

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E  
SANEAMENTO AMBIENTAL**

**LEONARDO RODOLFO PAUL**

**PROPOSIÇÃO DE MODELO PARA SIMULAÇÃO DE FLUXOS DE DETRITOS  
EM ESCALA DE BACIA**

**PORTO ALEGRE**

**2020**

LEONARDO RODOLFO PAUL

PROPOSIÇÃO DE MODELO PARA SIMULAÇÃO DE FLUXOS DE DETRITOS EM  
ESCALA DE BACIA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito à obtenção do grau de mestre.

Orientador: Gean Paulo Michel

PORTO ALEGRE

2020

LEONARDO RODOLFO PAUL  
PROPOSIÇÃO DE MODELO PARA SIMULAÇÃO DE FLUXOS DE DETRITOS EM  
ESCALA DE BACIA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito à obtenção do grau de mestre.

Aprovado em: Porto Alegre, \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_.

---

Prof. Dr. Gean Paulo Michel – UFRGS  
Orientador

---

Prof. Dr. Masato Kobiyama - UFRGS  
Examinador

---

Prof. Dr. Rodrigo Cauduro Dias de Paiva - UFRGS  
Examinador

---

Prof. Dr. Roberto Fabris Goerl - UFSC  
Examinador

### CIP - Catalogação na Publicação

Paul, Leonardo

Proposição de modelo para simulação de fluxos de detritos em escala de bacia / Leonardo Paul. -- 2020. 204 f.

Orientador: Gean Paulo Michel.

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, 2020.

1. Desastres naturais. 2. Fluxos de detritos. 3. Modelagem matemática. 4. Modelagem computacional. I. Michel, Gean Paulo, orient. II. Título.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho é resultado de uma jornada que, temporalmente curta, mas grandiosa em termos de crescimento pessoal. O caminho trilhado foi moldado por novos conhecimentos, novas amizades e novas experiências. Também não faltaram desafios, alguns que puderam ser superados, outros em que foi necessário aprender a conviver. Posso afirmar que tranquilamente que o mestrado foi uma experiência importante e pela qual sou grato.

Primeiramente, agradeço aos meus pais pelo apoio ao longo de toda a minha vida. Sei que se esforçaram muito por mim e pelas pessoas que amam. Devo a eles a oportunidade de cursar ensino superior, seguir para o mestrado e de realizar este trabalho. Vocês são o meu maior exemplo. Amo vocês!

A decisão de partir pro mestrado não foi aleatória, mas sim estimulada por meu orientador e, sobretudo, amigo, Gean Paulo Michel, a quem devo esse trabalho. Caso não tivesse lecionado na UDESC – mesmo que por um curto período de tempo – provavelmente não teria passado esses dois anos em uma pós-graduação. Por isso e também por me receber muito bem em Porto Alegre, sou muito grato a ele.

Também sou grato a diversas pessoas que me acompanharam de perto, afinal, tiveram a (in)feliz oportunidade de morar comigo: Heron Schwarz, Guilherme Censi, Bruno H. Abatti e Cayo L. Bezerra. Vocês me ajudaram a me sentir em casa.

Agradeço ao pessoal da Sala da Hidrologia, Franciele Zanandrea, Regina Cadore, Daniela S. Adamatti, Clarissa G. Salvador, Gabriel Cardozo, Jéssica Ribeiro, Adriana Moreira, Benício Montes e Juan Ticona, pelo companheirismo (e também pelos cafezinhos, conversas e momentos de descontração).

Também sou grato pelo companheirismo e receptibilidade do pessoal do GPDEN, em especial a Mel Guirro, Karla Campagnolo, Marina Fagundes e Danrlei de Menezes. Também tenho muito a agradecer à Aline Zanini e à Anne Biehl pela ajuda com algumas das simulações.

Agradeço também o apoio de grandes amizades, Rômulo W. Morastoni, Lucas de Souza, Augusto Schlegel, Júlio Gums e Matheus Schroeder. À Larissa de Castro Ribeiro, que me acompanhou de perto durante o último ano, minha imensa gratidão. Obrigado pelo apoio nas horas difíceis e pelo companheirismo nos momentos tranquilos.

A todos os outros que estiveram envolvidos nessa experiência, que contribuíram para torná-la especial e engrandecedora, muito obrigado!

*“The basis of growth of modern invention is science, and science is almost wholly the outgrowth of pleasurable intellectual curiosity”*

Alfred North Whitehead

## RESUMO

Os fluxos de detritos são movimentos de massa com altas velocidades e longo alcance, com grande capacidade de provocar perdas humanas e danos sociais, econômicos e ambientais. Portanto, o entendimento do fenômeno e a capacidade de prever áreas que possam ser afetadas é de extrema importância para prevenir desastres causados por fluxos de detritos. Uma das formas de prevenção se dá por meio da elaboração de mapas de perigo, os quais permitem delimitar regiões com potencial de ocorrência de um fluxo de detritos. Para tanto, podem ser utilizados modelos fisicamente embasados, que procuram representar os processos e dinâmicas desse fenômeno. Nesse contexto, o trabalho propõe um modelo para a simulação de fluxo de detritos, que requer poucos parâmetros de entrada e é capaz de oferecer informações sobre alcance, velocidades e alturas das deposições. O modelo consiste no acoplamento de um modelo de balanço de massa com um método de direcionamento de fluxo. O modelo foi aplicado na bacia do rio Mascarada (RS), em uma área de 3 km<sup>2</sup>, para simular um fluxo de detritos ocorrido em janeiro de 2017. Foram testados os efeitos de diferentes algoritmos de direcionamento (D8, D-inf e MFD de Freeman) e abordagens reológicas (fluido newtoniano, dilatante, Herschel-Bulkley e plástico de Bingham). O MFD mostrou-se mais adequado para representar a mancha de um fluxo de detritos, combinada a reologia dilatante e viscosidade cinemática de 0,5 m<sup>2</sup>/s, com taxa de acertos de 83% e escore de Heidke de 0,65. A combinação otimizada foi aplicada a outros 3 fluxos de detritos, também situados na bacia do rio Mascarada. Dois deles foram simulados conjuntamente, resultando em manchas simuladas com 84% de acerto e  $H_s$  de 0,52, apresentando aplicabilidade em escala de bacia. O terceiro caso, de um fluxo de detritos que atinge o canal, tiveram 52% de acerto e  $H_s$  de 0,22. No geral, o modelo conseguiu representar adequadamente os alcances dos fluxos de detritos, formando manchas semelhantes às observadas e utilizando apenas dois parâmetros físicos de calibração (viscosidade e expoente da equação reológica do fluido dilatante). Portanto, o modelo proposto configura-se em uma ferramenta de fácil aplicação para a avaliação de suscetibilidade a fluxo de detritos em áreas com baixa disponibilidade de dados.

**Palavras-chave:** Fluxo de detritos. Direção de fluxo. Modelagem.

## ABSTRACT

Debris flows are mass movements with high reach and velocity, having the capacity to cause social, economic and environmental loss. Thus, it is important to understand this phenomenon and to predict affected areas in order to prevent disasters driven by debris flows. The prevention can be achieved through the development of debris flow hazard maps, which can indicate areas prone to such events. To this end, physically based models that seek to represent debris flow processes and dynamics can be utilized. In this regard, this study proposes a debris flow simulation model that requires few inputs and is capable to provide information about reach, velocity and depth of deposition. The model is a coupling of a mass balance equation and a flow direction algorithm. The study was undertaken at rio Mascarada (RS) basin, in a 3 km<sup>2</sup> area, simulating a debris flows event occurred in January, 2017. The behavior of different flow direction algorithms (D8, D-inf, Freeman's MFD) and different rheological approaches (Newtonian, dilatant, Bingham plastic and Herschel-Bulkley) was tested. MFD, associated to a dilatant rheology and kinematic viscosity of 0.5 m<sup>2</sup>/s, was the most adequate flow direction algorithm to represent debris flow. This simulation had a success rate of 83% and Heidke's score of 0.65. The optimized combination was tested in 3 other debris flows, also situated in Mascarada basin. Two of them were simulated together, resulting in a success rate of 84% and  $H_s$  of 0.52, presenting the model's applicability at basin level. The third debris flow, which reached the channel, resulted in success rate of 52% and  $H_s$  of 0,22. In general, the model properly represented debris flow reach, resulting in simulated areas similar to most of the studied cases with just two calibratable physical parameters (viscosity and dilatant rheological exponent). Therefore, the proposed model sets up as an easy-to-use tool to assess debris flow susceptibility in areas with low data availability.

**Key-words:** Debris flow. Flow direction. Modelling.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Classes de movimentos de massa. (Adaptado de USGS, 2004) .....	24
Figura 2. Mapa com distribuição de eventos de fluxos de detritos registrados no Brasil .	28
Figura 3. Classificação de movimentos de massa e fluxos.....	30
Figura 4. Diagrama de classificação para fluxo de detritos dinâmicos .....	32
Figura 5. Morfologia de um fluxo de detritos .....	33
Figura 6. Encosta hipotética com lençol freático .....	35
Figura 7. Mudança da densidade aparente conforme a tensão cisalhante .....	36
Figura 8. Esquema de conversão da temperatura granular .....	38
Figura 9. Esquema da segregação de materiais em um fluxo de detritos .....	39
Figura 10. Tipos de modelo de fluxo de detritos .....	41
Figura 11. Taxa de deformação de fluidos de acordo com a tensão cisalhante .....	43
Figura 12. Esquema de funcionamento do D8 de O'Callaghan e Mark.....	52
Figura 13. Diagrama de funcionamento do algoritmo D-inf.....	53
Figura 14. Representação do funcionamento do algoritmo D8-LTD.....	54
Figura 15. Esquema de direcionamento do DEMON.....	55
Figura 16. Fluxograma da metodologia do trabalho.....	63
Figura 17. Esquema de encosta com propagação de fluxo de detritos .....	64
Figura 18. Esquema da conservação de massa em um <i>grid</i> .....	66
Figura 19. Fluxograma de funcionamento do modelo.....	69
Figura 20. Perfil de velocidades para um plástico de Bingham .....	72
Figura 21. Matriz de confusão base para os índices .....	75
Figura 22. Exemplo genérico de uma curva ROC com AUC destacada em amarelo .....	78
Figura 23. Localização da bacia do rio Mascarada e mapa altimétrico.....	80
Figura 24. Mapa de declividades da bacia do rio Mascarada.....	81
Figura 25. Evidência de presença de rochas e vegetação na composição do material.....	82
Figura 26. Áreas de iniciação e de transporte para quatro resoluções diferentes .....	84
Figura 27. Cicatrizes observadas dos fluxos de detritos F1, F2 e F3 .....	85
Figura 28. Cicatrizes observadas dos fluxos de detritos F1 e F4 .....	86
Figura 29. Mancha do fluxo de detritos: D8, resolução de 1m, viscosidade de 0,5 m <sup>2</sup> /s.	89
Figura 30. Mancha do fluxo de detritos: D8, resolução de 5m, viscosidade de 0,8 m <sup>2</sup> /s..	92
Figura 31. Mancha do fluxo de detritos: D8, resolução de 10m, viscosidade de 0,8 m <sup>2</sup> /s	94

Figura 32. Gráfico comparativo dos valores de $H_s$ para diferentes resoluções de MDT...	95
Figura 33. Curvas ROC adaptadas para D8 em diferentes resoluções .....	96
Figura 34. Mancha do fluxo de detritos: D-inf, resolução de 1 m, $\nu$ de 1 m <sup>2</sup> /s.....	98
Figura 35. Mancha do fluxo de detritos: D-inf, resolução de 2,5 m, $\nu$ de 0,5 m <sup>2</sup> /s.....	100
Figura 36. Mancha do fluxo de detritos: D-inf, resolução de 5m, $\nu$ de 0,5 m <sup>2</sup> /s.....	102
Figura 37. Mancha do fluxo: D-inf, viscosidades de 0,05 m <sup>2</sup> /s com resolução de 10 m.	103
Figura 38. Gráfico comparativo dos $H_s$ para D-inf com diferentes resoluções.....	104
Figura 39. Curvas ROC adaptadas para D-inf com diferentes resoluções .....	105
Figura 40. Mancha do fluxo de detritos: MFD, resolução de 1m, $\nu$ de 0,8 m <sup>2</sup> /s.....	107
Figura 41. Mancha do fluxo de detritos: MFD, resolução de 1m, $\nu$ de 0,5 m <sup>2</sup> /s.....	108
Figura 42. Mancha do fluxo de detritos: MFD, resolução de 2,5m, $\nu$ de 0,05 m <sup>2</sup> /s.....	110
Figura 43. Gráfico comparativo de $H_s$ para diferentes resoluções com MFD.....	111
Figura 44. Curvas ROC adaptadas para MFD com diferentes resoluções .....	112
Figura 45. Gráfico comparativo do $H_s$ para os algoritmos de direcionamento .....	113
Figura 46. Mancha do fluxo de detritos: dilatante, $n$ 1,2, viscosidade de 0,5 m <sup>2</sup> /s .....	115
Figura 47. Evolução das velocidades do fluxo de detritos para $n$ de 1,2.....	116
Figura 48. Velocidades do fluxo aos 90 s do escoamento para diferentes valores de $n$ ..	117
Figura 49. Gráfico comparativo de $H_s$ para fluidos dilatantes com diferentes $n$ .....	118
Figura 50. Curvas ROC adaptadas para fluido dilatante com diferentes $n$ .....	119
Figura 51. Gráfico de $H_s$ para plásticos de Bingham com diferentes alturas de <i>plug</i> .....	120
Figura 52. Curvas ROC adaptadas para Bingham com diferentes alturas de <i>plug</i> .....	121
Figura 53. Gráfico comparativo dos índices de desempenho para $m$ de 0,6 .....	122
Figura 54. Gráfico comparativo dos índices de desempenho para $m$ de 0,8 .....	123
Figura 55. Gráfico comparativo dos índices de desempenho para $m$ de 1,2 .....	124
Figura 56. Gráfico comparativo dos índices de desempenho para $m$ de 1,4 .....	124
Figura 57. ROCs adaptadas para Herschel-Bulkley com <i>plug</i> de 10 cm .....	125
Figura 58. Mancha simulada dos fluxos de detritos F2 e F3 .....	129
Figura 59. Mancha simulada do fluxo de detritos F4 .....	130
Figura 60. Mancha do fluxo de detritos: dilatante, $n$ 1,4, viscosidade de 0,5 m <sup>2</sup> /s .....	165
Figura 61. Mancha do fluxo de detritos: dilatante, $n$ 1,6, viscosidade de 0,5 m <sup>2</sup> /s .....	166
Figura 62. Mancha do fluxo de detritos: dilatante, $n$ 1,8, viscosidade de 1,0 m <sup>2</sup> /s .....	167
Figura 63. Mancha do fluxo de detritos: dilatante, $n$ 2 viscosidade de 0,5 m <sup>2</sup> /s .....	168
Figura 64. Mancha do fluxo de detritos: Bingham, <i>plug</i> de 2,5 cm, $\nu$ de 0,5 m <sup>2</sup> /s.....	169
Figura 65. Mancha do fluxo de detritos: Bingham, <i>plug</i> de 5 cm, $\nu$ de 0,5 m <sup>2</sup> /s .....	170

Figura 66. Mancha do fluxo de detritos: Bingham, <i>plug</i> de 7,5 cm, $v$ de 0,5 m <sup>2</sup> /s.....	171
Figura 67. Mancha do fluxo de detritos: Bingham, <i>plug</i> de 10 cm, $v$ de 0,5 m <sup>2</sup> /s.....	172
Figura 68. Mancha do fluxo de detritos: HB, $v$ 0,5 m <sup>2</sup> /s, $m$ de 0,6 e <i>plug</i> de 10 cm .....	173
Figura 69. Mancha do fluxo de detritos: HB, $v$ de 0,5, $m$ de 0,8 e <i>plug</i> de 5 cm.....	174
Figura 70. Curvas ROC adaptadas – D8 para diferentes resoluções .....	175
Figura 71. Curvas ROC adaptadas – D-inf para diferentes resoluções .....	176
Figura 72. Curvas ROC adaptadas – MFD para diferentes resoluções .....	177
Figura 73. Curvas ROC adaptadas – Dilatante com diferentes valores de $n$ .....	178
Figura 74. Curvas ROC adaptadas – Bingham com diferentes alturas de <i>plug</i> .....	179
Figura 75. Curvas ROC adaptadas – Herschel-Bulkley com $m$ de 0,6.....	180
Figura 76. Curvas ROC adaptadas – Herschel-Bulkley com $m$ de 0,8.....	181
Figura 77. Curvas ROC adaptadas – Herschel-Bulkley com $m$ de 1,2.....	182
Figura 78. Curvas ROC adaptadas – Herschel-Bulkley com $m$ de 1,4.....	183

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Classificação de desastres (Adaptado de UNISDR, 2014).....	22
Tabela 2. Ocorrência de desastres no Brasil entre 1959 e 2019 segundo EM-DAT .....	23
Tabela 3. Diferentes definições de fluxos de detritos.....	26
Tabela 4. Informações de entrada de acordo com o método de direção de fluxo .....	71
Tabela 5. Elementos da matriz de confusão: D8 para 1 m de resolução .....	87
Tabela 6. Índices para as simulações com D8 para 1 m de resolução .....	90
Tabela 7. Índices para as simulações com D8 para 2,5 m de resolução .....	90
Tabela 8. Índices para as simulações com D8 para 5 m de resolução .....	91
Tabela 9. Índices para as simulações com D8 para 10 m de resolução .....	93
Tabela 10. Índices para as simulações com D-inf para 1 m de resolução .....	97
Tabela 11. Índices para as simulações com D-inf para 2,5 m de resolução .....	99
Tabela 12. Índices para as simulações com D-inf para 5 m de resolução .....	101
Tabela 13. Índices para D-inf para 10 m de resolução e critério de parada de 0,01 m ...	101
Tabela 14. Índices para MFD com resolução de 1 m e critério de parada de 0,01 m ....	106
Tabela 15. Índices para MFD com resolução de 2,5 m e critério de parada de 0,005 m	109
Tabela 16. Índices para MFD com resolução de 5 m e critério de parada de 0,01 m ....	109
Tabela 17. Índices para MFD com resolução de 10 m e critério de parada de 0,01 m ...	111
Tabela 18. Índices para as simulações com coeficiente $n$ de 1,2.....	114
Tabela 19. Melhores desempenhos de acordo com o objeto de teste .....	127
Tabela 20. Índices de desempenho para a simulação dos fluxos de detritos F2 e F3 .....	128
Tabela 21. Índices de desempenho para a simulação do fluxo de detritos F4.....	129
Tabela 22. Elementos da matriz de confusão: D8 para 2,5 m de resolução .....	149
Tabela 23. Elementos da matriz de confusão: D8 para 5 m de resolução .....	149
Tabela 24. Elementos da matriz de confusão: D8 para 10 m de resolução .....	149
Tabela 25. Elementos da matriz de confusão: D-inf para 1 m de resolução .....	150
Tabela 26. Elementos da matriz de confusão: D-inf para 2,5 m de resolução .....	150
Tabela 27. Elementos da matriz de confusão: D-inf para 5 m de resolução .....	150
Tabela 28. Elementos da matriz de confusão: D-inf para 10 m de res. e CP de 0,01 m .	151
Tabela 29. Elementos da matriz de confusão: MFD para res. de 1 m e CP de 0,01 m ...	151
Tabela 30. Elementos da matriz de confusão: MFD com res. de 2,5 m e CP de 0,005 m...	151
Tabela 31. Elementos da matriz de confusão: MFD com res. de 5 m e CP de 0,01 m ...	151

Tabela 32. Elementos da matriz de confusão: MFD com res. de 10 m e CP de 0,01 m.....	152
Tabela 33. Elementos da matriz de confusão: fluido dilatante com coeficiente $n$ de 1,2	152
Tabela 34. Elementos da matriz de confusão: fluido dilatante com coeficiente $n$ de 1,4	152
Tabela 35. Elementos da matriz de confusão: fluido dilatante com coeficiente $n$ de 1,6	152
Tabela 36. Elementos da matriz de confusão: fluido dilatante com coeficiente $n$ de 1,8	152
Tabela 37. Elementos da matriz de confusão: fluido dilatante com coeficiente $n$ de 2,0	153
Tabela 38. Elementos da matriz de confusão para as simulações com <i>plug</i> de 2,5 cm ..	153
Tabela 39. Elementos da matriz de confusão para as simulações com <i>plug</i> de 5 cm .....	153
Tabela 40. Elementos da matriz de confusão para as simulações com <i>plug</i> de 7,5 cm ..	154
Tabela 41. Elementos da matriz de confusão para as simulações com <i>plug</i> de 10,0 cm	154
Tabela 42. Elementos da matriz de confusão: <i>plug</i> de 2,5 cm e $m$ de 0,6.....	154
Tabela 43. Elementos da matriz de confusão: <i>plug</i> de 5 cm e $m$ de 0,6.....	154
Tabela 44. Elementos da matriz de confusão: <i>plug</i> de 7,5 cm e $m$ de 0,6.....	155
Tabela 45. Elementos da matriz de confusão: <i>plug</i> de 10 cm e $m$ de 0,6.....	155
Tabela 46. Elementos da matriz de confusão: <i>plug</i> de 2,5 cm e $m$ de 0,8.....	155
Tabela 47. Elementos da matriz de confusão: <i>plug</i> de 5 cm e $m$ de 0,8.....	155
Tabela 48. Elementos da matriz de confusão: <i>plug</i> de 7,5 cm e $m$ de 0,8.....	156
Tabela 49. Elementos da matriz de confusão: <i>plug</i> de 10 cm e $m$ de 0,8.....	156
Tabela 50. Elementos da matriz de confusão: <i>plug</i> de 2,5 cm e $m$ de 1,2.....	156
Tabela 51. Elementos da matriz de confusão: <i>plug</i> de 5 cm e $m$ de 1,2.....	156
Tabela 52. Elementos da matriz de confusão: <i>plug</i> de 7,5 cm e $m$ de 1,2.....	157
Tabela 53. Elementos da matriz de confusão: <i>plug</i> de 10 cm e $m$ de 1,2.....	157
Tabela 54. Elementos da matriz de confusão: <i>plug</i> de 2,5 cm e $m$ de 1,4.....	157
Tabela 55. Elementos da matriz de confusão: <i>plug</i> de 5 cm e $m$ de 1,4.....	157
Tabela 56. Elementos da matriz de confusão: <i>plug</i> de 7,5 cm e $m$ de 1,4.....	158
Tabela 57. Elementos da matriz de confusão: <i>plug</i> de 10 cm e $m$ de 1,4.....	158
Tabela 58. Índices para as simulações com coeficiente $n$ de 1,4.....	159
Tabela 59. Índices para as simulações com coeficiente $n$ de 1,6.....	159
Tabela 60. Índices para as simulações com coeficiente $n$ de 1,8.....	159
Tabela 61. Índices para as simulações com coeficiente $n$ de 2,0.....	159
Tabela 62. Índices para as simulações com <i>plug</i> de 2,5 cm .....	160
Tabela 63. Índices para as simulações com <i>plug</i> de 5 cm .....	160
Tabela 64. Índices para as simulações com <i>plug</i> de 7,5 cm .....	160
Tabela 65. Índices para as simulações com <i>plug</i> de 10,0 cm .....	160

Tabela 66. Índices para as simulações com <i>plug</i> de 2,5 cm e <i>m</i> de 0,6.....	161
Tabela 67. Índices para as simulações com <i>plug</i> de 5 cm e <i>m</i> de 0,6.....	161
Tabela 68. Índices para as simulações com <i>plug</i> de 7,5 cm e <i>m</i> de 0,6.....	161
Tabela 69. Índices para as simulações com <i>plug</i> de 10 cm e <i>m</i> de 0,6.....	161
Tabela 70. Índices para as simulações com <i>plug</i> de 2,5 cm e <i>m</i> de 0,8.....	162
Tabela 71. Índices para as simulações com <i>plug</i> de 5 cm e <i>m</i> de 0,8.....	162
Tabela 72. Índices para as simulações com <i>plug</i> de 7,5 cm e <i>m</i> de 0,8.....	162
Tabela 73. Índices para as simulações com <i>plug</i> de 10 cm e <i>m</i> de 0,8.....	162
Tabela 74. Índices para as simulações com <i>plug</i> de 2,5 cm e <i>m</i> de 1,2.....	163
Tabela 75. Índices para as simulações com <i>plug</i> de 5 cm e <i>m</i> de 1,2.....	163
Tabela 76. Índices para as simulações com <i>plug</i> de 7,5 cm e <i>m</i> de 1,2.....	163
Tabela 77. Índices para as simulações com <i>plug</i> de 10 cm e <i>m</i> de 1,2.....	163
Tabela 78. Índices para as simulações com <i>plug</i> de 2,5 cm e <i>m</i> de 1,4.....	164
Tabela 79. Índices para as simulações com <i>plug</i> de 5 cm e <i>m</i> de 1,4.....	164
Tabela 80. Índices para as simulações com <i>plug</i> de 7,5 cm e <i>m</i> de 1,4.....	164
Tabela 81. Índices para as simulações com <i>plug</i> de 10 cm e <i>m</i> de 1,4.....	164
Tabela 82. Ocorrências de fluxo de detritos no Brasil .....	203

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AUC	<i>Area Under Curve</i>
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
DEMON	<i>Digital Elevation Model Network</i>
Embrapa	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EM-DAT	<i>Emergency Disasters Database</i>
FMFD	<i>Freeman's Multiple Flow Direction</i>
FDR	<i>False Discovery Rate</i>
FNR	<i>False Negative Rate</i>
FPR	<i>False Positive Rate</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
HB	Herschel-Bulkley
IRDR	<i>Integrated Research on Disaster Risk</i>
MDT	Modelo Digital de Terreno
MFD	<i>Multiple Flow Direction</i>
MFD-md	<i>Multiple Flow Direction – maximum downslope</i>
PUB	<i>Prediction in Ungauged Basins</i>
QMFD	<i>Quinn's Multiple Flow Direction</i>
Rho8	<i>Randomic Eight-Node Algorithm</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
ROC	<i>Receiver Operating Characteristics</i>
SEMA	Secretaria do Ambiente e Desenvolvimento Sustentável
SFD	<i>Single Flow Direction</i>
TPR	<i>True Positive Rate</i>
TNR	<i>True Negative Rate</i>
UNISDR	<i>United Nations International Strategy for Disaster Reduction</i>
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
WSGS	<i>Wyoming State Geological Survey</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_{cicatriz}$	Área da cicatriz do fluxo de detritos	$m^2$
$A_{in}$	Área de iniciação do fluxo de detritos	$m^2$
$Ba$	Número de Bagnold	-
$c$	Tensões coesivas (solo e vegetação)	$N/m^2$
$C$	Concentração volumétrica de sólidos	-
$C_{esp}$	Coefficiente de espalhamento	-
$C_{max}$	Concentração volumétrica de sólidos máxima	-
$d$	Diâmetro do grão	$m$
$F$	Proporção de partição do fluxo	-
$G$	Aceleração da gravidade	$m/s^2$
$H$	Altura do escoamento	$m$
$h'$	Carga hidráulica	$m$
$h_{in}$	Altura inicial do escoamento	$m$
$h_{RMS}$	RMS da altura das células entre tempo $t$ e $t-1$	$m$
$HS$	Escore de Heidke ( <i>Heidke's score</i> ) ou Cohen's Kappa	-
$I_A$	Índice de acurácia	-
$I_C$	Índice de FDR	-
$I_D$	Índice de desempenho	-
$I_E$	Índice de erro	-
$I_O$	Índice de omissão	-
$k$	Fator randômico do algoritmo Rho8	
$K$	Condutividade hidráulica do solo	$cm/dia$
$Kd$	Consistência do fluido dilatante	-
$K_{HB}$	Consistência do fluido de Herschel-Bulkley	-
$L_i$	Largura do escoamento na célula $i$	$m$
$m$	Índice de comportamento do fluido de Herschel-Bulkley	-
$n$	Índice de comportamento do fluido dilatante	-
$p$	Porosidade	$N/m^2$
$P_d$	Pressão dinâmica	$N/m^2$
$q_{in}$	Fluxo de entrada	$m^2/s$
$q_{out}$	Fluxo de saída	$m^2/s$



$Re_y$	Número de Reynolds	-
$R_H$	Raio hidráulico	m
$u_m$	Velocidade média do escoamento	m/s
$\alpha$	Ângulo de direcionamento de fluxo	°
$\beta_i$	Declividade da célula $i$	°
$\theta$	Ângulo da encosta	°
$\lambda$	Concentração linear	-
$\rho$	Massa específica do fluido	kg/m <sup>3</sup>
$\varphi$	Ângulo de repouso do solo	°
$\varphi_i$	Coefficiente de aspecto	-
$\dot{\gamma}$	Taxa de deformação do meio	N/m <sup>2</sup>
$\gamma_w$	Peso específico da água	N/m <sup>3</sup>
$\sigma$	Tensão normal	N/m <sup>2</sup>
$\sigma'$	Tensão normal efetiva	N/m <sup>2</sup>
$\eta$	Coefficiente operacional dos algoritmos MFD	-
$\delta$	Desvio transversal	m
$\tau$	Tensão cisalhante	N/m <sup>2</sup>
$\tau_c$	Tensões cisalhantes de colisão intergranular	N/m <sup>2</sup>
$\tau_t$	Tensões cisalhantes de correntes turbulentas	N/m <sup>2</sup>
$\tau_y$	Tensão cisalhante crítica	N/m <sup>2</sup>
$\tau_\mu$	Tensões cisalhantes viscosas	N/m <sup>2</sup>
$\mu$	Viscosidade dinâmica do fluido	N/m <sup>2</sup>
$\mu_{f'}$	Viscosidade efetiva para fluido macroviscoso	Ns/m <sup>2</sup>
$\mu_b$	Viscosidade para plástico de Bingham	Ns/m <sup>2</sup>
$\mu_l$	Índice de consistência para fluido viscoplástico-colisional	-
$\nu$	Viscosidade cinemática	m <sup>2</sup> /s
$\nu_B$	Viscosidade cinemática para plástico de Bingham	m <sup>2</sup> /s
$\nu_D$	Viscosidade cinemática para fluido dilatante	m <sup>2</sup> /s
$\nu_{HB}$	Viscosidade cinemática para fluido de Herschel-Bulkley	m <sup>2</sup> /s

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	9
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....	15
LISTA DE SÍMBOLOS .....	16
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>20</b>
2.1 OBJETIVO GERAL .....	20
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	20
<b>3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....</b>	<b>21</b>
<b>4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>22</b>
4.1 DESASTRES NATURAIS .....	22
4.2 MOVIMENTOS DE MASSA .....	24
4.3 FLUXO DE DETRITOS .....	25
<b>4.3.1 Ocorrências de fluxos de detritos no Brasil.....</b>	<b>27</b>
<b>4.3.2 Tipos de fluxos (<i>flows</i>) .....</b>	<b>28</b>
<b>4.3.3 Fases de um fluxo de detritos .....</b>	<b>33</b>
4.3.3.1 <i>Iniciação de um fluxo de detritos .....</i>	<i>34</i>
4.3.3.2 <i>Desenvolvimento de um fluxo de detritos.....</i>	<i>38</i>
4.4 MODELAGEM DE FLUXO DE DETRITOS .....	41
<b>4.4.1 Abordagens reológicas para a mecânica de escoamento.....</b>	<b>43</b>
4.4.1.1 <i>Fluido Newtoniano/macro-viscoso .....</i>	<i>44</i>
4.4.1.2 <i>Plástico de Bingham e fluido visco-plástico .....</i>	<i>45</i>
4.4.1.3 <i>Fluido de Herschel-Bulkley.....</i>	<i>46</i>
4.4.1.4 <i>Fluido dilatante .....</i>	<i>47</i>
4.4.1.5 <i>Modelo bifásico .....</i>	<i>47</i>
<b>4.4.2 Simulação numérica de fluxo de detritos .....</b>	<b>48</b>
4.4.2.1 <i>Algoritmos de direcionamento de fluxo .....</i>	<i>50</i>
4.4.2.2 <i>Condicionamento do MDT.....</i>	<i>57</i>
<b>4.4.3 Fontes de incertezas na simulação de fluxos de detritos .....</b>	<b>58</b>
<b>4.4.4 Contexto modelagem na gestão de risco para fluxo de detritos .....</b>	<b>60</b>
<b>5 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>62</b>
5.1 METODOLOGIA .....	62
<b>5.1.1 Etapa 1 – desenvolvimento e implementação do modelo simplificado .</b>	<b>62</b>

5.1.1.1	<i>Modelo de escoamento para fluido newtoniano</i>	62
5.1.1.2	<i>Transferência do escoamento no grid</i>	66
5.1.1.3	<i>Critério de parada</i>	67
5.1.1.4	<i>Coeficiente de espalhamento</i>	68
5.1.1.5	<i>Funcionamento geral do modelo</i>	68
<b>5.1.2</b>	<b>Etapa 2 – simulações com diferentes algoritmos de direcionamento</b>	<b>70</b>
<b>5.1.3</b>	<b>Etapa 3 – simulações com solução para diferentes reologias</b>	<b>71</b>
5.1.3.1	<i>Plástico de Bingham</i>	72
5.1.3.2	<i>Fluido de Herschel-Bulkley</i>	73
5.1.3.3	<i>Fluido dilatante</i>	74
<b>5.1.4</b>	<b>Avaliação de desempenho</b>	<b>74</b>
5.1.4.1	<i>Matriz de confusão e índices para avaliação da simulação</i>	75
5.1.4.2	<i>Adaptação das curvas ROC</i>	77
5.2	<b>ÁREA DE ESTUDO</b>	78
<b>5.2.1</b>	<b>Bacia Hidrográfica do Rio Mascarada</b>	<b>78</b>
5.2.1.1	<i>Fluxos de detritos e dados utilizados</i>	83
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>87</b>
6.1	<b>REOLOGIA NEWTONIANA</b>	87
6.1.1	<b>Deterministic 8</b>	87
6.1.2	<b>D-infinity</b>	96
6.1.3	<b>Multiple Flow Direction</b>	105
6.1.4	<b>Comparação entre os métodos de direcionamento</b>	112
6.2	<b>REOLOGIA DILATANTE</b>	114
6.3	<b>PLÁSTICO DE BINGHAM</b>	119
6.4	<b>REOLOGIA DE HERSHEY-BULKLEY</b>	121
6.4.1	<b>Fluido pseudoplástico</b>	121
6.4.2	<b>Fluido dilatante</b>	123
6.5	<b>COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES REOLOGIAS</b>	125
6.6	<b>ESTABELECIMENTO DAS CARACTERÍSTICAS MAIS ADEQUADAS PARA A SIMULAÇÃO</b>	127
6.6.1	<b>Avaliação da melhor combinação de parâmetros</b>	128
6.6.2	<b>Limitações do modelo</b>	132
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>134</b>
7.1	<b>RECOMENDAÇÕES</b>	135

<b>REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO .....</b>	<b>137</b>
<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>149</b>
<b>APÊNDICE B.....</b>	<b>159</b>
<b>APÊNDICE C .....</b>	<b>165</b>
<b>APÊNDICE D .....</b>	<b>175</b>
<b>APÊNDICE E.....</b>	<b>184</b>
<b>APÊNDICE F.....</b>	<b>203</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os fluxos de detritos são fenômenos naturais que atuam na evolução da paisagem, e que, por se moverem em altas velocidades, deslocarem grandes volumes de material e possuírem longo alcance, têm grande capacidade de destruição (HUNGR et al, 2014; TAKAHASHI, 2014). São movimentos regidos pela gravidade e podem ser constituídos por água, ar, sedimentos, detritos e material lenhoso (GREGORETTI et al., 2016). Quando atingem uma comunidade podem provocar um desastre.

Com a expansão urbana acelerada das últimas décadas, diversas pessoas passaram a estar suscetíveis a esse tipo de fenômeno, uma vez que começaram a ocupar áreas próximas às encostas. De acordo com Petley (2012), houve um aumento no registro de movimentos de massa com fatalidades ao longo dos anos, sendo mais frequentes em áreas que possuem a combinação de relevo acidentado com eventos de precipitação extrema e alta densidade populacional. Além disso, no Brasil, Kobiyama e Michel (2015) apontam um aumento na ocorrência de fluxo de detritos que causam vítimas fatais a partir da década de 90. Dessa maneira, é necessária a tomada de ações com caráter preventivo, a fim de gerir os riscos e evitar essas adversidades.

A gestão de risco é realizada por meio de medidas estruturais e não-estruturais (BAAS et al., 2008). As estruturais, como o nome indica, aplicam intervenções físicas para conter possíveis danos derivados de um fenômeno natural, sendo uma alternativa cara e nem sempre viável. Além do mais, por serem medidas físicas, podem causar falsa sensação de segurança, estimulando a construção em áreas que podem ser de risco. As medidas não-estruturais são compostas por ações como o mapeamento de perigo, que consiste na identificação da propensão de uma área à ocorrência de um determinado fenômeno, permitindo criar políticas públicas para controle da expansão urbana (KOBİYAMA et al., 2006).

Nesse contexto, um dos métodos que permite o mapeamento do perigo é a aplicação de modelos computacionais que procuram representar o fenômeno. Contudo, diversos dos modelos disponíveis exigem informações de difícil obtenção para sua aplicação, como hidrograma do fluxo de detritos, concentração de sólidos e granulometria do material (*e.g.* NAKATANI et al., 2008; PIRULLI; SORBINO, 2008; PITMAN et al., 2003), tornando a análise pouco confiável em regiões com escassez de dados.

Em contrapartida, existem modelos que requerem poucas informações, os quais comumente são empíricos (*e.g.* PROCHASKA et al., 2008; HORTON et al., 2013), procurando prever áreas potencialmente suscetíveis ao fluxo de detritos por meio de equações e relações estatísticas. Nesses casos, os modelos foram desenvolvidos utilizando observações em regiões que podem possuir características muito diferentes da área em que está sendo aplicado, podendo gerar resultados pouco verossímeis. Além disso, tais modelos geralmente não geram informações relevantes para a gestão de risco de desastres, tais como velocidade do fluxo, tempo de propagação, altura do fluxo e de sua deposição.

No Brasil, diversos municípios possuem mapeamento de susceptibilidade a movimentos de massa, elaborado principalmente pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM), mas a metodologia utilizada dificilmente considera efeitos de fluxos de detritos (CPRM, 2014). Possivelmente essa abordagem é resultado da escassez de dados, o que dificulta a aplicação de metodologias muito complexas. Ao considerar que existem mais de 23 registros de ocorrências de fluxo de detritos entre 1920 e 2015, com cerca de mais 4 mil fatalidades associadas a esses casos (KOBAYAMA; MICHEL, 2015), fica evidente que os fluxos de detritos precisam ser melhor abordados dentro da gestão de risco, mesmo com a deficiência de informações. Nesse contexto, existe a necessidade de consolidação de modelos de simples aplicação, que exijam poucos parâmetros de entrada, mas que sejam confiáveis e tenham capacidade de prever locais suscetíveis aos efeitos dos fluxos de detritos.

Nesse sentido, Chiang et al. (2012) propuseram um modelo para avaliação de movimentos de massa em que o módulo que trata sobre fluxo de detritos requer poucas informações para ser executado. Basicamente, o modelo consiste na aplicação de equações simples de conservação de massa e de continuidade, baseadas em uma abordagem reológica de fluido Newtoniano, acoplado a um algoritmo de determinação de fluxo com base na topografia e um critério de parada para indicar cessação do movimento. A abordagem se mostrou promissora, fornecendo informações quanto a área afetada, profundidade de deposição e velocidades atingidas. Entretanto Gregoretti et al. (2016) ressaltaram que diversos aspectos ainda precisam ser refinados, principalmente o método de determinação de direção do escoamento. A partir disso, surgem duas questões: i) os algoritmos de direcionamento de fluxo podem influenciar significativamente no resultado das simulações de propagação de fluxos de detritos? ii) a abordagem reológica pode alterar significativamente a simulação?

Procurando responder esses questionamentos e propor e disponibilizar um modelo para propagação de fluxos de detritos, este trabalho avaliará a influência que os algoritmos de direcionamento podem ter nas simulações de fluxo de detritos, bem como a diferença de comportamento entre diferentes abordagens reológicas. Para tal, o modelo proposto está embasado no trabalho de Chiang et al. (2012) e foi aplicado à bacia do rio Mascarada, buscando representar fluxos de detritos já ocorridos. Atingido o objetivo, poderão ser determinados quais abordagens representam melhor o fluxo de detritos estudado. Ademais, possibilitará que modelos simplificados, que utilizem uma base semelhante ao proposto neste trabalho, possam tornar-se aplicáveis e mais verossímeis para estas regiões, além de trazer informações úteis para a compreensão do fenômeno. Assim, a avaliação do perigo voltado a fluxo de detritos em locais com escassez de dados poderá ser realizada com maior facilidade e confiabilidade.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é o desenvolvimento de um modelo fisicamente embasado simplificado para simulação da propagação de fluxo de detritos em escala de bacia com considerações referentes à influência de diferentes métodos de direcionamento de fluxo e diferentes abordagens reológicas.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar a influência da resolução do modelo digital de terreno nas simulações.
- Analisar a influência do critério de parada do fluxo (máxima diferença de altura entre passos de tempo) nos resultados das simulações.
- Determinar a melhor combinação dentre as abordagens testadas para representar fluxos de detritos ocorridos na bacia do rio Mascarada (RS).



### 3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho está estruturado da seguinte maneira:

i) **Fundamentação teórica:** apresenta conceitos relevantes e aprofunda a discussão sobre fluxo de detritos. São discutidos os conceitos de desastre natural, movimentos de massa e fluxos de detritos. Também são apresentadas diferentes classificações de fluxos, discussões a respeito da iniciação e desenvolvimento dos fluxos de detritos. São discutidos tópicos sobre modelagem de fluxo de detritos, apresentando alguns exemplos de modelos existentes. Em seguida, são apresentados alguns dos algoritmos de direcionamento de fluxo mais utilizados, procedimentos para condicionamento de modelos digitais de terreno e uma discussão sobre incertezas associadas à modelagem. Por fim, evidencia-se o papel da modelagem de fluxos de detritos dentro da gestão de risco.

ii) **Materiais e métodos:** nesta seção é apresentada a metodologia seguida neste estudo, comentando sobre a base de funcionamento do modelo proposto, indicando as equações reológicas e algoritmos de direcionamento de fluxo empregados. Em seguida são definidos os métodos de verificação de desempenho das simulações. Por fim, são apresentados os fluxos de detritos utilizados para realizar as simulações e uma descrição da bacia do rio Mascarada, a qual os fluxos de detritos estão inseridos.

iii) **Resultados:** apresenta os resultados das diferentes etapas metodológicas empregadas. São desenvolvidas discussões para dar apoio às inferências e conclusões. Esta seção está dividida conforme a abordagem reológica utilizada.

iv) **Conclusões:** emprega a discussão desenvolvida na seção de resultados para solucionar os objetivos estabelecidos, definindo qual a melhor combinação entre direcionamento de fluxo, abordagem reológica e valor viscosidade cinemática. Também é discutido o efeito da resolução do modelo digital de terreno sobre as simulações e é comentado o desempenho do modelo proposto.

v) **Apêndices:** estas seções contêm dados e figuras referentes às simulações, complementando as discussões. Também apresenta o algoritmo desenvolvido em Python 3.7.x.

## 4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 4.1 DESASTRES NATURAIS

Um desastre é um evento de ocorrência súbita que perturba o funcionamento normal de uma comunidade, provocando perdas humanas, socioeconômicas e ambientais que superem a capacidade de comunidade de resistir e se recuperar com seus próprios recursos (*United Nations International Strategy for Disaster Reduction - UNISDR, 2009*). Os desastres podem ser separados em dois principais grupos: naturais e tecnológicos.

Os desastres naturais são aqueles deflagrados por fenômenos naturais extremos, como terremotos, precipitações intensas e tempestades. São divididos em seis subgrupos de acordo com a natureza do fenômeno ocorrido (UNISDR, 2014), conforme apresentados na Tabela 1. Em contrapartida, os desastres tecnológicos têm origem em acidentes envolvendo atividades e/ou estruturas humanas, como por exemplo explosões, acidentes aéreos e colapsos de estruturas.

Tabela 1. Classificação de desastres (Adaptado de UNISDR, 2014)

<b>Grupo</b>	<b>Subgrupo</b>	<b>Principais tipos</b>
Natural	Geológico	Terremotos, vulcões, movimentos de massa seco
	Hidrológico	Inundações e movimentos de massa úmidos
	Meteorológico	Tempestades
	Climatológico	Secas, incêndios naturais, temperaturas extremas
	Biológico	Epidemia, infestação de insetos, acidente animal
	Extraterrestre	Impactos, clima espacial
Tecnológico	Acidente industrial	Explosão, incêndio, envenenamento, colapso, vazamento de produtos químicos e de gás
	Acidente de transporte	Aéreo, hidroviário, ferroviário e rodoviário
	Acidentes diversos	Incêndio, colapso, explosão

Kobiyama et al. (2006) apontam que com o passar dos anos houve um aumento na quantidade de desastres, que poderia ser explicado pelo aumento populacional associado a ocupações desordenadas. Nesse contexto, a pressão demográfica gerada, especialmente em países em desenvolvimento, força a população, principalmente a de baixa renda, a habitar regiões potencialmente perigosas.

Além do evento que desencadeia um desastre, existem condicionantes e agravantes associados às comunidades. Assim, existem duas componentes que constituem o risco de ocorrência de um desastre: a vulnerabilidade e o perigo (CASTRO, 1999; WISNER et al., 2003; KOBİYAMA, 2006). A vulnerabilidade refere-se a aspectos da comunidade: a

exposição ao fenômeno natural; o nível de preparo para alerta, resposta e reconstrução; a existência de um arcabouço sistêmico que promova a resiliência da comunidade, promovendo acesso à educação, saúde e políticas públicas igualitárias; a densidade demográfica, dentre outros fatores (BIRKMANN, 2007; ALMEIDA; WELLE; BIRKMANN, 2016). Em contrapartida, o perigo refere-se ao evento potencialmente causador de um desastre e pode ser mensurado por fatores como magnitude e frequência (WISNER et al., 2003).

A incidência de um determinado tipo de desastre será mais comum dependendo das características naturais da região, tais como clima e geomorfologia. No Brasil, os desastres hidrológicos são os mais recorrentes, conforme pode ser observado na Tabela 2, a qual apresenta as ocorrências de desastres no Brasil em 60 anos de acordo com registros na plataforma *Emergency Disasters Database – EM-DAT* (GUHA-SAPIR, et al. 2019). Dentre os desastres hidrológicos, as inundações foram mais recorrentes. Contudo, os movimentos de massa possuem uma média de mortos por evento maior, ficando atrás apenas das epidemias. Além do mais, conforme explicitado por Kobiyama et al. (2009), a recuperação dos estragos provenientes de desastres relacionados a sedimentos costuma ser mais difícil se comparado às inundações.

Apesar do número de ocorrências parecer muito menor que as inundações, é importante destacar que os movimentos de massa normalmente são deflagrados por precipitações intensas (SIDLE; SWANSTON, 1981; CROSTA; FRATTINI, 2003), e, por conta disso, muitas vezes ocorrem concomitantemente às inundações. Por consequência o número de registros oficiais de ocorrência de movimentos de massa em situações de desastre é possivelmente menor que o real. Além disso, movimentos de massa tais como fluxos de detritos são comumente confundidos com inundações bruscas.

Tabela 2. Ocorrência de desastres no Brasil entre 1959 e 2019 segundo EM-DAT

<b>Classificação</b>	<b>Tipo</b>	<b>Eventos contabilizados</b>	<b>Total de mortes</b>	<b>MME *</b>
Biológico	Infestação de insetos	1	0	-
	Epidemia	17	2632	146,2
	Seca	18	20	1,1
Climatológico	Temperatura extrema	8	355	44,4
	Incêndio natural	3	1	0,3
Geofísico	Terremoto	2	2	1,0
Hidrológico	Movimento de massa úmido	21	1679	73
	Inundação	122	7479	56,2
Meteorológico	Tempestade	16	254	14,1

\*média de mortes por evento

## 4.2 MOVIMENTOS DE MASSA

Dentre os fenômenos naturais que podem incorrer em desastre estão os movimentos de massa. Os movimentos de massa são processos naturais de transformação da paisagem, na qual uma porção de solo e/ou rocha desloca-se ao longo de uma encosta regida pela força da gravidade (MARGOTTINI; CANUTI; SASSA, 2013). Podem ocorrer de formas diferentes conforme o mecanismo de deflagração, as condicionantes envolvidas e as características do material.

Internacionalmente é utilizada a classificação proposta por Cruden e Varnes (1996), que separa os movimentos de massa em seis grupos: quedas, tombamentos, rastejo, escorregamentos, fluxos e movimentos de massa complexos. Para este trabalho foi adotada a classificação de Augusto Filho (1992), que agrupa os diversos tipos de movimentos de massa em quedas, escorregamentos (rotacional e translacional), fluxos e rastejo (Figura 1).

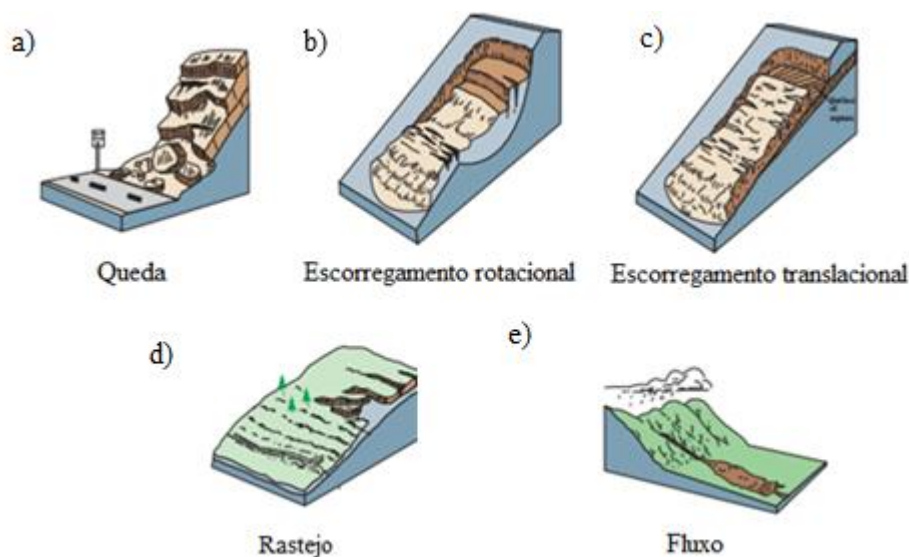


Figura 1. Classes de movimentos de massa. (Adaptado de USGS, 2004)

a) A queda consiste no movimento gravitacional de um bloco de rocha ou solo, que se desprende de uma encosta íngreme, podendo rolar, saltitar e deslizar ao longo de uma encosta. São deflagrados pelo próprio peso do bloco associado à meteorização climática e pelo movimento de água intersticial, que criam planos frágeis e suscetíveis à ruptura.

Os escorregamentos se propagam rapidamente e são causados por uma tensão de cisalhamento intensa (SIDLE; OCHIAI, 2006). Possuem planos de deslizamento bem definidos e são divididos em rotacionais e translacionais:

b) Os escorregamentos rotacionais distinguem-se por possuírem uma superfície de ruptura côncava, onde a porção de solo desloca-se em um movimento de rotação. Nesses casos é possível observar que partes do solo sofrem pouca deformação interna, mantendo a estrutura próxima à original, e costumam ocorrer em solos mais profundos (HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008).

c) Os escorregamentos translacionais, também chamados de planares, costumam ocorrer em profundidades relativamente baixas e possuem uma superfície de ruptura plana. Usualmente o comprimento da superfície de ruptura é maior que a largura, ocorrendo em interfaces de solo e rocha ou de solos com diferentes permeabilidades e/ou densidades. Durante o deslocamento o solo se movimenta de forma translacional, fazendo com que perca sua estrutura. Quando se movimentam em velocidades altas, associados à alta quantidade de água, os escorregamentos translacionais podem evoluir para um fluxo de detritos (HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008).

d) O rastejo, ou rastejamento, é o movimento extremamente lento do solo. Ele pode ocorrer de maneira sazonal devido às mudanças na umidade e temperatura do solo provenientes das variações climáticas entre diferentes estações; continuamente, quando as tensões cisalhantes atuantes na encosta superam as tensões resistivas; progressivamente, quando as encostas estão próximas de falhar e dão início a outros tipos de movimentos de massa. O rastejo desenvolve uma feição na encosta que se assemelha a degraus, onde tronco de árvores, cercas e postes inclinados podem ser indícios da ocorrência desse tipo de movimento.

e) É considerado um fluxo quando a massa deslocada se comporta como um fluido (VARNES, 1978; IVERSON, 1997; TAKAHASHI, 2007). Nesses casos o movimento de massa desenvolve altas velocidades e propaga-se por longas distâncias, podendo estender-se a quilômetros em passagens estreitas e declivosas, erodindo o leito e arrastando materiais grosseiros (TAKAHASHI, 2014). Uma vez que o fluxo de detritos é objeto de estudo desta pesquisa, a seguir será dedicada uma seção para explorar os diferentes tipos de fluxos, suas características e seu desenvolvimento ao longo de uma encosta.

#### 4.3 FLUXO DE DETRITOS

A discussão sobre fluxo de detritos é relativamente recente, mas existem relatos antigos que remetem a ocorrência desse fenômeno em diversas regiões do mundo. No Brasil, o Padre José de Anchieta descreveu um evento ocorrido em 1560, em Piratininga

(CÔRREA FILHO, 1954). De acordo com Kobiyama e Michel (2015) essa descrição possivelmente se refere a um fluxo de detritos. No Japão, de acordo com Takahashi (2009), eram usados termos como *Yama-tsunami* e *Yama-shio* para se referir aos fluxos de detritos, que significam, respectivamente, “tsunami na montanha” e “onda de montanha”.

Um dos primeiros trabalhos a relatar um fluxo de detritos cientificamente foi Schlumberger (1882). Cossout e Meunier (1996) comentam que na França alguns autores já estudavam fluxo de detritos há muito tempo, mas os designavam como “lava torrencial” (e.g. DEMONTZEY, 1894; THIÉRY, 1914).

Com o aumento do interesse em compreender esse fenômeno, diversos autores procuraram elaborar conceitos que definem o que é um fluxo de detritos. Entretanto, existem diversos conceitos e não há uma concordância absoluta entre eles. Isso se deve ao fato dos fluxos de detritos serem movimentos de massa que estão na transição entre um escorregamento e um fluxo hiperconcentrado (COUSSOT; MEUNIER, 1996), além de possuírem comportamentos diferentes conforme sua constituição. Algumas definições e seus respectivos autores são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Diferentes definições de fluxos de detritos

<b>Autor</b>	<b>Definição</b>
Varnes (1978)	Movimento rápido de material viscoso, podendo ser um fluxo de lama, detritos ou avalanche de rochas
Takahashi (1981)	Movimento onde grãos estão dispersos em água com concentração levemente abaixo daquela necessária para uma acumulação estável de sedimentos.
Coussot & Meunier (1996)	Evento subaéreo em que grandes volumes de uma mistura viscosa e muito concentrada de água-detritos desenvolve-se e movimenta-se ao longo do leito de um canal.
Hutter <i>et al.</i> (1996)	Fluxo regido pela gravidade, onde há uma mistura de sedimentos de diversos tamanhos diferentes, água e ar, e movimenta-se ao longo de uma encosta íngreme.
Jan & Shen (1997)	Fluxo gravitacional de uma mistura de solo, rochas, água e/ou ar, principiado por escorregamentos com alto escoamento de água.
Iverson (1997)	Movimento em que misturas de sedimentos e água se propagam subitamente ao longo de uma encosta, com uma dinâmica influenciada tanto pelas forças associadas à fase sólida quanto à líquida.
Hungr <i>et al.</i> (2014)	Movimento de massa rápido a extremamente rápido de detritos em um canal declivoso, com forte arraste de materiais e água ao longo do percurso. Ocorre em caminhos pré-estabelecidos por ravinas ou canais de primeira/segunda ordem.
UNISDR (2014)	Tipo de escorregamento que acontece quando chuvas intensas aliadas a forças gravitacionais provocam a descida de um grande volume de detritos (vegetação, rochas, lama, entre outros) em encostas.

Apesar de existirem diversas definições, vários autores acordam que fluxos de detritos são movimentos de massa com alta destrutibilidade, alcançam altas velocidades e podem se estender ao longo de vários quilômetros. Este trabalho adota a definição apresentada por UNISDR (2014).

#### **4.3.1 Ocorrências de fluxos de detritos no Brasil**

O Brasil possui diversas regiões montanhosas, com características geomorfológicas que, associadas às chuvas intensas, propiciam a ocorrência de fluxo de detritos. Entretanto, o registro de ocorrências de fluxo de detritos não é muito extenso. De acordo com Kobiyama e Michel (2013), esses processos incidem com maior frequência em lugares pouco habitados, visto que são mais comuns em regiões montanhosas. Assim, as testemunhas da ocorrência de um fluxo de detrito raramente possuem a *expertise* necessária para registrá-lo adequadamente.

Ainda assim, existem grandes desastres envolvendo fluxos de detritos que podem ser destacados. Kobiyama e Michel (2015) reuniram as informações de fatalidades para 23 episódios de fluxos de detritos, que resultam em 4.123 mortes registradas (média de quase 180 mortos por evento). Dentre os episódios, estão os fluxos de detritos recentes, ocorridos no Morro do Baú em 2008 e no Rio de Janeiro, em 2011.

Em Santa Catarina, um evento chuvoso intenso acometeu a região do Vale do Itajaí entre os meses de outubro e novembro de 2008, causando inundações e movimentos de massa em diversos municípios. Uma das cidades afetadas foi Rio dos Cedros, onde ocorreram diversos escorregamentos, especialmente na bacia do Rio Cunha. Um dos fluxos de detritos ocorrido barrou temporariamente a seção do rio. De acordo com Kobiyama et al. (2010), a precipitação registrada na semana do evento foi de 256 mm - valor duas vezes maior que a média de chuvas para o mês de novembro.

No Rio Grande do Sul, também existem casos registrados de fluxos de detritos. Um desses casos aconteceu no município de Alto Feliz, na Bacia do Arroio Jaguar, no ano de 2000, durante eventos de precipitações extremas (MICHEL, 2015; PAIXÃO, 2017). Nessa ocorrência uma residência estava no caminho do fluxo de detritos, a qual foi atingida e causou quatro fatalidades.

Recentemente, em janeiro de 2017, uma precipitação intensa desencadeou uma grande quantidade de movimentos de massa na bacia do Rio Mascarada, que é comportada pelos municípios de Rolante, São Francisco de Paula e Riozinho (RS). Diversos fluxos de

detritos ocorreram dentro do domínio e registros não oficiais indicam precipitações diárias de até 272 mm. Foi levantada a hipótese de que os fluxos pudessem ter criado uma barragem temporária no rio Mascarada, a qual, ao romper, poderia ter causado a inundação brusca que acometeu o município de Rolante (SECRETARIA DO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL-SEMA, 2017).

Além dos casos comentados, existem diversos outros. Uma tabela com ocorrências de fluxo de detritos listados nos trabalhos de Kobiyama e Michel (2015) e Silva (2016) pode ser observada no Apêndice F. Além disso, o mapa da Figura 2 apresenta a distribuição espacial dos registros.

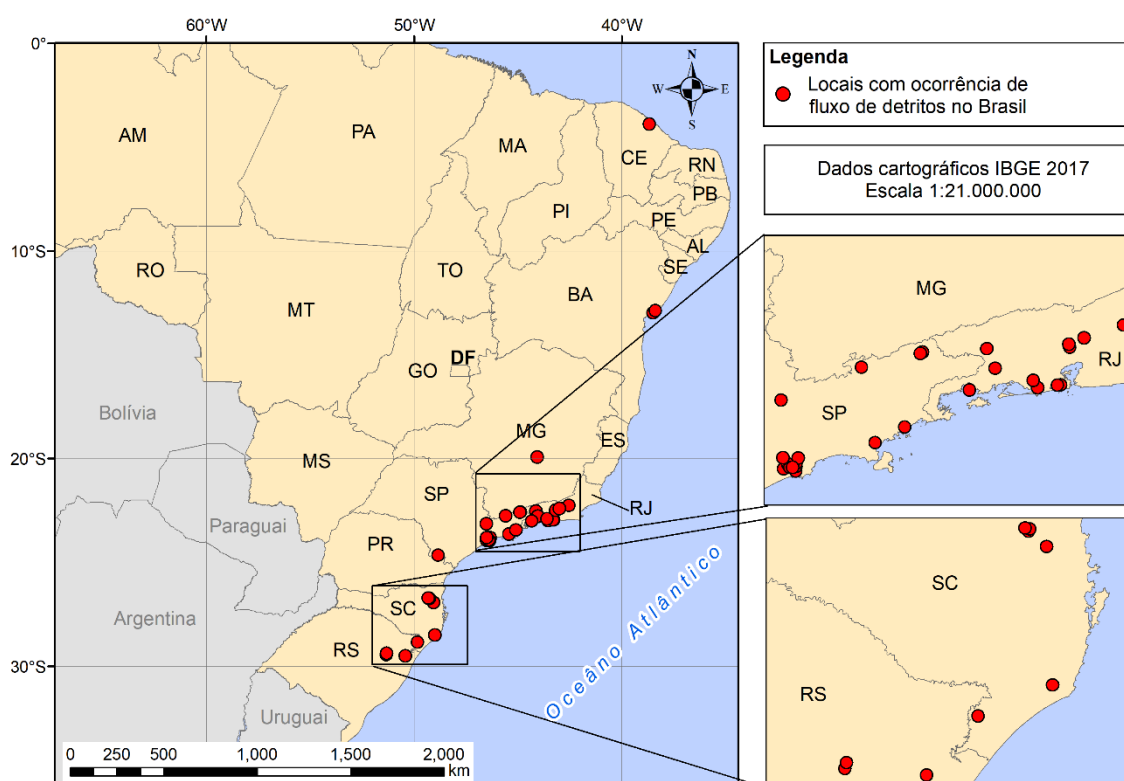


Figura 2. Mapa com distribuição de eventos de fluxos de detritos registrados no Brasil<sup>1</sup>

#### 4.3.2 Tipos de fluxos (*flows*)

O fluxo de detritos é um movimento de massa do tipo fluxo (*flow*, em língua inglesa), por conseguinte outros indivíduos compartilham o mesmo grupo taxonômico. Os fluxos podem ser classificados quanto ao seu aspecto, sua constituição, seus mecanismos

<sup>1</sup> elaborado por Aline Zanini – GPDEN/IPH/UFRGS



ou por parâmetros quantitativos como velocidade média, concentração de sólidos e coesão do material (TAKAHASHI, 2014).

Para Cruden e Varnes (1996) os fluxos são separados em *earthflows*, *skin flows*, *lahars*, *chanelled flows*, *debris torrent*, *open-slope debris flows*, *debris avalanches* e *bedrock flows*. Essa separação é tipicamente qualitativa e apenas alguns tipos de fluxos possuem parâmetros quantitativos (volume transportado, velocidades médias e alcance, por exemplo) que os caracterizam. Nessa classificação, o termo fluxo de detritos é utilizado para se referir a uma fase do escorregamento em que há materiais grosseiros se movimentando com o resto do fluxo. De acordo com Hungr et al. (2007), a terminologia elaborada por Cruden e Varnes (1996) causa confusão por ser muito abrangente, portanto sugere utilização de definições propostas por Hungr et al. (2001).

Já Takahashi (2001) elaborou uma classificação que prioriza os mecanismos físicos envolvidos, a qual adotar-se-á neste trabalho. Cada movimento de massa está representado em um bloco, onde a sobreposição parcial de blocos indica que parte de seus mecanismos de propagação são semelhantes, ou seja, quanto mais distante estiverem os retângulos, maior a diferença entre os movimentos de massa, conforme pode ser observado na Figura 3. As flechas azuis indicam que o movimento teve origem de um escorregamento/liquefação da superfície de escorregamento, que são os fluxos de detritos. Apesar de terem origem a partir de um escorregamento, os blocos dos fluxos de detritos estão distantes do escorregamento por terem mecanismos de movimentação diferentes. Os cinco blocos azuis são os movimentos de sedimentos subaéreos que se comportam como fluxos:

i) Fluxo granular seco – normalmente ocorre em locais montanhosos que passam por terremotos intensos, mas pode derivar de escorregamentos que foram deflagrados anteriormente (JIANG et al., 2018). Esse tipo de movimento se propaga até atingir relevos com ângulos equivalentes ao ângulo de repouso do material deslocado (TAKAHASHI, 2014). O material se move principalmente por colisões entre grãos e mergulho de partículas entre camadas, sendo esses mecanismos chamados de “tensão de colisão” e “tensão cinética”, respectivamente (TAKAHASHI, 2001).

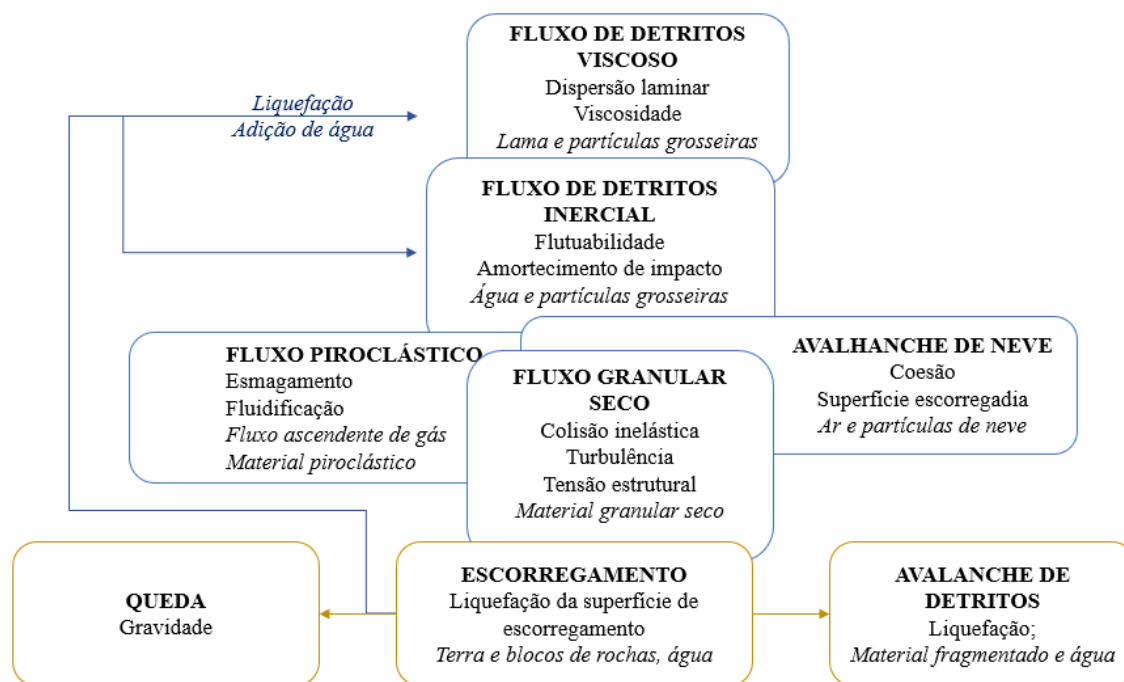


Figura 3. Classificação de movimentos de massa e fluxos (Adaptado de Takahashi, 2001).

ii) **Avalanche de neve** – esse fluxo possui efeitos coesivos que favorecem a formação de bolas de neve por colisão entre partículas, aumentando seu volume ao longo do deslocamento. O movimento é facilitado por superfícies de ruptura planas e escorregadias formados na neve (SCHWEIZER et al., 2003). Quando as temperaturas são bem baixas, o movimento pode ser considerado um fluxo seco, uma vez que a neve possuirá aspecto de pó.

iii) **Fluxo piroclástico** – esse tipo de movimento ocorre em ambientes vulcânicos. A mistura em movimento possui duas camadas distintas, uma inferior, que se comportará semelhantemente a um fluxo granular, e outra superior, composta por gases e cinzas suspensas, que se comporta como fluido. Um mecanismo único desse tipo de fluxo é o esmagamento dos grãos por conta das colisões violentas das partículas entre si e com o leito.

iv) **Fluxo de detritos inercial** – nesse movimento de massa há o efeito da flutuabilidade por conta do fluido intersticial e há o amortecimento de impacto entre as partículas, diminuindo as tensões geradas por colisões. As concentrações de sólidos finos não são tão altas, permitindo que haja linhas de corrente turbulentas que contribuem para o movimento do sedimento, principalmente nas camadas próximas à superfície livre (TAKAHASHI, 2001). Dessa maneira, o comportamento da fase sólida e fase líquida são

distintas e a interação que ocorre entre elas é preponderante para a determinação da dinâmica de escoamento.

v) Fluxo de detritos viscoso – ocorre quando há uma grande concentração de sedimentos finos, como siltes e argilas, que irão aumentar a viscosidade do fluido intersticial. Por conta disso, efeitos de colisão de partículas são amenizados e a turbulência do fluido diminui (TAKAHASHI, 2014). Assim, os principais mecanismos de propagação são a flutuabilidade e a dispersão laminar, predominando no meio as forças viscosas. Esse fluxo possui poucos mecanismos em comum com os demais.

