

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

Dissertação de mestrado

**ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MODELO DE FLUXOS DE DETRITOS -
KANAKO-2D**

MAURÍCIO ANDRADES PAIXÃO

Porto Alegre
Março 2017

Maurício Andrades Paixão

**ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MODELO DE FLUXOS DE DETRITOS -
KANAKO-2D**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

Orientador: Masato Kobiyama

Porto Alegre

Março de 2017

Maurício Andrades Paixão

**ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MODELO DE FLUXOS DE DETRITOS -
KANAKO-2D**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Fernando Mainardi Fan - UFRGS

Prof. Dr. Gean Paulo Michel - UFRGS

Prof. Dr. Marco Alésio Figueiredo Pereira – FEEVALE

Porto Alegre

Março de 2017

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, aos meus pais (José Fernando e Sônia) por todo o amor, carinho e ensinamentos ao longo da minha vida. Sou muito grato a vocês por tudo. O apoio de vocês foi fundamental para a realização de mais esta etapa. Aos meus irmãos, Diego e Vinícius, pelo incentivo constante e pela parceria de sempre.

À minha namorada, Joana, pelo amor e compreensão em todos os momentos da minha jornada acadêmica. Por entender, apoiar e participar dos trabalhos aos sábados, domingos e feriados no IPH neste último ano.

À Rafinha, minha sobrinha e afilhada, que ainda é pequena demais para compreender o quanto me dá lições de amor e de incentivo.

Aos meus amigos de sempre por estarem presentes em todos os momentos. Vocês são verdadeiros campeões.

Agradeço ao meu orientador Masato Kobiyama pelos ensinamentos, presteza e amizade ao longo desses últimos anos.

À família Boeni por toda a acolhida, hospitalidade e parceria nos trabalhos de campo. Este trabalho não seria possível sem esse apoio. Todo respeito à história desta família!

Aos colegas do GPDEN pelos ensinamentos e discussões.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas pela oportunidade de estudo.

Às camadas mais pobres da população que, com o suor de seus trabalhos, financiaram meus estudos. Retribuirei com meu trabalho e dedicação todo o investimento realizado.

“Aprendi que a coragem não é a ausência de medo mas o triunfo sobre ele. Senti medo mais vezes do que consigo recordar, mas escondi-o atrás de uma máscara de ousadia. O homem de coragem não é o que não sente medo, mas o que o vence”

-Nelson Mandela-

RESUMO

Por se tratar de um fenômeno complexo, a modelagem computacional tem sido utilizada na tentativa de simular o comportamento de fluxos de detritos. Um dos modelos computacionais é o Kanako-2D. O presente trabalho realizou análise de sensibilidade desse modelo em relação a alcance, área de erosão, área de deposição, área total atingida e largura do fluxo. Os valores dos parâmetros de entrada do Kanako-2D, cujas faixas de variação foram estabelecidas a partir de revisão bibliográfica, foram alterados individualmente enquanto os demais eram mantidos nos valores padrão do modelo. Os parâmetros analisados foram: diâmetro dos sedimentos, coeficiente de rugosidade de Manning, coeficiente de taxa de deposição, coeficiente de taxa de erosão, massa específica da fase fluida, massa específica do leito, concentração de sedimentos e ângulo de atrito interno. Foi utilizada uma vertente real com histórico de ocorrência de fluxos de detritos (bacia hidrográfica do arroio Böni, em Alto Feliz e São Vendelino/RS) e uma vertente hipotética com as mesmas características da vertente real para avaliar o efeito da topografia na propagação do fluxo. Também foram simuladas diferentes condições de terreno na propagação do fluxo de detritos. A sensibilidade do modelo foi quantificada a partir de três métodos: (a) análise por rastreamento, que indicou massa específica do leito, ângulo de atrito interno e concentração de sedimentos como os parâmetros que causam maior sensibilidade do modelo; (b) análise regional, indicando que os parâmetros massa específica do leito, ângulo de atrito interno e massa específica da fase fluida apresentaram maior sensibilidade do modelo; e (c) análise das variâncias, em que os parâmetros que mais causaram sensibilidade ao modelo foram coeficiente de taxa de erosão, diâmetro dos sedimentos e massa específica do leito. Os resultados apontaram que, de maneira geral, os parâmetros que geram maior sensibilidade no modelo são massa específica do leito, ângulo de atrito interno e concentração de sedimentos. As maiores variações relativas, no entanto, foram observadas nos parâmetros massa específica do leito, ângulo de atrito interno e massa específica da fase fluida. As maiores sensibilidades foram verificadas, em ordem decrescente, para área de erosão, área total, área de erosão, área de deposição, alcance e largura na vertente real e, para área total, alcance e largura na vertente hipotética. A condição de terreno que gerou maior alcance e área atingida foi de 45° de inclinação na encosta e 17° de inclinação na planície aluvial.

PALAVRAS-CHAVE: fluxo de detritos, análise de sensibilidade, Kanako-2D

SENSITIVITY ANALYSIS OF DEBRIS FLOW MODEL, KANAKO-2D

ABSTRACT

Due to a complex phenomenon, computational modeling has been used in an attempt to simulate the behavior of debris flows. One of the computational models is Kanako-2D. The present work carried out sensitivity analysis of this model in relation to length, erosion area, deposition area, total reached area and flow width. The values of the Kanako-2D input parameters, which ranges were established from literature review, were individually changed while the others were kept at the standard values of the model. The analyzed parameters were: sediment diameter, Manning roughness coefficient, coefficient of deposition rate, coefficient of erosion rate, mass density of the fluid phase, mass density of bed material, sediment concentration and internal friction angle. It was used a real slope-site with a history of occurrences of debris flow (Böni river basin in Alto Feliz and São Vendelino/RS) and a hypothetical slope-site with the same characteristics of the real one to evaluate the effect of the topography in the propagation of the flow. Different hillslope and alluvial fan conditions were also simulated in order to evaluate the length and reached area in the propagation of the flow. The sensitivity was quantified from three methods: (a) screening analysis, which indicated mass density of bed material, internal friction angle and sediment concentration as the parameters that cause bigger sensitivity in the model; (b) regionalized analysis, indicate that the parameters mass density of bed material, internal friction angle and mass density of the fluid phase showed higher sensitivity in the model; and (c) variances analysis, indicated that coefficient of erosion rate, sediment diameter and mass density of bed material showed higher sensitivity in the model. The results showed that, in general, the parameters that generate the higher sensitivity in the model are mass density of bed material, internal friction angle and concentration. The largest relative variation, however, in the response of the model were observed in mass density of bed material, internal friction angle and mass density of fluid phase. In descending order, the highest sensitivities were verified for erosion area, total area, deposition area, length and width for the real slope-site and total area, length and width for the hypothetical slope-site. The terrain condition that generated the largest length and reached area was 45° on the hillslope and 17° on the alluvial fan.

KEYWORDS: debris flow, sensitivity analysis, Kanako-2D

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema ilustrativo de fluxo de detritos (Fonte: Hussin, 2011).....	18
Figura 2 – Fluxo de detritos ocorrido em Rolante/RS em 06/01/2017.....	19
Figura 3 – Curvas características para alguns tipos de fluidos (Fonte: TAKAHASHI, 2007)....	22
Figura 4 – Fluxograma de funcionamento do Kanako-2D.....	26
Figura 5 – Visualização do modelo Kanako-2D.	32
Figura 6 – Arranjo de variáveis no canal (Fonte: NAKATANI et al., 2008).....	34
Figura 7 – Esquema de integração entre 1 e 2-D do modelo Kanako-2D (Fonte: NAKATANI et al., 2008).....	34
Figura 8 – Esquema representativo de divisão de vazões no Kanako-2D (Fonte: NAKATANI et al., 2008).....	35
Figura 9 – Esquema representativo de entrada de sedimentos na planície aluvial do Kanako-2D (Fonte: NAKATANI et al., 2008).	35
Figura 10 – Bacia hidrográfica do arroio Böni, RS.....	37
Figura 11 – Trabalho de campo: comunicação com moradores.....	38
Figura 12 – Evidências de fluxo de detritos	39
Figura 13 – Fluxograma do presente trabalho.....	40
Figura 14 – Vertente hipotética.....	41
Figura 15 – Utilização de Kanako-2D no mundo.....	44
Figura 16 – Exemplo de visualização do resultado do Kanako-2D para diferentes diâmetros dos sedimentos: (a) $d=0,15$ m; (b) $d=0,30$ m; e (c) $d=0,50$ m.	46
Figura 17 – Análise de Sensibilidade do modelo Kanako-2D - Alcance: (a) CSD, ANG, MFL, MEL, CCM; e (b) DIA, CTD, CRM, CTE.	48
Figura 18 – Análise de Sensibilidade do modelo Kanako-2D – Área total: (a) CSD, ANG, MFL, MEL, CCM ; e (b) DIA, CTD, CRM, CTE.	49
Figura 19 – Análise de Sensibilidade do modelo Kanako-2D – Área de Erosão: (a) CSD, ANG, MFL, MEL, CCM ; e (b) DIA, CTD, CRM, CTE.	50
Figura 20 – Análise de Sensibilidade do modelo Kanako-2D - Área de deposição: (a) CSD, ANG, MFL, MEL, CCM ; e (b) DIA, CTD, CRM, CTE.....	51
Figura 21 – Análise de Sensibilidade do modelo Kanako-2D - Largura: (a) CSD, ANG, MFL, MEL, CCM; e (b) DIA, CTD, CRM, CTE.	52
Figura 22 – Análise de Sensibilidade: diâmetro dos sedimentos: (a): alcance, deposição, área total, largura; e (b) erosão	53
Figura 23 – Análise de Sensibilidade: coeficiente de rugosidade de Manning.....	55
Figura 24 – Análise de Sensibilidade: coeficiente de taxa de deposição	56
Figura 25 – Análise de Sensibilidade - coeficiente de taxa de deposição: (a) alcance, deposição, total, largura; e (b) erosão.	58
Figura 26 – Análise de Sensibilidade - massa específica da fase fluida: (a) alcance, deposição, total, largura; e (b) erosão.	59
Figura 27 – Análise de Sensibilidade - massa específica do leito: (a) alcance, deposição, total, largura; e (b) erosão.	61
Figura 28 – Análise de Sensibilidade: concentração de sedimentos	62
Figura 29 – Análise de Sensibilidade - ângulo de atrito interno: (a) alcance, deposição, total, largura; e (b) erosão.	64
Figura 30 – Análise de Sensibilidade - concentração da camada móvel: (a) alcance, deposição, total, largura; e (b) erosão.	65
Figura 31 – Análise de sensibilidade da vertente hipotética – alcance: (a) CCM, MEL, MFL, ANG, CSD; e (b) CRM, CTE, CTD, DIA.	67

Figura 32 – Análise de sensibilidade da vertente hipotética - Área total atingida: (a) CCM, MEL, MFL, ANG, CSD; e (b) CRM, CTD, DIA.	68
Figura 33 – Análise de sensibilidade da vertente hipotética - largura: (a)CCM, MEL, MFL, ANG, CSD; e (b) CRM, CTE, CTD, DIA.	69
Figura 34 – Análise de sensibilidade da vertente hipotética - diâmetro dos sedimentos.	70
Figura 35 – Análise de sensibilidade da vertente hipotética - coeficiente de rugosidade de Manning	71
Figura 36 – Análise de sensibilidade da vertente hipotética - coeficiente de taxa de deposição	72
Figura 37 – Análise de sensibilidade da vertente hipotética - coeficiente de taxa de erosão: (a) deposição, erosão, total, alcance, largura; e (b) valores absolutos de área de erosão, deposição e total.....	73
Figura 38 – Análise de sensibilidade da vertente hipotética - massa específica da fase fluida...	74
Figura 39 – Análise de sensibilidade da vertente hipotética - massa específica do leito	75
Figura 40 – Análise de sensibilidade da vertente hipotética - concentração de sedimentos	76
Figura 41 – Análise de sensibilidade da vertente hipotética - ângulo de atrito interno.....	77
Figura 42 – Análise de sensibilidade da vertente hipotética - concentração da camada móvel ..	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Diferentes conceitos de fluxos de detritos	20
Tabela 2: Condições de terreno para avaliar a influência da declividade no fluxo de detritos.	42
Tabela 3: Valores comumente utilizados nas simulações com Kanako-2D	45
Tabela 4: Faixa de variação dos parâmetros.....	45
Tabela 5: Sensibilidade do modelo: (a) $K1$; (b) $K2$; e (c) $K3$	79
Tabela 6: Avaliação da influência da declividade nos resultados do modelo	81

LISTA DE SÍMBOLOS

C^* [g/L]	concentração de sedimentos por volume na camada do leito móvel
C_k [g/L]	concentração de sedimentos na k -ésima posição
g [m/s ²]	aceleração da gravidade
h [m]	altura do fluxo
i [m/s]	velocidade de erosão/deposição
i_k [m/s]	velocidade de erosão/deposição na k -ésima posição
$K1$ [%/%]	índice de sensibilidade obtido através do método de análise por rastreamento
$K2$ [%/%]	índice de sensibilidade obtido através do método de análise regional
$K3$ [-]	índice de sensibilidade obtido através do método das variâncias
N	número de resultados para um determinado parâmetro
Q [m ³ /s]	vazão de sedimentos
R	resultado extraído do modelo Kanako-2D para parâmetro considerado
$R_{\text{padrão}}$	resultado extraído do modelo Kanako-2D para o valor padrão do parâmetro considerado
T [s]	tempo
u [m/s]	velocidade na direção x
v [m/s]	velocidade na direção y
ΔP [%]	variação do parâmetro em relação ao valor padrão
ΔR [%]	variação do resultado em relação ao valor padrão
Δx [m]	tamanho do <i>pixel</i> na direção x
Δy [m]	tamanho do <i>pixel</i> na direção y
μ :	resultado relacionado a um determinado parâmetro
$\bar{\mu}$:	valor da média dos resultados relacionados a um determinado parâmetro
ρ [kg/m ³]	massa específica intersticial do fluido
τ_x [kPa]	tensão de cisalhamento no leito na direção x
τ_y [kPa]	tensão de cisalhamento no leito na direção y
θ_1 [°]	inclinação da vertente
θ_2 [°]	inclinação da planície aluvial
θ_{wx}	gradiente de fluxo superficial na direção x
θ_{wy}	gradiente de fluxo superficial na direção y

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANG	ângulo de atrito interno
CCM	concentração da camada móvel
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
CRM	coeficiente de rugosidade de Manning
CSD	concentração de sedimentos
CTE	coeficiente de taxa de erosão
CTD	coeficiente de taxa de deposição
DIA	diâmetro dos sedimentos
GPDEN	Grupo de Pesquisa em Desastres Naturais
IPH	Instituto de Pesquisas Hidráulicas
MEL	massa específica do leito
MFL	massa específica da fase fluida
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. OBJETIVOS.....	17
2.1. GERAL	17
2.2. ESPECÍFICOS	17
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
3.1. FLUXOS DE DETRITOS	18
3.2. MODELO DE FLUIDO DILATANTE.....	21
3.3. MODELAGEM DE FLUXOS DE DETRITOS	22
3.4. UTILIZAÇÃO DO MODELO KANAKO-2D.....	24
3.5. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	26
3.6. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE EM FLUXOS DE DETRITOS	30
4. MATERIAIS E MÉTODOS	32
4.1. TEORIA DO MODELO KANAKO-2D	32
4.2. APLICAÇÃO DO MODELO KANAKO-2D	36
4.2.1. VERTENTE REAL	36
4.2.1.1. ÁREA DE ESTUDO	36
4.2.1.2. DADOS UTILIZADOS	37
4.2.1.3. LEVANTAMENTO EM CAMPO.....	37
4.2.1.4. OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS DE ENTRADA.....	39
4.2.2. VERTENTE HIPOTÉTICA	39
4.2.3. COMPARAÇÃO ENTRE VERTENTE REAL E HIPOTÉTICA	40
4.2.4. CRIAÇÃO DE DIFERENTES CONDIÇÕES DE TERRENO PARA AVALIAR A INFLUÊNCIA DA DECLIVIDADE NO ALCANCE E NA ÁREA ATINGIDA	41
4.2.5. MEDIÇÃO DOS FLUXOS DE DETRITOS	42
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
5.1. OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS DE ENTRADA	44
5.2. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA VERTENTE REAL	46
5.2.1. DIÂMETRO DOS SEDIMENTOS (DIA)	52
5.2.2. COEFICIENTE DE RUGOSIDADE DE MANNING (CRM).....	54
5.2.3. COEFICIENTE DE TAXA DE DEPOSIÇÃO (CTD).....	55
5.2.4. COEFICIENTE DE TAXA DE EROÇÃO (CTE)	57
5.2.5. MASSA ESPECÍFICA DA FASE FLUIDA (MFL).....	58
5.2.6. MASSA ESPECÍFICA DO LEITO (MEL).....	60

5.2.7.	CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS (CSD)	61
5.2.8.	ÂNGULO DE ATRITO INTERNO (ANG)	63
5.2.9.	CONCENTRAÇÃO DA CAMADA MÓVEL (CCM)	64
5.3.	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA VERTENTE HIPOTÉTICA	66
5.3.1.	DIÂMETRO DOS SEDIMENTOS (DIA)	69
5.3.2.	COEFICIENTE DE RUGOSIDADE DE MANNING (CRM)	70
5.3.3.	COEFICIENTE DE TAXA DE DEPOSIÇÃO (CTD)	71
5.3.4.	COEFICIENTE DE TAXA DE EROÇÃO (CTE)	72
5.3.5.	MASSA ESPECÍFICA DA FASE FLUIDA (MFL)	73
5.3.6.	MASSA ESPECÍFICA DO LEITO (MEL)	74
5.3.7.	CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS (CSD)	75
5.3.8.	ÂNGULO DE ATRITO INTERNO (ANG)	76
5.3.9.	CONCENTRAÇÃO DA CAMADA MÓVEL (CCM)	77
5.4.	SENSIBILIDADE DO MODELO	78
5.5.	ANÁLISE DO EFEITO DA DECLIVIDADE NO ALCANCE E NA ÁREA ATINGIDA	81
6.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	84
7.	REFERÊNCIAS	87
	APÊNDICES	94

1. INTRODUÇÃO

Fluxos de detritos são fenômenos naturais com alto poder destrutivo, governados pela gravidade e compostos pela mistura de água, ar e sedimentos (TAKAHASHI, 2007), sendo considerado um dos tipos de movimentos de massa mais perigosos devido à alta velocidade do fluxo e as grandes distâncias que podem percorrer (JAKOB e HUNGR, 2005). No mundo inteiro os fluxos de detritos vêm causando sérios danos à sociedade e ao meio ambiente, incluindo o Brasil (KOBİYAMA et al., 2015).

Ao longo das últimas décadas o desenvolvimento econômico e populacional do Brasil associado ao planejamento inadequado de bacias hidrográficas em níveis municipal, estadual e nacional ocasionou a expansão territorial. Tal expansão causou intensa e desordenada urbanização, inclusive em áreas susceptíveis à ocorrência de fenômenos como os fluxos de detritos. Kobiyama et al. (2015) mostraram que o número de desastres relacionados a sedimentos no Brasil vem aumentando e causando um grande número de vítimas fatais. Enfatiza-se a necessidade de conhecer a distribuição espacial e de avaliar os perigos naturais no processo de ocupação territorial.

Os fluxos de detritos apresentam elevado potencial causador de desastre, de modo que a sociedade brasileira necessita implementar medidas preventivas adequadas. As medidas preventivas podem ser estruturais e não-estruturais, sendo as medidas estruturais as obras de engenharia e os serviços ambientais e as medidas não-estruturais o mapeamento de áreas de perigo e a simulação de cenários críticos (KOBİYAMA et al., 2006). A utilização de medidas não-estruturais tem fundamental importância na gestão de desastres naturais, sendo a sua utilização uma tendência mundial (CARVALHO, 2015). Servindo como medida não-estrutural na prevenção de desastres naturais, segundo Nishiguchi et al. (2011), a simulação computacional tem sido utilizada na tentativa de reproduzir o comportamento de fluxos de detritos e mapear áreas susceptíveis à ocorrência destes fenômenos.

Neste contexto, estudos sobre desastres relacionados a sedimentos, como escorregamentos e fluxos de detritos, que utilizam modelagem computacional podem contribuir com a simulação de cenários críticos e com a identificação de áreas susceptíveis a estes desastres. A redução de desastres relacionados a sedimentos, especialmente a fluxos de detritos, é uma questão urgente para a comunidade brasileira e a simulação numérica é importante ferramenta na predição de áreas atingidas por fluxos de detritos.

Um dos modelos utilizados para simulação de fluxos de detritos é o Kanako-2D, modelo fisicamente embasado, desenvolvido por Nakatani et al. (2008) no Japão. Segundo os autores, inicialmente o objetivo era avaliar a influência de diferentes tipos de barragens na propagação do fluxo, no entanto, atualmente o modelo tem sido utilizado para mapeamento de áreas susceptíveis.

Devido a sua assertividade, disponibilização gratuita e interface amigável para iniciantes em linguagem de programação, o modelo apresenta elevado potencial de uso. No Brasil, o modelo Kanako-2D foi utilizado pela primeira vez por Michel et al. (2015) na bacia do rio Cunha, em Santa Catarina, para avaliar o efeito de pequenos reservatórios na propagação de sedimentos oriundos de fluxos de detritos, obtendo bons resultados. Isto instiga a necessidade de maior investigação e utilização do modelo Kanako-2D no país.

Para compreender o uso do modelo e também o mecanismo do fenômeno, a realização da análise de sensibilidade é importante. Após a análise de sensibilidade do modelo, os gestores e tomadores de decisão poderão utilizar mais corretamente o Kanako-2D, fornecendo uma melhor predição de áreas susceptíveis a fluxos de detritos a partir de modelagem computacional.

2. OBJETIVOS

2.1. GERAL

Avaliar a sensibilidade do modelo Kanako-2D na propagação de fluxos de detritos em termos de alcance, área atingida e largura do fluxo.

2.2. ESPECÍFICOS

- Estudar a aplicação do modelo Kanako-2D na literatura a partir de todos os artigos publicados
- Estabelecer a faixa de variação dos parâmetros de entrada do modelo
- Compreender as incertezas dos parâmetros a partir da literatura,
- Determinar os parâmetros mais sensíveis do modelo;
- Avaliar o efeito da topografia por meio de comparação entre vertentes reais e hipotéticas.
- Avaliar o desempenho do modelo sob diferentes condições de vertentes e planícies aluviais;

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. FLUXOS DE DETRITOS

Fluxos de detritos são fenômenos naturais hidrológicos altamente destrutivos, compostos pela mistura de água, ar e sedimentos, governados pela gravidade, que se movem em massa e são dirigidos por forças dinâmicas de fluidos (TAKAHASHI, 2007). Os fluxos de detritos são um dos tipos de movimentos de massa mais perigosos devido à velocidade do fluxo e das longas distâncias que podem percorrer (JAKOB e HUNGR, 2005).

Geomorfologicamente os fluxos de detritos são caracterizados sob três aspectos: zona de iniciação, de transporte e de deposição, os quais podem ser visto esquematicamente na Figura 1. A zona de iniciação é o local em que ocorre o aporte inicial de sedimentos ao fluxo. A zona de transporte é uma zona transicional, muitas vezes associadas a canais em zonas declivosas, em que os sedimentos são incorporados ao fluxo. Já a zona de deposição é o local em que os sedimentos se depositam, apresentando formato de diques ou de cones (HUSSIN, 2011).

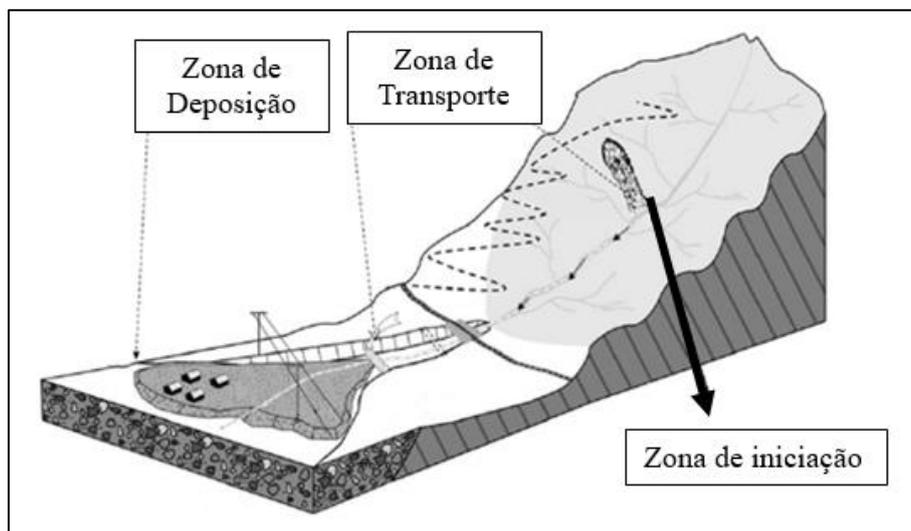


Figura 1 – Esquema ilustrativo de fluxo de detritos (Fonte: Hussin, 2011)

Segundo Takahashi (2014), a iniciação de um fluxo de detritos pode ocorrer a partir de três situações:

- i) Sedimentos depositados no leito de um canal, ao serem mobilizados pela água e tornarem a concentração de sólidos muito alta, aumentando a densidade do fluido, e se transformando em fluxos de detritos.
- ii) Escorregamentos podem se transformar em fluxos de detritos quando se movem devido ao efeito da água armazenada no solo ou devido ao suprimento externo de água, como quando um escorregamento converge para um canal e seus sedimentos são propagados.
- iii) Colapso de uma barragem de detritos.

A Figura 2 apresenta um exemplo de fluxo de detritos cuja iniciação ocorreu a partir de escorregamentos.



Figura 2 – Fluxo de detritos ocorrido em Rolante/RS em 06/01/2017.

Coussot e Meunier (1996) consideram fluxos de detritos como fenômenos intermediários entre fluxo hiperconcentrado e escorregamentos. Iverson (2004) citou que fluxos de detritos são fenômenos transicionais, oscilando características entre escorregamentos e inundações. Por ambos os autores, no entanto, há a concordância de que são fenômenos relacionados com altas velocidades na movimentação de sedimentos.

Devido ao caráter transicional, entre fluxo hiperconcentrado e escorregamentos, diversos autores têm tentado estabelecer conceitos relacionados a fluxos de detritos (Tabela 1).

Tabela 1: Diferentes conceitos de fluxos de detritos

Autores	Conceitos
Varnes (1978)	Rápido movimento de material viscoso. Existem fluxos de detritos, de lama e avalanche de rochas, dependendo da natureza do material movimentado.
Costa (1988)	O fluxo é um fluido plástico-viscoso, não-newtoniano ou fluido dilatante de forma laminar, com perfil uniforme de concentração de sedimentos. A concentração de sedimentos varia de 70 a 90% em peso (47 a 77% em volume) e o esforço cisalhante superior a 0,04 kPa.
Jan e Shen (1997)	Fluxo gravitacional de material que compõe uma mistura de solo, rocha, água e ar, proveniente de escorregamentos com uma grande quantidade de escoamento. Suas propriedades variam de acordo com a quantidade de água e tamanho e distribuição dos sedimentos.
Vandine e Bovis (2002)	É um movimento de massa rápido, com material orgânico e inorgânico (especialmente material grosseiro), saturado, ao longo de um canal confinado e declivoso.
Imaizumi et al. (2008)	Movimento de massa em canais é considerado fluxo de detritos, enquanto em encostas é considerado escorregamento.
IRDR (2014)	Fluxo de detritos é um tipo de escorregamento que ocorre quando chuvas intensas causam o descenso de uma grande quantidade de detritos (vegetação, rochas, lama etc.) em encostas devido a forças gravitacionais.
Hungr et al. (2014)	É um fenômeno altamente perigoso que ocorre em regiões montanhosas. É diferente de outros tipos de escorregamentos devido ao fato de que as trajetórias estabelecidas normalmente são os canais e as bacias de segunda ordem.

Uma vez posto o caráter transicional, é necessário também observar o tipo de detrito que está fluindo. Segundo o IRDR (2014) os detritos podem ser lenhosos, rochosos ou de lama, por exemplo. A realidade brasileira aponta para fluxos de detritos lenhosos, com grande contribuição da vegetação (KOBİYAMA et al., 2015). É necessário, portanto, ter isso em consideração na interpretação dos resultados de uma simulação computacional.

Os fluxos de detritos têm causado diversas perdas humanas e prejuízos sociais e econômicos no Brasil nos últimos anos, entretanto, tal tema ainda não é amplamente discutido no meio científico brasileiro. Dado isso, Kobiyama et al. (2015) sugerem quatro ações para a questão de fluxos de detritos no Brasil: (i) estabelecimento de terminologia e conceitos; (ii) sistematização de monitoramento hidrometeorológico e dados

topográficos; (iii) registro de ocorrências e criação de banco de dados; e (iv) desenvolvimento de pesquisas com fluxos de detritos lenhosos. O presente trabalho, embora não trate diretamente dessas quatro ações propostas, permeia entre elas podendo fornecer subsídios através de ferramenta computacional na modelagem de fluxos de detritos e, conseqüentemente, auxiliar no mapeamento de áreas susceptíveis à ocorrência de fluxos de detritos.

3.2. MODELO DE FLUIDO DILATANTE

Fluxos de detritos pedregosos apresentam alta mobilidade e competência para carrear sedimentos grosseiros mesmo em zonas planas, com inclinações de até aproximadamente 4° (TAKAHASHI, 2014). Os sedimentos são mais pesados que o fluido intersticial, tendo uma tendência natural a se depositarem. Portanto, para manter o fluxo é necessário um mecanismo para dispersão dos sedimentos. Na teoria do modelo de fluido dilatante, o mecanismo responsável por manter o fluxo são as forças repulsivas causadas pelas colisões das partículas.

