



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS HUMANAS  
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA  
LABORATÓRIO DE SISTEMAS DE INFORMAÇÕES ESPACIAIS

**APLICAÇÃO DO MODELO SHALSTAB PARA DELIMITAÇÃO  
DE ÁREAS SUSCEPTÍVEIS A ESCORREGAMENTO NO  
MUNICÍPIO DE NITERÓI - RJ**

PEDRO COUTINHO MENDONÇA

ORIENTADOR: PROF. DR. ROBERTO ARNALDO TRANCOSO GOMES

COORIENTADOR: PROF. DR. RENATO FONTES GUIMARÃES

Dissertação de Mestrado

Brasília, 2017

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS HUMANAS  
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA  
LABORATÓRIO DE SISTEMAS DE INFORMAÇÕES ESPACIAIS

APLICAÇÃO DO MODELO SHALSTAB PARA DELIMITAÇÃO DE ÁREAS  
SUSCEPTÍVEIS A ESCORREGAMENTO NO MUNICÍPIO DE NITERÓI - RJ

PEDRO COUTINHO MENDONÇA

Dissertação de Mestrado submetida ao Departamento de Geografia da Universidade de  
Brasília, como parte dos requisitos necessários para obtenção do Grau de Mestre em  
Geografia, área de concentração Gestão Ambiental e Territorial

---

Prof. Dr. Roberto Arnaldo Trancoso Gomes  
Universidade de Brasília - Departamento de Geografia  
Orientador

---

Prof. Dr. Renato Fontes Guimarães  
Universidade de Brasília - Departamento de Geografia  
Coorientador

---

Profa. Dra. Simone Cardoso Ribeiro  
Universidade Regional do Cariri – Departamento de Geociências  
Examinador Externo

---

Prof. Dr. Fabrizio de Luiz Rosito Listo  
Universidade Federal de Pernambuco – Departamento de Ciências Geográficas  
Examinador Externo

Brasília, 2017

Mendonça, Pedro Coutinho  
Aplicação do Modelo SHALSTAB para Delimitação de Áreas Susceptíveis a  
Escorregamento no Município de Niterói – RJ

54 p.

(UnB-IH-GEA-LSIE, Mestrado, 2017)  
Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Departamento de Geografia

Orientador: Roberto Arnaldo Trancoso Gomes

Coorientador: Renato Fontes Guimarães

Palavras chave: Escorregamentos, SHALSTAB, MDS, MDT.

Agradecimentos:

Quero agradecer a todos aqueles que ajudaram de alguma forma na realização desse trabalho.

Em especial aos meus familiares. A minha mãe Laura, meu pai Erasto, minha irmã Clara e minha companheira Gaia.

Aos professores do LSIE, Dr. Roberto Arnaldo Trancoso Gomes, Dr. Renato Fontes Guimarães e Dr. Osmar Abílio de Carvalho Junior. E aos professores Dra. Simone Cardoso Ribeiro e Dr. Fabrizio de Luiz Rosito Listo.

Aos companheiros do LSIE, Nathalia, Saiaka, Anesmar e Verônica.

## Resumo:

Os movimentos de massa são o tipo de desastre natural mais recorrente em ambientes tropicais, estes estão fortemente ligados a topografia e ao clima da região. A precipitação e a forma do relevo são os fatores mais importantes nos escorregamentos rasos. Os modelos de previsão podem auxiliar na identificação das áreas de risco e permitem que ações preventivas sejam tomadas. Dentre os diversos modelos de previsão, o mais utilizado em ambientes tropicais está o Modelo SHALSTAB que combina um modelo hidrológico com um modelo de estabilidade de encosta para determinar a razão entre quantidade de chuva diária e a transmissividade do solo para ocorrência de escorregamentos translacionais. Este trabalho tem por objetivo identificar as áreas mais susceptíveis à ocorrência de escorregamentos rasos no município de Niterói – RJ. As etapas necessárias para a aplicação do modelo SHALSTAB foram: a) Confecção do MDS e do MDT da região a partir dos dados laser provenientes do aerolevanteamento com a utilização do LiDAR, b) mapeamento das cicatrizes de deslizamentos anteriores a 2014, c) aquisição dos dados históricos de precipitação diária, d) aplicação do Modelo SHALSTAB, d) análise da eficácia do modelo. Os resultados demonstram que as simulações provenientes do MDT têm um comportamento contínuo e de maior eficiência do que as simulações feitas a partir do MDS. Nas simulações feitas a partir do MDS nota-se a presença da classe instável em maior quantidade na área estudada. Deste modo, conclui-se que as simulações a partir de um modelo digital de terreno é de suma importância pois identifica com melhor exatidão as áreas mais susceptíveis a escorregamentos.

Palavras Chave: Escorregamentos, SHALSTAB, MDS, MDT.