Ainda dentro da classificação de movimentos de massa de Takahashi, também existe a avalanche de detritos, que apesar de sua camada inferior ser liquefeita, seu comportamento é mais semelhante ao deslizamento de aglomerados de solo e rochas do que ao movimento de um fluido. Por conta disso, a avalanche de detritos não é considerada um tipo de fluxo.

Especificamente dentro dos fluxos de detritos, Takahashi (2014) propõe medidas quantitativas para classificá-los, utilizando como base três parâmetros: número de Reynolds (REYNOLDS, 1883), profundidade relativa e número de Bagnold (BAGNOLD, 1954). Essa classificação é apresentada na Figura 3.

O número de Reynolds ( $Rey$ ) indica uma relação entre forças viscosas e forças inerciais, sendo utilizado para determinar os regimes de escoamento de um fluido sobre uma superfície. O número de Reynolds é calculado pela seguinte equação:

$$Rey = \frac{u_m R_H}{\nu} \quad (4.1)$$

onde  $u_m$  é a velocidade média do fluido [m/s];  $R_H$  é o raio hidráulico [m] e  $\nu$  é a viscosidade cinemática [m<sup>2</sup>/s].

O número de Bagnold ( $Ba$ ) expressa a proporção de forças causadas pela colisão entre partículas e forças viscosas, para um escoamento granular. É expresso pela seguinte equação:

$$Ba = \frac{d^2 \lambda^{1/2} \dot{\gamma}}{\nu} \quad (4.2)$$

$$\therefore \lambda = \frac{1}{\left(\frac{C_{max}}{C}\right)^{1/3} - 1} \quad (4.3)$$

onde  $d$  é o diâmetro do grão;  $\dot{\gamma}$  é a taxa de deformação;  $\lambda$  é a concentração linear, dada em função da concentração volumétrica máxima de sólidos ( $C_{max}$ ); e a concentração real de sólidos ( $C$ ).

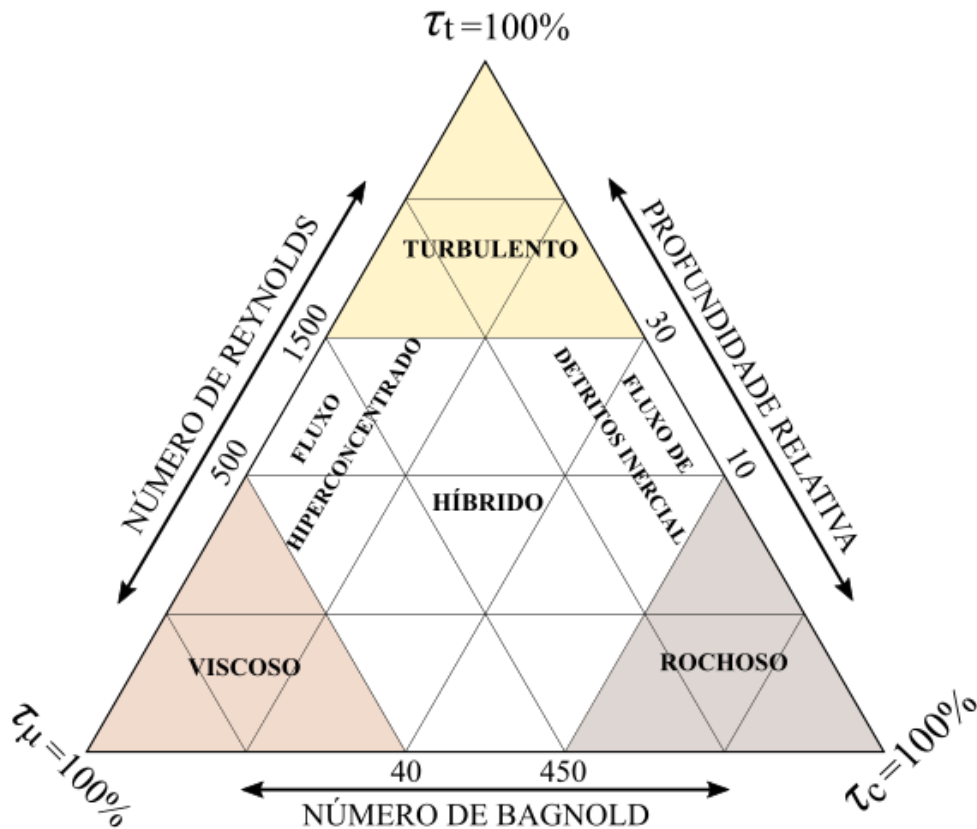


Figura 4. Diagrama de classificação para fluxo de detritos dinâmicos (Adaptado de Takahashi, 2014)

Os vértices extremos do diagrama ternário da Figura 4 indicam três mecanismos responsáveis pela sustentação das partículas durante o escoamento, onde  $\tau_t$  é a tensão cisalhante proveniente de linhas de correntes turbulentas,  $\tau_c$  indica tensões provenientes da colisão entre partículas da mistura e  $\tau_\mu$  refere-se a tensões que derivam das forças viscosas do fluido.

Uma outra maneira comum de diferenciar os fluxos de detritos é nomeando-os conforme sua composição. Nesse sentido, existem fluxos de detritos de lama, rochosos e/ou lenhosos. De acordo com Kobiyama & Michel (2013), no Brasil é comum a ocorrência de fluxo de detritos lenhosos, uma vez que o clima subtropical favorece o desenvolvimento de uma vegetação rica nas zonas ripárias e, por conseguinte, durante um fluxo de detritos pode haver uma significativa incorporação de troncos à massa.

### 4.3.3 Fases de um fluxo de detritos

Os fluxos de detritos passam por diferentes fases (Figura 5), que podem ser separadas morfologicamente em três partes:

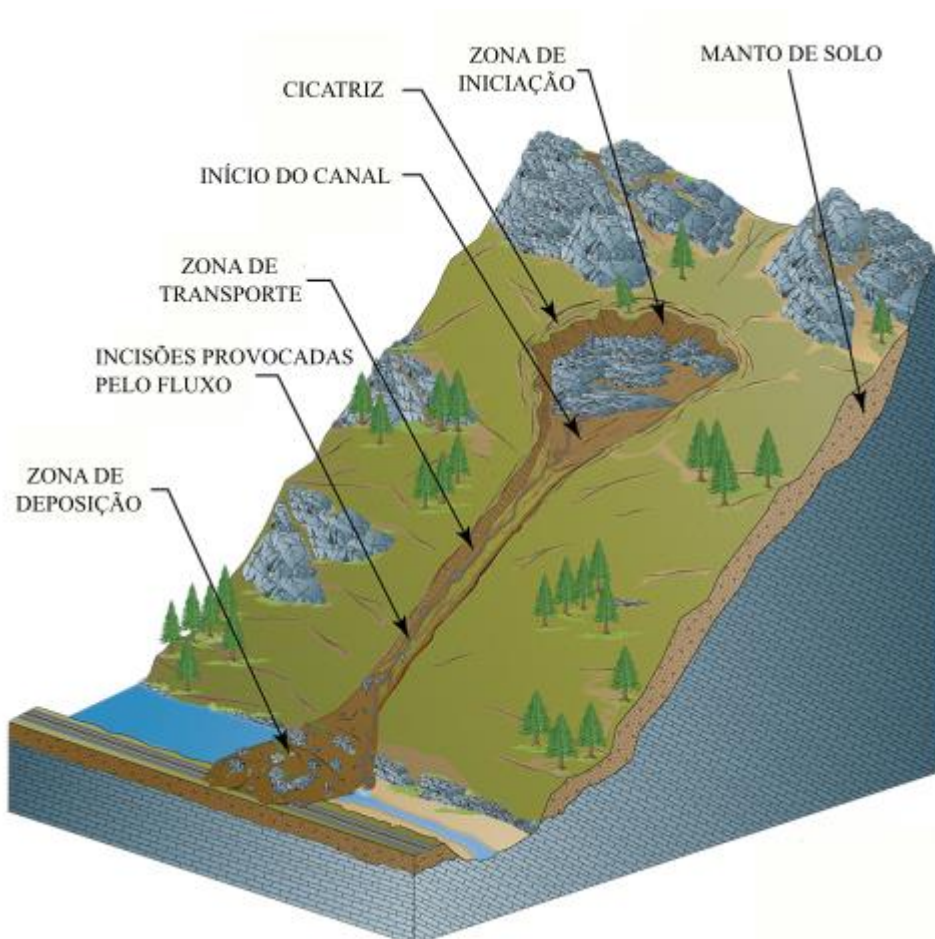


Figura 5. Morfologia de um fluxo de detritos  
(Adaptado de *Wyoming State Geological Survey*, 2019)

- i) zona de iniciação, onde ocorrerão os mecanismos de fluidificação e mobilização do solo. É a região fonte de sedimentos, na qual é possível observar um plano de ruptura referente ao escorregamento que deu início ao movimento do material;
- ii) zona de transporte: área pela qual o fluxo irá se desenvolver, incorporando e depositando sedimentos ao longo do percurso.
- iii) zona de deposição, é a região onde o fluxo de detritos perde o confinamento e se espalha, formando um leque aluvial (também chamado de *lobe*). Conforme destacado

por Takahashi (2014), é durante esse processo que os desastres associados aos fluxos de detritos geralmente são causados.

#### 4.3.3.1 Iniciação de um fluxo de detritos

Tani (1968, apud. TAKAHASHI, 2007) elencou três situações para que ocorra um fluxo de detritos:

- i) Transformação de um bloco de massa proveniente de um escorregamento em um fluxo de detritos por conta do aumento da quantidade de água presente no solo.
- ii) Sedimentos depositados no leito de um canal são carregados paulatinamente pelo escoamento superficial de água, aumentando sua concentração e densidade até tornar-se um fluxo de detritos.
- iii) Rompimento de uma barragem originada por um escorregamento, na qual a água represada à montante irá arrastar os sedimentos à jusante. Haverá um aumento na concentração de sedimentos e, conseqüentemente, um aumento na viscosidade no momento do rompimento.

Para Takahashi (2007) a maior parte dos fluxos de detritos derivam de escorregamentos. Para tanto, o bloco de solo precisa passar por um processo de fluidificação, na qual o atrito interno e a coesão dos grãos serão reduzidos ou eliminados (HUTTER et al., 1996). De acordo com Iverson *et al.* (1997), quando se trata de um fluxo de detritos iniciado a partir de um escorregamento, existem pelo menos três mecanismos que são relevantes:

- i) Falha de Coulomb generalizada ao longo do solo – a falha de Coulomb se baseia na equação de equilíbrio estático de Mohr-Coulomb :

$$\tau = c + \sigma' \tan \varphi \quad (4.4)$$

onde  $\tau$  é a tensão cisalhante;  $c$  é a coesão do solo;  $\varphi$  é o ângulo de repouso do solo;  $\sigma'$  a tensão normal efetiva. A tensão normal efetiva é dada pela tensão normal exercida pelo peso do bloco de solo com água ( $\sigma$ ) diminuída pela poro-pressão ( $p$ ) exercida pela água:

$$\sigma' = \sigma - p \quad (4.5)$$

a poro-pressão é dada pelo produto do peso específico da água ( $\gamma_w$ ) e da soma da carga hidráulica ( $h'$ ) e da coordenada vertical orientada para baixo ( $z$ ):

$$p = \gamma_w(h' + z) \quad (4.6)$$

A poro-pressão indica a pressão exercida pela água presente nos espaços entre partículas do solo (poros).

Segundo a Equação 4.4, a falha de Coulomb ocorrerá quando as tensões cisalhantes (lado esquerdo da equação) forem superiores às tensões resistivas (lado direito da equação). Essa ideia constitui a base do modelo de encosta infinita, que é utilizada para a avaliação da estabilidade de encostas em diversos modelos (*e.g.* SIDLE, 1997; PACK et al., 2003; WU; BAUM et al., 2008). Esse equilíbrio de forças numa encosta está esquematizado na Figura 5.

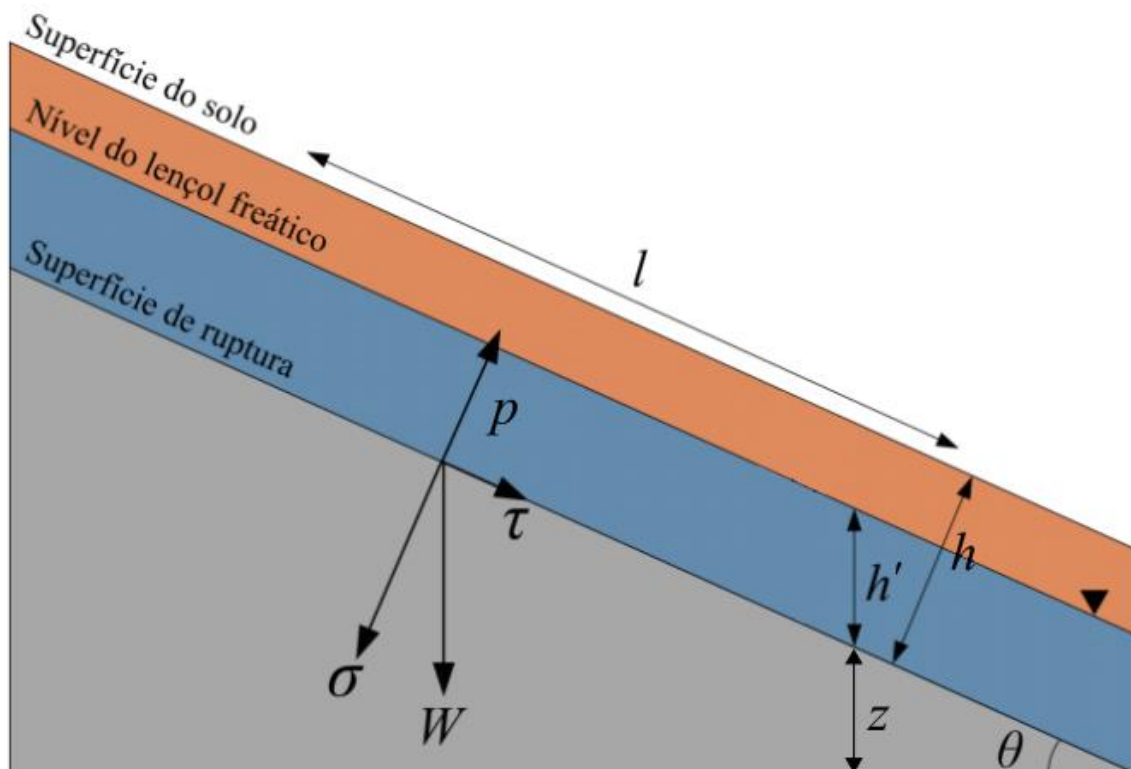


Figura 6. Encosta hipotética com lençol freático  
(Adaptado de Michel, 2015)

No contexto de iniciação de fluxo de detritos a partir de um escorregamento, a falha de Coulomb já ocorreu em uma determinada profundidade, entretanto a tensão normal

efetiva precisaria ser baixa o suficiente para que essa falha se propague ao longo de toda a camada de solo, para então comportar-se como fluido (IVERSON et al., 1997). Nesse sentido, a adição de água é determinante para que haja um aumento significativo da poro-pressão ( $p$ ) para que a tensão normal efetiva se aproxime de zero. Nos casos em que o solo está completamente saturado e não houve liquefação, é possível adicionar o efeito de sobrecarga gerada por uma lâmina de água que escoar superficialmente, que aumentarão as tensões cisalhantes atuantes ao longo do bloco e poderão ser determinantes para o desencadeamento do fluxo de detritos (TAKAHASHI, 1981).

ii) Liquefação por conta de poro-pressões elevadas – um dos mecanismos sugeridos explica que a liquefação pode ocorrer por um movimento lento do escorregamento, na qual as partículas de solo se rearranjam e o bloco atinge um estado chamado quase-estático ou crítico (IVERSON et al., 1997). O estado crítico aumenta a densidade de solos pouco densos e diminui em solos muito densos (Figura 7). Portanto, quando um solo pouco denso contrai e está numa condição saturada ou próxima a saturação, as poro-pressões irão aumentar, reduzindo a tensão efetiva e provocando a liquefação. Em alguns casos o fluxo de detritos será deflagrado pela dilatação de um solo bastante denso (ANDERSON; SITAR, 1995), mas existem evidências de que solos muito densos também podem sofrer contrações quando submetidos a determinadas tensões (VAID; THOMAS, 1995).

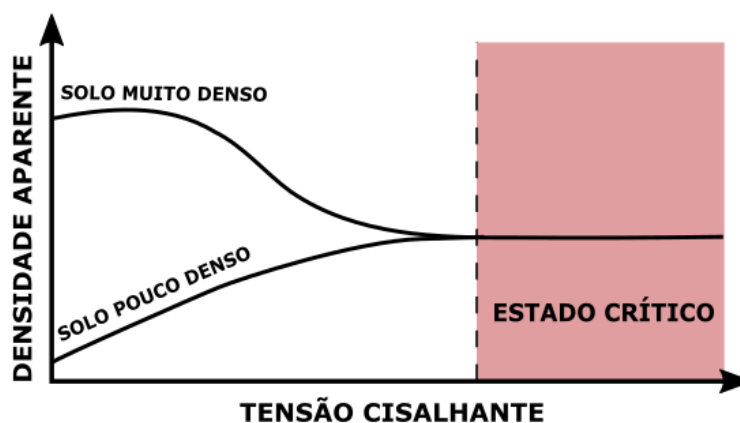


Figura 7. Mudança da densidade aparente conforme a tensão cisalhante (Adaptado de Iverson et al., 1997)

Como o efeito da poro-pressão está sendo exercido por água presente nos espaços entre grãos, naturalmente sua magnitude é influenciada por fatores hidrológicos. Chuvas, derretimento de neves e escoamentos superficiais irão contribuir na saturação do solo de



cima para baixo, fazendo que poro-pressões positivas se desenvolvem quando a água encontra uma camada de solo ou rocha com baixa permeabilidade. Nesses casos, a água terá dificuldade em escoar e se acumulará sobre essa camada pouco permeável ( REID et al., 1988; RICHARD et al., 1997). Em contrapartida, o escoamento de água subterrânea de solos e rochas adjacentes irá saturar o solo a partir da base com o aumento do nível do lençol freático.

A saturação de baixo para cima dificulta a mobilização de um fluxo de detritos, uma vez que poderá induzir a instabilidades antes mesmo de estar saturado. Entretanto, a massa ainda poderá ser fluidificada de duas maneiras (IVERSON et al., 1997): a primeira consiste na criação de gradientes hidráulicos com direcionamento para cima na vertical, potencializando a quebra de coesão do solo e facilitando a mobilização; a segunda maneira é a já citada contração do solo após a ruptura, deixando-o suficientemente saturado e aumentando a poro-pressão.

Segundo Takahashi (2014), nos casos em que o fluxo de detritos foi iniciado pelo fluxo de água subterrânea, poderá ocorrer a liquefação apenas da camada inferior, enquanto a superior permanece como bloco de solo coeso. Esse bloco será sustentado pelas pressões intrínsecas à camada liquefeita e se moverá ao longo da encosta, perdendo massa para o fluxo de detritos conforme avança. Quando o bloco cessar o movimento ao atingir relevos mais suaves, a porção liquefeita continuará se movimentando e irá galgar o bloco, soterrando-o conforme os sedimentos depositam-se.

iii) Aumento da temperatura granular – a temperatura granular representa a intensidade das flutuações e o grau de agitação dos sedimentos presentes no meio. Nesse mecanismo há uma conversão de energia translacional dos grãos para energia de flutuação, a qual aumentará a mobilidade dos grãos (IVERSON, 1997). A energia translacional é gerada pelo movimento descendente na encosta, enquanto a conversão para energia de flutuação é dada pela interação dos grãos com superfícies irregulares (Figura 8). O efeito da temperatura granular será mais relevante próxima a superfície de ruptura (IVERSON et al., 1997) e atuará na transição de um estado quase-estático para um fluxo agitado e generalizado (ZHANG; CAMPBELL, 1992).

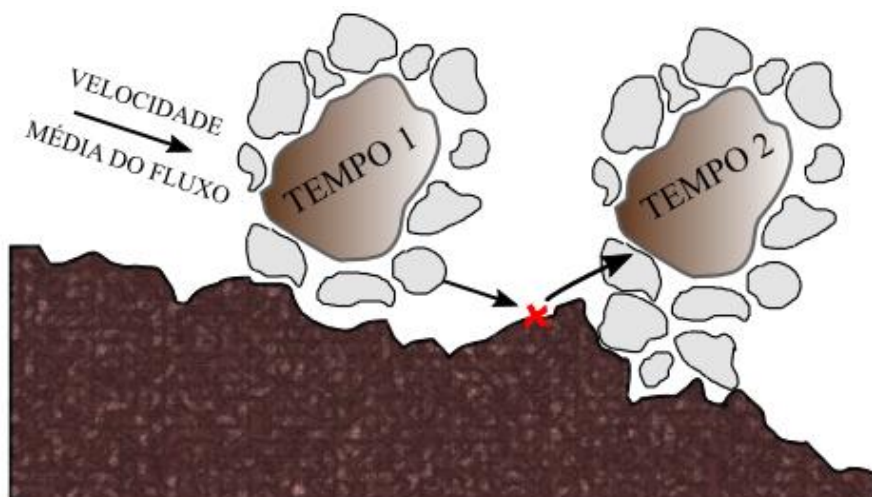


Figura 8. Esquema de conversão da temperatura granular  
(Adaptado de Iverson et al., 1997)

Iverson et al. (1997) comentam que esses mecanismos costumam ocorrer em conjunto, sendo que a liquefação, ao menos parcial, proveniente do aumento da poro-pressão atinge todos os fluxos de detritos, uma vez que esse é o principal fenômeno que os distingue dos movimentos de sedimentos secos.

#### 4.3.3.2 *Desenvolvimento de um fluxo de detritos*

Durante a propagação de um fluxo de detritos ocorre a segregação dos sedimentos, na qual na frente e nas laterais do escoamento observa-se a manifestação de materiais mais grosseiros; e uma gradação inversa, ou seja, partículas mais finas estão mais próximas do fundo ( NAYLOR, 1980; INNES, 1983; JOHSON et al., 2011; TAKAHASHI, 2007, 2014). Esse comportamento foi observado em filmagens e fotografias (*e.g.* SUWA; OKANO; KANNO, 2013), bem como em experimentos baseados em modelos físicos (*e.g.* IVERSON et al., 2010; LOGAN et al., 2018). Isso faz com que diversos fluxos de detritos assumam um aspecto análogo à Figura 9.

Existem algumas vertentes que procuram explicar a gradação inversa: (i) pela teoria de dispersão de pressão de Bagnold (1954, 1966), onde por conta da colisão entre grãos, as partículas de maiores diâmetros migram para regiões onde as tensões atuantes não são muito altas, sendo que essa região fica na superfície; (ii) pelo peneiramento cinético proposto por Middleton (1970), onde o autor explica que pequenas partículas permeiam entre espaços formados por partículas maiores quando há agitação no meio, deslocando

partículas maiores para cima; (iii) pelo efeito de bordas, na qual partículas irão colidir com as margens do canal e direcionar-se-ão para o centro do escoamento (SAFFMAN, 1965).

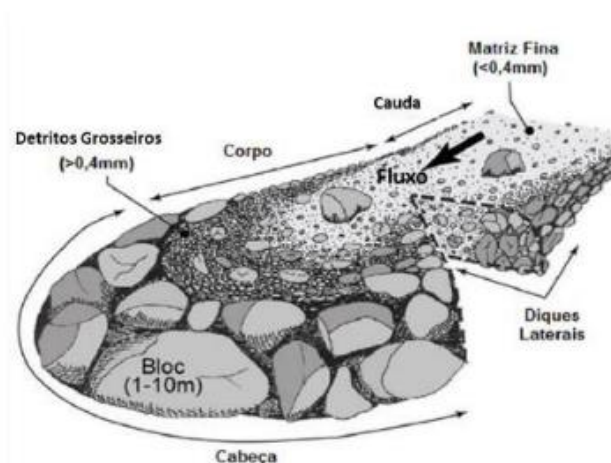


Figura 9. Esquema da segregação de materiais em um fluxo de detritos (NUNES e SAYÃO, 2014)

Naylor (1980) discorda que o fenômeno é explicado isoladamente por tais mecanismos e sugere que a gradação inversa ocorre por conta da diminuição da competência de misturas com altas concentrações de argilas próximas ao fundo do canal, fazendo que partículas grandes sejam carregadas em direção à superfície, onde existe uma feição coesa (*plug*) que terá competência o suficiente para transportar blocos maiores. Entretanto, Takahashi (2014) relatou que diversos fluxos de detritos observados em campo não apresentavam *plug* e, portanto, a explicação proposta por Naylor (1980) também não descreve completamente o fenômeno.

Takahashi (1981) atribui a existência de materiais mais grosseiros na frente do escoamento ao efeito da gradação inversa, que faz as rochas e materiais mais grosseiros adquirirem maiores velocidades por estarem mais próximas da superfície. Para Suwa (1988), os detritos de maior dimensão deslocam-se pela frente por conta de sua velocidade terminal, que é maior que a velocidade da lama que está escoando em seu entorno. Conseqüentemente, o autor defende que grandes blocos podem se mover para a frente do escoamento mesmo que não estejam na superfície. Esses blocos localizados à frente do escoamento geram um represamento móvel que retarda o movimento da matriz fina localizada na cauda do escoamento.

Os fluxos de detritos também podem ocorrer em pulsos intermitentes (*pulsing flow* ou *multiple surges*) (RICKENMANN; ZIMMERMANN, 1993; TAKAHASHI, 2014).

Esses pulsos contribuem para a definição do canal pela qual o fluxo de detritos irá percorrer, criando condições favoráveis para mobilização dos fluxos seguintes, potencializando seu alcance. A frente do pulso, constituído por materiais mais grosseiros, atua erodindo o canal, enquanto a matriz mais fina na cauda do escoamento irá se depositar e criar uma superfície menos rugosa para o avanço dos próximos pulsos (DAVIES, 1990)

Como a cabeça do escoamento pode erodir o leito, sedimentos são incorporados a massa fluida enquanto o fluxo de detritos avança. Conseqüentemente, a magnitude de um fluxo de detritos nem sempre está relacionada ao volume inicial do escorregamento, mas sim da capacidade de erodir e arrastar mais partículas durante seu trajeto (HUNGR et al., 2007). Nesse sentido, a topografia contribui significativamente para a magnitude do fenômeno. Hungr et al., (2008) identificou uma correlação linear positiva entre a magnitude e o comprimento da encosta a partir do ponto de iniciação até o canal atingir uma declividade abaixo de 15°, indicando que quanto maior o trajeto íngreme, mais sedimentos podem ser incorporados ao fluxo de detritos. Além do mais, o grau de erosão também é influenciado pelo material constituinte da encosta. Logo, solos com maior erodibilidade providenciarão mais sedimentos para a massa fluida.

Quando o fluxo de detritos está completamente desenvolvido e atingiu a máxima capacidade de aporte de sedimentos, a erosão é drasticamente reduzida (TAKAHASHI, 2014). Associado a esse fator e a perda de água durante o trajeto, também poderá ocorrer a deposição de sedimentos ao longo da zona de transporte. Segundo Iverson (1997), as primeiras deposições irão ocorrer nas laterais e na cabeça do escoamento.

Quando há a perda do confinamento, geralmente o fluxo atingiu um local pouco declivoso, o qual diminui as tensões cisalhantes direcionadas à descida, reduzindo a velocidade de propagação e favorecendo os mecanismos deposicionais. Os seguintes mecanismos podem atuar na deposição: i) decaimento do excesso de poro pressão (HUTCHINSON, 1986); ii) resistências viscosas em fluidos viscoplásticos que superam as tensões atuantes sobre a massa fluida (JOHNSON, 1970; COUSSOT; PROUST, 1996); iii) decaimento das tensões de colisões entre grãos (TAKAHASHI, 1981); iv) aumento da fricção proveniente do contato entre grãos e fricção com as margens do escoamento (MAJOR, 1997; IVERSON, 2005); v) decaimento da temperatura granular, principalmente nas laterais do escoamento (IVERSON et al. 1997).

De acordo com Haas et al. (2015), a composição do fluxo irá influenciar na iniciação da deposição e, conseqüentemente, no alcance do fluxo de detritos. Quando há materiais muito grosseiros há maior perda de água durante o escoamento, o que contribui para a

diminuição das poro-pressões, enquanto materiais mais argilosos irão reter a água mais facilmente, mas estarão sujeitos à deposição por conta das resistências viscosas.

A deposição que ocorre nas laterais do escoamento irá formar feições laterais chamadas de diques (*levees*) e é causada quando a cauda do fluxo de detritos empurra para os lados as partículas maiores presentes na cabeça do escoamento (*shouldering effect*). Ao empurrar as partículas para as laterais do escoamento, a deposição será favorecida (JOHNSON et al., 2011).

#### 4.4 MODELAGEM DE FLUXO DE DETRITOS

O modelo de fluxo de detritos pode ser classificado em fisicamente embasada, empírica ou física (ALVARADO, 2006) (Figura 10).

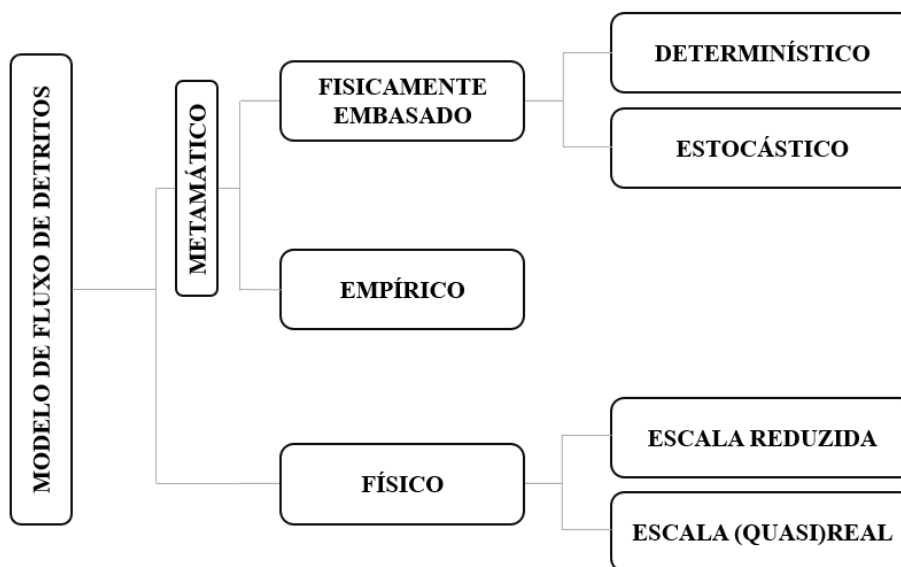


Figura 10. Tipos de modelo de fluxo de detritos

a) **modelos físicos:** procuram representar o fenômeno de fluxo de detritos em escala reduzida ou em escalas próximas a uma condição real. As representações físicas são utilizadas para extrair informações quanto ao comportamento do fluxo de detritos, sendo que os materiais constituintes e o volume de água envolvidos no experimento são conhecidos e controlados. Com as informações obtidas poderão ser desenvolvidos modelos matemáticos que expressam os comportamentos observados.

Como exemplo de modelos físicos tem-se diversos trabalhos de Iverson e Major, que utilizam um canal de grande escala da USGS (*United States Geological Survey*), monitorando parâmetros como poro-pressão, velocidade de fluxo, largura e altura das

deposições (MAJOR, 1997; IVERSON et al., 1997; IVERSON et al., 2010; LOGAN et al., 2018). Também existem experimentos físicos realizados em laboratório (*e.g.* VALENTINO et al., 2008; HAAS et al., 2015), nos quais os canais projetados possuem dimensões reduzidas se comparado às escalas reais.

b) **modelos matemáticos fisicamente embasados:** são aproximações que procuram descrever os mecanismos físicos do fenômeno por meio de relações matemáticas. Eles podem considerar a mistura como bifásica ou monofásica, utilizar diferentes abordagens mecânicas para o escoamento, procurar representar fluxos de detritos individuais ou um conjunto de fluxos de detritos em escala de bacia (GREGORETTI et al., 2016). Os modelos fisicamente embasados podem ser divididos entre determinísticos e estocásticos. No primeiro caso a resposta dada pelo modelo será sempre a mesma para um mesmo conjunto de parâmetros de entrada, enquanto o segundo irá utilizar ao menos um componente randômico para realizar as simulações, apresentando saídas diferentes para o mesmo conjunto de entradas.

De acordo com Crosta et al. (2006), diversos modelos fisicamente embasados de fluxo de detritos irão compreender o meio como contínuo, utilizando equações clássicas para conservação de massa, momento e energia. Além disso, irão utilizar aproximações para a profundidade média, na qual as propriedades e volume ao longo da coluna do material propagado permanecem constantes, sem troca interna de material.

Apesar de serem denominados fisicamente embasados, naturalmente existe um nível de empirismo dentro de grande parte dos modelos de fluxo de detritos que utilizam de metodologias baseadas em estudos reológicos. Diversas equações constitutivas para diferentes tipos de fluidos são determinadas por relações obtidas experimentalmente (IVERSON, 2003). Por utilizarem princípios físicos que procurem explicar os mecanismos do fenômeno, esses modelos podem ser aplicados em uma ampla diversidade de ambientes sem subjetividade de análise, mas costumam necessitar de muitas informações para serem utilizados.

c) **modelos empíricos:** procuram estabelecer relações matemáticas por meio de dados observados em campo. Baseiam-se fortemente nas estatísticas obtidas nas observações, criando regressões e índices que traduzam o comportamento do fluxo de detritos. Diversos estudos são feitos utilizando características morfométricas dos fluxos de detritos, como volume, área de iniciação, distância de deslocamento e área de deposição, para extrair relações (*e.g.* RICKENMANN, 1999; CHEN; YU, 2011). Uma das equações empíricas bastante utilizadas para avaliação de fluxo de detritos é o ângulo de alcance

(COROMINAS, 1996), por exemplo. Um dos grandes atrativos é a facilidade de aplicação desses modelos, ao passo que podem possuir limitação de aplicação dependendo das características da área de estudo.

#### 4.4.1 Abordagens reológicas para a mecânica de escoamento

O fluxo de detritos possui uma grande variabilidade quanto seu comportamento, conforme sua composição. Por conta disso, há uma preocupação quanto a abordagem a ser tomada para descrever a mecânica de escoamento. Como já apresentado, diversos mecanismos atuam na propagação de um fluxo de detritos e cada um deles terá uma significância diferente conforme as propriedades do material constituinte, a concentração de sólidos e a distribuição granulométrica.

Nesse sentido, a maioria dos modelos aborda o fluxo de detritos como uma mistura monofásica, propondo equações que se baseiam nas relações entre a tensão cisalhante aplicada e a taxa de deformação (TAKAHASHI, 2014). Grande parte dos modelos irá entender o fluido como de plástico de Bingham, fluido Newtoniano, fluido dilatante ou fluido de Herschel-Bulkley (JAN; SHEN, 1997). A Figura 11 apresenta as curvas que descrevem o comportamento ideal desses tipos de fluidos quando submetidos a uma determinada tensão cisalhante.

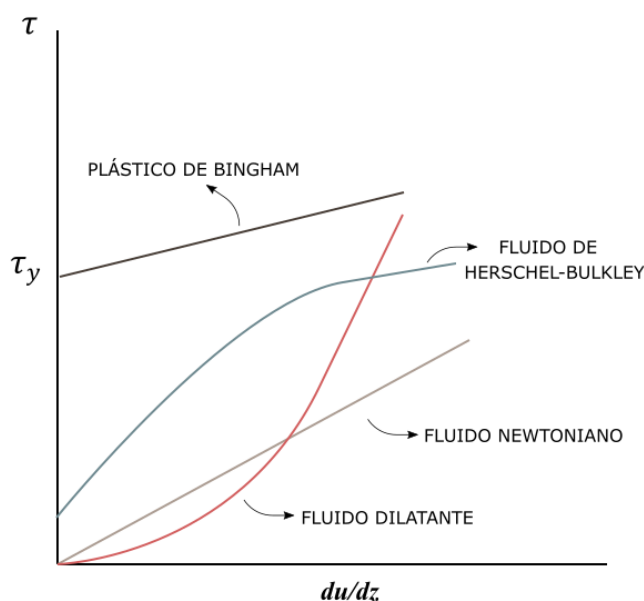


Figura 11. Taxa de deformação ( $du/dz$ ) de diferentes fluidos de acordo com a tensão cisalhante  $\tau$  (Adaptado de Takahashi, 2014)

Alguns autores, como Yang & Wang (1991) e Su et al. (1993), desenvolveram modelos que separam o escoamento em camadas para representar as diferenças de comportamento entre a fração inferior e superior do canal. Assim, cada uma das camadas terá um tratamento reológico diferente, a fim de representar a variabilidade granulométrica ao longo do perfil do escoamento.

Outros métodos tratam os fluxos de detritos como uma mistura bifásica e, dessa forma, avaliarão as fases sólida e líquida como meios independentes. Nessas abordagens as características do fluxo serão dadas pela solução concomitante das equações de momento e conservação de massa para cada uma das fases (IVERSON; DENLINGER, 2001).

Durante a ocorrência de um fluxo de detritos, a matriz de solo está liquefeita durante maior parte de sua duração, principalmente em misturas compostas majoritariamente por argila, silte, areia e água (IVERSON; DENLINGER, 2001). Para esses casos, Iverson (2003) afirma que modelos reológicos simples como de Newton, Bingham e Herschel-Bulkley podem representar apropriadamente as resistências ao cisalhamento. Além disso, Coussot & Meunier (1996) destacam que fluxos de detritos mais viscosos podem ser entendidos como uma única fase, uma vez que a elevada concentração de sedimentos irá induzir a água e os sedimentos a comportarem-se de maneira semelhante ao longo do escoamento.

#### 4.4.1.1 *Fluido Newtoniano/macro-viscoso*

Uma das aproximações mais simples tratam o fluxo de detritos como o escoamento de um fluido Newtoniano (*e.g.* HUPPERT, 1982; HUNT, 1994 e HUTTER et al., 2003). A equação constitutiva para um fluido Newtoniano ideal é dada por:

$$\tau = \mu_{f'} \frac{du}{dz} \quad (3.7)$$

onde  $\mu_{f'}$  é a viscosidade efetiva do fluido,  $(du/dz)$  corresponde à taxa de deformação do fluido. Para considerar o efeito de concentração de sedimentos na mistura, existem algumas equações empíricas para determinar seu impacto na viscosidade do fluido, como as propostas por Einstein (1956), Chu (1983) e Krone (1984).



Hunt (1994) propôs soluções de escoamento de fluxo de detritos newtonianos para condições laminares, turbulentas, permanentes e não-permanentes. O autor comenta sobre a predominância de comportamento laminar em simulações físicas de fluxos de detritos que poderiam ser aproximados a fluidos newtonianos.

#### 4.4.1.2 *Plástico de Bingham e fluido visco-plástico*

Esse modelo se baseia em um fluido que se comporta como um plástico de Bingham. Semelhantemente a um fluido newtoniano, o plástico de Bingham se deforma linearmente conforme o aumento da tensão de cisalhamento, entretanto ele só irá começar a escoar quando a tensão de cisalhamento crítica (*yield stress*) for atingida. A seguinte expressão descreve o comportamento geral do fluido:

$$\tau = \tau_y + \mu_b \frac{du}{dz} \quad (3.8)$$

onde  $\tau_y$  é a tensão de cisalhamento crítica,  $\mu_b$  é a viscosidade do plástico de Bingham. Uma adaptação foi proposta por Johnson (1970), onde a tensão de cisalhamento crítica é representada pelas forças resistivas do bloco de solo, conforme a equação a seguir:

$$\tau = c + \sigma \tan\varphi + \mu_b \frac{du}{dz} \quad (3.9)$$

Esse é o modelo Coulomb-viscoso, também conhecido como visco-plástico. Um dos avanços se comparado à abordagem de fluido newtoniano é a capacidade de determinar condições para o fim do movimento de um bloco de massa (TAKAHASHI, 2014). Essa condição seria a tensão de cisalhamento crítica, que precisará ser superada para haver movimento ao longo da encosta.

Apesar de ser um tratamento simplificado para o fluxo de detritos, o modelo de plástico de Bingham pode explicar alguns comportamentos, como o escoamento coeso de uma massa no centro do canal que permanece praticamente indeformado (*plugs*) e também o fato de existirem grandes blocos flutuando na matriz de solos e detritos (JAN; SHEN, 1997). O modelo anterior é recomendado para fluxos de detritos viscosos que escoam em regime laminar. A partir do momento que são considerados os efeitos de linhas de correntes

turbulentas, o tratamento passa a ser mais complexo. Chen (1988) elaborou um modelo que inclui os efeitos da turbulência e também o efeito de dispersão granular explicitado por Bagnold (1954):

$$\tau = c \cdot \cos\varphi + p_d \operatorname{sen} \varphi + \mu_l \left( \frac{du}{dz} \right)^n \quad (3.10)$$

onde  $p_d$  é a pressão dinâmica;  $\mu_l$  é o índice de consistência da mistura;  $n$  é o índice de comportamento do fluido. Quando  $n$  for 1, o modelo será reduzido ao modelo de Bingham, quando for 2 será de Bagnold. Essa abordagem, chamada de viscoplástico-colisional (*collisional-visco-plastic*), passa a exigir um conhecimento mais amplo dos parâmetros, sendo comentado por Chen (1988) que diversos ensaios em laboratório seriam necessários para determinar os valores de  $\tau_c$ ,  $\varphi$ ,  $\mu_l$  e  $p$  para um solo qualquer.

#### 4.4.1.3 Fluido de Herschel-Bulkley

Um fluido de Herschel-Bulkley precisa de uma tensão mínima para começar a deformar-se, similarmente a um plástico de Bingham. Entretanto, em vez de possuir uma taxa de deformação linear, o fluido exibe uma viscosidade que diminui conforme o aumento da tensão cisalhante, o que provocará um aumento na taxa de deformação – tal comportamento é denominado pseudoplasticidade. No âmbito dos fluxos de detritos, essa equação é utilizada pra simular a perda de coesão e resistência ao escoamento conforme a massa se deforma ao longo da encosta, sendo utilizada em trabalhos como Coussot *et al.* (1998), Huang & García (1998), Remaître *et al.* (2005) e Kaitna *et al.* (2007). A equação que generaliza tal comportamento é apresentada a seguir:

$$\tau = \tau_y + K_{HB} \left( \frac{du}{dz} \right)^m \quad (3.11)$$

onde  $K_{HB}$  é o índice de consistência do fluido; e  $m$  é o índice de comportamento do fluido, o qual varia entre 0 e 1 e determina o comportamento do escoamento – para  $m = 1$ , o fluido comportar-se-á como um plástico de Bingham. De acordo com Coussot *et al.* (1998),  $K_{HB}$

e  $\tau_y$  irão aumentar proporcionalmente à concentração de sólidos na mistura, onde a relação  $K_{HB}/\tau_y$  permanece aproximadamente constante para diferentes concentrações.

Esse modelo serve a escoamentos com baixos valores de Reynolds, adequando-se a fluxos de detritos viscosos, especialmente quando compostos majoritariamente por argilas e siltes (COUSSOT et al., 1998).

#### 4.4.1.4 *Fluido dilatante*

Um fluido dilatante irá se deformar de maneira não-linear, aumentando sua resistência à deformação conforme o aumento da tensão cisalhante. A equação constitutiva de um fluido dilatante é expressa por:

$$\tau = K_d \left( \frac{du}{dz} \right)^n, n > 1 \quad (3.12)$$

onde  $K_d$  é o índice de consistência do fluido dilatante e  $n$  é o índice de comportamento do fluido. Essa abordagem é comumente utilizada em modelos de propagação de fluxos de detritos rochosos (e.g. BREITFUSS; SCHEIDEGGER, 1974; TAKAHASHI, 1981). Conforme exposto por Takahashi (2014), a mobilidade dos fluxos de detritos rochosos deve-se a mecanismos de dispersão de grãos, o que também explicaria a presença de partículas maiores na superfície do escoamento. Nesse sentido, Bagnold (1954) descobriu que as colisões entre partículas atuam de maneira relevante na dispersão dos grãos, ao notar que regiões em que eram aplicadas grandes tensões a viscosidade tornava-se menor do que áreas com baixas tensões cisalhantes.

Bagnold (1954) obteve experimentalmente que  $n$  é aproximadamente 2, ou seja, a tensão cisalhante aplicada é diretamente proporcional ao quadrado da taxa de formação. De acordo com Hunt et al. (2002) o valor de  $n$  é de 1,5, e explica que o experimento de Bagnold possuía limitações quanto ao aparato utilizado, portanto grande parte da tensão mensurada era causada pelas placas laterais.

#### 4.4.1.5 *Modelo bifásico*

O modelo bifásico soluciona equações que descrevem o comportamento da fase líquida e da fase sólida, considerando que as mesmas se comportam de maneira diferente,

mas interagem entre si. Um dos principais modelos, provenientes a partir de soluções propostas por Savage e Hutter (1989, 1991), é a teoria da mistura de Coulomb de Iverson e Denlinger (2001). A partir das observações de experimentos em larga escala, os autores notaram que a tensão gerada pela fricção de Coulomb era predominante em detrimento da tensão gerada pela colisão entre partículas. Assim, desenvolveram uma teoria de escoamento não permanente tridimensional, que abarca desde a iniciação até a deposição do fluxo de detritos. O modelo indica que o escoamento poderá assumir caráter permanente, mas o tempo necessário para desenvolver tal comportamento pode ser muito longo, sendo inalcançável em diversas situações reais. Apesar de procurar descrever um comportamento para aplicações mais amplas, permitindo que as fases sólidas e líquidas sejam alteradas ao longo do tempo, Takahashi (2014) destaca que esse modelo é apropriado apenas pra altas concentrações volumétricas (>50%), uma vez que trabalha no regime quasi-estático (ou seja, está no limiar de um corpo rígido e de um fluido).

A partir do modelo bifásico de Iverson e Denlinger (2001), Pitman & Long (2005) desenvolveram um modelo matemático para interação entre dois fluidos com densidades específicas constantes, assumindo-os como invíscidos e estabelecendo a pressão como única forma de tensão atuante.

#### **4.4.2 Simulação numérica de fluxo de detritos**

Existem diversos modelos que se propõem a simular a propagação de um fluxo de detritos (*e.g.* PITMAN et al., 2003; NAKATANI et al., 2008; BEGUERÍA et al., 2009). A complexidade desses modelos está relacionada com o objetivo da aplicação. Modelos desenvolvidos para investigar o comportamento dos fluxos de detritos, que procuram reproduzir detalhadamente os processos mecânicos que ocorrem durante a propagação, costumam focar em apenas um evento e são fisicamente embasados. Em contrapartida, modelos que procuram identificar regiões que podem ser atingidas pelo fluxo de maneira rápida e pouco onerosa, estão mais interessados no alcance e/ou capacidade de destruição em um cenário hipotético. Assim, sacrificam detalhes em prol de uma aplicação mais ampla. Grande parte desses modelos são empíricos. Também existem modelos que utilizam de soluções fisicamente embasadas para alguns processos e relações empíricas para outros.

Dentro dos fisicamente embasados, existem diversos modelos numéricos que se propõem simular a propagação de um fluxo de detritos, representando seu escoamento. Dentre os existentes podem ser citados: MassMov2D (BEGUERÍA et al., 2009),

r.debrisflow (MERGILI et al., 2012), KANAKO-2D (NAKATANI et al., 2008), Flo2D (O'BRIEN; JULIEN; FULLERTON, 2006), TITAN-2D (PITMAN et al., 2003), RASH3D (PIRULLI; SORBINO, 2008). Não está no escopo deste trabalho apresentar uma discussão aprofundada acerca do funcionamento de tais modelos e mais informações sobre eles podem ser encontradas nos trabalhos citados.

Os modelos empíricos comumente utilizam informações geomorfológicas como principal parâmetro para determinação do alcance e das manchas de fluxo. Por exemplo, Prochaska et al. (2008) apresenta um modelo que utiliza como base a declividade média do canal para prever a área de alcance de fluxo de detritos não-vulcânicos. Horton et al. (2013) desenvolveram o Flow-R, modelo empírico distribuído que usa como entrada um MDT (modelo digital de terreno) e indica áreas propensas a iniciação de fluxo de detritos e emula uma propagação utilizando algoritmos de direcionamento. Outro exemplo é o *Avalanche Runout*, que utiliza o conceito de ângulo de alcance - relação entre a diferença de altura entre a zona de iniciação e a de deposição pela distância de propagação (COROMINAS, 1996) – junto ao algoritmo de direcionamento de fluxo D-inf (TARBOTON, 1997) para determinar a área de influência de um fluxo de detritos.

Com a proposta de um modelo topográfico com equações simplificadas de controle de escoamento, Chiang et al. (2012) simularam a propagação de fluxo de detritos por meio do acoplamento entre um módulo responsável pela estimativa do fluxo e outro responsável por seu direcionamento. Os autores consideraram que o escoamento se comporta como um fluido newtoniano (HUNT, 1994) e utilizaram o algoritmo de direcionamento de fluxo D-inf (TARBOTON, 1997), alcançando resultados com acurácia de até 80% ao comparar a área atingida observada e a simulada. Segundo Gregoret et al. (2016), esse tipo de modelo pode ser denominado como “conceitual fisicamente embasado” e possui a vantagem de simular o comportamento de fluxo de detritos em escala de bacia, enquanto outros modelos focam na propagação de um único movimento de massa. Além disso, diferente de grande parte dos modelos, ele consegue considerar a interação entre mais de um fluxo de detritos.

Gregoret et al. (2016) também procuraram simular fluxo de detritos em escala de bacia, baseando-se na ideia de Chiang et al. (2012). O algoritmo de direcionamento utilizado foi o D8 (O'CALLAGHAN; MARK, 1984) e o fluido foi considerado monofásico, com soluções de escoamento derivados das equações constitutivas de fluidos dilatantes. Além disso, o autor adicionou um módulo com relações empíricas para estimar a erosão e deposição de sedimentos ao longo do escoamento, conseguindo obter um volume de deposição simulado apenas 2% menor que o mensurado em campo.

#### 4.4.2.1 Algoritmos de direcionamento de fluxo

Ao desenvolver um modelo de propagação de fluxo de detritos, grande parte do foco recai sobre as equações de conservação de massa e de momento que regerão o escoamento. Entretanto, um aspecto de extrema importância e que estará intimamente ligado ao comportamento do fluido relaciona-se à forma como o modelo irá distribuir o fluxo no ambiente de análise (em um MDT, por exemplo). Para os modelos baseados em Sistemas de Informações Geográficas (SIG), que em geral não contabilizam a distribuição de velocidades em duas dimensões, uma alternativa é a aplicação de um algoritmo para a determinação do direcionamento do fluxo com base na topografia.

Os algoritmos de direção de fluxo baseiam-se na ideia de que o gradiente hidráulico pode ser estimado de acordo com a topografia obtida a partir de MDTs, comumente avaliando as elevações que circundam um pixel, ou seja, dentro de uma janela 3x3 (QIN et al., 2007). Esses algoritmos são bastante utilizados para extração de redes de drenagem em um terreno e delimitação automatizada de bacias hidrográficas.

Existem diversos algoritmos, com diferentes abordagens, mas basicamente são divididos em dois grupos:

i) fluxo único (*single flow direction* – SFD): indicarão uma única direção para o fluxo, mas podem distribuir o fluxo para mais de uma célula. Alguns dos algoritmos existentes são: D8 (O’CALAGHAN; MARK, 1984), D-inf (TARBOTON, 1997) e Rho8 (FARIFIELD; LEYMARIE, 1991).

ii) fluxo múltiplo (*multiple flow direction* – MFD): irão dar múltiplas direções para o escoamento, dividindo-os entre as células indicadas. Dentre os algoritmos existentes podem ser citados: FMFD (FREEMAN, 1991), MFD-Holmgren (HOLMGREN, 1994), QMFD (QUINN et al., 1991), MFD-md (QIN et al., 2007) e DEMON (COSTA-CABRAL, 1994).

O fato de um algoritmo considerar uma, duas ou múltiplas direções pode ser o suficiente para alterar significativamente o resultado de uma simulação de fluxo de detritos. Uma das limitações dos SFD está na predominância da convergência do fluxo, subestimando o espalhamento em áreas mais suaves. Já os algoritmos MFD poderão fornecer um espalhamento irreal do escoamento (WILSON, 2018). Esse espalhamento ocorre principalmente em regiões de transição de altas para baixas declividades, onde o

fluxo que deveria convergir para o canal, quando há o maior gradiente de declividade, começa a se dispersar em excesso (KISS, 2004).

Qin et al. (2013) realizaram testes aplicando os algoritmos D8, D-inf, FD8 e MFD-md para superfícies fictícias. O MFD-md apresentou menor erro na geração de redes de escoamento do que os demais em regiões mais suaves e teve desempenho semelhante ao D-inf em ambientes declivosos. Entretanto, os autores destacam que em ambientes reais eles podem se comportar de maneira diferenciada e são bastante dependentes da resolução do MDT.

A seguir serão apresentados o funcionamento dos algoritmos de direcionamento supracitados:

i) **D8 – deterministic eight-node algorithm** (O'CALLAGHAN; MARK, 1984): um dos primeiros algoritmos desenvolvidos para a determinação da direção de um escoamento a partir de um MTD. Cada pixel do ambiente irá indicar o fluxo para o pixel localizado no entorno que está com maior desnível negativo (Figura 12).

O declive ( $S_{D8}$ ) é calculado por:

$$S_{D8} = \max_{i=1,8} \left[ \frac{z_0 - z_i}{b \cdot \varphi_i} \right] \quad (4.13)$$

onde:  $z_0$  é a altura da célula central;  $z_i$  é a altura da  $i$  célula do entorno;  $b$  é a dimensão do pixel;  $\varphi_i$  é o coeficiente de aspecto (equivalência de distâncias entre os centros de duas células adjacentes), o qual será igual a 1 para células horizontais e verticais ao pixel e  $\sqrt{2}$  para células diagonais.

77	71	68	70	57	48	↘	↘	↘	↘	↓	↙
74	66	56	48	45	50	↘	↘	↘	↓	↙	↙
68	52	43	36	37	47	→	→	↘	↓	↙	↓
63	57	54	21	30	23	↗	↗	↘	↘	↓	↙
67	60	46	20	15	19	↘	↘	↘	↘	↙	↙
73	52	33	11	12	13	→	→	→	↓	←	←

Figura 12. Esquema de funcionamento do D8 de O'Callaghan e Mark (Zhang et al., 2015)

Como o algoritmo só indica uma saída, esse algoritmo faz com que o fluxo apresente grande convergência, mascarando os efeitos de espalhamento. Assim, esse algoritmo pode ser mais adequado para avaliar fluxos em um vale, mas pouco interessante para áreas muito planas ou em cumes onde há divergência de escoamento (WILSON, 2018).

ii) **Rho8 – Randomized eight-node algorithm** (FAIRFIELD; LEYMARIE, 1991): seu funcionamento tem como base o D8, a diferença está em uma componente do algoritmo que trabalha de maneira estocástica. O Rho8 foi elaborado visando superar uma limitação do D8 original, em que fluxos paralelos eram gerados em terrenos suaves. Para tanto, ao calcular o declive para as células diagonais, o fator de aspecto da Equação 4.13 é substituído por  $\phi(i) = 2-k$ , onde  $k$  é um valor randômico uniformemente distribuído entre 0 e 1. Por conta do caráter probabilístico, cada vez que o algoritmo for executado, novas direções de fluxo serão obtidas.

iii) **D-inf** (TARBOTON, 1997): O D-inf é um dos algoritmos mais utilizados para a delimitação de bacias e está disponível no pacote de ferramentas TauDEM (*Terrain Analysis Using Digital Elevation Models*). Seu nome provém da capacidade de direcionar o fluxo para um número infinito de direções. Ele trabalha com uma única direção de fluxo, que terá uma orientação entre 0 e  $2\pi$  voltada para o declive mais acentuado dentre oito feições triangulares formadas em um *grid* 3x3. A Figura 13 apresenta um esquema do funcionamento desse algoritmo.



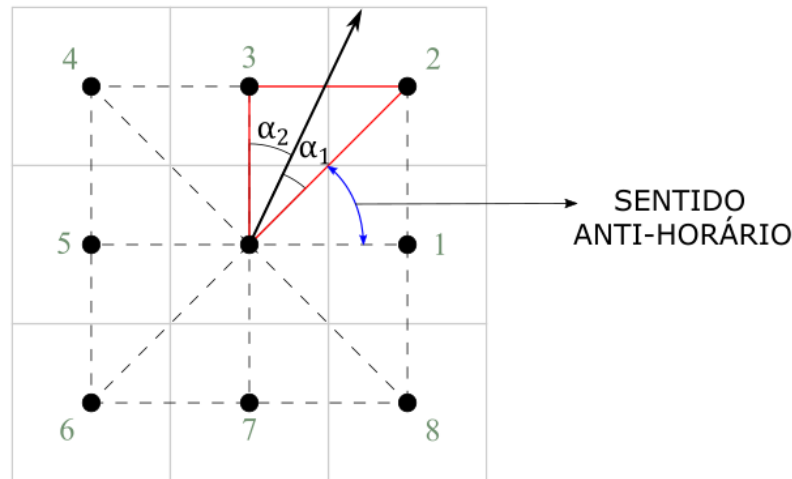


Figura 13. Diagrama de funcionamento do algoritmo D-inf  
(Adaptado de Tarboton, 1997)

O algoritmo verifica as declividades ao obter as diferenças de altura entre os centros focais dos 8 pixels circundantes. A partir da direção, são calculados os ângulos ( $\alpha_1$  e  $\alpha_2$ , conforme a Figura 12) formados entre o vetor do fluxo e as duas arestas das feições triangulares. Esses ângulos são calculados no sentido anti-horário a partir do Leste e são utilizados para particionar o fluxo entre duas células. A partição do fluxo é dada pelas seguintes expressões:

$$F_i = \frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} \quad (4.14)$$

$$F_{i+1} = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2} \quad (4.15)$$

onde:  $F_i$  é o escoamento particionado para a célula  $i$ ,  $F_{i+1}$  é o fluxo particionado para a célula seguinte no sentido anti-horário.

Nos casos em que há uma área muito plana ou depressões, o algoritmo marca o pixel como “não resolvido” e utiliza o D8 (O’CALLAGHAN; MARK 1984) para indicar o escoamento para um pixel vizinho de elevação semelhante que tenha sua direção de fluxo determinada. Dessa maneira, o algoritmo consegue evitar inconsistências como *loops* na direção de fluxo (TARBOTON, 1997).

iv) **D8-LTD:** (ORLANDINI et al., 2003): tem como base o algoritmo D-inf, no entanto, em vez de utilizar os ângulos para a determinação da direção do fluxo e particionar

o fluxo, irá utilizar o menor desvio transversal (*least transversal deviation* – LTD) entre o centro do pixel que receberá o fluxo e a direção teórica de drenagem. O desvio é calculado pelas seguintes expressões:

$$\delta_1 = d_1 \cdot \sin \alpha_1 \quad (4.16)$$

$$\delta_2 = (d_1^2 + d_2^2)^{\frac{1}{2}} \sin \alpha_2 \quad (4.17)$$

onde:  $\delta_1$  e  $\delta_2$  são os desvios associados às duas células que recebem o fluxo teórico;  $d_1$  e  $d_2$  correspondem às dimensões do pixel. Caso  $\delta_1 > \delta_2$ , o caminho irá para a célula 2 e vice-versa. Assim, apesar de utilizar o D-inf, essa adaptação simula o D8, mas de acordo com Wilson (2018), apresenta resultados mais verossímeis para a determinação de redes de drenagem do que o D8 original. A Figura 14 apresenta o esquema de funcionamento do algoritmo.

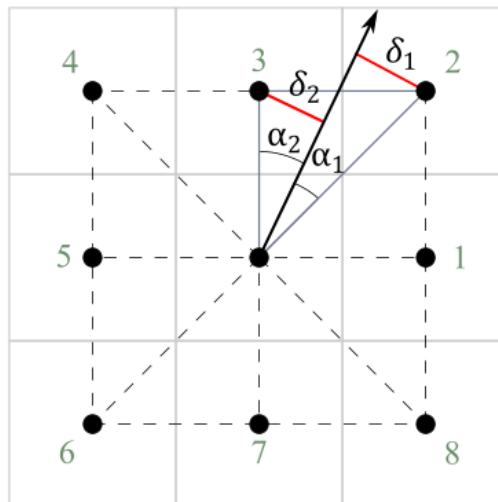


Figura 14. Representação do funcionamento do algoritmo D8-LTD (Orlandini et al., 2003)

v) **DEMON** – *digital elevation model network* (COSTA-CABRAL; BURGESS, 1994): esse algoritmo gera uma linha fictícia para cada pixel, que será levada até as bordas do MDT ou até encontrar uma depressão (*sink*). A direção do fluxo é calculada a partir dos quatro vértices do pixel:

$$a = \frac{1}{2\Delta x} (-c_1, c_2, c_3, -c_4) \quad (4.18)$$

$$b = \frac{1}{2\Delta y} (c_1, c_2, -c_3, -c_4) \quad (4.19)$$

onde:  $\Delta x$  e  $\Delta y$  são as dimensões do pixel em  $x$  e  $y$ ;  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$  e  $c_4$  são as altitudes dos vértices superior esquerdo, superior direito, inferior direito e inferior esquerdo, respectivamente. A direção será dada pelo vetor  $(ai + bj)$ . A direção de movimento, dessa maneira, não será limitada a diagonais, verticais e horizontais. Além do mais, esse método indica larguras de escoamento com base nas linhas de escoamento, criando um polígono de escoamento associado a cada pixel. A Figura 15 apresenta o esquema geral de funcionamento do direcionamento do DEMON em um *grid*.

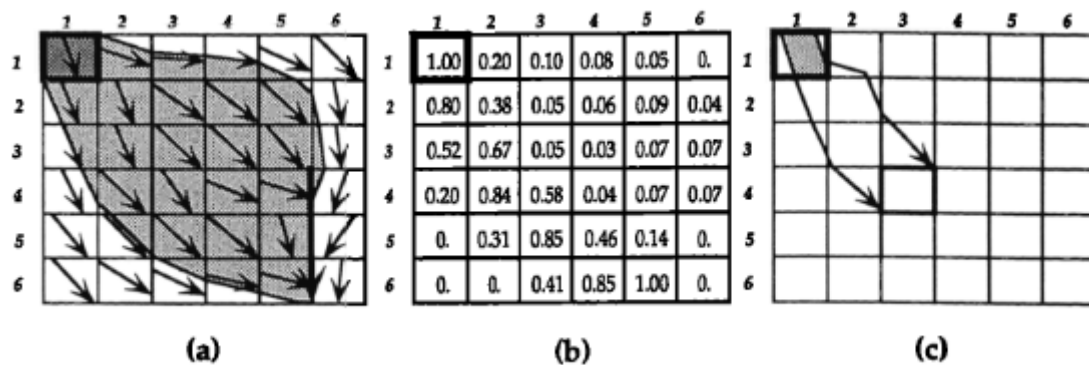


Figura 15. (a) esquema de direcionamento do DEMON. (b) matriz de influência, onde os valores das células indicam qual a fração de área que será drenada do pixel (1,1). (c) ilustração do significado físico do valor da matriz de influência – 58% do fluxo de (1,1) chega ao pixel (4,3). (COSTA-CABRAL; BURGESS, 1994)

Tarboton (1997) comenta que o código do DEMON método não é muito fácil de lidar, uma vez que sua programação é difícil e apresenta vários casos especiais que geram problemas nos resultados.

vi) **FMFD – Freeman's multiple flow direction** (FREEMAN, 1991): diferentemente dos algoritmos apresentados anteriormente, esse é capaz de distribuir o fluxo para mais de uma célula de acordo com a declividade. A distribuição de fluxos é calculada por:

$$F_i = \frac{(\tan \beta_i)^\eta}{\sum_{j=1}^n (\tan \beta_j)^\eta} \quad (\tan \beta_i > 0; n \leq 8) \quad (4.20)$$

onde:  $\beta_i$  é a declividade da célula  $i$ ;  $\eta$  é um expoente operacional que quando próximo de 1 estimula a dispersão do fluxo e quanto maior for seu valor, seu comportamento se aproxima de um algoritmo de fluxo único.

Quando o algoritmo encontrar uma área plana, em que os pixels do entorno possuem o mesmo valor, a direção do fluxo irá ser determinada considerando células que estão além do *grid* de análise 3x3. Esse procedimento é realizado até encontrar uma célula que possui altitude inferior à área plana.

vii) **QMFD – Quinn's multiple flow direction** (QUINN et al., 1991): esse algoritmo é semelhante ao FMFD, o diferencial está na consideração de uma largura hipotética para o escoamento.

$$F_i = \frac{L_i \tan \beta_i}{\sum_{j=1}^n L_j \tan \beta_j} \quad (\tan \beta_i > 0; n \leq 8) \quad (4.21)$$

onde:  $L_i$  é a largura do escoamento na célula  $i$ , sendo que  $L_i = 0,5b$  para células horizontais e verticais e  $L_i = 0,354b$  para as células diagonais. Em 1995, Quinn et al. realizou modificações na partição, assemelhando-se ainda mais ao FMFD:

$$F_i = \frac{L_i (\tan \beta_i)^\eta}{\sum_{j=1}^n L_j (\tan \beta_j)^\eta} \quad (\tan \beta_i > 0; n \leq 8) \quad (4.22)$$

viii) **MFD-md** (QIN et al., 2007): preocupados com a determinação do expoente  $\eta$  existente no FMFD e QMFD, Qin et al. propuseram um método em que o expoente de partição poderia ser extraído da própria topografia de análise. Assim são utilizados os gradientes de declividades de descida máximos (*maximum downslope – md*) para calcular a partição. Nos casos em que a declividade é muito acentuada, o algoritmo limita o espalhamento do algoritmo, enquanto em locais mais suaves, irá aumentar a dispersão:

$$f(e) = \begin{cases} \eta_l & ; e \leq e_{min} \\ \frac{e - e_{min}}{e_{max} - e_{min}} \cdot (p_u - p_l) + p_l & ; e_{min} < e < e_{max} \\ \eta_u & ; e \geq e_{max} \end{cases} \quad (4.23)$$

onde:  $e$  é um parâmetro determinado pela tangente da declividade que varia entre 0 e 1;  $\eta_u$  e  $\eta_l$  são os valores do expoente de espalhamento superior e inferior, respectivamente. O valor máximo de  $e$  será para 45° e mínimo para 0°. Assim, a formulação final fica:

$$F_i = \frac{L_i(\tan \beta_i)^{f(e)}}{\sum_{j=1}^n L_i(\tan \beta_j)^{f(e)}} \quad (\tan \beta_i > 0; n \leq 8) \quad (4.24)$$

ix) **MFD-Holmgren modificado** (HOLMGREN, 1994; HORTON et al., 2013): possui como base o algoritmo de Holmgren, que utiliza uma equação semelhante à Equação 4.20. Entretanto, a modificação feita por Horton et al. (2013) controla a rugosidade de MDTs de alta resolução, permitindo que os gradientes gerados por pequenas diferenças de altitude do terreno sejam atenuados, criando uma superfície mais suave. Essa modificação é feita partindo do pressuposto que um fluxo de detritos irá ignorar pequenas diferenças do terreno, como um obstáculo de 10 cm de altura, por exemplo.

#### 4.4.2.2 Condicionamento do MDT

Quando algoritmos de direcionamento são aplicados a um modelo digital de terreno, é de extrema importância que irregularidades, como depressões pontuais (*sinks* e *pits*), sejam corrigidas. As depressões comprometem a qualidade do direcionamento de fluxo por serem interpretadas como grandes gradientes de declividade, criando pontos de descontinuidade de fluxo, onde o entorno tende a escoar para as células espúrias (WILSON, 2018). Esse tipo de irregularidade é extremamente comum em MDTs, portanto foram desenvolvidas algumas ferramentas que propõem garantir a continuidade do fluxo.