Os fluidos podem ser classificados conforme a relação entre a variação da tensão de cisalhamento e a deformação do fluido (alguns exemplos são demonstrados na Figura 3). Fluidos newtonianos apresentam relação linear entre a variação da tensão de cisalhamento e a deformação causada no fluido, como a água e o ar em estudos práticos de engenharia. O fluido dilatante é considerado um fluido não-newtoniano, ou seja, tal relação não é linear. Nota-se, a partir da Figura 3, que existe uma relação aproximadamente exponencial para o fluido dilatante, em que uma pequena variação da tensão de cisalhamento causa uma grande deformação no fluido.

Para o modelo de fluido dilatante, o excesso de pressão no fluido intersticial é um dos mecanismos que auxilia na sustentação dos sedimentos, no entanto, quando a concentração de sedimentos é baixa a sustentação ocorre por um espaço de tempo muito curto devido aos grandes espaços vazios entre as partículas. O mecanismo que atua na sustentação dos sedimentos, então, são as forças repulsivas devido às colisões dos grãos. Bagnold (1954) foi o primeiro a demonstrar, através de modelagem física, que as colisões entre partículas geravam dispersão de grãos. Em seu modelo, demonstrou que o número de grãos por unidade de área afeta o número de colisões, mantendo as condições de sustentação das partículas.

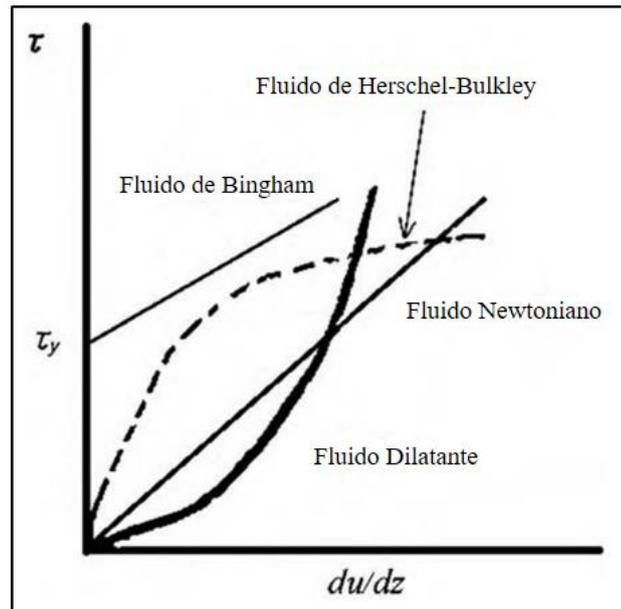


Figura 3 – Curvas características para alguns tipos de fluidos (Fonte: TAKAHASHI, 2007).

Takahashi (1977) realizou a primeira aproximação para fluxos de detritos pedregosos a partir das equações de Bagnold (1954), aplicando-as para uma mistura de água e sedimentos em canais abertos em estado uniforme nas quais os sedimentos eram mais pesados do que a água. Nesta aproximação, é considerada uma distribuição uniforme dos sedimentos ao longo da profundidade.

Embora a aproximação pudesse descrever razoavelmente bem o fenômeno, era considerada muito simplificada e apresentava contradições para descrever a velocidade do fluxo. Então, Takahashi (1991) utilizou as considerações de Savage e Sayed (1984), reformulando a aproximação do modelo de fluido dilatante para a propagação de fluxos de detritos.

3.3. MODELAGEM DE FLUXOS DE DETRITOS

A modelagem de fluxos de detritos pode se dar a partir de modelos físicos ou matemáticos. Os modelos físicos podem ser construídos, enquanto os modelos matemáticos podem ser empíricos ou computacionais, os quais podem ter embasamento físico. Devido à alta complexidade do fenômeno, muitos modelos têm sido utilizados para

tentar simular o comportamento de fluxos de detritos, entretanto, nem todos os modelos consideram os fluxos de detritos como fluidos dilatantes.

Os modelos empíricos são elaborados a partir da observação, de relações simplificadas ou de análises estatísticas (FANNIN e WISE, 2001), especialmente quando o sistema a ser analisado é muito complexo. Barragán et al. (2015) reuniram diversas abordagens empíricas comumente utilizadas na modelagem de fluxos de detritos e demonstraram que, muitas vezes, os modelos requerem especificações de parâmetros que não podem ser mensurados durante o fluxo de detritos. Desse modo, muitos desses parâmetros são estimados a partir de retroanálises ou calibração para determinados eventos, em que apenas os valores médios ou um comportamento padrão podem ser estimados (NAEF et al., 2006). Por se tratar de um fenômeno muito complexo e não totalmente compreendido, os modelos baseados na observação ainda são muito utilizados pois fornecem abordagens que auxiliam na compreensão dos fluxos de detritos.

Diversos modelos físicos têm sido utilizados para fazer considerações sobre os fluxos de detritos, trazendo importante conhecimento acerca destes fenômenos (TAKAHASHI, 1991; IVERSON, 2004; TAKAHASHI, 2007; NAKATANI et al., 2013). No entanto, tal modelagem é altamente onerosa e não, necessariamente, consegue reproduzir as condições reais dos terrenos. Além disso, a aplicação para fins de mapeamento de áreas susceptíveis não é facilmente realizada a partir de modelagem física.

Embora existam diversas maneiras para realizar estudos de fluxos de detritos, a modelagem numérica computacional é uma das ferramentas mais importantes e eficientes para fins de mapeamento (HUTTER et al., 1996; TAKAHASHI, 2007). Modelos numéricos requerem baixo custo de implementação e possibilitam maior agilidade na obtenção de resultados, uma vez que podem simular cenários mais facilmente e a custos inexpressivos quando comparados com os modelos físicos. Os modelos podem ser fisicamente embasados, ou seja, baseiam-se no conhecimento físico dos processos para simulação dos fenômenos.

Um desses modelos numéricos fisicamente embasados é o Kanako-2D, desenvolvido no Japão, para fluxos de detritos pedregosos. Embora existam outros modelos numéricos, tais como o FLO-2D, DFLOWZ, FLOW-2D e UBCDFLOW, o modelo Kanako-2D já foi utilizado no Brasil, em uma área do estado de Santa Catarina e outra do Rio Grande do Sul, obtendo bons resultados (MICHEL et al., 2015a e 2015b),

embora Kobiyama et al. (2015) tenham destacado que o tipo de fluxo de detritos que normalmente acontece no Brasil é o lenhoso, e não o pedregoso.

Além disso, o Kanako-2D é um modelo gratuito e que apresenta interface amigável para iniciantes em linguagem de programação e permite avaliar, também, a influência de barragens para controle de sedimentos. Tais considerações podem popularizar a utilização do modelo no Brasil e ser útil para a Proteção e Defesa Civil, o que evidencia a necessidade de maior investigação sobre o funcionamento do Kanako-2D.

3.4. UTILIZAÇÃO DO MODELO KANAKO-2D

Inicialmente o modelo foi desenhado para avaliar o efeito de diferentes tipos de barragens (grid, fenda ou fechada) na contenção de desastres relacionados a sedimentos, especialmente fluxo de detritos, tendo análises unidimensionais. Na sua versão bidimensional, Kanako-2D, simula o fluxo a partir de sua entrada no canal com equações em 1-D e a propagação e a deposição do fluxo na planície aluvial em 2-D. Posteriormente, o modelo foi utilizado para mapear áreas susceptíveis a ocorrência destes fenômenos (NAKATANI et al., 2009), em que uma área localizada numa planície aluvial na parte ocidental de Kyoto foi tema de interesse, uma vez que na região há inúmeras casas, escolas, hospitais, estradas e um patrimônio histórico (Santuário e Mausoléu Seiwa Emperor) exposto à ocorrência de fluxo de detritos.

Nakatani et al. (2010) desenvolveram um método para avaliar as melhores soluções em barragens utilizando o volume deslocado como indicador e estimando índices de danos e perigos através de simulações com Kanako-2D. A utilização de barragens em trechos mais baixos apresentaram maior eficiência na redução dos danos causados do que barragens em trechos localizados mais à montante dos canais. Nakatani et al. (2011) também avaliaram o efeito de barragens com comportas, buscando identificar os efeitos que diferentes vazões de aberturas nas comportas causavam no leito do rio. Nishiguchi et al. (2011) tentaram identificar padrões de erosão e deposição de fluxos de detritos de grande escala com observações em campo e simulação computacional com Kanako-2D. Já Matsumoto et al. (2012) propuseram utilizar modelos que contemplem a mistura de sedimentos e sua classificação. Enquanto Nakatani et al. (2010 e 2011) buscaram avaliar os efeitos à jusante dos barramentos para prevenir desastres

relacionados a sedimentos, Nishiguchi et al. (2011) e Matsumoto et al. (2012) buscaram incrementar o conhecimento dos padrões de erosão e deposição no canal buscando uma previsão mais racional para os fluxos de detritos.

Posteriormente a isso, percebe-se uma tendência em mapear áreas susceptíveis a serem atingidas por fluxo de detritos, cujo eixo central de análise passa do canal para a planície aluvial. Um desses exemplos é Liu et al. (2012), que propôs a criação de uma rede de drenagem na zona de deposição para conduzir o fluxo de detritos até um reservatório com dimensões suficientes para armazenamento do material rochoso. Ele comenta, no entanto, que as faixas de variação de alguns parâmetros, como coeficiente de rugosidade de Manning e diâmetro dos sedimentos, precisam ser debatidas. Também sugere que faltaram dados para analisar a confiabilidade dos resultados devido ao elevado número de parâmetros empíricos ou devido à ausência de parâmetros medidos.

Em estudos realizados por Nakatani et al. (2012a, 2013 e 2016a), foram avaliadas a influência da presença de casas na propagação e na deposição do fluxo. Os resultados indicaram que, na presença de casas, há um maior espalhamento do fluxo, especialmente quando a vazão ou o tamanho dos sedimentos é grande. Evidenciou-se que o tamanho dos sedimentos e a vazão de pico são parâmetros que demandam atenção na modelagem de fluxos de detritos. Itokazu et al. (2016) avaliaram rotas de fuga a partir da modelagem de um fluxo de detritos e consideraram a construção de um canal para avaliar se o fluxo seria direcionado por ele ou se atingiria outros locais.

Michel et al. (2015a) utilizaram o Kanako-2D pela primeira vez no Brasil avaliando a eficiência de reservatórios artificiais (açudes) para armazenar sedimentos provenientes de fluxos de detritos em áreas rurais. Estes reservatórios normalmente são construídos com argila e servem para criação de peixes e armazenamento de água em áreas rurais. Constatou-se que a presença do reservatório alterou completamente o comportamento do fluxo e evitou que casas fossem destruídas. Michel et al. (2015b) propuseram uma metodologia para mapeamento de fluxos de detritos, em que os resultados de um modelo de análise de estabilidade de encostas servissem como *input* para um modelo de fluxo de detritos como o Kanako-2D.

O funcionamento simplificado do Kanako-2D pode ser visualizado na Figura 4:

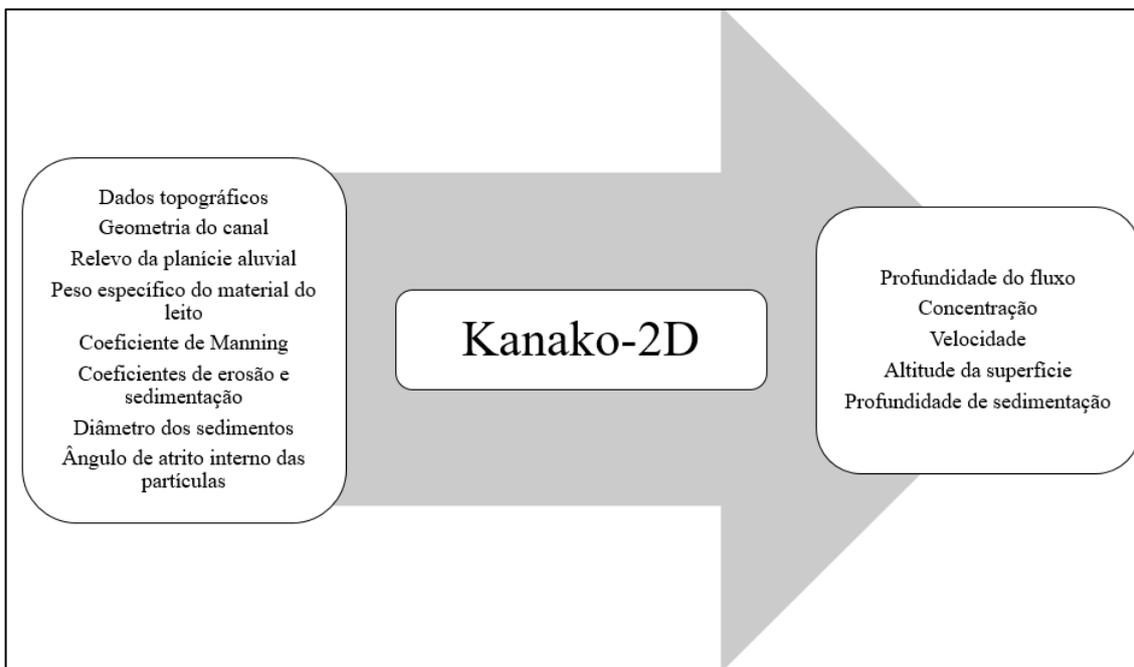


Figura 4 – Fluxograma do Kanako-2D

Para fins de mapeamento de perigo, os dados de saída mais comumente analisados se referem à espessura de sedimentação, que aponta os locais em que houve deposição e erosão. Embora seja possível, porém improvável, que um determinado local possa servir apenas para transporte do fluxo sem que haja mínima erosão ou deposição, tal efeito será desconsiderado neste trabalho. A combinação dos efeitos de deposição e erosão permitem saber as áreas que seriam atingidas pelos fluxos de detritos, indicando, portanto, locais de perigo a estes fenômenos.

O entendimento dos parâmetros mais sensíveis pode contribuir para um melhor mapeamento de perigo à ocorrência de fluxo de detritos. Por sua vez, um melhor mapeamento de perigo é uma importante ferramenta não-estrutural na gestão do risco de desastres.

3.5. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Análise de sensibilidade consiste no estudo da resposta dos modelos a uma determinada variação nos parâmetros de entrada (SALTELLI et al., 2000), cujo objetivo é determinar a contribuição individual das variáveis no resultado do modelo (HEISELBERG et al., 2007). Além disso, como a modelagem é uma tentativa de

reproduzir situações reais, ela pode ser sensível ao próprio modelo escolhido, aos seus submodelos e aos parâmetros utilizados (MOHANTY et al., 2001).

O conceito fundamental da análise de sensibilidade se baseia no princípio “E se...”, no qual se avalia a variação da resposta do sistema quando são geradas perturbações (HOPFE e HENSEN, 2011; SILVA e GHISI, 2013). Mohanty et al. (2001) comentaram que um parâmetro dito sensível é aquele que produz uma grande variação nos dados de saída de um modelo a partir de uma alteração no valor de entrada dentro de um intervalo de incerteza. Desse modo, pode-se enumerar parâmetros mais sensíveis em diferentes aspectos, explicitando as maiores contribuições e suas variabilidades.

Heiselberg et al. (2009), comentaram que há seis passos a serem seguidos na análise de sensibilidade, a citar: (i) a identificação de questões a serem respondidas; (ii) determinação de parâmetros a serem incluídos na análise inicial; (iii) atribuição de funções a cada parâmetro; (iv) geração de dados de entrada para os modelos; (v) criação de distribuição de resultados; e (vi) avaliação da influência de cada parâmetro. Embora tenham trabalhado com modelos de construções sustentáveis, Heiselberg et al. (2009) realizaram ampla discussão sobre os fundamentos de análise de sensibilidade, tornando-se referências também nas demais áreas do conhecimento.

A análise de sensibilidade pode ser dividida em três grupos segundo Heiselberg et al. (2009):

- i) Análise por rastreamento: parâmetros são variados individualmente em dois níveis extremos enquanto os demais são mantidos constantes. Essa análise permite ter uma noção da resposta do modelo à variação de um parâmetro dentro de uma faixa de valores, sendo útil para análises preliminares.
- ii) Análise local: os parâmetros são variados individualmente em diversos níveis enquanto os demais são mantidos constantes. Dessa forma, tem-se a tendência em cada nível sendo considerada uma análise mais completa. Este método é muito utilizado para avaliar a importância relativa entre os diversos parâmetros.
- iii) Análise global: é mais complexa, uma vez que todos os parâmetros devem ser variados simultaneamente. Assim, são obtidos índices globais de sensibilidade, uma vez que se avalia o efeito do alcance e da forma de um grupo de variações.

Além disso, podem ser classificadas em estatisticamente baseadas e não-estatisticamente baseadas. Análises estatisticamente baseadas utilizam diferentes distribuições dos parâmetros de entrada de um modelo e geram diferentes respostas para a avaliação de desempenho. Então, utilizam testes de hipóteses e buscam identificar relação entre os parâmetros. As análises estatisticamente baseadas estão relacionadas intimamente com a análise global. Análises não-estatisticamente baseadas executam os modelos especificamente para tratar da sensibilidade, como o método de Morris (1991), que consiste em variar um parâmetro por vez e avaliar as variações em diferentes âmbitos (MOHANTY et al., 1999; LU e MOHANTY, 2001).

Quanto aos dados de entrada, é preciso analisá-los através da análise de incertezas. Embora análise de sensibilidade e análise de incerteza estejam fortemente relacionadas, ambas diferem quanto ao objeto de análise. Enquanto a análise de sensibilidade busca identificar parâmetros mais sensíveis, a análise de incertezas busca identificar as faixas de variação dos parâmetros (EPA, 2009). Michel et al. (2014) realizaram típica análise de sensibilidade em modelos de estabilidade de encostas, avaliando a sensibilidade de parâmetros de resistência do solo e da contribuição das raízes no fator de segurança da estabilidade.

É preciso, pois, que a variação dos parâmetros seja realizada dentro de uma faixa fisicamente coerente. No presente trabalho, foram definidas tanto a sensibilidade do modelo aos parâmetros quanto suas faixas de variação (análise de incerteza).

A avaliação da sensibilidade do modelo aos diferentes valores dos parâmetros de entrada pode ser realizada a partir de diferentes métodos, tais como, rastreamento, análises regionais e análise de variâncias (SONG et al., 2015). Os diferentes métodos permitem fazer análises diferentes dos resultados, indicando a ordem de importância dos parâmetros na sensibilidade do modelo.

O método de rastreamento ($K1$) apresenta características mais gerais (SALTELLI et al., 2008), uma vez que avalia, para os valores extremos da faixa de variação dos parâmetros, a relação entre a variação da resposta frente à variação do parâmetro. Esse método permite avaliar de maneira geral o comportamento de um determinado parâmetro. Entretanto, para variações mais específicas dentro da faixa de valores totais, o método pode ter sua acuracidade reduzida. O método de rastreamento pode ser explicado segundo a equação (1):

$$K1 = \frac{\Delta R}{\Delta P} \cdot 100 = \frac{R - R_{padr\tilde{a}o}}{P - P_{padr\tilde{a}o}} \cdot 100 \quad (1)$$

onde R é o resultado do parâmetro de entrada considerado; $R_{padr\tilde{a}o}$ é o resultado do valor padrão; ΔR é a variação do resultado em relação ao valor padrão; P é o valor considerado do parâmetro de entrada; $P_{padr\tilde{a}o}$ é o valor padrão; e ΔP é a variação do parâmetro em relação ao valor padrão.

O método das análises regionais ($K2$) contempla as respostas para cada simulação realizada, trazendo mais elementos para a discussão da sensibilidade. Esse método analisa a variação relativa de uma resposta com a resposta imediatamente seguinte, funcionando como a derivada da função que descreve o comportamento do modelo num determinado ponto de análise. O método é capaz de indicar, então, quais são as maiores variações de resposta do modelo, trazendo um indicador da maior sensibilidade. Tal método pode ser descrito pela forma de derivada:

$$K2 = \frac{d[\Delta R]}{d[\Delta P]} \cdot 100 \quad (2)$$

Já a análise das variâncias ($K3$) busca avaliar a dispersão dos resultados em torno de um valor central médio, utilizando a variância amostral. Zhan et al. (2013) comentaram que análises de sensibilidade avaliadas em termos da variância promovem análises mais robustas quando comparadas aos outros métodos. No entanto, quando as faixas de variação dos parâmetros de entrada são muito grandes, a interpretação da sensibilidade pode se tornar mais complexa (SONG et al., 2015). A análise das variâncias pode ser descrita pela equação (3).

$$K3 = \sum_{i=1}^n \frac{(\mu - \bar{\mu})^2}{N} \quad (3)$$

Por se tratar de relações entre a variação percentual do parâmetro de entrada e a variação percentual da resposta do modelo, os valores de $K1$ e $K2$ podem ser tanto positivos quanto negativos, indicando aumento ou redução da resposta perante uma variação do parâmetro de entrada. Quanto à $K3$, por se tratar de análise de variâncias, ou seja, o grau de dispersão dos resultados em torno de um valor central, os valores são sempre positivos. Além disso, quanto maior for o valor, mais distante estará o resultado de um valor central e, portanto, maior será a sensibilidade do modelo.

A sensibilidade do modelo Kanako-2D será avaliada pelos métodos de rastreamento, regionais e de análises de variâncias. Desse modo será possível inferir diferentes condições de sensibilidade do modelo à variação dos parâmetros.

3.6. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE EM FLUXOS DE DETRITOS

Yu et al. (2014) utilizaram modelagem numérica para incrementar a compreensão dos efeitos da erosão e da sedimentação causada por deslizamentos e fluxos de detritos e avaliaram a influência de parâmetros reológicos no escoamento do fluxo. O modelo utilizado foi proposto por Cannon e Savage (1988), cuja massa era considerada uma aglomeração de partículas que se arrastava devido a forças gravitacionais e cuja existência de forças de atrito eram determinantes para a propulsão do fluxo. Os resultados apontaram que a topografia é um importante fator nos processos de transporte e de deposição de fluxos de detritos. Além disso, a velocidade, o alcance do fluxo, a área de deposição e o volume movimentado são influenciados pelas condições subjacentes do solo, ao tamanho das partículas e da poro-pressão.

Kurilo (2010) realizou análise de sensibilidade a fluxo de detritos com o modelo BCDFLOW, proposto por Fannin e Rollerson (1993), em cinco regiões do Canadá compostas por regiões montanhosas vegetadas com alta incidência de neve no inverno. Ele analisou a sensibilidade a alcance e a volume acumulado, comparando os resultados medidos em campo com os preditos pelo modelo nestas cinco localidades com ocorrência de fluxo de detritos mapeadas. O BCDFLOW é um modelo empírico, baseado na observação de 449 eventos de fluxos de detritos no Canadá. A partir da topografia e da estimativa do volume movimentado e do tipo de canal pelo qual foi transportado o fluxo de detritos, o modelo realiza predição de alcance e volume total movimentado ao longo do fluxo. Como as considerações do modelo basicamente se dão a partir da topografia, este é o fator predominante que conduz aos resultados do modelo.

Hussin et al. (2012) realizaram análise de sensibilidade para o modelo RAMMS, proposto por Bartelt et al. (1999), em termos de alcance do fluxo alterando valores de coeficiente de atrito, coeficiente de turbulência e coeficiente de arrasto. O RAMMS utiliza o modelo de fluxo contínuo de um fluido de Voellmy-Salm. A identificação dos parâmetros mais sensíveis auxiliou na calibração do modelo a fluxos de detritos

simulados, cujos detritos estavam associados a material rochoso que fluiu durante uma avalanche.

Luna et al. (2012) realizaram análise de sensibilidade em fluxos de detritos utilizando o modelo proposto por van Asch et al. (2004). Tal modelo considera a dinâmica do fluxo como unidimensional e o fluxo é tratado como se fosse laminar e o fluido incompressível. Os autores comentaram que o ângulo de atrito interno, profundidade e coesão do solo são parâmetros sensíveis ao se avaliar a quantidade de material movimentado, no entanto, não influenciam consideravelmente a velocidade do fluxo.

Embora se tenha alguns trabalhos com análise de sensibilidade em modelos de fluxo de detritos, a maior parte deles estão relacionados a *avalanche debris flow*. Além disso, são especialmente voltados para estimar o alcance e não a área atingida ou a largura do fluxo. Conforme comentado anteriormente, o número de estudos de fluxos de detritos utilizando o modelo Kanako-2D tem aumentado no mundo. Inicialmente na Ásia, tem sido utilizado na Oceania e na América do Sul. No entanto, este modelo ainda não foi avaliado em termos de sensibilidade, o que destaca a importância científica da realização deste trabalho.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. TEORIA DO MODELO KANAKO-2D

O modelo Kanako-2D aplica um modelo integrado entre 1D e 2D. Nos canais são utilizadas simulações numéricas unidimensionais visando reproduzir as variações causadas por fluxos de detritos no leito dos canais. É nesta etapa que são avaliados diferentes tipos de barragens para controle de sedimentos. Na planície aluvial a simulação ocorre em 2D visando reproduzir as variações na profundidade e na sedimentação do fluxo para simular as áreas susceptíveis à passagem de fluxo de detritos. A interface do modelo pode ser visualizada na Figura 5.

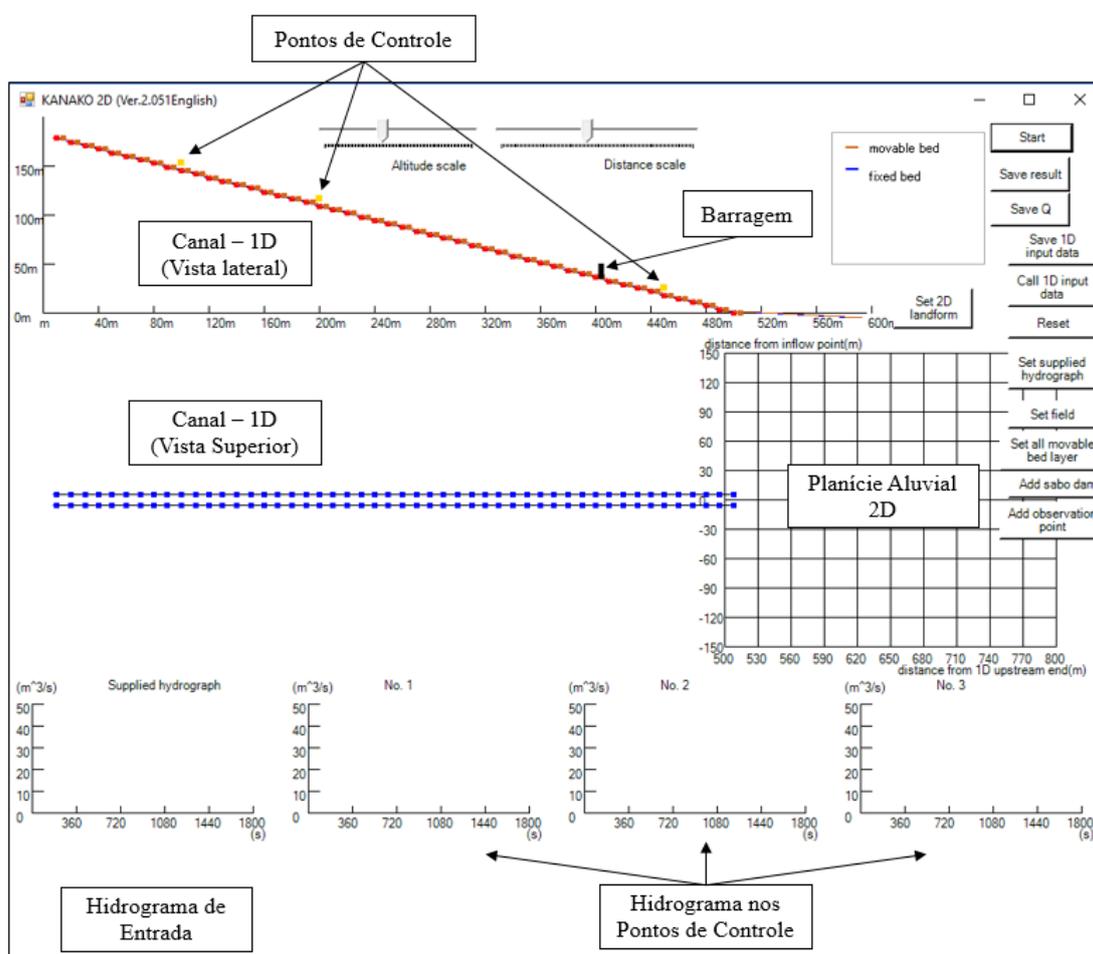


Figura 5 – Visualização do modelo Kanako-2D.

O Kanako-2D utiliza as equações de continuidade, momento, deformação do leito, erosão/deposição e tensões de cisalhamento no leito baseados no modelo de fluxo

dilatante proposto por Takahashi e Nakagawa (1991). As equações utilizadas na parte 1D e 2D são as mesmas, no entanto, na parte 2D se incluem os termos na direção y também.

Devido ao fato de no presente trabalho estar sendo avaliada a sensibilidade do modelo Kanako-2D na propagação do fluxo em termos de alcance e área atingida, não estão apresentadas as equações de funcionamento dos diferentes tipos de barragens que o modelo é capaz de simular.

A equação da continuidade para o volume total pode ser descrita como:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} = i \quad (4)$$

A equação da continuidade para determinar o fluxo de detritos na k -ésima posição da partícula pode ser descrita por:

$$\frac{\partial C_k h}{\partial t} + \frac{\partial C_k h u}{\partial x} + \frac{\partial C_k h v}{\partial y} = i_k \cdot C^* \quad (5)$$

Quando estiver considerando as deformações no leito e na planície aluvial, o modelo utiliza o diâmetro médio dos sedimentos.

As equações (6) e (7) representam equações de momento nos eixos x e y , respectivamente.

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial v}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial v}{\partial y} = g \cdot \sin \theta_{wx} - \frac{\tau_x}{\rho h} \quad (6)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial v}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial v}{\partial y} = g \cdot \sin \theta_{wy} - \frac{\tau_y}{\rho h} \quad (7)$$

A equação (8) avalia as alterações na elevação da superfície do leito.

$$\frac{\partial z}{\partial t} + i = 0 \quad (8)$$

onde h é a altura do fluxo; u é a velocidade na direção x ; v é a velocidade na direção y ; C_k é a concentração de sedimentos na k -ésima posição da partícula; z é a altitude do leito; t é o tempo; i é a velocidade de erosão ou deposição; i_k é a velocidade de erosão ou deposição na k -ésima posição; g é a aceleração da gravidade; ρ é a massa específica intersticial do fluido; θ_{wx} e θ_{wy} são os gradientes de fluxo superficial nas direções x e y ; C^* é a concentração de sedimentos por volume na camada do leito móvel; e τ_x e τ_y são as tensões de cisalhamento no leito nas direções x e y .

O modelo utiliza o método das diferenças finitas para realizar as simulações numéricas, escalonando os escalares e os vetores por $\Delta x/2$ na direção do fluxo e por $\Delta y/2$ na direção transversal (Figura 6).

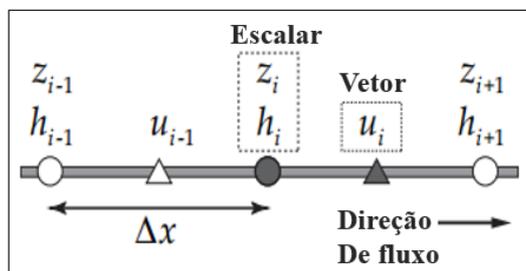


Figura 6 – Arranjo de variáveis no canal (Fonte: NAKATANI et al., 2008).

O modelo integrado permite simulação contínua da parte 1-D (canais) e 2-D (planície aluvial), utilizando um método explícito. A vazão e a concentração de sedimentos de jusante da calha são despejadas na planície aluvial. A altura do leito e a profundidade do fluxo nesta interface são calculadas a partir das informações da planície aluvial, enquanto a profundidade do fluxo utilizada é a mesma da saída da calha. Desse modo, pode-se afirmar que o modelo integrado (Figura 7) considera influência mútua da parte 1-D e da parte 2-D.

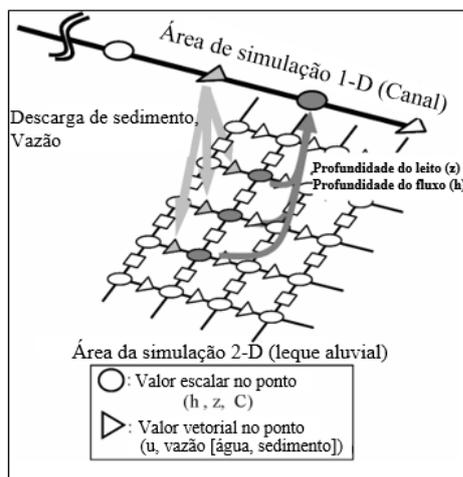


Figura 7 – Esquema de integração entre 1 e 2-D do modelo Kanako-2D (Fonte: NAKATANI et al., 2008).

A vazão de entrada dos sedimentos (Q) na planície aluvial pode ser dividida nas direções x e y (Q_x e Q_y , respectivamente) (Figura 8), para os quais serão aplicadas as equações anteriormente mencionadas. A entrada da vazão de sedimentos na planície

aluvial se dá no ponto central da largura da calha. Combinando as vazões Q_x e Q_y com o ponto central da entrada de sedimentos, novamente se calculam profundidade do fluxo, altura do leito, vazão e concentração de sedimentos (Figura 9).

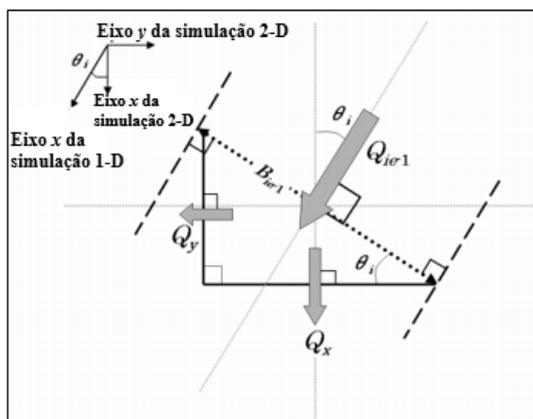


Figura 8 – Esquema representativo de divisão de vazões no Kanako-2D (Fonte: NAKATANI et al., 2008).

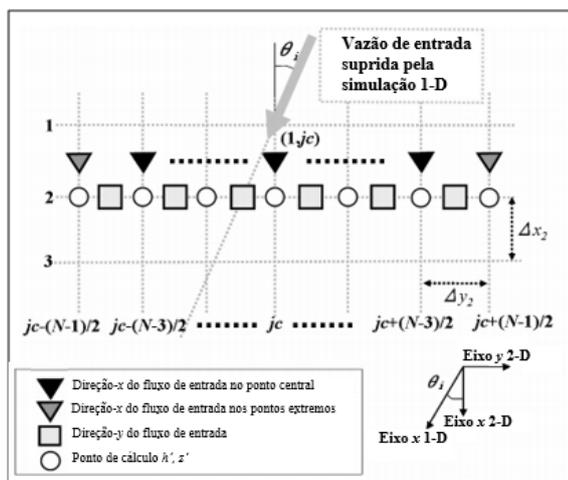


Figura 9 – Esquema representativo de entrada de sedimentos na planície aluvial do Kanako-2D (Fonte: NAKATANI et al., 2008).

As condições do terreno e do canal são dados de entrada do modelo. Para vertentes reais devem ser elaborados arquivos no formato *.asc* para leitura automática do Kanako-2D, enquanto para vertentes hipotéticas as condições do terreno podem ser ajustadas manualmente na interface do modelo.

A descrição mais detalhada do modelo Kanako-2D, com as equações e as considerações sobre a modelagem do efeito das barragens, encontra-se em Nakatani et al. (2008).

4.2. APLICAÇÃO DO MODELO KANAKO-2D

4.2.1. VERTENTE REAL

4.2.1.1. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo é a bacia hidrográfica do arroio Böni (Figura 10), cuja área é de 2,27 km² e está compreendida no limite dos municípios de São Vendelino e Alto Feliz no estado do Rio Grande do Sul. Ressalta-se que, antes do presente trabalho, não existia um nome para o arroio. A escolha do nome da bacia hidrográfica é uma homenagem à família Boeni, a qual perdeu tragicamente familiares no desastre do ano 2000, e que apoia o Grupo de Pesquisa em Desastres Naturais (GPDEN/IPH/UFRGS) nas atividades de campo realizadas na região, sendo de fundamental importância para a execução deste trabalho.

A região localiza-se entre escarpas e o planalto da Serra Geral apresentando ambiente tipicamente montanhoso. A bacia do arroio Böni apresenta altimetria entre 673 e 379 m e apresenta um extenso histórico de recorrência de movimentos de massa, sendo que grandes eventos foram registrados nos anos de 1982 e 2000. Conforme Michel (2015), esses eventos são caracterizados por escorregamentos translacionais rasos que se transformam em fluxo de detritos ao convergirem para o canal.

Com base nos depoimentos de morador local (Sr. Laurindo Boeni), sabe-se que no dia 24 de dezembro de 2000, após precipitações intensas na região, esta bacia foi atingida por fluxos de detritos e perdas humanas e danos materiais foram registrados. Devido ao histórico de ocorrências e à necessidade de se realizar mapeamentos de perigo a fluxos de detritos nesta região, esta bacia foi escolhida para as simulações. As diferenças entre mapeamento de perigo, risco e vulnerabilidade podem ser conferidas em Kobiyama et al. (2006).

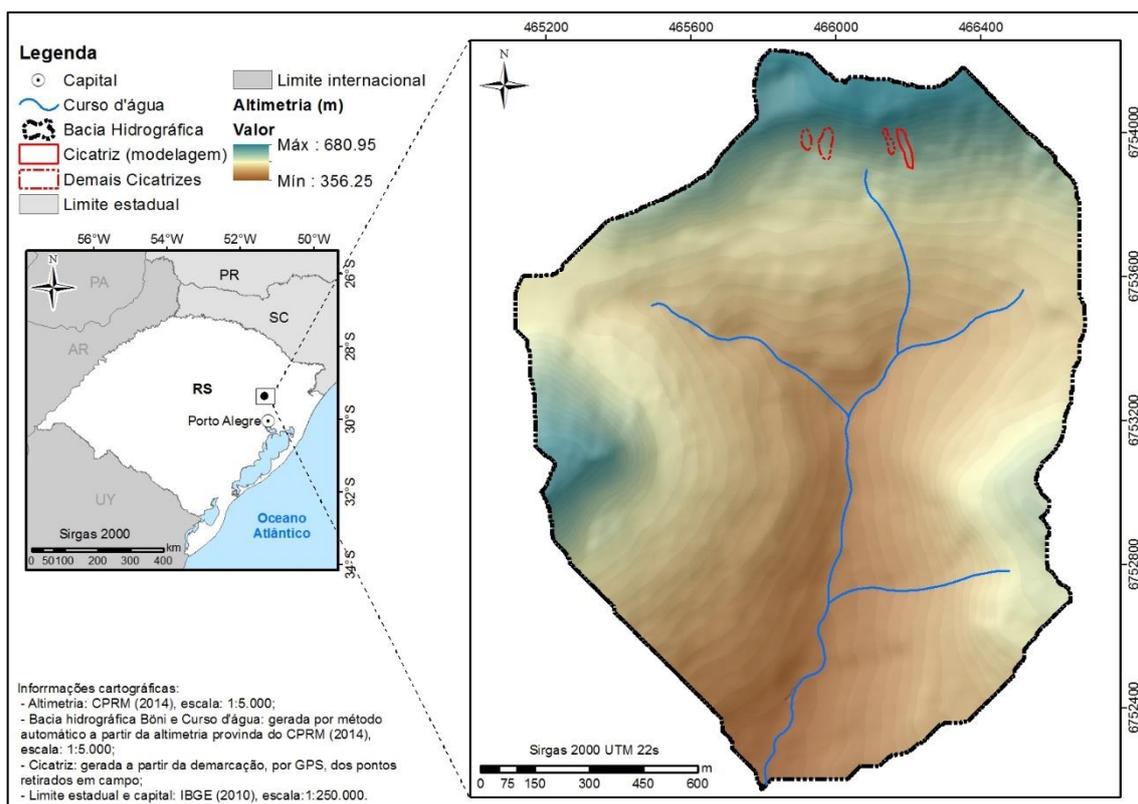


Figura 10 – Bacia hidrográfica do arroio Böni, RS

4.2.1.2. DADOS UTILIZADOS

O modelo digital de elevação (MDE) foi obtido junto ao Serviço Geológico do Brasil (CPRM), com resolução de 2,5 x 2,5 m. A partir do MDE foram gerados os arquivos com informações do terreno utilizados nas simulações pelo Kanako-2D.

Os parâmetros utilizados na simulação são: ângulo de atrito interno (ANG), concentração da camada móvel (CCM), coeficiente de rugosidade de Manning (CRM), concentração de sedimentos (CSD), coeficiente de taxa de deposição (CTD), coeficiente de taxa de erosão (CTE), diâmetro dos sedimentos (DIA), massa específica do leito (MEL) e massa específica da fase fluida (MFL).

4.2.1.3. LEVANTAMENTO EM CAMPO

O trabalho de campo foi realizado em duas campanhas, entre os dias 19 a 21 de julho e 26 a 28 de julho de 2016 visando identificar aspectos dos fluxos de detritos que

atingiram a região em dezembro de 2000. A partir de comunicação verbal dos moradores locais (Sr. Laurindo Boeni e Srta. Jaqueline Boeni) (Figura 11), percorreram-se os locais onde o fluxo de detritos passou. Foi possível buscar evidências dos locais de propagação do fluxo, em especial, as cicatrizes dos escorregamentos e as zonas de transporte. Ao total, sete pessoas participaram das atividades.



Figura 11 – Trabalho de campo: comunicação com moradores

O trabalho de campo permitiu delimitar as cicatrizes e, com isso, estimar o volume deslocado a ser utilizado na elaboração do hidrograma de entrada dos sedimentos no canal. A cicatriz foi percorrida na sua totalidade, com pontos de interesse sendo marcados em GPS a fim de obter um polígono com geometria mais próxima possível da real. Também foi possível mensurar seções transversais pelas quais o fluxo de detritos foi transportado, o que permitiu um melhor entendimento do canal de propagação (zona 1-D) do fluxo de detritos.

A área estimada da cicatriz simulada foi de 3750 m² e o volume considerado de 7500 m³. O volume foi calculado a partir do produto da área pela máxima profundidade do solo na região, que foi observada por Michel (2015) como sendo aproximadamente 2 m. Para estabelecer o hidrograma de entrada de sedimentos foi considerado o método de Whipple (1992), que adota um formato triangular, com tempo de ascensão menor que o tempo de recessão. Foi adotado tempo de recessão igual ao dobro do tempo de ascensão. Além disso, para definir a vazão de pico, a qual é 160 m³/s, foi utilizada a equação de Rickenmann (1999).

Apesar de transcorrido um intervalo de tempo relativamente longo entre os eventos do ano 2000 e a realização do campo, observaram-se evidências similares às

descritas por Takahashi (2007) (Figura 12). Foram observadas árvores curvadas e com marcas visando identificar a orientação do fluxo, vegetação consideravelmente menor dentro da calha e material lenhoso acumulado na planície aluvial.

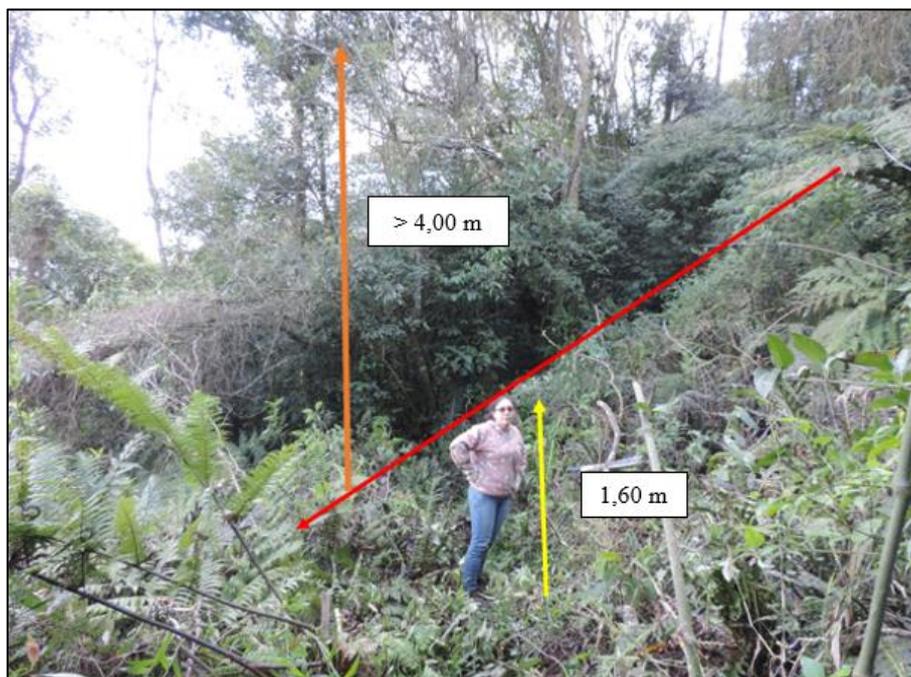


Figura 12 – Evidências de fluxo de detritos

4.2.1.4. OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS DE ENTRADA

As faixas de variação dos parâmetros foram estabelecidas observando os valores registrados em literatura sobre cada um dos itens. Também foram considerados os valores utilizados em trabalhos realizados com Kanako-2D. Primeiramente foram simulados os valores extremos das faixas de variação (análise de sensibilidade por rastreamento) e posteriormente, de acordo com a variabilidade das áreas atingidas e do alcance, diversos intervalos foram analisados (análise de sensibilidade local).

4.2.2. VERTENTE HIPOTÉTICA

A utilização de vertentes reais pode estar associada a peculiaridades geomorfológicas. Os terrenos hipotéticos são considerados terrenos ideais, com declividades constantes ao longo da vertente e também ao longo da planície aluvial. Tais

condições, no entanto, não reproduzem necessariamente o que acontece no terreno quando da ocorrência de um fluxo de detritos.

Visando analisar a influência da topografia na propagação e no alcance do fluxo de detritos, foi realizada análise de sensibilidade para uma vertente hipotética com a mesma declividade da vertente real e da planície aluvial da bacia do arroio Böni para fins comparativos. Condicionantes do terreno podem ser esclarecidas a partir de comparação de situações análogas em terrenos reais e ideais.

4.2.3. COMPARAÇÃO ENTRE VERTENTE REAL E HIPOTÉTICA

A comparação entre a vertente real e a vertente hipotética possibilitou avaliar os efeitos da topografia na propagação de fluxos de detritos. Não é suficiente condicionar a análise de sensibilidade apenas na condição real ou apenas na condição hipotética. A vertente real está condicionada à geomorfologia enquanto a vertente hipotética está condicionada a um modelo ideal.

A partir da comparação entre ambas vertentes, foi possível inferir a influência da topografia na propagação de fluxos de detritos. Além disso, foi possível verificar o funcionamento do modelo sob diferentes condições de terreno, a partir da criação de vertentes e planícies aluviais hipotéticas. O presente trabalho seguiu o fluxograma da Figura 13:

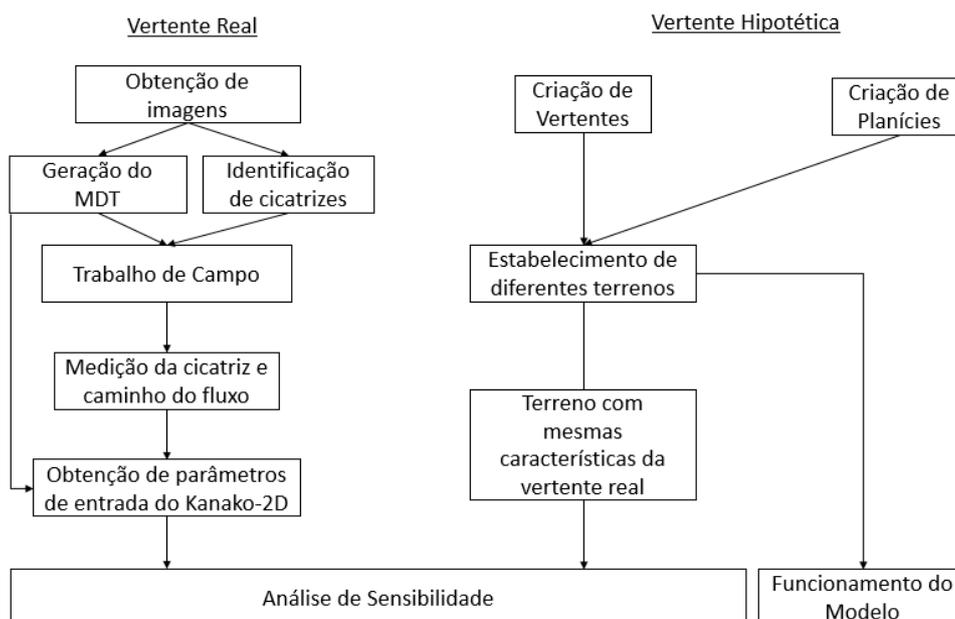


Figura 13 – Fluxograma do presente trabalho

4.2.4. CRIAÇÃO DE DIFERENTES CONDIÇÕES DE TERRENO PARA AVALIAR A INFLUÊNCIA DA DECLIVIDADE NO ALCANCE E NA ÁREA ATINGIDA

Foram criadas diferentes condições de terreno visando avaliar o efeito da declividade nos resultados do modelo Kanako-2D, com diferentes inclinações de vertente e de planícies aluviais. Para tal, algumas condições físicas foram observadas.

Takahashi (2007) comentou que os sedimentos começam a se depositar a partir de inclinações menores que 17° . Dado isso, foram avaliadas planícies aluviais com inclinações entre 0 e 17° . As inclinações de vertentes utilizadas variam entre 30 e 90° , buscando verificar se existe uma condição crítica para o funcionamento do modelo e também uma condição crítica para a propagação de fluxos de detritos.

A representação de terreno hipotética considerada neste trabalho é visualizada na Figura 14 e as combinações entre as inclinações simuladas são visualizadas na Tabela 2.

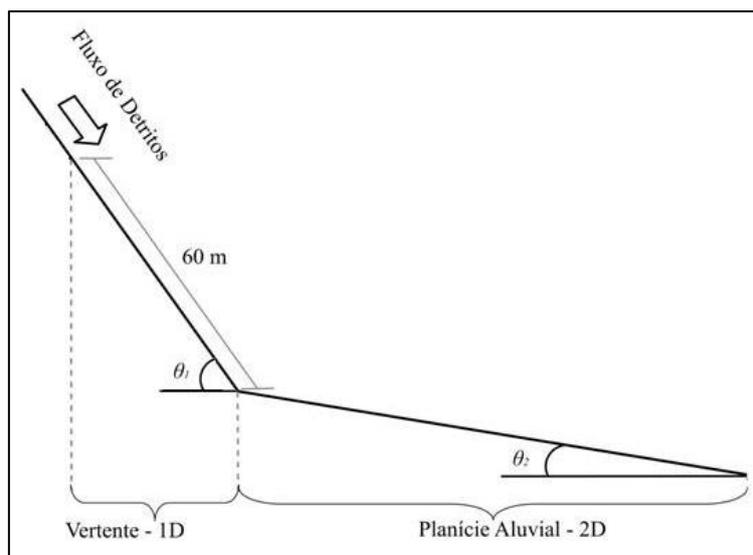


Figura 14 – Vertente hipotética

Tabela 2: Condições de terreno para avaliar a influência da declividade no fluxo de detritos.

Vertente – θ_1 (°)	Planície Aluvial - θ_2 (°)
30	0
	7
	10
	17
45	0
	7
	10
	17
60	0
	7
	10
	17
90	0
	7
	10
	17

4.2.5. MEDIÇÃO DOS FLUXOS DE DETRITOS

A medição do alcance, largura e área atingida pelo fluxo de detritos pode ser visualizada na Figura 15. As medições permitiram que fosse realizada a análise de sensibilidade do modelo Kanako-2D.

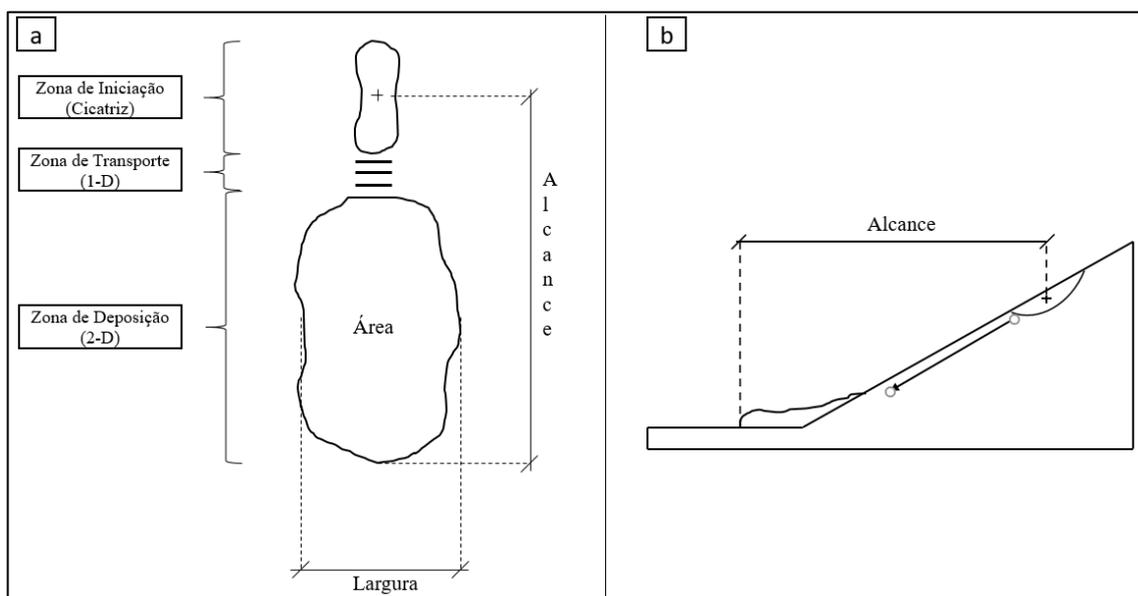


Figura 15 – Medições das características dos fluxos de detritos: (a) vista superior; e (b) vista lateral.

O alcance do fluxo de detritos foi medido desde o centro da área de iniciação (cicatriz do escorregamento) até a total deposição do material na planície aluvial (zona de deposição). A largura do fluxo de detritos foi considerada como sendo a largura média ao longo da mancha de inundação. A área atingida considerada foi a da planície aluvial, ou seja, a área atingida na zona de deposição (2-D), não sendo considerada a parcela referente à zona de transporte (1-D).

Para avaliar as áreas de erosão e deposição, foram avaliados os valores de altura de sedimentação *pixel a pixel*. Quando a altura de sedimentação foi negativa, considerou-se que houve erosão. Quando a altura de sedimentação foi positiva, considerou-se que houve sedimentação. A soma das duas foi considerada como área total.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS DE ENTRADA

A partir da revisão bibliográfica foi possível verificar que o modelo Kanako-2D é mais utilizado no Japão, com 15 trabalhos. A distribuição geográfica dos trabalhos publicados com o modelo é visualizada na Figura 16.

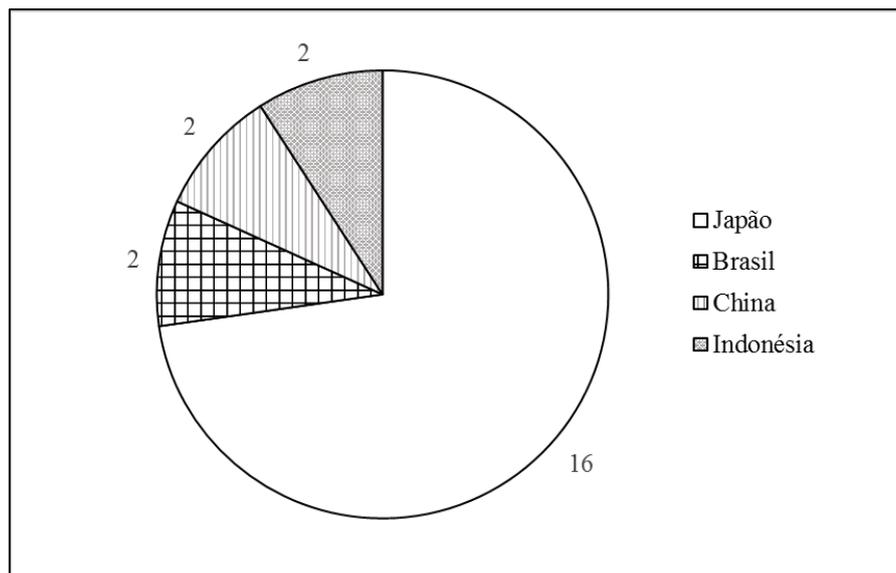


Figura 16 – Utilização de Kanako-2D no mundo.

Os valores mais comumente utilizados dos parâmetros nas simulações com Kanako-2D observados na literatura podem ser visualizados na Tabela 3. Percebe-se que alguns dos parâmetros são utilizados deliberadamente nos valores padrão informados no modelo. Outros, no entanto, realizam pequenas variações nos parâmetros de entrada visando calibração.

Ressalta-se o trabalho de Liu et al. (2013) em que os diâmetros foram alterados para identificar as diferentes alterações no leito do canal e os diferentes alcances e áreas atingidas, respectivamente. Nota-se que Nakatani et al. (2016a) simularam duas diferentes condições de massa específica da fase fluida para avaliar os efeitos do fluxo de detritos na presença de casas e residências.

Tabela 3: Valores comumente utilizados nas simulações com Kanako-2D

	MEL (kg/m³)	MFL (kg/m³)	CCM (m³/m³)	CRM	CTE	CTD	DIA (m)	ANG (°)	CSD (g/L)
Valores padrão	2650	1000	0,65	0,03	0,0007	0,05	0,45	37	-
Sumaryono et al. (2009)	2650	1100	0,60	0,03	0,0007	0,05	1,00	35	-
Nakatani et al. (2009)	2550	1180	0,60	0,03	0,0007	0,05	0,05	48	-
Nakatani et al. (2010)	2650	1180	0,60	0,03	0,0007	0,05	0,05	37	-
Nakatani et al. (2011)	2650	1000	0,65	0,03	0,0007	0,05	0,05	37	-
Nishigushi et al. (2011)	2650	1000	0,65	0,03	0,0007	0,05	0,45	37	-
Liu et al. (2012)	2550	1170	0,60	0,03	0,0007	0,05	0,80	35	0,3
Wisoyo (2012)	2830	1000	0,65	0,03	0,0007	0,05	0,01	35	-
Liu et al. (2013)	2650	1000	0,60	0,03	0,0007	0,05	0,1	35	-
Uchida et al. (2013)	2650	1000	0,65	0,06	0,0007	0,05	0 – 0,10	35	-
Nakatani et al. (2013)	2650	1000	0,60	0,03	0,0007	0,05	0,45	37	-
Michel et al. (2015a)	2650	1200	0,65	0,03	0,0007	0,05	0,20	30,15	0,5
Michel et al. (2015b)	2650	1200	0,65	0,03	0,0007	0,05	1,00	31,50	-
Itozaku et al. (2016)	2650	1200	0,65	0,03	0,0007	0,05	0,05	35	-
Nakatani et al. (2016b)	2650-2650	1000-1200	0,60	0,03	0,0007	0,05	0,15	35	-
Nakatani et al. (2016c)	2650	1000	0,65	0,03	0,0007	0,05	0,20	35	-

Embora diferentes condições tenham sido simuladas com Kanako-2D na literatura apresentada na Tabela 3, não se verifica a realização de análise de sensibilidade do modelo às variações dos parâmetros de entrada. Dado isso, buscou-se na literatura as faixas de valores fisicamente coerentes para cada um dos parâmetros (Tabela 4).