Existem três formas principais de abordagem para a correção de depressões:

i) algoritmos que preenchem as depressões - aumentam a altitude do pixel considerado como *sink* até atingir a elevação do pixel de entorno de menor altitude (e. g. JENSON; DOMINGUE, 1988; WANG; LIU, 2006).

ii) algoritmos que escavam o terreno – cria um caminho de descida a partir do fundo da depressão por meio da escavação do terreno, onde o caminho tem sua elevação

diminuída até atingir um pixel que possua uma altitude tão baixa quanto o fundo da depressão (e. g. MARTZ; GARBRECHT, 1999; SOILLE; VOGT; COLOMBO, 2003).

iii) algoritmos mistos – combinam os dois métodos supracitados. Como exemplo, Reuter et al. (2009) desenvolveu um método que utiliza preenchimento e escavação em que o algoritmo procura minimizar as diferenças de elevação entre o MDT original e o MDT de saída.

De acordo com o Wilson (2018), apesar de serem necessários para diversas análises, os métodos de correção de depressões podem gerar alguns problemas. O primeiro deles está relacionado à criação de correções em ambientes que representam depressões reais e não problemas/erros associados aos métodos de elaboração do MDT. O segundo está na alteração dos atributos das encostas ao preencher depressões localizadas em vales, podendo criar atenuações de declividade pouco realistas. O terceiro, trata da dificuldade dos algoritmos de direcionamento em resolver direções de fluxo em terrenos muito planos, a qual é potencializada quando as depressões são preenchidas. Dessa maneira, o método utilizado para contornar o problema das depressões pode alterar significativamente o resultado dos algoritmos de direcionamento de fluxo.

#### **4.4.3 Fontes de incertezas na simulação de fluxos de detritos**

A modelagem nada mais é que uma representação de um fenômeno. Essa representação parte de pressupostos e possui simplificações, ora por convenção, ora pela limitação na compreensão dos processos e elementos envolvidos no sistema de análise. Tais pressupostos e simplificações dentro de um modelo irão causar certos desvios do resultado esperado (cenário futuro real). Esses desvios, por sua vez, constituirão as incertezas dentro das simulações. Como expressado por Lorenz (1963), ao enfatizar a existência de sistemas caóticos e sua sensibilidade às condições iniciais, um presente aproximadamente real não refletirá, necessariamente, em um futuro aproximadamente real. Dessa forma, ao procurar prever um comportamento, incertezas estarão associadas ao resultado obtido. Estas incertezas derivam de diferentes etapas, desde a aquisição de dados até a interpretação dos resultados (MONTANARI et al., 2009).

Primeiramente, em relação ao presente trabalho pode-se citar incertezas associadas à reologia. As equações constitutivas para fluidos acabam servindo como uma abstração de comportamentos das partículas envolvidas nos fluxos de detritos (IVERSON, 2003). As partículas dentro de uma mistura de água e sedimentos assumem diversos comportamentos

considerados aleatórios, o que adiciona um grau de imprevisibilidade que reflete no comportamento macro. Consequentemente, diversos mecanismos e pressupostos associados aos próprios equacionamentos geram níveis de incerteza dentro da simulação.

Outro nível de incerteza é adicionado durante a aquisição dos parâmetros reológicos. Parâmetros como a viscosidade são comumente determinados em escala de laboratório, portanto estão sujeitos às limitações do aparato utilizado (COLEMAN; STEELE, 2009; HUNT et al., 2002). Além do mais, podem surgir erros humanos durante a realização dos ensaios. Ainda no âmbito das viscosidades, Jan e Shen (1997) apontam pequenas diferenças na composição da mistura testada podem alterar drasticamente os valores. Experimentos realizados por Major e Pierson (1992) mostraram que o pequeno aumento de concentrações (2% para 4%) de sedimentos pode aumentar em um grau de magnitude os valores de tensão crítica.

Além dos parâmetros reológicos, as simulações de fluxo de detritos dependem da representação do terreno por onde se propagará. Por conta do avanço das ferramentas em SIG tornou-se extremamente comum a utilização de MDTs. Conforme explicitado por Wilson (2018), existem diversas maneiras de elaborar os MDTs com diversos níveis de requinte, entretanto, independente da técnica, erros podem ser introduzidos em diferentes etapas: escolha de sensor, método de aplicação do sensor, método de tratamento das informações coletadas e também particularidades da área de estudo.

Para diversos modelos fisicamente embasados a constituição da mistura a ser propagada é de extrema importância. Entretanto, quando se busca prever as áreas de alcance de fluxos de detritos que virão a ocorrer, não é possível determinar com total certeza as características da mistura. Além do mais, as propriedades da mistura irão se alterar ao longo da ocorrência de um fluxo de detritos, uma vez que as frações de água, ar e sólidos mudam continuamente até o fim do percurso.

Também existem problemas associados a escassez de dados. Por vezes os modelos contam com abordagens matemáticas e numéricas robustas, procurando descrever o fenômeno de maneira fidedigna à realidade, mas em compensação acabam limitando a aplicação à reprodução de eventos já ocorridos e exigem inúmeros parâmetros de entrada. Quando se trata da aplicação do modelo para obtenção de áreas suscetíveis a fluxo de detritos, o desconhecimento de alguns parâmetros acumulará incertezas que levarão a cenários pouco verossímeis.

A falta de dados continua um problema a ser superado e o desenvolvimento de metodologias para áreas com escassez de informações continuam sendo alvo de estudos

dentro da hidrologia (*e.g.* WORQLUL et al., 2017; BASHEER; ELAGIB, 2019; FALAH et al., 2019), inclusive voltados a fluxo de detritos (*e.g.* MOSTBAUER et al., 2018; PAN et al., 2018). Por tais motivos, quando se procura representar um fenômeno com limitações associadas a disponibilidade de dados, modelos simplificados, que exigem poucos parâmetros de entrada, mas que procuram representar o fenômeno de forma adequada, podem reduzir incertezas quando comparados a situações de utilização de modelos extremamente parametrizados.

Ao se tratar de simulações numéricas, existem incertezas geradas por erros acumulados durante os procedimentos de cálculo. Esses erros podem ser gerados ao utilizar séries truncadas para representar algumas expressões, arredondamentos e desconsideração de alguns fatores nas equações, que irão se propagar ao longo do procedimento de cálculo, criando erros de ordens maiores (BORCHE, 2008).

Segundo Eidsvig et al. (2014) existem também incertezas associadas à qualidade da interpretação e tratamento dos resultados, as quais estarão interligadas às incertezas acumuladas durante etapas de aquisição de dados e implementação do modelo.

#### **4.4.4 Contexto modelagem na gestão de risco para fluxo de detritos**

Como já explicitado, o mapeamento de perigo é fundamental para a gestão de risco de desastres. Nesse contexto, a modelagem matemática fisicamente embasada surge como uma ferramenta útil para a determinação das áreas suscetíveis aos efeitos dos fluxos de detritos. Além do mais, a modelagem permite avançar o entendimento acerca dos processos envolvidos no fluxo de detritos.

Uma das vantagens das metodologias baseadas em modelos físicos sobre outras metodologias está na retirada da subjetividade de análise e na universalidade de aplicação. Nesse sentido, esses modelos vêm como uma forma de simular o comportamento e propagação de um fluxo de detritos, fornecendo cenários que apresentam os locais que podem ser atingidos. Com o advento das ferramentas de Sistema de Informações Geográficas e sensoriamento remoto, aliado ao aumento do poder computacional, as simulações podem abranger áreas maiores, facilitando o processo de mapeamento de áreas potencialmente perigosas.

Contudo, muitos desses modelos são bastante parametrizados, uma vez que buscam representar fielmente os processos físicos que governam o fenômeno e, portanto, sua utilização torna-se onerosa. Tendo a realidade brasileira em mente, que sofre com escassez



de dados, modelos simples e confiáveis passam a ser uma necessidade. Por essa razão, é de suma importância que modelos simplificados, que exigem poucos parâmetros de entrada estejam disponíveis para uso. Entretanto, as simplificações podem incutir limitações severas, prejudicando a qualidade dos resultados das simulações e criando resultados pouco confiáveis. Consequentemente, há a necessidade de refinar tais modelos, aumentando sua eficácia sem comprometer sua simplicidade.

Os modelos propostos por Chiang et al. (2012) e Gregoretti et al. (2016) propõem metodologias fisicamente embasadas, mas que são de simples aplicação e podem ser realizadas em escala de bacia, permitindo que diferentes fluxos de detritos possam interagir e convergir. Gregoretti et al. (2016) destaca que a abordagem ainda requer maiores testes para a validação e que sejam implementadas outras maneiras para a avaliação do direcionamento do fluxo. Nesse sentido, um dos pontos pouco explorados dentro da modelagem para fluxo de detritos é o critério de direcionamento do escoamento, que pode ser determinante nos resultados de uma simulação. Dentro do âmbito da hidrologia, existem diversos algoritmos que foram aperfeiçoados para representar da forma mais adequada possível as redes de drenagem dentro de um modelo digital de terreno, mas o comportamento de um fluxo de detritos não é idêntico ao do escoamento superficial de água. Dessa maneira, ainda não foi verificado como diferentes critérios de direcionamento de escoamento podem alterar os resultados de uma simulação de propagação de fluxo de detritos (GREGORETTI et al., 2016).

Além do mais, esses algoritmos podem traduzir melhor o comportamento de um fluxo de detritos com características específicas. Dessa forma, também é interessante que haja uma análise do comportamento do escoamento para diferentes abordagens reológicas combinadas a diferentes algoritmos de direcionamento.

## 5 MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho pode ser dividido em três etapas distintas. O fluxograma da Figura 16 apresenta os passos a serem realizados. Primeiramente será exposta a metodologia, em seguida a área de estudo.

### 5.1 METODOLOGIA

#### 5.1.1 Etapa 1 – desenvolvimento e implementação do modelo simplificado

A primeira etapa consiste na implementação do modelo para propagação de fluxos de detritos, inspirado no trabalho de Chiang *et al.* (2012). Esse é um modelo matemático de propagação de fluxo de detritos simplificado, determinístico e fisicamente embasado. A base do modelo é composta pelo acoplamento de um modelo de escoamento com um algoritmo de determinação de direcionamento de fluxo. As etapas de cálculo foram programadas na linguagem Python 3.7.x, a qual é desenvolvida sob licença livre, sendo gratuita para uso e distribuição. *Softwares* de geoprocessamento como o QGIS possuem suporte e integração com essa linguagem, permitindo fácil implementação de ferramentas e algoritmos desenvolvidos para esses ambientes.

##### 5.1.1.1 Modelo de escoamento para fluido newtoniano

Nesse modelo é utilizada uma abordagem de fluido newtoniano de uma fase, ou seja, uma mistura homogênea sem distinção entre o comportamento da água e dos sedimentos.

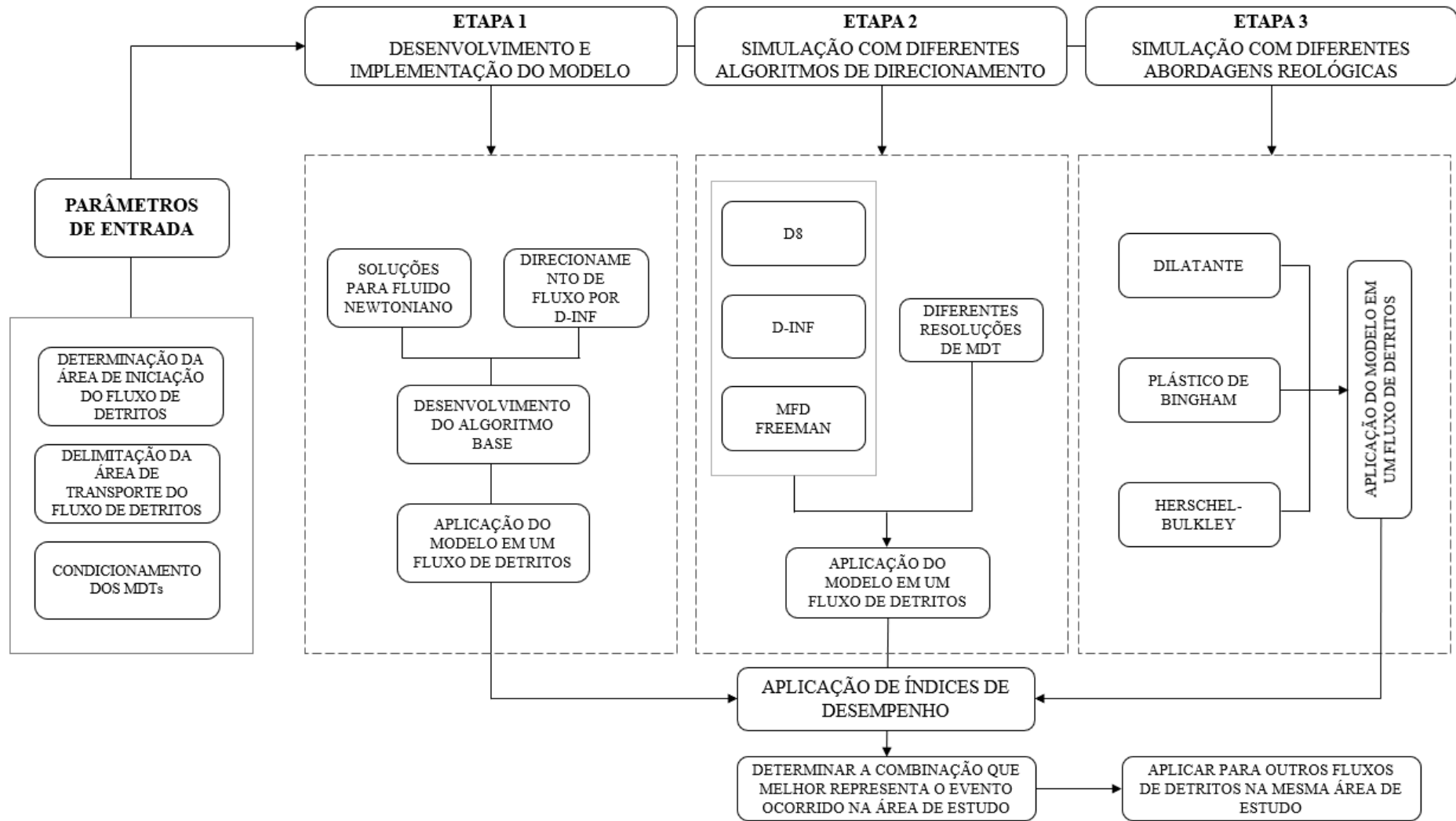


Figura 16. Fluxograma da metodologia do trabalho

O modelo interpreta a célula como um canal, conforme a Figura 17, onde os seguintes pressupostos são adotados:

- i) Escoamento completamente desenvolvido, permanente e uniforme;
- ii) O escoamento possui regime laminar;
- iii) A mistura é um contínuo monofásico que se comporta como fluido newtoniano ideal;
- iv) A resistência promovida pela superfície em que se escoam está traduzida na própria viscosidade do fluido newtoniano;
- v) As seções transversais são consideradas retangulares;
- vi) O volume do fluxo dentro da célula é uma função da profundidade do fluxo;
- vii) A saída e entrada de fluxo na célula ocorrem simultaneamente;
- viii) A vazão de saída de uma célula não pode superar o volume existente no tempo anterior;

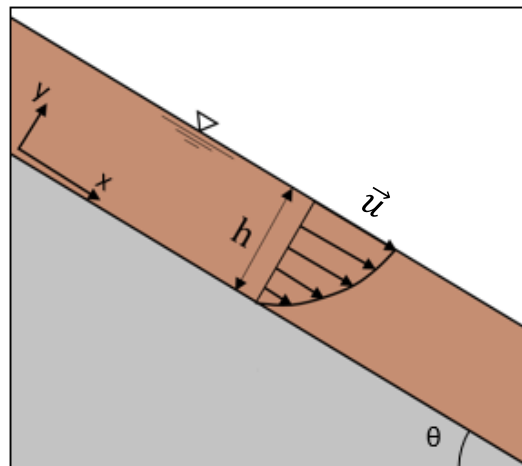


Figura 17. Esquema de encosta com propagação de fluxo de detritos.  
(Adaptado de Hunt, 1994)

A solução utilizada para estimar o fluxo que passa por uma célula se baseia no trabalho de Hunt, (1994). A solução parte das equações de Navier-Stokes e de continuidade para duas dimensões (sendo  $x$  a componente paralela ao fundo e  $y$  a componente perpendicular ao fundo):

$$-\frac{\partial p}{\partial x} + \rho g \sin \theta + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) = \rho \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial t} \right) \quad (5.1)$$

$$-\frac{\partial p}{\partial y} + \rho g \cos \theta + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) = \rho \left( u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial t} \right) \quad (5.2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (5.3)$$

onde  $p$  é a pressão;  $u$  e  $v$  são as velocidades nas componentes  $x$  e  $y$ , respectivamente;  $\theta$  é o ângulo da encosta;  $\mu$  é a viscosidade dinâmica do fluido;  $\rho$  é a massa específica do fluido. Tem-se como pressupostos o escoamento permanente e completamente desenvolvido, portanto  $u$  e  $p$  irão depender apenas de  $y$  e a velocidade vertical passa a ser desprezada. Assim, a solução torna-se:

$$g \sin \theta + \nu_N \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0 \quad (5.4)$$

$$-\frac{\partial p}{\partial y} - \rho g \cos \theta = 0 \quad (5.5)$$

em que  $\nu_N = \mu/\rho$  e é a viscosidade cinemática para fluido newtoniano. Assume-se um perfil de velocidades em que  $u$  junto ao fundo e as tensões cisalhantes na superfície são nulas. A velocidade em ponto qualquer da componente  $y$  é dada por:

$$u = \frac{g}{2\nu_N} [h^2 - (h - y)^2] \sin \theta \quad (5.6)$$

Assim, considerando que o escoamento possui uma altura  $h$ , o fluxo unitário ( $q$ ) pode ser determinado por uma integração da variação da velocidade ao longo da componente  $y$ :

$$q = \int_0^h u \, dy = \frac{gh^3}{3\nu_N} \sin \theta \quad (5.7)$$

Dessa maneira, a velocidade média do perfil ( $U$ ) pode ser expressa por:

$$U = \frac{q}{h} = \frac{gh^2}{3\nu_N} \sin \theta \quad (5.8)$$

As formulações finais são denominadas como aproximação de onda-cinemática (*kinematic wave*). Com essa equação é possível estimar a variação das alturas e dos fluxos em cada incremento de tempo.

#### 5.1.1.2 Transferência do escoamento no grid

Para avaliar a mudança transiente da profundidade do escoamento do fluxo de detritos, a seguinte equação de conservação de massa é utilizada:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla q = 0 \quad (5.9)$$

Essa equação exprime um balanço de entradas e saídas em um volume de controle aberto interligado por outras oito unidades, que são os *pixels* do entorno (Figura 18).

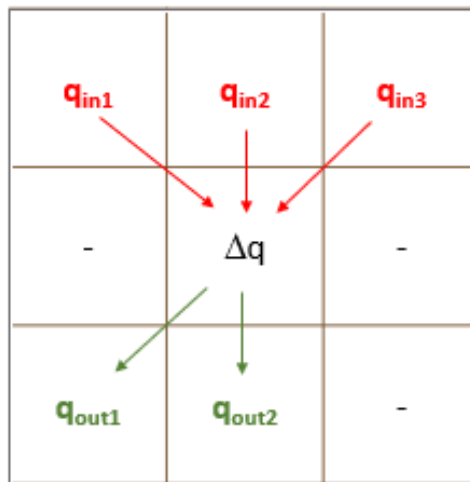


Figura 18. Esquema da conservação de massa em um *grid*

Assim, ao discretizar a Equação 5.9 por uma aproximação de diferenças finitas pelo método de Euler para equação diferencial ordinária, a altura do escoamento de uma célula no tempo  $t$  é expressa por:

$$h(t) = h(t - 1) + \frac{\Delta t}{b} \left( \sum_{i=1}^8 q_{in} - \sum_{i=1}^8 q_{out} \right) \quad (5.10)$$

onde:  $b$  é a dimensão da célula [m];  $q_{in}$  é o fluxo proveniente das oito células envolta da célula em análise [m<sup>2</sup>/s];  $q_{out}$  [m<sup>2</sup>/s] é o fluxo que sai da célula em análise para as oito células adjacentes. A acurácia desse método estará diretamente ligada ao intervalo de tempo ( $\Delta t$ ), na qual menores intervalos resultarão em uma solução mais adequada (HORNBERGER; WIBERG, 2013).

Dessa maneira, o fluxo que sai da célula é calculado e redistribuído para as células indicadas pelo algoritmo de direcionamento de fluxo. Esse cálculo ocorre até atingir o critério de parada.

O método para determinar o direcionamento de fluxo tem como base o D-inf concebido por Tarboton (1997), em que o respectivo funcionamento foi descrito na seção 4.4.2.1.

#### 5.1.1.3 Critério de parada

De acordo com Chiang et al. (2012), estipular previamente o tempo de simulação de um fluxo de detritos torna-se um desafio à nível de bacia, visto que na ocorrência de inúmeros fluxos de detritos, cada um possuirá uma velocidade diferente. Portanto, é interessante haver um outro critério que determine a parada do algoritmo.

Para tanto, Chiang et al. (2012) utilizou a raiz do valor quadrático médio (ou *root mean square – RMS*) da diferença das alturas entre os tempos  $t$  e  $t-1$ . A fórmula do *RMS* para este caso é dada por:

$$h_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (h_t - h_{t-1})_i^2} \quad (5.11)$$

onde  $h_{RMS}$  é o RMS da altura para as células entre os tempos  $t$  e  $t-1$  [m].

Entretanto para áreas muito grandes com pequenas áreas de iniciação de fluxo de detritos poderiam encerrar a simulação precocemente. Dessa forma, foi utilizado como

critério de parada a máxima diferença de alturas entre os tempos  $t$  e  $t-1$ . Os valores testados variam de 0,1 a 0,001 m.

#### 5.1.1.4 *Coefficiente de espalhamento*

Um dos problemas apresentados por Chiang et al. (2012) está no espalhamento do fluxo de detritos além do limite das manchas observadas. Uma primeira medida que pode ser tomada é a inserção de um coeficiente que limite a distribuição do fluxo, chamado de coeficiente de espalhamento. Esse coeficiente é utilizado no *D-inf Avalanche Runout*, uma ferramenta que cria manchas de propagação de fluxos a partir do ângulo de alcance (COROMINAS, 1996), o qual é formado entre o ponto de origem do fluxo e o ponto de maior alcance do fluxo.

Basicamente, o coeficiente impõe um limite para a distribuição de fluxos entre células: nos casos em que a porcentagem de fluxo a ser distribuída for menor do que o coeficiente informado, a partição do fluxo é negligenciada e é redirecionada para a célula mais favorável, ou seja, para a que resultar numa maior declividade.

#### 5.1.1.5 *Funcionamento geral do modelo*

De acordo com o procedimento exposto, o funcionamento do modelo é expresso pelo fluxograma da Figura 19.

Primeiramente, a partir das áreas de estudo obtêm-se os parâmetros de entrada para aplicação do modelo, os quais são:

- i) MDT da área de estudo, com unidade em metros. Deve ser realizado o preenchimento de depressões (*sinks*), as quais podem afetar a qualidade do resultado do algoritmo de direcionamento;
- ii) *grid* indicando as declividades associadas a cada pixel (°);
- iii) zona de iniciação do fluxo de detritos ( $A_{in}$ ), referente a área que fornece o volume para o escoamento. Essa entrada é fornecida na forma de um *grid* para determinar as condições iniciais;



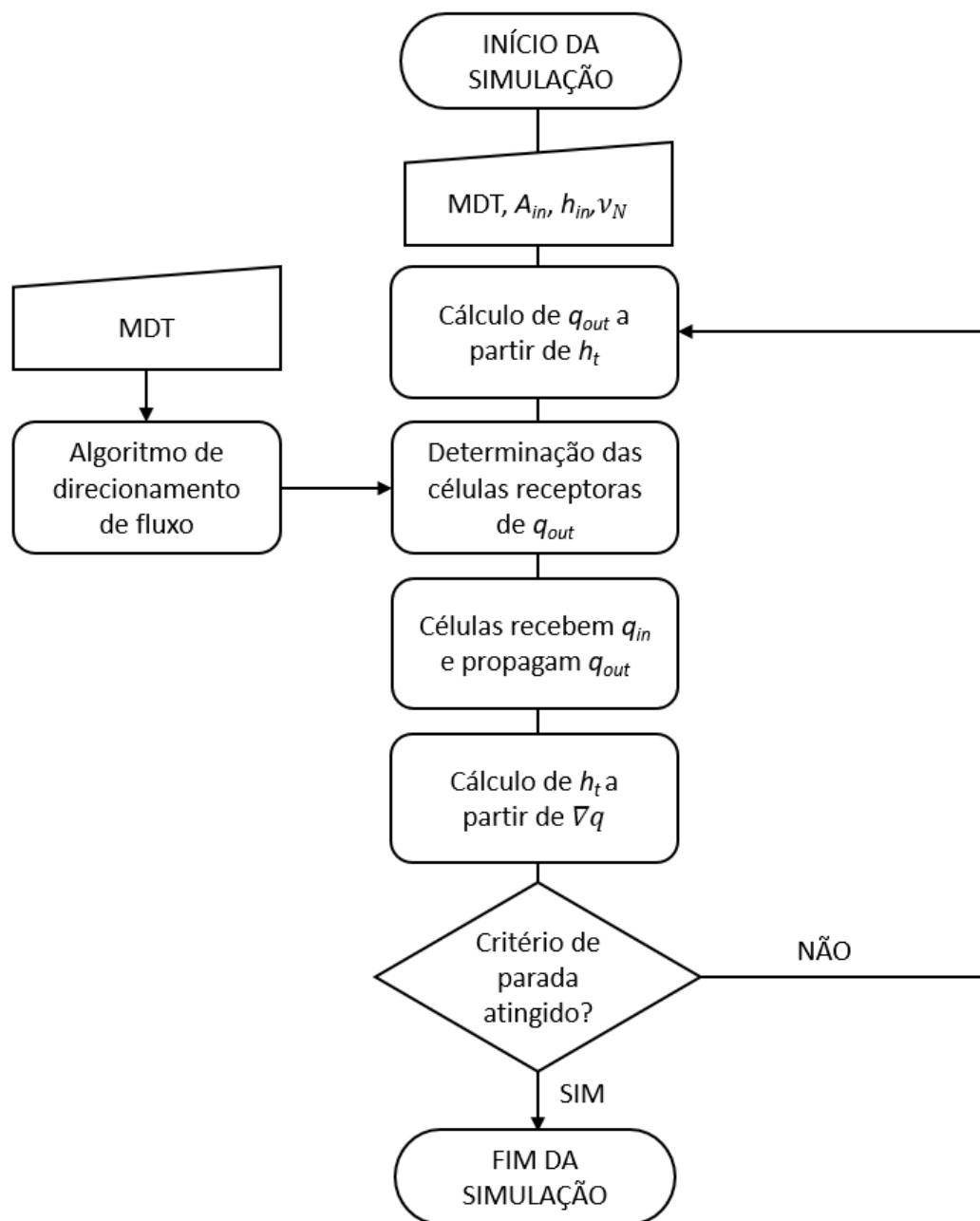


Figura 19. Fluxograma de funcionamento do modelo

iv) profundidade da superfície de ruptura ( $h_{in}$ ) [m], que será associada a área de iniciação, constituindo o volume a ser propagado. É informada de maneira distribuída a partir de um *grid* ou na forma de uma profundidade média assumida para todos os pixels contidos dentro da área de iniciação;

v) viscosidade cinemática para fluido newtoniano ( $v_N$ ) [m<sup>2</sup>/s], o qual pode ser estimado a partir da viscosidade dinâmica ( $\mu$ ) e massa específica ( $\rho$ ). Neste trabalho a viscosidade cinemática serve como parâmetro de calibração manual.

Além dos supracitados, existem parâmetros operacionais:

- i) coeficiente de espalhamento ( $C_{esp}$ ) [%] – disponível somente para D-inf;
- ii) intervalo de temporal para realização dos cálculos ou *time step* ( $\Delta t$ ) [s];
- iii) valor do critério de parada (variação máx. da altura) [m].

Inseridas todas as entradas, o algoritmo iniciará os cálculos. Ao fornecer as áreas de iniciação do fluxo, junto às profundidades, as células tem suas respectivas alturas iniciais de escoamento. A partir disso, é calculado o primeiro afluxo ( $q_{out}$ ) para cada uma das células considerando as alturas de escoamento iniciais. Em seguida são determinadas as células receptoras a partir de informações fornecidas pelo algoritmo de direcionamento de fluxo. Então, ocorre o influxo e afluxo simultaneamente, gerando uma variação de altura na célula. A partir dos volumes propagados, uma nova altura  $h_t$  é calculada para a célula. O critério de parada verifica se a máxima variação das alturas foi inferior ao valor pré-estabelecido. Caso essa variação for inferior ao valor informado, a simulação é encerrada, caso contrário os afluxos são recalculados com base em  $h_t$ .

O modelo permite extrair informações de velocidade e profundidade do escoamento de acordo com um intervalo de iterações fornecidas pelo usuário. Por exemplo, se informado o valor 30, a cada 30 iterações será salvo um *grid* de velocidades e de profundidade de escoamento.

### 5.1.2 Etapa 2 – simulações com diferentes algoritmos de direcionamento

A segunda etapa foca na avaliação da influência de diferentes algoritmos de direcionamento de fluxo. Os seguintes algoritmos foram testados: D8, FMFD e D-inf. O funcionamento de cada um dos algoritmos foi descrito na seção 4.4.2.1. Cada um deles foi utilizado em conjunto com as soluções de escoamento propostas por Hunt (1994), apresentadas na seção 5.1.1.1.

As informações de direção para D8 e D-inf foram obtidas utilizando a ferramenta TauDEM (TARBOTON et al., 2009) e então os *rasters* resultantes foram utilizados como entrada para o modelo. O D-inf permite inserir o coeficiente de espalhamento, que limita a dispersão do fluxo caso a porcentagem de partição seja inferior ao valor inserido. Nas simulações realizadas, foi utilizado um coeficiente de valor zero.

Já os algoritmos de MFD dão como saída apenas as direções que serão tomadas, sem conter as informações da partição do fluxo entre as células. Isso ocorre por ser uma informação que não seria representável no formato *raster*, uma vez que cada célula

precisaria fornecer até nove informações. Assim, a determinação do FMFD precisou ser reprogramada e implementada diretamente no modelo para possibilitar as simulações.

Como se percebe no equacionamento do método FMFD, há um expoente que define o comportamento do fluido e, em diversos algoritmos, este valor está fixado. Nesse modelo, optou-se por permitir definir o valor desse expoente operacional ( $\eta$ ). Dessa forma, para cada um dos métodos, os arquivos de entrada são diferentes (Tabela 4):

Tabela 4. Informações de entrada de acordo com o método de direção de fluxo

<b>INFORMAÇÕES DE ENTRADA</b>	<b>D8</b>	<b>D-INF</b>	<b>FMFD</b>
Viscosidade	X	X	X
<i>Raster</i> de declividade	X	X	X
Área de iniciação	X	X	X
MDT	-	-	X
<i>Raster</i> de direção de fluxo	X	X	-
Coefficiente de espalhamento	-	X	-
Expoente operacional ( $\eta$ )	-	-	X
Critério de parada	X	X	X
Intervalo de tempo ( <i>time step</i> )	X	X	X

Cada um dos métodos foi simulado para MDTs de resolução de 1 m, 2,5 m, 5 m e 10 m. As viscosidades cinemáticas utilizadas variaram de 0,00001 m<sup>2</sup>/s a 1 m<sup>2</sup>/s, baseadas na amplitude de parâmetros reológicos medidos ou calculados a partir de fluxos de detritos observados (PHILLIPS; DAVIES, 1991). Além do mais, o valor do critério de parada testado variou entre 0,001 m e 0,1 m.

### 5.1.3 Etapa 3 – simulações com solução para diferentes reologias

Nesta etapa foram testadas diferentes abordagens reológicas, além das soluções para fluido newtoniano, sendo elas plástico de Bingham, Herschel-Bulkley e dilatante. Cada uma conta com uma solução que parte de sua equação constitutiva. Ademais, cada uma das abordagens foi testada com o algoritmo de direcionamento que teve o melhor desempenho para o MDT com resolução de 1 m.

### 5.1.3.1 Plástico de Bingham

Um plástico de Bingham somente começa a se movimentar a partir de um valor de tensão de cisalhamento crítica. Logo, pode-se dizer que a taxa de deformação do fluido é dada por:

$$\mu_b \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \begin{cases} 0, & \tau < \tau_y \\ \tau - \tau_y, & \tau \geq \tau_y \end{cases} \quad (5.12)$$

A partir do momento em que há movimento a taxa de deformação passa a ser linearmente proporcional à viscosidade dinâmica. Ao considerar o esquema da Figura 20 pode-se notar que existe uma camada em que a velocidade de movimento é máxima e constante ao longo de sua extensão. Essa camada é chamada de *plug*.

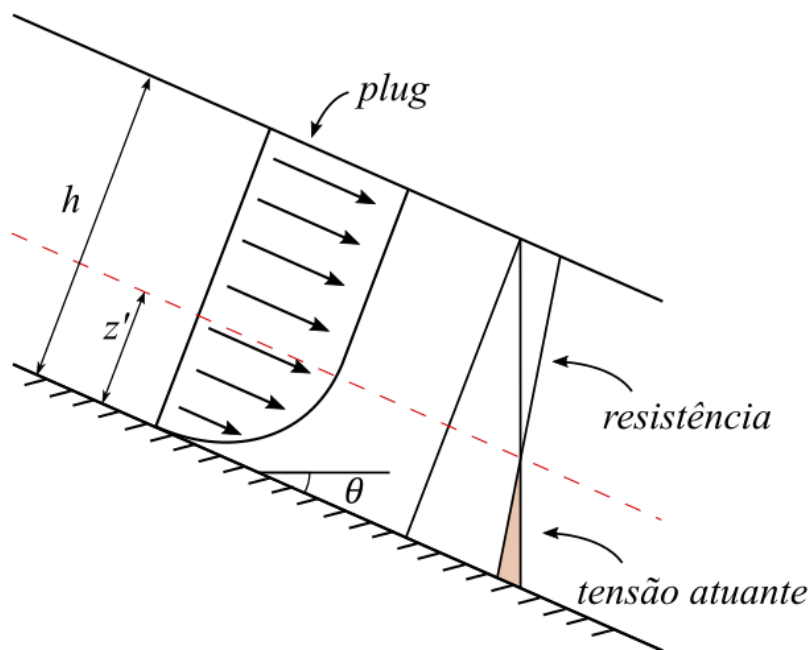


Figura 20. Perfil de velocidades para um plástico de Bingham

De acordo com Jan e Shen (1997), ao considerar que  $\tau_y$  e  $\mu_b$  são constantes, em regime permanente, uniforme, a velocidade ao longo do perfil pode ser dada por:

$$u = \frac{g \cdot z'^2 \cdot \sin \theta}{\nu_B} \left[ \frac{y}{z'} - \frac{1}{2} \left( \frac{y}{z'} \right)^2 \right] \quad (5.13)$$

onde:  $\nu_B$  é a viscosidade cinemática para um plástico de Bingham. Considerando a Equação 5.13, podem ser obtidos o fluxo e a velocidade média:

$$q = \int_0^{z'} u \, dy = \frac{g \cdot z'^3 \sin \theta}{\nu_B} \left( \frac{1}{2} - \frac{z'}{6h} \right) \quad (5.14)$$

$$U = \frac{g \cdot z'^2 \sin \theta}{\nu_B} \left( \frac{1}{2} - \frac{z'}{6h} \right) \quad (5.15)$$

Desse modo, se a profundidade  $h$  for igual a  $z'$ , significa que todo o ambiente está fluidificado, reduzindo-se a uma equação semelhante a Equação 5.8. As alturas do *plug* testadas foram de 2,5; 5,0; 7,5 e 10,0 cm

#### 5.1.3.2 Fluido de Herschel-Bulkley

Um fluido de Herschel-Bulkley também se movimenta apenas após uma tensão de cisalhamento crítica ser atingida. Portanto, a taxa de deformação é expressa por:

$$K_{HB} \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^m = \begin{cases} 0, & \tau < \tau_y \\ \tau - \tau_y, & \tau \geq \tau_y \end{cases} \quad (5.16)$$

Esse tipo de fluido também possui um *plug*, que tende a se tornar mais espesso conforme a diminuição do coeficiente  $m$  (HUANG; GARCÍA, 1998). De acordo com Jan e Shen (1997), o perfil de velocidades e a velocidade média são dados pelas seguintes equações:

$$u = \left( \frac{m}{m+1} \right) \left( \frac{g \cdot z'^{m+1} \cdot \sin \theta}{\nu_{HB}} \right)^{\frac{1}{m}} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{y}{z'} \right)^{\frac{m+1}{m}} \right] \quad (5.17)$$

$$U = \left( \frac{m}{m+1} \right) \left( \frac{g \cdot z'^{m+1} \cdot \sin \theta}{\nu_{HB}} \right)^{\frac{1}{m}} \left( 1 - \frac{m}{2m+1} \frac{z'}{h} \right) \quad (5.18)$$

onde  $\nu_{HB} = K_{HB} / \rho_{HB}$  e é a viscosidade cinemática para um fluido de Herschel-Bulkley. Pode-se notar que um coeficiente  $m = 1$ , a equação reduz-se a um plástico de Bingham e, adicionalmente, caso  $y = z'$ , então será reduzida a uma equação típica de um fluido newtoniano.

Para este fluido, foram testadas abordagens pseudoplásticas ( $m < 1$ , sendo utilizados os valores de 0,6 e 0,8) e dilatantes ( $m > 1$ , sendo utilizados valores de 1,2 e 1,4). Para cada um dos coeficientes comportamentais utilizados foram aplicadas *plugs* com alturas de 2,5; 5,0; 7,5 e 10,0 cm.

### 5.1.3.3 Fluido dilatante

A abordagem para fluido dilatante considera que o fluido sofrerá deformação a partir de qualquer tensão cisalhante imposta. As soluções para o perfil de velocidades e velocidade média são apresentadas a seguir:

$$u = \left( \frac{n}{n+1} \right) \left( \frac{g \cdot h^{n+1} \cdot \sin \theta}{\nu_d} \right)^{\frac{1}{n}} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{y}{h} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right] \quad (5.19)$$

$$U = \left( \frac{n}{n+1} \right) \left( \frac{g \cdot h^{n+1} \cdot \sin \theta}{\nu_d} \right)^{\frac{1}{n}} \left( 1 - \frac{n}{2n+1} \right) \quad (5.20)$$

onde  $\nu_d = K_d / \rho_d$  e é a viscosidade cinemática para um fluido dilatante. O comportamento esperado por um fluido dilatante é o aumento da resistência à deformação conforme o aumento da tensão cisalhante. Assim, o coeficiente  $n$  deve ser maior que 1. Caso  $n = 2$ , a equação tornar-se-á a solução para regime colisional proposta por Bagnold (1954). Foram utilizados os valores de 1,2; 1,4; 1,6; 1,8 e 2,0 para testar o comportamento do fluido.

### 5.1.4 Avaliação de desempenho

Ao simular a propagação do fluxo de detritos na área de estudo (a qual será apresentada na seção 5.2), espera-se a concordância da mancha simulada com as cicatrizes de fluxo de detritos observadas. Para avaliar essa concordância e o desempenho

das simulações, são utilizados índices elaborados a partir de uma matriz de confusão. Tais índices permitem a construção de curvas ROC adaptadas, as quais servem para comparar o desempenho entre simulações com diferentes algoritmos de direcionamento de fluxo e diferentes abordagens reológicas.

#### 5.1.4.1 Matriz de confusão e índices para avaliação da simulação

Os índices variam a partir da matriz de confusão (Figura 21), comumente utilizados dentro de análises preditivas (FAWCETT, 2006). No contexto deste trabalho, verdadeiros positivos (VP) indicam células atingidas pelo fluxo de detritos que estão dentro da delimitação das cicatrizes; falsos positivos (FP) são células atingidas que estão fora das cicatrizes; falsos negativos (FN) são células não atingidas na simulação, mas que estão dentro da delimitação de cicatrizes; verdadeiros negativos (VN) são células exteriores a cicatrizes e que não foram atingidas na simulação. Os valores absolutos de VN não são utilizados nas métricas, uma vez que a área total da bacia é muito maior que área de cicatrizes. Um grande número de VN cria uma tendência nos índices, dando uma falsa noção de boa qualidade para as simulações, portanto, foi utilizada a estratégia empregada por Mergili et al. (2015), onde VN será 5 vezes a área da cicatriz.

	<b>Condição real positiva</b>	<b>Condição real negativa</b>
<b>Condição simulada positiva</b>	Verdadeiro positivo (VP)	Falso positivo (FP)
<b>Condição simulada negativa</b>	Falso negativo (FN)	Verdadeiro negativo (VN)

Figura 21. Matriz de confusão base para os índices

São utilizados os seguintes índices:

a) taxa de verdadeiros positivos (*true positive ratio* – TPR) – indica a taxa de acerto da simulação. Uma noção simples de quanto foi acertado, semelhante ao Índice de

Acerto proposto por Sorbino et al. (2010). Valores próximos de 1 indicam melhor desempenho:

$$TPR = \frac{VP}{A_{cicatriz}} \quad (5.21)$$

sendo que:  $A_{cicatriz}$  é a área da cicatriz.

b) taxa de falsos positivos (*false positive ratio – FPR*) (similar ao Índice de Erro apresentado por SORBINO et al., 2010) – indica a proporção de falsos positivos sobre os verdadeiros negativos:

$$FPR = \frac{FP}{FP + VN} \quad (5.22)$$

c) taxa de falsos negativos (*false negative ratio – FNR*) – indica a proporção de condições reais positivas não acertadas pelo modelo. A situação perfeita possui valor igual a 0:

$$FNR = \frac{FN}{A_{cicatriz}} \quad (5.23)$$

d) taxa de falsa descoberta (*false discovery ratio – FDR*) – indica a proporção de condições simuladas positivas que extrapolam as condições reais positivas observadas, ou seja, indica a fração da área simulada que está fora da cicatriz:

$$FDR = \frac{FP}{FP + VP} \quad (5.24)$$

e) Escore de Heidke (HEIDKE, 1926) ( $H_s$ ) – baseado no Kappa de Cohen (COHEN, 1960), mensura a fração de classificações corretas enquanto elimina as classificações corretas por aleatoriedade:



$$H_s = \frac{VP + VN - E}{T - E} \quad (5.25)$$

$$E = \frac{1}{T} [(VP + FN) \cdot (VP + FP) + (VN + FN) \cdot (VN + FP)] \quad (5.26)$$

onde  $E$  é a estimativa do acerto por aleatoriedade e  $T$  é o total de *pixels* analisados. A formulação adotada baseia-se na apresentada no trabalho de Frattini et al. (2010). Uma simulação com correspondência perfeita possui valor de  $H_s$  igual a 1.

#### 5.1.4.2 Adaptação das curvas ROC

A partir dos índices apresentados pode-se elaborar curvas ROC (*receiver operating characteristics*) adaptadas, as quais são utilizadas para avaliar a performance das simulações. As curvas ROC adaptadas são construídas considerando escores, separados em faixas para determinação dos pontos da curva. No contexto deste trabalho, cada ponto da curva representa uma simulação diferente. Desse modo, as curvas ROC adaptadas servem para comparar os resultados obtidos pelos diferentes métodos de direcionamento de fluxo, bem como para comparar as diferentes reologias.

A Figura 22 apresenta um exemplo hipotético da curva. Pontos que estiverem localizados acima da reta bissetriz aos eixos coordenados representarão uma simulação com maior quantidade de acertos e baixa omissão, enquanto pontos localizados abaixo indicarão maior quantidade de omissões do que acertos. Pontos localizados exatamente em cima da reta indicam aleatoriedade nos resultados, ou seja, o modelo não consegue discernir adequadamente os casos positivos dos negativos. Para comparação geral entre curvas, foi utilizada análise da área abaixo da curva (*area under curve* - AUC).

Como a curva ROC possui dois eixos que variam de 0 a 1, a área máxima é igual a 1. Para uma ROC padrão, uma predição perfeita resulta na área máxima, enquanto o pior cenário possível resulta em uma área igual a 0. Quando a área está próxima de valores igual 1, significa que a probabilidade de selecionar randomicamente um pixel corretamente classificado como positivo pelo modelo é maior do que selecionar um indivíduo erroneamente classificado como negativo (BRADLEY, 1997).

Entretanto, na adaptação adotada neste trabalho, cada ponto da curva corresponde a uma simulação. Logo, a AUC só possui significado quando comparada com AUCs de outras curvas. Uma das ideias que pode ser obtida é o grau de sensibilidade apresentado

a determinado parâmetro. Se cada ponto da curva representar a viscosidade cinemática e cada curva representa uma reologia diferente, por exemplo, é possível identificar o grau de impacto da mudança da reologia sobre resultados: caso as AUCs forem bastante diferentes entre si, significa que a reologia tem grande impacto nas simulações. Outra inferência que pode ser feita está na distribuição dos pontos no gráfico: quanto mais próximos, menos sensível o modelo é ao parâmetro.

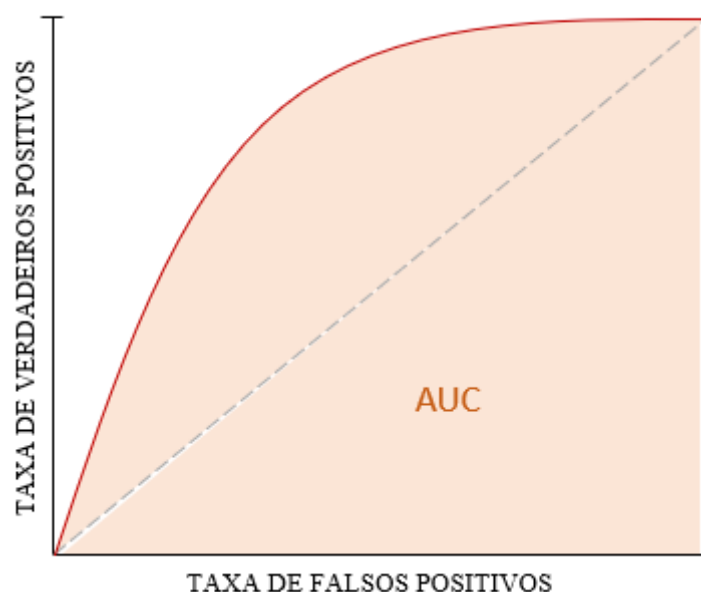


Figura 22. Exemplo genérico de uma curva ROC com AUC destacada em amarelo

## 5.2 ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi realizado em fluxos de detritos ocorridos na bacia do Rio Mascarada. A seguir será apresentada a bacia e os fluxos de detritos utilizados.

### 5.2.1 Bacia Hidrográfica do Rio Mascarada

O rio Mascarada possui sua cabeceira no município de São Francisco de Paula e sua bacia abarca parte dos municípios de Riozinho e Rolante, no estado do Rio Grande do Sul. Sua área é de 318,20 km<sup>2</sup>. O rio Mascarada é tributário do rio Rolante, que desemboca no rio dos Sinos.

A respeito da geologia, a bacia está localizada na Bacia Sedimentar do Paraná. A região mais baixa possui arenitos da Formação Botucatu, seguido da Formação Serra Geral, na qual estão inseridas a Fácies Gramado, constituída por rochas vulcânicas básicas (basaltos), e nas partes mais altas a Fácies Caxias, com rochas tipicamente ácidas (riolitos e riodacitos) (Serviço Geológico do Brasil - CPRM, 2007). Quanto ao tipo de solo, de acordo com a Secretaria do Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (2017), predominam os solos dos tipos Argissolos Vermelho-Amarelo, Neossolo Litólico e Cambissolo Húmico.

Quanto à topografia, a bacia possui amplitude altimétrica de 938 m entre os pontos de máxima e mínima altitude (Figura 23). Possui declividades que variam de 0 a 85° sendo que maior parte se encontra dentro da faixa de 10 a 35°. Assim, considerando as classes de declividade sugeridas pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) (1979), a bacia possui relevo fortemente ondulado com diversas áreas escarpadas e regiões montanhosas. O mapa de declividades pode ser observado na Figura 24.

De acordo com a classificação climática de Köppen, a região possui clima Cfa, ou seja, subtropical úmido, com precipitação abundante e distribuída ao longo do ano, com inverno e verão bem definidos (WREGE et al., 2012). A temperatura média dessa região, segundo Atlas Climático do Rio Grande do Sul (MATZENAUER et al., 2011), é de 20°C, com regime de chuvas anual médio de 1.600 mm. Os eventos de precipitação na cabeceira da bacia são fortemente influenciados pela orografia por conta do movimento ascensional do ar.

A região passou por eventos extremos de chuva em 5 de janeiro de 2017, com valores máximos registrados em pluviômetros rurais não oficiais de 272 mm em poucas horas (SEMA, 2017). Esse evento deflagrou diversos escorregamentos ao longo da bacia, sendo contabilizadas mais de 400 cicatrizes (CARDOZO et al. 2018).

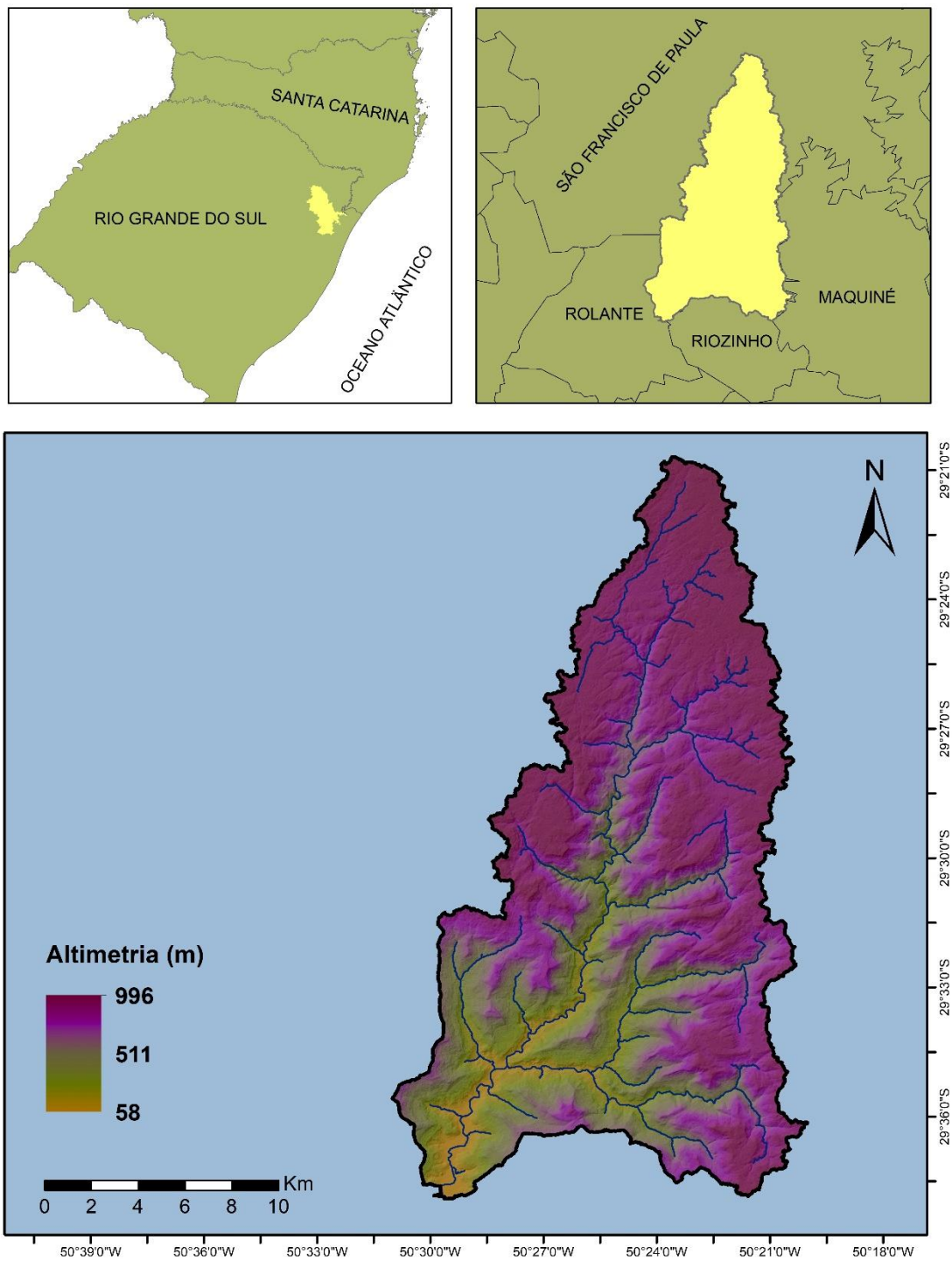


Figura 23. Localização da bacia do rio Mascarada e mapa altimétrico

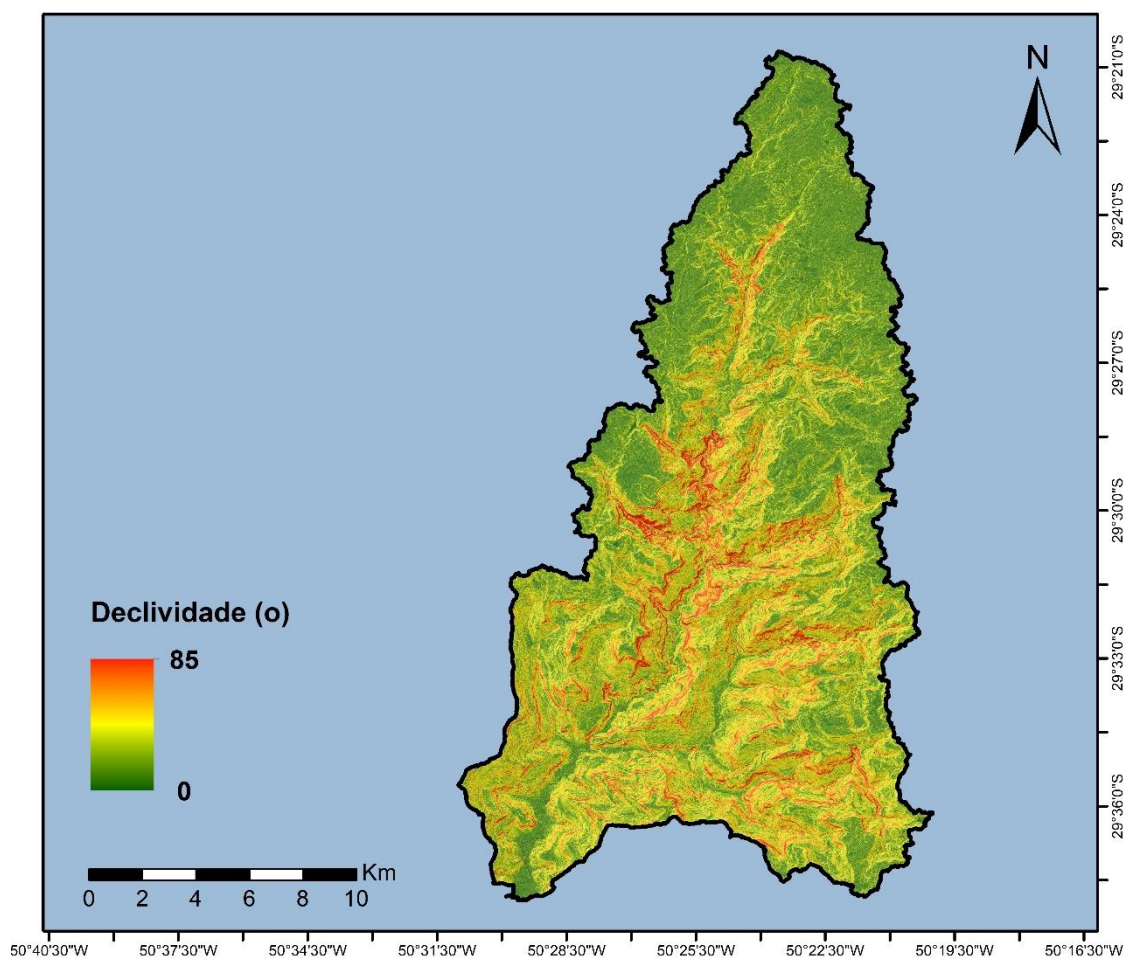


Figura 24. Mapa de declividades da bacia do rio Mascarada

Diversos dos fluxos desencadeados na bacia durante o evento de janeiro de 2017 apresentam grande quantidade de rochas (Figura 25 - A), e conforme alguns autores, (discutido na seção 4.4.1.4) a presença desse tipo de material faz o escoamento comportar-se de acordo com a reologia de fluido dilatante. A Figura 25 (B) apresenta o material de deposição, que também evidencia a presença de rochas e matacões na composição do fluxo de detritos. Entretanto, essas regiões possuem grande quantidade de vegetação e, por tal motivo, outras reologias também foram testadas.

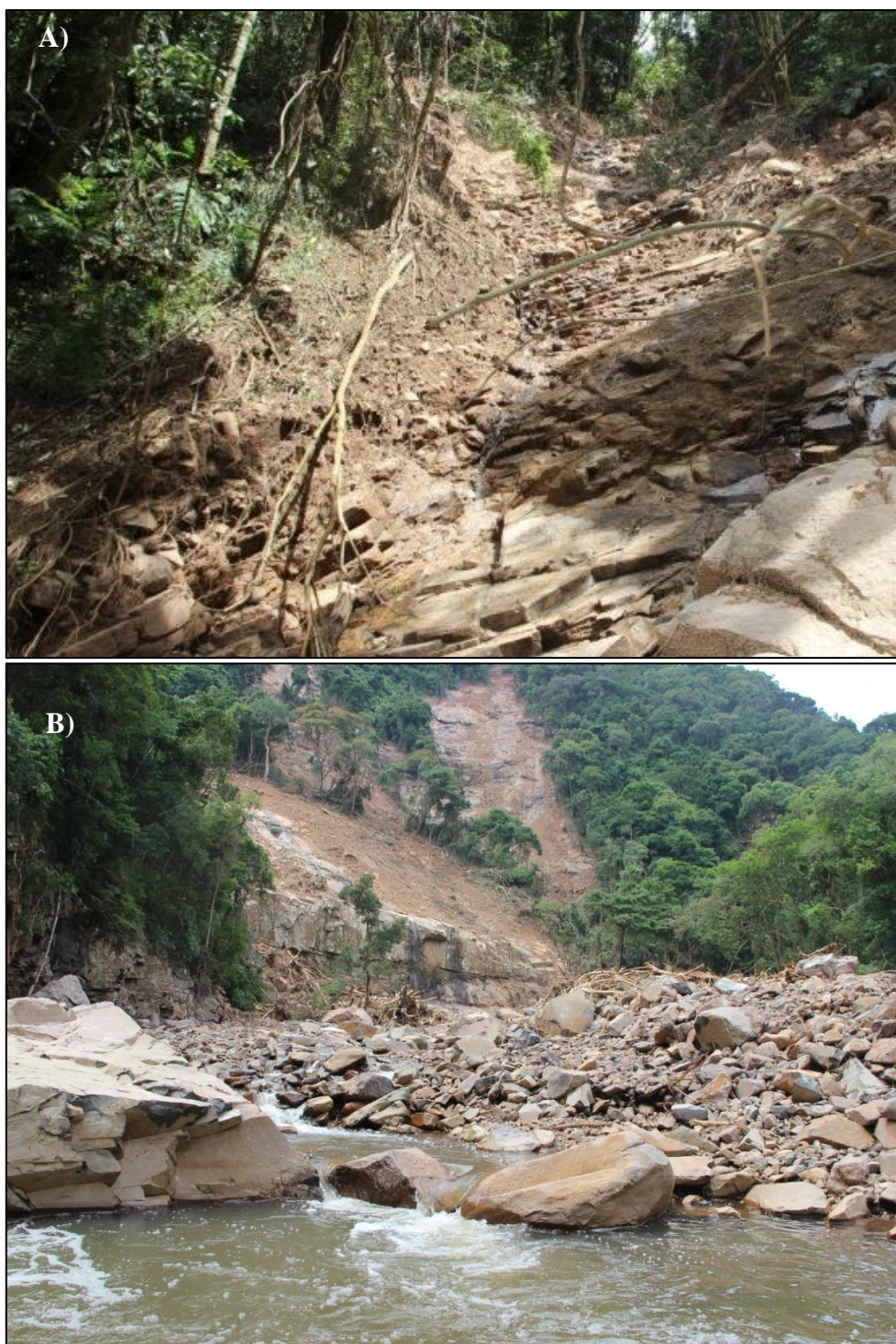


Figura 25. A) Evidência de presença de rochas e vegetação na composição do material (SEMA, 2017) B) Deposição um fluxo de detritos ocorrido na bacia do rio Mascarada<sup>2</sup>.

---

<sup>2</sup> Fotografia da equipe de pesquisas na bacia do rio Mascarada – GPDEN/IPH/UFRGS

### 5.2.1.1 Fluxos de detritos e dados utilizados

O MDT utilizado para a área de estudo possui resolução espacial de 1 m x 1 m por pixel, no formato GeoTIFF, com projeção original WGS 84. O MDT foi elaborado pela empresa NTT DATA Corporation. A obtenção do modelo digital consiste na coleta de imagens de múltiplos satélites da DigitalGlobe. Essas imagens representam a área sob múltiplos ângulos e são processadas em conjunto para extrair um MDT com alta resolução.

As cicatrizes utilizadas correspondem ao fluxo de detrito ocorrido em 5 de janeiro de 2017. A delimitação das cicatrizes de fluxos de detritos tem como referência o mapeamento prévio realizado por Cardozo et al. (2018). Foram mensuradas as profundidades existentes em algumas cicatrizes de escorregamento em um trabalho de campo, indicando profundidade de ruptura próxima de 1 m (SEMA, 2017). Esse valor é utilizado como a altura inicial dos fluxos de detritos. Para a realização das etapas 1, 2 e 3 foi utilizado um fluxo de detritos, apresentado na Figura 26.

A maior parte dos fluxos de detritos ocorridos na bacia possuíam cicatrizes que indicavam ter atingido o talvegue. Entretanto, procurava-se um caso em que o fluxo parasse antes de atingir o canal e poucos casos que efetivamente evoluíram para um fluxo de detritos cumpriam tal critério. Esse critério foi adotado para que fosse possível identificar a área de transporte. Fluxos de detritos que atingem o canal dificultam a identificação dessa área, além de sofrer influência do escoamento proveniente do próprio canal, tornando imprópria a aplicação do modelo.

Para a verificação da correspondência entre a área do fluxo de detritos obtida na simulação e a observada, foi feito um *raster* com quatro resoluções diferentes, tanto para a área de iniciação como para a de transporte. Para cada resolução diferente, a contagem de *pixels* da área de iniciação era descontada, a fim de avaliar somente os acertos provenientes da área de transporte. Foram utilizadas as resoluções de 1; 2,5; 5 e 10 m, sendo as três últimas obtidas com auxílio do ArcGis 10.4, a partir da reamostragem do *raster* de 1 m pelo método bilinear. A área de simulação possui aproximadamente 3 km<sup>2</sup> (1,62 km x 1,88 km).

Além disso, todos os MDTs tiveram suas depressões preenchidas pelo método de Wang & Liu (2006), uma vez que permite determinar um gradiente de declividade mínimo que deve existir entre células – fator necessário para que o algoritmo de direcionamento MFD funcione apropriadamente.

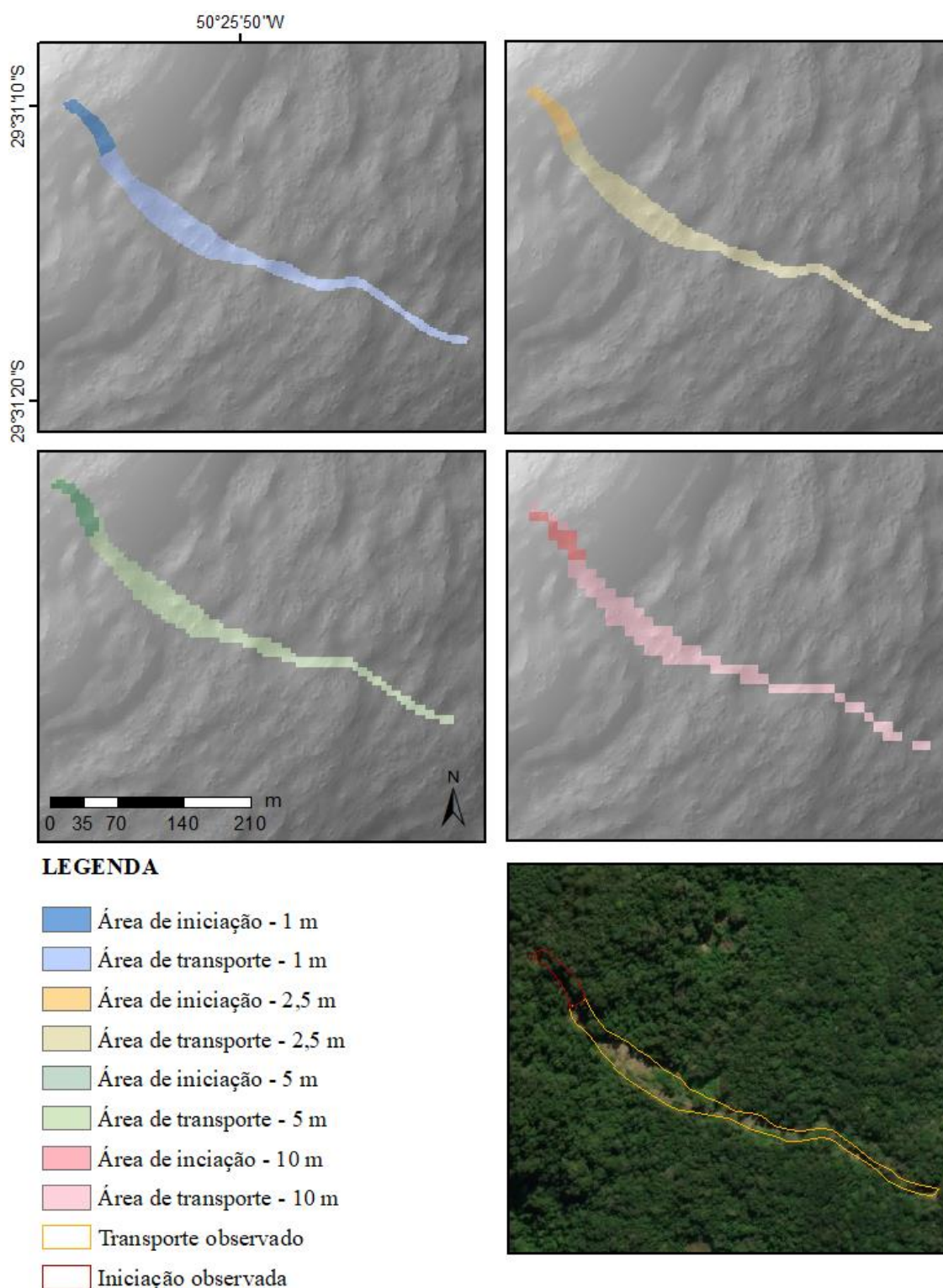


Figura 26. Áreas de iniciação e de transporte para quatro resoluções diferentes

Após a realização das simulações no fluxo de detritos apresentado, o modelo foi aplicado a outros fluxos de detritos utilizando a melhor combinação de parâmetros



encontrada. Foram utilizados três outros fluxos de detritos. Por conveniência, os fluxos foram denominados como F1, F2, F3 e F4, sendo F1 o que foi utilizado para realizar as etapas 1, 2 e 3 (Figura 27 e 28).

Os fluxos F2 e F3 foram simulados concomitantemente para avaliar a aplicabilidade do modelo a múltiplas zonas de iniciação. Ambos não aparentam ter atingido o canal (Figura 27).

O quarto fluxo de detritos simulado (F4), também próximo ao F1, foi o único caso utilizado em que o fluxo atingiu o canal (Figura 28). Por tal fato, a zona de deposição não pode ser definida com precisão, uma vez que seus vestígios foram apagados pelas altas vazões do canal durante o evento. Entretanto, decidiu-se aplicar o modelo em um caso desses para verificar seu comportamento e também verificar a deposição que poderia ter se formado.