Tabela 4: Faixa de variação dos parâmetros

Parâmetro	Faixa de Valores	Referências	Valor Padrão (Kanako-2D)
Massa específica do leito (kg/m ³)	1600 – 2700	RIO DE JANEIRO (2016)	2650
Massa específica da fase fluida (kg/m ³)	1000 – 1500	FERNANDO (2013)	1000
Concentração da camada móvel (m ³ /m ³)	0,00 – 0,65	TAKAHASHI (2007)	0,65
Coefficiente de Rugosidade de Manning	0,025 – 0,200	CHOW (1959)	0,030
Coefficiente de Taxa de Erosão	0,0001 – 0,1000	TAKAHASHI (2007)	0,0007
Coefficiente de Taxa de Deposição	0,0001 – 1,00	TAKAHASHI (2007)	0,05
Diâmetro dos sedimentos (m)	0,01 - 10	-	0,45
Ângulo de atrito interno (°)	22 – 40	ASTM (1985)	37
Concentração de sedimentos	0,44 – 0,77	COSTA (1988)	0,50

Ao todo foram realizadas 160 simulações com Kanako-2D na execução deste trabalho buscando avaliar a sensibilidade do modelo à variação dos parâmetros conforme faixa descrita na Tabela 4. Os valores utilizados em cada simulação e o número de simulações por parâmetro é visualizado na Tabela A1 (Apêndice). Um exemplo dos resultados dessas simulações é visualizado na Figura 17.

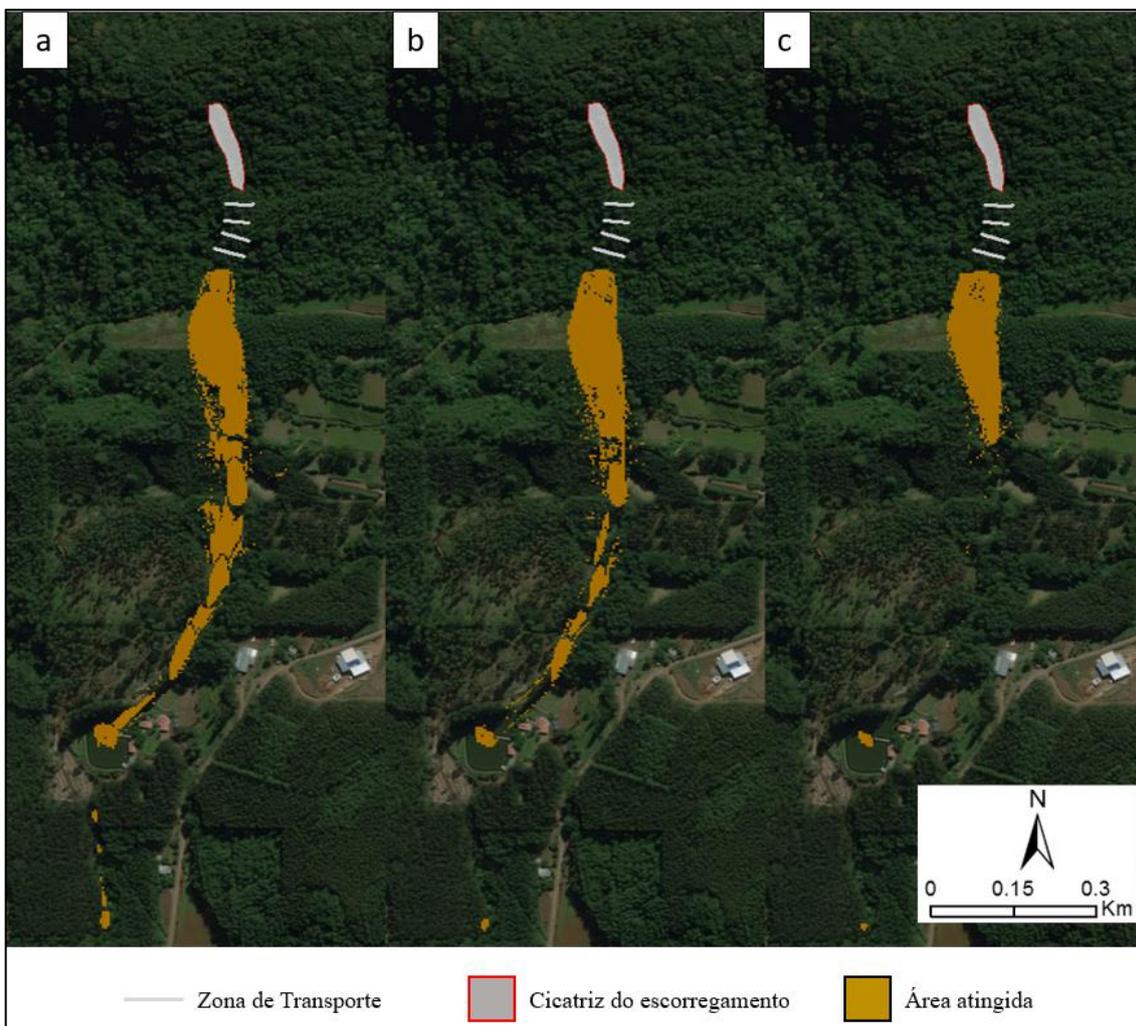


Figura 17 – Exemplo de visualização do resultado do Kanako-2D para diferentes diâmetros dos sedimentos: (a) $d=0,15$ m; (b) $d=0,30$ m; e (c) $d=0,50$ m.

5.2. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA VERTENTE REAL

Os resultados consistem em análise de sensibilidade local, em que os parâmetros são variados dentro de uma faixa de valores (HEISELBERG et al., 2009) individualmente e os demais são mantidos constantes. Nesse trabalho, os valores de referência são os valores padrão contidos no Kanako-2D. A sensibilidade do modelo à variação dos

parâmetros foi analisada em termos de alcance, área atingida e largura média da mancha de inundação.

As Figuras 18, 19, 20, 21 e 22 apresentam os resultados da análise de sensibilidade para o alcance do fluxo de detritos em termos de alcance, área total, área de erosão, área de deposição e largura média do fluxo, respectivamente. Nota-se que os valores de referência utilizados na análise (valores padrão do Kanako-2D) não se referem a valores médios observados dos parâmetros verificados na literatura, sendo, por vezes, muito próximos aos extremos estabelecidos. Os resultados expressos graficamente apresentam as zonas em que houve variação dos resultados. Situações em que houve grande variação no parâmetro e baixa variação relativa na resposta, houve supressão dos resultados graficamente, apenas para fins de visualização das zonas em que houve maior sensibilidade do modelo. Os resultados completos podem ser visualizados nos Apêndices.

Como as diferenças de faixas de variação dos parâmetros e das respostas em alguns casos são de ordem de grandeza diferentes, os resultados foram discutidos individualmente nos itens subsequentes. A Tabela A2 (Apêndice) apresenta os resultados para todas as simulações realizadas.

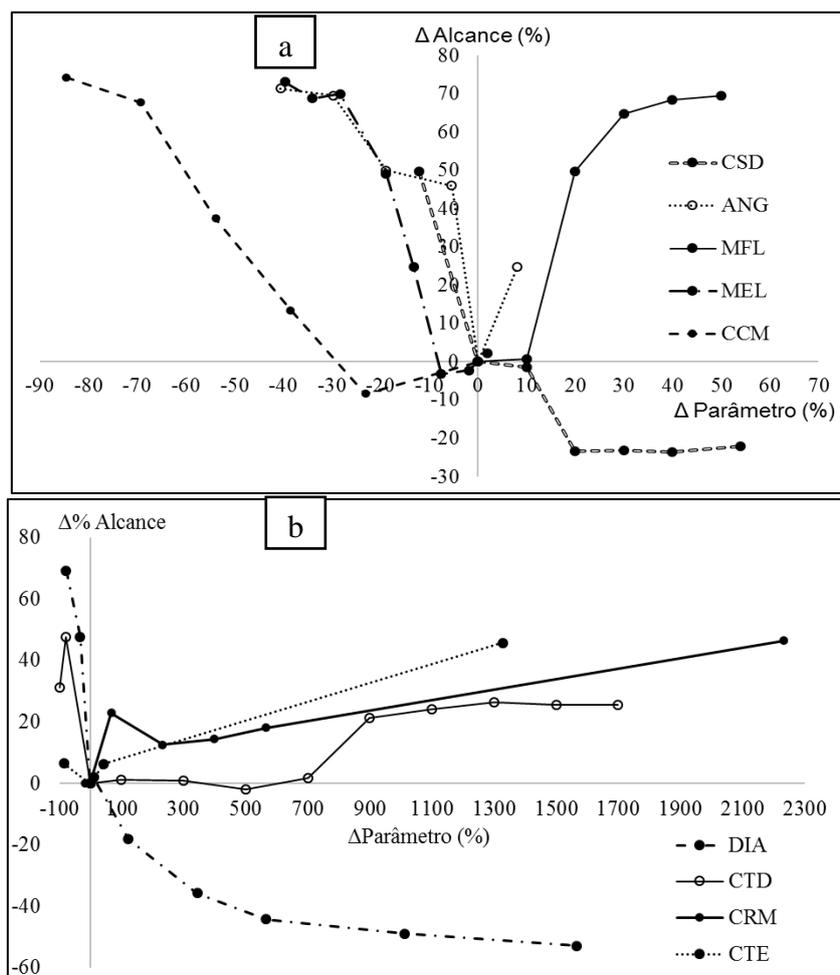


Figura 18 – Análise de Sensibilidade do modelo Kanako-2D - Alcance: (a) CSD, ANG, MFL, MEL, CCM; e (b) DIA, CTD, CRM, CTE.

Observa-se, a partir da Figura 18, que o alcance do fluxo de detritos é fortemente afetado pela variação de alguns parâmetros, especialmente MFL, CSD e ANG. A variação do parâmetro DIA também afeta os resultados do modelo, no entanto, é necessária uma grande variação percentual do parâmetro para que isso ocorra. Embora percentualmente a variação necessite ser grande, em termos físicos essa variação pode não ser tão significativa.

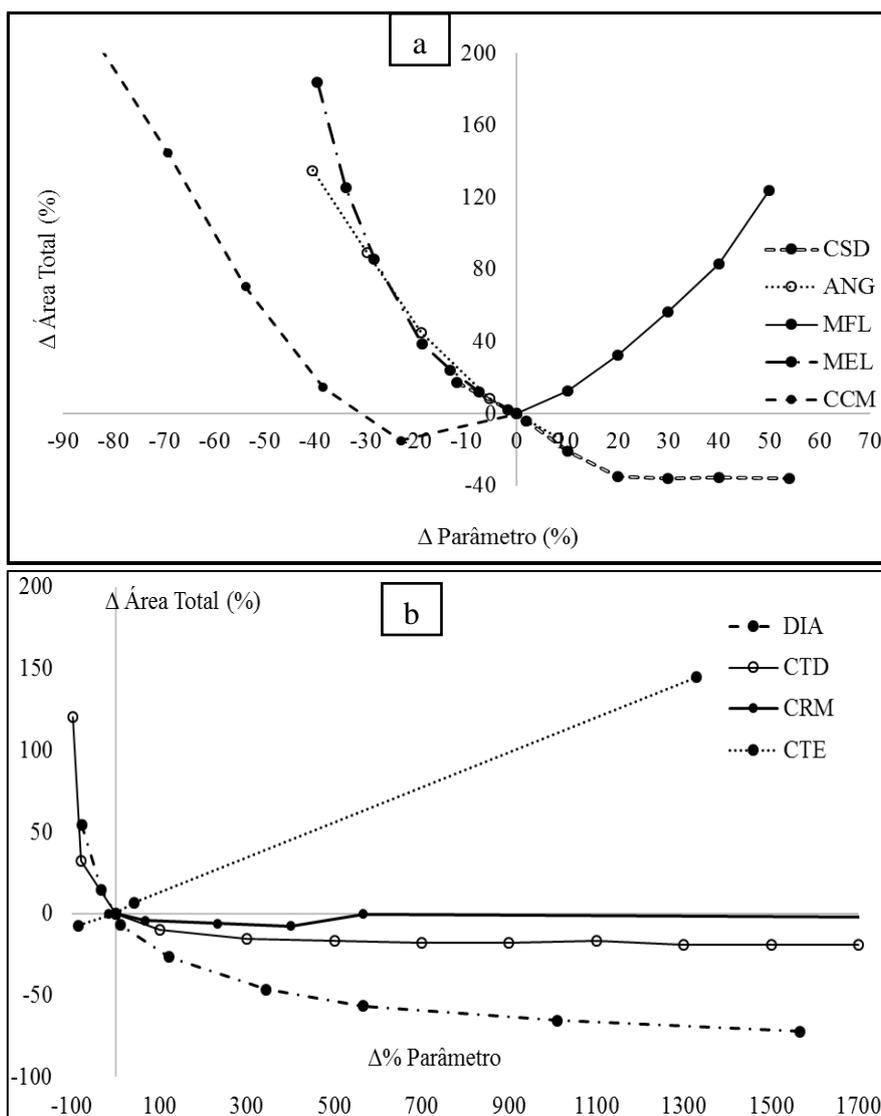


Figura 19 – Análise de Sensibilidade do modelo Kanako-2D – Área total: (a) CSD, ANG, MFL, MEL, CCM ; e (b) DIA, CTD, CRM, CTE.

A partir da Figura 19 observa-se que, em termos de área total afetada pelo fluxo de detritos, a variação de alguns parâmetros não afetou a sensibilidade do modelo Kanako-2D. Parâmetros como CTE, CTD e CRM não apresentaram grandes variações de resposta mesmo quando submetidos a grandes variações do parâmetro. Os parâmetros da Figura 19a geraram maior sensibilidade do modelo. Destaca-se, no entanto, que o parâmetro CSD não apresentou variação na resposta quando submetido a variações do parâmetro maiores que 20%.

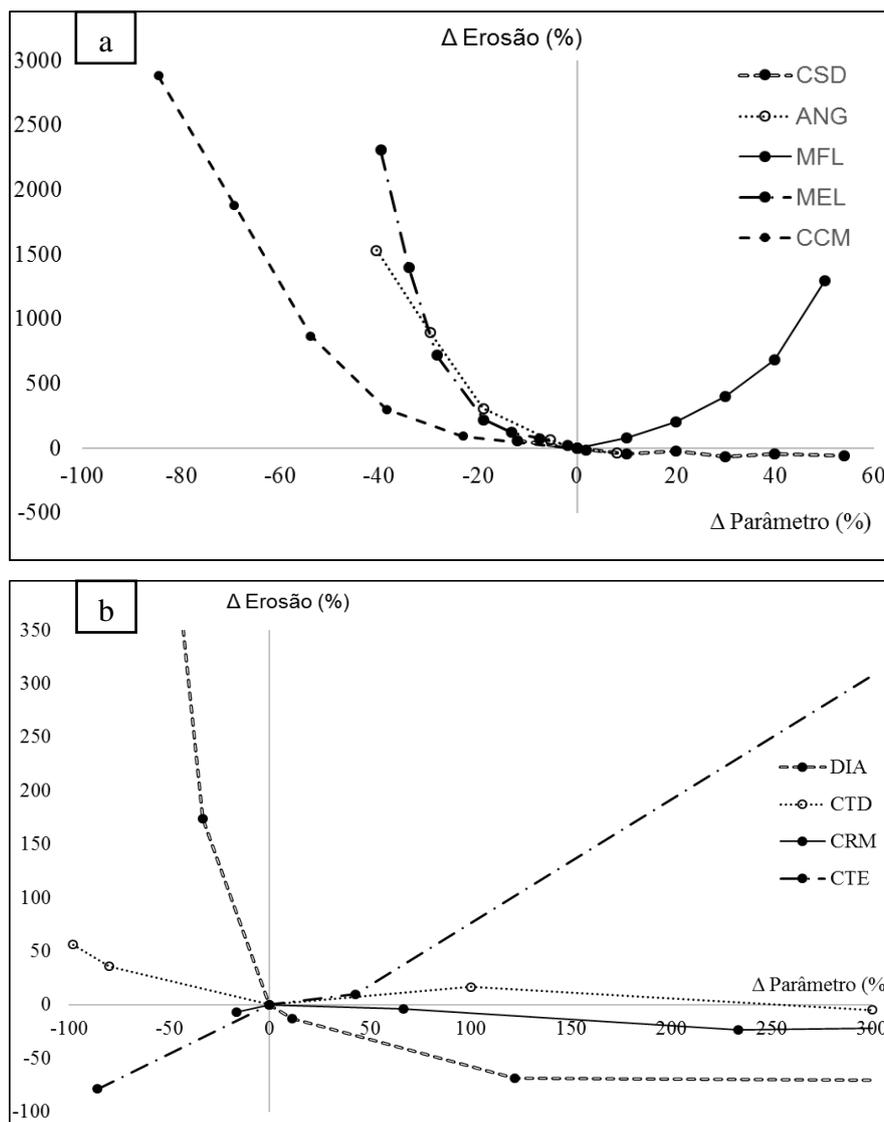


Figura 20 – Análise de Sensibilidade do modelo Kanako-2D – Área de Erosão:
 (a) CSD, ANG, MFL, MEL, CCM ; e (b) DIA, CTD, CRM, CTE.

Em termos de área de erosão, conforme Figura 20, os parâmetros que mais geraram sensibilidade ao modelo foram CCM, MFL, MEL e DIA. O parâmetro MEL está relacionado a características do terreno, enquanto CCM, MFL e DIA são característicos do fluxo de detritos e que podem afetar o modo de interação do fluxo com o leito.

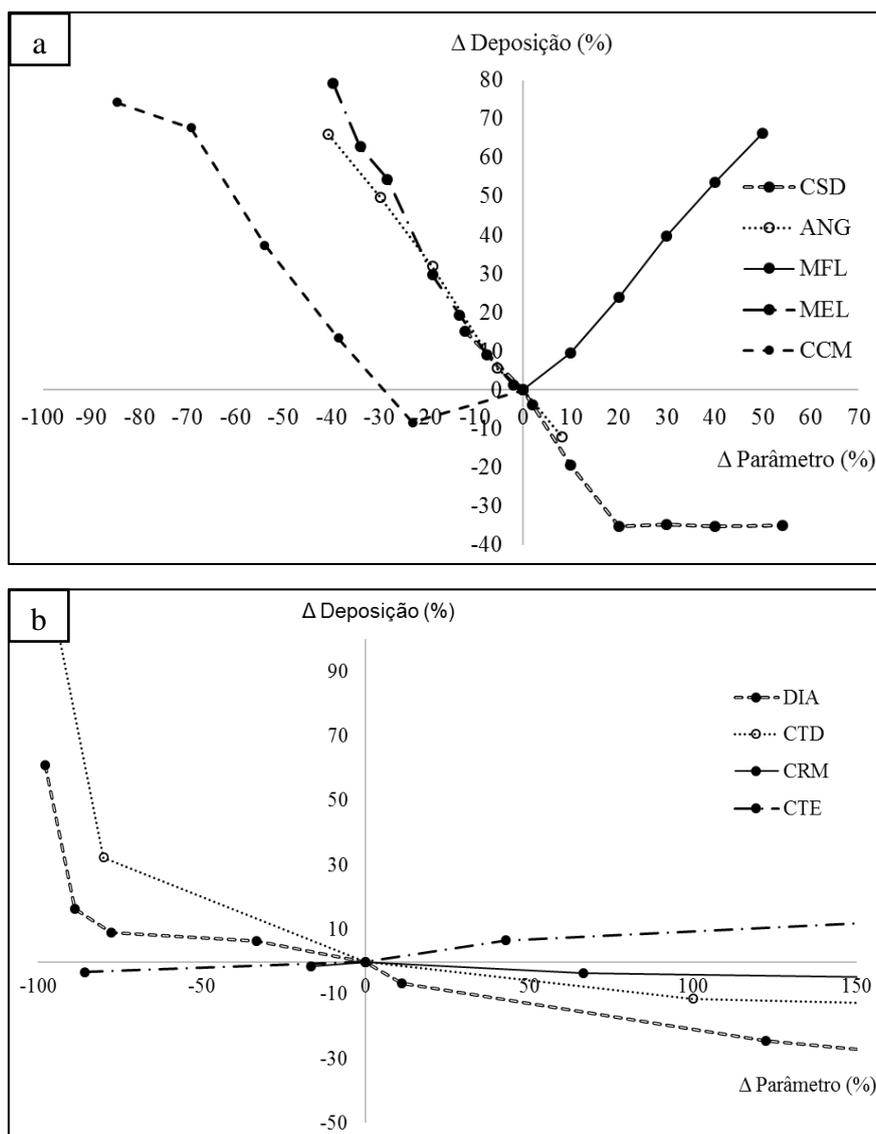


Figura 21 – Análise de Sensibilidade do modelo Kanako-2D - Área de deposição: (a) CSD, ANG, MFL, MEL, CCM ; e (b) DIA, CTD, CRM, CTE.

Quanto à área de deposição, os parâmetros que mais afetaram a sensibilidade do modelo foram MFL, CSD e CCM. Conforme Takahashi (1991), existe uma relação entre CCM e CSD que proporciona a deposição dos sedimentos, de modo que estes eram resultados esperados em termos de deposição.

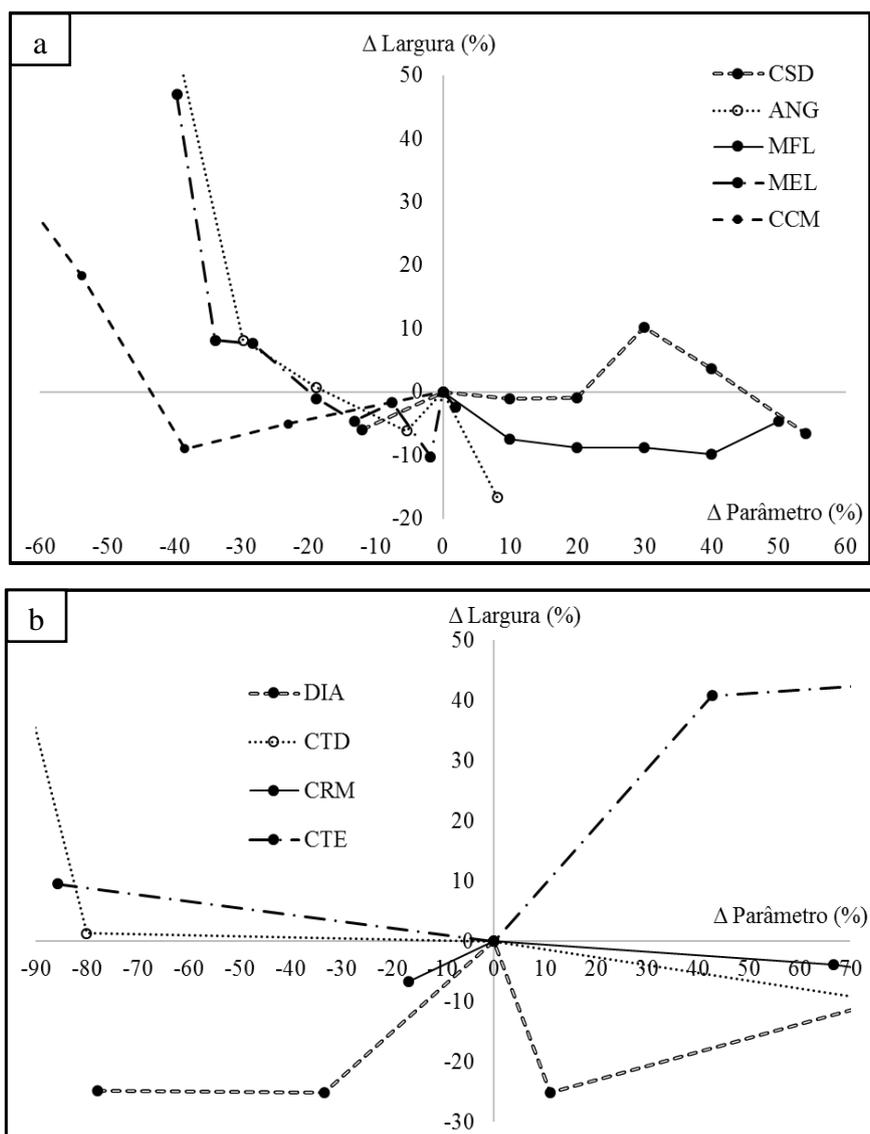


Figura 22 – Análise de Sensibilidade do modelo Kanako-2D - Largura: (a) CSD, ANG, MFL, MEL, CCM; e (b) DIA, CTD, CRM, CTE.

A largura média do fluxo (Figura 22) parece ser controlada pela topografia, uma vez que há variações não esperadas no seu valor. Além disso, a largura do fluxo pode modificar à medida em que o alcance muda, permitindo que novas configurações sejam estabelecidas.

5.2.1. DIÂMETRO DOS SEDIMENTOS (DIA)

O modelo Kanako-2D é altamente sensível ao diâmetro dos sedimentos, sendo um dos parâmetros mais sensíveis e apresentando altas variações no alcance e na área atingida

pelo fluxo (Figura 23). No entanto, como a variação do tamanho dos sedimentos em termos percentuais é muito alta, já que o diâmetro pode variar desde centímetros a metros. Quanto menor o diâmetro dos sedimentos, maior foi a propagação do fluxo, percorrendo distâncias maiores. Conforme o modelo de fluido dilatante proposto por Bagnold (1954), para sedimentos menores é possível ter mais partículas por unidade de área, o que faz aumentar o número de colisões e manter as condições necessárias para a sustentação das partículas na propagação do fluxo.

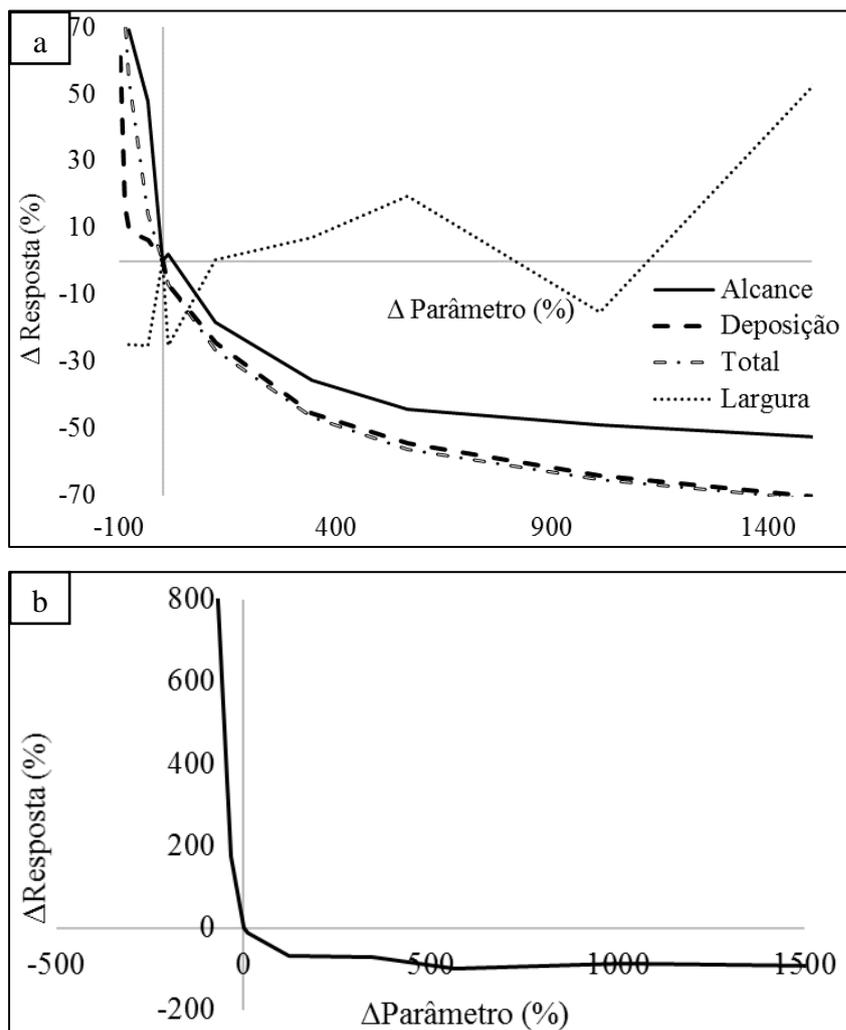


Figura 23 – Análise de Sensibilidade: diâmetro dos sedimentos: (a): alcance, deposição, área total, largura; e (b) erosão

Observou-se, também, que quanto menor o diâmetro, maior foi a área total e a área de deposição atingida pelo fluxo. No entanto, a área de erosão foi menor nessa condição. Em relação à largura do fluxo, percebe-se que quanto maior o diâmetro, maior foi a largura. Isso ocorre porque o aumento do diâmetro dos sedimentos reduz o alcance

da distância e aumenta o espalhamento da erosão, conforme equações propostas por Takahashi e Nakagawa (1991). Tal situação pode ser explicada com o aumento do poder destrutivo do material.

Os resultados são concordantes com a afirmação de Takahashi (2007), isto é, quanto menor o tamanho dos sedimentos, maior será a mobilidade do fluido. Também são concordantes com Uchida et al. (2013), que comentou que os padrões de erosão, deposição e alcance são fortemente influenciados pelo diâmetro dos sedimentos, mas que é necessário definir este parâmetro empírica e teoricamente, uma vez que os valores utilizados nas simulações podem não corresponder aos valores observados em campo. Dado isso, considera-se o parâmetro diâmetro dos sedimentos como altamente sensível na modelagem de fluxos de detritos utilizando Kanako-2D.

5.2.2. COEFICIENTE DE RUGOSIDADE DE MANNING (CRM)

A faixa de valores utilizada nas simulações deste parâmetro variou desde as menores rugosidades para canais naturais (0,025) até valores de rugosidade bem altos (0,7). Apesar de o valor 0,7 estar fora da faixa considerada para canais naturais por Chow (1959), a rugosidade na zona de iniciação e de transporte de fluxos de detritos cuja deflagração ocorreu por escorregamentos é extremamente elevada. Nesses locais normalmente são verificados canais de baixa ordem e, na condição da área de estudo apresentada neste trabalho, com grande influência da vegetação.