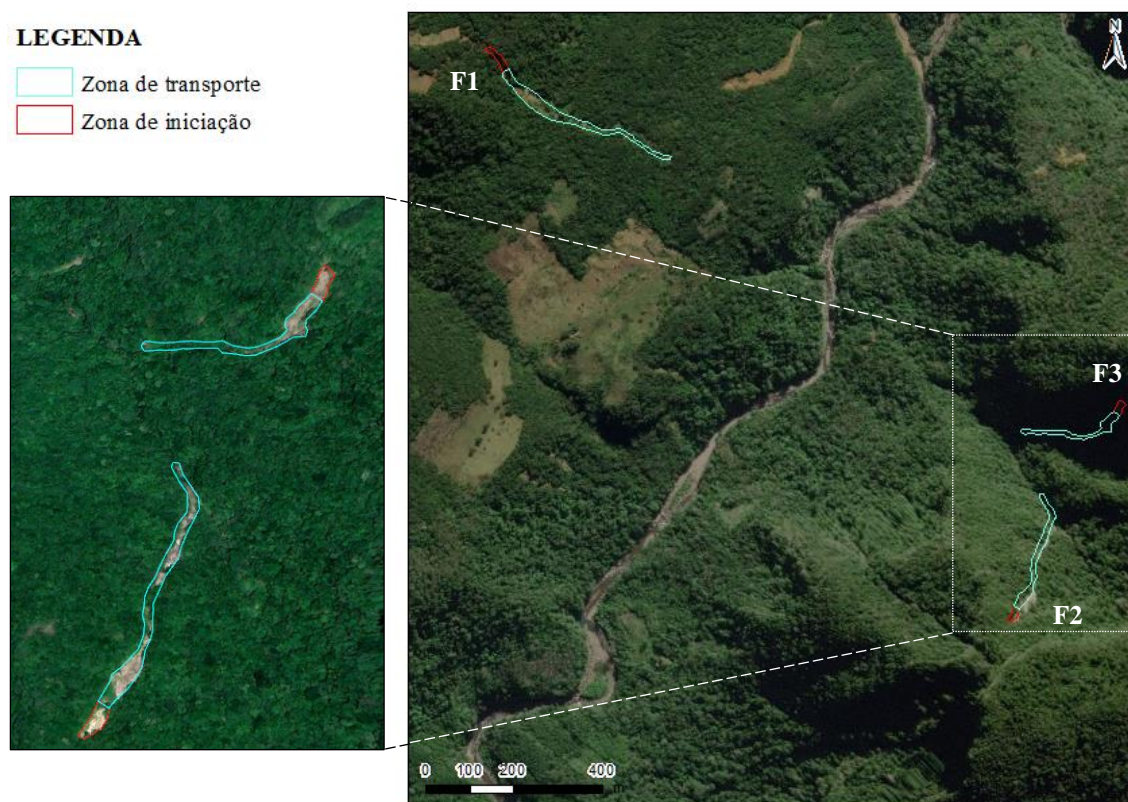


Figura 27. Cicatrizes observadas dos fluxos de detritos F1, F2 e F3 utilizados no estudo

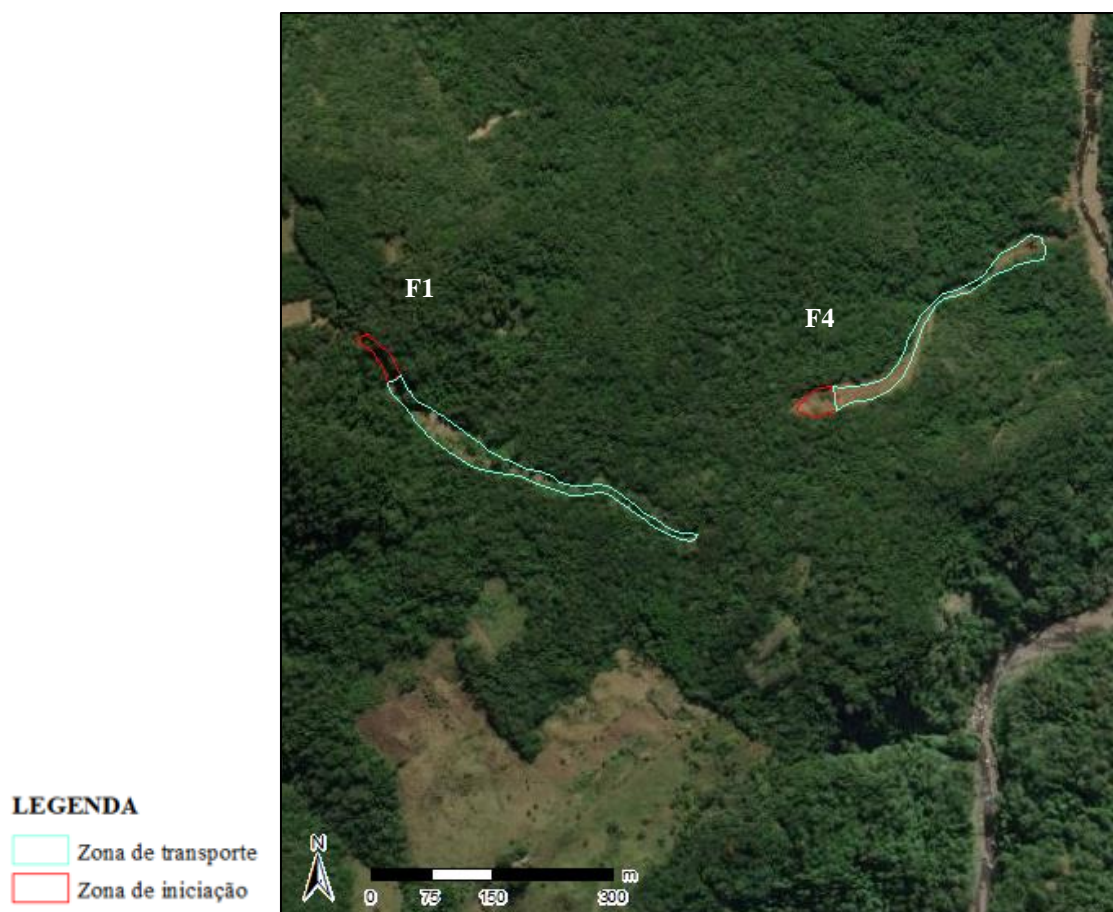


Figura 28. Cicatrizes observadas dos fluxos de detritos F1 e F4

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 REOLOGIA NEWTONIANA

Esta primeira seção corresponderá aos resultados obtidos nas etapas 1 e 2 apresentadas na metodologia. Os resultados estão segregados conforme o método de direcionamento de fluxo utilizado.

#### 6.1.1 Deterministic 8

A seguir serão apresentados e discutidos os resultados realizados com o algoritmo de direcionamento D8. A Tabela 5 e a Tabela 6 tratam das simulações realizadas para o MDT com resolução de 1 metro.

Tabela 5. Elementos da matriz de confusão para as simulações com D8 para 1 m de resolução

VISCOSIDADE CINEMÁTICA (m <sup>2</sup> /s)	TP	TN	FP	FN	TEMPO (s)	A.M.* (m)
1	1548	37826	3394	6696	3139	908,00
0,8	1548	37826	3394	6696	2495	982,00
0,5	1548	37826	3394	6696	2495	982,40
0,05	1548	37826	3394	6696	2514	1023,20
0,005	1548	37826	3394	6696	2519	1023,32
0,0005	1548	37826	3394	6696	2519	1023,37

\* A.M. – altura máxima

Como pode ser observado na Tabela 5, independente da viscosidade do fluxo, a contagem de pixel foi a mesma para todos os elementos da matriz de confusão. Inicialmente, foi atribuído que tal fato poderia estar relacionado ao valor do critério de parada que, se muito baixo, permite que a simulação ocorra até a maior parte do volume atingir os limites do MDT. Dessa forma, o critério de parada foi alterado para 0,1 m para testar se a simulação encerraria antes, entretanto os tempos de simulação mantiveram-se similares para suas correspondentes viscosidades cinemáticas.

Assim, é possível destacar que esse método de direcionamento acaba convergindo todo o escoamento para poucos pontos em comum, proporcionando um acúmulo de fluxo em poucos *pixels*. Tal fato pode ser observado nas alturas máximas finais das simulações.

Com esses acúmulos, a altura de fluxo torna-se alta e permite a vazão de um passo de tempo para o outro com valor suficiente para superar o critério de parada, mesmo em declividades pequenas. Assim, a simulação continua a ocorrer por muito tempo e, ao atingir o canal, terá declividade o suficiente para atingir o limite do MDT e acumular-se em um único *pixel*. Essa região onde o fluxo acumulou-se corresponde à borda do mapa de declividades, que possui células sem dados, as quais o modelo atribui declividade de 0,0001°.

Como pode ser observado na Tabela 6, conforme a viscosidade diminui, as alturas máximas aumentaram, chegando a 1023 m nos dois últimos casos. As três últimas simulações listadas indicam alturas de 1023 m, que corresponde ao número de *pixels* que compõem a área de iniciação do escorregamento, ou seja, todo o volume atingiu o limite do MDT. Os valores decimais que excedem o valor de 1023 provém de valores gerados pelo algoritmo do modelo, uma vez que ele identifica regiões que o fluxo percorreu com valores de 0,1 mm, caso a altura final no *pixel* seja zero. Essa estratégia é tomada para, no final dos cálculos, diferenciar as regiões em que a altura permaneceu zero, ou seja, área na qual o fluxo não percorreu, das que foram atingidas pelo fluxo.

Além disso, esse valor foi utilizado como o limite na qual a célula poderia contribuir com fluxo, ou seja, *pixels* com valores iguais ou abaixo de 0,1 mm não fluirão. Entretanto, esse pequeno valor pode fazer parte da contribuição quando um *pixel* que perdeu toda sua massa passa a receber contribuição após um passo de tempo. Para esse cenário, a adição de volume ao fluxo (de 0,48 m<sup>3</sup>) corresponde a quase 0,05% do original.

Na Figura 29 pode-se perceber que o D8, para a resolução de 1 m, não possui capacidade de representar adequadamente o fluxo de detritos. A sua premissa, de indicar uma única direção preponderante, acaba concentrando o fluxo em poucos caminhos, apresentando um resultado que mais se assemelha a linhas do que uma mancha de fluxo. Mesmo que a simulação terminasse antes de ultrapassar o final da zona de transporte observada, os índices de desempenho não teriam um valor satisfatório, uma vez que a taxa de acertos é baixa. Além do mais, é possível visualizar no quadro que aproxima a zona final da mancha de transporte simulada, o *pixel* que acumula a maior parte do fluxo (em vermelho), concentrando 981,2 m<sup>3</sup>, ou seja, 95,8% do volume original.

Outro detalhe a ser observado é a tendência do fluxo a se propagar para uma região mais ao norte da mancha observada. Esse comportamento pode indicar: i) a área de iniciação está um pouco deslocada, resultado de erros de interpretação da ortofotos; ii) alguns erros associados à elaboração do MDT ao tratar os dados do modelo digital de

superfície (MDS), que impedem a representação fidedigna do terreno; iii) o efeito da vegetação, que pode criar a resistência ao espalhamento lateral do fluxo de detritos, o qual não é abordado dentro do modelo.

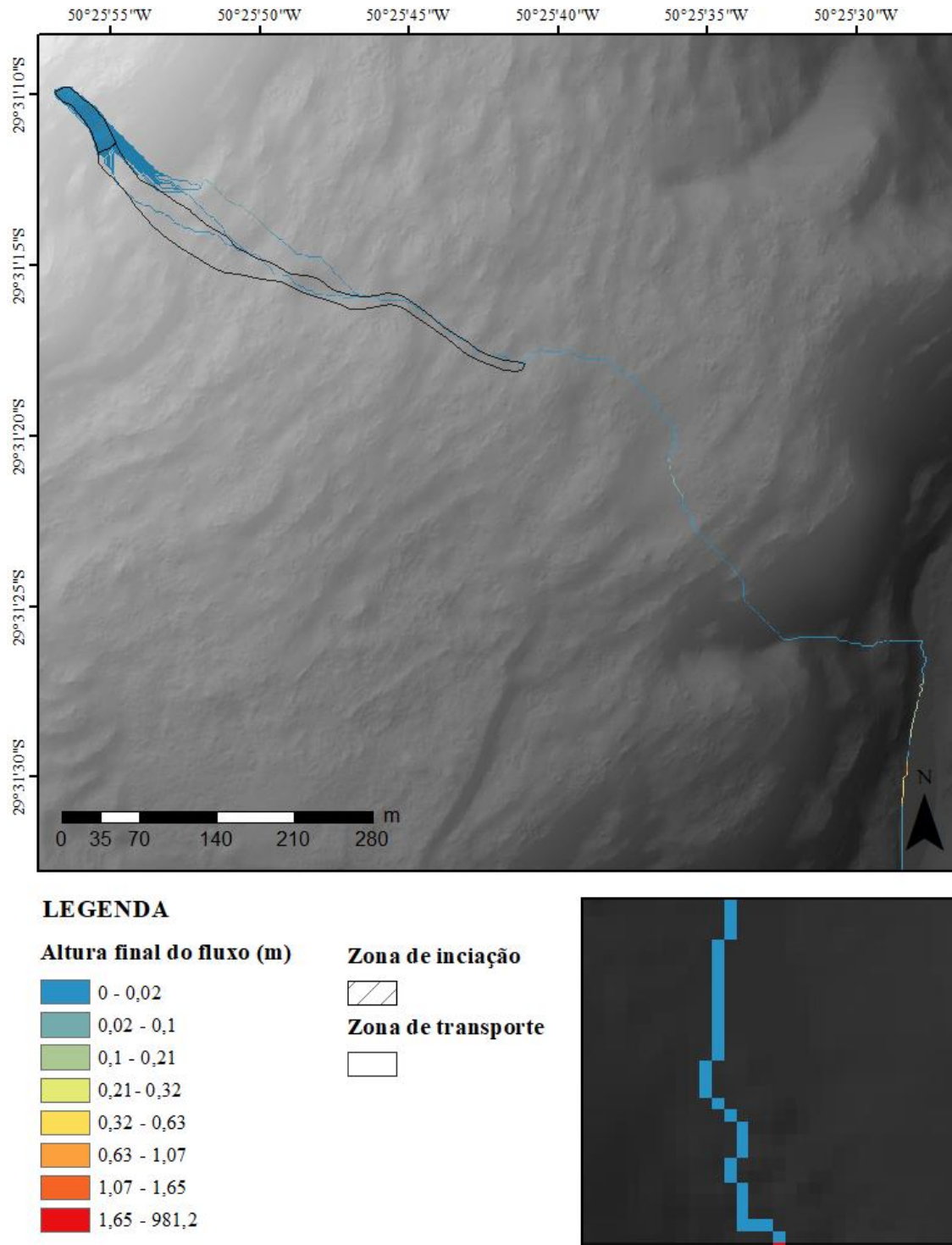


Figura 29. Mancha do fluxo de detritos: D8, resolução de 1m,  $v = 0,5 \text{ m}^2/\text{s}$

Como os valores de todas as simulações para 1 m de resolução foram semelhantes, os índices que representam todas as simulações estão apresentados em uma única linha na Tabela 6.

Tabela 6. Índices para as simulações com D8 para 1 m de resolução

<b>TPR</b>	<b>FPR</b>	<b>FDR</b>	<b>FNR</b>	<b>H<sub>s</sub></b>
18,78	8,23	68,68	81,22	0,13

Os índices apresentam uma baixa correspondência entre o polígono de transporte e a simulação realizada. Para altas resoluções, o D8 não obteve uma boa representação do fluxo de detritos. O acerto foi de 18,78%, sendo que 68,68% das células indicadas como positivas ficaram fora da mancha observada. O  $H_s$  de 0,13 está muito distante de 1, indicando desempenho muito baixo.

Para o MDT com resolução de 2,5 m, a maior parte das simulações passaram das 10 mil iterações, indicando que não houve convergência para o critério de parada. Apenas os dois casos apresentados na Tabela 7 conseguiram atingir o critério. Para essa resolução, o  $H_s$  chegou a 0,23, aumentando em comparação à resolução de 1 m. Indicando que o aumento da dimensão dos *pixels* acabou aumentando a área de correspondência. Ainda assim, as alturas máximas finais foram de pelo menos 83 m, valor pouco realista ao considerar o tamanho da área de iniciação.

Tabela 7. Índices para as simulações com D8 para 2,5 m de resolução

<b>CP (m)</b>	<b>VISCOSIDADE CINEMÁTICA (m<sup>2</sup>/s)</b>	<b>TPR</b>	<b>FPR</b>	<b>FDR</b>	<b>FNR</b>	<b>H<sub>s</sub></b>	<b>TEMPO (s)</b>	<b>A.M. (m)</b>
0,1	0,0005	27,63	7,60	57,90	72,37	0,23	370	83,05
0,01	0,8	27,48	17,00	75,57	72,52	0,10	1168	83,98

\* CP – critério de parada

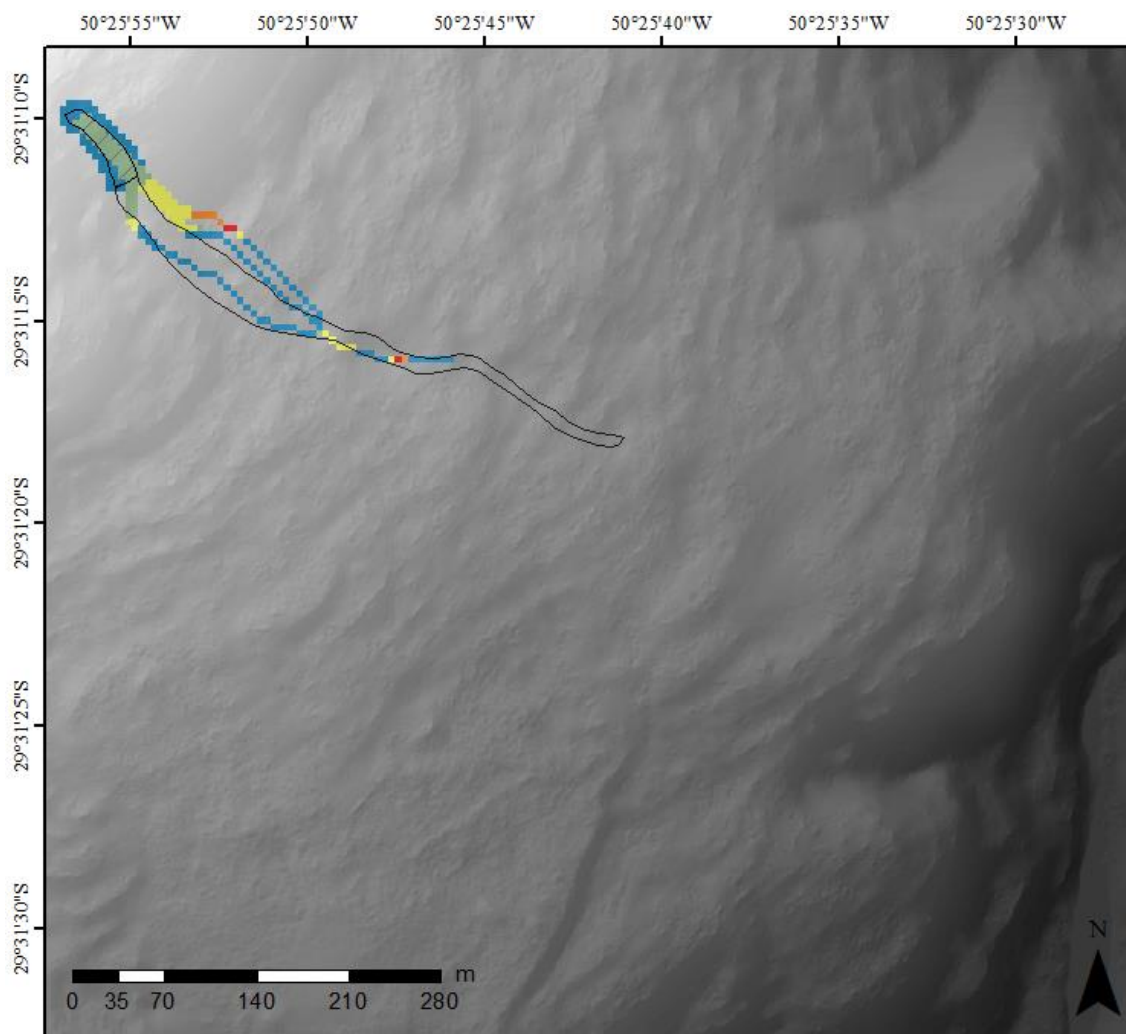
Para a resolução de 5 m, o  $H_s$  atingiu um máximo de 0,31 m, com altura máxima de 0,96 m (Tabela 8). Apesar do baixo desempenho, essa simulação já passou a ter alturas finais mais realistas. Para os três critérios de parada diferentes, considerando uma mesma viscosidade, percebe-se que o tempo de simulação aumentava conforme o valor do critério diminuía. Esse comportamento é esperado, uma vez que valores pequenos no critério de parada só serão atingidos quando o fluxo estiver mais avançado e parte de seu

volume permaneceu em *pixels* de baixa declividade. Da mesma forma que as resoluções anteriores, diversas viscosidades não convergiram ao critério de parada. Outro aspecto a ser observado é o aumento dos escores. Mais uma vez, o D8 se beneficiou da diminuição da resolução do MDT.

Tabela 8. Índices para as simulações com D8 para 5 m de resolução

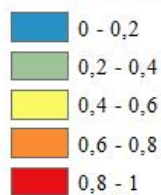
CP (m)	VISCOSIDADE CINEMÁTICA (m <sup>2</sup> /s)	TPR	FPR	FDR	FNR	H <sub>s</sub>	TEMPO (s)	A.M. (m)
0,1	1	37,92	10,76	58,67	62,08	0,28	28	0,69
	0,8	37,92	8,75	53,56	62,08	0,31	49	0,96
	0,05	37,92	13,94	64,77	62,08	0,23	183	21,02
0,05	1	24,46	7,34	60,00	75,54	0,20	121	0,85
	0,8	32,11	7,52	53,95	67,89	0,28	88	0,89
	0,05	37,92	13,94	64,77	62,08	0,23	183	21,02
0,01	1	37,92	13,94	64,77	62,08	0,23	909	0,55
	0,8	37,92	13,94	64,77	62,08	0,23	278	0,278

A Figura 30 apresenta a mancha da simulação com maior  $H_s$ . Da mesma forma que o caso com resolução de 1 m, pode-se observar a tendência do fluxo seguir três caminhos diferentes e convergirem em um determinado ponto a uma única linha de escoamento. Como a dimensão do *pixel* é maior, o volume transferido precisa ser muito maior para provocar uma grande diferença de altura, se comparado a resoluções menores. Esse pode ter sido um dos motivos que levou ao fim da simulação em poucas iterações. Ademais, também é visível que há uma concentração de alturas maiores logo após a zona de iniciação, indicando que não houve tempo o suficiente para a maior parte do volume atingir a parte final da zona de transporte observada.



### LEGENDA

#### Altura final do fluxo (m)



#### Zona de iniciação



#### Zona de transporte

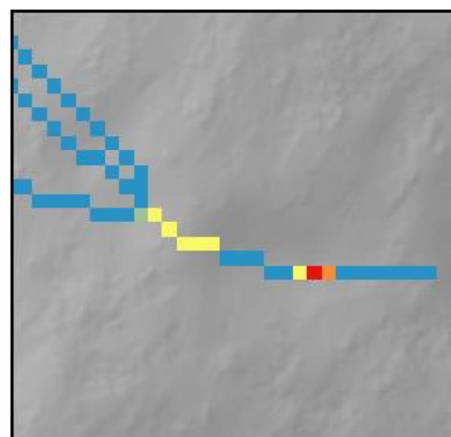


Figura 30. Mancha do fluxo de detritos: D8, resolução de 5m,  $v = 0,8 \text{ m}^2/\text{s}$

Os resultados para a resolução de 10 m tiveram uma pequena melhoria para o C.P. de 0,1 m, com  $H_s$  de 0,32, entretanto para os outros C.P.s houve a redução do desempenho (Tabela 9). Conforme a Figura 31, pode-se notar que nesta resolução, há a preponderância de duas linhas de fluxo, na qual ambas se direcionam para fora da zona de transporte



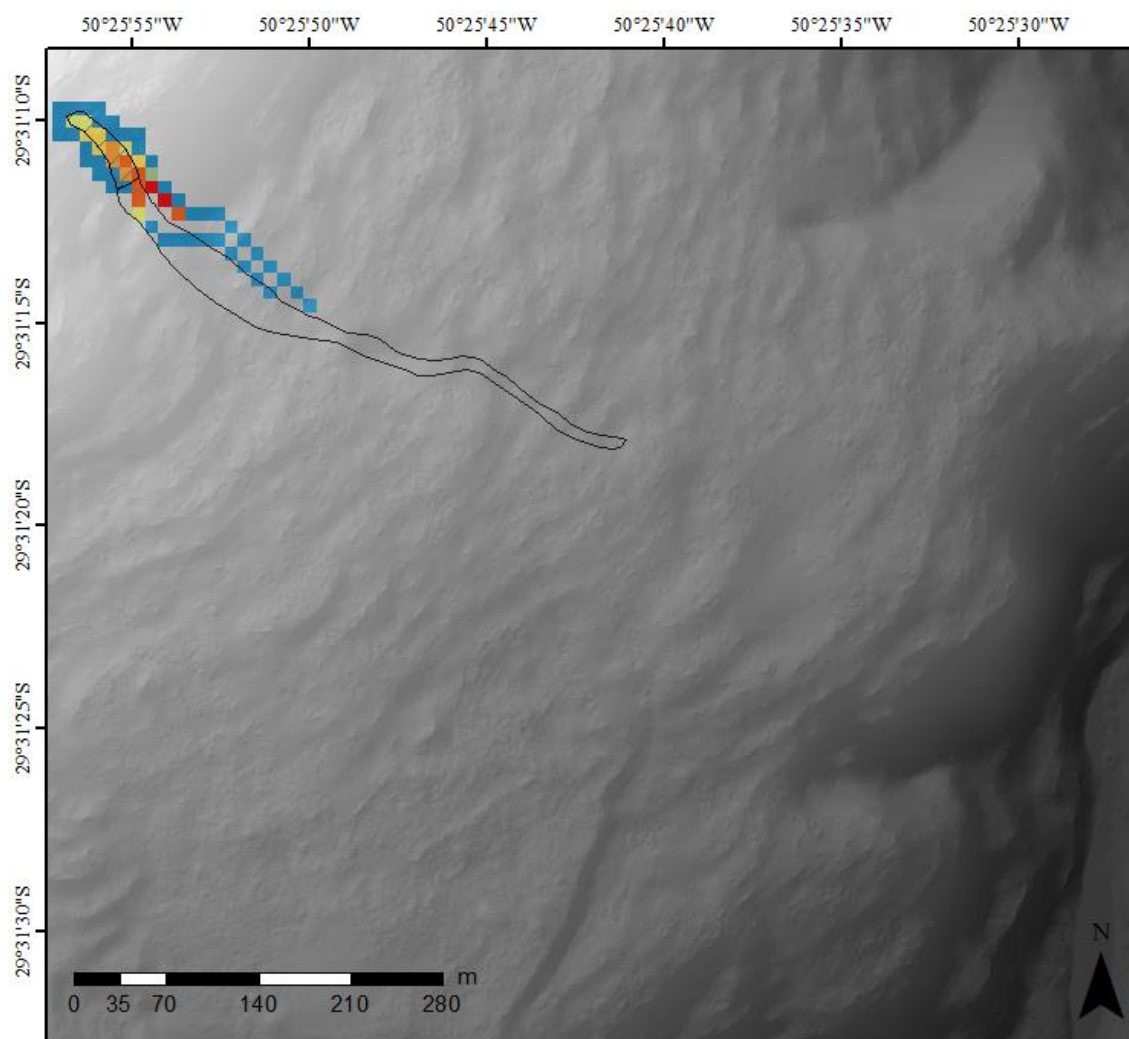
observada. Até a resolução de 5 m percebia-se ganhos de desempenho pelo fato do *pixel* de maior tamanho ocupar uma maior área dentro da cicatriz, melhorando o desempenho. Entretanto, justamente uma das linhas de fluxo que percorria ao longo da cicatriz não existe mais nesse MDT. Nesse caso, a perda de informações pela diminuição da resolução, comprometeu a maior parte das simulações com o MDT de 10 m.

Tabela 9. Índices para as simulações com D8 para 10 m de resolução

CP (m)	VISCOSIDADE CINEMÁTICA (m <sup>2</sup> /s)	TPR	FPR	FDR	FNR	H <sub>s</sub>	TEMPO (s)	A.M. (m)
0,1	1	39,51	10,86	57,89	60,49	0,29	10	0,87
	0,8	41,98	10,86	56,41	58,02	0,32	13	0,78
	0,5	38,27	10,86	58,67	61,73	0,28	12	0,67
0,05	1	23,46	9,14	66,07	76,54	0,16	24	0,68
	0,8	25,93	10,12	66,13	74,07	0,17	26	0,62
	0,5	24,69	9,88	66,67	75,31	0,17	23	0,57
0,01	1	48,15	22,72	70,23	51,85	0,20	132	0,54
	0,8	48,15	22,72	70,23	51,85	0,20	130	0,50
	0,5	48,15	22,72	70,23	51,85	0,20	120	0,43

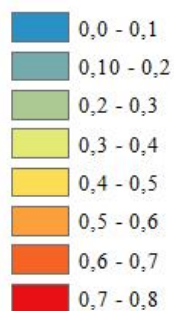
Outro fator de importância é o “tempo” do fluxo. Como foi exposto na metodologia, o modelo faz a transferência de volume de um *pixel* para outro a cada iteração. Assim, o tempo de 1 s acaba perdendo seu significado, uma vez que é pouco provável que esse tempo seria o suficiente para percorrer a dimensão da célula.

Para os três valores de critério de parada, não houve convergência para a viscosidade 0,5 m<sup>2</sup>/s. Também não houve convergência para viscosidades menores do que 0,05 para os três valores de CP testados. O D8 foi o único algoritmo a apresentar esse problema em todos os MDTs, uma vez que, como já destacado, não distribui o fluxo, estando suscetível ao acúmulo de volume pouco verossímil em *pixels* com baixa declividade.



### LEGENDA

#### Altura final do fluxo (m)



#### Zona de iniciação



#### Zona de transporte

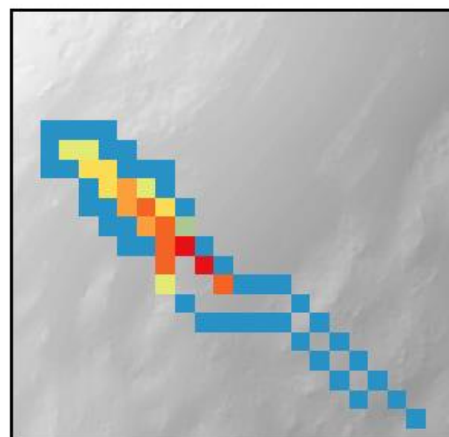


Figura 31. Mancha do fluxo de detritos: D8, resolução de 10m,  $\nu = 0,8 \text{ m}^2/\text{s}$

A Figura 32 apresenta os  $H_s$  para as diferentes simulações. Como diversos casos não convergiram para o critério de parada, há dificuldade de visualizar a diferença do comportamento provocado pela mudança da resolução para cada uma das diferentes viscosidades testadas. A única viscosidade que apresentou resultado para todas resoluções

foi a de  $0,8 \text{ m}^2/\text{s}$ . No geral, é possível perceber que há um aumento no escore, salvo a resolução de  $2,5 \text{ m}$ , que pra essa viscosidade específica, teve o pior desempenho. Mas, a parte desse caso, todas as simulações testadas tiveram um desempenho um pouco maior que a resolução de  $1 \text{ m}$ .

Conforme discutido, o aumento da dimensão do *pixel* pode contribuir para aumentar a área acertada, mesmo que o algoritmo dê uma única direção para o escoamento. Entretanto, a partir de um momento, a perda de informação na resolução de  $10 \text{ m}$  provocou uma diminuição do desempenho (vide Tabela 9).

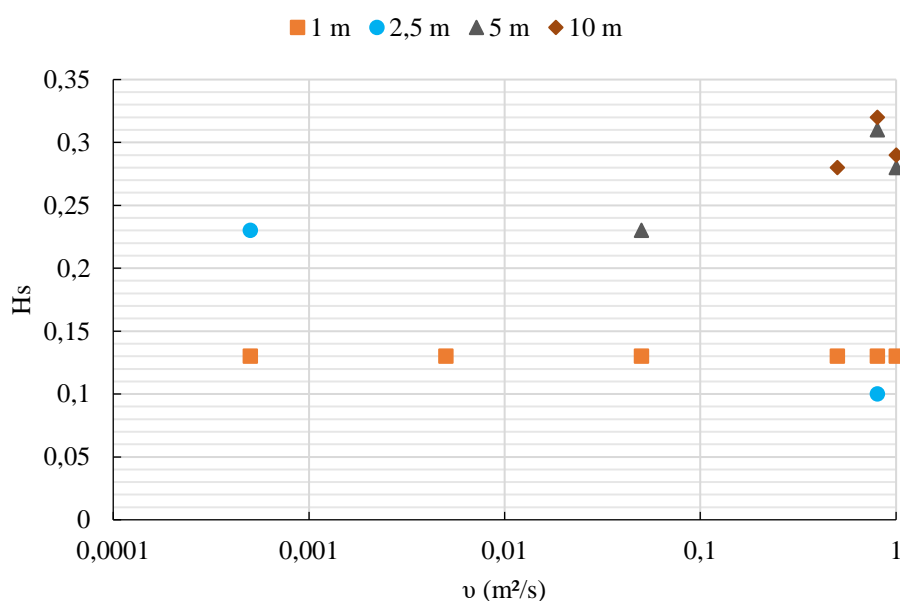


Figura 32. Gráfico comparativo dos valores de  $H_s$  para diferentes resoluções de MDT

Por fim, o D8 apresentou grande variabilidade no comportamento do modelo em diferentes resoluções, mas apresentou baixa sensibilidade à viscosidade. Tal fato é corroborado pelas ROC adaptadas (Figura 33). As AUCs variaram de  $0,553$  a  $0,653$ , enquanto os pontos, que definem diferentes viscosidades, estão muito próximos em cada uma das curvas. Assim, pode-se afirmar que a resolução do MDT tem mais efeito sobre a simulação do que o valor da viscosidade.

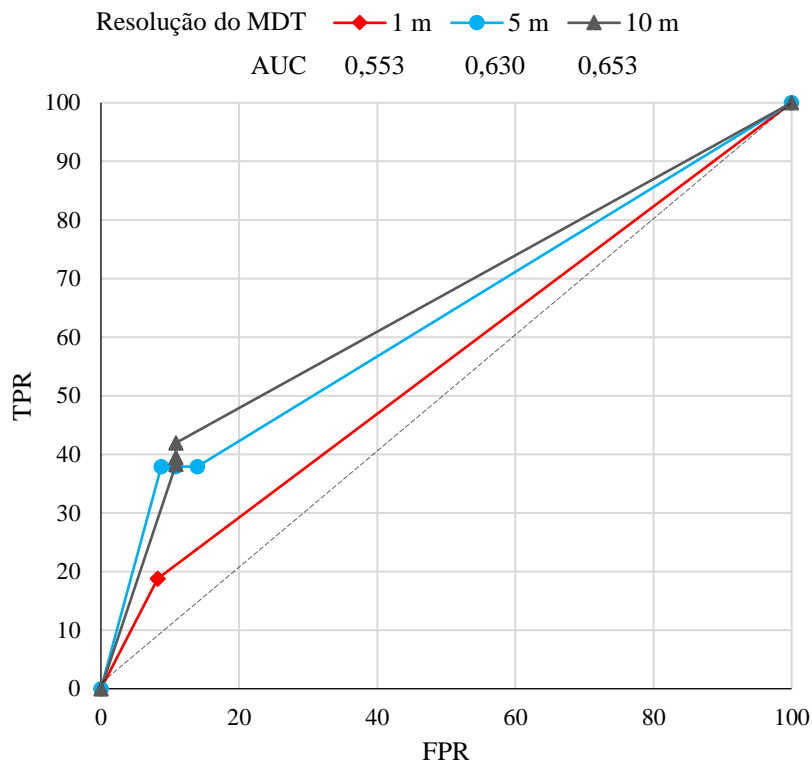


Figura 33. Curvas ROC adaptadas para D8 em diferentes resoluções

### 6.1.2 D-infinity

Em sequência estão os resultados referentes às simulações com a direção de fluxo determinada pelo D-inf. A Tabela 10 apresenta a primeira série de simulações realizadas, com o MDT de 1 m de resolução. Diferente do D8, as simulações com D-inf apresentaram apenas um caso com problema de convergência ao critério de parada. Foram testados diferentes critérios de parada (0,05 e 0,01 m) e os resultados foram bastante semelhantes. A contagem de *pixels* foi idêntica entre viscosidades com o mesmo valor, havendo uma pequena diferença apenas nas alturas máximas da mancha simulada. O maior  $H_s$  encontrado foi de 0,45 para a viscosidade de 1 m<sup>2</sup>/s.

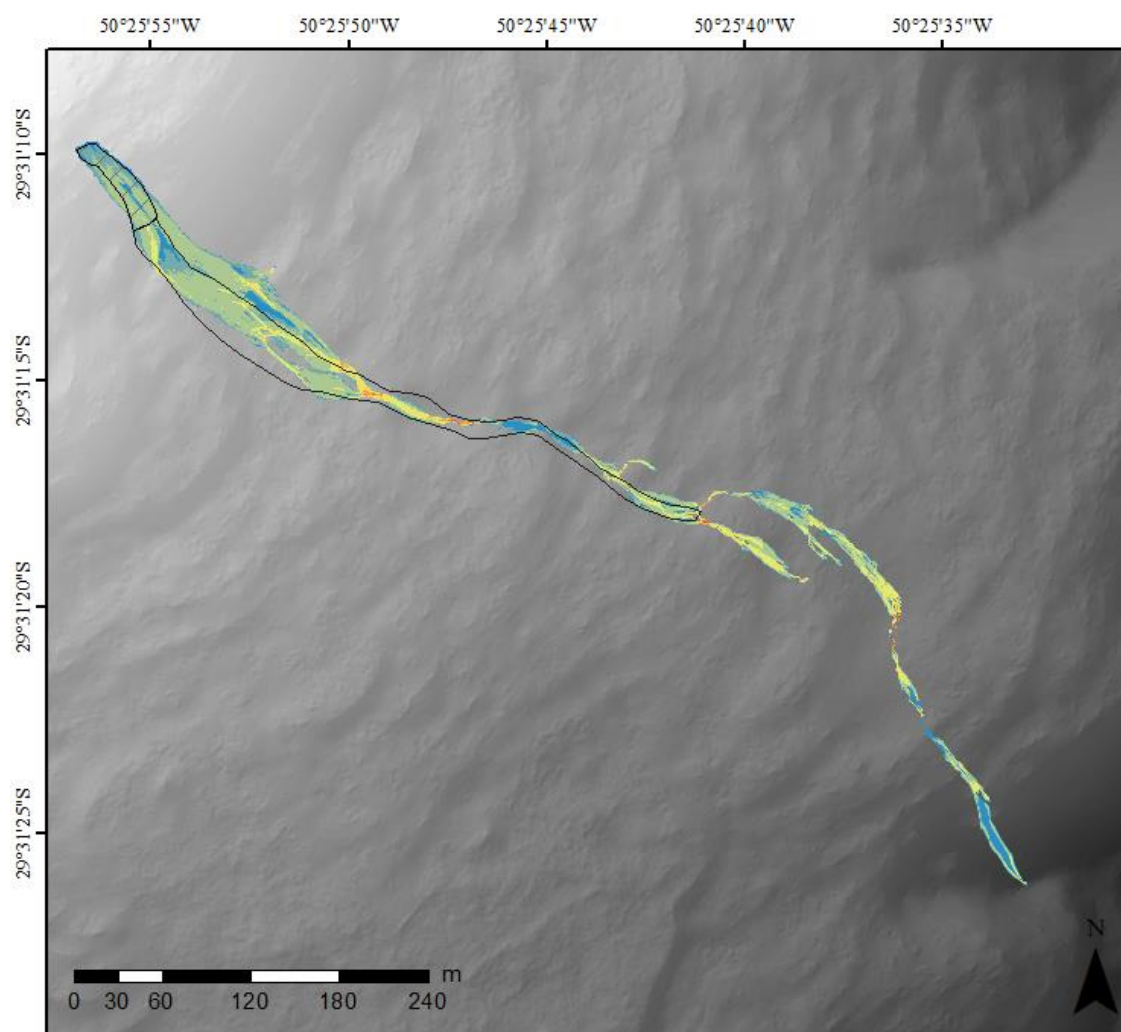
Os resultados partiram de uma taxa de verdadeiros positivos de 69,10%, chegando a 75,79% para as menores viscosidades. O aumento da taxa de acerto, entretanto, é acompanhado de um aumento significativo da taxa de falsos positivos, superestimando as áreas afetadas. Tal comportamento faz com que os valores de  $H_s$  diminuam conforme a viscosidade diminui, uma vez que as menores viscosidades permitem maiores velocidades de fluxo, permitindo que haja escoamento com alturas superiores ao critério de parada, mesmo em declividades mais suaves. Essa explicação é corroborada ao

comparar a simulação mais viscosa com a menos viscosa: enquanto o acerto aumentou de 69% para 75%, a taxa de falsos positivos foi de 15% para 52%.

Tabela 10. Índices para as simulações com D-inf para 1 m de resolução

CP (m)	VISCOSIDADE CINEMÁTICA (m <sup>2</sup> /s)	TPR	FPR	FDR	FNR	H <sub>s</sub>	TEMPO (s)	A.M. (m)
0,05	1	69,10	15,55	52,94	30,90	0,45	779	0,51
	0,8	69,63	19,16	57,91	30,37	0,40	879	0,55
	0,5	70,72	24,48	63,38	29,28	0,34	983	0,40
	0,05	72,50	36,67	71,66	27,50	0,22	1739	1,94
	0,005	74,60	49,36	76,79	25,40	0,13	3268	0,73
	0,0005	75,79	52,25	77,51	24,21	0,12	3900	0,23
0,01	1	69,10	15,55	52,94	30,90	0,45	779	0,51
	0,8	69,63	19,13	57,87	30,37	0,40	883	0,55
	0,5	70,73	24,47	63,37	29,27	0,34	985	0,40
	0,05	72,50	36,54	71,59	27,50	0,22	1829	1,86
	0,005	74,60	49,36	76,79	25,40	0,13	3287	0,74
	0,0005	75,79	52,24	77,51	24,21	0,12	4259	0,23

A Figura 34 demonstra que, mesmo para um fluido bastante viscoso, o fluxo percorreu uma longa distância, maior que a zona de transporte observada. Além do mais, apareceram algumas ramificações na mancha simulada que, apesar de desviar do formato da cicatriz observada, possivelmente contribuiriam para que o critério de parada fosse atingido. Caso as alturas presentes nessas ramificações se concentrassem em um único caminho, é provável que a distância atingida pelo escoamento fosse suficiente para chegar ao canal. Portanto, optou-se por não utilizar o coeficiente de espalhamento. Também é possível perceber, em diversas partes, que o fluxo diverge e volta a convergir alguns *pixels* a frente, criando espaços vazios dentro da cicatriz, que comprometeram os valores de acerto.



### LEGENDA

#### Altura final do fluxo (m)

	0,00 - 0,02
	0,02 - 0,06
	0,06 - 0,12
	0,12 - 0,18
	0,18 - 0,30
	0,30 - 0,43
	0,43 - 0,68
	0,68 - 2,00

#### Zona de iniciação



#### Zona de transporte

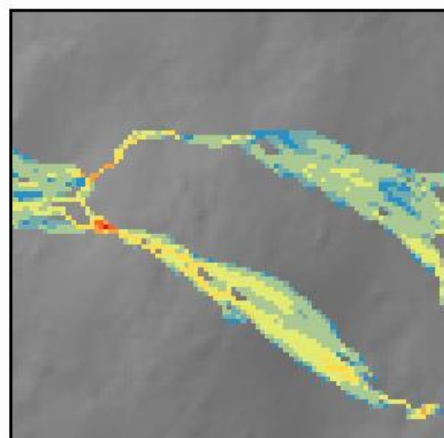


Figura 34. Mancha do fluxo de detritos: D-inf, resolução de 1 m,  $v = 1 \text{ m}^2/\text{s}$

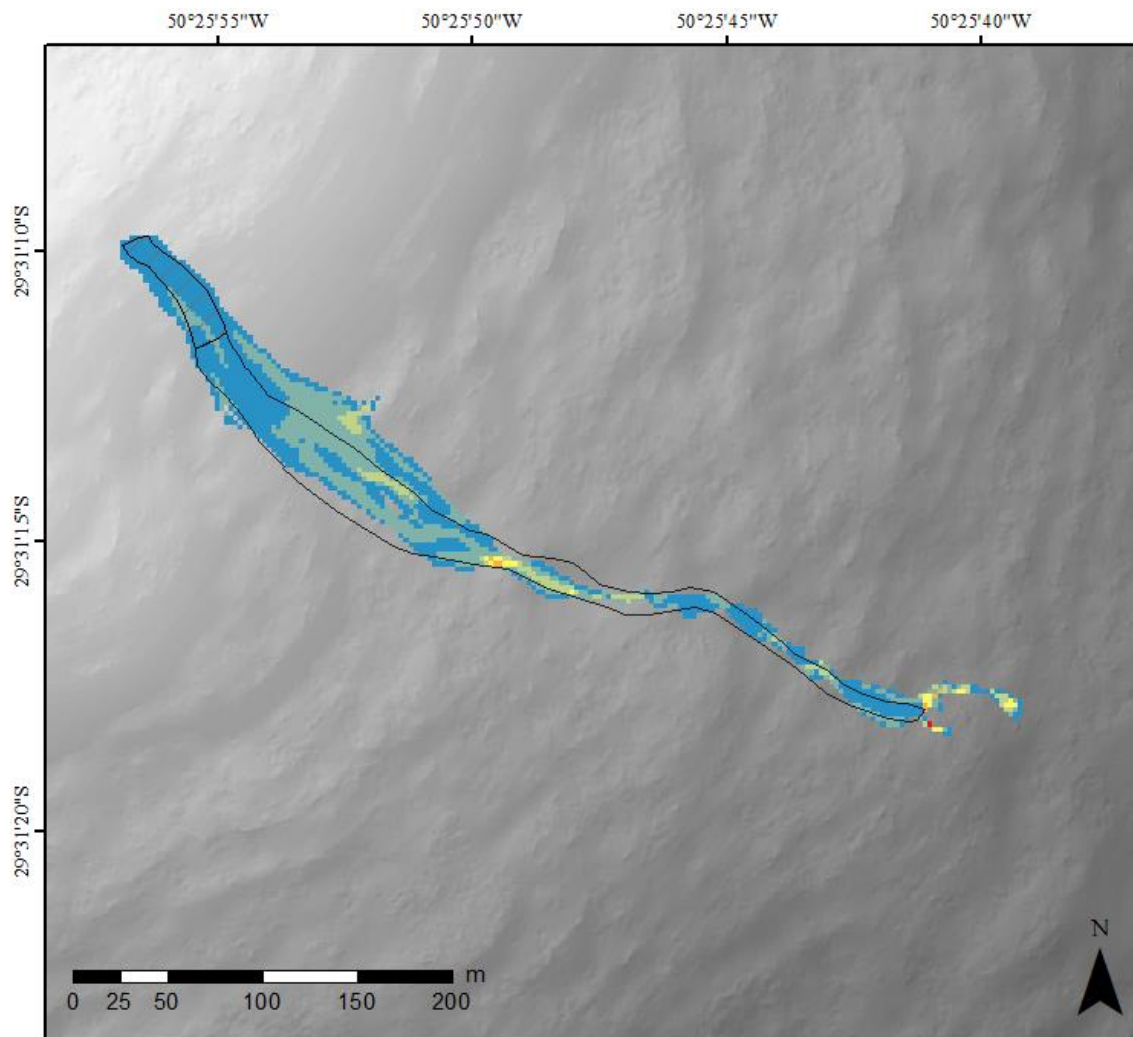
Tabela 11. Índices para as simulações com D-inf para 2,5 m de resolução

CP (m)	VISCOSIDADE CINEMÁTICA (m <sup>2</sup> /s)	TPR	FPR	FDR	FNR	H <sub>s</sub>	TEMPO (s)	A.M. (m)
0,01	1	63,51	6,39	33,47	36,49	0,58	55	0,51
	0,8	62,15	6,77	35,25	37,85	0,56	146	0,47
	0,5	83,72	10,95	39,53	16,28	0,63	231	0,48
	0,05	86,98	46,96	72,97	13,02	0,21	562	1,82
	0,005	91,45	66,92	78,54	8,55	0,11	1109	0,84
	0,0005	92,28	78,29	80,92	7,72	0,06	1150	72,00
0,05	1	60,86	5,89	32,61	39,14	0,57	93	0,99
	0,8	59,65	6,40	34,93	40,35	0,55	90	0,84
	0,5	83,57	10,51	38,60	16,43	0,64	202	0,67
	0,05	86,98	45,72	72,44	13,02	0,22	416	2,35
	0,005	91,45	66,04	78,31	8,55	0,11	807	1,23
	0,0005	92,28	78,29	80,92	7,72	0,06	1139	72,61

Com o aumento da resolução para 2,5 m, os acertos variaram de 62,15% a 92,28% e a taxa de falso positivo foi de 6,39% a 78,29%. Para essa resolução, o impacto do critério de parada foi um pouco maior, mas ainda assim, pouco significativo, havendo maior diferença nas alturas máximas encontradas. Os maiores  $H_s$  foram obtidos para a viscosidade de 0,5 m<sup>2</sup>/s (0,63 e 0,64 para CPs de 0,01 e 0,05 respectivamente).

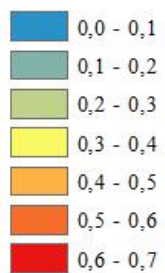
Para a viscosidade de 0,0005 m<sup>2</sup>/s, a altura máxima foi de 72 m, valor pouco verossímil para este caso. Tal fato ocorreu por causa do *grid* de declividade, que possui uma linha adicional sem valores (*no data*) no final e, na formulação do algoritmo, os *pixels* de declividade sem dados são atribuídos com valor 0,0001°. Assim, a maior parte do fluxo que chegou nos limites da área de análise acumularam neste pixel, de forma análoga ao que ocorreu com o algoritmo que utiliza o D8.

A mancha resultante do melhor cenário para essa resolução (Figura 35) mostra como o aumento da resolução permitiu uma maior correspondência que a de 1 m, preenchendo melhor a zona de transporte observada. Além do mais, a dimensão dos espaços vazios, observados na Figura 34, tornaram-se menores, contribuindo para que o MDT de 2,5 m apresentasse resultados melhores.



### LEGENDA

#### Altura final do fluxo (m)



#### Zona de iniciação



#### Zona de transporte

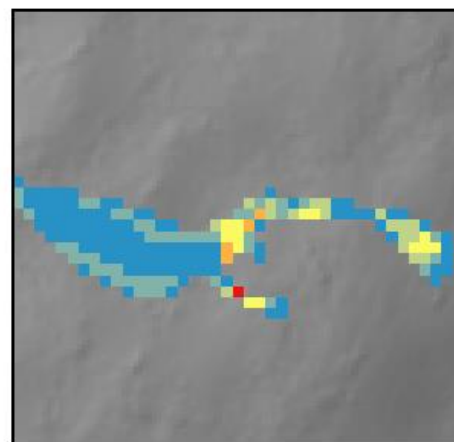


Figura 35. Mancha do fluxo de detritos: D-inf, resolução de 2,5 m,  $\nu = 0,5 \text{ m}^2/\text{s}$

A resolução de 5 m apresentou taxas de acerto que variaram entre 37,92% e 94,8%, enquanto os valores de  $H_s$  ficaram abaixo de 0,5 (Tabela 12). O melhor resultado teve viscosidade de  $0,5 \text{ m}^2/\text{s}$ , com TPR de aproximadamente 49%. A mancha gerada (Figura 36) nessa simulação não atinge metade da distância percorrida pelo fluxo de detritos



observado. Para as viscosidades mais baixas, o fluxo prosseguia por uma distância muito maior, entretanto a taxa de falsos positivos aumentava expressivamente, chegando a 82,8%. Por essa razão, para essa resolução, a representação do fluxo de detritos que possui o melhor escore de Heidke subestima o seu real alcance.

Tabela 12. Índices para as simulações com D-inf para 5 m de resolução

CP (m)	VISCOSIDADE CINEMÁTICA (m <sup>2</sup> /s)	TPR	FPR	FDR	FNR	HE	TEMPO (s)	A.M. (m)
0,01	1	37,92	6,97	47,90	62,08	0,35	141	1,01
	0,8	40,06	7,46	48,22	59,94	0,36	135	0,27
	0,5	48,93	8,69	47,02	51,07	0,42	68	0,38
	0,05	91,13	37,92	67,54	8,87	0,31	142	0,39
	0,005	94,80	82,81	81,37	5,20	0,05	536	0,41

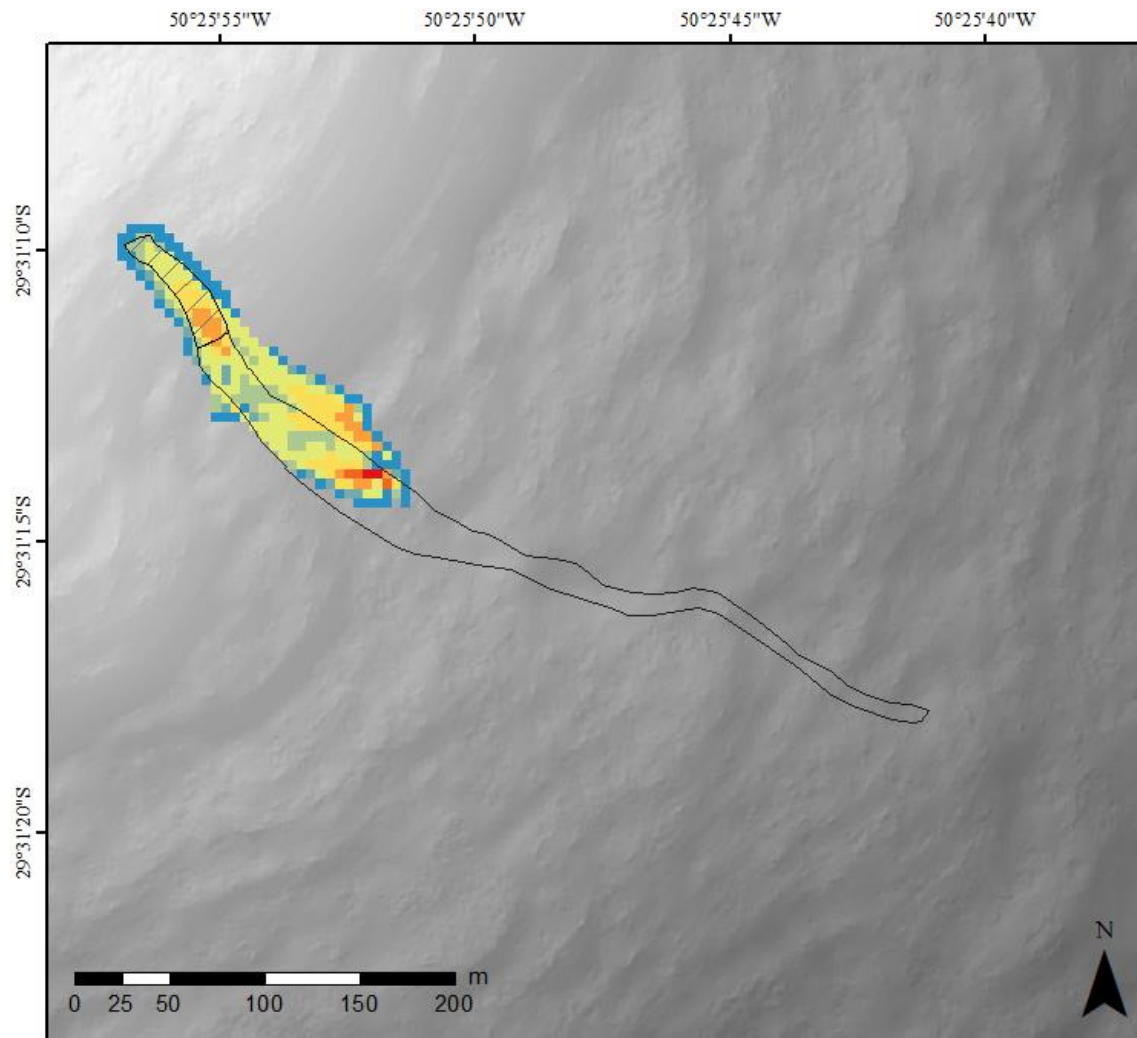
Para a viscosidade de 0,0005 m<sup>2</sup>/s não houve convergência ao critério de parada. Esse foi o único caso que não convergiu para o D-inf. Como o algoritmo distribui seu fluxo para até duas células, possivelmente ao atingir o canal o fluxo converge para poucos pontos, causando um efeito semelhante aos casos que não convergiram com o algoritmo D8.

Tabela 13. Índices para as simulações com D-inf para 10 m de resolução e critério de parada de 0,01 m

VISCOSIDADE CINEMÁTICA (m <sup>2</sup> /s)	TPR	FPR	FDR	FNR	H <sub>s</sub>	TEMPO (s)	A.M. (m)
1	32,10	8,89	58,06	67,90	0,26	50	0,54
0,8	32,10	9,38	59,38	67,90	0,25	57	0,47
0,5	35,80	10,37	59,15	64,20	0,27	52	0,40
0,05	79,01	22,22	58,44	20,99	0,42	36	0,20
0,005	98,77	106,67	84,38	1,23	-	92	0,16
0,0005	100,00	182,47	90,12	0,00	-	272	0,16

Nas simulações com resolução de 10 m, o maior valor de  $H_s$  foi de 0,42 para as viscosidades de 0,05 m<sup>2</sup>/s (Tabela 13). A taxa de acerto foi de 79%, entretanto 58% da área simulada ficou fora da zona de transporte observada (Figura 37), deixando o  $H_s$  baixo. Para as viscosidades abaixo de 0,05 m<sup>2</sup>/s a quantidade de falsos positivos foi muito maior do que a quantidade de total de *pixels* negativos estimados (5 vezes os *pixels* da cicatriz). Como os VN eram calculados pela diferença entre total de *pixels* negativos e os

falsos positivos, nesses casos o VN assumia um valor negativo. Por tal motivo, os VN para esses casos foram considerados iguais a zero, tornando os índices de Heidke in calculáveis.



#### LEGENDA

##### Altura final do fluxo (m)

0,00 - 0,05
0,05 - 0,10
0,10 - 0,15
0,15 - 0,20
0,20 - 0,25
0,25 - 0,30
0,30 - 0,35
0,35 - 0,40

##### Zona de iniciação



##### Zona de transporte

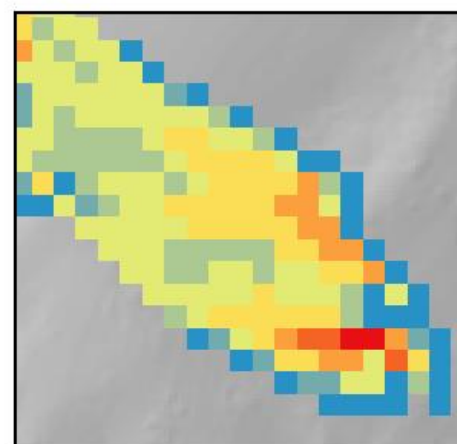
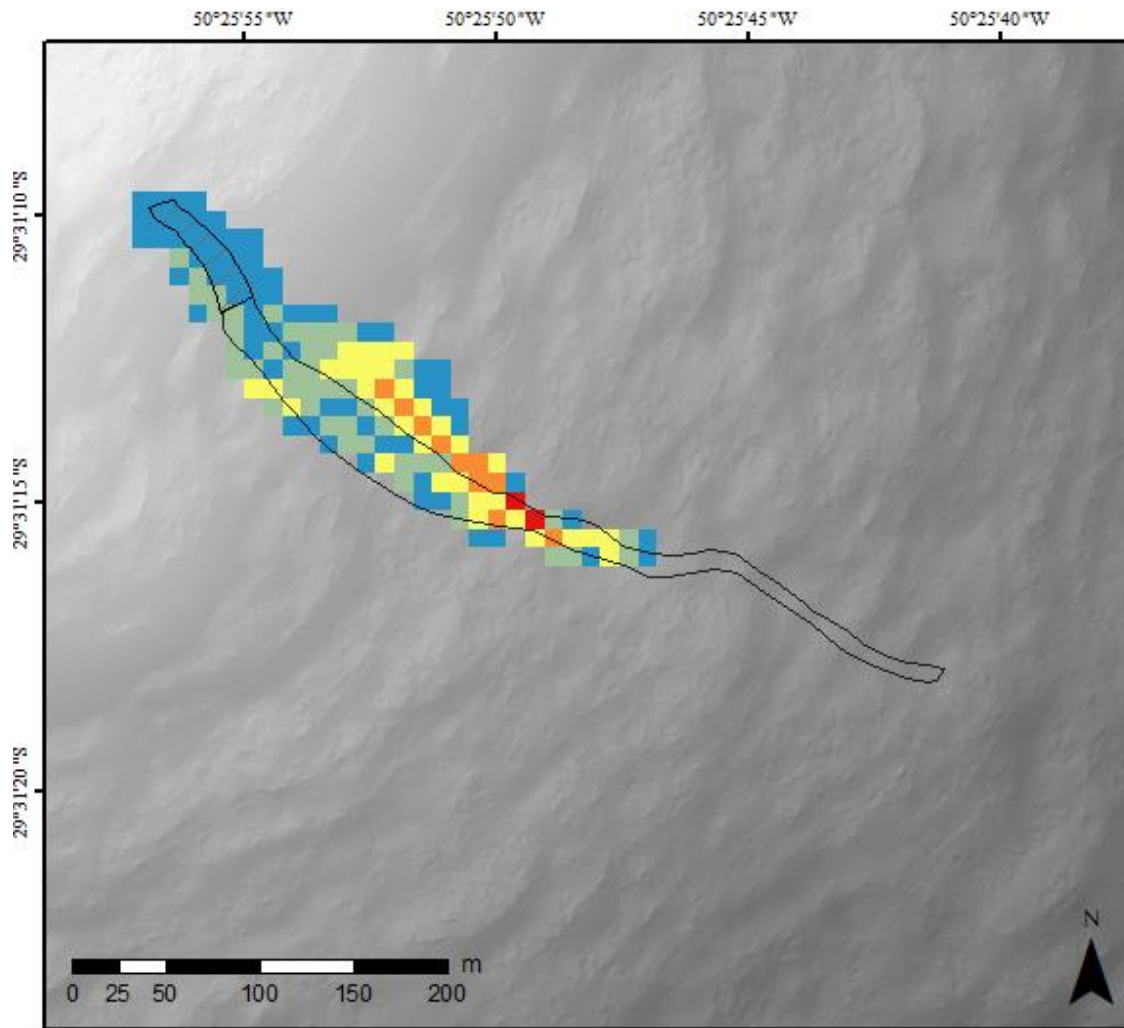


Figura 36. Mancha do fluxo de detritos: D-inf, resolução de 5m,  $\nu = 0,5 \text{ m}^2/\text{s}$



### LEGENDA

Altura final do fluxo (m)	Zona de iniciação
<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: blue; border: 1px solid black;"></span> 0,00 - 0,05	<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; border: 1px solid black; background: repeating-linear-gradient(45deg, transparent, transparent 2px, black 2px, black 4px);"></span>
<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: lightgreen; border: 1px solid black;"></span> 0,05 - 0,10	<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; border: 1px solid black; background-color: white;"></span>
<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: yellow; border: 1px solid black;"></span> 0,10 - 0,15	
<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: orange; border: 1px solid black;"></span> 0,15 - 0,20	
<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: red; border: 1px solid black;"></span> 0,20 - 0,25	

Figura 37. Mancha do fluxo: D-inf,  $v = 0,05 \text{ m}^2/\text{s}$  com resolução de 10 m

Ao comparar o efeito das diferentes resoluções (Figura 38), percebe-se que os melhores  $H_s$  foram obtidos para a resolução de 2,5 m. Ao utilizar *rasters* mais grosseiros, o desempenho cai bastante, especialmente para as maiores viscosidades. Esse comportamento pode estar atrelado às baixas velocidades de fluxo resultantes nessas viscosidades, que acabam por transferir um volume insuficiente para superar o critério de parada, encerrando a simulação precocemente. Esse término precoce das simulações pode ser observado ao comparar as manchas para diferentes resoluções: enquanto para as

melhores resoluções o fluxo tem longo alcance, para as resoluções mais grosseiras o fluxo possui um alcance inferior. Adicionalmente, a maior dimensão do *pixel* também contribui para aumentar a área superestimada pelos falsos positivos.

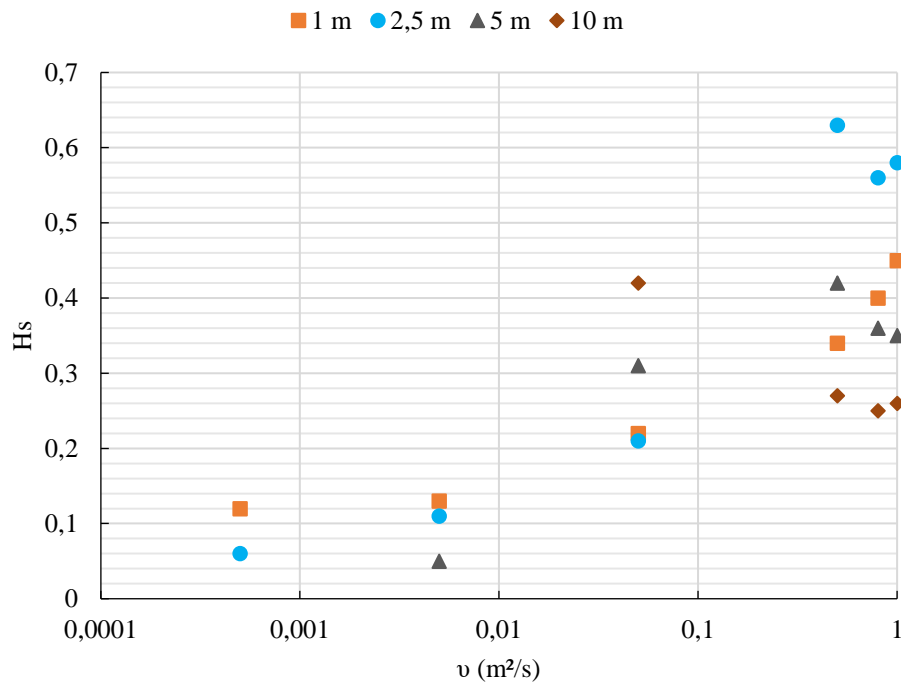


Figura 38. Gráfico comparativo dos  $H_s$  para D-inf com diferentes resoluções

O efeito da resolução nas séries de simulações pode ser melhor observado por meio das curvas ROC adaptadas (Figura 39). As AUCs variaram de 0,738 a 0,852 e há um espaçamento maior entre os pontos de uma mesma curva, indicando que o modelo é sensível tanto à mudança da resolução como da viscosidade quando utilizado o algoritmo D-inf. Ademais, nesse diagrama, quanto mais à esquerda e mais acima estiver o ponto, melhor é o desempenho da simulação. Assim, como pode ser notado, a simulação com 0,5 m²/s da curva de 2,5 m (cor roxa) ocupa essa posição, corroborando o fato dessa simulação possuir o maior valor de  $H_s$ .

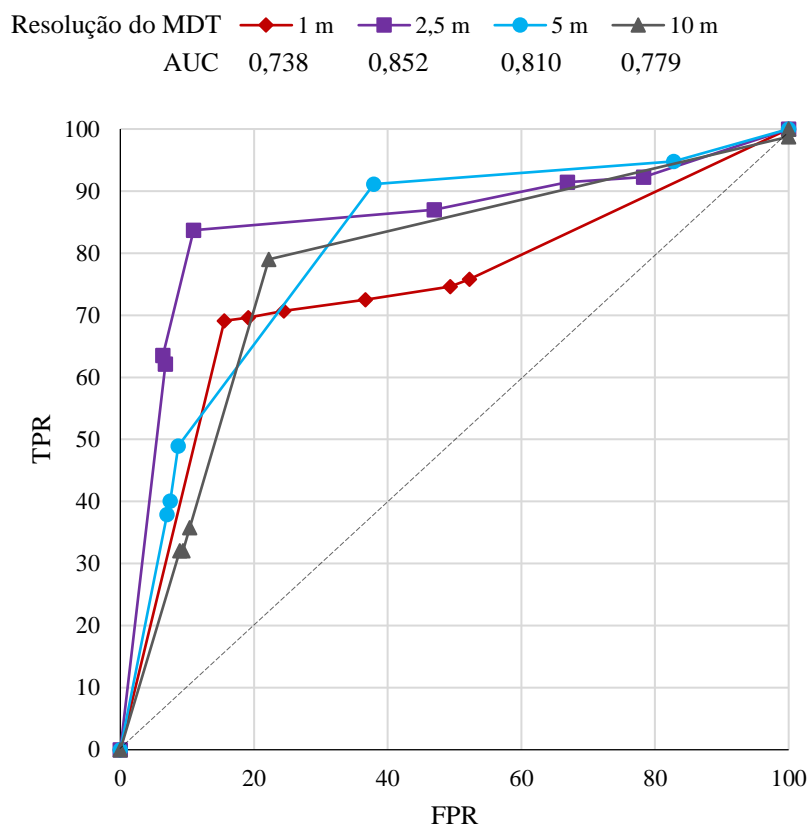


Figura 39. Curvas ROC adaptadas para D-inf com diferentes resoluções

### 6.1.3 Multiple Flow Direction

O último algoritmo de direcionamento testado foi o MFD de Freeman (1991). Foram testados expoentes operacionais ( $\eta$ ) de 1,0 e 1,5, o primeiro causa espalhamento excessivo e diversas simulações encerravam com poucas iterações, até mesmo para viscosidades baixas, enquanto o de 1,5 começava a aproximar ao comportamento do D8 em alguns pontos, tornando as simulações longas. Dessa forma, nas simulações foi utilizado um expoente de 1,25.

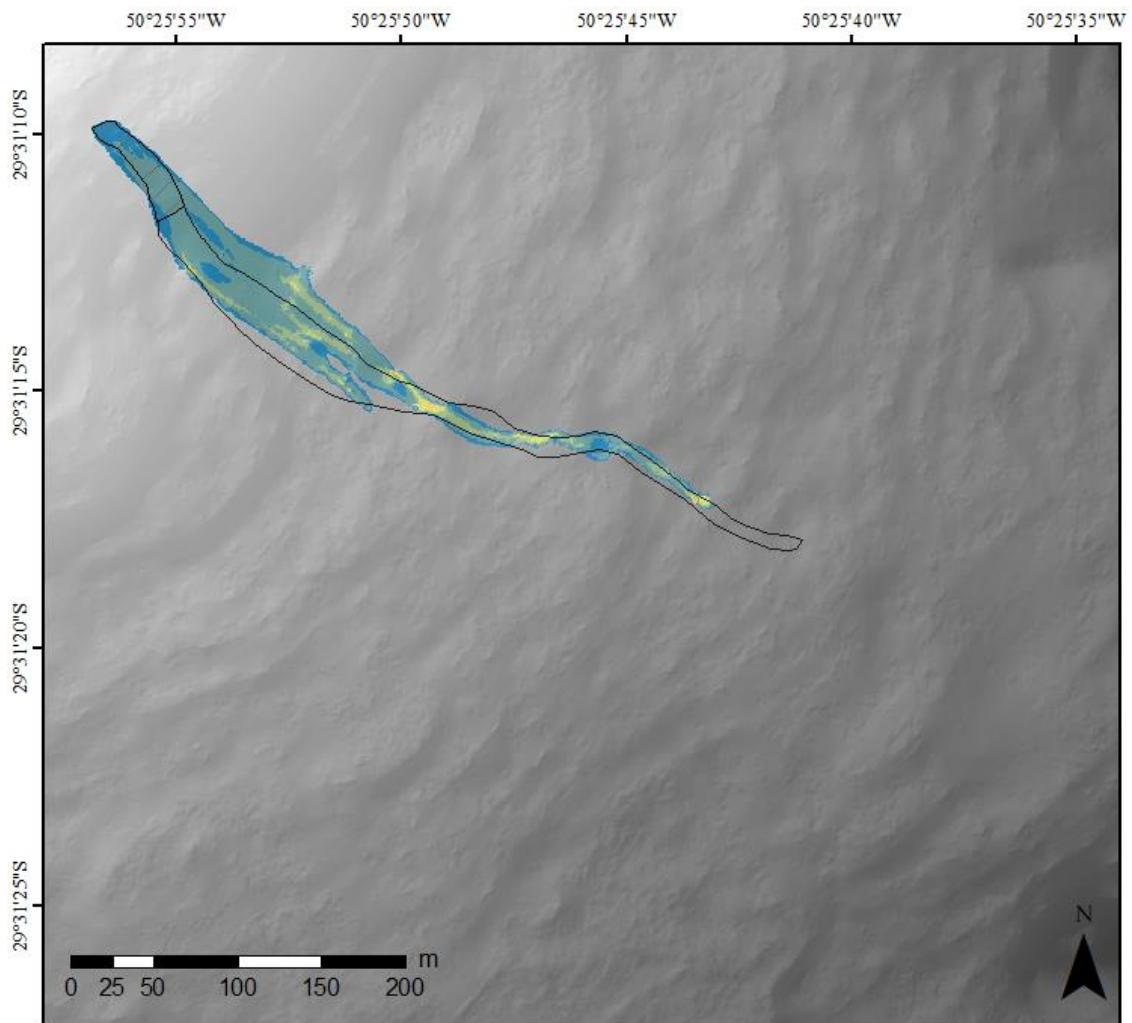
Para a resolução de 1 m, o índice  $H_s$  chegou a 0,63, com taxa de verdadeiros positivos de 85,8% e taxa de falsos positivos de 11,9% para viscosidade de 0,5 m<sup>2</sup>/s (Tabela 14). O desempenho para as viscosidades de 1 e 0,8 m<sup>2</sup>/s também foram altos, decaindo substancialmente a partir da viscosidade de 0,05 m<sup>2</sup>/s por conta do aumento da área superestimada.

Tabela 14. Índices para as simulações de MFD com resolução de 1 m e critério de parada de 0,01 m

VISCOSIDADE CINEMÁTICA (m <sup>2</sup> /s)	TPR	FPR	FDR	FNR	H <sub>s</sub>	TEMPO (s)	A.M. (m)
1	67,81	7,68	36,15	32,19	0,59	331	0,42
0,8	75,52	8,56	36,18	24,48	0,62	424	0,55
0,5	85,81	11,89	40,94	14,19	0,63	527	2,72
0,05	89,92	52,66	74,54	10,08	0,19	1371	1,33
0,005	93,73	81,92	81,38	6,27	0,05	5766	0,57

As Figura 40 e 41 mostram que, apesar do score ser bem semelhante para as viscosidades de 0,5 e 0,8 m<sup>2</sup>/s, a mancha é bastante diferente. Para o caso mais viscoso, o fluxo é interrompido antes de chegar ao final da cicatriz observada, obtendo uma taxa de acertos de 75,5%. No segundo caso, o movimento continua além da cicatriz, chegando a criar uma bifurcação pela qual o fluxo segue por dois caminhos distintos. Dessa maneira, é importante atestar que o índice  $H_s$ , apesar de ser um bom método para comparar diferentes simulações (VAKSHOORI, 2018), requer observações adicionais para verificar se o maior score realmente satisfaz ao problema analisado. Há a possibilidade de duas simulações possuírem  $H_s$  semelhantes, mas a taxa de acertos entre eles serem bastante diferentes, uma vez que a proporção de acertos é igualmente compensada pela taxa de falsos positivos em ambos os casos.

Em alguns casos do MFD também é possível observar ramificações do fluxo, tal como visto no D-inf, entretanto não tomam as mesmas dimensões. Esse comportamento é perceptível em resultados como o da Figura 41, no qual percebe-se que parte do fluxo está seguindo um caminho na direção nordeste próximo ao fim da zona de transporte.



### LEGENDA

#### Altura final do fluxo (m)

[Blue box]	0,000 - 0,075
[Teal box]	0,075 - 0,150
[Light green box]	0,150 - 0,225
[Yellow-green box]	0,225 - 0,300
[Yellow box]	0,300 - 0,375
[Orange box]	0,375 - 0,450
[Red-orange box]	0,450 - 0,525
[Red box]	0,525 - 0,600

#### Zona de inciação



#### Zona de transporte

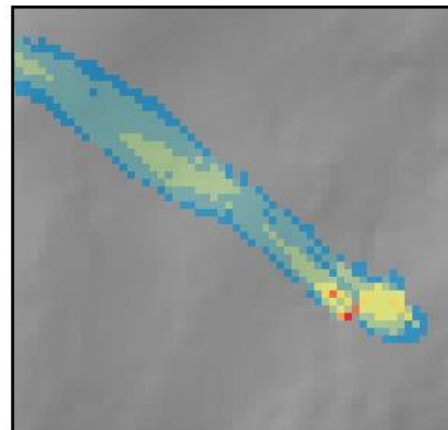
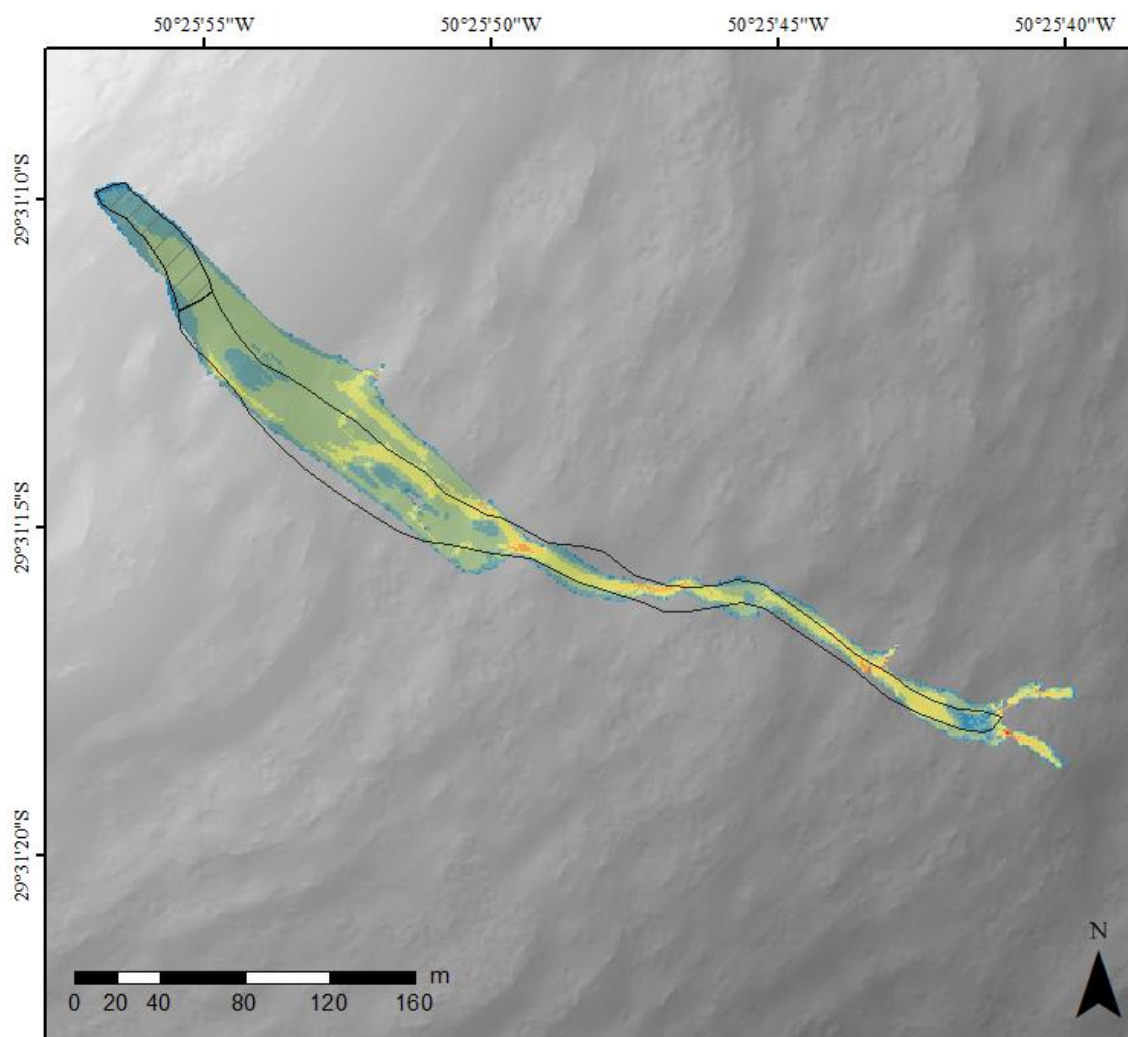


Figura 40. Mancha do fluxo de detritos: MFD, resolução de 1m,  $v = 0,8 \text{ m}^2/\text{s}$



### LEGENDA

#### Altura final do fluxo (m)

0,00 - 0,02
0,02 - 0,06
0,06 - 0,10
0,10 - 0,17
0,17 - 0,24
0,24 - 0,44
0,44 - 0,76
0,76 - 2,50

#### Zona de iniciação



#### Zona de transporte

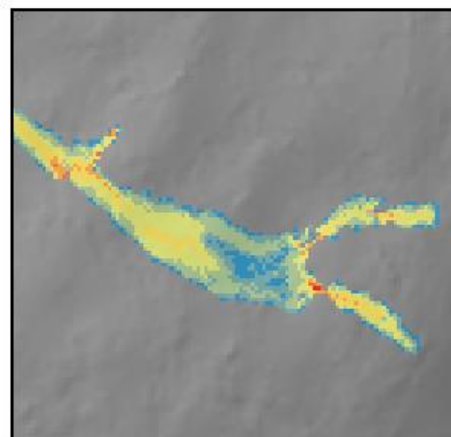


Figura 41. Mancha do fluxo de detritos: MFD, resolução de 1m,  $v = 0,5 \text{ m}^2/\text{s}$

Como pode ser observado na Tabela 15, o tempo de simulação dos três casos com maior viscosidade foram maiores que os menos viscosos. Uma das explicações reside na baixa velocidade de movimentação do fluxo quando muito viscosos, requerendo maior tempo para percorrerem as células. O modelo impede de um fluxo ir para a próxima célula



caso o seu valor seja menor que 0,001, portanto o fluxo não se propagou a uma longa distância, mesmo ficando por mais tempo em simulação.

Tabela 15. Índices para as simulações de MFD com resolução de 2,5 m e critério de parada de 0,005 m

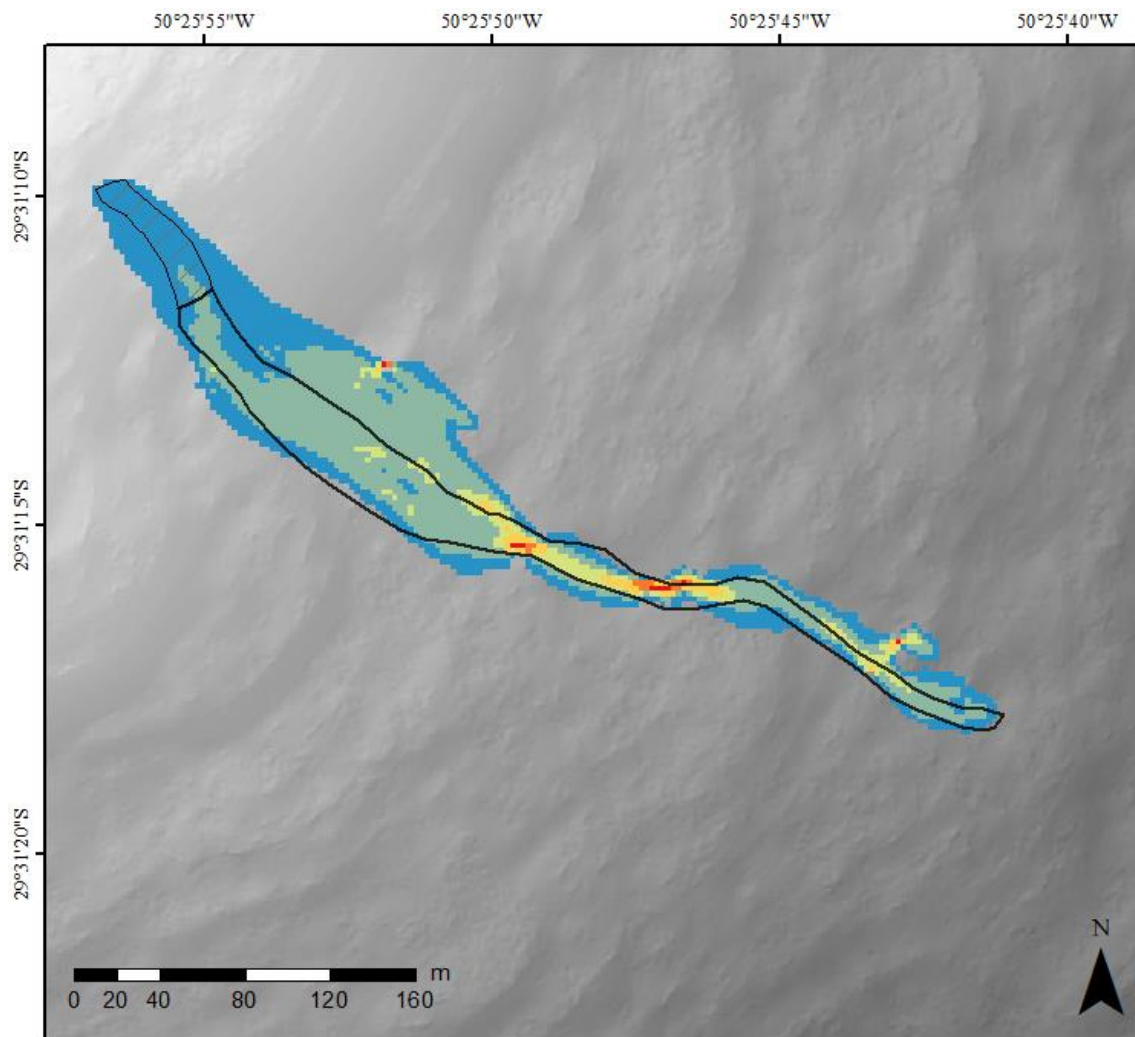
VISCOSIDADE CINEMÁTICA (m <sup>2</sup> /s)	TPR	FPR	FDR	FNR	H <sub>s</sub>	TEMPO (s)	A.M. (m)
1	50,04	8,87	46,99	49,96	0,42	543	0,36
0,8	53,67	9,54	47,05	46,33	0,44	539	0,32
0,5	69,34	12,70	47,81	30,66	0,50	871	0,46
0,05	97,27	23,42	54,63	2,73	0,51	222	0,30
0,005	99,77	100,24	83,40	0,23	-	393	0,15
0,0005	100,00	142,50	87,69	0,00	-	471	0,20

Em comparação à resolução anterior (1 m), percebe-se que a qualidade da simulação, para cada uma das viscosidades, baixou, com exceção da viscosidade de 0,05 m<sup>2</sup>/s. Essa simulação foi a de melhor desempenho, com 97% de acerto e um H<sub>s</sub> de 0,51. A mancha do fluxo (Figura 42) não segue muito além do fim da zona de transporte, entretanto a largura do escoamento logo após a iniciação é bem maior, extrapolando os limites da cicatriz tanto ao sul quanto ao norte. Tal fato afetou o escore, deixando-a com um desempenho razoável, apesar do alto nível de acerto.

Ao diminuir a resolução para 5 m, a queda do desempenho se tornou mais expressiva. A melhor simulação, para viscosidade de 0,05 m<sup>2</sup>/s, obteve um escore de 0,37 (Tabela 16). Já para a resolução de 10 m, o maior escore foi de 0,17 (Tabela 17), ficando tão baixo quanto às simulações com D8.

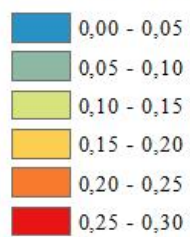
Tabela 16. Índices para as simulações de MFD com resolução de 5 m e critério de parada de 0,01 m

VISCOSIDADE CINEMÁTICA (m <sup>2</sup> /s)	TPR	FPR	FDR	FNR	H <sub>s</sub>	TEMPO (s)	A.M. (m)
1	30,58	8,56	58,33	69,42	0,25	138	0,53
0,8	32,11	9,17	58,82	67,89	0,25	129	0,50
0,5	36,70	10,70	59,32	63,30	0,27	127	0,41
0,05	69,72	21,35	60,49	30,28	0,37	70	0,21
0,005	100,00	70,34	77,86	0,00	0,12	126	0,12
0,0005	100,00	198,90	90,86	0,00	-	223	0,14



### LEGENDA

#### Altura final do fluxo (m)



#### Zona de iniciação



#### Zona de transporte

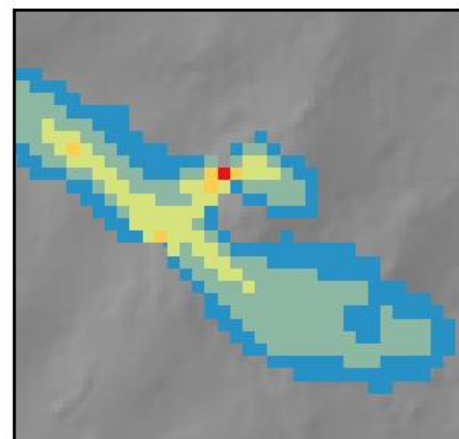
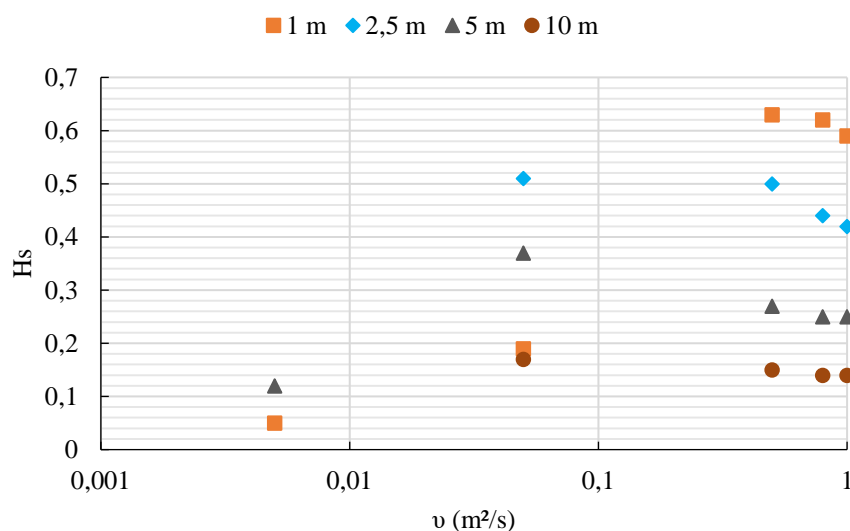


Figura 42. Mancha do fluxo de detritos: MFD, resolução de 2,5m,  $v = 0,05 \text{ m}^2/\text{s}$

Tabela 17. Índices para as simulações de MFD com resolução de 10 m e critério de parada de 0,01 m

VISCOSIDADE CINEMÁTICA (m <sup>2</sup> /s)	TPR	FPR	FDR	FNR	H <sub>s</sub>	TEMPO (s)	A.M. (m)
1	23,46	10,62	69,35	76,54	0,14	50	0,45
0,8	23,46	10,62	69,35	76,54	0,14	42	0,44
0,5	25,93	11,60	69,12	74,07	0,15	45	0,44
0,05	46,91	24,69	72,46	53,09	0,17	45	0,19
0,005	100,00	100,00	83,33	0,00	-	73	0,08
0,0005	100,00	239,01	92,28	0,00	-	106	0,04

Ao comparar os resultados com diferentes resoluções (Figura 43), percebe-se uma queda do desempenho conforme a dimensão do *pixel* aumenta para as viscosidades acima de 0,05 m<sup>2</sup>/s. Uma das explicações para tal comportamento se assemelha ao que ocorreu com o D-inf: para as viscosidades mais altas, a velocidade do fluxo é menor e, ao distribuir o volume para diversas células do entorno, a diferença de altura entre um passo de tempo e outro é pequena para as resoluções mais grosseiras, provocando o término precoce da simulação. Essa explicação é corroborada pela baixa taxa de verdadeiros positivos nas simulações mais viscosas para as resoluções de 5 e 10 m. Adicionalmente, para as viscosidades muito baixas, o espalhamento para mais de dois *pixels* aumentou muito a mancha simulada, resultando em uma alta taxa de falsos positivos (Tabela 16 e Tabela 17). Dessa forma, é possível observar que o MDT com maior resolução tem uma melhor capacidade de lidar com o espalhamento provocado pelo MFD.

Figura 43. Gráfico comparativo de  $H_s$  para diferentes resoluções com MFD

De toda forma, o maior  $H_s$  foi obtido com viscosidade de  $0,5 \text{ m}^2/\text{s}$  para a resolução de  $1 \text{ m}$ . Para as demais resoluções, a viscosidade com maior desempenho foi a de  $0,05 \text{ m}^2/\text{s}$ , com o  $H_s$  chegando até a  $0,37$ . Entretanto, esse valor é expressivamente menor que o obtido na simulação de melhor desempenho ( $H_s = 0,63$ ).

Por fim, as ROCs para MFD (Figura 44) indicam que o modelo é sensível tanto à viscosidade quanto à resolução do MDT, uma vez que as AUCs variaram de  $0,616$  a  $0,889$  e os pontos estão distantes entre si em cada uma das curvas.

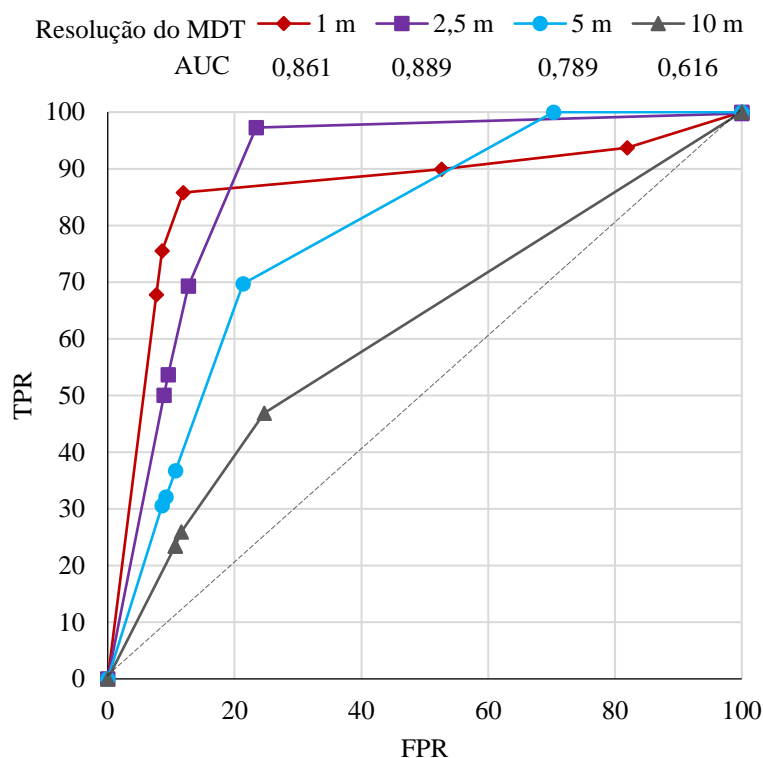


Figura 44. Curvas ROC adaptadas para MFD com diferentes resoluções

#### 6.1.4 Comparação entre os métodos de direcionamento

Os algoritmos de direcionamento, por possuírem funcionamentos distintos, apresentaram comportamentos diferenciados conforme a alteração da resolução do MDT. Para o D8, menores resoluções contribuíram para o aumento do acerto do modelo, mas não refletem no aumento na capacidade do algoritmo de representar melhor o fluxo, uma vez que o maior acerto é reflexo do aumento da área ocupada pela *pixel* dentro da cicatriz. Para o D-inf, o mesmo ocorreu ao comparar a resolução de  $1 \text{ m}$  e  $2,5 \text{ m}$ , mas percebe-se

que, para resoluções de 5 e 10 m, a capacidade do algoritmo em representar o fluxo foi bastante prejudicada.

Alguns autores (RICKENMANN et al., 2016; WANG et al., 2008) reportaram que MDTs mais detalhados são mais adequados para representar fluxos de detritos. Além do mais, mesmo que o resultado de uma simulação seja melhor com um *raster* de pior resolução, a resolução do MDT influencia significativamente a distribuição da massa (STOLZ; HUGGEL, 2008). Portanto, considerando que um MDT com melhor resolução tem o potencial de representar o terreno de maneira mais fidedigna, os testes subsequentes, com diferentes reologias, foram realizados com o algoritmo que resultou no melhor desempenho para a resolução de 1 m. Os resultados são comparados na Figura 45.

É possível perceber que os maiores escores são obtidos ao utilizar o MFD, principalmente para as maiores viscosidades. O D-inf supera o MFD nas viscosidades de 0,5 e 0,05, entretanto o escore para todos os casos nessa viscosidade é baixo (menores que 0,25).

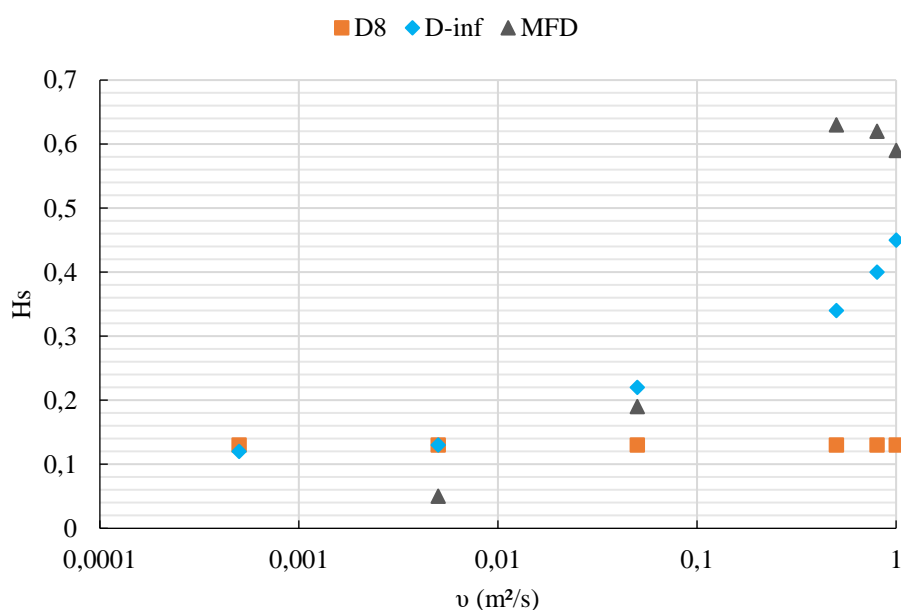


Figura 45. Gráfico comparativo do  $H_s$  para os diferentes algoritmos de direcionamento

A partir dos resultados apresentados até aqui, o D8 perceptivelmente não consegue representar o fluxo de detritos de maneira adequada. Em contrapartida, as manchas geradas pelo D-inf passam a demonstrar um formato mais coerente à zona de transporte

observada. Entretanto, o algoritmo apresentava diversos espaços vazios, provenientes da capacidade distribuir o fluxo somente para duas células. Em compensação, o MFD permite que o fluxo prossiga para qualquer célula que tenha uma altitude menor, permitindo o preenchimento desses espaços vazios. Essa capacidade permitiu que fossem atingidos melhores índices de desempenho. Dessa forma, o MFD foi considerado o direcionamento mais adequado para dar sequência à metodologia, sendo utilizado para todas as simulações da etapa 3.

## 6.2 REOLOGIA DILATANTE

As simulações para fluido dilatante foram realizadas considerando diferentes expoentes de comportamento do fluido ( $n$ ). As simulações com  $n$  de 1,2 levaram a um dos resultados com maior valor de  $H_s$  (Tabela 18). Como pode ser observado, para a viscosidade de 0,5 m<sup>2</sup>/s há uma TPR de 83%, com apenas 9,74% de falsos positivos e 36,9% de FDR.

Tabela 18. Índices para as simulações com coeficiente  $n$  de 1,2

VISCOSIDADE CINEMÁTICA (m <sup>2</sup> /s)	TPR	FPR	FDR	FNR	H <sub>s</sub>	TEMPO (s)	A.M. (m)
1	64,41	7,39	36,46	35,59	0,57	320	0,37
0,5	83,15	9,74	36,94	16,85	0,65	437	0,38
0,1	88,37	32,63	64,87	11,63	0,35	740	0,35
0,05	88,72	36,21	67,11	11,28	0,31	752	0,33
0,01	93,40	69,88	78,91	6,60	0,10	2793	0,69

A mancha gerada (Figura 46) mostra uma concentração de maiores alturas próximas ao centro do caminho do escoamento, apresentando o início de uma ramificação do fluxo próximo ao final da cicatriz observada. As alturas máximas encontradas para este caso foram baixas e percebe-se que há acúmulo em diversos pontos da mancha ( áreas amarelas e vermelhas), indicando que a viscosidade, aliada à reologia dilatante, retardou o movimento do fluxo. Para visualizar melhor o comportamento do fluxo sob a abordagem dilatante e do funcionamento do modelo, foram extraídas as velocidades em diferentes janelas de tempo da simulação. Como pode ser observado na Figura 47, grande parte dos *pixels*, em início de movimento, possuem velocidade de 1 m/s. Essa velocidade fica limitada ao volume disponível no *pixel* na iteração anterior, ou seja, velocidades

maiores que 1 m/s só seriam alcançadas se houver uma célula que acumule mais de 1 m de altura de fluido. Esse comportamento indica que o passo de tempo utilizado poderia ser menor, para que fossem permitidas maiores velocidades – caso fosse 0,5 segundos, por exemplo, a velocidade máxima poderia ser de até 2 m/s para 1 m de altura de fluido. Ao limitar a velocidade do fluxo, quando há mais de uma área de iniciação dentro da região de análise, o tempo em que haverá convergência entre dois fluxos poderá ser atrasado em comparação à situação real.

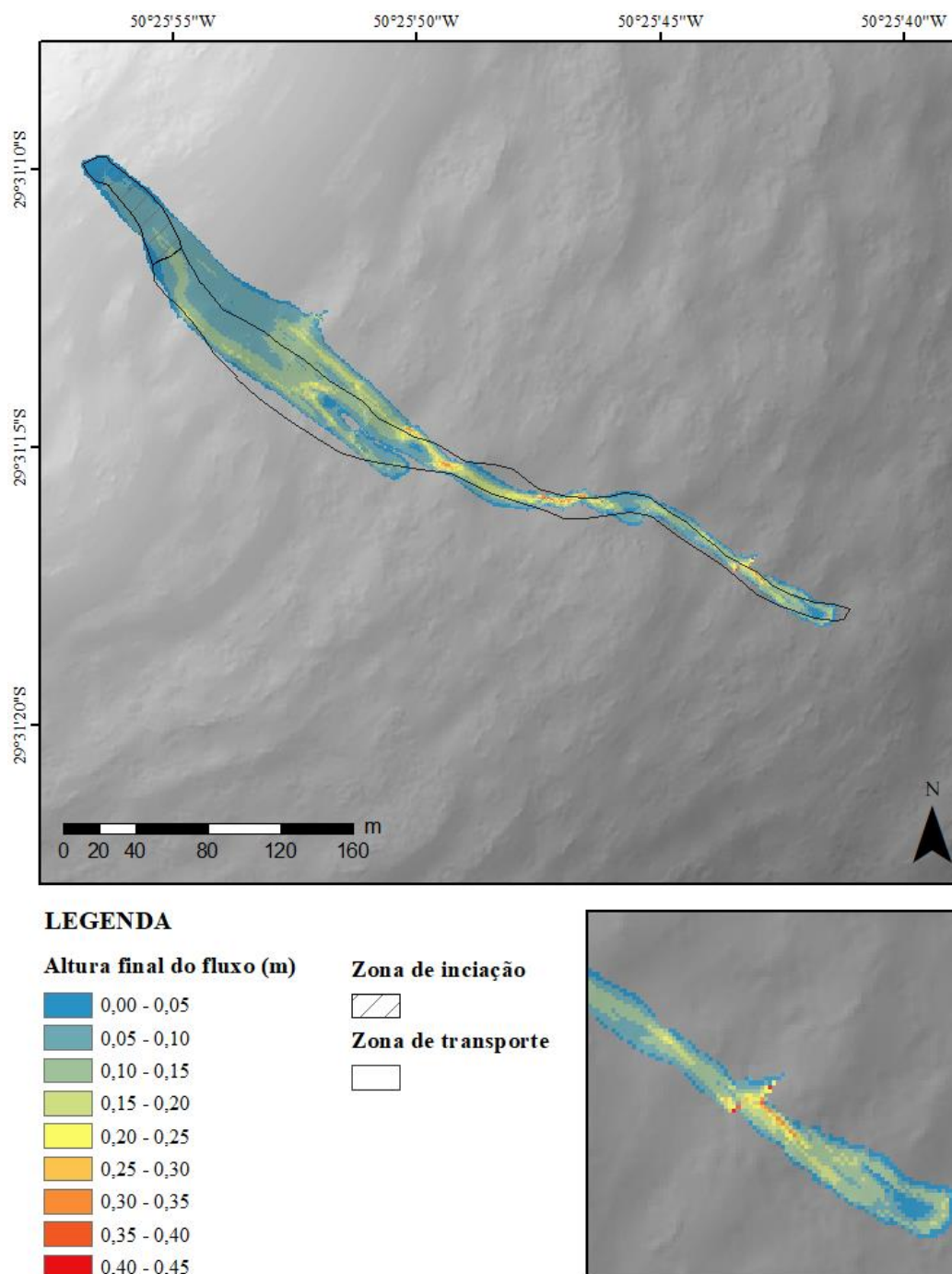


Figura 46. Mancha do fluxo de detritos: dilatante,  $n$  1,2,  $v_D = 0,5 \text{ m}^2/\text{s}$

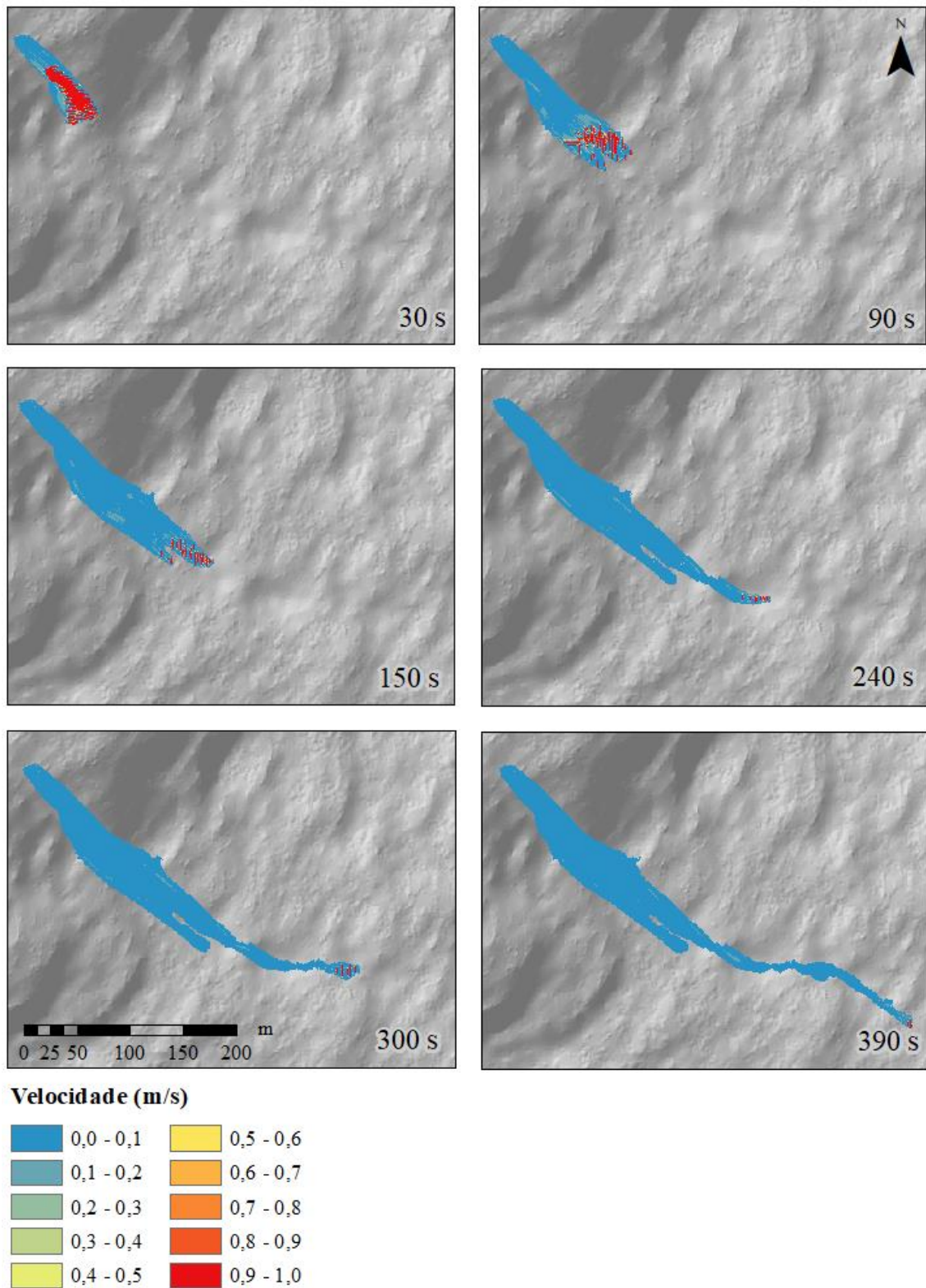


Figura 47. Evolução das velocidades do fluxo de detritos para  $n$  de 1,2



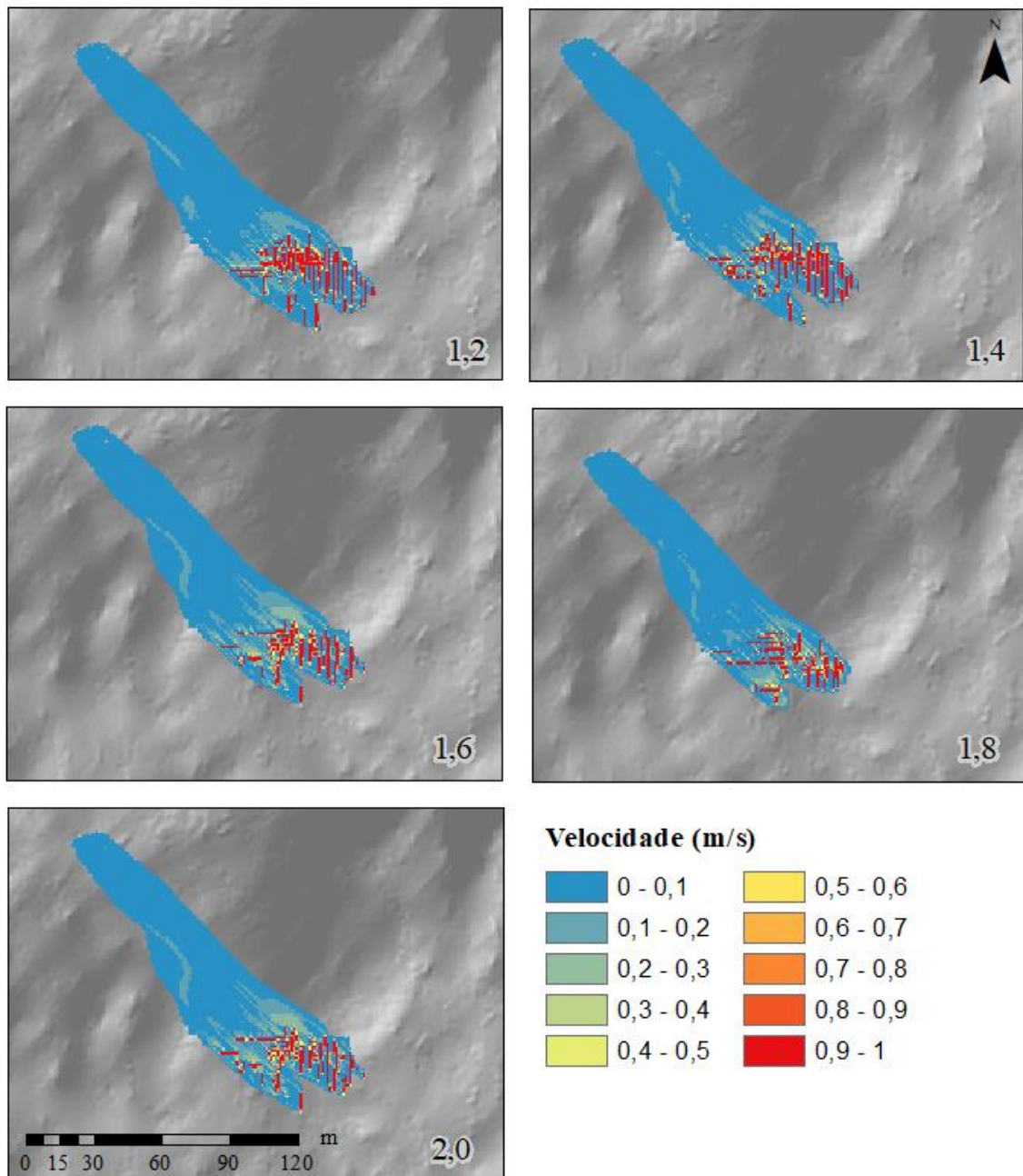


Figura 48. Comparação das velocidades do fluxo aos 90 s do escoamento para diferentes valores de  $n$

Apesar dessa limitação intrínseca ao funcionamento do modelo, a Figura 48 apresenta a diferença das velocidades entre fluidos dilatantes com diferentes expoentes de comportamento ( $n$ ). Como pode-se observar, conforme  $n$  aumenta, a quantidade de *pixels* vermelhos (maiores velocidades) reduz, demonstrando que, mesmo com essa limitação, ainda há diferença o suficiente para provocar diferenças no resultado. Tal diferença é corroborada pelas informações contidas no gráfico da Figura 49. Para as viscosidades de 0,05 e 0,1  $\text{m}^2/\text{s}$ , percebe-se uma maior variabilidade nos desempenhos.

Por essas viscosidades estarem num intermediário entre um cenário com os melhores e os piores resultados, a importância do coeficiente aumenta. Por exemplo, na viscosidade de  $0,1 \text{ m}^2/\text{s}$ , o menor desempenho é atribuído ao menor  $n$ , enquanto o melhor foi para o maior  $n$ . Quanto maior o valor de  $n$ , menores serão as velocidades assumidas em maiores profundidades de escoamento. Os acertos variaram de 87% a 88%, enquanto os falsos positivos variaram de 18% a 32,6% para  $n$  de 2,0 e 1,2, respectivamente. Com isso, percebe-se que para essa viscosidade, as menores velocidades proporcionadas pelo  $n$  de 2,0 controlaram o número de falsos positivos. Em contrapartida, para viscosidade de  $0,5 \text{ m}^2/\text{s}$  a ordem de desempenho praticamente inverteu, indicando que os maiores  $n$  estavam retardando demais o escoamento, impedindo o fluxo de atingir maiores valores de verdadeiros positivos.

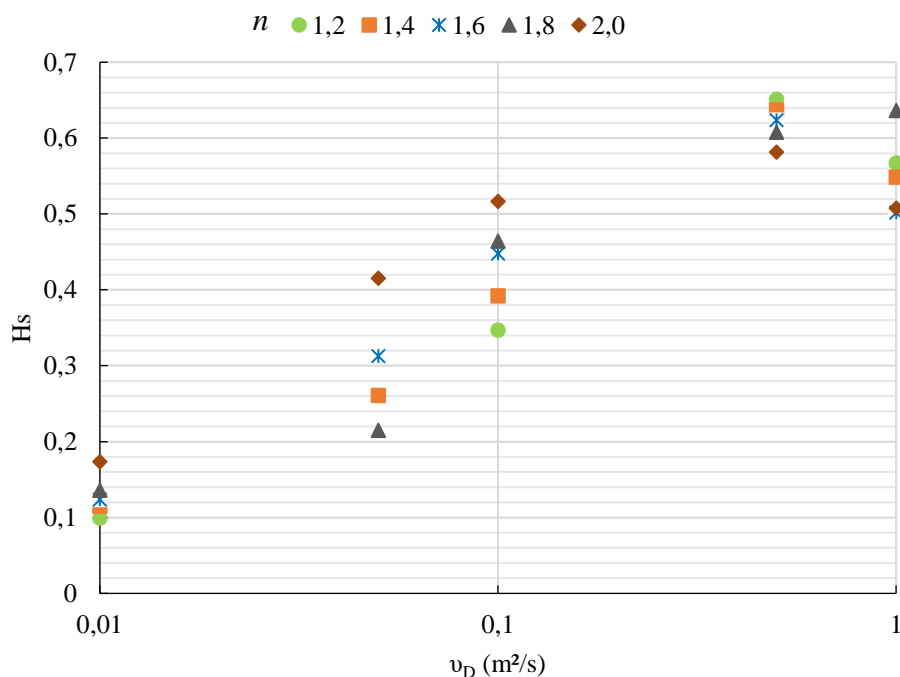


Figura 49. Gráfico comparativo de  $H_s$  para fluidos dilatantes com diferentes  $n$

As curvas ROCs adaptadas para fluido dilatante indicam grande variabilidade nos resultados conforme a variação da viscosidade (Figura 50<sup>3</sup>). A maior diferença reside na contagem de FPR, que variam de 7,4 % a 70 % conforme a viscosidade diminui, para

<sup>3</sup> O Apêndice D possui cada uma das curvas representadas separadamente para melhor visualização

fluido dilatante com  $n$  de 1,2. As AUCs variaram de 0,859 a 0,867, indicando que o desempenho geral do modelo não é fortemente afetado pela variação de  $n$ .

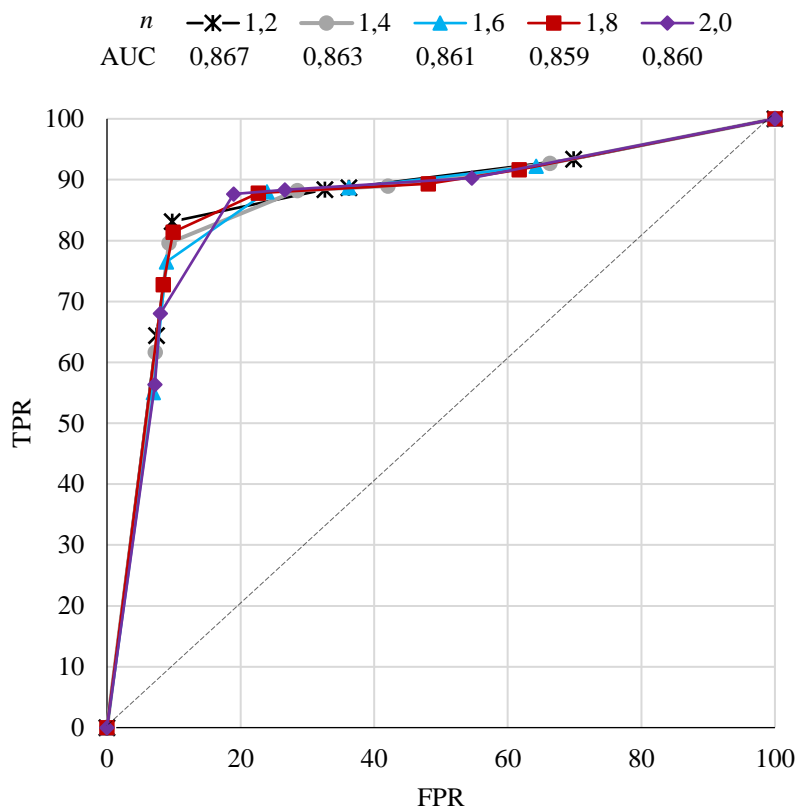


Figura 50. Curvas ROC adaptadas para fluido dilatante com diferentes  $n$

### 6.3 PLÁSTICO DE BINGHAM

As simulações com reologia de plástico de Bingham foram realizadas variando a altura do *plug*. Informações adicionais sobre as simulações podem ser encontradas nos Apêndices A, B e C, os quais possuem as tabelas com a contagem dos elementos da matriz de confusão, índices de desempenho e figuras das manchas simuladas, respectivamente.

A Figura 51 apresenta a comparação dos valores de  $H_s$  entre as diferentes simulações. A variação entre os desempenhos entre diferentes alturas de *plug*, para a maior parte das viscosidades, não tiveram uma variação muito grande. Apenas para a viscosidade mais baixa pode-se observar uma maior dispersão entre os pontos.

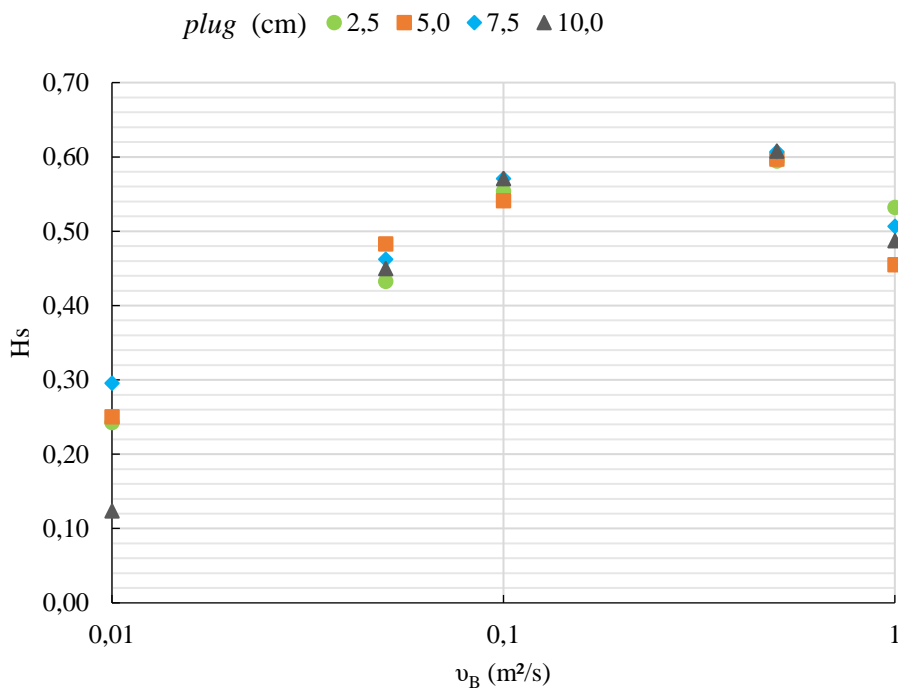


Figura 51. Gráfico comparativo de  $H_s$  para plásticos de Bingham com diferentes alturas de *plug*

O comportamento esperado, para esse tipo de fluido, seria o qual as maiores alturas do *plug* encerrariam a simulação mais rapidamente, uma vez que *pixels* com valores de altura abaixo desse valor não iriam fluir. Entretanto, essa lógica não foi seguida de maneira consistente. Ao observar as comparações entre as simulações, por vezes o maior *plug* passava por mais iterações antes de encerrar a simulação (vide Tabelas 62 a 65, Apêndice B).

Uma das explicações pode estar relacionada com a reativação do movimento de uma célula. Quanto maior o *plug*, maior o volume armazenado na célula e, ao receber uma contribuição de outro *pixel*, a sua velocidade, ao reativar o movimento, seria maior se comparada aos *plugs* menores. Assim, por vezes o *plug* pode ter contribuído para que o critério de parada não fosse atingido tão facilmente.

De toda forma, dentre as simulações realizadas, as que possuem maior desempenho foram as com *plug* de 7,5 e 10,0 cm, ambos para uma viscosidade de 0,5 m<sup>2</sup>/s, com  $H_s$  de 0,61. O acerto chegou a 69% e a taxa de falsos positivos foi de 7,3%. As manchas dessas simulações (Figuras 64 - 67, Apêndice C) mostram que as simulações terminaram antes de atingir o final da cicatriz observada.

Por fim, as curvas ROC adaptadas para Bingham mostraram uma maior sensibilidade à viscosidade quando aplicado *plug* de 10 cm. Já as AUCs ficaram próximas, variando de 0,853 a 0,863, indicando que a alteração da altitude do *plug* não impacta excessivamente nas simulações (Figura 52).

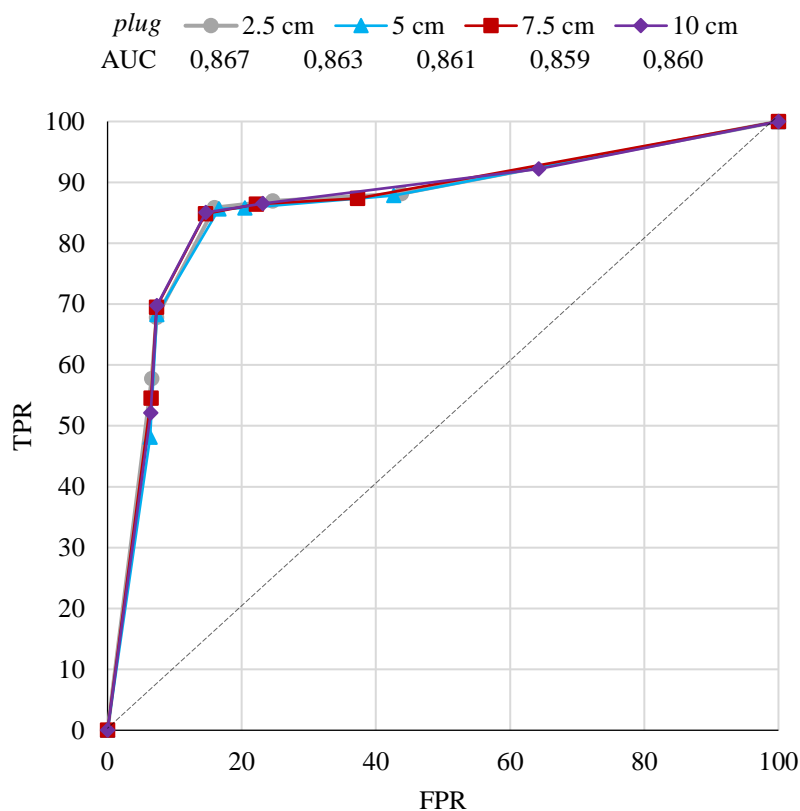


Figura 52. Curvas ROC adaptadas para Bingham com diferentes alturas de *plug*

## 6.4 REOLOGIA DE HERSCHEL-BULKLEY

### 6.4.1 Fluido pseudoplástico

Os resultados a seguir possuem reologia de Herschel-Bulkley com comportamento pseudoplástico, ou seja, a taxa de deformação aumenta com o aumento da tensão aplicada. Assim, os coeficientes de comportamento do fluido ( $m$ ) devem ser menores que 1. A primeira parte apresenta resultados para  $m$  de 0,6 e a segunda para  $m$  de 0,8.

As simulações com  $m$  de 0,6, para todas as alturas de *plug* (Tabelas 66 a 69, Apêndice B) apresentaram um desempenho maior para a viscosidade de 0,5 m<sup>2</sup>/s, seguindo a tendência da maior parte dos resultados apresentados até então.

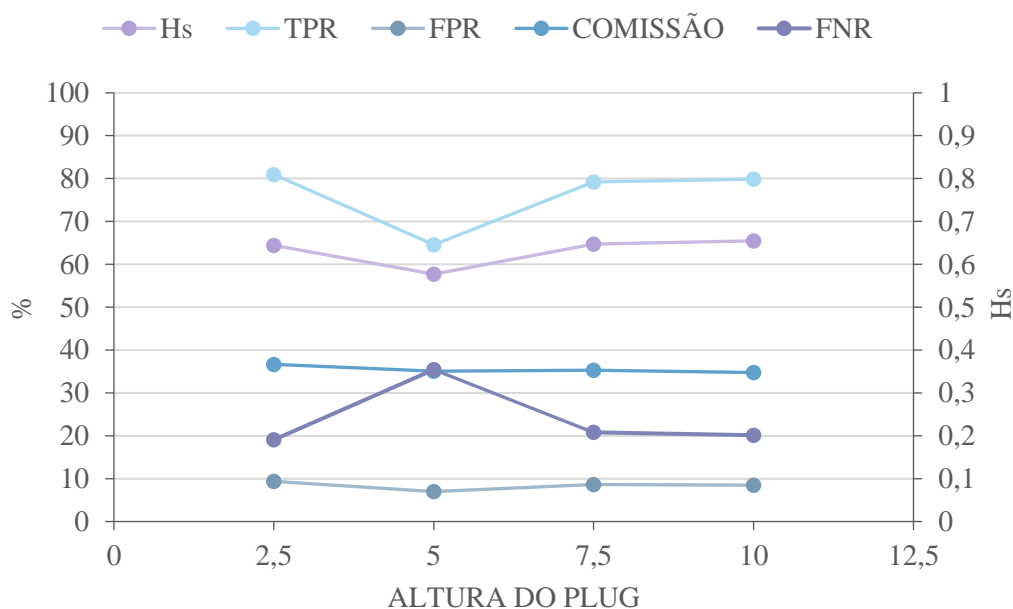


Figura 53. Gráfico comparativo dos índices de desempenho para  $m$  de 0,6

Ao comparar os melhores resultados para  $m$  de 0,6 (Figura 53), todos com viscosidade de 0,5 m<sup>2</sup>/s, o resultado com maior destaque é o com *plug* de 10 cm. Possui o maior dos escores de Heidke (0,65), a menor FDR (34,75%), ao passo que possui apenas 1% a menos de TPR em comparação à maior TPR dentre as quatro simulações (79,84% vs 80,94%). A altura máxima da mancha final é de 0,91 m, a menor dentre as simulações. Ainda que essa simulação apresente o melhor desempenho, foi semelhante aos casos com 2,5 e 7,5 cm de *plug*.

Como pode ser observado no gráfico (Figura 54) os resultados com  $m$  de 0,8, para a viscosidade de 0,5 m<sup>2</sup>/s, também tiveram desempenhos bem semelhantes entre si, sendo que a simulação com *plug* de 5 cm apresentou índices um pouco mais altos, com TPR de 76,86% e FPR de 8,14%.

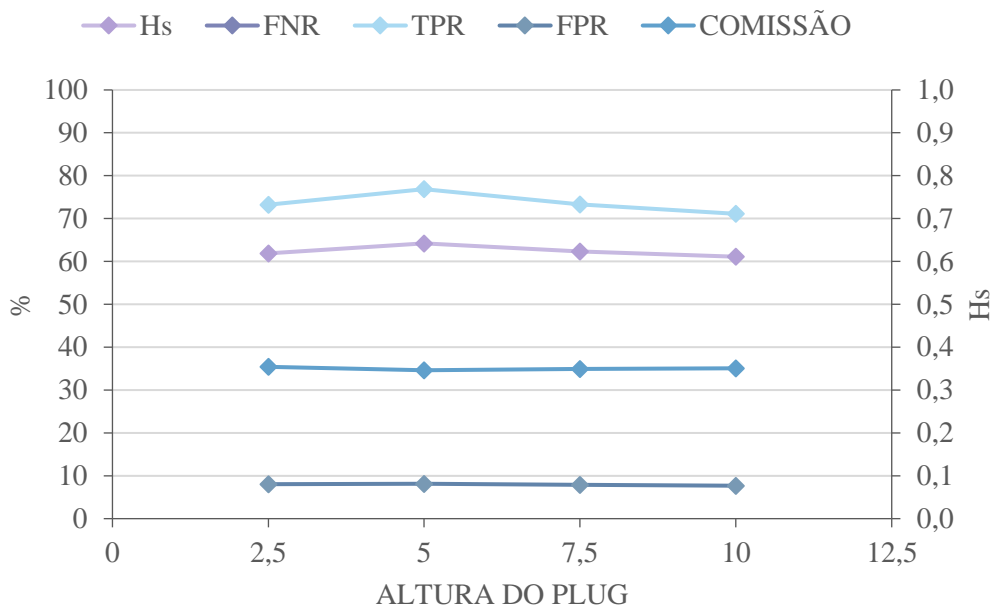


Figura 54. Gráfico comparativo dos índices de desempenho para  $m$  de 0,8

A baixa variabilidade entre os diferentes  $m$  e alturas de *plug* são corroborados pelas curvas ROC adaptadas (Figura 66 e 67, Apêndice D). As AUCs para as oito séries de simulações variaram de 0,855 a 0,858, indicando baixo impacto da variação no desempenho do modelo ao combinar esses dois parâmetros. Como as velocidades máximas estão sendo limitadas por conta dos pressupostos do modelo, a reologia pseudoplástica é a abordagem mais afetada, principalmente em *pixels* com maiores valores de altura de escoamento.

#### 6.4.2 Fluido dilatante

Para as simulações que consideram um fluido de Herschel-Bulkley dilatante, todos os resultados com maior desempenho correspondem à viscosidade de 0,1  $m^2$  (Figura 55 e Figura 56). Em comparação aos pseudoplásticos, houve uma redução geral no desempenho, com valores de  $H_s$  abaixo de 0,6. Tal fato pode ser resultado da associação entre a diminuição da velocidade provocada por valores de  $m$  maiores que 1 e aos efeitos dos *plugs*. Essa combinação tende a retardar mais o movimento do fluxo, por esse motivo a viscosidade cinemática de 0,1 conseguiu atingir um desempenho melhor, uma vez que, mesmo com essas restrições ao movimento, consegue atingir velocidades maiores se comparado aos fluidos mais viscosos.

Assim como observado para os pseudoplásticos, a variação do desempenho promovida pela mudança da altura do *plug* não é muito expressiva, com valores de  $H_s$  que variam de 0,52 a 0,58. No geral, as manchas obtidas nos melhores resultados são consideravelmente semelhantes, visto que precisam estar de acordo com a cicatriz observada, tendo maior diferença entre os formatos do final da mancha simulada.

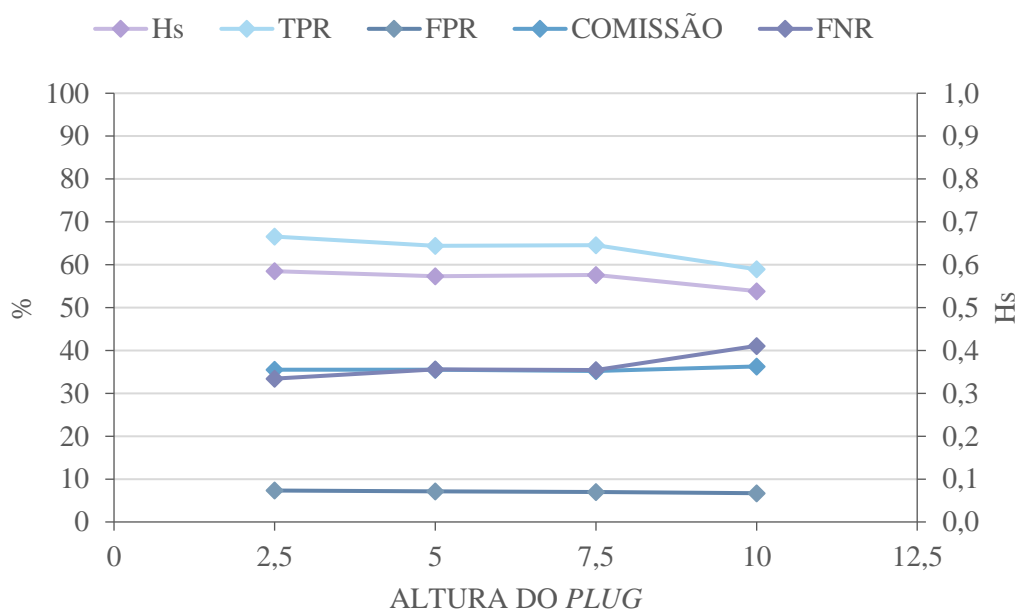


Figura 55. Gráfico comparativo dos índices de desempenho para  $m$  de 1,2

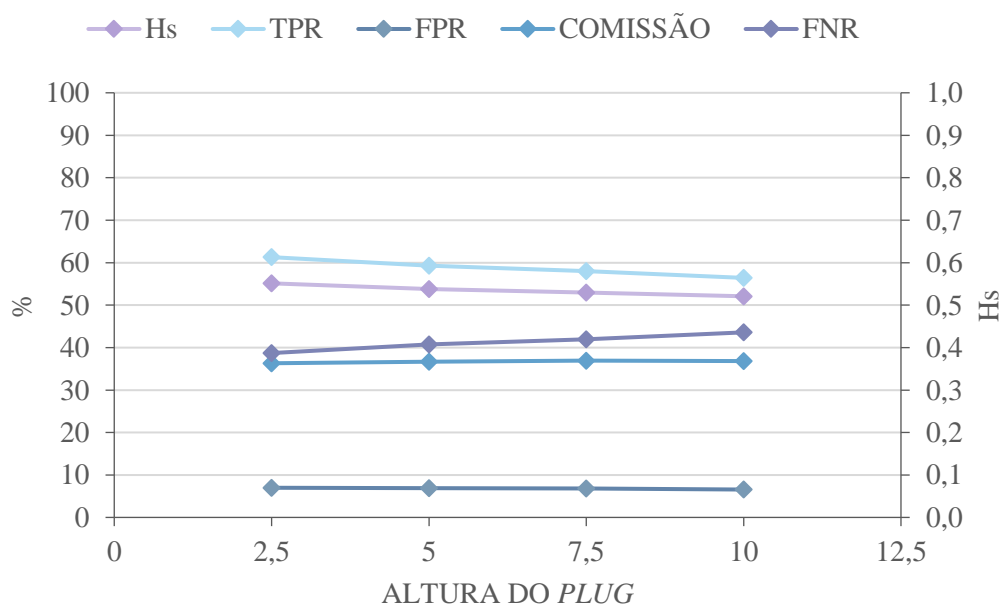


Figura 56. Gráfico comparativo dos índices de desempenho para  $m$  de 1,4



Analogamente ao Herschel-Bulkley pseudoplástico, o dilatante também não apresentou grandes diferenças quando alterado o valor de  $m$  ou do *plug*. As AUCs variaram de 0,858 a 0,870 (Figura 77e Figura 78, Apêndice D). Além do mais, ao comparar  $m$  para pseudoplástico ou dilatante, a mudança das AUCs é pequena: 0,858 a 0,868 para *plug* de 10 cm (Figura 57).