Quanto aos resultados das simulações (Figura 24), percebe-se que, de maneira geral, quanto maior é o seu valor, maior é o alcance do fluxo de detritos. No entanto, erosão, deposição, área total e largura são pouco afetadas pela variação do parâmetro. Por exemplo, é necessária uma variação aproximada de 233% no valor do parâmetro para ter uma redução de 23% na área de erosão e de 5% na área de deposição.

Nota-se que, em variações de até 500% dos valores do parâmetro, o modelo apresenta resposta de maneira não esperada, sem apresentar uma tendência clara em cada um dos itens analisados.

Hussin (2011) chegou a resultados diferentes, em que a rugosidade impedia o fluxo de prosseguir. Entretanto, o modelo utilizado por ele não considera o modelo de fluido dilatante, e a rugosidade apresenta caráter simplesmente resistivo.

O coeficiente de rugosidade de Manning está normalmente relacionado a forças de atrito e, portanto, de resistência. Desse modo, poderia se imaginar que valores maiores de rugosidade devessem implicar em menor alcance. No entanto, dada a teoria do fluido dilatante, uma rugosidade maior pode implicar num número maior de colisões entre as partículas permitindo que elas se mantenham suspensas no fluido por mais tempo e, por consequência, percorram distâncias maiores.

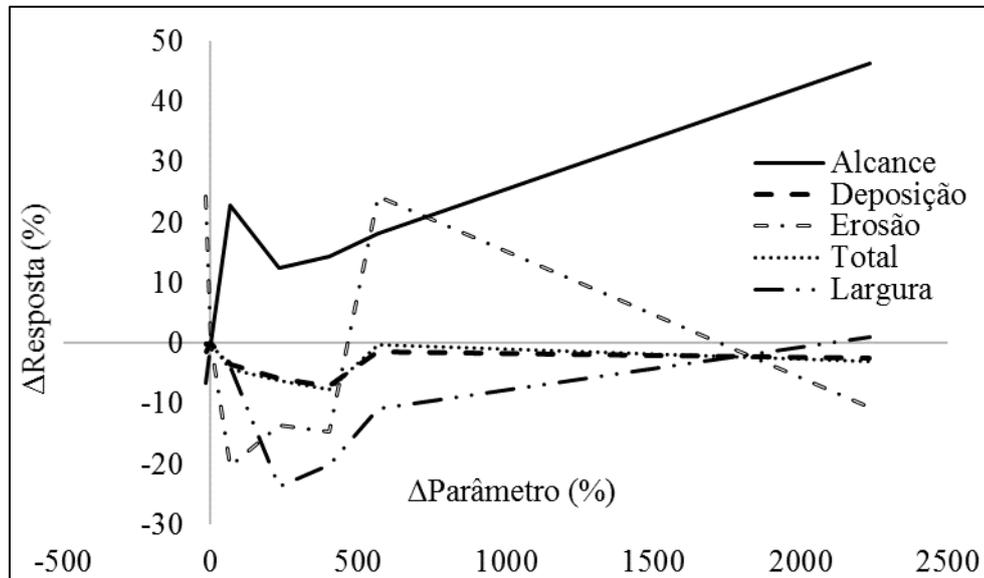


Figura 24 – Análise de Sensibilidade: coeficiente de rugosidade de Manning

5.2.3. COEFICIENTE DE TAXA DE DEPOSIÇÃO (CTD)

O coeficiente de taxa de deposição não é um parâmetro que gera sensibilidade no modelo de fluxos de detritos Kanako-2D. Dentro da faixa de valores possíveis para este parâmetro proposta por Takahashi (2007) foram observados dois padrões de comportamento para o alcance do fluxo (Figura 25), sendo que para variações de até 700% no valor do parâmetro, praticamente não há variação no alcance. Já para variações maiores que 900% no valor do parâmetro, o alcance aumenta em torno de 20%, quando passa a se manter constante em torno deste valor.

Em termos de área total atingida pelo fluxo, valores menores que o padrão para este parâmetro fazem com que a área atingida seja maior. Para valores maiores, há redução da área atingida. Quando a variação do coeficiente de taxa de deposição chega a 300%, a variação da área total é de aproximadamente -15%, mantendo-se constante a partir daí.

Takahashi (2007) comentou que existem três processos de deposição possíveis ao longo de um fluxo de detritos: (i) quando a inclinação da superfície é menor do que a inclinação da frente do fluxo ocorre deposição; (ii) quando a inclinação da superfície é menor do que a inclinação crítica (em que inevitavelmente não ocorrerá deposição) mas maior que a inclinação da frente do fluxo, parte dos sedimentos se deposita e parte segue em movimento; e (iii) quando a declividade na frente do fluxo é maior que a declividade crítica, o fluxo segue em movimento. Tais afirmações trazem evidências de que o coeficiente de deposição poderia ser mais representativo no processo (ii), uma vez que o processo (i) está intimamente relacionado à topografia e o processo (iii) pode estar mais relacionado ao tamanho e à concentração dos sedimentos na parte frontal do fluxo.

Na condição de deposição devido ao processo (ii), o fluxo desacelerado fará com que algumas partes da fração sólida se depositem. Quando isso acontece, o conteúdo de água ajuda a diluir os sólidos restantes, aumentando a mobilidade do fluxo. Isso pode explicar porque o alcance do fluxo aumentou quando a taxa de deposição aumentou.

Tal parâmetro aparece no equacionamento do modelo Kanako-2D nas equações de continuidade do fluxo. Entretanto, conforme observado na Tabela 3, sua faixa de valores possíveis e com sentido físico ainda não foi amplamente debatida, visto que, para os trabalhos realizados com o modelo Kanako-2D os valores de coeficiente de taxa de deposição utilizados foram sempre os valores padrão.

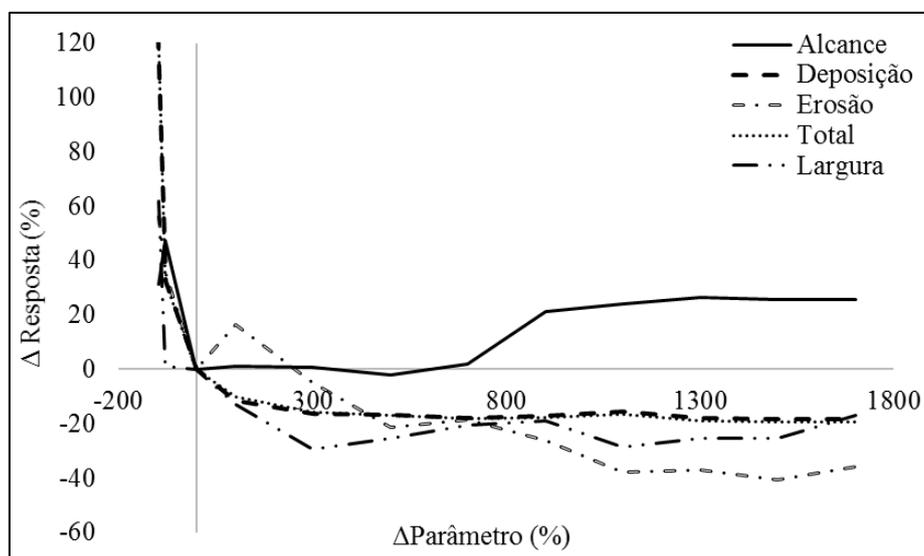


Figura 25 – Análise de Sensibilidade: coeficiente de taxa de deposição

5.2.4. COEFICIENTE DE TAXA DE EROSÃO (CTE)

A faixa de valores utilizada para este parâmetro corresponde aos valores possíveis indicados por Takahashi (2007). Entretanto, é necessária melhor definição teórica e empírica do parâmetro, uma vez que o mesmo compreende as incertezas em relação a erosão durante fluxos de detritos e não há indicativo de como proceder com medições em campo ou em laboratório. O modelo Kanako-2D apresentou sensibilidade a este parâmetro (Figura 26).

Os processos erosivos estão equacionados pela conservação do momento, cuja variação está relacionada ao momento gerado por forças gravitacionais, momento na troca de declividade, pressão hidrostática e momento gerado por forças resistivas. Infere-se que tal coeficiente esteja relacionado à parcela referente a forças resistivas, no entanto, outros parâmetros também estão, tais como coeficiente de rugosidade de Manning, ângulo de atrito interno e coeficiente de taxa de deposição.

Em relação ao alcance, para variações até aproximadamente 2000% no parâmetro, a resposta variou positivamente, ou seja, maior foi o alcance. Para variações superiores, o alcance não apresentou mais variação, isto é, independente de aumentar o valor do parâmetro pareceu ter ocorrido um alcance máximo do fluxo de detritos.

Em relação a área (total, erosão e deposição), quanto maior os valores utilizados de CTE, maiores foram os resultados obtidos. Tais resultados corroboram com o equacionamento do modelo a partir de forças resistivas e com o modelo de fluido dilatante.

Para a largura, quanto maior os valores utilizados, maiores foram as larguras verificadas. Para variações do parâmetro entre 6000 e 8000% foram verificadas as maiores variações de resposta, indicando um comportamento não esperado do modelo. Tal situação pode ter sido influenciada pelas condições topográficas do terreno, permitindo um maior espalhamento do fluxo de detritos.

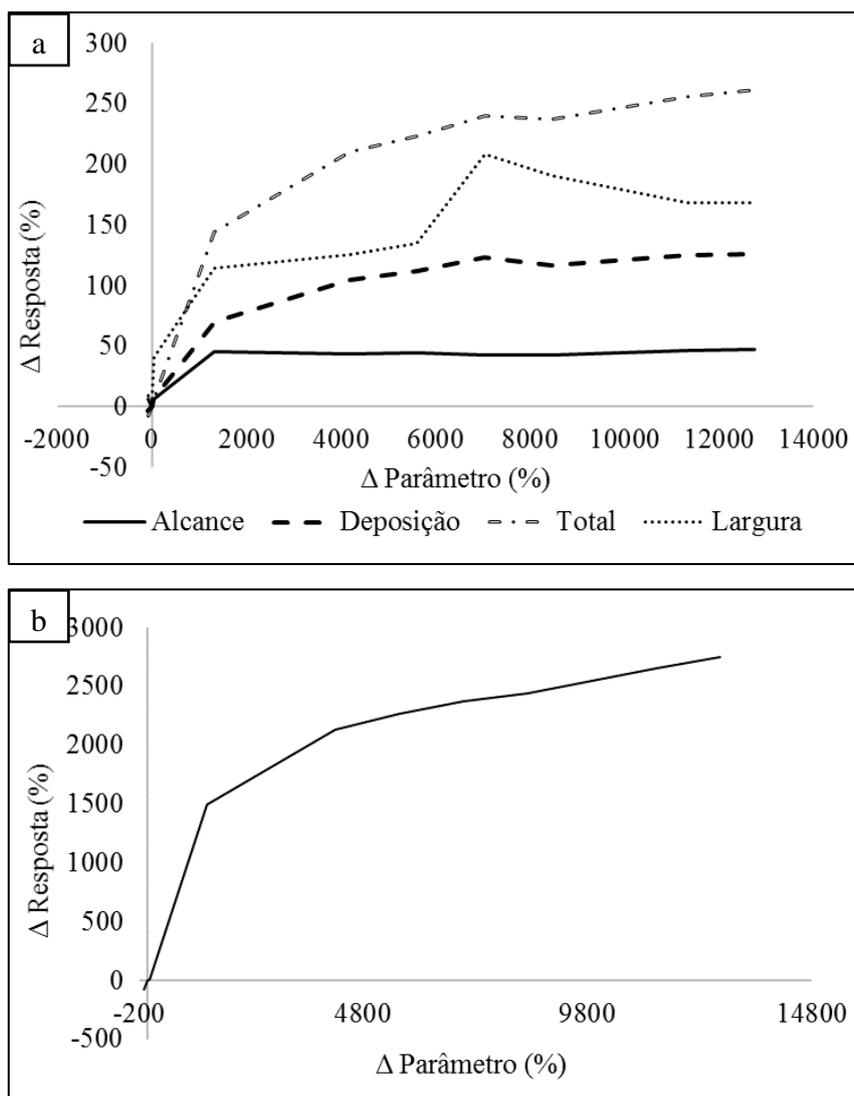


Figura 26 – Análise de Sensibilidade - coeficiente de taxa de deposição: (a) alcance, deposição, total, largura; e (b) erosão.

5.2.5. MASSA ESPECÍFICA DA FASE FLUIDA (MFL)

O valor de referência deste parâmetro também não é um valor médio, mas sim o menor valor de massa específica que um fluxo de detritos pode apresentar conforme Fernando (2013). Os valores de massa específica são influenciados pela quantidade de sedimentos presente num determinado volume, sendo que quanto maior a quantidade de sedimentos maior será o valor de massa específica do fluido. Os resultados podem ser visualizados na Figura 27.

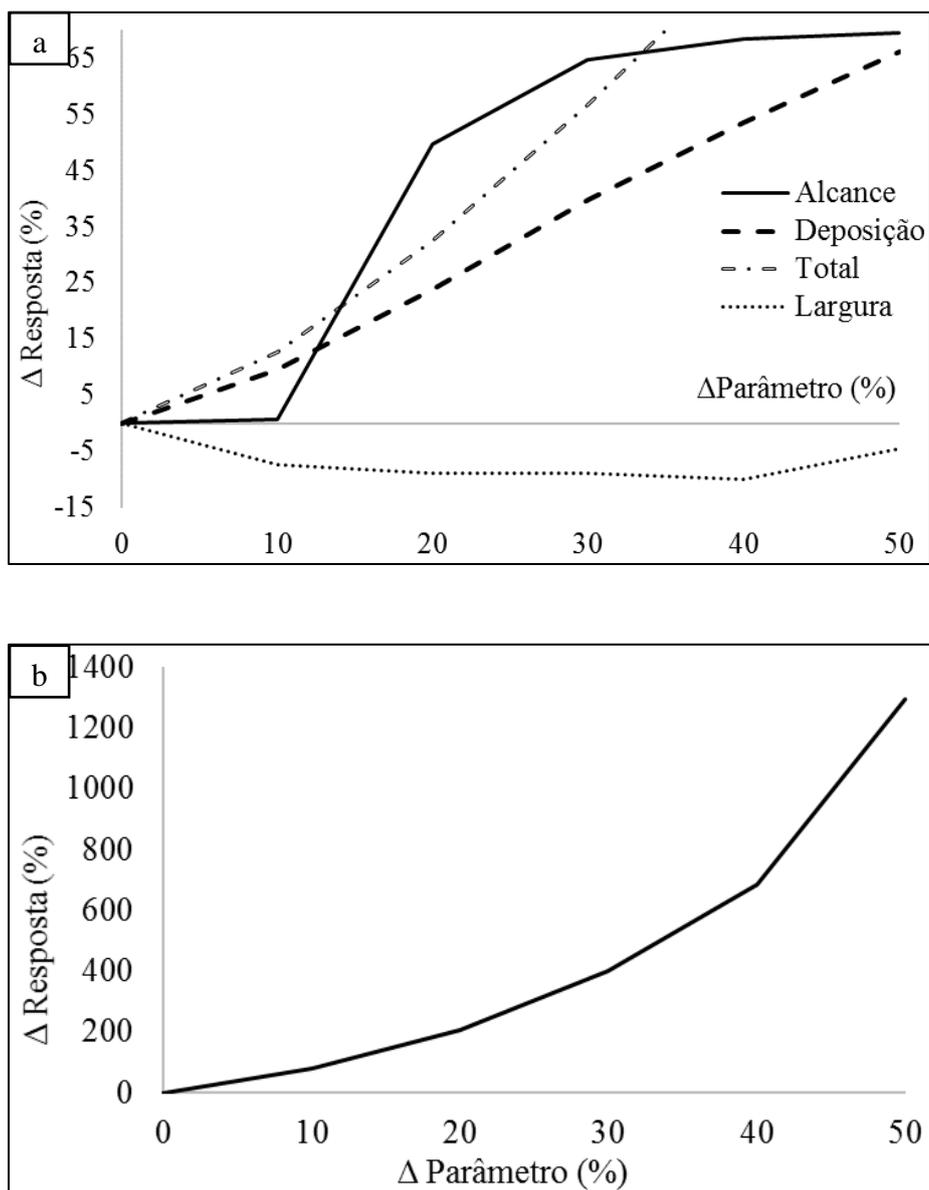


Figura 27 – Análise de Sensibilidade - massa específica da fase fluida: (a) alcance, deposição, total, largura; e (b) erosão.

O modelo apresentou alta sensibilidade a este parâmetro em termos de alcance, de área erosão, deposição e total. Quanto maior os valores utilizados no parâmetro, maior foi a variação da resposta.

Quanto à largura do fluxo, ao passar a massa específica da fase fluida de 1000 para 1100 kg/m³, verificou-se uma redução da largura. Tal redução não sofreu grandes variações à medida que se aumentavam os valores de massa específica da fase fluida. A redução da largura associada ao aumento do alcance e da área atingida indica alteração da mancha de inundação da área atingida, sendo mais estreita e percorrendo uma distância e cobrindo uma área maior.

Pela teoria de fluxo dilatante e pela aproximação de fluxos de detritos pedregosos, o aumento da massa específica pode proporcionar maior possibilidade de colisões entre as partículas, gerando sustentação da massa fluida. Além disso, a massa específica da fase fluida pode interferir diretamente na capacidade e na competência de transporte de sedimentos, ou seja, massas específicas maiores na fase fluida podem conseguir carregar mais e maiores sedimentos, aumentando sua mobilidade.

Entretanto, ressalta-se que o aumento da massa específica associado à baixa concentração de sedimentos e diâmetro dos sedimentos muito grande pode acarretar em não-verificação do modelo de fluido dilatante. Isto é, a massa específica aumentaria devido aos sedimentos serem maiores mas não haveria colisões suficientes para manutenção do fluxo.

5.2.6. MASSA ESPECÍFICA DO LEITO (MEL)

Aqui também o valor padrão do modelo Kanako-2D não é um valor médio dos parâmetros, estando próximo a um dos valores extremos da faixa de variação observada na literatura e com significado físico. Os valores extremos considerados foram 1600 kg/m^3 referente a terreno arenoso e 2700 kg/m^3 referente à ardósia. O modelo Kanako-2D mostrou-se sensível às variações deste parâmetro em termos de alcance, área total, erosão, deposição e largura do fluxo (Figura 28).

Em termos de alcance, variações de -20% no parâmetro apresentaram maior taxa de variação da resposta, 50%. Para área total, área de erosão e largura do fluxo, variações de -40% no parâmetro apresentaram maior resposta, 180, 2500, 47 %, respectivamente. O leito por onde o fluxo de detritos está fluindo é a zona susceptível à mobilização e remobilização de material, de modo que quanto maior for sua massa específica, mais dificilmente o material será erodido. Com o incremento do material erodido para massas específicas menores (aumentando a área de erosão), haverá mais sedimentos fluindo no fluxo de detritos, o que implica em maior alcance e deposição em zonas mais longínquas conforme o modelo proposto por Takahashi (1991).

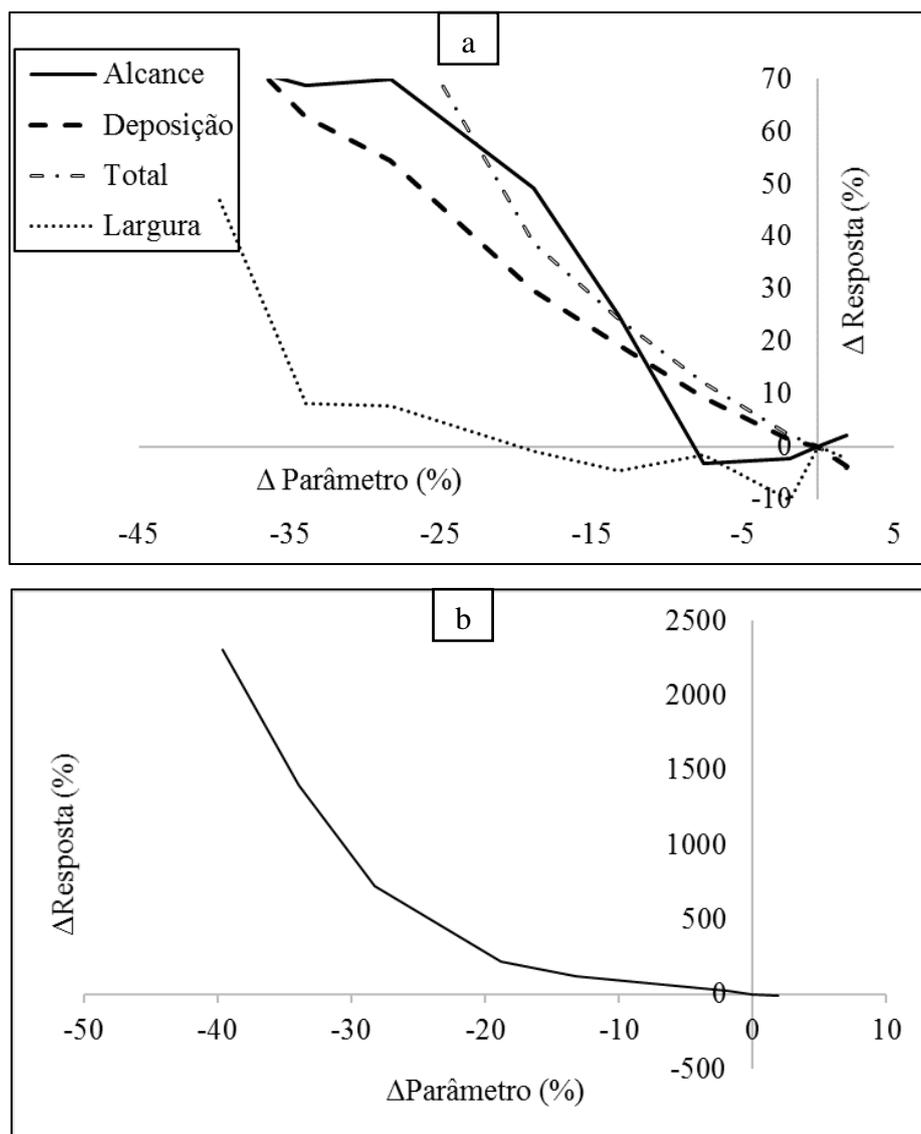


Figura 28 – Análise de Sensibilidade - massa específica do leito: (a) alcance, deposição, total, largura; e (b) erosão.

5.2.7. CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS (CSD)

Observou-se que quanto maior foi o valor da concentração de sedimentos, menor foi o alcance, a área total, a área de deposição e maior foi a largura do fluxo de detritos. Em relação à área de erosão, praticamente não houve variação à medida em que se aumentava a concentração de sedimentos. O modelo apresentou relativa sensibilidade para alcance do fluxo. Os resultados podem ser visualizados na Figura 29.

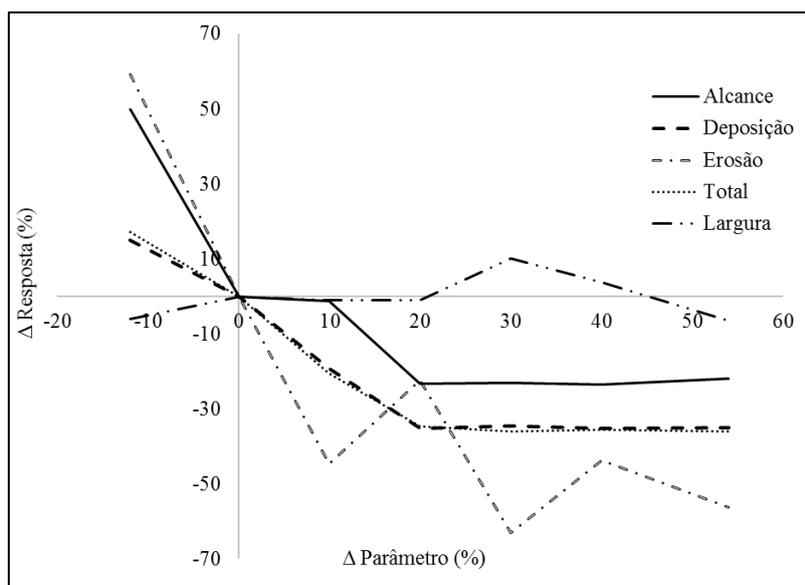


Figura 29 – Análise de Sensibilidade: concentração de sedimentos

A redução do alcance, a redução da área total e o aumento da largura do fluxo indicam alterações na mancha de inundação, evidenciando alterações no espalhamento do fluxo. Uma área atingida menor e uma largura maior indicam também um provável maior acúmulo em termos de altura do fluxo, no entanto, este trabalho não avaliou alturas de sedimentação.

Embora à primeira vista estes resultados pareçam destoar da teoria do fluido dilatante (BAGNOLD, 1954) e da aproximação para fluxos de detritos pedregosos (TAKAHASHI, 1991), uma vez que possibilitaria aumentar o número de colisões entre os sedimentos, quando os fluxos de detritos apresentam alta concentração de sedimentos ocorre sedimentação a fim de buscar um estado de equilíbrio (IVERSON, 1997; IVERSON et al., 2000). Considerando a curva do modelo de fluido dilatante (Figura 3), existe uma região a partir da qual é necessária uma grande variação de tensão cisalhante para gerar uma pequena deformação no fluido. É possível que o aumento da concentração de sedimentos leve o fluxo de detritos para a região em que isso acontece, o que evidencia a ocorrência de sedimentação quando as concentrações são muito elevadas. Além disso, quando a concentração de sedimentos se torna muito alta pode exceder a capacidade de transporte de sedimentos do canal, o que promove a sedimentação.

5.2.8. ÂNGULO DE ATRITO INTERNO (ANG)

Foi utilizada uma faixa de valores de ângulo de atrito interno coerente com os registrados na literatura para este parâmetro. Foi observado que quanto menor o ângulo de atrito interno, maiores foi o alcance, área de erosão e de deposição, área total e largura do fluxo. A maior variação percentual para alcance ocorreu em valores próximos ao valor padrão, em que uma variação de -5,4% no parâmetro gerou uma variação de 45,9% no alcance. Para área de erosão, deposição, total e largura do fluxo de detritos, as maiores variações ocorreram em valores mais baixos de ângulo de atrito interno. Os resultados podem ser visualizados na Figura 30.

O termo ângulo de atrito interno de um solo refere-se tanto ao atrito físico entre suas partículas quanto o atrito idealizado proveniente do entrosamento de partículas (CAPUTO, 1988). Considerando as mesmas variações das tensões normais, a envoltória de cisalhamento de Mohr-Coulomb apresenta tensões de cisalhamento menores para ângulos de atrito interno menores do que quando comparados com ângulos de atritos maiores. Tal consideração implica em gerar cisalhamento mais facilmente para valores mais baixos de ângulo de atrito, o que, de acordo com o modelo de fluido dilatante e com a aproximação do modelo para fluxos de detritos, permite um maior número de colisões e maior suspensão de material granular, aumentando a distância percorrida e a erosão de material.

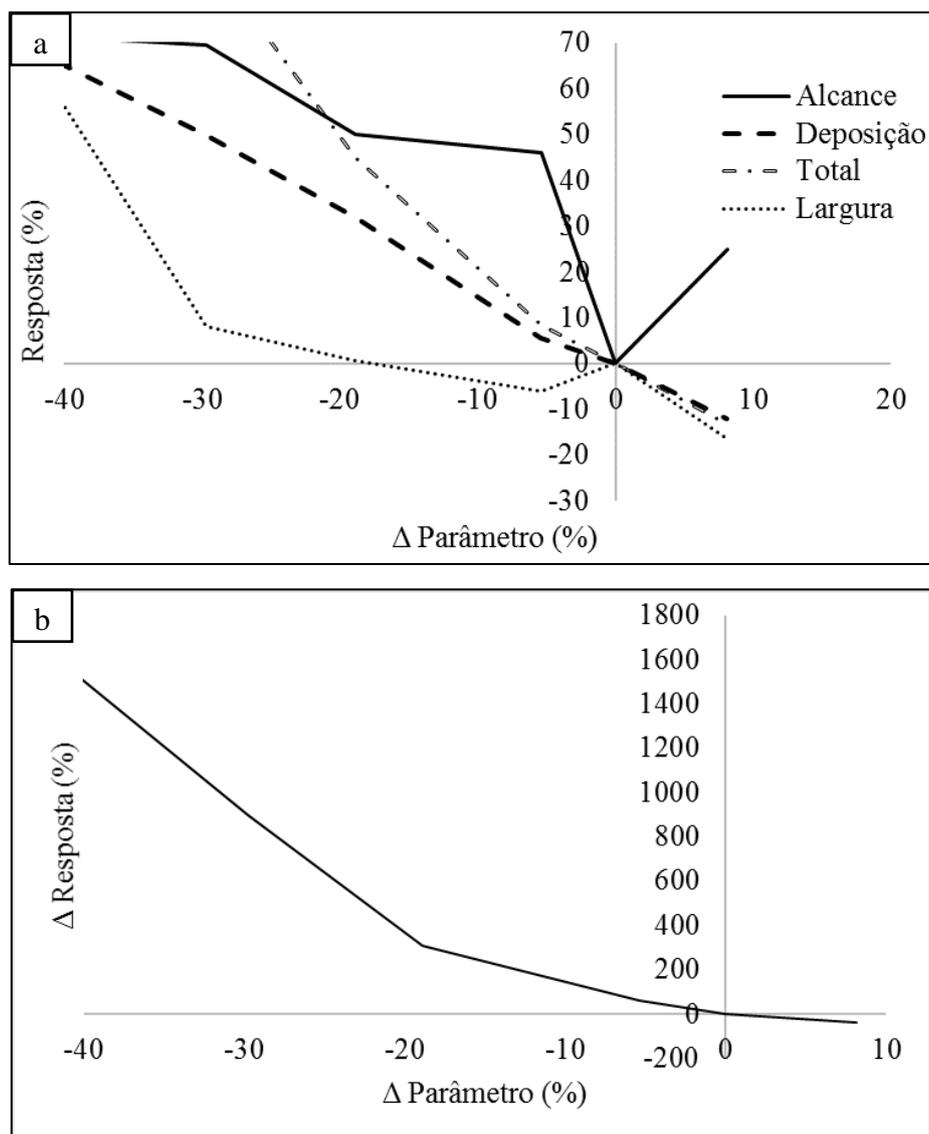


Figura 30 – Análise de Sensibilidade - ângulo de atrito interno: (a) alcance, deposição, total, largura; e (b) erosão.

5.2.9. CONCENTRAÇÃO DA CAMADA MÓVEL (CCM)

O valor de referência utilizado no modelo Kanako-2D não se refere a um valor médio, mas sim às maiores concentrações verificadas experimentalmente por Takahashi (1977 e 1991), em que as concentrações foram medidas durante execução de modelo físico reduzido de um fluxo de detritos. Ressalta-se que tais informações são extremamente difíceis de serem obtidas em um caso real, já que envolve medições durante a ocorrência de fluxos de detritos e a construção de modelos físicos é onerosa. Os resultados para a variação deste parâmetro podem ser visualizados na Figura 31.

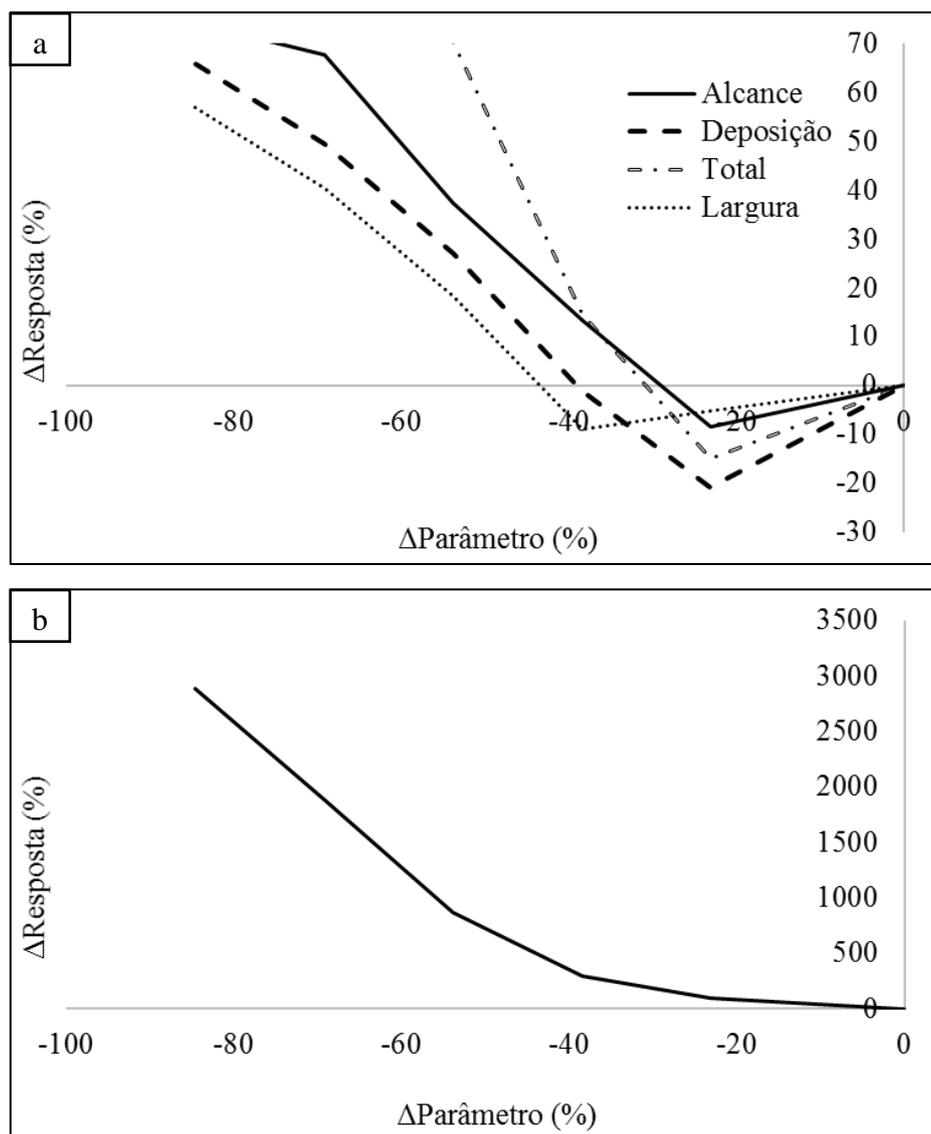


Figura 31 – Análise de Sensibilidade - concentração da camada móvel: (a) alcance, deposição, total, largura; e (b) erosão.

Em termos de alcance, houve redução para variações de até -30% no parâmetro. Para variações mais negativas, houve aumento do alcance. Tal comportamento foi similar para área de deposição, área total e largura. Para área de erosão, quanto menor o valor do parâmetro, maior foi a área erodida.

Experimentos conduzidos por Takahashi (1977) demonstraram condições de equilíbrio entre a concentração da camada móvel e a declividade do terreno, mostrando que para declividades maiores os valores de equilíbrio da concentração da camada móvel também eram maiores. Em concentrações menores, no entanto, a declividade do terreno que mantinha o equilíbrio era menor. Isto é, para concentrações menores há um maior

desequilíbrio, alterando os padrões de erosão e sedimentação e causando maior espalhamento.

5.3. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA VERTENTE HIPOTÉTICA

Para analisar a sensibilidade do modelo Kanako-2D foi criada uma vertente hipotética com as mesmas declividades da encosta e da planície aluvial da bacia hidrográfica do arroio Böni. A declividade média da encosta é de 30° e a declividade média da planície aluvial é de 7°. A partir daí foram realizadas as simulações dentro das faixas de variação estabelecidas na Tabela 3. A Tabela A3 (Apêndice) apresenta todos os resultados obtidos para a vertente hipotética.

As Figuras 32, 33 e 34 apresentam os resultados da análise de sensibilidade do modelo Kanako-2D em termos de alcance, área total atingida e largura média do fluxo de detritos para a vertente hipotética, respectivamente. A análise sobre a área de erosão foi feita apenas para o parâmetro “coeficiente de taxa de erosão”, uma vez que o valor padrão utilizado pelo Kanako-2D é extremamente baixo e não resultou em erosão quando analisados os demais parâmetros. De modo geral, neste item, a área atingida é praticamente igual à área de deposição, à exceção do parâmetro “coeficiente de taxa de erosão”.

Em relação ao alcance do fluxo de detritos, observa-se que, de maneira geral, os parâmetros MEL e MFL geraram maior sensibilidade no modelo Kanako-2D. O parâmetro CTD gerou alta sensibilidade em pequenas variações negativas do parâmetro, ou seja, valores menores que o padrão utilizado pelo Kanako-2D geraram sensibilidade no modelo.

Em termos de área total atingida, os parâmetros CSD, ANG e MEL geraram maior sensibilidade do modelo. Esses parâmetros afetam diretamente as condições de colisões entre as partículas e a resistência ao cisalhamento nos locais atingidos, sendo importantes parâmetros na modelagem de fluxo de detritos.

Quanto à largura do fluxo, os parâmetros que geraram maior sensibilidade no modelo foram MEL, ANG e CTD. Este último, em especial, quando submetido a variações negativas do parâmetro, ou seja, quando os valores utilizados nas simulações eram menores do que os valores padrão.

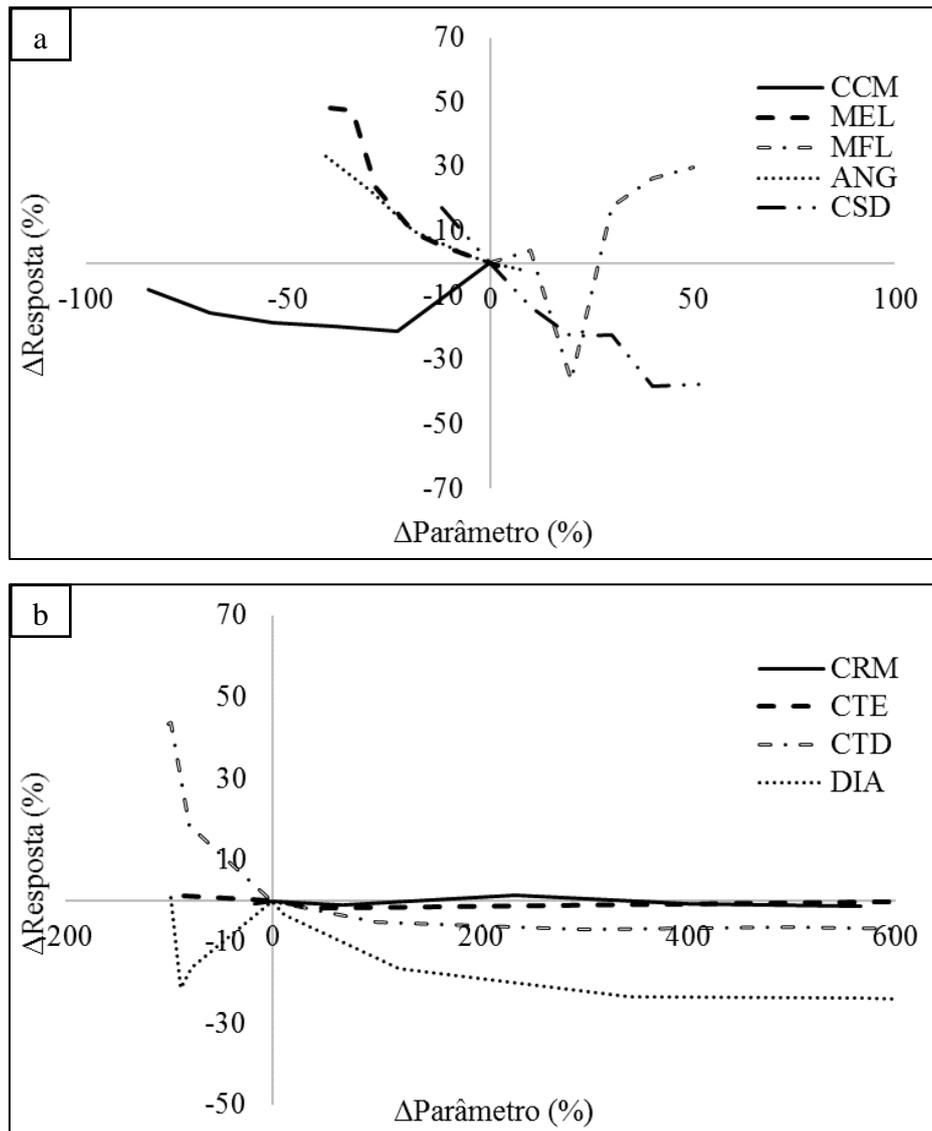


Figura 32 – Análise de sensibilidade da vertente hipotética – alcance: (a) CCM, MEL, MFL, ANG, CSD; e (b) CRM, CTE, CTD, DIA.

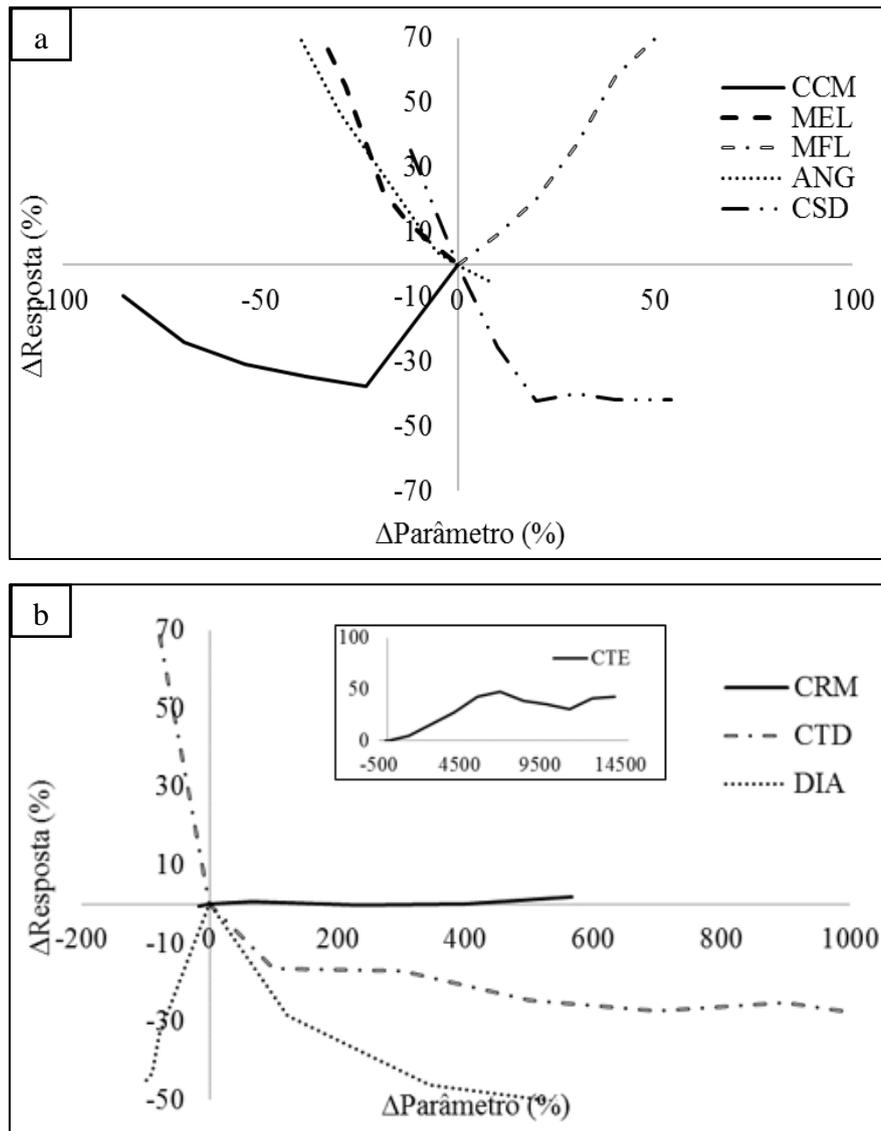


Figura 33 – Análise de sensibilidade da vertente hipotética - Área total atingida: (a) CCM, MEL, MFL, ANG, CSD; e (b) CRM, CTD, DIA.

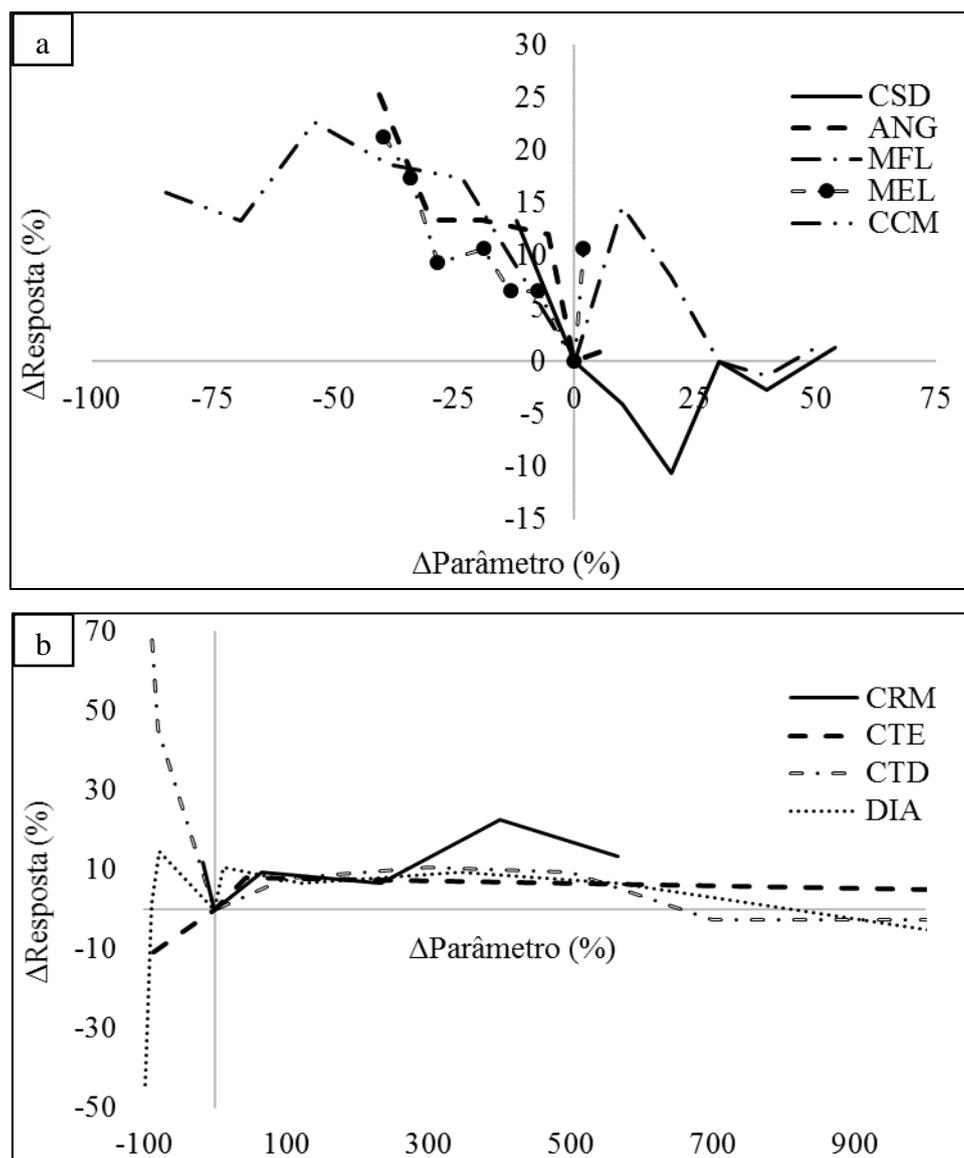


Figura 34 – Análise de sensibilidade da vertente hipotética - largura: (a)CCM, MEL, MFL, ANG, CSD; e (b) CRM, CTE, CTD, DIA.

5.3.1. DIÂMETRO DOS SEDIMENTOS (DIA)

Os resultados para este parâmetro (Figura 35) apresentaram comportamentos semelhantes aos obtidos para a vertente real, em que a redução do tamanho dos sedimentos gerou aumento do alcance e da área total atingida. Em termos de largura do fluxo, no entanto, os resultados diferiram dos observados para a vertente real.

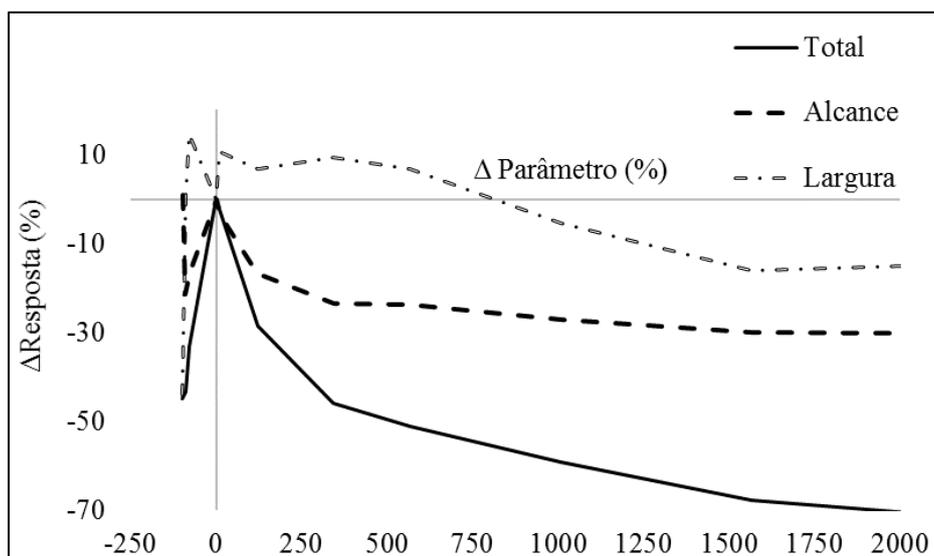


Figura 35 – Análise de sensibilidade da vertente hipotética - diâmetro dos sedimentos.

Esperava-se que com o aumento do tamanho dos sedimentos a largura do fluxo ficasse maior, aumentando o espalhamento. Porém, os resultados apontam para redução da largura e redução da área atingida, o que indica um maior aumento da altura de sedimentação. O maior espalhamento esperado pode estar associado, então, à topografia local, uma vez que na vertente hipotética as declividades são constantes e não há interferência de concavidades no terreno, por exemplo.

5.3.2. COEFICIENTE DE RUGOSIDADE DE MANNING (CRM)

De maneira análoga ao observado para a vertente real, o coeficiente de rugosidade de Manning praticamente não apresentou variação da resposta em função da variação do parâmetro dentro da faixa simulada (Figura 36). As maiores variações foram observadas para a largura do fluxo de detritos na vertente hipotética, enquanto para a vertente real o alcance foi aquele que gerou maior variação da resposta.

A diferença da largura observada na simulação da vertente real e na vertente hipotética pode estar associada às feições topográficas. A topografia é um importante fator no espalhamento do fluxo de detritos, além disso, pode ter ocorrido instabilidade numérica e incertezas na medição das larguras.

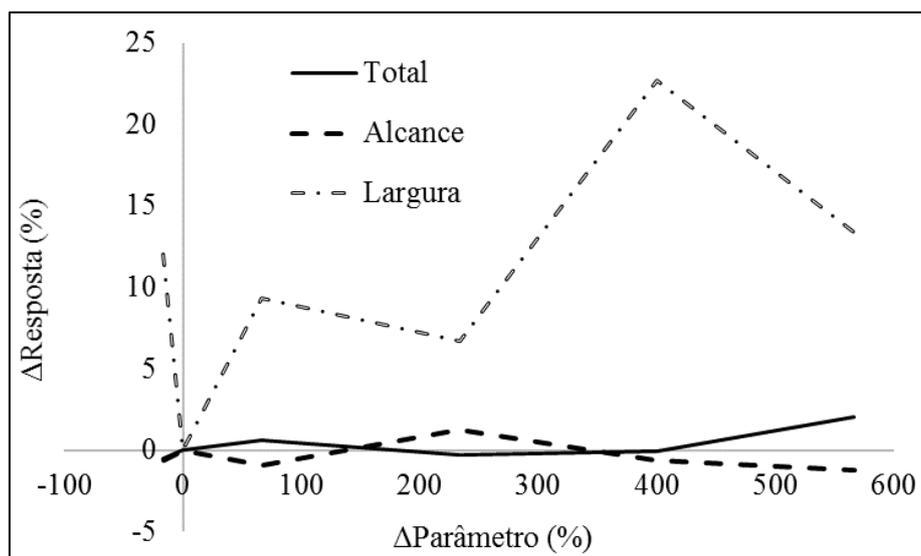


Figura 36 – Análise de sensibilidade da vertente hipotética - coeficiente de rugosidade de Manning

5.3.3. COEFICIENTE DE TAXA DE DEPOSIÇÃO (CTD)

Os resultados para o coeficiente de taxa de deposição para a vertente hipotética (Figura 37) foram similares aos obtidos para a vertente real em termos de alcance e de área total atingida. Entretanto, para largura do fluxo os resultados foram diferentes. Na vertente real ocorriam variações positivas após variação de 800% no parâmetro, enquanto na vertente ideal passou a ter variação constante negativa após 700% de variação do parâmetro, ainda que próximo do zero.

Em fluxos com elevada fluidez e que a diferença entre a inclinação da frente do fluxo e a inclinação do terreno seja menor que $0,05^\circ$, é necessário um aumento de turbulência para manutenção da condição de fluxo de detrito pedregoso (TAKAHASHI, 2007). Conforme as equações de aproximação de fluxos de detritos de Takahashi (1991), o coeficiente de taxa de deposição pode afetar a inclinação da frente do fluxo e, se não for combinado com alterações em outros parâmetros, o processo de deposição seja alterado e perca significado físico conforme o equacionamento proposto para fluxos pedregosos.

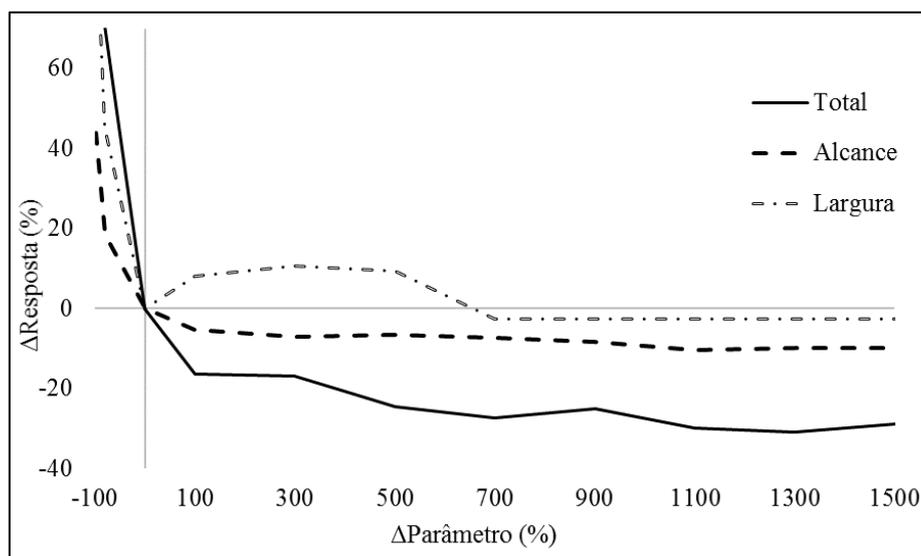


Figura 37 – Análise de sensibilidade da vertente hipotética - coeficiente de taxa de deposição

5.3.4. COEFICIENTE DE TAXA DE EROSIÃO (CTE)

Não foi possível comparar as variações percentuais em termos de erosão, uma vez que ao longo deste trabalho todos os resultados foram comparados com os valores padrão. Entretanto, o coeficiente de taxa de erosão padrão é muito pequeno e não causa erosão no leito. Dado isso, o resultado para erosão será apresentado em valores absolutos (Figura 38).

O modelo parece ser sensível às variações deste parâmetro para deposição e largura do fluxo. Uma vez que acontece maior erosão, mais material será mobilizado no fluxo, permitindo que mais sedimentos sejam depositados. A largura do fluxo apresentou oscilações entre variações positivas e negativas de resposta. Tal situação pode se assemelhar à do coeficiente de taxa de deposição, uma vez que as equações são semelhantes, ou seja, o uso de determinados valores do parâmetro associado às condições topográficas propostas pode causar instabilidade do modelo ou, ainda, perda de significado da aproximação das equações para fluxos de detritos pedregosos. Percebe-se que em termos de alcance houve pouca influência da variação do parâmetro na resposta do modelo, permanecendo aproximadamente constante ao longo do intervalo de simulação.

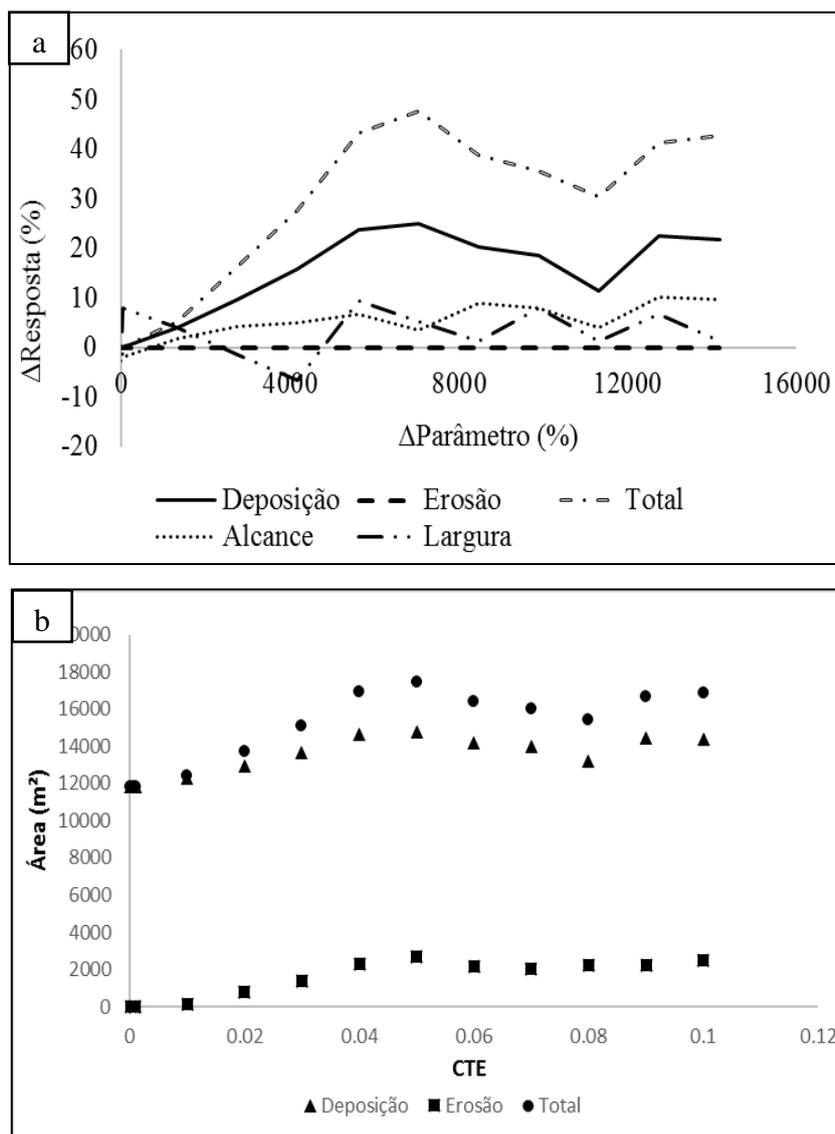


Figura 38 – Análise de sensibilidade da vertente hipotética - coeficiente de taxa de erosão: (a) deposição, erosão, total, alcance, largura; e (b) valores absolutos de área de erosão, deposição e total.

5.3.5. MASSA ESPECÍFICA DA FASE FLUIDA (MFL)

Os resultados para massa específica da fase fluida na vertente hipotética foram semelhantes aos da vertente real apenas para o alcance do fluxo. Os resultados podem ser visualizados na Figura 39.