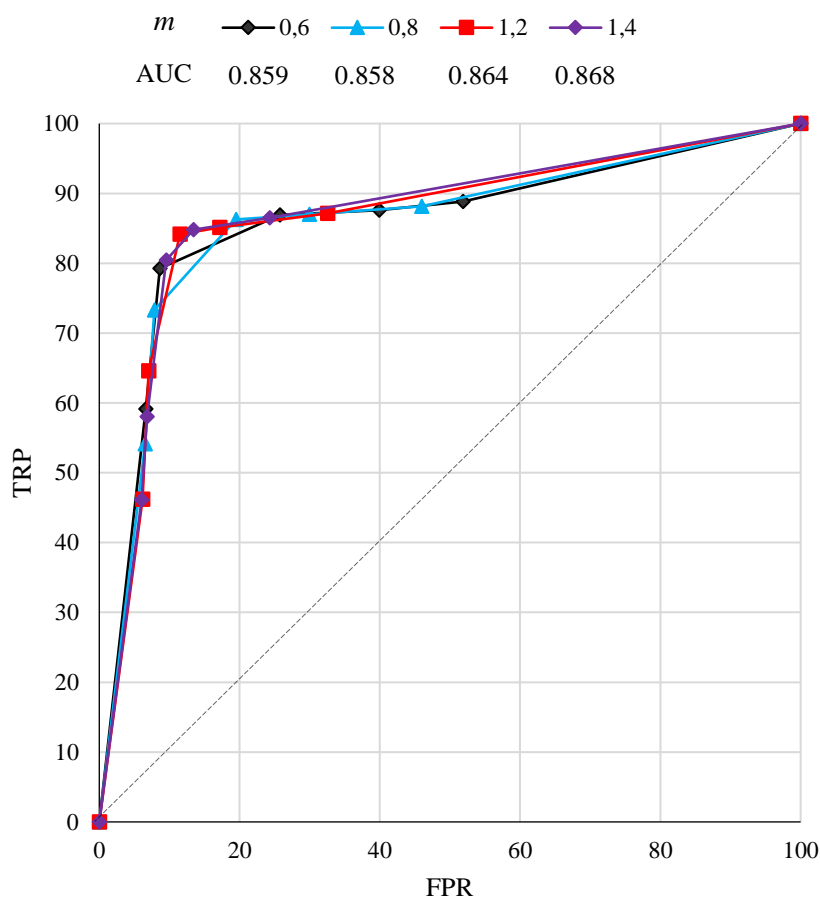


Figura 57. ROCs adaptadas para Herschel-Bulkley com *plug* de 10 cm

## 6.5 COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES REOLOGIAS

No geral, a viscosidade cinemática que demonstra o melhor desempenho na maior parte dos resultados é de  $0,5 \text{ m}^2/\text{s}$ , valor que retrata um fluido bastante viscoso. Alguns estudos reológicos de fluxos de detritos observados apontam viscosidades dinâmicas de até  $6.000 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  (PHILLIPS; DAVIES, 1991). Assim, mesmo considerando fluxos de

dejetos com materiais com alta massa específica levariam a uma viscosidade cinemática com valores acima de  $1 \text{ m}^2/\text{s}$ . Dessa forma, esse valor de viscosidade fica dentro de uma faixa verossímil. Apesar disso, conforme os resultados obtidos em diferentes simulações, esse comportamento pode estar associado ao critério de parada da simulação, que tende a favorecer viscosidades altas, uma vez que promovem baixas velocidades quando próximas aos limites da cicatriz.

Outro fator importante a ser ressaltado é a limitação das velocidades intrínseca ao funcionamento do modelo, que limitará a velocidade ao volume disponível durante o passo de tempo calculado. Assim, quando há uma mudança do comportamento reológico, nem sempre os aumentos das velocidades serão bem representados na distribuição do fluxo. Assim, é interessante que haja um passo de tempo que seja determinado conforme as velocidades máximas encontradas, ou à velocidade associada a um determinado percentil.

Dois simulações alcançaram um  $H_S$  de 0,65, maior valor encontrado: um com fluido dilatante e  $n$  de 1,2, outro com Herschel-Bulkley pseudoplástico, com  $m$  de 0,6 e  $plug$  de 10 cm, ambos para a viscosidade  $0,5 \text{ m}^2/\text{s}$ . Apesar da semelhança entre os escores, ainda é possível perceber que há alteração no comportamento do fluxo. A altura máxima encontrada para a simulação com dilatante foi de 0,38, enquanto o de Herschel-Bulkley foi de 0,91. O primeiro caso apresenta maior resistência ao escoamento quanto maior for a tensão aplicada, enquanto o segundo diminui a resistência. Dessa forma, as melhores condições de simulação partem de dois fluidos com comportamento distintos. Esse resultado também indica que o algoritmo está limitando a representação do comportamento do fluido por conta do passo de tempo fixo. As possíveis maneiras de contornar essa limitação são: i) diminuir o passo de tempo de cálculo, o que aumentaria o tempo necessário para processar a simulação e também aumentaria erros associados às baixas velocidades, onde o fluido iria passar para a célula seguinte no próximo passo de tempo, mesmo que sua velocidade não fosse suficiente para percorrer a dimensão da célula; ii) estabelecer um critério de passo de tempo dinâmico, para se adequar às velocidades máximas encontradas.

## 6.6 ESTABELECIMENTO DAS CARACTERÍSTICAS MAIS ADEQUADAS PARA A SIMULAÇÃO

Para sumarizar os resultados, a Tabela 19 apresenta qual elemento possuiu o melhor desempenho, segundo o objeto de teste. O algoritmo de direcionamento que resultou numa mancha mais fidedigna foi o FMFD. As reologias com os desempenhos mais altos foram as dilatantes (com  $n$  de 1,2) e Herschel-Bulkley com  $m$  0,6 e *plug* de 10 cm. A resolução adequada a ser utilizada para essa simulação é a de 1 m, uma vez que é o MDT de origem e representa de maneira mais adequada o terreno, entretanto, para casos em que não há disponibilidade de resoluções tão detalhadas o D-inf é uma alternativa mais interessante para conter o espalhamento em excesso do MFD. Quanto à viscosidade, a maior parte das simulações que possuíam o maior desempenho para MFD possuía o valor de 0,5 m<sup>2</sup>/s.

Tabela 19. Melhores desempenhos de acordo com o objeto de teste

<b>OBJETO DE TESTE</b>	<b>RECOMENDAÇÃO</b>
Algoritmo de direcionamento	Multiple Flow Direction de Freeman
Abordagem reológica	Dilatante com $n$ de 1,2
Resolução do MDT	1 m
Viscosidade	0,5 m <sup>2</sup> /s
C.P.	0,01 m

Outro aspecto relevante refere-se ao C.P. Em diversos casos ele causou baixo impacto da simulação, especialmente para D8 e D-inf. Em contrapartida, quando utilizado valores altos (>0,1 m), a simulação era interrompida com poucas iterações, especialmente para o MFD, o qual encerrava os cálculos com menos de 10 iterações para as resoluções de 5 e 10 m. Nesse contexto, o valor de C.P. que não demonstrou o problema de rápido encerramento da simulação foi de 0,01 m.

Dentre os objetos de teste, o algoritmo de direcionamento, conjuntamente com a resolução, são recomendações para toda e qualquer simulação, uma vez que são características operacionais do modelo. Em compensação, a abordagem reológica, seus expoentes característicos e a viscosidade podem ser diferentes conforme o evento estudado por representarem características físicas do fluxo de detritos.

### 6.6.1 Avaliação da melhor combinação de parâmetros

A seguir estão os resultados da simulação realizada para F2 e F3, utilizando os parâmetros de melhor desempenho obtidos nas etapas anteriores para F1 (Tabela 19), com *time step* de 1 s. A simulação alcançou TPR de 84,06%, com 17,25% de FPR, com  $H_s$  de 0,52 (Tabela 20). Esses fluxos foram simulados de maneira concomitante, demonstrando a aplicabilidade do modelo para múltiplos fluxos de detritos em escala de bacia.

Tabela 20. Índices de desempenho para a simulação dos fluxos de detritos F2 e F3

TPR	FPR	FDR	FNR	$H_s$	TEMPO (s)	A.M. (m)
84,06	17,25	50,64	15,94	0,52	396	0,31

O valor de  $H_s$  foi significativamente afetado por conta dos falsos positivos e, como pode ser visto na mancha simulada (Figura 58), o fluxo extrapolou os limites zona de transporte observada. Entretanto, existem alguns fatores que podem ter limitado a qualidade da simulação: (i) a presença da vegetação densa pode ocultar o fluxo de detritos nas ortofotos - o fluxo assumiu alturas menores que 30 cm ao final da mancha, portanto, pode ter prosseguido entre a vegetação com facilidade, sem danificá-la; (ii) para o fluxo F2, percebe-se que o formato da cicatriz e da mancha simulada é similar, mas elas não se sobrepõem quando há mudança brusca de direções (de nordeste para noroeste) – tal fato pode ser atribuído a erros provenientes da delimitação visual da cicatriz, uma vez que as ortofotos podem apresentar distorções; (iii) erros associados à representação do terreno pelo MDT e aos pós-processamentos realizados para utilizar o modelo.

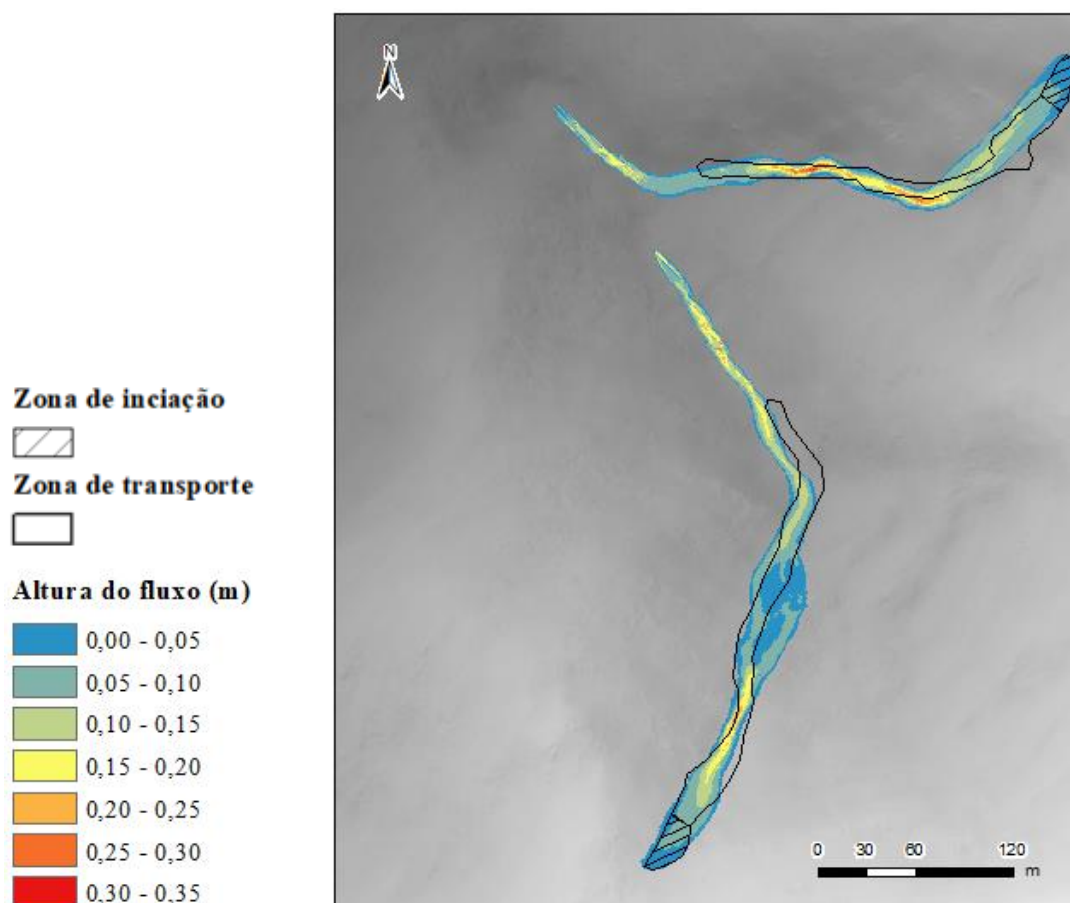


Figura 58. Mancha simulada dos fluxos de detritos F2 e F3

O fluxo de detritos F4 foi o de menor desempenho. O TPR dessa simulação foi de 58,20%, com 70% de FDR, ou seja, maior parte da simulação é composta por falsos positivos, razão pela qual o  $H_s$  foi baixo, com valor de 0,22.

Tabela 21. Índices de desempenho para a simulação do fluxo de detritos F4

TPR	FPR	FDR	FNR	$H_s$	TEMPO (s)	A.M. (m)
58,20	28,15	70,75	41,80	0,22	744	3,24

A mancha simulada do fluxo de detritos F4 percorre trajetórias diferentes da observada (Figura 59). Enquanto há uma curva suave no início da cicatriz, percebe-se que na simulação o caminho do fluxo segue uma trajetória aproximadamente retilínea, passando por um estrangulamento da seção, onde acumulam-se as maiores alturas do fluxo (chegando a 3 m). Posteriormente, a mancha assume um formato de leque. Esse comportamento está diretamente ligado à representação do terreno oferecida pelo MDT

– o talvegue do MDT não é o mesmo pelo qual o fluxo de detritos observado percorreu no início do movimento - e também pode estar associado a efeitos de escoamento não considerados no modelo. O modelo depende fortemente da topografia, uma vez que ela determina a direção do escoamento, portanto, independente da reologia ou viscosidade aplicada, o desempenho não apresentaria aumentos expressivos em termos de verdadeiros positivos.

Quanto à formação do leque, uma das possibilidades é a desconsideração das árvores que podem limitar o espalhamento do fluxo, condicionando o escoamento em uma direção preferencial. Ademais, o fluxo F4 atingiu o canal durante um evento chuvoso extremo, que estava com altas vazões e velocidades de escoamento. Portanto, a informação sobre o formato da zona de deposição do fluxo de detritos foi alterada pelo evento, prejudicando a avaliação do modelo com a metodologia de cicatrizes delimitadas por interpretação de ortofotos. Entretanto, mesmo com os índices mais baixos, o final do fluxo formou um leque aluvial típico do fluxo de detritos quando atinge áreas de menor declividade.

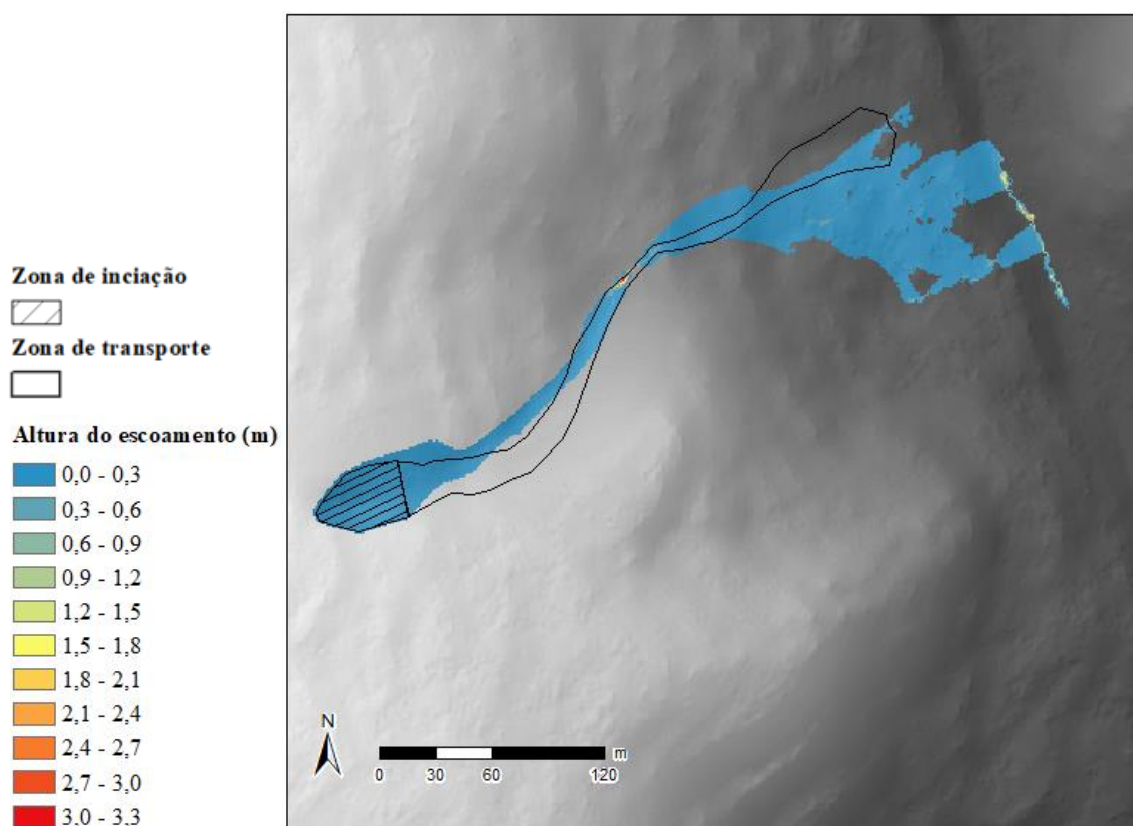


Figura 59. Mancha simulada do fluxo de detritos F4

Em comparação a modelos com estrutura similar, Chiang et al. (2012) alcançaram valores de TPR de 92% para a área de transporte e de 88% para a de deposição ao calibrar seu modelo para um evento ocorrido no vilarejo de Maya, Taiwan, utilizando um MDT de 10 m. Os autores, posteriormente, aplicaram o modelo para uma bacia de 116 km<sup>2</sup> e obtiveram TPR de 80%, contabilizando no índice área de iniciação, transporte e deposição de maneira conjunta. Gregoretti et al. (2016), alcançou 83 % de TPR em suas simulações para um fluxo de detritos ocorrido na bacia do rio Lazin, na província de Trento, Itália, em 1966, utilizando um MDT com resolução de 1 m. Seu modelo baseia-se no de Chiang et al. (2012), com adição de equações empíricas para contabilizar deposição e erosão, requerendo hidrogramas do fluxo de detritos, concentração de sedimentos, além de declividades e velocidades limites para a ocorrência da deposição. Apesar das regiões de estudo serem distintas, percebe-se que o modelo proposto nesse trabalho conseguiu atingir TPR de 83% para F1 e 84% para F2 e F3, valores semelhantes ao obtido por Gregoretti et al. (2016).

Park et al. (2016), ao combinar um modelo de estabilidade de encostas com o modelo empírico de fluxo de detritos, Flow-R, atingiu TPR de 89% em bacias da Coreia do Sul, entretanto 70% da mancha simulada correspondeu a falsos positivos. Salvador (2018) utilizou a ferramenta Avalanche Runout (TARBOTON, 2008) para avaliar susceptibilidade a fluxos de detritos para a bacia do arroio Jaguar (Alto Feliz – RS) e alcançou TPR de 66% e FPR de 35%.

Bout et al. (2018) aplicaram um modelo de fluxo de detritos bifásico, implementado no *software* OpenLISEM, em uma bacia do nordeste da Itália, obtendo TPR de 72% e  $H_s$  de 0,638 (os autores consideraram toda a extensão da bacia ao determinar o número de verdadeiros negativos, ao seguir essa metodologia para o presente estudo, o  $H_s$  atinge 0,7 para F1). Tal modelo requer dados como porosidade, coesão e densidade do solo e mapas de uso do solo.

Diversos outros trabalhos que simulam numericamente fluxos de detritos não costumam apresentar índices de desempenho, recorrendo a análises visuais das manchas simuladas (e.g. Stolz e Huggel (2008), Wang et al. (2008)) ou da profundidade média da zona de deposição observada e simulada ( e.g. Rickenmann et al. (2016); Pirulli e Sorbino (2008)). Esse tipo de avaliação de resultados dificulta a comparação entre diferentes modelos, além de deixar a leitura das simulações mais subjetiva, por depender de avaliação visual do leitor. Em suma, apesar de existirem diversos modelos e trabalhos que

os utilizam, ainda não há consenso quanto a forma de avaliação de resultados referentes a fluxo de detritos.

### 6.6.2 Limitações do modelo

A partir dos pressupostos utilizados para o modelo e dos resultados obtidos, as seguintes limitações podem ser encontradas:

➤ O modelo considera a propagação após a fluidificação do meio, considerando um escoamento completamente desenvolvido, portanto não avalia os mecanismos de iniciação e desenvolvimento do fluxo de detritos.

➤ A mecânica de escoamento utilizada no modelo não considera a alteração das propriedades da mistura ao longo do tempo.

➤ O material propagado é considerado homogêneo, negligenciando os efeitos da segregação de materiais no desenvolvimento do escoamento do fluxo de detritos. Além do mais, a formação de obstáculos permanentes ou temporários, como grandes blocos de rocha e troncos de árvores, não são considerados, bem como a formação de diques laterais.

➤ Não considera a erosão da superfície do canal no qual o fluxo de detritos propaga-se, nem a incorporação de solo e blocos ao longo do percurso.

➤ Não há formulações para simular a deposição. O fim do movimento é determinado pelo critério de parada de máxima diferença de altura, assumindo que ao haver pequena variação nas alturas entre as iterações, a velocidade de escoamento será baixa o suficiente para determinar a parada do movimento.

➤ Não são consideradas a perda e/ou incorporação de água ao fluxo de detritos durante a propagação. Dessa maneira, ao atingir um corpo hídrico, não são avaliadas as mudanças de comportamento por conta da diminuição drástica da concentração de sedimentos.

➤ Não são consideradas as ondas de choque provocadas pelo encontro súbito com obstáculos e seus efeitos nas linhas de corrente da massa fluidizada e, conseqüentemente, seus efeitos no escoamento.

➤ Não é considerada a capacidade de rompimento de obstáculos e estruturas.

➤ Não são considerados os efeitos de pulsos, onde um escorregamento poderá ser mobilizado em diversos fluxos de detritos consecutivos de menor escala.



➤ A superfície de escoamento não sofre alterações ao longo do tempo por conta do fluxo, ou seja, o MDT não é alterado pelo efeito de deposição/erosão. Dessa maneira, a formação de feições que pudessem barrar/estimular o escoamento não é considerada.

➤ Foi estabelecido que escoamentos com altura de 1 mm são insignificantes e desprezíveis, podendo haver alteração na massa ao longo das iterações por conta dessa simplificação.

➤ Inicialmente o modelo foi projetado para que a cada iteração o fluxo se mova apenas um *pixel*. A cada iteração realizada o fluxo obrigatoriamente avançará um pixel, mesmo que esse passo de tempo seja pequeno demais para o fluxo percorrer a dimensão da célula ou grande demais a ponto de ser suficiente para percorrer mais de uma célula.

## 7 CONCLUSÕES

A modelagem de fluxo de detritos apresenta um desafio pela complexidade do fenômeno e pela dificuldade em monitorá-los. Esse desafio reforça a necessidade de desenvolver meios que permitam avaliar o perigo associado a esses fenômenos, representando-os adequadamente. Esse trabalho propôs um modelo que requer poucos dados para sua utilização, testando diferentes abordagens reológicas e métodos de direcionamento de fluxo, para verificar seu comportamento e capacidade de representar fluxos de detritos. O modelo demonstrou alto desempenho, alta aplicabilidade e, por depender de poucos parâmetros de entrada, é simples de calibrar/validar.

Com os resultados apresentados, é possível notar que o algoritmo MFD conseguiu representar de maneira mais fidedigna o fluxo de detritos F1. Sua capacidade de distribuir o escoamento para diversos *pixels* do entorno possibilitou a formação de uma mancha com aparência mais realista. Entretanto, o mesmo aspecto que permitiu seu melhor desempenho, pode se tornar uma limitação. Pode-se observar no início do transporte que houve um espalhamento exagerado, havendo janela para melhoria.

Percebeu-se também que a resolução dos MDTs altera significativamente a qualidade das simulações. A maior parte das simulações tiveram um desempenho decrescente, conforme a resolução diminuía, com exceção do D8. A explicação reside no fato do D8 não conseguir representar adequadamente o fluxo de detritos, uma vez que converge o fluxo a poucas linhas de escoamento. Assim, em resoluções mais grosseiras, essas linhas de escoamento aumentavam em dimensão e, conseqüentemente, aumentavam a área acertada.

A respeito do critério de parada, percebeu-se a necessidade de estabelecer outros métodos para determinar o fim da simulação, especialmente para lidar com as resoluções mais grosseiras: como a quantidade de massa armazenada em um pixel com grandes dimensões é muito grande, por vezes a mudança de altura é pequena, fazendo com que simulação termine precocemente. Analogamente, para resoluções melhores, o pixel é pequeno e, pequenas contribuições podem alterar drasticamente sua altura, permitindo que a simulação continue por bastante tempo, aumentando muito a área de alcance do fluxo.

Dentre as reologias testadas, as que alcançaram os melhores resultados foram a dilatante, com  $n$  de 1,2, e Herschel-Bulkley com  $m$  de 0,6 e *plug* de 10 cm, ambas com viscosidade cinemática de 0,5 m<sup>2</sup>/s. As duas reologias possuem um comportamento

bastante distinto entre si, entretanto existem evidências provenientes de visitação a campo que indicam que há grande possibilidade dos fluxos da região se comportarem como fluido dilatante. Assim, esse conjunto de parâmetros foi aplicado a outros três fluxos, alcançando 84% de TPR e  $H_s$  de 0,52 para F2 e F3, que foram simulados conjuntamente, e TPR de 52% para F4. A TPR para os fluxos F1, F2 e F3 foram similares aos estudos de Chiang et al. (2012) e Gregoretto et al. (2016) (80% e 83% respectivamente), que utilizam um modelo conceitualmente semelhante. Também apresentou desempenho superior a modelos conceitualmente mais simples (e.g. Salvador (2018) alcançou TPR de 63% com Avalanche Runout) e mais complexos (e.g. Bout et al. (2018) atingiu TPR de 72% com modelo de escoamento bifásico).

Mesmo com as limitações e erros encontrados, os parâmetros utilizados conseguiram representar satisfatoriamente os fluxos de detritos estudados. Com a reologia dilatante, o modelo conseguiu simular uma mancha semelhante a observada com a utilização de apenas dois parâmetros físicos passíveis de calibração (a viscosidade e o  $n$  da equação reológica), atingindo desempenhos altos.

Por fim, o modelo permite obter informações das alturas de fluido, bem como de alcance e velocidades, todas essenciais para a elaboração de um mapa de perigo, mostrando que há potencial para a aplicação na gestão de risco. Ao considerar que pode ser aplicado em escala de bacia, simulando o escoamento de múltiplos fluxos de detritos com poucos dados de entrada, o modelo configura-se em uma ferramenta aplicável no desenvolvimento de estudos para a prevenção de desastres no Brasil.

## 7.1 RECOMENDAÇÕES

Ao analisar os resultados obtidos, algumas recomendações podem ser feitas:

- i) A limitação dos valores de velocidade, de acordo com o volume disponível da célula, pode atrasar o movimento do fluxo de detritos, indicando que um critério de passo de tempo dinâmico, que se adapte às máximas velocidades encontradas no *grid*, poderia ser interessante para o modelo.
- ii) Apesar desse trabalho ter avaliado diferentes métodos de direcionamento de fluxo, diversos outros ainda podem ser testados, como o algoritmo de Qin et al. (2007), que poderá solucionar a dispersão existente no começo do fluxo, observado principalmente no algoritmo de MFD para o F1.

- iii) Testar diferentes critérios de parada e verificar seu efeito na correspondência das áreas observadas e simuladas.
- iv) Ampliar os testes, combinando as reologias dilatante, plástico de Bingham e Herschel-Bulkley com mais métodos de direcionamentos, além do MFD.
- v) Aplicar para fluxos de detritos bem documentados, com informações de tempo de propagação e profundidades da deposição, para avaliar o desempenho do modelo quanto a esses aspectos.
- vi) Aplicar o modelo a outras regiões, com características distintas, para verificar seu desempenho e comportamento.

## REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

- ALMEIDA, L.; WELLE, T.; BIRKMANN, J. Disaster risk indicators in Brazil: A proposal based on the world risk index. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 17, n. March 2015, p. 251–272, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijdr.2016.04.007>>
- ALVARADO, L. A. **Simulação bidimensional de corridas de detritos usando o Método de Elementos Discretos**. 2006. Pontifca Univesidade Católica do Rio de Janeiro, 2006.
- ANDERSON, B. S. A.; SITAR, N. Analysis of rainfall-induced debris flows. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 121, p. 544–552, 1995.
- BAAS, S. et al. **Disaster risk management systems analysis: A guide book**. 1. ed. Rome: FAO-UN, 78 p., 2008.
- BAGNOLD, R. A. Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences**, v. 225, p. 49–63, 1954.
- BAGNOLD, R. A. **An Approach to the Sediment Transport Problem From General Physics**. 1966 .Disponível em: <<https://pubs.usgs.gov/pp/0422i/report.pdf>>.
- BASHEER, M.; ELAGIB, N. A. Performance of satellite-based and GPCC 7.0 rainfall products in an extremely data-scarce country in the Nile Basin. **Atmospheric Research**, v. 215, n. August 2018, p. 128–140, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.08.028>>
- BAUM, R. L.; SAVAGE, W. Z.; GODT, J. W. TRIGRS — A Fortran Program for Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Analysis, Version 2.0. **U.S. Geological Survey Open-File Report**, n. 2008–1159, p. 75, 2008.
- 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.
- BIRKMANN, J. Risk and vulnerability indicators at different scales: Applicability, usefulness and policy implications. **Environmental Hazards**, v. 7, n. 1, p. 20–31, 2007.
- BONIELLO, M. A.; CALLIGARIS, C.; LAPASIN, R.; ZINI, L. Rheological investigation and simulation of a debris-flow event in the Fella watershed. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 10, p. 989-997, 2010.
- BORCHE, A. **Métodos numéricos**. 1 ed. Porto Alegre: Editora UFRGS, 206 p., 2008.
- BOUT, B.; LOMBARDO, L.; VAN WESTEN, C.J.; JETTEN, V.G. Integration of two-phase solid fluid equations in a catchment model for flashfloods, debris flows and shallow slope failures. **Environmental Modelling & Software**, v. 105, p. 1-16, 2018.

BRADLEY, A. P. The use of the area under the ROC curve in the evaluation of machine learning algorithms. **Pattern Recognition**, v. 30, n. 7, p. 1145–1159, 1997.

BREITFUSS, G.; SCHEIDEGGER, A. On a possible mechanism of Alpine debris flows. **Annals of Geophysics**, v. 27, n. 1–2, p. 45–57, 1974. Disponível em: <<http://www.annalsofgeophysics.eu/index.php/annals/article/viewFile/4913/4971>>

CARDOZO, G. L.; ZANANDREA, F.; MICHEL, G. P.; KOBAYAMA, M. Parâmetros geomorfológicos para avaliação pós-desastre de escorregamentos: estudo de caso da bacia hidrográfica do Rio Mascarada/RS. em **Anais do I Encontro Nacional de Desastres**, Porto Alegre, Jul. 2018, 1, 8 p.

CASTRO, A. L. C. **Glossário de defesa civil estudos de riscos e medicina de desastres**. 5. ed. Brasília: SEDEC, 1999.

CHEN, C. Generalized viscoplastic modeling of debris flow. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 114, p. 237–258, 1988.

CHEN, C. Y.; YU, F. C. Morphometric analysis of debris flows and their source areas using GIS. **Geomorphology**, v. 129, n. 3–4, p. 387–397, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.03.002>>

CHIANG, S. H. et al. Simulation of event-based landslides and debris flows at watershed level. **Geomorphology**, v. 138, n. 1, p. 306–318, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.09.016>>

CHU, J. Basic characteristics of sediment-water mixture with hyperconcentration. **Proc. 2nd Int'l Symp on River Sedimentation**, Nanjing, China, pp.265-273, 1983 (em chinês).

COHEN, J. A coefficient of agreement for nominal scales. **Educational and Psychological Measurement**. v. 20, n. 1, p. 37–46, 1960.

COLEMAN, H. W.; STEELE, W. G. **Uncertainty Analysis for Engineers**. 3. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2009.

COROMINAS, J. The angle of reach as a mobility index for small and large landslides. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 33, p. 260–271, 1996.

COSTA-CABRAL, M. C.; BURGESS, S. J. Digital Elevation Model Networks (DEMON): A model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas. **Water Resources Research**, v. 30, n. 6, p. 1681–1692, 1994.

COUSSOT, P. et al. Direct Determination of Rheological Characteristics of Debris Flow. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 124, p. 865–868, 1998.

COUSSOT, P.; MEUNIER, M. Recognition, classification and mechanical description of debris flows. **Earth Science Reviews**, v. 40, p. 209–227, 1996.

COUSSOT, P.; PROUST, S. Slow, unconfined spreading of a mudflow. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 25, n. B11, p. 217–229, 1996.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Mapa geológico do Estado do Rio Grande do Sul. Escala 1:750.000. 2007 Disponível em: <[http://www.cprm.gov.br/publique/media/geologia\\_basica/cartografia\\_regional/mapa\\_rio\\_grande\\_sul.pdf](http://www.cprm.gov.br/publique/media/geologia_basica/cartografia_regional/mapa_rio_grande_sul.pdf)>. Acesso em 10 de abril de 2019.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações: 1:25000**. Brasília. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 2014.

CROSTA, G. B.; FRATTINI, P. Distributed modelling of shallow landslides triggered by intense rainfall. **Natural Hazards and Earth System Science**, v. 3, p. 81–93, 2003.

CROSTA, G. B.; IMPOSIMATO, S.; RODDEMAN, D. G. Continuum numerical modelling of flow-like landslides. In: EVANS, S. G. et al. (Eds.). **Landslide from Massive Rock Slope Failure**. 1. ed. Dordrecht. p. 211–232.

CRUDEN, D. M.; VARNES, D. J. Landslide types and processes. Transportation Research Board. **U.S. National academy of Science Special Report**, 247: 36-75. 1996.

DAVIES, T. Debris flow surges - experimental simulation. **Journal of Hydrology**, v. 29, n. 1, p. 18–46, 1990.

DEMONTZEY, P. **L'Extinction des Torrents en France par le Reboisement**. Imprimerie Nationale, Paris, 1894. (em francês)

DOURADO, F.; ARRAES, T. C.; FERNANDES, M. Megadesastre da Região Serrana do Rio de Janeiro – as Causas do Evento, os Mecanismos dos Movimentos de Massa e a Distribuição Espacial dos Investimentos de Reconstrução no Pós-Desastre. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, v. 35, p. 43–54, 2012.

EIDSVIG, U. M. K. et al. Quantification of model uncertainty in debris flow vulnerability assessment. **Engineering Geology**, v. 181, n. August 1987, p. 15–26, 2014.

EINSTEIN, A., "Investigation on the theory of Brownian Movement." **Dover Publications, Inc.**, New York, 1956.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Súmula da 10. Reunião Técnica de Levantamento de Solos**. Rio de Janeiro, RJ: Embrapa, 1979.

FAIRFIELD, J.; LEYMARIE, P. Drainage networks from grid digital elevation models. **Water Resources Research**, v. 27, n. 5, p. 709–717, 1991.

FALAH, F. et al. **Artificial Neural Networks for Flood Susceptibility Mapping in Data-Scarce Urban Areas**. 1. ed. Amsterdam: Elsevier Inc., 2019. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-815226-3.00014-4>>

FAWCETT, T. An introduction to ROC analysis. **Pattern Recognition Letters**, v. 27, n. 8, p. 861–874, 2006.

FLORES, C.A.; PÖTTER, R.O.; FASOLO, P.J.; HASENACK H. & WEBER, E. **Levantamento semidetalhado de solos: Região da Serra Gaúcha - Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: UFRGS/Embrapa Clima Temperado, 2007.

- FRATINI, P.; CROSTA, G.; CARRARA, A. Techniques for evaluating the performance of landslide susceptibility models. **Engineering Geology**, v. 111, n. 1-4, p. 62-72, 2010.
- FREEMAN, T. G. Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid. **Computers and Geosciences**, v. 17, n. 3, p. 413-422, 1991.
- GREGORETTI, C.; DEGETTO, M.; BOREGGIO, M. GIS-based cell model for simulating debris flow runout on a fan. **Journal of Hydrology**, v. 534, p. 326-340, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.12.054>>
- GUHA-SAPIR, D; BELOW, R; HOYOIS, P; EM-DAT: **The CRED/OFDA International Disaster Database**. Université Catholique de Louvain. Belgium. 2009. Disponível em <[www.emdat.be](http://www.emdat.be)>. Acesso em 26 de março de 2019
- HAAS, T. De et al. Effects of debris flow composition on runout, depositional mechanisms, and deposit morphology in laboratory experiments. **Journal of Geophysical Research F: Earth Surface**, v. 120, n. 9, p. 1949-1972, 2015.
- HEIDKE, P., 1926. Berechnung des Erfolges und der Güte der Windstärkevorhersagen im Sturmwarnungsdienst (Cálculo do sucesso e qualidade das previsões de ventos no serviço de alerta de tempestades). **Geografika Annaler** 8, 301-349.
- HIGHLAND, L. M.; BOBROWSKY, P. The Landslide Handbook — A Guide to Understanding Landslides. **Landslides**, p. 129, 2008.
- HOLMGREN, P. Multiple flow direction algorithms for runoff modelling in grid based elevation models: An empirical evaluation. **Hydrological Processes**, v. 8, n. 4, p. 327-334, 1994.
- HORNBERGER, G.; WIBERG, P. **Numerical Methods in the Hydrological Sciences**. Washington: American Geophysical Union. 2005.
- HORTON, P. et al. Flow-R, a model for susceptibility mapping of debris flows and other gravitational hazards at a regional scale. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 13, n. 4, p. 869-885, 2013.
- HUANG, X.; GARCÍA, M. H. A Herschel-Bulkley model for mud flow down a slope. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 374, p. 305-333, 1998.
- HUNGR, O. et al. A review of the classification of landslides of the flow type. **Environmental & Engineering Geoscience**, v. 7, n. 3, p. 302, 2001.
- HUNGR, O. et al. Magnitude-frequency relationships of debris flows and debris avalanches in relation to slope relief. **Geomorphology**, v. 96, n. 3-4, p. 355-365, 2008.
- HUNGR, O.; LEROUEIL, S.; PICARELLI, L. The Varnes classification of landslide types, an update. **Landslides**, v. 11, n. 2, p. 167-194, 2013.
- HUNGR, O.; MCDUGALL, S.; BOVIS, M. Entrainment of material by debris flows. **Debris-flow Hazards and Related Phenomena**, p. 135-158, 2007.



HUNT, B. Newtonian fluid mechanics treatment of debris flow and avalanches. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 120, n. 12, p. 1350–1363, 1994.

HUNT, M. L. et al. Revisiting the 1954 suspension experiments of R. A. Bagnold. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 452, p. 1–24, 2002.

HUPPERT, H. E. Flow and instability of a viscous current down a slope. **Nature**, v. 300, p. 427–429, 1982.

HUTCHINSON, J. N. A sliding–consolidation model for flow slides. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 23, n. 2, p. 115–126, 1986.

HUTTER, K. et al. Newtonian fluid mechanics treatment of debris flow and avalanches. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 8, n. 1, p. 1–36, 2003. Disponível em: <<https://www.tib.eu/en/search/id/BLSE%3ARN005301130/Debris-flow-modeling/#documentinfo>>

HUTTER, K.; SVENDSEN, B.; RICKENMANN, D. Debris flow modeling: a review. **Continuum Mechanics and Thermodynamics**, v. 8, n. 1, p. 1–36, 1996. Disponível em: <<https://www.tib.eu/en/search/id/BLSE%3ARN005301130/Debris-flow-modeling/#documentinfo>>

INNES, J. L. Debris Flows. **Progress in Physical Geography: Earth and Environment**, v. 7, n. 4, p. 469–201, 1983.

IVERSON, R. M. Physics of debris flow. **Review of Geophysics**, v. 35, n. 97, p. 245–296, 1997.

IVERSON, R. M. The debris-flow rheology myth. **Debris-flow hazards mitigation: Mechanics, prediction and assessment**, p. 303–314, 2003.

IVERSON, R. M. Debris-flow mechanics. In: JAKOB, M.; HUNGR, O. (Eds.). **Debris-flow Hazards and Related Phenomena**. 1. ed. Berlin. p. 105–134.

IVERSON, R. M. et al. The perfect debris flow? Aggregated results from 28 large-scale experiments. **Journal of Geophysical Research**, v. 115, n. F3, 2010.

IVERSON, R. M.; DENLINGER, R. P. Flow of variably fluidized granular masses across three-dimensional terrain. **Journal of Geophysical Research**, v. 106, n. B1, p. 537–552, 2001.

IVERSON, R. M.; REID, M. E.; LAHUSEN, R. G. Debris-Flow Mobilization From Landslides. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, v. 25, n. 1, p. 85–138, 1997. Disponível em: <<http://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev.earth.25.1.85>>

JAN, C.-D.; SHEN, H. W. Review dynamic modeling of debris flows. In: ARMANINI, A.; MICHIUE, M. (Eds.). **Recent Developments on Debris Flows**. Berlin: Springer, 1997. p. 93–116.

JENSON, S. K.; DOMINGUE, J. O. Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 54, p. 1593–1600, 1988.

JIANG, Y. J. et al. Influence of particle-size segregation on the impact of dry granular flow. **Powder Technology**, v. 340, p. 39–51, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.09.014>>

JOHNSON, A. M. **Physical Processes in Geology: A Method for Interpretation of Natural Phenomena—Intrusions** em Igneous Rocks, Fractures, and Folds, Flow of Debris and Ice, Freeman, Cooper, San Francisco, Calif. 1970.

JOHNSON, C. G. et al. Grain-size segregation and levee formation in geophysical mass flows. **Journal of Geophysical Research: Earth Surface**, v. 117, n. F1, p. n/a-n/a, 2011.

KAITNA, R.; RICKENMANN, D.; SCHATZMANN, M. Experimental study on rheologic behaviour of debris flow material. **Acta Geotechnica**, v. 2, n. 2, p. 71–85, 2007.

KISS, R. Determination of drainage network in digital elevation models, utilities and limitations. **Journal of Hungarian Geomathematics**, v. 2, p. 16–29, 2004.

KOBIYAMA, M. et al. **Prevenção de desastres naturais: conceitos básicos**. 1. ed. Florianópolis: Organic Trading, 2006. 109p.

KOBIYAMA, M. et al. Aprender hidrologia para prevenção de desastres naturais. 2009.

KOBIYAMA, M.; GOERL, R. F.; CORRÊA, G. P., MICHEL, G. P. (2010) “Debris flow occurrences in Rio dos Cedros, Southern Brazil: meteorological and geomorphic aspects”, em Conference Monitoring, Simulation, Prevention and Remediation of Dense and debris Flows III, D. de Wrachien and C. A. Brebbia Editors, p 77-88.

KOBIYAMA, M.; MICHEL, G. P. Histórico de ocorrência de fluxos de detritos e seus estudos no Brasil. **XI Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, ENES**, p. 1–20, 2015.

KRONE, R. B. (1984), The significance of aggregate properties to transport processes. **Lecture Note on Estuarine Cohesive Sediment Dynamics**, ed. by A. J. Mehta pp. 66-84, 1984.

LOGAN, M., IVERSON, R.M., OBRYK, M.K. Video documentation of experiments at the USGS debris-flow flume 1992–2017 (ver 1.4, January 2018): **U.S. Geological Survey Open-File Report 2007–1315**, 2018 <https://doi.org/10.3133/ofr20071315>.

LORENZ, E. N. Deterministic nonperiodic flow. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 20, p. 130–141, 1963.

MAJOR, J. J. Depositional Processes in Large-Scale Debris-Flow Experiments. **The Journal of Geology**, v. 105, n. 3, p. 345–366, 1997.

MAJOR, J. J. et al. Debris-flow deposition: Effects of pore-fluid pressure and friction concentrated at flow margins — Geological Society of America Bulletin. **Bulletin of the Geological Society of America**, v. 111, n. 10, p. 1424–1434, 1999. Disponível em: <<http://gsabulletin.gsapubs.org/content/111/10/1424.abstract>>

MAJOR, J.; PIERSON, T. C. Debris Flow Rheology' Experimental Analysis of Fine-Grained Slurries. **Water Resources Research**, v. 28, n. 3, p. 841–857, 1992.

MARGOTTINI, C.; CANUTI, P.; SASSA, K. **Landslide Science and Practice**. . Berlin: Springer. v. 6. 607 p. 2013.

MARTZ, L. W.; GARBRECHT, J. An outlet breaching algorithm for the treatment of closed depressions in a raster DEM. **Computers and Geosciences**, v. 25, n. 7, p. 835–844, 1999.

MATZENAUER, R; RADIN, B; ALMEIDA, I. (Ed.). **Atlas Climático: Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura Pecuária e Agronegócio; Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária (FEPAGRO), 2011.

MERGILI, M. et al. Simulation of debris flows in the Central Andes based on Open Source GIS: Possibilities, limitations, and parameter sensitivity. **Natural Hazards**, v. 61, n. 3, p. 1051–1081, 2012.

MERGILI, M.; KRENN, J.; CHU, H. J. R.randomwalk v1, a multi-functional conceptual tool for mass movement routing. **Geoscientific Model Development**, v. 8, n. 12, p. 4027–4043, 2015.

MICHEL, G. P. **Modelagem de Estabilidade de Encostas Com Consideração do Efeito da Vegetação**. Florianópolis, SC: Universidade Federal de Santa Catarina, 2013.

MICHEL, G. P. et al. Metodologia de mapeamento de escorregamentos e fluxo de detritos. **XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, p. 1–8, 2015.

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.

MIDDLETON, G. V. Experimental studies related to problems of flysch sedimentation, in Lajoie, J., ed., *Flysch Sedimentology in North America*: **Geol. Assoc. Canada Special Paper 7**, p. 253-272. 1970.

MONTANARI, A.; SHOEMAKER, C. A.; VAN DE GIESEN, N. Introduction to special section on Uncertainty Assessment in Surface and Subsurface Hydrology: An overview of issues and challenges. **Water Resources Research**, v. 45, n. 10, p. 2005–2008, 2009.

MOSTBAUER, K. et al. The temporally varying roles of rainfall, snowmelt and soil moisture for debris flow initiation in a snow-dominated system. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 22, n. 6, p. 3493–3513, 2018.

NAKATANI, K. et al. User-Friendly One- and Two-Dimensional Debris Flow Simulator Equipped With a Graphical User Interface. v. 1, n. 2, p. 62–72, 2008.

NAYLOR, M. A. The Origin of Inverse Grading in Muddy Debris Flow Deposits--A Review. **Journal of Sedimentary Petrology**, v. 50, n. 4, p. 1111–1116, 1980.

NUNES, A.L.L.S.; SAYÃO, A.S.F.J. (2014) Debris Flows e Técnicas de Mitigação e Convivência, 14CNG – *in Anais do Congresso nacional de Geotecnia*. Geotecnia nas infraestruturas, Covilhã, Portugal, pp. 83 – 123.

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. 244–259, 2006.

O'CALLAGHAN, J. F.; MARK, D. M. The extraction of drainage networks from digital elevation data. **Computer Vision, Graphics and Image Processing**, v. 28, n. 1, p. 323–344, 1984.

ORLANDINI, S. et al. Path-based methods for the determination of nondispersive drainage directions in grid-based digital elevation models. **Water Resources Research**, v. 39, n. 6, p. 1–8, 2003.

PACK, R. T.; TARBOTON, D. G.; GOODWIN, C. N. SINMAP - A stability index approach to terrain stability hazard mapping. **Manuel**, p. 1–75, 2003.

PAIXÃO, 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.

PAN, H. L. et al. Rainfall threshold calculation for debris flow early warning in areas with scarcity of data. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 18, n. 5, p. 1395–1409, 2018.

PETLEY, D. Global patterns of loss of life from landslides. **Geology**, v. 40, n. 10, p. 927–930, 2012.

PHILLIPS, C. J.; DAVIES, T. R. H. Determining rheological parameters of debris flow material. **Geomorphology**, v. 4, p. 101-110, 1991.

PIRULLI, M.; SORBINO, G. Assessing potential debris flow runout: A comparison of two simulation models. **Natural Hazards and Earth System Science**, v. 8, n. 4, p. 961–971, 2008.

PITMAN, E. B. et al. Computing granular avalanches and landslides. **Physics of Fluids**, v. 15, n. 12, p. 3638–3646, 2003.

PITMAN, E. B.; LONG, L. E. A two-fluid model for avalanche and debris flows. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 363, n. 1832, p. 1573–1601, 2005.

PROCHASKA, A. B. et al. Debris-flow runout predictions based on the average channel slope (ACS). **Engineering Geology**, v. 98, n. 1–2, p. 29–40, 2008.

QIN, C. et al. An adaptive approach to selecting a flow-partition exponent for a multiple-flow-direction algorithm. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 21, n. 4, p. 443–458, 2007.

QIN, C. Z. et al. Artificial surfaces simulating complex terrain types for evaluating grid-based flow direction algorithms. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 27, n. 6, p. 1055–1072, 2013.

QUINN, P. et al. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models. **Hydrological Processes**, v. 5, n. 1, p. 59–79, 1991.

REID, M. E.; NIELSEN, H. P.; DREISS, S. J. Hydrologic factors triggering a shallow hillslope failure. **Bulletin of the Geological Society of America**, v. 25, n. 3, p. 349–361, 1988.

REMAÎTRE, A. et al. Flow behaviour and runout modelling of a complex debris flow in a clay-shale basin. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 30, n. 4, p. 479–488, 2005.

REUTER, H.I., HENGL, T., GESSLER, P., SOILLE, P. (2009) Preparation of DEMs for geomorphometric analysis. In: T. Hengl & H.I. Reuter (eds) **Geomorphometry: Concepts, Software, Applications**, pp. 87–120. Amsterdam, Netherlands: Elsevier.

REYNOLDS, O. An experimental investigation of the circumstances which determine whether the Motion of Water shall be Direct or Sinuous, and the Law of Resistance in Parallel Channels. **Philosophical Transactions of the Royal Society**, v. 174, p. 935–982, 1883. Disponível em: <<http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/183/1>>

RICKENMANN, D. Empirical relationships for Debris Flow. **Natural hazards**, v. 19, n. 47, p. 47–77, 1999. Disponível em: <[ftp://ftp.wsl.ch/pub/rickenmann/Rickenmann-pdf/1999/Rickenmann-1999\\_NH.pdf](ftp://ftp.wsl.ch/pub/rickenmann/Rickenmann-pdf/1999/Rickenmann-1999_NH.pdf)>

RICKENMANN, D.; ZIMMERMANN, M. The 1987 debris flows in Switzerland: documentation and analysis. **Geomorphology**, v. 8, n. 2–3, p. 175–189, 1993.

SAFFMAN, P. G., 1965, The lift on a small sphere in a slow viscous shear flow: **Jour. Fluid Mech.**, v. 22, p. 385–400.

SALVADOR, C.G. **Utilização da ferramenta avalanche runout para geração de mapa de suscetibilidade a fluxo de detritos na bacia do arroio Jaguar - Alto Feliz, RS.** 2018. 87 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

SAVAGE, S. B.; HUTTER, K. The motion of a finite mass of granular material down a rough incline. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 199, n. 2697, p. 177–215, 1989.

SAVAGE, S. B.; HUTTER, K. The dynamics of avalanches of granular materials from initiation to runout. Part I: Analysis. **Acta Mechanica**, v. 89, p. 201–223, 1991.

SCHLUMBERGER. **Über den Muhrgang am 13 August 1876 im Wildbache von Faucon bei Barcelonnette (Niederalpen): in Studien über die Arbeiten der Gebirge** (Ed. DEMONZY, P.) pp. 289–299, 1882.

SCHWEIZER, J.; JAMIESON, J. B.; SCHNEEBELI, M. Snow avalanche formation. **Reviews of Geophysics**, v. 41, n. 4, 2003.

SECRETARIA DO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. **Diagnóstico Preliminar: Descritivo dos eventos ocorridos no dia 5 de janeiro de 2017 entre as regiões dos municípios de São Francisco de Paula e Rolante/RS**. Porto Alegre, RS: SEMA, 2017.

SECRETARIA DE ESTADO DO DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO SUSTENTÁVEL (SDS). **Sistema de Informações Geográficas de Santa Catarina (SIGSC)**. 2013. Disponível em: <http://sigsc.sc.gov.br/>. Acesso em: 20/04/2019.

SIDLE, R. C.; SWANSTON, D. N. Analysis of a small debris slide in coastal Alaska. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 19, n. 2, p. 167–174, 1981.

SIDLE, R.; OCHIAI, H. **LANDSLIDES: Processes, Prediction, and Land Use**. 1. ed. Washington: American Geophysical Union, 2006.

SILVA, D. T. **Contribuições sobre previsão de fluxo de detritos**. Dissertação de mestrado. Rio de Janeiro: COPPE. 2016.

SORBINO, G.; SICA, C.; CASCINI, L. Susceptibility analysis of shallow landslides source areas using physically based models. **Natural Hazards**, v. 53, n. 2, p. 313–332, 2010.

SOILLE, P.; VOGT, J.; COLOMBO, R. Carving and adaptive drainage enforcement of grid digital elevation models. **Water Resources Research**, v. 39, n. 12, p. 13, 2003.

STOLZ, A.; HUGGEL, C. Debris flows in the Swiss National Park: the influence of different flow models and varying DEM grid size on modelling results. **Landslides**, v. 5, n. 3, p. 311–319, 2008.

SUWA, H. Focusing mechanism of large boulders to a debris-flow front. **Japanese Geomorphological Union**, v. 9, n. 3, p. 151–178, 1988.

SUWA, H.; OKANO, K.; KANNO, T. Behavior of debris flows monitored on test slopes of Kamikamihorizawa Creek, Mount Yakedake, Japan. **International Journal of Erosion Control Engineering**, v. 2, n. 2, p. 33–45, 2013.

TAKAHASHI, T. Debris flow. **Annual Review Fluid Mechanics**, p. 57–77, 1981.

TAKAHASHI, T. Theoretical and numerical approaches. **Spec. Publ. int. Ass. Sediment**, v. 31, p. 11–43, 2001.

TAKAHASHI, T. A Review of Japanese Debris Flow Research. **International Journal of Erosion Control Engineering**, v. 2, n. 1, p. 1–14, 2007.

TAKAHASHI, T. **Debris Flow: Mechanics, Prediction and Countermeasures**. 2<sup>a</sup> ed. London: Taylor & Francis Group, 2014. v. 1. 448 p. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s00024-008-0342-8>>

TANI I.: On debris flow (*Yamatsunami*). **Water Science**, 60, pp.106–126, 1968 (em japonês).

TARBOTON, D. G. 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, 1997.

TARBOTON, D. G., SCHREUDERS K. A. T., WATSON D. W.; BAKER, M. E. Generalized terrain-based flow analysis of digital elevation models. *In*: World IMACS Congress and MODSIM International Congress on Modelling and Simulation, XVIII, 2009. **Proceedings**, Cairns: p. 2000-2006, 2009.

THIÉRY. E. **Restauration des Montagnes**. Librairie Polytechnique Ch. Béranger, Paris. 1914.

UNISDR. Terminology on Disaster Risk Reduction. **International Strategy for Disaster Reduction (ISDR)**, p. 1–30, 2009. Disponível em: <[www.unisdr.org/publications](http://www.unisdr.org/publications)>

UNITED NATIONS OFFICE FOR DISASTER RISK REDUCTION (UNISDR). Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015 - 2030. **United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNISDR)**, p. 32, 2015. Disponível em: <[https://www.unisdr.org/files/43291\\_sendaiframeworkfordrren.pdf](https://www.unisdr.org/files/43291_sendaiframeworkfordrren.pdf)>

USGS. Landslide Types and Processes. **Highway Research Board Special Report**, n. July, p. 1–4, 2004. Disponível em: <<http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/search.html>>

VAID, Y. P.; THOMAS, J. Liquefaction and Post-Liquefaction Behavior of Sand. **8**, v. 121, n. 1987, p. 88–89, 1995.

VAKSHOORI, V; ZARE, M. Is the ROC curve a reliable tool to compare de validity of landslide susceptibility maps? **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, v. 9, n. 1, p. 249-266, 2018.

VALENTINO, R.; BARLA, G.; MONTRASIO, L. Experimental analysis and micromechanical modelling of dry Granular flow and impacts in laboratory flume tests. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, v. 41, n. 1, p. 153–177, 2008.

VARNES, D. J. Slope Movement Types and Processes. **Transportation Research Board Special Report**, n. 176, p. 11–33, 1978.

WANG, L.; LIU, H. An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 20, n. 2, p. 193–213, 2006.

WANG, C.; LI, S.; ESAKI, T. GIS-based two-dimensional numerical simulation of rainfall-induced debris flow. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 8, p. 47-58, 2008.

WILSON, J. P. **Enviromental applications of Digital Terrain Modeling**. 1<sup>a</sup> ed. Hoboken: Wiley Blackwell, 2018.

WISNER, B. et al. **At Risk : natural hazards , people's vulnerability and disasters**. 2. ed. New York: Routledge, 2003.

WORQLUL, A. W. et al. Evaluation of CFSR, TMPA 3B42 and ground-based rainfall data as input for hydrological models, in data-scarce regions: The upper Blue Nile Basin, Ethiopia. **Catena**, v. 152, p. 242–251, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2017.01.019>>

WREGGE, M. S. et al. **Atlas climático da Região Sul do Brasil : estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul**. 2. ed. Brasília: Embrapa, 2012. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1045852>>

WU, W.; SIDLE, R. C. Application of a distributed Shallow Landslide Analysis Model (dSLAM) to managed forested catchments in Oregon, USA. **Human Impact on Erosion and Sedimentation**, v. 245, n. 245, p. 213–221, 1997.

WYOMING STATE GEOLOGICAL SURVEY. **Hazards: landslides**. 2019. Disponível em: <<https://www.wsgs.wyo.gov/hazards/landslides>>. Acesso em: 20/02/2019,

ZHANG, D. wei et al. Flash flood hazard mapping: A pilot case study in Xiapu River Basin, China. **Water Science and Engineering**, v. 8, n. 3, p. 195–204, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.wse.2015.05.002>>

ZHANG, Y.; CAMPBELL, C. S. The interface between fluid-like and solid-like behaviour in two-dimensional granular flows. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 237, n. 541, p. 541–568, 1992.