Em termos de largura, observou-se que em variações de até 30% no parâmetro a resposta apresentou variação positiva, ou seja, apresentou maior largura, diferindo da vertente real. Quanto ao alcance do fluxo, o comportamento foi similar à vertente real, à

exceção da variação de 20% no parâmetro que gerou uma resposta de aproximadamente -40% no alcance. Tal resultado não era esperado, uma vez que fluidos com maior massa específica (devido ao aumento da massa dos sedimentos) tendem a ter maior energia nas colisões, resultando em maior sustentação do fluxo conforme a teoria do fluido dilatante. Este resultado pode estar associado à incerteza na medição do alcance.

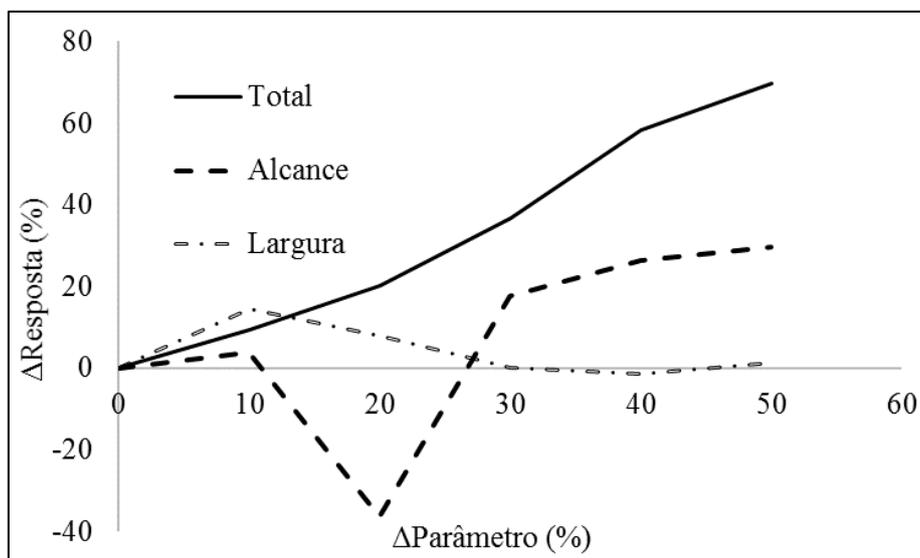


Figura 39 – Análise de sensibilidade da vertente hipotética - massa específica da fase fluida

5.3.6. MASSA ESPECÍFICA DO LEITO (MEL)

Os resultados para massa específica do leito na vertente hipotética (Figura 40) foram semelhantes aos observados na vertente real. Tanto para alcance quanto para área total atingida pelo fluxo de detritos. Em termos de largura, na vertente hipotética a variação sempre foi positiva à medida que se reduzia os valores de massa específica do leito, enquanto na vertente real a largura reduziu e posteriormente aumentou. Como os alcances tiveram valores absolutos diferentes na região em que houve redução da largura na vertente real, é possível que o terreno tenha limitado o espalhamento, afetando a largura do fluxo de detritos.

O modelo Kanako-2D parece ser sensível às variações da massa específica do leito. Entretanto, embora as simulações tenham sido realizadas dentro de uma faixa coerente de valores de massa específica, é necessário verificar a faixa de valores de massa

específica do leito em regiões que normalmente são afetadas por fluxos de detritos. É possível que não exista região tipicamente montanhosa cujas massas específicas do leito apresentem valores baixos tais quais foram simulados ao longo deste trabalho.

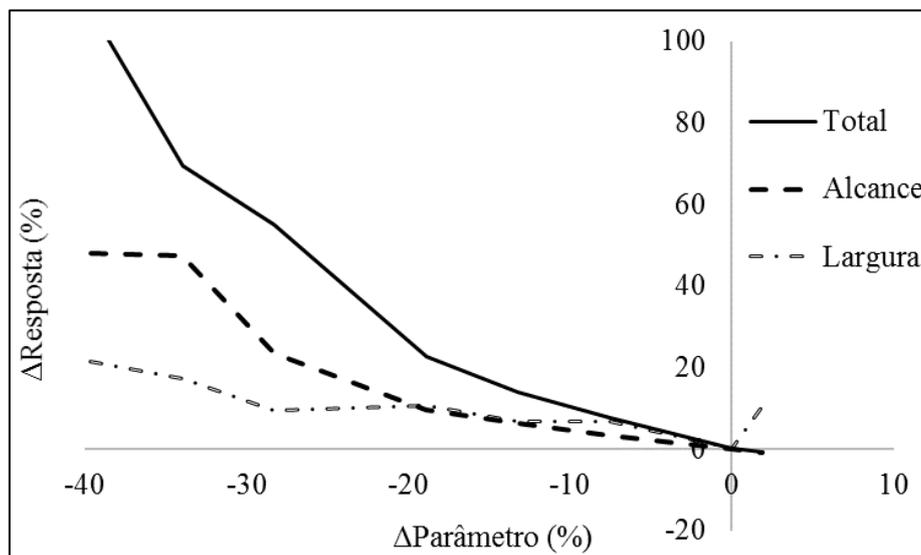


Figura 40 – Análise de sensibilidade da vertente hipotética - massa específica do leito

5.3.7. CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS (CSD)

Os resultados para concentração de sedimentos na vertente hipotética (Figura 41) apresentou comportamento similar ao observado na vertente real para alcance e área total atingida pelo fluxo de detritos. Em termos de largura, novamente, os resultados foram diferentes.

Para variações de até 20% na concentração de sedimentos os resultados mantiveram com comportamento similar para alcance do fluxo, no entanto, para valores maiores foram observadas taxas de redução menores do que para a mesma variação na vertente real. Como o alcance e a área atingida foram diferentes, embora com comportamento similar, a topografia local pode ter influenciado os resultados na vertente real, explicando a diferença observada na vertente hipotética.

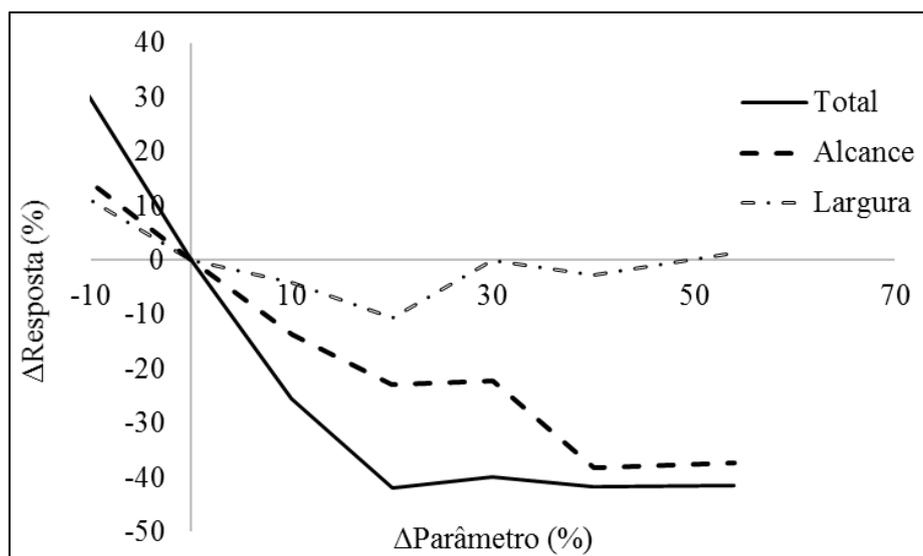


Figura 41 – Análise de sensibilidade da vertente hipotética - concentração de sedimentos

5.3.8. ÂNGULO DE ATRITO INTERNO (ANG)

Os resultados para ângulo de atrito interno na vertente hipotética (Figura 42) foram novamente semelhantes àqueles verificados na vertente real em termos de alcance e área total atingida pelo fluxo de detritos. Foi observado que, à medida que se reduzia o valor do ângulo de atrito interno, maiores eram o alcance e a área total atingida pelo fluxo. Conforme discutido anteriormente, pela teoria do fluido dilatante e pela aproximação do modelo aos fluxos de detritos feita por Takahashi (1991), um menor ângulo de atrito proporcionaria ao fluxo uma interação maior entre as partículas, com maior energia nas colisões, o que sustentaria as partículas por mais tempo e, por consequência, percorrendo distâncias maiores.

Para largura, no entanto, a resposta do modelo diferiu da vertente real para variações do parâmetro de até -15%. Enquanto na vertente real houve redução da largura, na vertente hipotética houve aumento. Tal condição pode estar relacionada às singularidades encontradas no relevo, uma vez que na vertente hipotética as declividades são constantes e na vertente real elas variam conforme as condições do terreno.

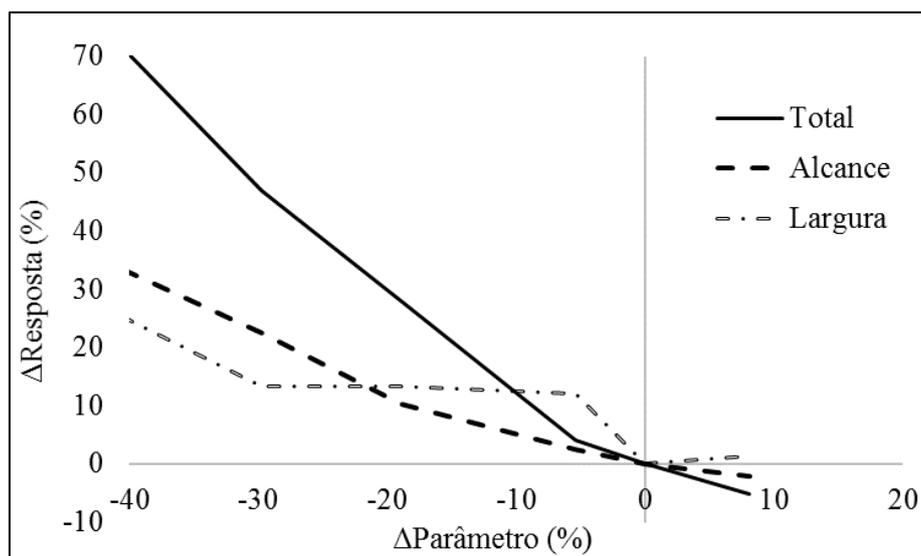


Figura 42 – Análise de sensibilidade da vertente hipotética - ângulo de atrito interno

5.3.9. CONCENTRAÇÃO DA CAMADA MÓVEL (CCM)

As respostas do modelo para as alterações do parâmetro de concentração da camada móvel foram diferentes na vertente real e na vertente hipotética. Enquanto na vertente real variações entre -30 e -40% no parâmetro geraram variações de resposta positivas para alcance, área total e largura, na vertente hipotética apenas a largura apresentou variação positiva. Ainda assim, a largura apresentou variação positiva em todo o domínio, diferente da vertente real. Os resultados podem ser visualizados na Figura 43.

Conforme comentado anteriormente, Takahashi (1977) demonstrou empiricamente que havia uma proporção ideal para equilíbrio entre a concentração da camada móvel e a declividade do terreno. Para concentrações menores há um maior desequilíbrio, alterando os padrões de erosão e sedimentação e causando um espalhamento maior do fluxo. Tais considerações explicam porque a variação de resposta da largura é sempre positiva ao longo do domínio analisado. Para variações de até 20% do parâmetro é, também, a região de maior declividade da linha que representa a sensibilidade do modelo. Isto indica que é também a região que implica em maior sensibilidade do modelo frente às variações do parâmetro.

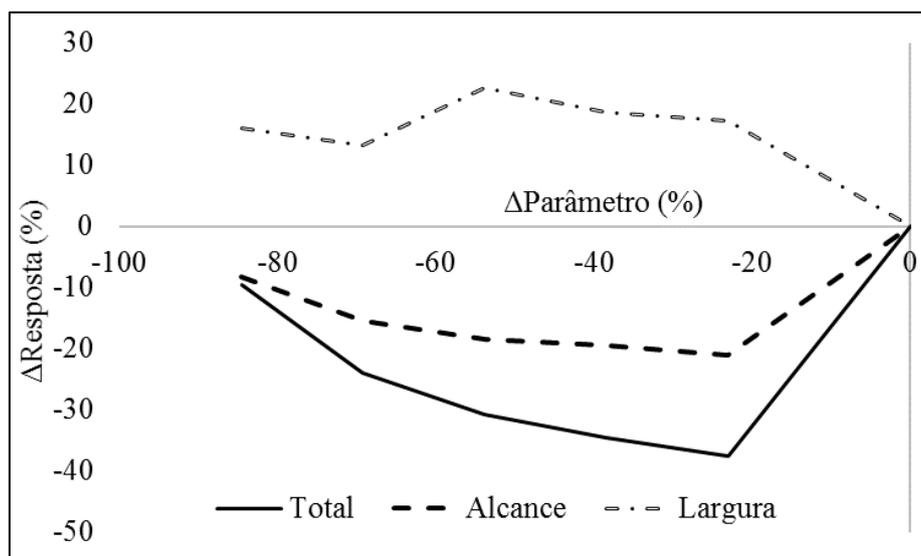


Figura 43 – Análise de sensibilidade da vertente hipotética - concentração da camada móvel

5.4. SENSIBILIDADE DO MODELO

A avaliação da sensibilidade do modelo Kanako-2D foi feita pelos métodos de rastreamento ($K1$), regional ($K2$) e de análise de variâncias ($K3$). A Tabela A4 (Apêndice) apresenta todos os resultados de sensibilidade do modelo, tanto para a vertente real quanto para a vertente hipotética.

Os resultados da Tabela 5 representam os máximos valores de cada análise para cada um dos parâmetros. Por exemplo, para o método de rastreamento na vertente real, foi selecionado o maior valor de $K1$ para cada parâmetro em termos de alcance, área de deposição, área de erosão, área total e largura; e, assim, sucessivamente. Desse modo, é possível inferir que o parâmetro que causou maior sensibilidade no modelo é aquele que possui o maior valor em um mesmo método de análise.

Para a vertente hipotética não foram avaliadas áreas de erosão, uma vez que com os valores padrão do Kanako-2D só há valores de erosão para alguns valores de massa específica do leito. Além disso, há resultados de erosão quando se altera o parâmetro coeficiente de taxa de erosão, como é de se esperar. Como este trabalho está considerando que a área total atingida é a soma das áreas de deposição e de erosão, os valores totais podem ser considerados como sendo os mesmos para área de deposição na vertente hipotética.

Tabela 5: Sensibilidade do modelo: (a) K1; (b) K2; e (c) K3

(a)								
Vertente Real						Vertente Hipotética		
Parâmetro	Alcance	Área de Deposição	Área de Erosão	Área Total	Largura	Alcance	Área Total	Largura
CSD	1,1	0,8	1,8	0,8	0,0	0,8	1,2	0,2
ANG	1,0	1,6	32,3	3,0	1,5	0,7	1,6	0,5
DIA	0,2	0,1	0,9	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0
CTD	0,0	0,4	0,1	0,3	0,0	0,1	0,2	0,1
MFL	1,4	1,3	25,9	2,5	0,1	0,6	1,4	0,0
MEL	1,7	2,0	55,9	4,5	1,2	1,2	2,6	0,3
CRM	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
CCM	0,9	0,8	34,1	2,5	0,7	0,1	0,1	0,2
CTE	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
(b)								
Vertente Real						Vertente Hipotética		
CSD	4,1	2,5	4,9	2,6	1,1	2,7	3,0	1,1
ANG	8,5	1,9	58,7	4,2	4,7	1,1	2,3	2,2
DIA	2,9	5,0	35,6	3,1	2,3	2,5	2,3	5,1
CTD	0,9	5,0	1,1	4,9	3,4	0,3	2,7	1,4
MFL	4,9	1,6	61,3	4,1	0,7	5,4	2,1	1,5
MEL	5,0	2,9	159,9	10,3	6,8	4,3	6,7	1,4
CRM	0,3	0,1	1,5	0,1	0,4	0,0	0,0	0,7
CCM	2,0	1,8	65,9	4,8	1,8	0,9	1,6	0,8
CTE	0,1	0,2	1,2	0,2	1,0	0,0	0,0	0,2
(c)								
Vertente Real						Vertente Hipotética		
CSD	657	785	2152	823	28	401	883	53
ANG	748	940	396155	3361	695	200	922	86
DIA	3929	1621	276234	3495	788	135	549	286
CTD	257	1704	992	1646	636	415	11520	1726
MFL	1101	658	234881	2159	14	590	764	39
MEL	1143	934	657004	4347	282	416	1538	44
CRM	250	7	348	9	93	1	1	57
CCM	1214	1102	1329099	8154	718	66	224	61
CTE	389	3083	1375478	12849	5603	16	391	37

O método de análise por rastreamento permite ter uma noção do comportamento geral do modelo frente às variações dos parâmetros. Pode-se perceber, em termos de alcance, que para a vertente real o modelo é mais sensível aos parâmetros MEL, MFL e CSD, enquanto para a vertente hipotética o modelo é mais sensível a MEL, CSD e ANG. Em termos de área total atingida, na vertente real o modelo é mais sensível aos parâmetros MEL, ANG e CCM, enquanto na vertente hipotética é mais sensível a MEL, ANG e MFL.

Para largura do fluxo, na vertente real o modelo é mais sensível a ANG, MEL e CCM, enquanto na vertente hipotética é mais sensível a ANG, MEL e CSD.

O método das análises regionais permite dizer quais foram as maiores variações de resposta dentro da faixa analisada, permitindo apontar os valores dos parâmetros para os quais o modelo é mais sensível dentro da faixa considerada. Tal análise é importante pois pode fornecer embasamento para os modeladores escolherem valores a serem utilizados nas simulações, podendo reduzir o tempo gasto para calibração e validação do modelo. Em termos de alcance do fluxo as maiores sensibilidades do modelo ocorreram para os parâmetros ANG, MEL e MFL para a vertente real e ANG, MEL e CSD para a vertente hipotética. Já para a área total, o modelo foi mais sensível aos parâmetros CTE, CCM e MEL para a vertente real e CTE, MEL e ANG para a vertente hipotética. Para a largura do fluxo, o modelo foi mais sensível a CTE, DIA e CCM para a vertente real e CTE, DIA e ANG para a vertente hipotética.

A análise das variâncias permite maior acuracidade e robustez na análise de sensibilidade, buscando identificar o quanto os valores se afastam do valor central das amostras. Em termos de alcance, para a vertente real, o modelo é mais sensível a DIA, CCM e MEL, enquanto na vertente hipotética o modelo é mais sensível a DIA, MEL e CTD. Já para área total o modelo foi mais sensível a CTE, CCM e MEL para a vertente real e CTE, MEL e ANG para a vertente hipotética. Para largura do fluxo, o modelo é mais sensível a CTE, DIA e CCM para vertente real e CTE, DIA e ANG para a vertente hipotética.

De maneira geral observa-se, a partir de $K1$, $K2$ e $K3$ que, para a vertente real, que o modelo apresenta maior sensibilidade para área de erosão, seguida de área total, área de deposição, alcance e largura. Para a vertente hipotética, nos três métodos o modelo foi mais sensível à área total, seguido de alcance e largura.

Pode-se afirmar que o modelo Kanako-2D é sensível à variação dos parâmetros supracitados, sendo importante destacar os parâmetros MEL, ANG e CCM. Esses parâmetros são os mais frequentes entre os três mais sensíveis em todos os métodos utilizados. Para valores menores de MEL há maior remobilização de material, o que, conforme a teoria do fluido dilatante, proporciona maior capacidade do fluxo de permanecer fluído. Entretanto, é necessária maior investigação sobre ocorrência de fluxos de detritos em locais cujos valores de MEL fossem, de fato, mais próximos ao limite inferior da faixa utilizada. O parâmetro ANG embora apareça na maioria das análises tanto para vertentes reais quanto hipotéticas, ele é mais frequente na vertente

hipotética. Tal consideração pode indicar que na ausência de consideração sobre a topografia um dos responsáveis sobre a manutenção do fluxo seja a interação entre as partículas causadas pelo ângulo em que elas se atritam, consonante à teoria do fluido dilatante. A CCM é descrita por Takahashi (1991) como uma condicionante essencial ao fluxo, de modo que se esperava que o modelo fosse sensível à variação deste parâmetro. Entretanto, a CCM é um parâmetro de difícil obtenção, cuja estimativa tem sido feita a partir de modelagem física (TAKAHASHI, 2007).

5.5. ANÁLISE DO EFEITO DA DECLIVIDADE NO ALCANCE E NA ÁREA ATINGIDA

Embora este item possa diferir da análise de sensibilidade, é um importante indicativo dos efeitos da declividade no alcance e na área atingida por fluxos de detritos.

Foram realizadas 16 simulações a fim de buscar indícios de condições críticas da propagação de fluxos de detritos, ou seja, as condições em que o modelo resulta em maior alcance e área total atingida. Conforme Tabela 2, variou-se a inclinação da vertente entre 30 e 90° e a inclinação da planície aluvial entre 0 e 17°. Os resultados podem ser verificados na Tabela 6.

Tabela 6: Avaliação da influência da declividade nos resultados do modelo

Vertente (°)	Planície Aluvial (°)	Alcance (m)	Área (m²)
30	0	132	7781
	7	235	11969
	10	299	15031
	17	482	24469
45	0	132	7894
	7	235	12031
	10	297	14874
	17	490	25031
60	0	135	7950
	7	235	11994
	10	295	15119
	17	490	25025
90*	0	135	7950
	7	235	11994
	10	295	15119
	17	490	25025

*valor aproximado devido à execução da simulação. Valor real utilizado: 89,9°.

Em termos de alcance do fluxo de detritos, observou-se que as maiores distâncias percorridas se davam na inclinação de 17° da planície aluvial (em torno de 490 m) para todas as condições simuladas, não importando as inclinações da vertente. Em termos de área atingida, observou-se que o valor crítico (25031 m²) foi verificado na condição de 17° de inclinação na planície aluvial e 45° na vertente. No entanto, observa-se que os resultados para 17° na planície aluvial e 60 e 90° na vertente apresentam valores bem próximos da condição crítica.

Takahashi (1991) demonstrou, utilizando as considerações de distribuição de tamanho dos sedimentos ao longo do perfil longitudinal do fluxo de detritos proposto por Savage e Sayed (1984), que o aumento da declividade permitia que partículas que estavam na parte superior do fluxo pudessem entrar mais facilmente em colisão com partículas que estavam na parte inferior. Isso permite, portanto, que as condições críticas sejam encontradas em situações de declividade alta. No entanto, valores muito altos de inclinação da vertente podem não ter sentido físico ou não representar situações que ocorrem na natureza. Por exemplo, em inclinações próximas a 90° a propagação das partículas seria equivalente à queda livre e não seguiria o modelo de fluido dilatante, sem possibilidade de colisão das partículas envoltas por um fluido intersticial, condição essencial para propagação de fluxos de detritos conforme este modelo.

Experimentos conduzidos por Takahashi (1991) demonstraram que a deposição do fluxo de detritos inicia em vertentes com inclinação igual ou menor que 17°. Deste modo, os resultados encontrados em termos de alcance e de área atingida são coerentes com os relatados na literatura. Embora o fluxo tenha condições de se depositar em declividade aproximada de 17°, ele também tem maiores condições de seguir fluindo do que quando comparado com declividades menores, o que explica seu maior alcance e espalhamento. Os menores alcances e áreas atingidas foram verificados quando a inclinação da planície aluvial era de 0°. Nessa situação, a inclinação da superfície é, inevitavelmente, menor do que a inclinação da frente do fluxo e também da inclinação crítica, ocorrendo deposição (TAKAHASHI, 2007).

Embora as condições que geraram maior alcance e área atingida tenham sido verificadas em 45° de inclinação na vertente e 17° na planície aluvial para as condições simuladas, não significa que a condição crítica de funcionamento do modelo e da ocorrência de fluxos de detritos se dê nessa condição. A condição de inclinação de vertente acima de 45° (inclinações > 100%) pode indicar que o modelo apresenta o

mesmo comportamento, uma vez que em todas as situações simuladas a partir desta inclinação os resultados de alcance e área atingida foram iguais. Há uma diferença de 6 m² a mais na condição de 90° de inclinação de vertente e 17° de inclinação de planície aluvial, entretanto, isso representa um *pixel* de diferença, podendo ser apenas uma questão numérica no processamento dos resultados.

Para a verificação da condição crítica é necessário adensar a quantidade de inclinações de vertente ao redor de 45° de inclinação. Os resultados obtidos sugerem que as condições críticas de funcionamento do modelo Kanako-2D se encontram ao redor desses valores, evidenciando a necessidade de maior investigação.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A simulação computacional é uma importante ferramenta na predição de áreas susceptíveis à ocorrência de fluxos de detritos, atuando como medida não-estrutural preventiva. O presente trabalho realizou análise de sensibilidade do modelo Kanako-2D visando incrementar o conhecimento acerca do modelo e do mecanismo de fluxos de detritos. A utilização deste modelo pode fornecer embasamento para uma melhor predição de áreas susceptíveis e, por consequência, auxiliar a melhorar o gerenciamento de desastres naturais relacionados a sedimentos no Brasil.

Para tal, foi utilizada uma vertente real em uma bacia hidrográfica com histórico de ocorrência de fluxos de detritos (bacia do arroio Böni, em Alto Feliz e São Vendelino/RS). Devido às limitações da vertente real, também se procedeu com a análise de sensibilidade do modelo Kanako-2D utilizando uma vertente hipotética com as mesmas características da vertente real, isto é, com as mesmas declividades de encosta e de planície aluvial. Com o objetivo de analisar o efeito da declividade no alcance e na área atingida por fluxos de detritos, também foram criadas diferentes condições de declividade na encosta e na planície aluvial.

Os resultados da análise de sensibilidade do modelo Kanako-2D permitiram as seguintes conclusões:

- A análise de sensibilidade pelo método de rastreamento indicou que os parâmetros massa específica do leito (MEL), ângulo de atrito interno (ANG) e concentração de sedimentos (CSD) geraram maior sensibilidade do modelo, ou seja, em termos gerais uma pequena variação nesses parâmetros causa uma maior variação nos resultados do modelo;
- A análise de sensibilidade pelo método regional indicou que os parâmetros massa específica do leito (MEL), ângulo de atrito interno (ANG) e massa específica da fase fluida (MFL) geraram maior sensibilidade do modelo, ou seja, apresentam as maiores variações relativas de resposta frente às variações dos parâmetros;
- A análise de sensibilidade pelo método das variâncias indicou que os parâmetros coeficiente de taxa de erosão (CTE), diâmetro dos sedimentos (DIA) e massa específica do leito (MEL) geraram maior sensibilidade do modelo, ou seja, apresentaram maior dispersão dos resultados em torno do valor médio dos resultados;

- Em todas as análises (*K1*, *K2* e *K3*), as maiores sensibilidades foram verificadas para área de erosão, seguida de área total, área de deposição, alcance e largura, na vertente real. Na vertente hipotética, as maiores sensibilidades ocorreram para área total, alcance e largura;
- A condição crítica verificada para a influência da topografia no alcance e na área atingida pelo fluxo de detritos foi verificada na condição de 45° de inclinação da encosta e 17° de inclinação da planície aluvial. Nesta condição foi verificada a maior área atingida e o maior alcance;
- A obtenção dos parâmetros em campo pode auxiliar na melhor modelagem de fluxos de detritos.

Portanto para avançar em termos de pesquisas científicas, o presente trabalho recomenda as seguintes ações:

- Comparar os valores dos parâmetros obtidos em campo com os utilizados nas simulações para uma determinada área de estudo;
- Verificar a faixa de valores do parâmetro massa específica do leito (MEL) em locais de ocorrência de fluxos de detritos. Embora seja possível a ocorrência de valores próximos a 1600 kg/m³, essa condição pode não ocorrer em áreas susceptíveis a fluxos de detritos;
- Debater teórica e empiricamente os parâmetros coeficiente de taxa de erosão (CTE) e coeficiente de taxa de deposição (CTD) que ainda carecem de definição. Até o presente momento os trabalhos realizados com Kanako-2D não discutiram os valores utilizados tampouco comentaram sobre estimativas em campo ou em laboratório;
- Utilizar, preferencialmente, o índice *K2* na modelagem de fluxos de detritos com Kanako-2D, uma vez que ele indica as faixas de valores dos parâmetros em que o modelo é mais sensível e pode auxiliar mais rapidamente na calibração do modelo;
- Avaliar a sensibilidade do modelo Kanako-2D em função dos demais resultados fornecidos, tais como, profundidade do fluxo, concentração, velocidade, altura do leito após a passagem do fluxo de detritos e altura de sedimentação. É possível que a sensibilidade do modelo seja diferente ao

considerar estes parâmetros e que parâmetros ditos não sensíveis neste trabalho sejam considerados sensíveis, ou vice-versa;

- Avaliar a sensibilidade do modelo à variação das condições de terreno utilizando diferentes declividades de encosta e de planície aluvial;
- Realizar, a partir da análise de sensibilidade para a vertente real e da calibração do modelo pelo evento do ano 2000, mapeamento de áreas susceptíveis a fluxos de detritos nos municípios de Alto Feliz e São Vendelino-RS, uma vez que muitas das vertentes encontradas na região são semelhantes à simulada neste trabalho;
- Realizar análise de sensibilidade global do modelo Kanako-2D.

Recomenda-se para os gestores municipais de São Vendelino e Alto Feliz/RS e para a Proteção e Defesa Civil que procedam com o mapeamento de áreas susceptíveis a fluxos de detritos na região, utilizando o modelo Kanako-2D. Muitas vertentes da região apresentam características semelhantes à utilizada neste trabalho, com elevada possibilidade de ocorrência de desastres relacionados a sedimentos, em especial, a fluxos de detritos.

7. REFERÊNCIAS

ASTM. **Classification of Soils for Engineering Purposes**: Annual Book of ASTM Standards, D 2487-83, 04.08, American Society for Testing and Materials, 1985, pp. 395–408

AVELAR, A.S.; COELHO NETTO, A.L.; LACERDA, W.A.; BECKER, L.B.; MENDOÇA, M.B. Mechanisms of the recent catastrophic landslides in the mountainous range of Rio de Janeiro, Brazil. **In**: Forum, Proceedings of the Second World Landslide Rome, Italy, 2011, pp 265-270.