## APÊNDICE A

Tabela 22. Elementos da matriz de confusão: D8 para 2,5 m de resolução

<b>CP*</b> <b>(m)</b>	<b>VISCOSIDADE</b> <b>(m<sup>2</sup>/s)</b>	<b>TP</b>	<b>TN</b>	<b>FP</b>	<b>FN</b>
0.1	0.0005	365.0	6103.0	502.0	956.0
0.01	0.8	363.0	5482.0	1123.0	958.0

Tabela 23. Elementos da matriz de confusão: D8 para 5 m de resolução

<b>CP</b> <b>(m)</b>	<b>VISCOSIDADE</b> <b>(m<sup>2</sup>/s)</b>	<b>TP</b>	<b>TN</b>	<b>FP</b>	<b>FN</b>
0.1	1	124	1459	176	203
	0.8	124	1492	143	203
	0.05	124	1407	228	203
0.05	1	80	1515	120	247
	0.8	105	1512	123	222
	0.05	124	1407	228	203
0.01	1	124	1407	228	203
	0.8	124	1407	228	203

Tabela 24. Elementos da matriz de confusão: D8 para 10 m de resolução

<b>CP</b> <b>(m)</b>	<b>VISCOSIDADE</b> <b>(m<sup>2</sup>/s)</b>	<b>TP</b>	<b>TN</b>	<b>FP</b>	<b>FN</b>
0.1	1	32	361	44	49
	0.8	34	361	44	47
	0.5	31	361	44	50
0.05	1	19	368	37	62
	0.8	21	364	41	60
	0.5	20	365	40	61
0.01	1	39	313	92	42
	0.8	39	313	92	42
	0.5	39	313	92	42

Tabela 25. Elementos da matriz de confusão: D-inf para 1 m de resolução

CP (m)	VISCOSIDADE (m <sup>2</sup> /s)	VP	VN	FP	FN
0.05	1	5697	34812	6408	2547
	0.8	5740	33335	7885	2504
	0.5	5831	31134	10086	2413
	0.05	5977	26158	15062	2267
	0.005	6150	20874	20346	2094
	0.0005	6248	19687	21533	1996
0.1	1	5697	34812	6408	2547
	0.8	5740	33322	7898	2504
	0.5	5830	31130	10090	2414
	0.05	5977	26105	15115	2267
	0.005	6150	20873	20347	2094
	0.0005	6248	19681	21539	1996

Tabela 26. Elementos da matriz de confusão: D-inf para 2,5 m de resolução

CP (m)	VISCOSIDADE (m <sup>2</sup> /s)	VP	VN	FP	FN
0.01	1	839	6183	422	482
	0.8	821	6158	447	500
	0.5	1106	5882	723	215
	0.05	1149	3503	3102	172
	0.005	1208	2185	4420	113
	0.0005	1219	1434	5171	102
0.05	1	804	6216	389	517
	0.8	788	6182	423	533
	0.5	1104	5911	694	217
	0.05	1149	3585	3020	172
	0.005	1208	2243	4362	113
	0.0005	1219	1434	5171	102

Tabela 27. Elementos da matriz de confusão: D-inf para 5 m de resolução

CP (m)	VISCOSIDADE (m <sup>2</sup> /s)	VP	VN	FP	FN
0.01	0.005	3100	2810	13540	170
	0.05	2980	10150	6200	290
	0.5	1600	14930	1420	1670
	0.8	1310	15130	1220	1960
	1	1240	15210	1140	2030
0.05	0.8	880	15530	820	2390
	1	870	15530	820	2400

Tabela 28. Elementos da matriz de confusão: D-inf para 10 m de resolução e CP de 0,01 m

<b>VISCOSIDADE (m<sup>2</sup>/s)</b>	<b>VP</b>	<b>VN</b>	<b>FP</b>	<b>FN</b>
1	26	369	36	55
0.8	26	367	38	55
0.5	29	363	42	52
0.05	64	315	90	17
0.005	80	0	432	1
0.0005	81	0	739	0

Tabela 29. Elementos da matriz de confusão para as simulações com MFD para resolução de 1 m e critério de parada de 0,01 m

<b>VISCOSIDADE (m<sup>2</sup>/s)</b>	<b>VP</b>	<b>VN</b>	<b>FP</b>	<b>FN</b>
1	5590	38055	3165	2654
0.8	6226	37690	3530	2018
0.5	7074	36317	4903	1170
0.05	7413	19514	21706	831
0.005	7727	7452	33768	517

Tabela 30. Elementos da matriz de confusão para MFD com resolução de 2,5 m e critério de parada de 0,005 m

<b>VISCOSIDADE (m<sup>2</sup>/s)</b>	<b>VP</b>	<b>VN</b>	<b>FP</b>	<b>FN</b>
1	6610	60190	5860	6600
0.8	7090	59750	6300	6120
0.5	9160	57660	8390	4050
0.05	12850	50580	15470	360
0.005	13180	0	66210	30
0.0005	13210	0	94120	0

Tabela 31. Elementos da matriz de confusão para MFD com resolução de 5 m e critério de parada de 0,01 m

<b>VISCOSIDADE (m<sup>2</sup>/s)</b>	<b>VP</b>	<b>VN</b>	<b>FP</b>	<b>FN</b>
1	100	1495	140	227
0.8	105	1485	150	222
0.5	120	1460	175	207
0.05	228	1286	349	99
0.005	327	485	1150	0
0.0005	327	0	3252	0

Tabela 32. Elementos da matriz de confusão para MFD com resolução de 10 m e critério de parada de 0,01 m

<b>VISCOSIDADE (m<sup>2</sup>/s)</b>	<b>VP</b>	<b>VN</b>	<b>FP</b>	<b>FN</b>
1	19	362	43	62
0.8	19	362	43	62
0.5	21	358	47	60
0.05	38	305	100	43
0.005	81	0	405	0
0.0005	81	0	968	0

Tabela 33. Elementos da matriz de confusão: fluido dilatante com coeficiente  $n$  de 1,2

<b>VISCOSIDADE (m<sup>2</sup>/s)</b>	<b>VP</b>	<b>VN</b>	<b>FP</b>	<b>FN</b>
1	5310	38173	3047	2934
0.5	6855	37204	4016	1389
0.1	7285	27769	13451	959
0.05	7314	26295	14925	930
0.01	7700	12416	28804	544

Tabela 34. Elementos da matriz de confusão: fluido dilatante com coeficiente  $n$  de 1,4

<b>VISCOSIDADE (m<sup>2</sup>/s)</b>	<b>VP</b>	<b>VN</b>	<b>FP</b>	<b>FN</b>
1	5083	38235	2985	3161
0.5	6561	37402	3818	1683
0.1	7273	29477	11743	971
0.05	7333	23891	17329	911
0.01	7643	13883	27337	601

Tabela 35. Elementos da matriz de confusão: fluido dilatante com coeficiente  $n$  de 1,6

<b>VISCOSIDADE (m<sup>2</sup>/s)</b>	<b>VP</b>	<b>VN</b>	<b>FP</b>	<b>FN</b>
1	4537	38365	2855	3707
0.5	6309	37549	3671	1935
0.1	7255	31352	9868	989
0.05	7314	26295	14925	930
0.01	7603	14731	26489	641

Tabela 36. Elementos da matriz de confusão: fluido dilatante com coeficiente  $n$  de 1,8

<b>VISCOSIDADE (m<sup>2</sup>/s)</b>	<b>VP</b>	<b>VN</b>	<b>FP</b>	<b>FN</b>
1	6712	37142	4078	1532
0.5	6001	37755	3465	2243
0.1	7241	31885	9335	1003
0.05	7363	21402	19818	881
0.01	7557	15775	25445	687

Tabela 37. Elementos da matriz de confusão: fluido dilatante com coeficiente  $n$  de 2,0

<b>VISCOSIDADE (m<sup>2</sup>/s)</b>	<b>VP</b>	<b>VN</b>	<b>FP</b>	<b>FN</b>
1	4646	38264	2956	3598
0.5	5610	37922	3298	2634
0.1	7228	33406	7814	1016
0.05	7282	30249	10971	962
0.01	7443	18705	22515	801

Tabela 38. Elementos da matriz de confusão para as simulações com *plug* de 2,5 cm

<b>VISCOSIDADE (m<sup>2</sup>/s)</b>	<b>VP</b>	<b>VN</b>	<b>FP</b>	<b>FN</b>
1	4763	38518	2702	3481
0.5	5590	38206	3014	2654
0.1	7078	34654	6566	1166
0.05	7167	31075	10145	1077
0.01	7269	23168	18052	975

Tabela 39. Elementos da matriz de confusão para as simulações com *plug* de 5 cm

<b>VISCOSIDADE (m<sup>2</sup>/s)</b>	<b>VP</b>	<b>VN</b>	<b>FP</b>	<b>FN</b>
1	3970	38616	2604	4274
0.5	5628	38190	3030	2616
0.1	7058	34373	6847	1186
0.05	7072	32792	8428	1172
0.01	7239	23645	17575	1005

Tabela 40. Elementos da matriz de confusão para as simulações com *plug* de 7,5 cm

<b>VISCOSIDADE (m<sup>2</sup>/s)</b>	<b>VP</b>	<b>VN</b>	<b>FP</b>	<b>FN</b>
1	4498	38538	2682	3746
0.5	5727	38211	3009	2517
0.1	6995	35213	6007	1249
0.05	7126	32071	9149	1118
0.01	7203	25869	15351	1041

Tabela 41. Elementos da matriz de confusão para as simulações com *plug* de 10,0 cm

<b>VISCOSIDADE (m<sup>2</sup>/s)</b>	<b>VP</b>	<b>VN</b>	<b>FP</b>	<b>FN</b>
1	4296	38570	2650	3948
0.5	5749	38190	3030	2495
0.1	7011	35189	6031	1233
0.05	7133	31685	9535	1111
0.01	7603	14731	26489	641

Tabela 42. Elementos da matriz de confusão: *plug* de 2,5 cm e *m* de 0,6

<b>VISCOSIDADE (m<sup>2</sup>/s)</b>	<b>VP</b>	<b>VN</b>	<b>FP</b>	<b>FN</b>
1	5463	38314	2906	2781
0.5	6673	37358	3862	1571
0.1	7181	28653	12567	1063
0.05	7255	23662	17558	989
0.01	7350	17779	23441	894

Tabela 43. Elementos da matriz de confusão: *plug* de 5 cm e *m* de 0,6

<b>VISCOSIDADE (m<sup>2</sup>/s)</b>	<b>VP</b>	<b>VN</b>	<b>FP</b>	<b>FN</b>
1	5323	38341	2879	2921
0.5	6533	37675	3545	1711
0.1	7186	29479	11741	1058
0.05	7241	24205	17015	1003
0.01	7332	18527	22693	912

Tabela 44. Elementos da matriz de confusão: *plug* de 7,5 cm e *m* de 0,6

VISCOSIDADE (m <sup>2</sup> /s)	VP	VN	FP	FN
1	4874	38488	2732	3370
0.5	6532	37652	3568	1712
0.1	7164	30598	10622	1080
0.05	7221	24771	16449	1023
0.01	7324	19848	21372	920

Tabela 45. Elementos da matriz de confusão: *plug* de 10 cm e *m* de 0,6

VISCOSIDADE (m <sup>2</sup> /s)	VP	VN	FP	FN
1	5178	38381	2839	3066
0.5	6582	37714	3506	1662
0.1	7154	30277	10943	1090
0.05	7223	26169	15051	1021
0.01	7289	20722	20498	955

Tabela 46. Elementos da matriz de confusão: *plug* de 2,5 cm e *m* de 0,8

VISCOSIDADE (m <sup>2</sup> /s)	VP	VN	FP	FN
1	4662	38469	2751	3582
0.5	6035	37911	3309	2209
0.1	7117	32043	9177	1127
0.05	7193	27952	13268	1051
0.01	7309	20359	20861	935

Tabela 47. Elementos da matriz de confusão: *plug* de 5 cm e *m* de 0,8

VISCOSIDADE (m <sup>2</sup> /s)	VP	VN	FP	FN
1	4664	38476	2744	3580
0.5	6336	37866	3354	1908
0.1	7106	32174	9046	1138
0.05	7197	28524	12696	1047
0.01	7277	21247	19973	967

Tabela 48. Elementos da matriz de confusão: *plug* de 7,5 cm e *m* de 0,8

<b>VISCOSIDADE (m<sup>2</sup>/s)</b>	<b>VP</b>	<b>VN</b>	<b>FP</b>	<b>FN</b>
1	4461	38519	2701	3783
0.5	6042	37981	3239	2202
0.1	7111	33185	8035	1133
0.05	7171	28874	12346	1073
0.01	7267	22273	18947	977

Tabela 49. Elementos da matriz de confusão: *plug* de 10 cm e *m* de 0,8

<b>VISCOSIDADE (m<sup>2</sup>/s)</b>	<b>VP</b>	<b>VN</b>	<b>FP</b>	<b>FN</b>
1	4627	38543	2677	3617
0.5	5862	38054	3166	2382
0.1	7091	33189	8031	1153
0.05	7149	29505	11715	1095
0.01	7250	23160	18060	994

Tabela 50. Elementos da matriz de confusão: *plug* de 2,5 cm e *m* de 1,2

<b>VISCOSIDADE (m<sup>2</sup>/s)</b>	<b>VP</b>	<b>VN</b>	<b>FP</b>	<b>FN</b>
1	4204	38595	2625	4040
0.5	5488	38200	3020	2756
0.1	6933	35825	5395	1311
0.05	7096	33160	8060	1148
0.01	7224	25835	15385	1020

Tabela 51. Elementos da matriz de confusão: *plug* de 5 cm e *m* de 1,2

<b>VISCOSIDADE (m<sup>2</sup>/s)</b>	<b>VP</b>	<b>VN</b>	<b>FP</b>	<b>FN</b>
1	3958	38653	2567	4286
0.5	5311	38293	2927	2933
0.1	6967	36350	4870	1277
0.05	7077	34208	7012	1167
0.01	7209	27016	14204	1035



Tabela 52. Elementos da matriz de confusão: *plug* de 7,5 cm e *m* de 1,2

VISCOSIDADE (m <sup>2</sup> /s)	VP	VN	FP	FN
1	3810	38682	2538	4434
0.5	5325	38326	2894	2919
0.1	6939	36478	4742	1305
0.05	7019	34147	7073	1225
0.01	7185	27795	13425	1059

Tabela 53. Elementos da matriz de confusão: *plug* de 10 cm e *m* de 1,2

VISCOSIDADE (m <sup>2</sup> /s)	VP	VN	FP	FN
1	3694	38739	2481	4550
0.5	4858	38455	2765	3386
0.1	6915	36460	4760	1329
0.05	6974	34929	6291	1270
0.01	7140	29880	11340	1104

Tabela 54. Elementos da matriz de confusão: *plug* de 2,5 cm e *m* de 1,4

VISCOSIDADE (m <sup>2</sup> /s)	VP	VN	FP	FN
1	3706	38679	2541	4538
0.5	5053	38339	2881	3191
0.1	6722	36824	4396	1522
0.05	7045	34857	6363	1199
0.01	7193	28309	12911	1051

Tabela 55. Elementos da matriz de confusão: *plug* de 5 cm e *m* de 1,4

VISCOSIDADE (m <sup>2</sup> /s)	VP	VN	FP	FN
1	3880	38670	2550	4364
0.5	4887	38390	2830	3357
0.1	6890	36793	4427	1354
0.05	7044	34903	6317	1200
0.01	7173	29609	11611	1071

Tabela 56. Elementos da matriz de confusão: *plug* de 7,5 cm e *m* de 1,4

<b>VISCOSIDADE (m<sup>2</sup>/s)</b>	<b>VP</b>	<b>VN</b>	<b>FP</b>	<b>FN</b>
1	3802	38729	2491	4442
0.5	4785	38418	2802	3459
0.1	6632	37281	3939	1612
0.05	6991	35683	5537	1253
0.01	7130	31210	10010	1114

Tabela 57. Elementos da matriz de confusão: *plug* de 10 cm e *m* de 1,4

<b>VISCOSIDADE (m<sup>2</sup>/s)</b>	<b>VP</b>	<b>VN</b>	<b>FP</b>	<b>FN</b>
1	3603	38779	2441	4641
0.5	4651	38512	2708	3593
0.1	6717	37215	4005	1527
0.05	6915	35777	5443	1329
0.01	7138	31144	10076	1106

## APÊNDICE B

## TABELAS COM ÍNDICES DE DESEMPENHO

Tabela 58. Índices para as simulações com coeficiente  $n$  de 1,4

VISCOSIDADE (m <sup>2</sup> /s)	TPR	FPR	FDR	FNR	H <sub>s</sub>	TEMPO (s)	A.M. (m)
1	61.66	7.24	37.00	38.34	0.55	290	0.31
0.5	79.59	9.26	36.79	20.41	0.64	431	0.36
0.1	88.22	28.49	61.75	11.78	0.39	687	0.29
0.05	88.95	42.04	70.27	11.05	0.26	839	0.30
0.01	92.71	66.32	78.15	7.29	0.11	2076	0.66

Tabela 59. Índices para as simulações com coeficiente  $n$  de 1,6

VISCOSIDADE (m <sup>2</sup> /s)	TPR	FPR	FDR	FNR	H <sub>s</sub>	TEMPO (s)	A.M. (m)
1	55.03	6.93	38.62	44.97	0.50	267	0.31
0.5	76.53	8.91	36.78	23.47	0.62	396	0.41
0.1	88.00	23.94	57.63	12.00	0.45	752	0.34
0.05	88.72	36.21	67.11	11.28	0.31	626	0.35
0.01	92.22	64.26	77.70	7.78	0.12	2042	0.60

Tabela 60. Índices para as simulações com coeficiente  $n$  de 1,8

VISCOSIDADE (m <sup>2</sup> /s)	TPR	FPR	FDR	FNR	H <sub>s</sub>	TEMPO (s)	A.M. (m)
1	81.42	9.89	37.79	18.58	0.64	1855	0.62
0.5	72.79	8.41	36.60	27.21	0.61	375	0.37
0.1	87.83	22.65	56.32	12.17	0.46	1058	0.41
0.05	89.31	48.08	72.91	10.69	0.21	634	0.33
0.01	91.67	61.73	77.10	8.33	0.14	2052	0.58

Tabela 61. Índices para as simulações com coeficiente  $n$  de 2,0

VISCOSIDADE (m <sup>2</sup> /s)	TPR	FPR	FDR	FNR	H <sub>s</sub>	TEMPO (s)	A.M. (m)
1	56.36	7.17	38.88	43.64	0.51	374	0.26
0.5	68.05	8.00	37.02	31.95	0.58	327	0.45
0.1	87.68	18.96	51.95	12.32	0.52	646	0.42
0.05	88.33	26.62	60.11	11.67	0.42	564	0.44
0.01	90.28	54.62	75.16	9.72	0.17	1226	0.50

Tabela 62. Índices para as simulações com *plug* de 2,5 cm

VISCOSIDADE (m <sup>2</sup> /s)	TPR	FPR	FDR	FNR	H <sub>s</sub>	TEMPO (s)	AM (m)
1	57.78	6.56	36.20	42.22	0.53	273	0.38
0.5	67.81	7.31	35.03	32.19	0.59	332	0.36
0.1	85.86	15.93	48.12	14.14	0.55	687	0.20
0.05	86.94	24.61	58.60	13.06	0.43	521	0.15
0.01	88.17	43.79	71.29	11.83	0.24	1014	0.70

Tabela 63. Índices para as simulações com *plug* de 5 cm

VISCOSIDADE (m <sup>2</sup> /s)	TPR	FPR	FDR	FNR	H <sub>s</sub>	TEMPO (s)	A.M. (m)
1	48.16	6.32	39.61	51.84	0.46	244	0.30
0.5	68.27	7.35	35.00	31.73	0.60	357	0.29
0.1	85.61	16.61	49.24	14.39	0.54	593	0.19
0.05	85.78	20.45	54.37	14.22	0.48	550	0.17
0.01	87.81	42.64	70.83	12.19	0.25	980	0.20

Tabela 64. Índices para as simulações com *plug* de 7,5 cm

VISCOSIDADE (m <sup>2</sup> /s)	TPR	FPR	FDR	FNR	H <sub>s</sub>	TEMPO (s)	A.M. (m)
1	54.56	6.51	37.35	45.44	0.51	279	0.40
0.5	69.47	7.30	34.44	30.53	0.61	360	0.30
0.1	84.85	14.57	46.20	15.15	0.57	638	0.17
0.05	86.44	22.20	56.22	13.56	0.46	518	0.16
0.01	87.37	37.24	68.06	12.63	0.30	851	0.10

Tabela 65. Índices para as simulações com *plug* de 10,0 cm

VISCOSIDADE (m <sup>2</sup> /s)	TPR	FPR	FDR	FNR	H <sub>s</sub>	TEMPO (s)	A.M. (m)
1	52.11	6.43	38.15	47.89	0.49	258	0.38
0.5	69.74	7.35	34.51	30.26	0.61	364	0.27
0.1	85.04	14.63	46.24	14.96	0.57	642	0.20
0.05	86.52	23.13	57.21	13.48	0.45	523	0.15
0.01	92.22	64.26	77.70	7.78	0.12	2042	0.60

Tabela 66. Índices para as simulações com *plug* de 2,5 cm e *m* de 0,6

VISCOSIDADE (m <sup>2</sup> /s)	TPR	FPR	FDR	FNR	H <sub>s</sub>	TEMPO (s)	A.M. (m)
1	66.27	7.05	34.72	33.73	0.59	334	1.2
0.5	80.94	9.37	36.66	19.06	0.64	467	1.78
0.1	87.11	30.49	63.64	12.89	0.36	740	1.58
0.05	88.00	42.60	70.76	12.00	0.25	1045	1.02
0.01	89.16	56.87	76.13	10.84	0.15	1200	0.67

Tabela 67. Índices para as simulações com *plug* de 5 cm e *m* de 0,6

VISCOSIDADE (m <sup>2</sup> /s)	TPR	FPR	FDR	FNR	H <sub>s</sub>	TEMPO (s)	A.M. (m)
1	64.57	6.98	35.10	35.43	0.58	336	1.17
0.5	79.25	8.60	35.18	20.75	0.65	410	1.83
0.1	87.17	28.48	62.03	12.83	0.39	735	1.42
0.05	87.83	41.28	70.15	12.17	0.26	949	0.65
0.01	88.94	55.05	75.58	11.06	0.16	1150	0.66

Tabela 68. Índices para as simulações com *plug* de 7,5 cm e *m* de 0,6

VISCOSIDADE (m <sup>2</sup> /s)	TPR	FPR	FDR	FNR	H <sub>s</sub>	TEMPO (s)	A.M. (m)
1	59.12	6.63	35.92	40.88	0.54	289	1.29
0.5	79.23	8.66	35.33	20.77	0.65	437	1.92
0.1	86.90	25.77	59.72	13.10	0.42	698	0.62
0.05	87.59	39.91	69.49	12.41	0.27	923	0.53
0.01	88.84	51.85	74.48	11.16	0.19	1308	0.67

Tabela 69. Índices para as simulações com *plug* de 10 cm e *m* de 0,6

VISCOSIDADE (m <sup>2</sup> /s)	TPR	FPR	FDR	FNR	H <sub>s</sub>	TEMPO (s)	A.M. (m)
1	62.81	6.89	35.41	37.19	0.57	314	1.22
0.5	79.84	8.51	34.75	20.16	0.65	426	0.91
0.1	86.78	26.55	60.47	13.22	0.41	715	1.44
0.05	87.62	36.51	67.57	12.38	0.30	861	0.68
0.01	88.42	49.73	73.77	11.58	0.20	1357	0.67

Tabela 70. Índices para as simulações com *plug* de 2,5 cm e *m* de 0,8

VISCOSIDADE (m <sup>2</sup> /s)	TPR	FPR	FDR	FNR	H <sub>s</sub>	TEMPO (s)	A.M. (m)
1	56.55	6.67	37.11	43.45	0.52	266	1.03
0.5	73.20	8.03	35.41	26.80	0.62	421	0.75
0.1	86.33	22.26	56.32	13.67	0.46	625	1.26
0.05	87.25	32.19	64.85	12.75	0.35	771	0.51
0.01	88.66	50.61	74.05	11.34	0.19	1041	0.61

Tabela 71. Índices para as simulações com *plug* de 5 cm e *m* de 0,8

VISCOSIDADE (m <sup>2</sup> /s)	TPR	FPR	FDR	FNR	H <sub>s</sub>	TEMPO (s)	A.M. (m)
1	56.57	6.66	37.04	43.43	0.52	285	1.09
0.5	76.86	8.14	34.61	23.14	0.64	422	0.78
0.1	86.20	21.95	56.01	13.80	0.46	620	0.71
0.05	87.30	30.80	63.82	12.70	0.36	745	0.62
0.01	88.27	48.45	73.30	11.73	0.21	1085	0.63

Tabela 72. Índices para as simulações com *plug* de 7,5 cm e *m* de 0,8

VISCOSIDADE (m <sup>2</sup> /s)	TPR	FPR	FDR	FNR	H <sub>s</sub>	TEMPO (s)	A.M. (m)
1	54.11	6.55	37.71	45.89	0.50	255	1.05
0.5	73.29	7.86	34.90	26.71	0.62	411	0.68
0.1	86.26	19.49	53.05	13.74	0.50	602	1.16
0.05	86.98	29.95	63.26	13.02	0.37	736	0.58
0.01	88.15	45.97	72.28	11.85	0.23	1020	0.64

Tabela 73. Índices para as simulações com *plug* de 10 cm e *m* de 0,8

VISCOSIDADE (m <sup>2</sup> /s)	TPR	FPR	FDR	FNR	H <sub>s</sub>	TEMPO (s)	A.M. (m)
1	56.13	6.49	36.65	43.87	0.52	255	1.01
0.5	71.11	7.68	35.07	28.89	0.61	375	0.58
0.1	86.01	19.48	53.11	13.99	0.50	590	0.93
0.05	86.72	28.42	62.10	13.28	0.38	738	0.53
0.01	87.94	43.81	71.36	12.06	0.24	993	0.68

Tabela 74. Índices para as simulações com *plug* de 2,5 cm e *m* de 1,2

VISCOSIDADE (m <sup>2</sup> /s)	TPR	FPR	FDR	FNR	H <sub>s</sub>	TEMPO (s)	A.M. (m)
1	50.99	6.37	38.44	49.01	0.48	247	0.36
0.5	66.57	7.33	35.50	33.43	0.58	360	0.69
0.1	84.10	13.09	43.76	15.90	0.59	487	0.53
0.05	86.07	19.55	53.18	13.93	0.50	616	0.36
0.01	87.63	37.32	68.05	12.37	0.30	849	0.5

Tabela 75. Índices para as simulações com *plug* de 5 cm e *m* de 1,2

VISCOSIDADE (m <sup>2</sup> /s)	TPR	FPR	FDR	FNR	H <sub>s</sub>	TEMPO (s)	A.M. (m)
1	48.01	6.23	39.34	51.99	0.46	228	0.37
0.5	64.42	7.10	35.53	35.58	0.57	318	0.84
0.1	84.51	11.81	41.14	15.49	0.62	471	0.45
0.05	85.84	17.01	49.77	14.16	0.54	538	0.42
0.01	87.45	34.46	66.33	12.55	0.32	789	0.59

Tabela 76. Índices para as simulações com *plug* de 7,5 cm e *m* de 1,2

VISCOSIDADE (m <sup>2</sup> /s)	TPR	FPR	FDR	FNR	H <sub>s</sub>	TEMPO (s)	A.M. (m)
1	46.22	6.16	39.98	53.78	0.44	233	0.31
0.5	64.59	7.02	35.21	35.41	0.58	338	0.57
0.1	84.17	11.50	40.60	15.83	0.62	497	0.95
0.05	85.14	17.16	50.19	14.86	0.53	564	0.41
0.01	87.15	32.57	65.14	12.85	0.34	770	0.6

Tabela 77. Índices para as simulações com *plug* de 10 cm e *m* de 1,2

VISCOSIDADE (m <sup>2</sup> /s)	TPR	FPR	FDR	FNR	H <sub>s</sub>	TEMPO (s)	A.M. (m)
1	44.81	6.02	40.18	55.19	0.43	214	0.31
0.5	58.93	6.71	36.27	41.07	0.54	289	0.39
0.1	83.88	11.55	40.77	16.12	0.62	495	0.9
0.05	84.59	15.26	47.43	15.41	0.56	530	0.46
0.01	86.61	27.51	61.36	13.39	0.39	709	0.49

Tabela 78. Índices para as simulações com *plug* de 2,5 cm e *m* de 1,4

VISCOSIDADE (m <sup>2</sup> /s)	TPR	FPR	FDR	FNR	H <sub>s</sub>	TEMPO (s)	A.M. (m)
1	44.95	6.16	40.68	55.05	0.43	755	0.39
0.5	61.29	6.99	36.31	38.71	0.55	219	0.48
0.1	81.54	10.66	39.54	18.46	0.62	304	0.45
0.05	85.46	15.44	47.46	14.54	0.56	463	0.42
0.01	87.25	31.32	64.22	12.75	0.36	533	0.49

Tabela 79. Índices para as simulações com *plug* de 5 cm e *m* de 1,4

VISCOSIDADE (m <sup>2</sup> /s)	TPR	FPR	FDR	FNR	H <sub>s</sub>	TEMPO (s)	A.M. (m)
1	47.06	6.19	39.66	52.94	0.45	233	0.37
0.5	59.28	6.87	36.67	40.72	0.54	301	0.64
0.1	83.58	10.74	39.12	16.42	0.63	465	0.43
0.05	85.44	15.33	47.28	14.56	0.56	537	0.42
0.01	87.01	28.17	61.81	12.99	0.39	723	0.48

Tabela 80. Índices para as simulações com *plug* de 7,5 cm e *m* de 1,4

VISCOSIDADE (m <sup>2</sup> /s)	TPR	FPR	FDR	FNR	H <sub>s</sub>	TEMPO (s)	A.M. (m)
1	46.12	6.04	39.58	53.88	0.44	236	0.34
0.5	58.04	6.80	36.93	41.96	0.53	296	0.67
0.1	80.45	9.56	37.26	19.55	0.64	456	0.84
0.05	84.80	13.43	44.20	15.20	0.59	514	0.43
0.01	86.49	24.28	58.40	13.51	0.43	668	0.46

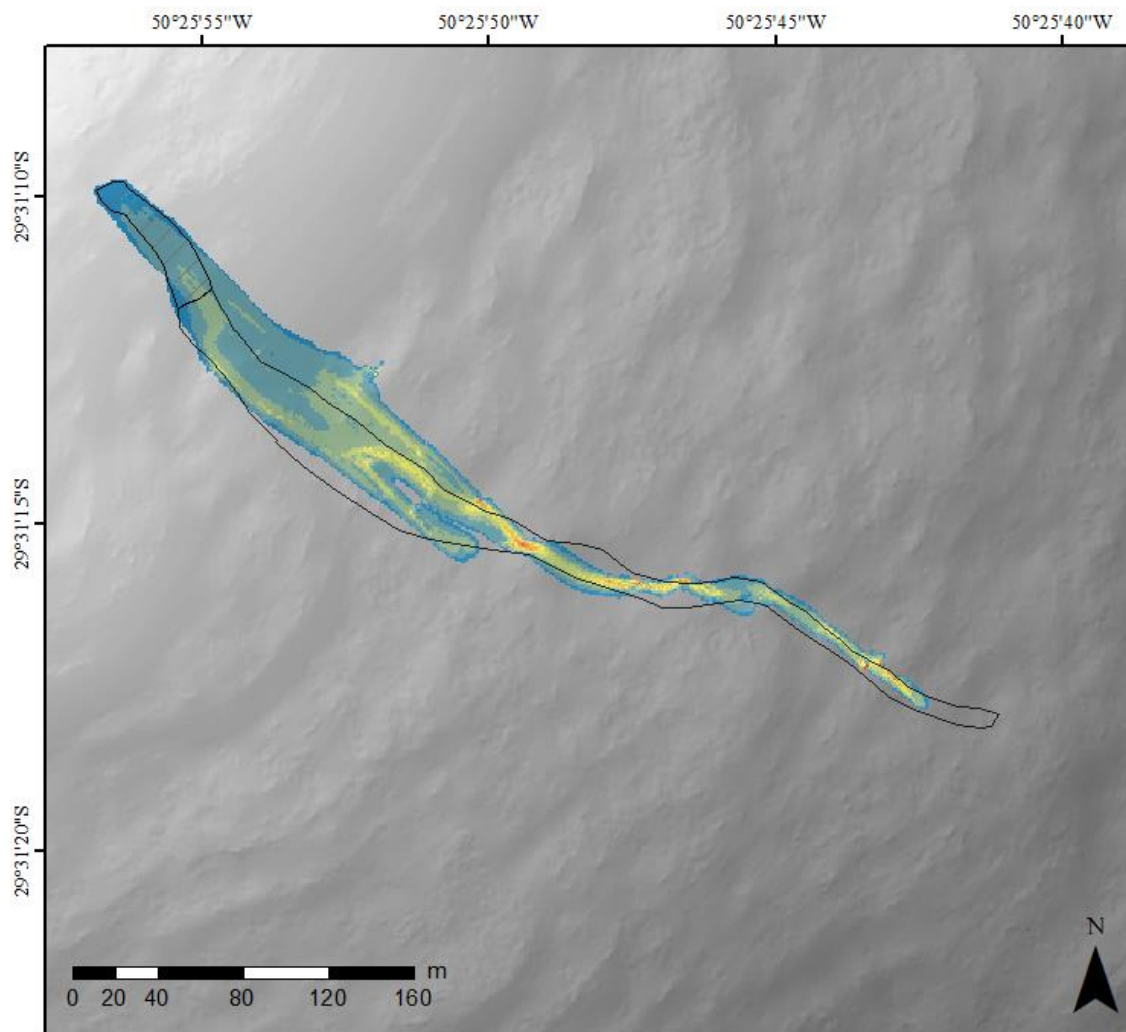
Tabela 81. Índices para as simulações com *plug* de 10 cm e *m* de 1,4

VISCOSIDADE (m <sup>2</sup> /s)	TPR	FPR	FDR	FNR	H <sub>s</sub>	TEMPO (s)	A.M. (m)
1	43.70	5.92	40.39	56.30	0.42	230	0.32
0.5	56.42	6.57	36.80	43.58	0.52	276	0.63
0.1	81.48	9.72	37.35	18.52	0.64	456	0.92
0.05	83.88	13.20	44.04	16.12	0.59	520	0.47
0.01	86.58	24.44	58.53	13.42	0.43	687	0.48



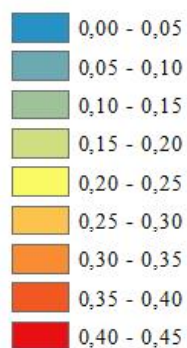
## APÊNDICE C

### FIGURAS DAS MANCHAS RESULTANTES



#### LEGENDA

##### Altura final do fluxo (m)



##### Zona de iniciação



##### Zona de transporte

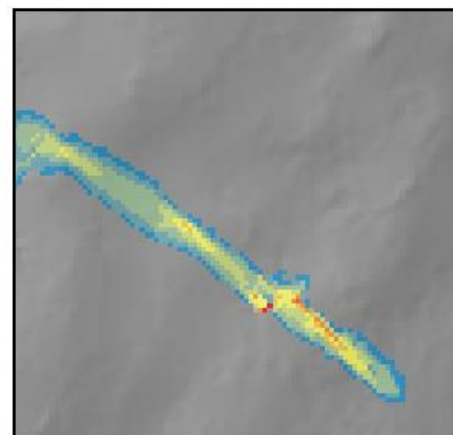
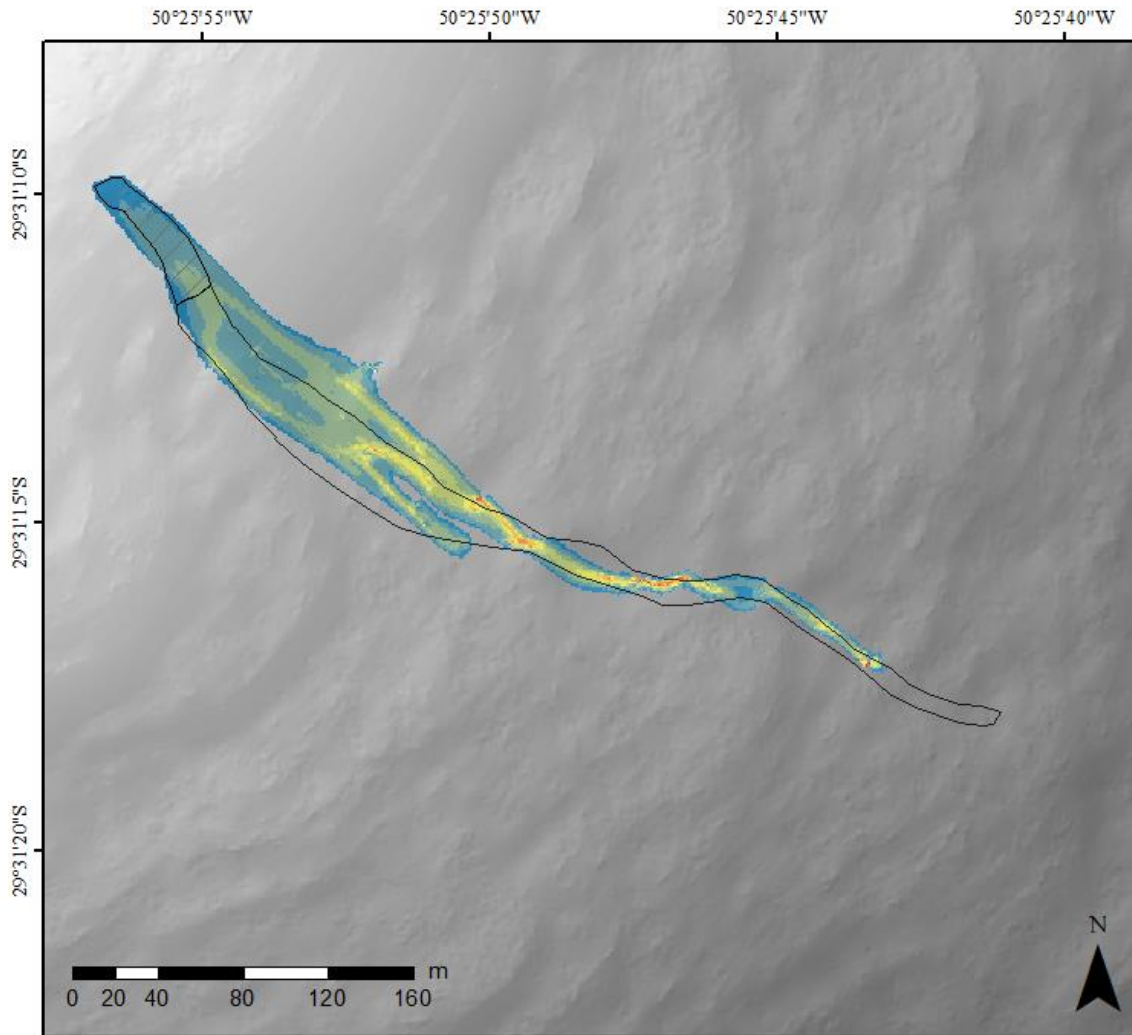
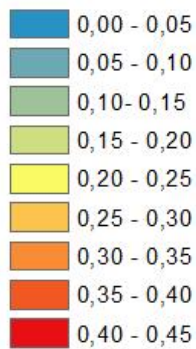


Figura 60. Mancha do fluxo de detritos: dilatante,  $n$  1,4, viscosidade de  $0,5 \text{ m}^2/\text{s}$



### LEGENDA

#### Altura final do fluxo (m)



#### Zona de iniciação



#### Zona de transporte

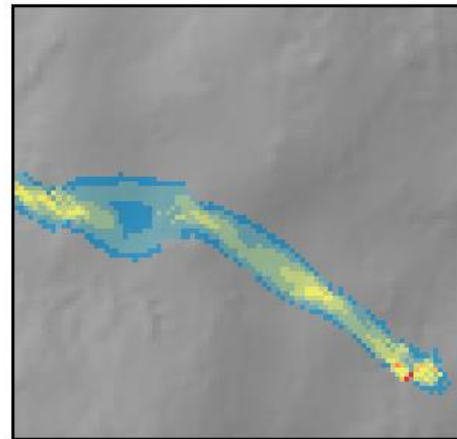
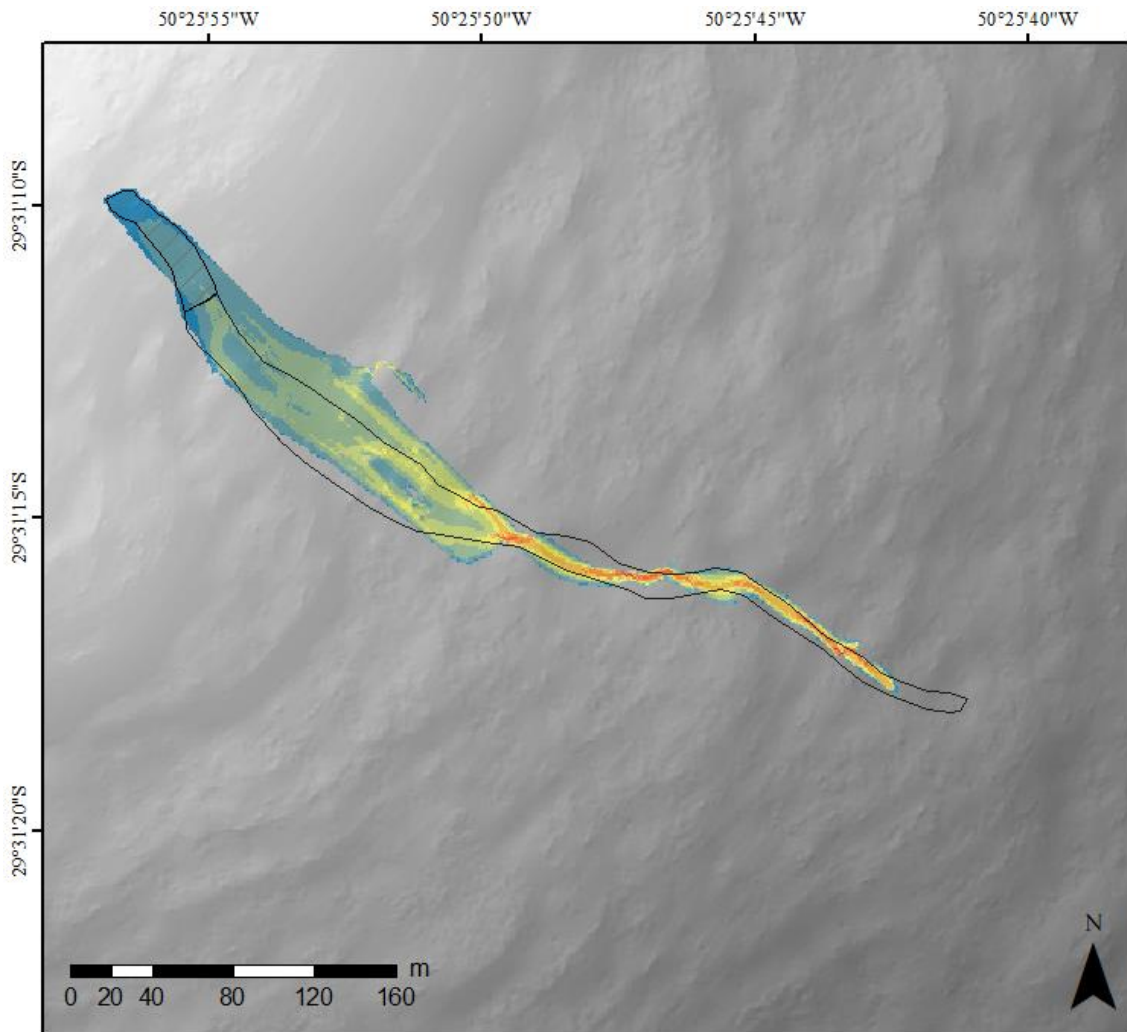
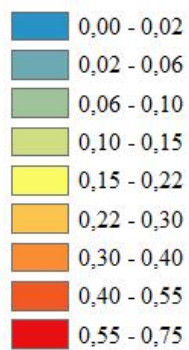


Figura 61. Mancha do fluxo de detritos: dilatante,  $n$  1,6, viscosidade de  $0,5 \text{ m}^2/\text{s}$



### LEGENDA

#### Altura final do fluxo (m)



#### Zona de iniciação



#### Zona de transporte

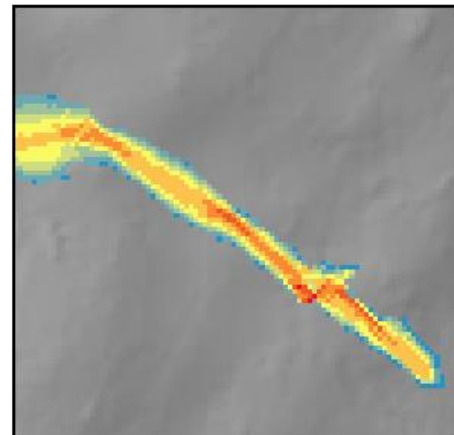
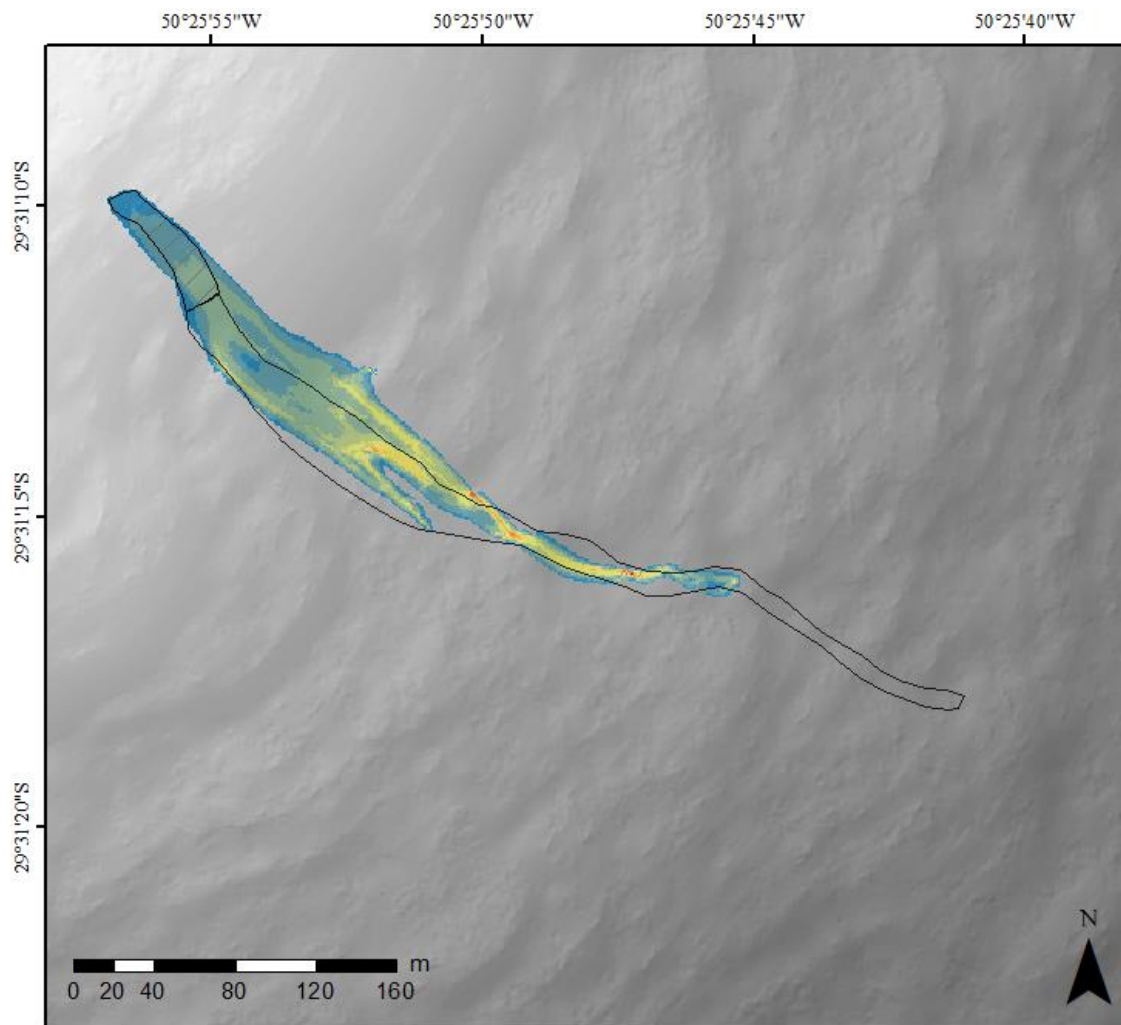
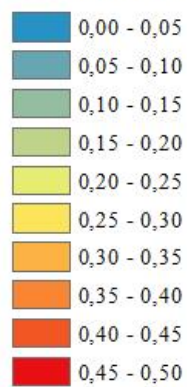


Figura 62. Mancha do fluxo de detritos: dilatante,  $n$  1,8, viscosidade de  $1,0 \text{ m}^2/\text{s}$



### LEGENDA

#### Altura final do fluxo (m)



#### Zona de iniciação



#### Zona de transporte

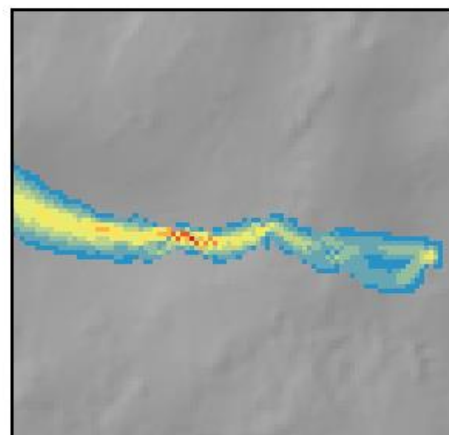
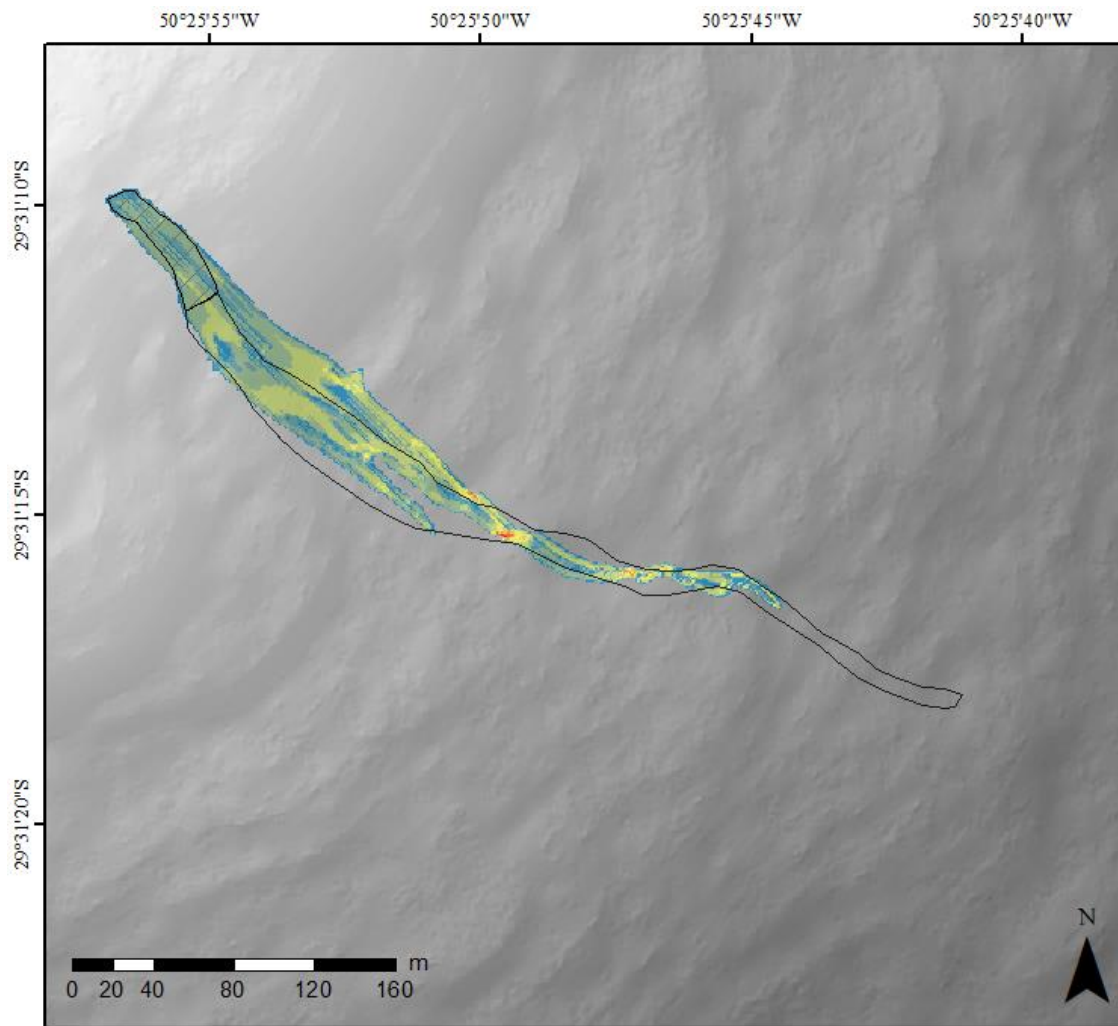


Figura 63. Mancha do fluxo de detritos: dilatante,  $n$  2 viscosidade de  $0,5 \text{ m}^2/\text{s}$



### LEGENDA

#### Altura final do fluxo (m)

0,00 - 0,05
0,05 - 0,10
0,10 - 0,15
0,15 - 0,20
0,20 - 0,25
0,25 - 0,30
0,30 - 0,35
0,35 - 0,40
0,40 - 0,45

#### Zona de iniciação



#### Zona de transporte

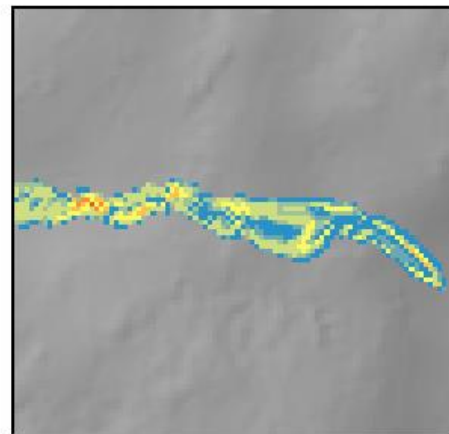
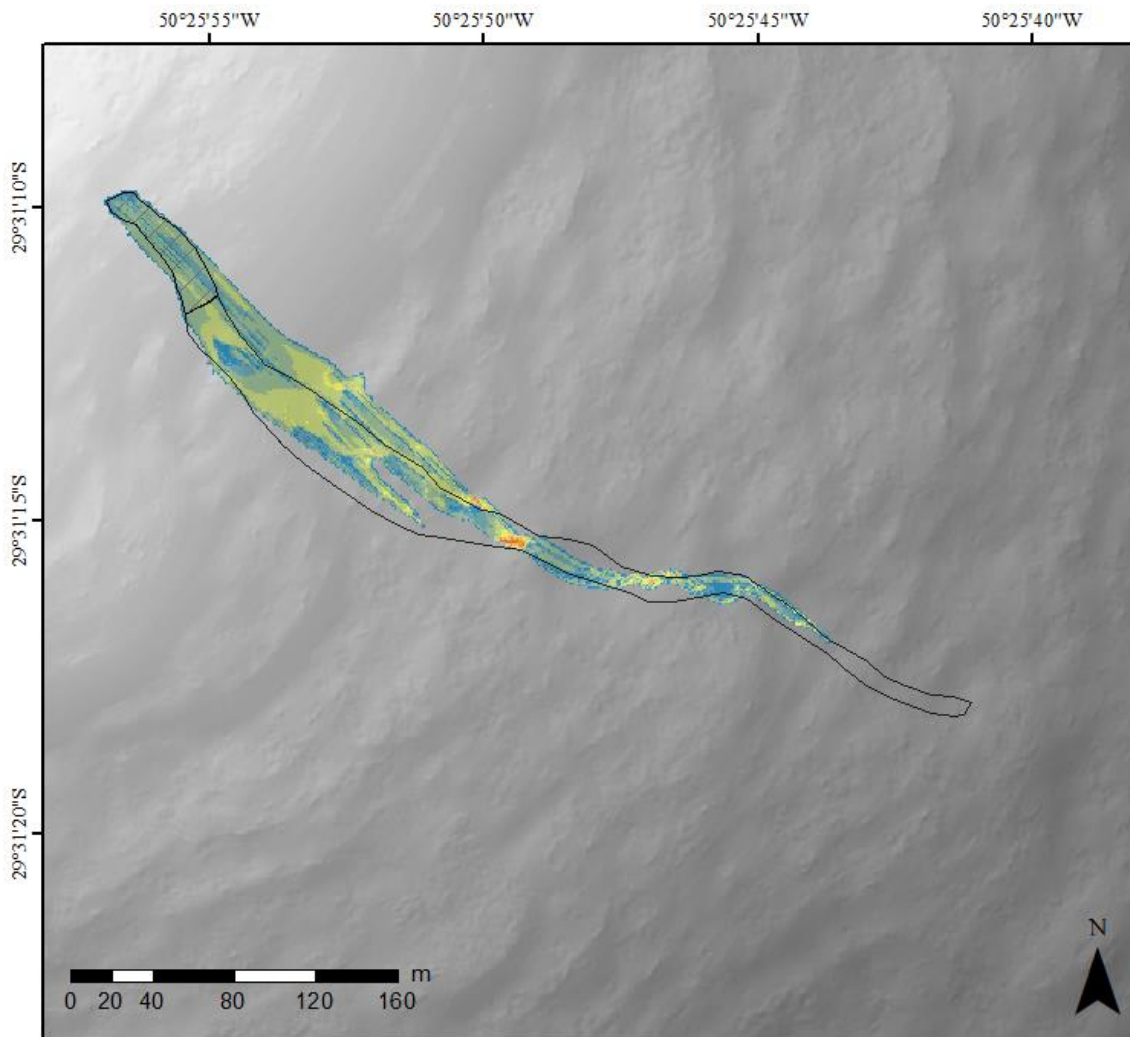
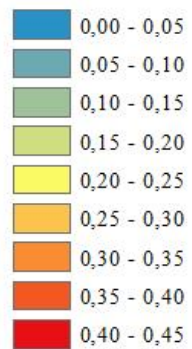


Figura 64. Mancha do fluxo de detritos: Bingham, *plug* de 2,5 cm, viscosidade de 0,5 m<sup>2</sup>/s



### LEGENDA

#### Altura final do fluxo (m)



#### Zona de iniciação



#### Zona de transporte

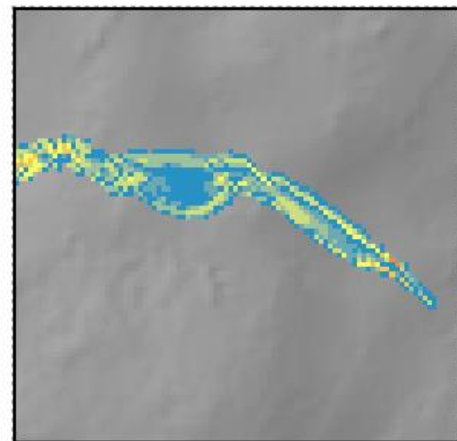
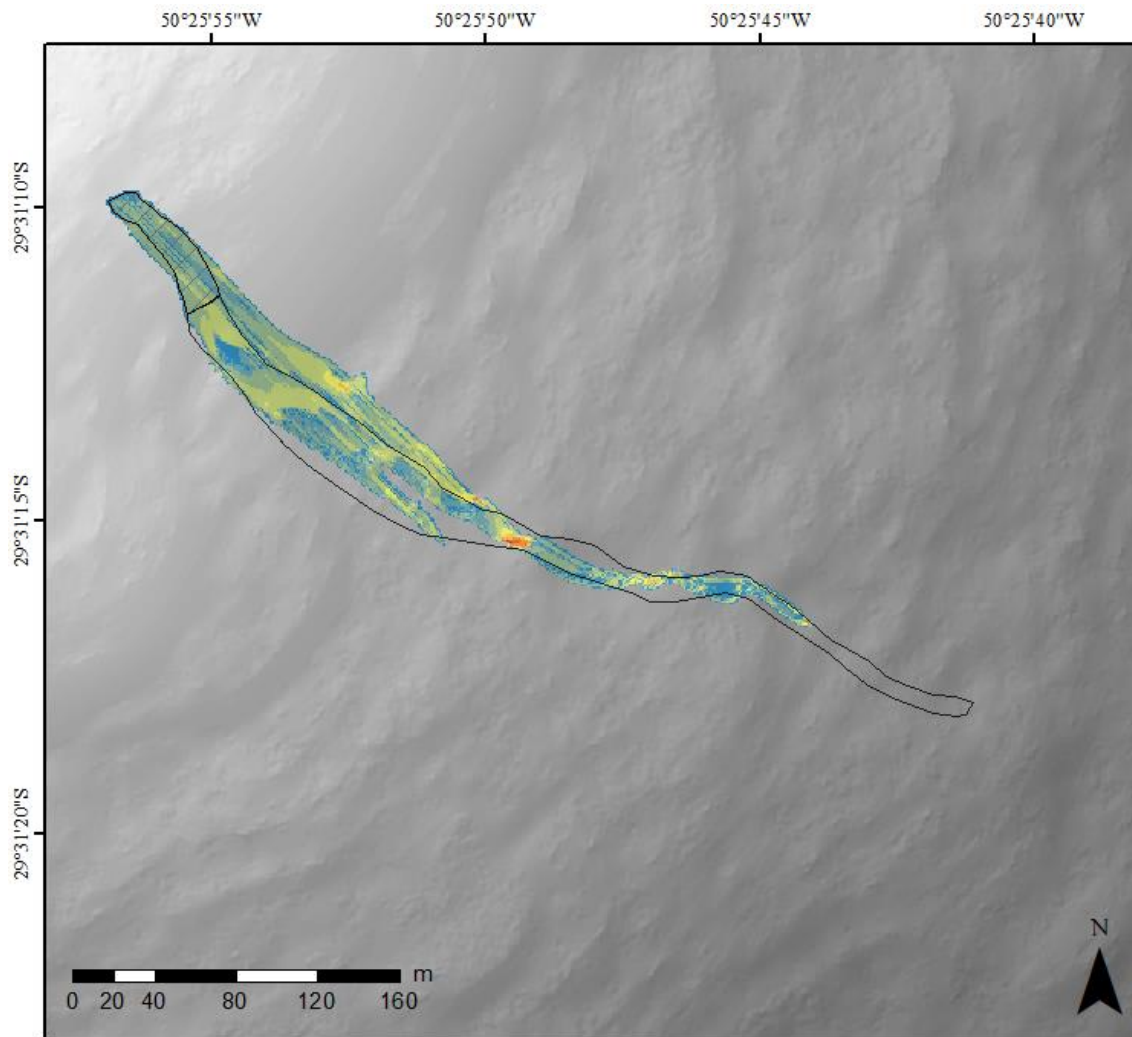


Figura 65. Mancha do fluxo de detritos: Bingham, *plug* de 5 cm, viscosidade de 0,5 m<sup>2</sup>/s



### LEGENDA

#### Altura final do fluxo (m)

0,00 - 0,05
0,05 - 0,10
0,10 - 0,15
0,15 - 0,20
0,20 - 0,25
0,25 - 0,30
0,30 - 0,35
0,35 - 0,40
0,40 - 0,45

#### Zona de iniciação



#### Zona de transporte

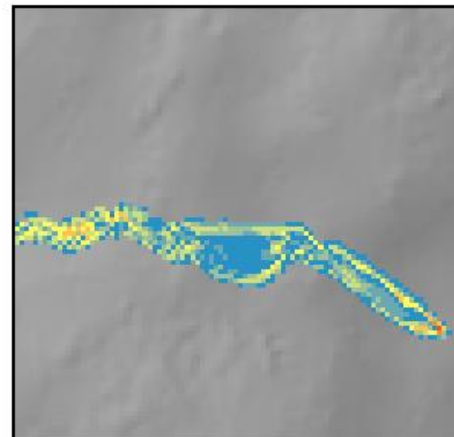
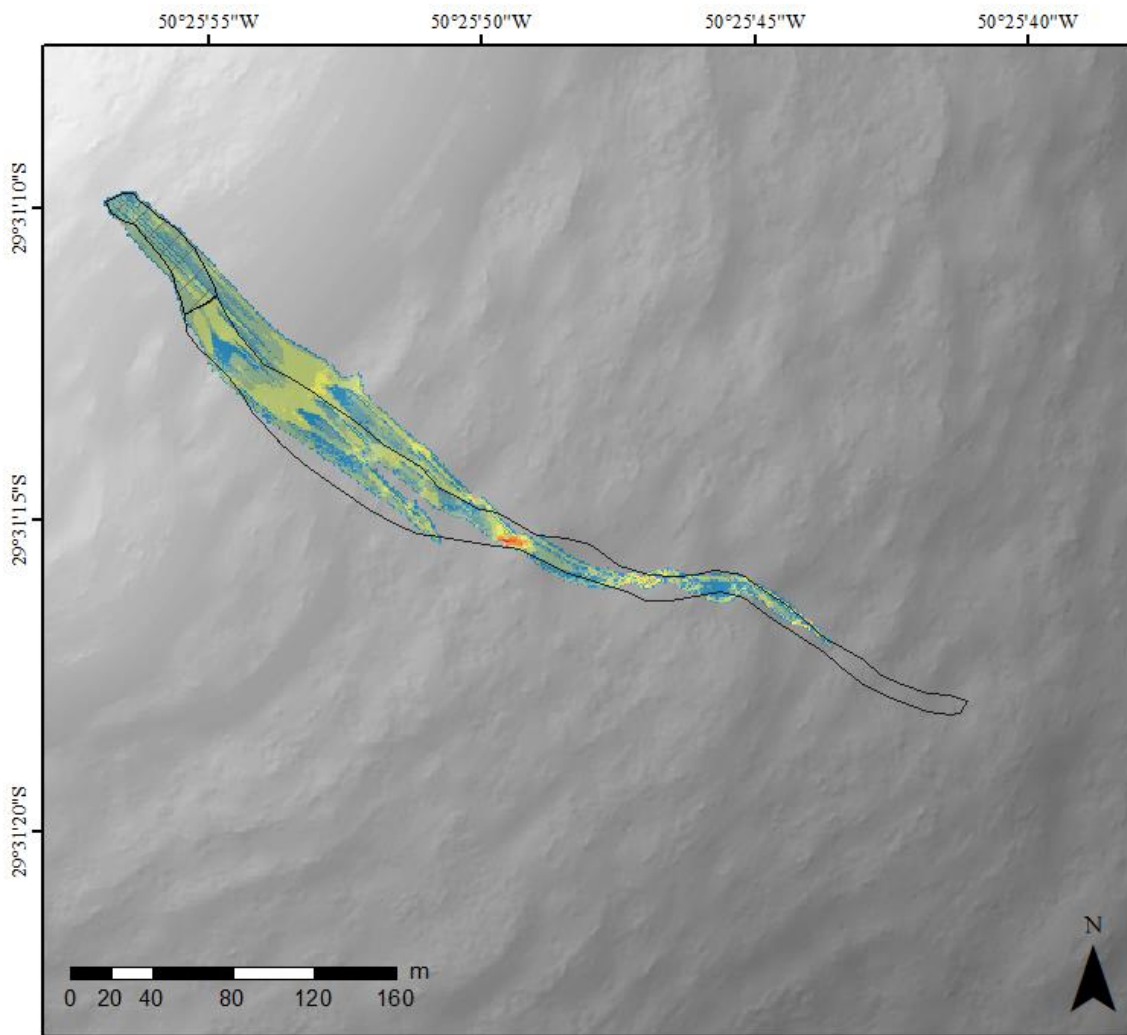


Figura 66. Mancha do fluxo de detritos: Bingham, *plug* de 7,5 cm, viscosidade de 0,5 m<sup>2</sup>/s



### LEGENDA

#### Altura final do fluxo (m)

	0,00 - 0,05
	0,05 - 0,10
	0,10 - 0,15
	0,15 - 0,20
	0,20 - 0,25
	0,25 - 0,30
	0,30 - 0,35
	0,35 - 0,40
	0,40 - 0,45

#### Zona de iniciação



#### Zona de transporte

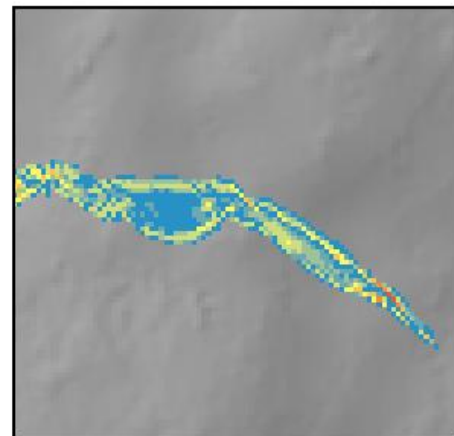
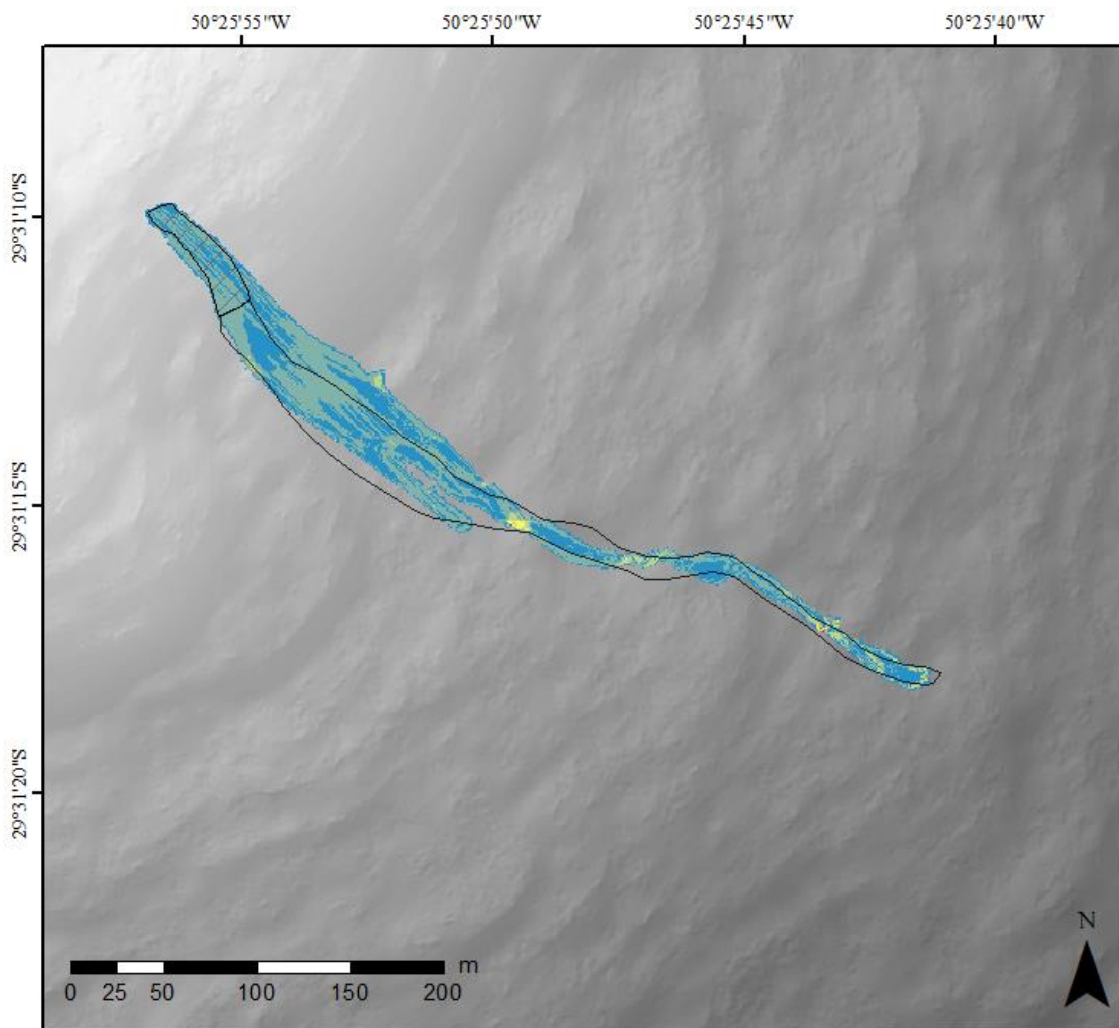


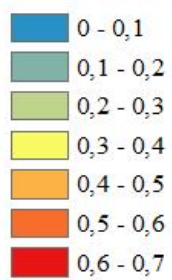
Figura 67. Mancha do fluxo de detritos: Bingham, *plug* de 10 cm, viscosidade de 0,5 m<sup>2</sup>/s





### LEGENDA

#### Altura final do fluxo (m)



#### Zona de iniciação



#### Zona de transporte

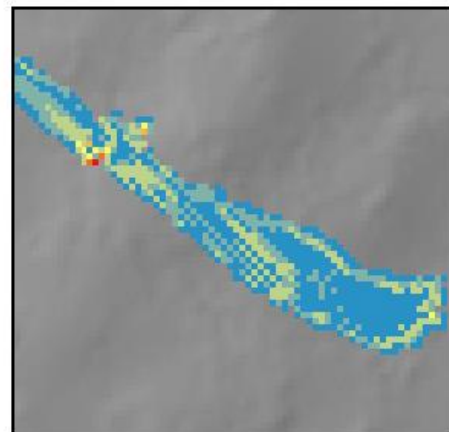
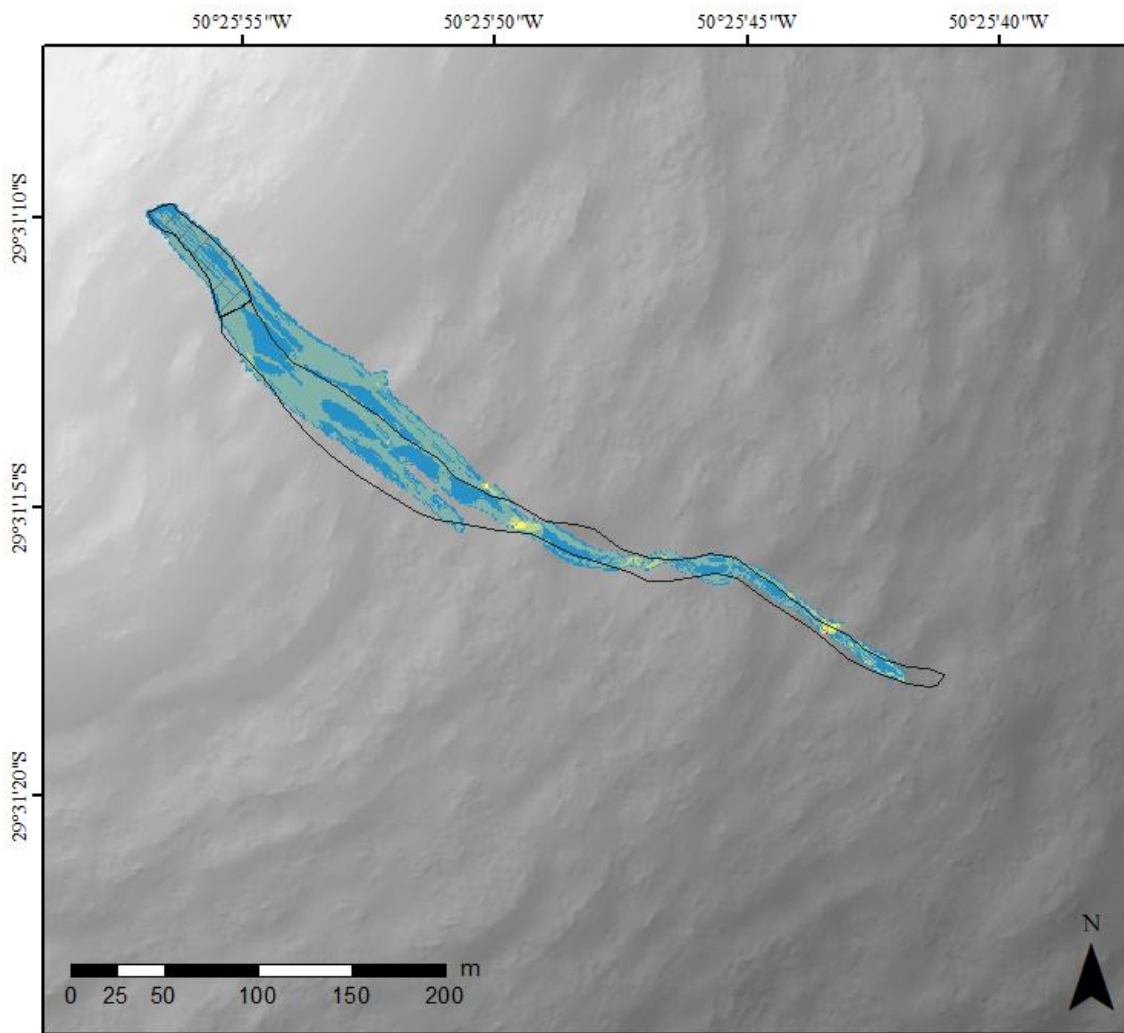
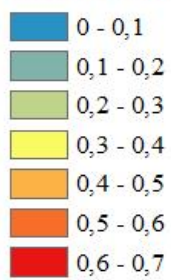


Figura 68. Mancha do fluxo de detritos: Herschel-Bulkley, viscosidade  $0,5 \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $m$  de  $0,6$  e  $plug$  de  $10 \text{ cm}$



### LEGENDA

#### Altura final do fluxo (m)



#### Zona de iniciação



#### Zona de transporte

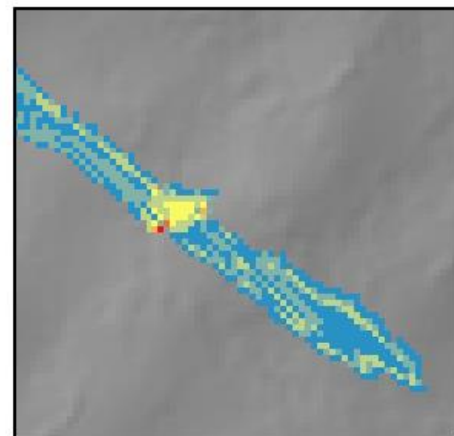


Figura 69. Mancha do fluxo de detritos: Herschel-Bulkley, viscosidade  $0,5 \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $m$  de  $0,8$  e  $plug$  de  $5 \text{ cm}$

## APÊNDICE D

## CURVAS ROC ADAPTADAS E AUC CALCULADOS

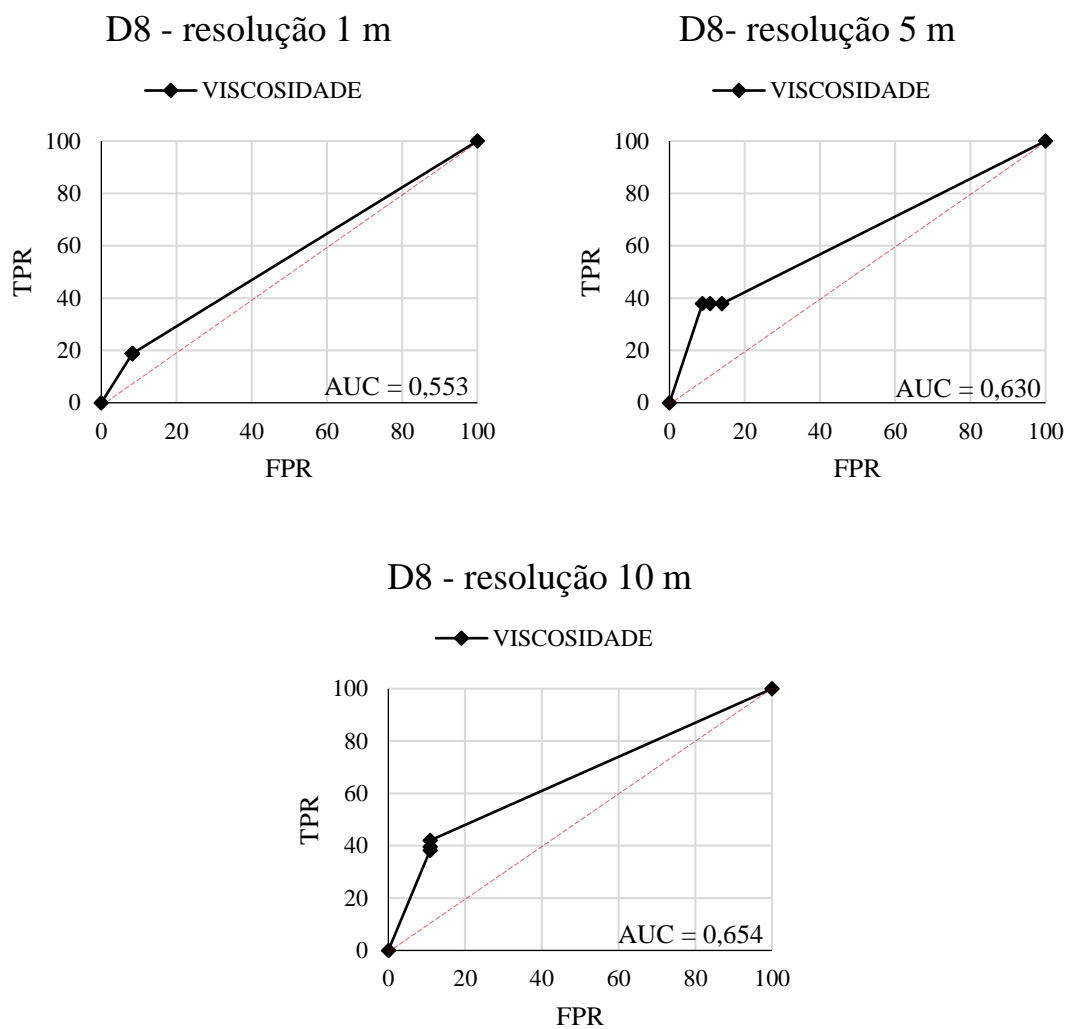


Figura 70. Curvas ROC adaptadas – D8 para diferentes resoluções

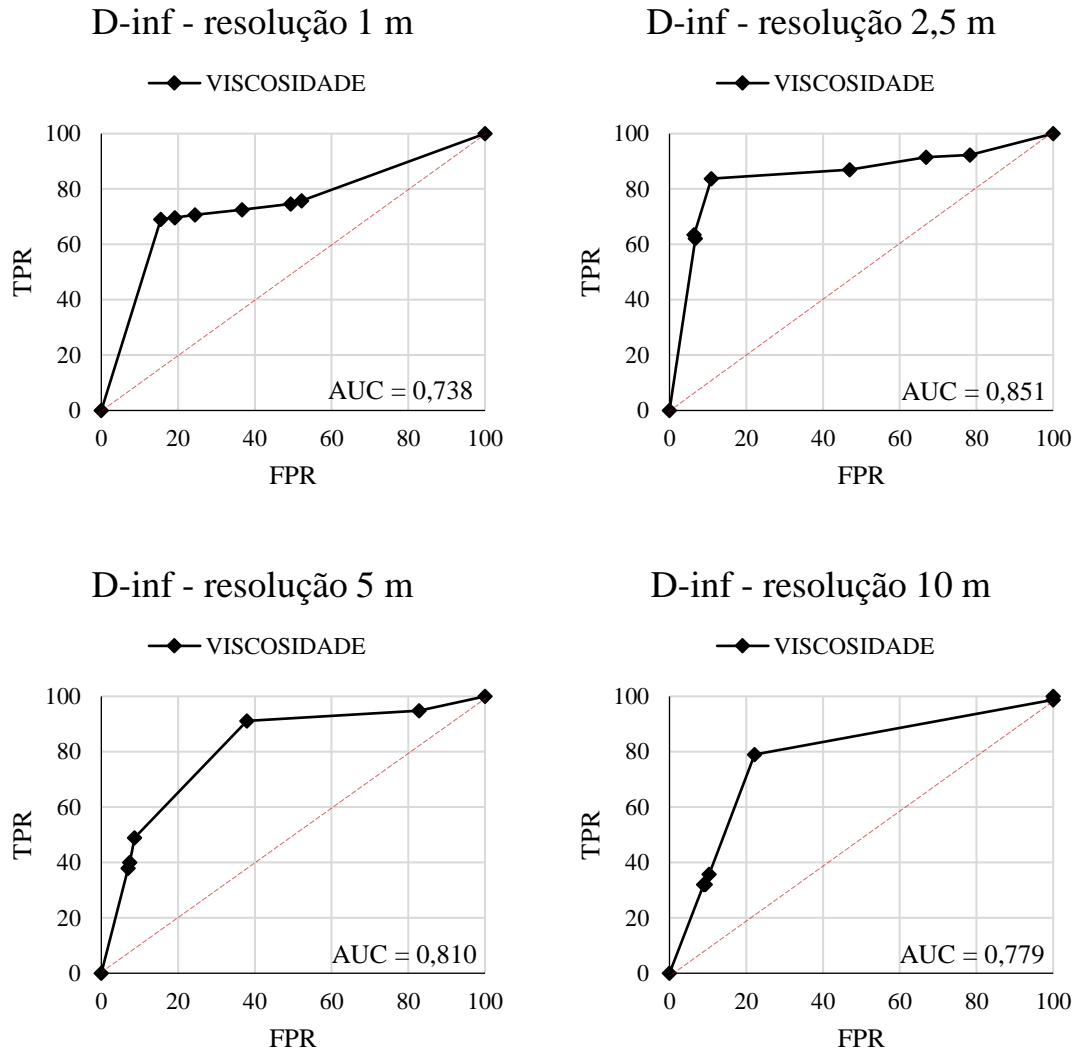


Figura 71. Curvas ROC adaptadas – D-inf para diferentes resoluções

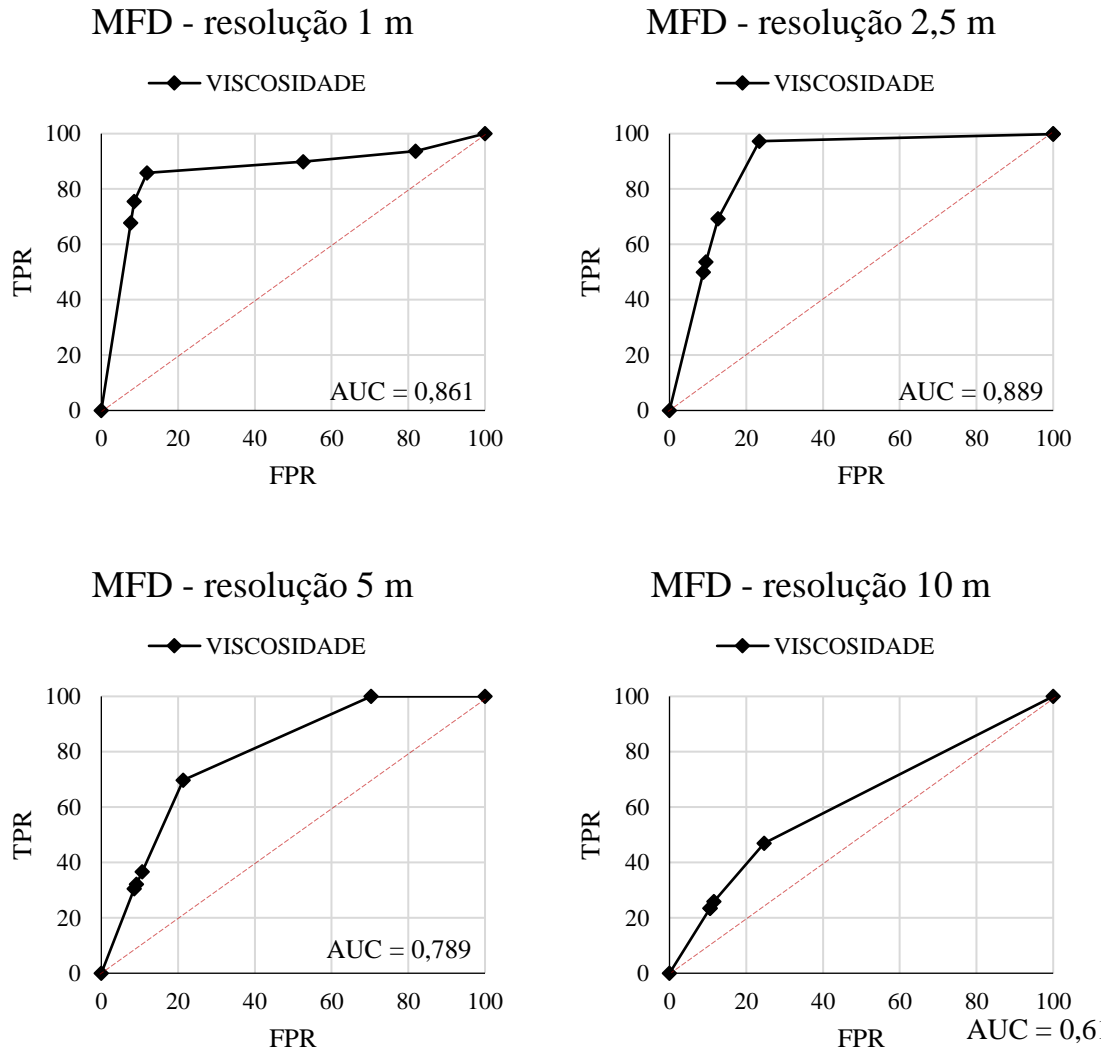


Figura 72. Curvas ROC adaptadas – MFD para diferentes resoluções

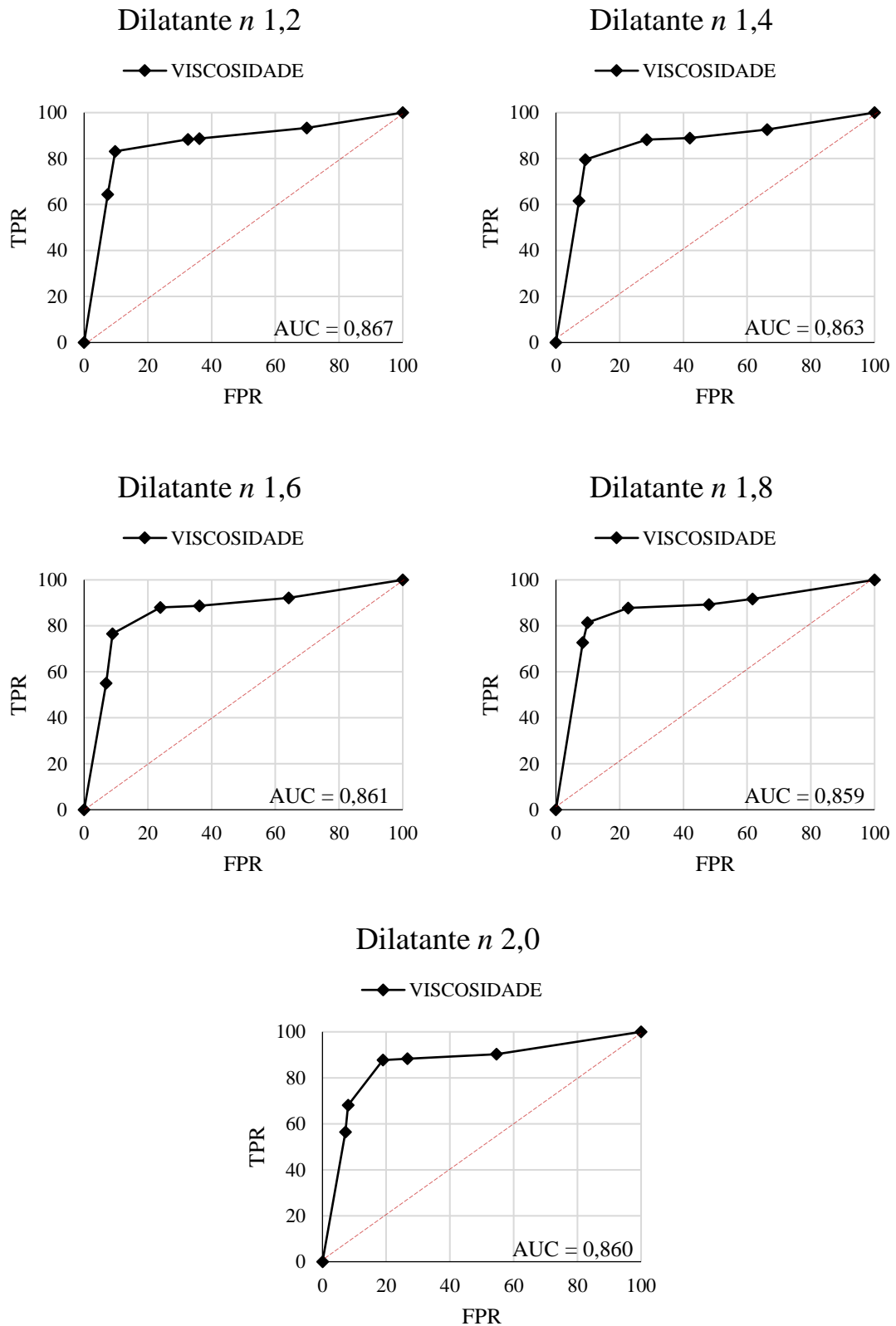


Figura 73. Curvas ROC adaptadas – Dilatante com diferentes valores de  $n$

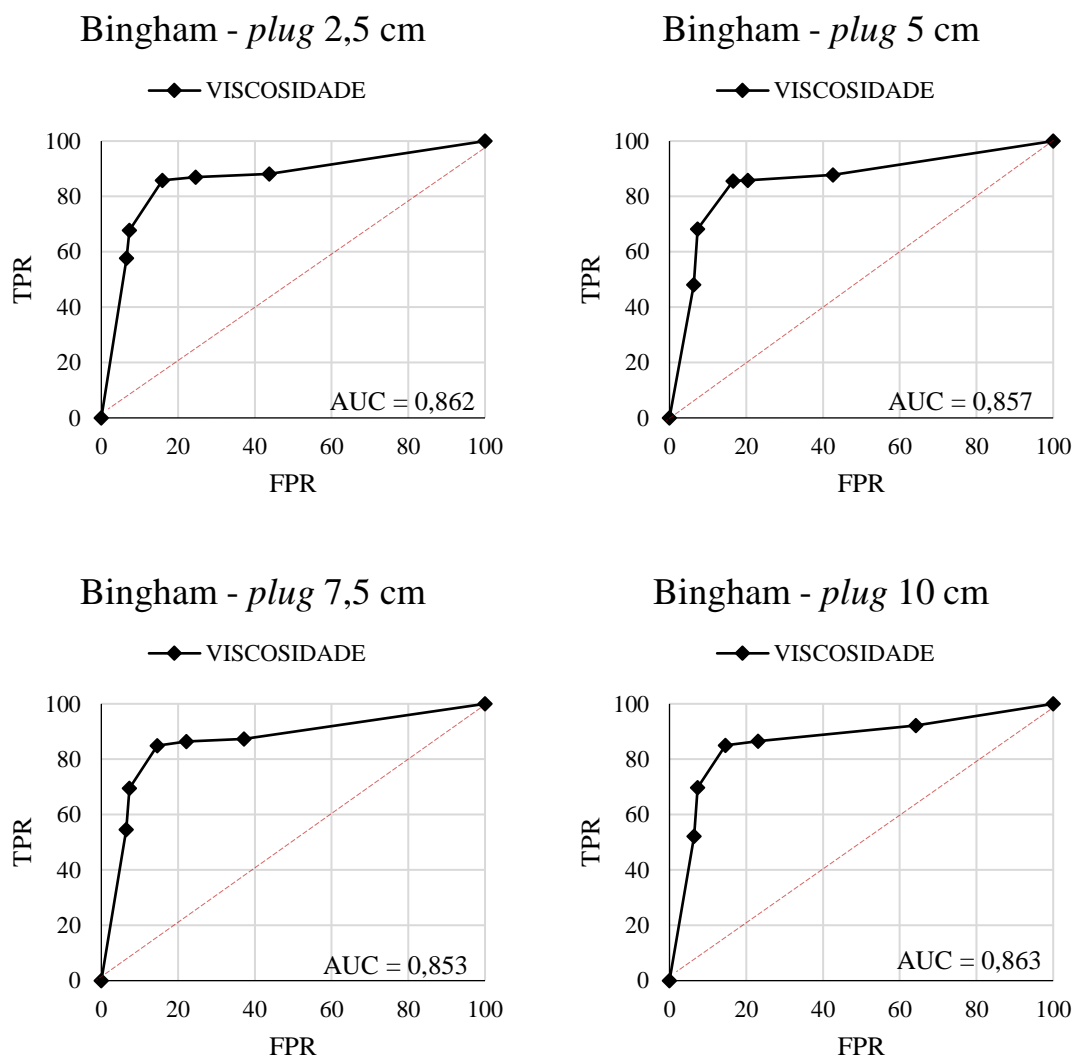


Figura 74. Curvas ROC adaptadas – Bingham com diferentes alturas de *plug*

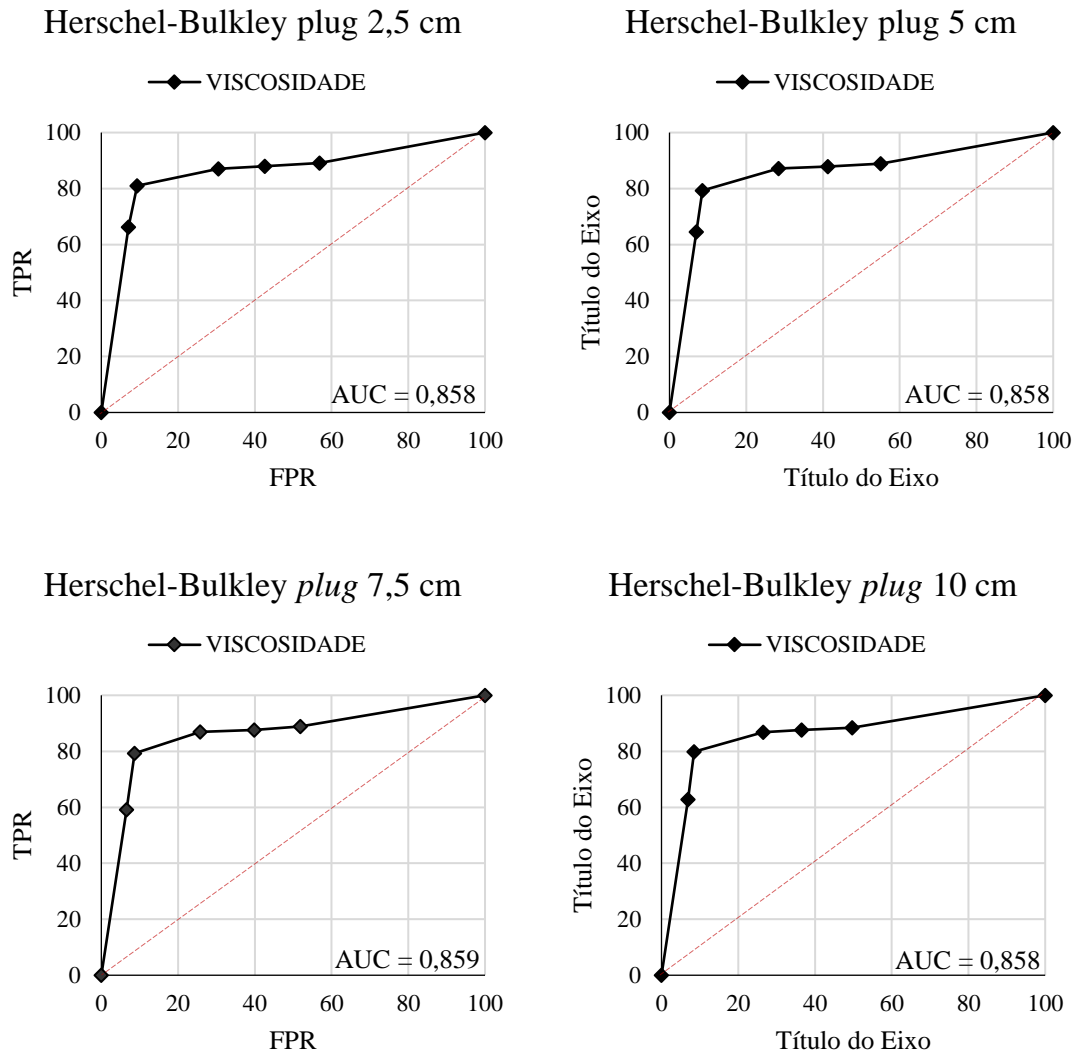


Figura 75. Curvas ROC adaptadas – Herschel-Bulkley com  $m$  de 0,6



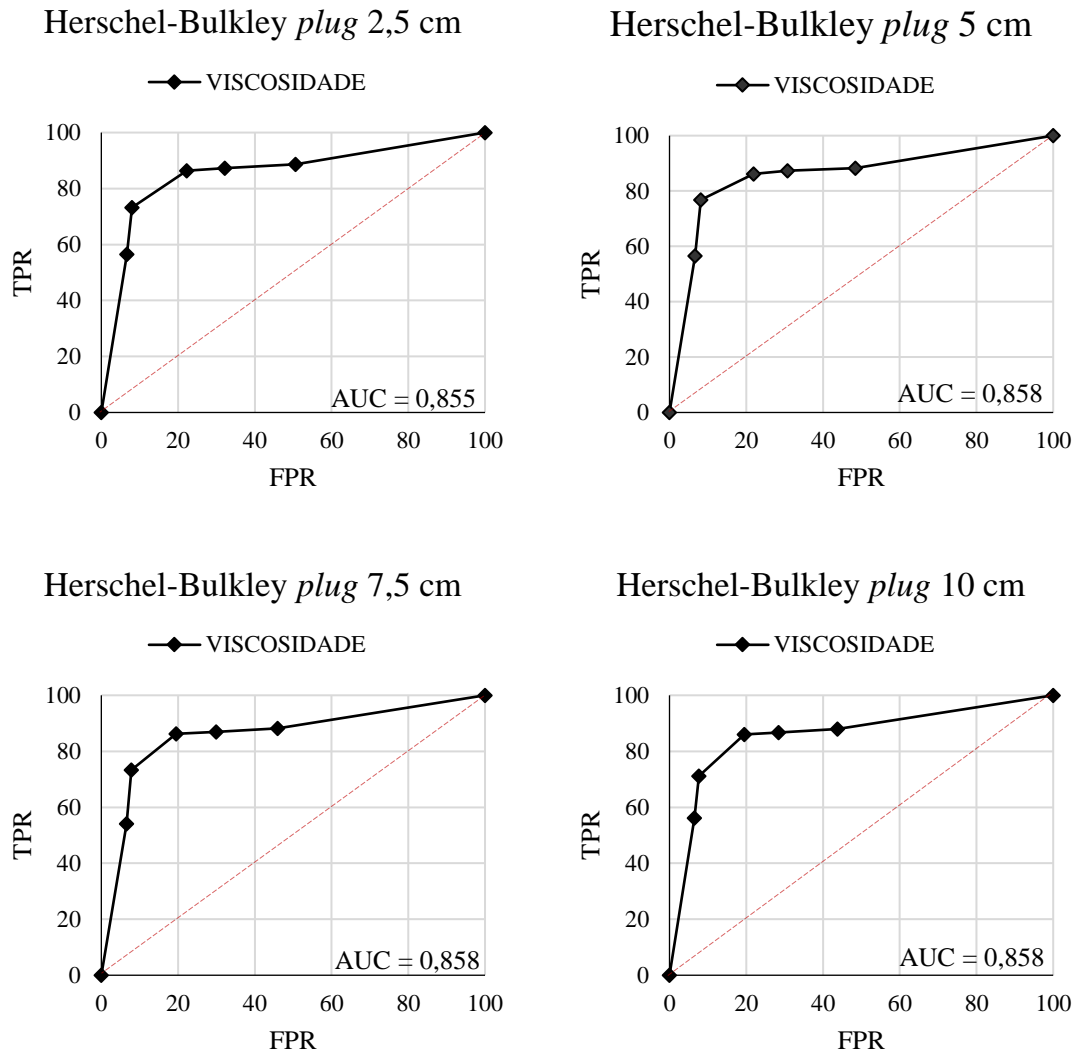


Figura 76. Curvas ROC adaptadas – Herschel-Bulkley com  $m$  de 0,8

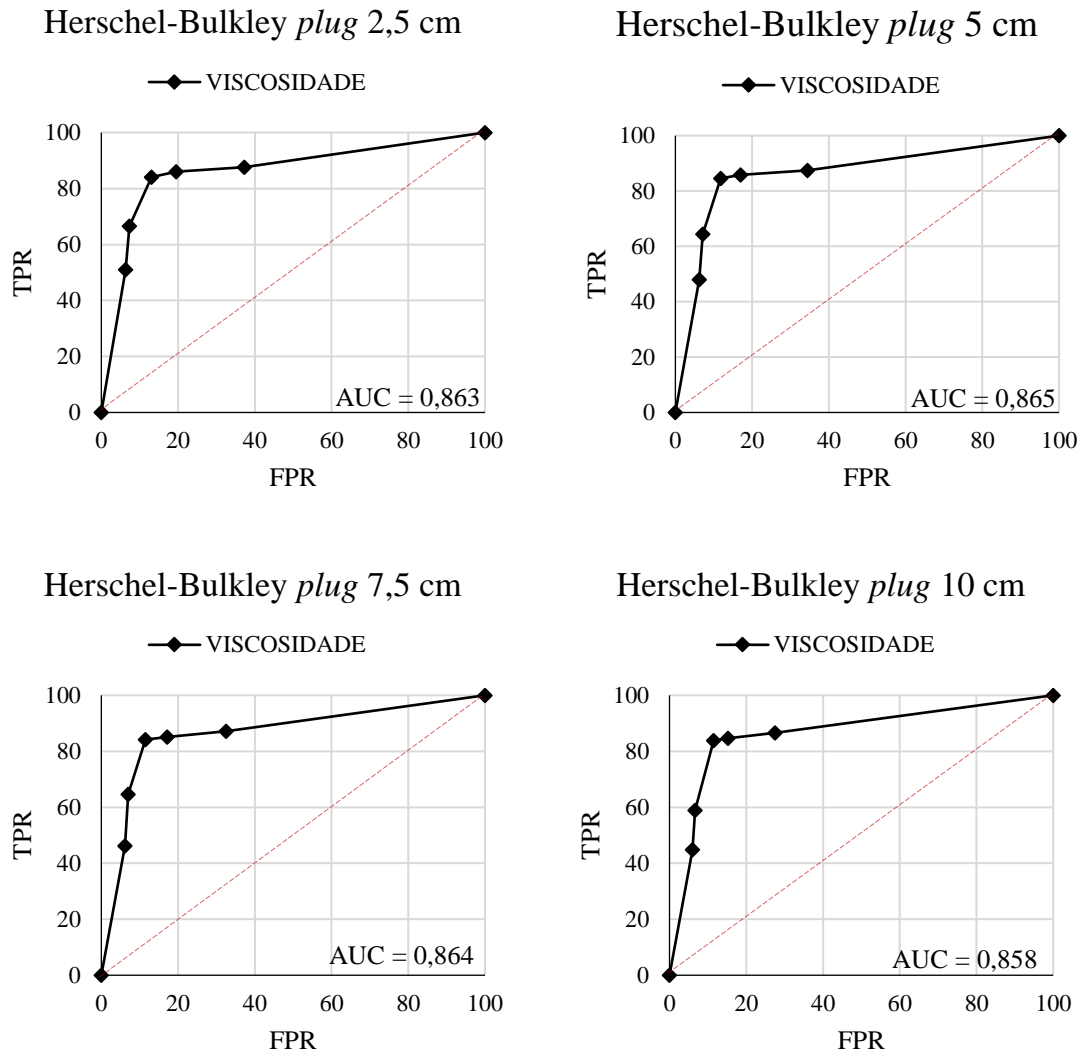


Figura 77. Curvas ROC adaptadas – Herschel-Bulkley com  $m$  de 1,2

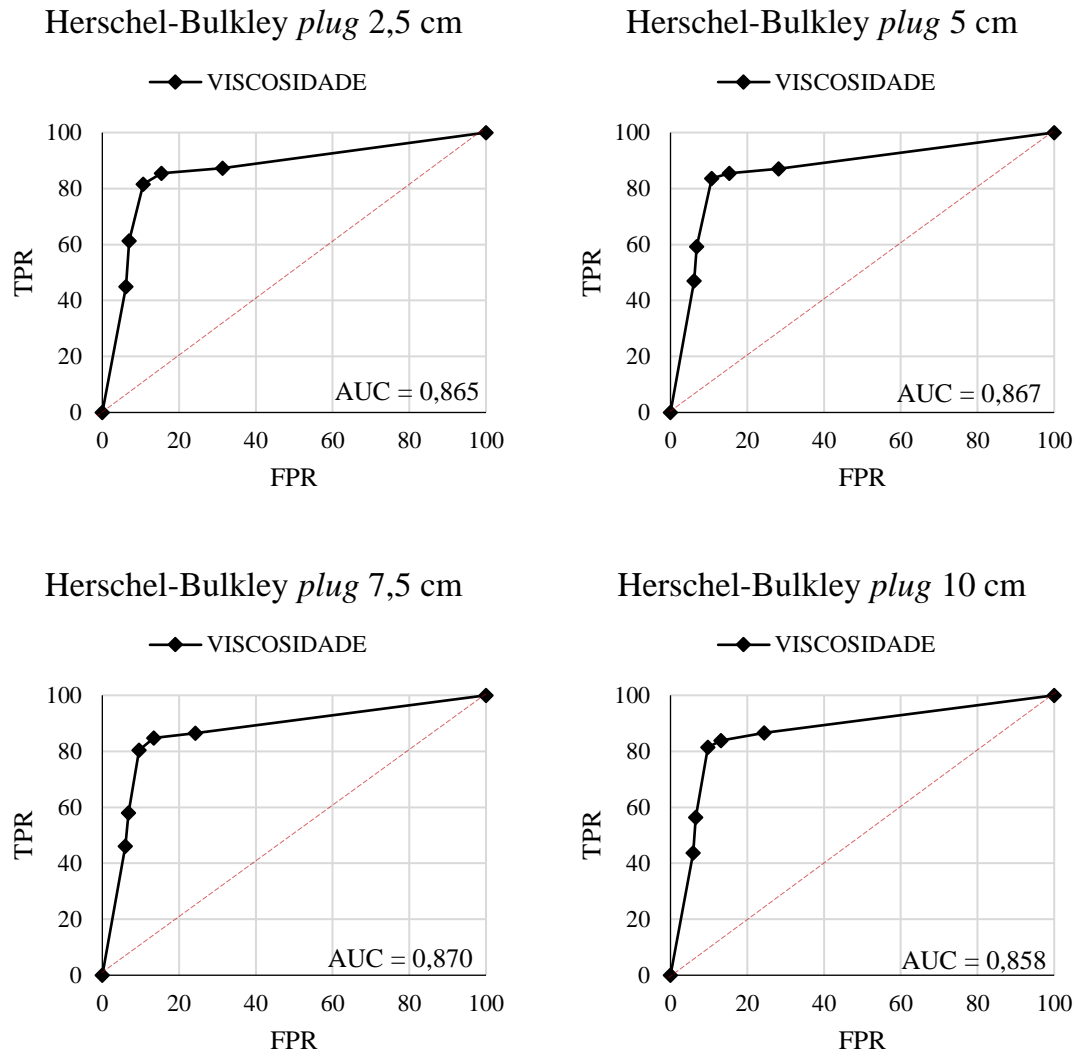


Figura 78. Curvas ROC adaptadas – Herschel-Bulkley com  $m$  de 1,4

## APÊNDICE E

### ALGORITMO UTILIZADO

Programado em Python 3.7.x

```

import os.path
import numpy as np
import gdal
import warnings
import multiprocessing as mp

# Prompted inputs:

while True: # Assigns different viscosity values to calibration areas in a dictionary
    c_ar = int(input("Enter the number of calibration areas: \n"))
    zone_list = range(1, c_ar + 1)
    zone_vis = []
    area_list = []
    if c_ar > 1:
        for _ in zone_list:
            area_name = "area_" + format(_)
            vis = float(input("Enter fluid cinematic viscosity number for " + area_name + " " + "[N.s/m2]: \n"))
            zone_vis.append(int(vis))
            area_list.append(area_name)
        # print(zone_vis)
        break
    elif c_ar == 1:
        vis = float(input("Enter fluid cinematic viscosity number for [N.s/m2]: \n"))
        break
    else:
        print("Invalid input. Integer value >= 1 expected \n")

# These variables are common to all calibration areas
dem = input("Enter path to DEM file - e.g.: C:/DEM.tif:\n")
slp = input("Enter path to SLOPE file in degrees - e.g.: C:/SLOPE.tif:\n")

while True: # Allows to choose between fdr methods
    fdr_ar = input("Enter the desired fdr method (currently available: d8, dinf, mfd): \n")
    if fdr_ar == 'd8':

```

```

    fdr = input("Enter path to FLOW DIRECTION file - e.g.: C:/FDR.tif:\n")
    break
elif fdr_ar == 'dinf':
    fdr = input("Enter path to FLOW DIRECTION file - e.g.: C:/FDR.tif:\n")
    break
elif fdr_ar == 'mfd':
    break
else:
    print("Invalid input, try \"d8\", \"dinf\", or \"mfd\" \n")

if fdr_ar == 'd8':
    fdr = gdal.Open(fdr)
    fdr = fdr.ReadAsArray()
    fdr = fdr.astype('float32')
elif fdr_ar == 'dinf':
    fdr = gdal.Open(fdr)
    fdr = fdr.ReadAsArray()
    fdr[:, 0:2] = -9999
    fdr[:, fdr.shape[1] - 2: fdr.shape[1]] = -9999
    fdr[0:2] = -9999
    fdr[fdr.shape[0]-2:fdr.shape[0]] = -9999
    if not np.any(fdr > np.pi):
        fdr = fdr * (180 / np.pi)
    spread = float(input("Enter minimum spread coefficient (0 - 1.0): \n"))
elif fdr_ar == 'mfd':
    n = float(input("Enter multiple flow direction 'n' factor (1 - 99). Lower values will cause more spreading: \n"))
else:
    pass

while True: # Allows to choose between different rheology
    rheo = input("Enter flow rheology (currently available: Newtonian (n), Bingham plastic (b), Herschel-
Bulkley(hb) "
                "and dilatant (d)): \n")
    if rheo == 'n':
        break
    elif rheo == 'b':
        z_plug = float(input("Enter plug height (z) in meters: \n "))

```

```

    m_hb = 1
    break
elif rheo == 'hb':
    z_plug = float(input("Enter plug height (z) in meters: \n"))
    m_hb = float(input("Enter flow behavior exponent value (m > 0): \n"))
    break
elif rheo == 'd':
    n_dil = float(input("Enter flow behavior exponent value (n > 1) \n"))
    break
else:
    print('Invalid input, try "n", "b", "hb" or "d" \n')

hin = input("Enter path to file indicating initiation areas and failure depths - e.g.: C:/HIN.tif: \n")
pxl = float(input("Enter pixel size in meters: \n "))
# TODO: auto recognition of pixel size
ts = float(input("Enter time step in seconds: \n"))
i_s = int(input("Enter number of iterations to save a flow velocity grid. Enter 0 if this information is not desired."
               "\n"))
max_dh = float(input("Enter maximum height difference in meters for stopping criteria:\n"))
# TODO: create an error message for invalid inputs with reprompt option | option to read inputs from a txt file

if c_ar > 1: # zone identification grid to relate different entries to different calibration areas
    zone_grid = input("Enter path to ZONE GRID - e.g.: C:/ZGRID.tif: \n")
    zone_grid = gdal.Open(zone_grid).ReadAsArray()
else:
    pass

def check_dimension(_dem, _fdr, _hin, _slp): # simple way to check if dimensions match, failure will interrupt
the code
    dim1 = [_dem.shape[0], _dem.shape[1]]
    dim2 = [_slp.shape[0], _slp.shape[1]]
    dim3 = [_fdr.shape[0], _fdr.shape[1]]
    dim4 = [_hin.shape[0], _hin.shape[1]]

    # coord1 = [_dem.bounds[0], _dem.bounds[1]]
    # coord2 = [_slp.bounds[0], _slp.bounds[1]]
    # coord3 = [_fdr.bounds[0], _fdr.bounds[1]]

```

```

# coord4 = [_hin.bounds[0], _hin.bounds[1]]

dim = [dim1, dim2, dim3, dim4]
# coord = [coord1, coord2, coord3, coord4] # TODO test coordinate checker
if dim.count(dim[0]) == len(dim): # and coord.count(coord[0]) == len(coord):
    print("Number of rows and columns from inputs matches. Starting calculations")
else:
    raise Exception("Number of rows and/or columns from inputs does not match")

def check_dimension_mfd(_dem, _hin, _slp): # mfd doesn't have a fdr grid
    dim1 = [_dem.shape[0], _dem.shape[1]]
    dim2 = [_slp.shape[0], _slp.shape[1]]
    dim4 = [_hin.shape[0], _hin.shape[1]]
    dim = [dim1, dim2, dim4]
    # coord = [coord1, coord2, coord3, coord4] # TODO test coordinate checker
    if dim.count(dim[0]) == len(dim): # and coord.count(coord[0]) == len(coord):
        print("Number of rows and columns from inputs matches. Starting calculations")
    else:
        raise Exception("Number of rows and/or columns from inputs does not match")

# this first section is responsible for files opening and reading

height = gdal.Open(hin)
dem = gdal.Open(dem)
slp = gdal.Open(slp)

dem = dem.ReadAsArray()
dem = dem.astype('float32')
dem[dem == -9999] = 0.0001
dem[:, 0:2] = 0.0001
dem[:, dem.shape[1] - 2: dem.shape[1]] = 0.0001
dem[0:2] = 0.0001
dem[dem.shape[0]-2:dem.shape[0]] = 0.0001

slp = slp.ReadAsArray()
slp = slp.astype('float32')
slp[slp == -9999] = 0
slp = np.sin(slp * np.pi / 180)

```

```

slp[:, 0:2] = 0
slp[:, slp.shape[1] - 2: slp.shape[1]] = 0
slp[0:2] = 0
slp[slp.shape[0]-2:slp.shape[0]] = 0

hin = height.ReadAsArray()
hin = hin.astype('float32')
hin[hin == -9999] = 0.0001
hin[hin == 0] = 0.0001
hin[:, 0:2] = 0.0001
hin[:, hin.shape[1] - 2: hin.shape[1]] = 0.0001
hin[0:2] = 0.0001
hin[hin.shape[0]-2:hin.shape[0]] = 0.0001
# with np.errstate(divide='ignore', invalid='ignore'):
#   hin = ((hin != -9999) / (
#       hin != -9999)) * hin # flag -9999 and by algebra turn it to a NaN - works only for floats

if fdr_ar == 'mfd':
    check_dimension_mfd(dem, hin, slp)
else:
    check_dimension(dem, fdr, hin, slp)

def get_grid(grid, row, column): # fetches a 3x3 window of data to perform analysis
    c_mid = grid.shape[1] - 1 > column > 0
    c_left = column - 1 < 0
    c_right = grid.shape[1] - 1 == column
    r_mid = grid.shape[0] - 1 > row > 0
    r_top = row - 1 < 0
    r_bot = grid.shape[0] - 1 == row
    if c_mid and r_mid:
        _grid = grid[row - 1:row + 2, column - 1:column + 2]
        return _grid
    elif r_top and c_mid:
        _grid = grid[row:row + 2, column - 1:column + 2]
        _grid = np.insert(_grid, 0, 0, axis=0)
        return _grid
    elif r_bot and c_mid:

```



```

    _grid = grid[row - 1:row + 1, column - 1:column + 2]
    _grid = np.insert(_grid, _grid.shape[0], 0, axis=0)
    return _grid
elif c_left and r_mid:
    _grid = grid[row - 1:row + 2, column:column + 2]
    _grid = np.insert(_grid, 0, 0, axis=1)
    return _grid
elif c_right and r_mid:
    _grid = grid[row - 1:row + 2, column - 1:column + 1]
    _grid = np.insert(_grid, _grid.shape[1], 0, axis=1)
    return _grid
elif c_right and r_top:
    _grid = grid[row:row + 2, column - 1: column + 1]
    _grid = np.insert(_grid, _grid.shape[0], 0, axis=1)
    _grid = np.insert(_grid, 0, 0, axis=0)
    return _grid
elif c_right and r_bot:
    _grid = grid[row - 1:row + 1, column - 1: column + 1]
    _grid = np.insert(_grid, _grid.shape[1], 0, axis=1)
    _grid = np.insert(_grid, _grid.shape[0], 0, axis=0)
    return _grid
elif c_left and r_top:
    _grid = grid[row:row + 2, column:column + 2]
    _grid = np.insert(_grid, 0, 0, axis=1)
    _grid = np.insert(_grid, 0, 0, axis=0)
    return _grid
elif c_left and r_bot:
    _grid = grid[row - 1:row + 1, column:column + 2]
    _grid = np.insert(_grid, 0, 0, axis=1)
    _grid = np.insert(_grid, _grid.shape[0], 0, axis=0)
    return _grid
else:
    raise Exception("Oops! Something went wrong!\n Cause: get_grid function failed required conditions")

```

class Zones:

```

# Class to assign different parameters to different areas in a DEM
def __init__(self, a, s, d, v, h):
    self.viscosity = float(v)

```

```

self.flow_height = float(h)
self.flow_direction = float(d)
self.slope = float(s)
self.altitude = float(a)

# def calc_outflow(self): # calculates profile mean velocity and outflow
#     q_out = float(px1*(self.flow_height**2)/(3*self.viscosity))
#     return q_out

# def calc_height(self, inflow, outflow):
#     q_in = inflow
#     q_out = outflow
#     self.flow_height += (ts/px1)*(q_in - q_out)
#     return self.flow_height

'''
This section contains a simple approach to calculate multiple flow directions from Freeman (1991)
'''

def mfd_slope(dem_grid, pxl):
    mfd_slp = np.empty((dem_grid.shape[0], dem_grid.shape[1], 9))
    img_h = dem.shape[0]
    img_w = dem.shape[1]
    diag = 2 * (2*((pxl / 2) ** 2)) ** 1 / 2
    non_diag = pxl
    for row_i in range(0, img_h):
        for col_j in range(0, img_w):
            if dem[row_i, col_j] == 0.0001 or dem[row_i, col_j] == -9999:
                mfd_slp[row_i, col_j] = np.array([0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0])
            else:
                aux_grid = get_grid(dem, row_i, col_j)
                mfd_slp[row_i, col_j] = np.array([(- aux_grid[0, 0] + aux_grid[1, 1]) / diag,
                                                (- aux_grid[0, 1] + aux_grid[1, 1]) / non_diag,
                                                (- aux_grid[0, 2] + aux_grid[1, 1]) / diag,
                                                (- aux_grid[1, 0] + aux_grid[1, 1]) / non_diag,
                                                0,
                                                (- aux_grid[1, 2] + aux_grid[1, 1]) / non_diag,

```

```

        (- aux_grid[2, 0] + aux_grid[1, 1]) / diag,
        (- aux_grid[2, 1] + aux_grid[1, 1]) / non_diag,
        (- aux_grid[2, 2] + aux_grid[1, 1]) / diag])
    mfd_slp[row_i, col_j] = np.where(mfd_slp[row_i, col_j] < 0, 0, mfd_slp[row_i, col_j])
return mfd_slp

```

def mfd\_fractions(mfd\_slp, n\_factor): # fractions are based on Freeman's formulae, then they're normalized with min/max

```

n = n_factor
img_h = dem.shape[0]
img_w = dem.shape[1]
for row_i in range(0, img_h):
    for col_j in range(0, img_w):
        frac = mfd_slp[row_i, col_j]
        p1, p2, p3, p4, p5, p6, p7, p8 = frac[0], frac[1], frac[2], frac[3], frac[5], frac[6], frac[7], frac[8]
        f1 = (p2 ** n + p3 ** n + p4 ** n + p5 ** n + p6 ** n + p7 ** n + p8 ** n)
        if f1 == 0:
            d1 = p1 ** n
        else:
            d1 = (p1 ** n) / f1
        f2 = (p1 ** n + p3 ** n + p4 ** n + p5 ** n + p6 ** n + p7 ** n + p8 ** n)
        if f2 == 0:
            d2 = p2 ** n
        else:
            d2 = (p2 ** n) / f2
        f3 = (p2 ** n + p1 ** n + p4 ** n + p5 ** n + p6 ** n + p7 ** n + p8 ** n)
        if f3 == 0:
            d3 = p3 ** n
        else:
            d3 = (p3 ** n) / f3
        f4 = (p2 ** n + p3 ** n + p1 ** n + p5 ** n + p6 ** n + p7 ** n + p8 ** n)
        if f4 == 0:
            d4 = p4 ** n
        else:
            d4 = (p4 ** n) / f4
        f5 = (p2 ** n + p3 ** n + p4 ** n + p1 ** n + p6 ** n + p7 ** n + p8 ** n)
        if f5 == 0:
            d5 = p5 ** n

```

```

else:
    d5 = (p5 ** n) / f5
f6 = (p2 ** n + p3 ** n + p4 ** n + p5 ** n + p1 ** n + p7 ** n + p8 ** n)
if f6 == 0:
    d6 = p6 ** n
else:
    d6 = (p6 ** n) / f6
f7 = (p2 ** n + p3 ** n + p4 ** n + p5 ** n + p6 ** n + p1 ** n + p8 ** n)
if f7 == 0:
    d7 = p7 ** n
else:
    d7 = (p7 ** n) / f7
f8 = (p2 ** n + p3 ** n + p4 ** n + p5 ** n + p6 ** n + p7 ** n + p1 ** n)
if f8 == 0:
    d8 = p8 ** n
else:
    d8 = (p8 ** n) / f8
frac = np.array([d1, d2, d3, d4, 0, d5, d6, d7, d8])
sum = np.sum(frac)
if sum > 0:
    frac = frac/sum
else:
    frac[:] = 0
    print('Cell ' + '(' + str(row_i) + ', ' + str(col_j) +
          ') is flat, has no downslope direction or is no_data')
frac = np.where(frac < 0.0001, 0, frac)
mfd_slp[row_i, col_j] = frac
return mfd_slp

```

'''

This function calculates the fractions of flow towards each cell of a grid; each cell of the result contains a 3x3 grid with the fractions located on the direction of the flow. This format was chosen to also match the output of a Multiple Flow Direction (MFD) algorithm.

'''

```
def dinf_f1(a1, a2): # cell contribution for deterministic infinity method
```

```
    f1 = a2 / (a1 + a2)
```

```
return f1
```

```
def dinf_f2(a1, a2):
```

```
    f2 = a1 / (a1 + a2)
```

```
    return f2
```

```
def dinf_fractions(fdr_grid, spread): # calculates contribution to each neighbor pixel
```

```
    fdr_inf = fdr_grid
```

```
    fdr_h = fdr_inf.shape[0]
```

```
    fdr_w = fdr_inf.shape[1]
```

```
    dinf = np.empty((fdr_grid.shape[0], fdr_grid.shape[1], 9))
```

```
    for row_i in range(0, fdr_h):
```

```
        for col_j in range(0, fdr_w):
```

```
            angle = fdr_inf[row_i, col_j]
```

```
            if 45 > angle >= 0:
```

```
                a1 = angle
```

```
                a2 = 45 - angle
```

```
                f1 = dinf_f1(a1, a2)
```

```
                f2 = dinf_f2(a1, a2)
```

```
                dinf[row_i, col_j] = np.array([0, 0, f2, 0, 0, f1, 0, 0, 0])
```

```
            elif 90 > angle >= 45:
```

```
                a1 = angle - 45
```

```
                a2 = 90 - angle
```

```
                f1 = dinf_f1(a1, a2)
```

```
                f2 = dinf_f2(a1, a2)
```

```
                dinf[row_i, col_j] = np.array([0, f2, f1, 0, 0, 0, 0, 0, 0])
```

```
            elif 135 > angle >= 90:
```

```
                a1 = angle - 90
```

```
                a2 = 135 - angle
```

```
                f1 = dinf_f1(a1, a2)
```

```
                f2 = dinf_f2(a1, a2)
```

```
                dinf[row_i, col_j] = np.array([f2, f1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0])
```

```
            elif 180 > angle >= 135:
```

```
                a1 = angle - 135
```

```
                a2 = 180 - angle
```

```
                f1 = dinf_f1(a1, a2)
```

```
                f2 = dinf_f2(a1, a2)
```

```

    dinf[row_i, col_j] = np.array([f1, 0, 0, f2, 0, 0, 0, 0])
elif 225 > angle >= 180:
    a1 = angle - 180
    a2 = 225 - angle
    f1 = dinf_f1(a1, a2)
    f2 = dinf_f2(a1, a2)
    dinf[row_i, col_j] = np.array([[0, 0, 0, f1, 0, 0, f2, 0]])
elif 270 > angle >= 225:
    a1 = angle - 225
    a2 = 270 - angle
    f1 = dinf_f1(a1, a2)
    f2 = dinf_f2(a1, a2)
    dinf[row_i, col_j] = np.array([[0, 0, 0, 0, 0, 0, f1, f2]])
elif 315 > angle >= 270:
    a1 = angle - 270
    a2 = 315 - angle
    f1 = dinf_f1(a1, a2)
    f2 = dinf_f2(a1, a2)
    dinf[row_i, col_j] = np.array([[0, 0, 0, 0, 0, 0, f1, f2]])
elif 360 >= angle >= 315:
    a1 = angle - 315
    a2 = 360 - angle
    f1 = dinf_f1(a1, a2)
    f2 = dinf_f2(a1, a2)
    dinf[row_i, col_j] = np.array([[0, 0, 0, 0, 0, f2, 0, 0, f1]])
else:
    pass
if spread > 0:
    if np.any((dinf[row_i, col_j] <= spread)):
        dinf[row_i, col_j] = np.where(dinf[row_i, col_j] <= spread, 0, dinf[row_i, col_j])
        dinf[row_i, col_j] = np.where(dinf[row_i, col_j] >= spread, 1, dinf[row_i, col_j])
return dinf

def d8_inflow(fdr_grid, q_grid): # if fdr points towards the center cell, it will sum flow values from q_grid
    f = fdr_grid
    q = q_grid
    _dir = np.array([[2, 4, 8],
                    [1, -99999, 16],

```

```

        [128, 64, 32]],
        int)
    inflow = np.nansum(q[f == _dir])
    return inflow

'''

def param_dist(zone_viscosity): # create objects to each zone and assigns to a list
    obj_list = []
    zv = zone_viscosity
    _ = 0
    for _ in zv:
        obj_list.append(Zones(dem, slp, fdr, _, hin))
    return obj_list
'''

def calc_height(local_h, inflow, outflow):
    q_in = inflow
    q_out = outflow
    flow_height = local_h + (ts / pxl) * (q_in - q_out)
    return flow_height

def dinf_inflow_pointer(fdr_grid): # fetch contributions from pixels
    fdr_inf = fdr_grid
    right = fdr_inf[1, 2, 3]
    ur = fdr_inf[0, 2, 6]
    up = fdr_inf[0, 1, 7]
    ul = fdr_inf[0, 0, 8]
    left = fdr_inf[1, 0, 5]
    dl = fdr_inf[2, 0, 2]
    down = fdr_inf[2, 1, 1]
    dr = fdr_inf[2, 2, 0]
    return right, ur, up, ul, left, dl, down, dr

def dinf_inflow(right, ur, up, ul, left, dl, down, dr, q_grid): # calculates flow partition to both cells
    cont1 = right * q_grid[1, 2]

```

```

cont2 = ur * q_grid[0, 2]
cont3 = up * q_grid[0, 1]
cont4 = ul * q_grid[0, 0]
cont5 = left * q_grid[1, 0]
cont6 = dl * q_grid[2, 0]
cont7 = down * q_grid[2, 1]
cont8 = dr * q_grid[2, 2]
inflow = np.round((cont1 + cont2 + cont3 + cont4 + cont5 + cont6 + cont7 + cont8), decimals=4)
return inflow

```

```

def d8_height(fdr_grid, q_grid, pxl_h0):
    f = fdr_grid
    _inflow = d8_inflow(f, q_grid)
    _outflow = q_grid[1, 1]
    _h = calc_height(pxl_h0, _inflow, _outflow)
    return _h

```

```

def dinf_height(fdr_grid, q_grid, pxl_h0):
    f = fdr_grid
    right, ur, up, lr, left, dl, down, dr = dinf_inflow_pointer(f)
    _inflow = dinf_inflow(right, ur, up, lr, left, dl, down, dr, q_grid)
    _outflow = q_grid[1, 1]
    _h = calc_height(pxl_h0, _inflow, _outflow)
    return _h

```

```

def qout_newtonian(flow_height, viscosity, slp_grid): # calculates profile mean velocity and outflow
    flow_height = np.where(flow_height <= 0.0001, 0, flow_height)
    q_out = slp_grid * 9.806 * (flow_height ** 3) / (3 * viscosity)
    q_out = np.where(q_out * ts > flow_height * pxl, flow_height * pxl / ts, q_out)
    return q_out

```

```

def qout_dil(flow_height, viscosity, slp_grid, par_n):
    n = par_n
    flow_height = np.where(flow_height <= 0.0001, 0, flow_height)
    q_out = flow_height * ((n / (n + 1)) *

```



```

        (((9.806 * flow_height ** (n + 1)) * slp_grid / viscosity) ** (1 / n)) * (1 - (n / (2 * n + 1))))
    q_out = np.where(q_out * ts > flow_height * pxl, flow_height * pxl / ts, q_out)
    return q_out

def qout_hb(flow_height, viscosity, slp_grid, par_m, z_plug): # will need unit weight of the mixture
    z = z_plug
    flow_height = np.where(flow_height <= z, z, flow_height)
    m = par_m
    q_out = flow_height * ((m / (m + 1)) *
        ((9.806 * (flow_height ** (m + 1)) * slp_grid / viscosity) ** (1 / m)) *
        (1 - (m / (2 * m + 1)))) * ((flow_height - z) / flow_height) * flow_height
    q_out = np.where(q_out * ts > flow_height * pxl, flow_height * pxl / ts, q_out)
    return q_out

''' this section will be useful when calibration areas are implemented
if c_ar > 1:
    zone_list = param_dist(zone_vis)
else:
    zone_list = Zones(dem, slp, fdr, vis, hin)
'''

'''

The first section of the code defines most functions needed for calculations. Further commands define the model
behavior
'''

def d8_method(hin, fdr, max_dh, vis, slp, i_s): # calculates flow propagation through D8
    h0 = hin
    h1 = np.full(hin.shape, 0.0001, dtype=float)
    dh = float(1.0) # arbitrary value to ensure "while" condition is met
    iter = 0
    img_h = hin.shape[0]
    img_w = hin.shape[1]
    k = 0
    u = []
    while np.nanmax(dh) > max_dh:

```

```

# outer loop defines stop criteria and calculates the height difference between time steps
with warnings.catch_warnings():
    warnings.simplefilter("ignore")
    if rheo == 'n':
        q0 = qout_newtonian(h0, vis, slp)
    elif rheo == 'b' or rheo == 'hb':
        q0 = qout_hb(h0, vis, slp, m_hb, z_plug)
    elif rheo == 'd':
        q0 = qout_dil(h0, vis, slp, n_dil)
h1[:] = 0.0001
iter += 1
print('Calculation step ' + str(iter))
for row_i in range(0, img_h):
    for col_j in range(0, img_w):
        # inner loop calculates the new height for each cell
        if not np.any(get_grid(h0, row_i, col_j) != 0.0001):
            pass
        else:
            h1[row_i, col_j] = d8_height(
                get_grid(fdr, row_i, col_j),
                get_grid(q0, row_i, col_j),
                h0[row_i, col_j]
            )
if iter - k == i_s:
    with warnings.catch_warnings():
        warnings.simplefilter("ignore")
        u_iter = np.round(q0 / h0, decimals=4)
        u_iter[u_iter == np.NaN] = -9999
    u.append(u_iter)
    k = iter
h_1 = np.nan_to_num(h1)
h_0 = np.nan_to_num(h0)
dh = h_1 - h_0
h0 = h1 * 1 # new initial height must be equal to h1 on subsequent calculations
h0[h0 == 0.0001] = -9999
h0[h0 == np.NaN] = -9999
h0 = np.round(h0, decimals=4)
time = str(iter * ts) + ' s'
tt = str(iter * ts) + ' until stoppage.'

```

```

print(tt)
return h0, time, u

```

```

def dinf_method(hin, max_dh, fdr, vis, slp, spread, i_s): # calculates flow propagation through deterministic
infinity
    h0 = hin
    h1 = np.full(hin.shape, 0, dtype=float)
    dh = float(1.0) # arbitrary value to ensure "while" condition is met
    iter = 0
    img_h = hin.shape[0]
    img_w = hin.shape[1]
    fdr_inf = fdr.astype(float)
    fdr_inf = dinf_fractions(fdr_inf, spread)
    u = []
    k = 0
    while np.nanmax(dh) > max_dh:
        # outer loop defines stop criteria and calculates the height difference between time steps
        if rheo == 'Newtoninan' or 'n' or 'newtonian':
            q0 = qout_newtonian(h0, vis, slp)
        elif rheo == 'Bingham' or 'Bingham plastic' or 'b' or 'bingham plastic' or 'hb' or 'Herschel-Bulkley':
            q0 = qout_hb(h0, vis, slp, m_hb, z_plug)
        elif rheo == 'd' or 'dilatant' or 'Dilatant':
            q0 = qout_dil(h0, vis, slp, n_dil)
        h1[:] = 0.0001
        iter += 1
        print('Calculation step ' + str(iter))
        for row_i in range(0, img_h):
            for col_j in range(0, img_w):
                if not np.any(get_grid(h0, row_i, col_j) != 0.0001):
                    pass
                else:
                    h1[row_i, col_j] = dinf_height(
                        get_grid(fdr_inf, row_i, col_j),
                        get_grid(q0, row_i, col_j),
                        h0[row_i, col_j]
                    )
            )
        if iter - k == i_s:
            with warnings.catch_warnings():

```

```

warnings.simplefilter("ignore")
u_iter = np.round(q0 / h0, decimals=4)
u_iter[u_iter == np.NaN] = -9999
u.append(u_iter)
k = iter
h_1 = np.nan_to_num(h1)
h_0 = np.nan_to_num(h0)
dh = h_1 - h_0
h0 = h1 * 1
h0[h0 == 0.0001] = -9999
h0[h0 == np.NaN] = -9999
h0 = np.round(h0, decimals=4)
time = str(iter * ts) + ' s'
tt = str(iter * ts) + ' until stoppage.'
print(tt)
return h0, time, u

```

def mfd\_method(hin, max\_dh, dem, vis, slp, n, i\_s): # calculates flow propagation through deterministic infinity

```

h0 = hin
h1 = np.empty(hin.shape, dtype=float)
dh = float(1.0) # arbitrary value to ensure "while" condition is met
iter = 0
img_h = hin.shape[0]
img_w = hin.shape[1]
fdr_mfd = mfd_slope(dem, pxl)
fdr_mfd = mfd_fractions(fdr_mfd, n)
u = []
k = 0
print('Multiple flow direction calculated. Starting simulation.')
while np.nanmax(dh) > max_dh:
    # outer loop defines stop criteria and calculates the height difference between time steps
    with warnings.catch_warnings():
        warnings.simplefilter("ignore")
        if rheo == 'Newtonian' or rheo == 'n' or rheo == 'newtonian':
            q0 = qout_newtonian(h0, vis, slp)
        elif rheo == 'Bingham' or rheo == 'Bingham plastic' or rheo == 'b' or rheo == 'bingham plastic' \
            or rheo == 'hb' or rheo == 'Herschel-Bulkley':
            q0 = qout_hb(h0, vis, slp, m_hb, z_plug)

```

```

elif rheo == 'd' or rheo == 'dilatant' or rheo == 'Dilatant':
    q0 = qout_dil(h0, vis, slp, n_dil)
    h1[:] = 0.0001
    iter += 1
    print('Calculation step ' + str(iter))
    for row_i in range(0, img_h):
        for col_j in range(0, img_w):
            if not np.any(get_grid(h0, row_i, col_j) != 0.0001):
                pass
            else:
                h1[row_i, col_j] = dinf_height(
                    get_grid(fdr_mfd, row_i, col_j),
                    get_grid(q0, row_i, col_j),
                    h0[row_i, col_j]
                )
    h_1 = np.nan_to_num(h1)
    h_0 = np.nan_to_num(h0)
    dh = h_1 - h_0
    h0 = h1 * 1
    if iter - k == i_s:
        with warnings.catch_warnings():
            warnings.simplefilter("ignore")
            u_iter = np.round(q0 / h0, decimals=4)
            u_iter[u_iter == np.NaN] = -9999
        u.append(u_iter)
        k = iter
    h0[h0 == 0.0001] = -9999
    h0[h0 == np.NaN] = -9999
    h0 = np.round(h0, decimals=4)
    time = str(iter * ts) + ' s'
    tt = str(iter * ts) + ' until stoppage.'
    print(tt)
    return h0, time, u

if fdr_ar == 'd8':
    output, total_time, vel = d8_method(hin, fdr, max_dh, vis, slp, i_s)
elif fdr_ar == 'dinf':
    output, total_time, vel = dinf_method(hin, max_dh, fdr, vis, slp, spread, i_s)

```

```

elif fdr_ar == 'mfd':
    output, total_time, vel = mfd_method(hin, max_dh, dem, vis, slp, n, i_s)

directory = os.getcwd()
os.makedirs(directory + '/results', exist_ok=True)
gt = height.GetGeoTransform()
projection = height.GetProjection()
nrows = output.shape[0]
ncols = output.shape[1]
driver = gdal.GetDriverByName('GTiff')
output_name = str(fdr_ar) + 'res' + str(pxl) + 'v' + str(vis) + 't' \
    + str(ts) + 'h' + str(max_dh) + 'tt' + str(total_time) + str(rheo) + ".tiff"
dataset = driver.Create(output_name, ncols, nrows, 1, gdal.GDT_Float32)
dataset.GetRasterBand(1).WriteArray(output)
dataset.SetGeoTransform(gt)
dataset.SetProjection(projection)
dataset.FlushCache()
dataset = None

if i_s > 0:
    for item in range(0, len(vel)):
        vel_name = str(fdr_ar) + str(vis) + 't' + str(ts) + 'h' + str(max_dh) + 'u' + str(ts*i_s*(item+1)) + ".tiff"
        velocity = driver.Create(vel_name, ncols, nrows, 1, gdal.GDT_Float32)
        velocity.GetRasterBand(1).WriteArray(output)
        velocity.SetGeoTransform(gt)
        velocity.SetProjection(projection)
        velocity.FlushCache()

```

## APÊNDICE F

Tabela 82. Ocorrências de fluxo de detritos no Brasil

ANO	LOCAL	CHUVA (mm)	VOLUME (m <sup>3</sup> )
1928 <sup>a</sup>	Santos – SP	-	-
1948 <sup>a</sup>	Vale do Paraíba – SP/RJ	-	-
1956 <sup>a</sup>	Santos – SP	-	-
1966 <sup>a</sup>	Rio de Janeiro – RJ	-	-
1967	Serra das Araras - RJ	114/1h	10.000.000
1967	Caraguatatuba - SP	420/24h	7.600.000
1971 <sup>a</sup>	Viaduto IV, Ferrovia de Santos – SP	-	100.000
1971	Salvador – BA	-	-
1972	Campos do Jordão – SP	-	-
1974	Tubarão - SC	394/72h	-
1975	Maranguape - CE	140/24h	-
1975	Grota Funda - SP	-	1.000.000
1976	Rio Cachoeira, Cubatão - SP	40/1h - 276/24h	100.000
1976	Braço Norte, Cubatão - SP	276/24h	156.000
1986 <sup>a</sup>	Lavrinhas - SP	-	-
1988	Petrópolis - RJ	145/24h	-
1988 <sup>a</sup>	Cubatão – SP	-	-
1988 <sup>a</sup>	Rio de Janeiro – RJ	-	-
1989 <sup>a</sup>	Salvador - BA	-	-
1990 <sup>a</sup>	Blumenau - SC	-	-
1992	Contagem – MG	-	-
1994	Córrego das pedras, Cubatão - SP	60/1h	300.000
1995	Timbé do Sul - SC	500/1h	3.000.000
1996	Córrego das pedras, Cubatão - SP	-	16.000
1996	Estrada de Ubatuba - SP	10/10min-442/13h	-
1996	Morro do Quitite - RJ	202/24h	90.000
1996	Morro do Papagaio - RJ	-	42.000

1999	Via Anchieta km 42 - SP	128/24h	300.000
2000	Lavrinhas - SP	70/1h	1.600.000
2000 <sup>b</sup>	Arroio do Böni - RS	-	75.000
2000 <sup>c</sup>	Arroio Jaguar – RS	-	-
2001 <sup>a</sup>	Petrópolis – RJ	-	-
2008	Rio dos Cedros - SC	21,47/24h	55.920
2008	Rio dos Cedros - SC	21,47/24h	61.340
2008	Rio Cunha - SC	92,9/24h	-
2010	Angula dos Reis – RJ	-	-
2011	Córrego D'antas, Nova Friburgo - RJ	297/24h	10.275
2011	Caleme, Teresópolis - RJ	297/24h	4.264
2014 <sup>a</sup>	Itaóca – SP	-	-
2017 <sup>d</sup>	Bacia do rio Mascarada - RS	96-272/24h	-

<sup>a</sup> Kobiyama e Michel (2015)

<sup>b</sup> Paixão (2017)

<sup>c</sup> Michel (2015)

<sup>d</sup> Secretaria do Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (2017)