BAGNOLD, R. A. Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear. **R. Soc.**, Londres, v. 225, n. A, p. 49-63, 1954.

BARRAGAN, M.L.M.; MICHEL, G.P.; KOBAYAMA, M.; ZAMBRANO, F.C.; BAUMBACH, M.F.; VASCONCELLOS, S.M. Abordagens empíricas utilizadas na modelagem de fluxos de detritos.. **In**: XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2015, Brasília. Segurança Hídrica e Desenvolvimento Sustentável. Porto Alegre: ABRH, 2015. p.1-8.

BARTELT, P.; SALM, B.; GRUBER, U. Calculating dense-snow avalanche runout using a Voellmy-fluid model with active/passive longitudinal straining. **Journal of Glaciology**, v. 45 (150), p. 242-254, 1999.

CANNON, S.H.; SAVAGE, W.Z. A Mass change model for the estimation of debris flow runout. **Journal of Geology**, v.96, p.221-227, 1988.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos**. 6 ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1988. 234 p.

CARVALHO, D. W. Instrumentos de prevenção a desastres naturais: as medidas não estruturais e a construção de cidades resilientes. **Revista Novos Estudos Jurídicos**, v.20, p.35-58, 2015.

CHOW, V.T. **Open-channel Hydraulics**. New York: McGraw-Hill, 1959.

COELHO NETTO, A.L.; SATO, A.M.; AVELAR, A.S.; VIANNA, L.G.; ARAÚJO, I.S.; FERREIRA, D.L.; LIMA, P.H.; SILVA, A.P.; SILVA, R.P. The extreme landslide disaster in Brazil. **In**: Forum, Proceedings of the Second World Landslide Rome, Italy, 2011, pp. 377 – 384

COSTA, J.E. Rheologic, geomorphic, and sedimentologic differentiation of water clouds, hyperconcentrated clows, and debris clows. **In**: BAKER, V.R.; KOCHER, R.C.; PATTON, P.C. (eds.) Flood geomorphology, New York: John-Wiley & Sons, 1988. p.113-122.

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

EPA. **Guidance on the development, evaluation, and application of environmental models**. Washington, DC, 2009, 99 p.

FANNIN, R.J.; WISE, M.P. An empirical–statistical model for debris flow travel distance. **Canadian Geotechnical Journal**. v.38, pp.982-994, 2001.

FERNANDO, H. J. (Ed.) **Handbook of Environmental Fluid Dynamics: Overview and Fundamentals**. Boca Raton: Crc Press, 2013. 589 p.

FRANK, B.; SEVEGNANI, L. **Desastre de 2008 no Vale do Itajaí: Água, gente e política**. Fundação Agencia de Água de Vale do Itajaí. Blumenau-SC, 2009. 192p.

HEISELBERG, P.K.; BROHUS, H.; HESSELHOLT, A.T.; RASMUSSEN, H.E.S.; SEINRE, E. THOMAS, S. Application of Sensitivity Analysis in Design of Sustainable Buildings. **Renewable Energy**, v. 34, n. 9, p. 2030-2036, 2009.

HOPFE, C. J.; HENSEN, J. L. M. Uncertainty Analysis in Building Performance Simulation For Design Support. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 10, p. 2798-2805, 2011.

HUNGR, O.; LEROUEIL, S.; PICARELLI, L. The Varnes classification of landslide types, an update. **Landslides**, v.11, p.167-194, 2014.

HUSSIN, H. Y. **Probabilistic run-out modeling of a debris flow in Barcelonnette**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geo-information Science And Earth Observation, University of Twente, Enschede, The Netherlands, 107 f., 2011.

HUTTER, K.; SVENDSEN, B.; RICKENMANN, D. Debris flow modeling: A review. **Continuum Mechanics and Thermodynamics**, v. 8, p.1-35, 1996.

IMAIZUMI, F.; SIDLE, R.; KAMEI, R. Effects of forest harvesting on the occurrence of landslides and debris flows in steep terrain of central Japan. **Earth Surface Processes and Landforms**, v.33, p.827–840, 2008.

IRDR — Integrated Research on Disaster Risk. **Peril Classification and Hazard Glossary**. Beijing: Integrated Research on Disaster Risk, 2014. 24p. (IRDR DATA Publication No. 1).

ITOKAZU, T.; NAKATANI, K.; YAMANOI, K.; HASEGAWA, Y.; FUJITA, M. Study on evacuation route from debris flow using debris flow simulator. **Annals of Disaster Prevention Research Institute**, n. 59-B, p.420-425, 2016.

IVERSON, R. M. The physics of debris flow: **Reviews Geophysics**, v. 35, n. 3, p. 245-296, 1997.

IVERSON, R. M. Landslide triggering by rain infiltration. **Water Resources Research**, v. 36, n. 7, p. 1897-1910, 2000.

IVERSON, R.M. Debris flow. In: GOUDIE, A.S. (ed.), **Encyclopedia of Geomorphology**, London: Routledge, 2004. p.225.

JAKOB, M; HUNGR,O. (eds.) **Debris-flow hazards and related phenomena**. Berlin: Springer-Verlag, 2005. 739p.

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-Verlag, 1997. p.93-116.

KOBIYAMA, M.; MENDONÇA, M.; MORENO, D. A.; MARCELINO, I. P. V. O; MARCELINO, E. V.; GONÇALVES, E. F.; BRAZETTI, L. L. P.; GOERL, R. F.; MOLLERI, G.; RUDORFF, F. **Prevenção de desastres naturais: conceitos básicos**. Curitiba: Organic Trading, 2006. 109 p.

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

KURYLO, J. B. **Sensitivity analysis of UBCDFLOW and debris flow travel distance in mountainous forested terrain around the Kootenay, British Columbia Region**. 2010. 105 f. TCC (Graduação) - Curso de Geological Engineering, University Of British Columbia, Vancouver, 2010. Disponível em: <<https://open.library.ubc.ca/cIRcle/collections/undergraduateresearch/52966/items/1.0053592>>. Acesso em: 12 nov. 2016.

LIU, J.; NAKATANI, K.; MIZUYAMA, T. Hazard mitigation planning for debris flow based on numerical simulation using Kanako simulator. **Journal of Mountain Science**, v. 9, n. 4, p. 529-537, 2012.

LIU, J.; NAKATANI, K.; MIZUYAMA, T. Effect assessment of debris flow mitigation works based on numerical simulation by using Kanako 2D. **Landslides**, v. 10, n. 2, p. 161- 173, 2013.

LU, Y.; MOHANTY, S. Sensitivity analysis of a complex, proposed geologic waste disposal system using the Fourier Amplitude Sensitivity Test method. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 72, n. 3, p.275-291, 2001. [http://dx.doi.org/10.1016/s0951-8320\(01\)00020-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0951-8320(01)00020-5).

LUNA, B. Q.; REMAITRE, A.; VAN ASCH, T.W.J.; MALET, J.P.; VAN WESTEN, C.J. Analysis of debris flow behavior with one dimensional run-out model incorporating entrainment. **Engineering Geology**, v. 128, p.63-75, 2012.

MATSUMOTO, N.; WADA, T.; NAKATANI, K.; SATOFUKA, Y.; MIZUYAMA, T. Prediction of debris flow deposition by a numerical model considering the change of grain size distribution. **Journal of Japan Society of Erosion Control**, v. 65, n. 3, p. 3 - 11, 2012.

MICHEL, G.P. **Estimativa da profundidade do solo e seu efeito na modelagem de escorregamentos**. 2015. 164 f. Tese (Doutorado)-Universidade Federal do Rio Grande

do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2015.

MICHEL, G. P. ; KOBİYAMA, M. ; GOERL, R. F. . Formulação do fator de segurança considerando a presença de vegetação. **In: XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2013, Bento Gonçalves. Anais, 2013.

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

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

MOHANTY, S.; CODELL, R.; RICE, R.; WELDY, J.; LU, Y.; BYRNE, R.; McCARTIN, T.; JARZEMBA, M.; WITTMAYER, G. **System-level repository sensitivity analysis using TPA version 3.2 code. Center for nuclear waste regulatory analyses, southwest research institute**, Report CNWRA 99-002, prepared for US Nuclear Regulatory Commission, 1999.

MORRIS, M.D. Factorial sampling plans for preliminary computational experiments. **Technometrics**. 33, p. 161-174, 1991

NAEF, D.; RICKENMANN, D.; RUTSCHMANN, P.; MCARDELL, B.W.. Comparison of flow resistance relations for debris flows using a one-dimensional finite element simulation model. **Natural Hazards and Earth System Sciences**. v. 6, pp. 155-165, 2006.

NAKATANI, K.; WADA, T.; SATOFUKA, Y.; MIZUYAMA, T. Development of “Kanakano 2D (Ver.2.00),” a user-friendly one- and two-dimensional debris flow simulator equipped with a graphical user interface. **International Journal of Erosion Control Engineering**, v. 1, n. 2, p. 62-72, 2008.

NAKATANI, K.; WADA, T.; SATOFUKA, Y.; MIZUYAMA, T. Study on preventing debris flow disaster on heritage existing mountainous area applying numerical simulation. **Journal of History, City and Disasters**, v. 3, n. 6, p. 135-142, 2009.

NAKATANI, K.; SATOFUKA, Y.; MIZUYAMA, T. Planning effective sabo dams with user friendly debris flow simulator “Kanakano”. **Journal of Japan Society of Erosion Control**, v. 63, n. 3, p. 42 – 49, 2010.

NAKATANI, K.; IMOTO, D.; SATOFUKA, Y.; MIZUYAMA, T. Study on sediment control effect of shutter sabo dam applying numerical simulation. **Journal of Japan Society of Erosion Control**, v. 63, n. 6, p. 43 – 51, 2011.

NAKATANI, K.; IWANAMI, E.; HORIUCHI, S.; SATOFUKA, Y.; MIZUYAMA, T. Development of “Hyper Kanakano”, a debris flow simulation system based on laser profiler

data. In.: 12th Congress INTERPRAEVENT, Grenoble/France, Proceedings, 2012, p.269-280.

NAKATANI, K.; OKUYAMA, Y.; HASEGAWA, Y.; SATOFUKA, Y.; MIZUYAMA, T. Influence of housing and urban development on debris flow flooding and deposition. **Journal of Mountain Science**, v. 10, n. 2, p.273-280, 2013. <http://dx.doi.org/10.1007/s11629-013-2507-x>.

NAKATANI, K.; HAYAMI, S.; SATOFUKA, Y.; MIZUYAMA, T. Case study of debris flow disaster scenario caused by torrential rain on Kiyomizu-dera, Kyoto, Japan – using Hyper KANAKO system. **Journal of Mountain Science**, v. 13, n.2, p. 193-202, 2016a.

NAKATANI, K.; KOSUGI, M.; SATOFUKA, Y.; MIZUYAMA, T. Debris flow flooding and debris deposition considering the effect of houses: disaster verification and numerical simulation. **International Journal of Erosion Control Engineering**, v. 9, n. 4, p.145-154, 2016b.

NAKATANI, K.; HAYAMI, S.; SATOFUKA, Y.; MIZUYAMA, T. Case study of debris flow disaster scenario caused by torrential rain on Kiyomizu-dera, Kyoto, Japan - using Hyper KANAKO system. **Journal of Mountain Science**, [s.l.], v. 13, n. 2, p.193-202, fev. 2016c. <http://dx.doi.org/10.1007/s11629-015-3517-7>.

NISHIGUCHI, Y.; UCHIDA, T.; ISHIZUKA, T.; SATOFUKA, Y.; NAKATANI, K. Numerical simulation for run out process of large-scale debris flow focused on fine sediments behaviors – application for debris flow triggered by a deep catastrophic landslide. **Journal of Japan Society of Erosion Control**, v. 64, n. 3, p. 11 – 20, 2011.

RICKENMANN, D. Empirical Relationships for Debris Flows. **Natural Hazards**, v.19, n.1, p. 47-77, 1999.

RIO DE JANEIRO. **Sistema de custos de obras e serviços de engenharia FGV: tabelas**. Diário Oficial do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 28 jul. 2016. Disponível em: www.rio.rj.gov.br/dlstatic/10112/5154402/4136618/FGV04MdoO20032015.pdf

SALTELLI, A.; TARANTOLA, S.; CAMPOLONGO, F. Sensitivity analysis as an ingredient of modeling. **Statistical Science**, v.15, p.377-395, 2000.

SALTELLI, A.; RATTO, M.; ANDRES, T.; CAMPOLONGO, F.; CARIBONI, J.; GATELLI, D. SAISANA, M.; TARANTOLA, S. **Global sensitivity analysis: the Primer**. John Wiley & Sons Ltd. Chichester. 2008.

SAVAGE, S. B.; SAYED, M.. Stress developed by dry cohesionless granular materials sheared in an annular shear cell. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 127, p. 453-472, 1984.

SEMA-RS. **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**. Secretaria do Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. Porto Alegre, RS, 25 jan. 2017. Disponível em: http://www.rs.gov.br/upload/20170125183225diagnostico_preliminar_gt_rolante_revfinal.pdf

SHRESTHA, D.P.; ZINCKA J.A.; VAN RANST, E.; Modelling land degradation in the Nepalese Himalaya. **Catena**, v.57, p.135–156, 2004.

SILVA, A.; GHISI, E. ENEDIR. **Análise de sensibilidade global dos parâmetros termofísicos de uma edificação residencial de acordo com o método de simulação do RTQ-R**. *Ambient. constr.* [online]. 2013, vol.13, n.4, pp.135-148. ISSN 1678-8621. <http://dx.doi.org/10.1590/S1678-86212013000400010>.

SONG, X.; ZHANG, J.; ZHAN, C.; XUAN, Y.; YE, M.; XU, C. Global sensitivity analysis in hydrological modeling: Review of concepts, methods, theoretical framework, and applications. **Journal of Hydrology**, v. 523, p.739-757, 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.02.013>.

SUMARYONO, A.; NAKATANI, K.; SATOFUKA, Y.; MIZUYAMA, T. One-dimensional numerical simulation for sabo dam planning using Kanako (Ver. 1.40): A case study at Cipanas, Guntur Volcanoes, West Java, Indonesia. **International Journal of Erosion Control Engineering**, v. 2, n. 1, p. 22-32, 2009.

TAKAHASHI, T. A mechanism of occurrence of mud-debris flows and their characteristics in motion. **Annuals. DPRI**, v. 20B-2; p. 405-435, 1977.

TAKAHASHI, T. **Debris flow**. Rotterdam: Balkema, 1991. 165p. (Monograph of IAHR).

TAKAHASHI, T. Progress in debris flow modeling. In: SASSA, K.; FUKUOKA, H.; WANG, F.; WABG, G. (eds.) **Progress in landslide science**. Heidelberg: Springer-Verlag, 2007. p.60-77.

TAKAHASHI, T.; NAKAGAWA, H. Prediction of Stony Debris Flow Induced by Severe Rainfall. **Sabo Gakkaishi**, v. 44, n. 3, p. 12-19, 1991.

UCHIDA, T.; NISHIGUCHI, Y.; NAKATANI, K.; SATOFUKA, Y.; YAMAKOSHI, T.; OKAMOTO, A.; MIZUYAMA, T. . New numerical simulation procedure for large-scale debris flows (Kanakano-LS). **International Journal of Erosion Control Engineering**, v. 6, n 2, p.58-67, 2013.

VAN ASCH, T. W. J. et al. Techniques, issues and advances in numerical modelling of landslide hazard. **Bulletin de La Societe Geologique de France**, v. 178, n. 2, p.65-88, 2007. GeoScienceWorld. <http://dx.doi.org/10.2113/gssgfbull.178.2.65>.

VANDINE, D.F.; BOVIS, M. History and Goals of Canadian Debris Flow Research, A Review. **Natural Hazards** v. 26, p.69–82, 2002.

VARNES, D. J. Slope movement types and processes. In: SCHUSTER, R.L.; KRIZEK, R.J. (eds.) **Landslides, analysis and control**. Washington: Transportation research board/National Academy of Sciences, 1978. p. 11-33. (Special report 176).

WHIPPLE, K. X. Predicting debris-flow runout and deposition on fans: the importance of the flow hydrograph. **IAHS Publication**, v.209, p. 337-345, 1992.

WISOYO, A. The analysis of sabo dam performance as a sediment control structure in Putih River, Mt. Terapi. **Civil Engineering Forum**, v. 21, n. 3, p. 1271-1278, 2012.

YU, G; ZHANG, M; CHEN, H. The dynamic process and sensitivity analysis for debris flow. In: SASSA, K.; CANUTI, P.; YIN, Y. (eds.) **Landslide Science for a Safer Geoenvironment**. 2. ed. Springer, 2014. p. 159-165.

ZHAN, C. S.; SONG, X.; XIA, J.; TONG, C. An efficient integrated approach for global sensitivity analysis of hydrological model parameters. **Environment Modelling & Software**, v. 41, p39-52, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.10.009>.

APÊNDICES

Tabela A1 - Valores utilizados nas simulações com Kanako-2D

PARÂMETRO	IDENTIFICAÇÃO DA SIMULAÇÃO											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
CCM	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,65						
CRM	0,025	0,05	0,100	0,150	0,200							
MEL	1600	1750	1900	2150	2300	2450	2600	2700				
MFL	1000	1100	1200	1300	1400	1500						
CTE	0,0001	0,001	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1
CTD	0,0001	0,001	0,01	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
DIA	0,01	0,05	0,1	0,3	0,5	1	2	3	5	7,5	10	
ANG	22	26	30	35	40							
CSD	0,44	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,77					

Tabela A2 - Resultados por parâmetro das simulações para a vertente real:
(a) CSD; (b) ANG; (c) DIA; (d) CTD; (e) MFL; (g) MEL; (h) CRM; (i) CCM; e (j) CTE

a)

Valor do parâmetro	0,44	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,77
Alcance (m)	668	446	440	341,7	342,9	341	348
Deposição (m ²)	15050	13075	10543,75	8468,75	8556,25	8481,25	8500
Erosão (m ²)	1025	643,75	356,25	500	237,5	362,5	281,25
Total (m ²)	16075	13718,75	10900	8968,75	8793,75	8843,75	8781,25
Largura (m)	44,32	47,1375	46,33	46,7	51,93	48,9	44,06

b)

Valor do parâmetro	22	26	30	35	37	40
Alcance (m)	764,3	756	669	651	446	557
Deposição (m ²)	21706,25	19593,75	17256,25	13812,5	13075	11512,5
Erosão (m ²)	10506,25	6418,75	2618,75	1050	643,75	400
Total (m ²)	32212,5	26012,5	19875	14862,5	13718,75	11912,5
Largura (m)	74,75	51	47,5	44,25	47,13	39,33

c)

Valor do parâmetro	0,01	0,05	0,1	0,3	0,45	0,5	1	2	3	5	7,5
Alcance (m)			755	659	446	455	365	287	249	228	210
Deposição (m ²)	21043,75	15237,5	14256,25	13918,75	13075	12200	9868,75	7143,75	5975	4668,75	3787,5
Erosão (m ²)	6793,75	8831,25	6943,75	1762,5	643,75	562,5	200	187,5	12,5	93,75	43,75
Total (m ²)	27837,5	24068,75	21200	15681,25	13718,75	12762,5	10068,75	7331,25	5987,5	4762,5	3831,25
Largura (m)			35,4	35,25	47,1375	35,25	47,4	50,5	56,3	40	76

d)

Valor do parâmetro	0,001	0,01	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Alcance (m)	585	658	446	451	450	437	454	541	553	564	560	560
Deposição (m ²)	29181,25	17306,25	13075	11581,25	10962,5	10906,25	10731,25	10831,25	11031,25	10718,75	10687,5	10668,75
Erosão (m ²)	1006,25	875	643,75	750	612,5	506,25	525	475	400	406,25	381,25	412,5
Total (m ²)	30187,5	18181,25	13718,75	12331,25	11575	11412,5	11256,25	11306,25	11431,25	11125	11068,75	11081,25
Largura (m)	76,25	47,75	471,375	41	33,25	35,25	37,5	38,25	33,75	35,25	35,25	39,25

e)

Valor do parâmetro	1000	1100	1200	1300	1400	1500
Alcance (m)	446	449	668	735	751	756
Deposição (m ²)	13075	14318,75	16200	18287,5	20075	21731,25
Erosão (m ²)	643,75	1150	1975	3218,75	5050	8993,75
Total (m ²)	13718,75	15468,75	18175	21506,25	25125	30725
Largura (m)	47,1	44,7	43	43	42,5	45

f)

Valor do parâmetro	1600	1750	1900	2150	2300	2450	2600	2650	2700
Alcance (m)	772	753	758	665	557	432	436	446	456
Deposição (m ²)	23425	21287,5	20193,75	16962,5	15606,25	14268,75	13237,5	13075	12587,5
Erosão (m ²)	15493,75	9668,75	5287,5	2075	1431,25	1118,75	775	643,75	568,75
Total (m ²)	38918,75	30956,25	25481,25	19037,5	17037,5	15387,5	14012,5	13718,75	13156,25
Largura (m)	69,25	51	50,75	46,6	45	46,3	42,3	47,13	46

g)

Valor do parâmetro	0,025	0,03	0,05	0,1	0,15	0,2	0,7
Alcance (m)	446	446	548	502	510	527	653
Deposição (m ²)	12887,5	13075	12612,5	12312,5	12137,5	12887,5	12743,75
Erosão (m ²)	800	643,75	512,5	556,25	550	800	575
Total (m ²)	13687,5	13718,75	13125	12868,75	12687,5	13687,5	13318,75
Largura (m)	44	47,1	45,3	36	37,6	42	47,6

h)

Valor do parâmetro	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,65
Alcance (m)	777	748	613	506	409	446
Deposição (m ²)	21406,25	19318,75	16400	12800	10231,25	12918,75
Erosão (m ²)	21062,5	13987,5	6831,25	2825	1375	706,25
Total (m ²)	42468,75	33306,25	23231,25	15625	11606,25	13625
Largura (m)	70,25	62,8	53	40,75	42,5	44,75

i)

Valor do parâmetro	0,0001	0,0007	0,001	0,01	0,03	0,04	0,05	0,06	0,08	0,09
Alcance (m)	475	446	474	650	640	645	637	638	655	656
Deposição (m ²)	12500	12919	13775	22050	26500	27350	28825	28000	29050	29200
Erosão (m ²)	150	706	775	11275	15800	16725	17450	17950	19450	20100
Total (m ²)	12650	13625	14550	33325	42300	44075	46275	45950	48500	49300
Largura (m)	49	45	63	96	101	105	138	130	120	120

Tabela A3 - Resultados por parâmetro das simulações para a vertente real: (a) CSD; (b) ANG; (c) DIA; (d) CTD; (e) MFL; (f) MEL; (g) CRM; (h) CCM; e (i) CTE

a)

Valor do parâmetro	0,44	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,77
Deposição (m ²)	16012,5	11812,5	8806,25	6862,5	7093,75	6881,25	6906,25
Erosão (m ²)	0	0	0	0	0	0	
Total (m ²)	16012,5	11812,5	8806,25	6862,5	7093,75	6881,25	6906,25
Alcance (m)	380	324	280	250	252	200	203
Largura (m)	85	75	72	67	75	73	76

b)

Valor do parâmetro	22	26	30	35	37	40
Deposição (m ²)	20243,75	17350	14987,5	12306,25	11812,5	11200
Erosão (m ²)	6,25	0	143,75	0	0	0
Total (m ²)	20250	17350	15131,25	12306,25	11812,5	11200
Alcance (m)	432	397	357	332	324	317
Largura (m)	94	85	85	84	75	76

c)

Valor do parâmetro	0,01	0,05	0,1	0,45	0,5	1	2	3	5	7,5	10
Deposição (m ²)	6506,25	6706,25	7893,75	11812,5	11525	8450	6375	5775	4818,75	3806,25	3418,75
Erosão (m ²)	987,5	87,5	0	0	37,5	0	0	12,5	81,25	0	0
Total (m ²)	7493,75	6793,75	7893,75	11812,5	11562,5	8450	6375	5787,5	4900	3806,25	3418,75
Alcance (m)	327	255	271	324	313	270	248	247	236	227	226
Largura (m)	42	76	86	75	83	80	82	80	71	63	64

d)

Valor do parâmetro	0,0001	0,001	0,01	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
Deposição (m ²)	44487,5	38668,75	20168,75	11812,5	9881,25	9787,5	8925	8593,75	8812	8268,75	8156,25	8368,75
Erosão (m ²)	0	0	0	0	0	18,75	0	0	31,25	0	0	43,75
Total (m ²)	44487,5	38668,75	20168,75	11812,5	9881,25	9806,25	8925	8593,75	8843,25	8268,75	8156,25	8412,5
Alcance (m)	465	466	384	324	307	301	303	300	297	290	292	292
Largura (m)	164	145	109	75	81	83	82	73	73	73	73	73

e)

Valor do parâmetro	1000	1100	1200	1300	1400	1500
Deposição (m ²)	11812,5	12918,75	14212,5	16168,75	18706,25	20056,25
Erosão (m ²)	0	0	0	0	0	0
Total (m ²)	11812,5	12918,75	14212,5	16168,75	18706,25	20056,25
Alcance (m)	324	337	206	381	410	420
Largura (m)	75	86	81	75	74	76

f)

Valor do parâmetro	1600	1750	1900	2150	2300	2450	2650	2700
Deposição (m ²)	23450	20037,5	18337,5	14500	13456,25	12718	11812,5	11706,25
Erosão (m ²)	1100	0	0	0	0	0	0	0
Total (m ²)	24550	20037,5	18337,5	14500	13456,25	12718	11812,5	11706,25
Alcance (m)	480	478	400	355	344	335	324	321
Largura (m)	91	88	82	83	80	80	75	83

g)

Valor do parâmetro	0,025	0,03	0,05	0,1	0,15	0,2
Deposição (m ²)	11750	11812,5	11881	11775	11806,25	12050
Erosão (m ²)	0	0	0	0	0	0
Total (m ²)	11750	11812,5	11881	11775	11806,25	12050
Alcance (m)	322	324	321	328	322	320
Largura (m)	84	75	82	80	92	85

h)

Valor do parâmetro	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.65
Deposição (m ²)	10225	8987.5	8187.5	7731.25	7368.75	11812.5
Erosão (m ²)	468.75	0	0	0	0	0
Total (m ²)	10693.8	8987.5	8187.5	7731.25	7368.75	11812.5
Alcance (m)	297	274	264	261	256	324
Largura (m)	87	85	92	89	88	75

i)

Valor do parâmetro	0,0001	0,0007	0,001	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1
Deposição (m ²)	11815,5	11812,5	11812,5	12287,5	12956,25	13681,25	14606,25	14750	14200	13993,75	13168,75	14462,5	14387,5
Erosão (m ²)	0	0	0	131,25	787,5	1400	2306,25	2700	2180,75	2025	2225	2212,5	2462,5
Total (m ²)	11815,5	11812,5	11812,5	12418,75	13743,75	15081,25	16912,5	17450	16380,75	16018,75	15393,75	16675	16850
Alcance (m)	328	324	318	330	338	340	346	335	353	350	337	357	355
Largura (m)	67	75	81	78	74	70	82	79	76	81	76	80	76

Tabela A4 - Resultados da análise de sensibilidade: (a) K1; (b) K2; e (c) K3.**a)**

Parâmetro	Vertente Real					Vertente Hipotética		
	Alcance	Área de Deposição	Área de Erosão	Área Total	Largura	Alcance	Total	Largura
CSD	1,09	0,76	1,75	0,81	0,01	0,83	1,17	0,18
ANG	0,96	1,60	32,27	3,04	1,54	0,73	1,57	0,49
DIA	0,16	0,11	0,94	0,15	0,01	0,03	0,02	0,03
CTD	0,01	0,35	0,05	0,34	0,04	0,12	0,17	0,07
MFL	1,39	1,32	25,94	2,48	0,09	0,59	1,40	0,03
MEL	1,71	2,00	55,85	4,52	1,19	1,18	2,62	0,26
CRM	0,02	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CCM	0,88	0,78	34,06	2,50	0,67	0,10	0,11	0,19
CTE	0,00	0,01	0,22	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00

b)

Parâmetro	Vertente Real					Vertente Hipotética		
	Alcance	Área de Deposição	Área de Erosão	Área Total	Largura	Alcance	Total	Largura
CSD	4,1	2,5	4,9	2,6	1,1	2,7	3,0	1,1
ANG	8,5	1,9	58,7	4,2	4,7	1,1	2,3	2,2
DIA	2,9	5,0	35,6	3,1	2,3	2,5	2,3	5,1
CTD	0,9	5,0	1,1	4,9	3,4	0,3	2,7	1,4
MFL	4,9	1,6	61,3	4,1	0,7	5,4	2,1	1,5
MEL	5,0	2,9	159,9	10,3	6,8	4,3	6,7	1,4
CRM	0,3	0,1	1,5	0,1	0,4	0,0	0,0	0,7
CCM	2,0	1,8	65,9	4,8	1,8	0,9	1,6	0,8
CTE	0,1	0,2	1,2	0,2	1,0	0,0	0,0	0,2

c)

Parâmetro	Vertente Real					Vertente Hipotética		
	Alcance	Área de Deposição	Área de Erosão	Área Total	Largura	Alcance	Total	Largura
CSD	656,82	785,31	2151,81	823,27	28,24	400,5	883,0	52,6
ANG	747,97	940,37	396155,34	3360,58	695,08	199,9	922,0	86,3
DIA	3928,95	1621,50	276234,16	3495,42	787,72	134,6	548,5	285,7
CTD	257,24	1703,83	992,15	1646,16	636,34	415,2	11519,7	1725,7
MFL	1100,96	658,16	234881,11	2159,00	13,67	589,9	763,6	39,4
MEL	1142,86	933,59	657004,30	4347,16	281,99	416,0	1538,1	43,6
CRM	250,43	6,62	348,09	9,46	92,70	0,8	0,9	56,9
CCM	1213,93	1102,36	1329099,12	8153,66	718,46	65,8	223,7	61,2
CTE	388,83	3082,64	1375478,19	12849,23	5602,82	16,3	391,0	36,7