## Abstract:

Landslides are the most recurrent type of natural disaster in tropical environments, they are strongly linked to the topography and climate of the region. Precipitation and topography are the most important factors in shallow landslides. Prediction models can help identify risk areas and allow preventive actions to be taken. The most used prediction model is the SHALSTAB, that combine a hydrological model with a slope stability model to determine the ratio between the daily rainfall and soil transmissivity for the occurrence of a landslide. This work aims to identify the areas that are most susceptible to the occurrence of shallow landslides in the city of Niterói - RJ. The procedures required to apply the SHALSTAB model were: a) making the DSM and DTM of the region from airborne laser scanner LiDAR, b) mapping the landslide scars that occurred before 2014, c) acquisition of the historical data of daily precipitation, d) SHALSTAB Model application, d) analysis of the model efficiency. The results show that the simulations from the DTM are continuous and have a greater efficiency than the simulations made from the DSM. In the simulations made with the DSM, it is possible to observe a greater quantity of unstable class in the area. Thus, it is concluded that the simulations from a digital terrain model are really important because it identifies with better accuracy the areas most susceptible to landslides.

Key Words: Landslide, SHALSTAB, DSM, DTM.

## Sumário

1. Introdução.....	1
2. Área de Estudo .....	6
3. Revisão Bibliográfica.....	10
3.1. Mecanismos dos Escorregamentos .....	10
3.2. LiDAR.....	11
3.3. Modelos Digitais (de Terreno e de Superfície).....	12
3.4. A Modelagem de Susceptibilidade a Escorregamento.....	14
<b>4. Materiais e Métodos .....</b>	<b>17</b>
4.1. Coleta e Tratamento dos Dados .....	17
4.1.1. Confecção do MDT e do MDS.....	17
4.2. Mapeamento das Cicatrizes .....	20
4.3. Elaboração do Modelo SHALSTAB .....	21
4.4. Validação do SHALSTAB.....	23
5. Resultados e Discussões.....	24
6. Conclusão.....	39
7. Bibliografia.....	40

## Lista de Figuras:

Figura 1: Visão Geral do Deslizamento do Morro do Bumba. Fonte: <a href="http://noticias.terra.com.br/">http://noticias.terra.com.br/</a> .....	2
Figura 2: Mapa de Domínios de Risco a Escorregamento no Rio de Janeiro. Adaptado de DRM, 2015. ....	4
Figura 3: Mapa de Localização de Niterói .....	6
Figura 4: Mapa Pedológico de Niterói. Fonte: CPRM. ....	8
Figura 5: Mapa de Escorregamentos Vistoriados em Niterói Pela Defesa Civil. Fonte: <a href="http://www.defesacivil.niteroi.rj.gov.br">www.defesacivil.niteroi.rj.gov.br</a> .....	9
Figura 6: Grade 5m x 5m mostrando a distribuição de densidade dos pontos provenientes de um levantamento laser. A: MDT; B: MDS; C: Ortofoto.....	18
Figura 7: Localização das 34 Cicatrizes Mapeadas no Presente Trabalho.....	21
Figura 8: MDT Gerado no Município .....	25
Figura 9: MDS Gerado no Município.....	26
Figura 10: Visão 3D do MDS com exagero vertical de 4x. ....	26
Figura 11: Visão 3D do MDT com exagero vertical de 4x. ....	27
Figura 12: Comparação do perfil topográfico do MDS e do MDT em área com presença de edifícios.....	27
Figura 13: Comparação do perfil topográfico do MDS e do MDT em área com presença de vegetação. ....	28
Figura 14: Comparação entre a declividade do MDT e do MDS.....	29
Figura 15: Comparação entre a área de contribuição do MDT e do MDS .....	30
Figura 16: Comparação entre a modelagem feita a partir do MDT (superior) e do MDS (inferior). As duas simulações foram feitas utilizando os valores de densidade do solo de 1,5 g/cm <sup>3</sup> , ângulo de atrito 35 e coesão 0. ....	33

Figura 17: Comparação entre a modelagem feita a partir do MDT (superior) e do MDS (inferior). As duas simulações foram feitas utilizando os valores de densidade do solo de 1,5 g/cm <sup>3</sup> , ângulo de atrito 40 e coesão 0. ....	34
Figura 18: Detalhe das simulações feitas, a partir do MDT (A e C) e do MDS (B e D) utilizando valores de densidade do solo de 1,5 g/cm <sup>3</sup> e ângulo de atrito 35 e 40.....	35
Figura 19: Classificação do modelo SHALSTAB sobre o relevo no MDT. ....	38
Figura 20: Classificação do modelo SHALSTAB sobre o relevo no MDS. ....	39

### **Lista de Tabelas:**

Tabela 1: Classes de Estabilidade dos Pixels no Modelo SHALSTAB. ....	16
Tabela 2: Tabela contendo a combinação dos valores que geraram os 72 cenários.....	23
Tabela 3: Média dos valores de declividade do MDT nas cicatrizes. ....	30
Tabela 4: Média dos valores de declividade do MDS nas cicatrizes.....	30
Tabela 5: Média dos valores de área de contribuição do MDT nas cicatrizes. ....	31
Tabela 6: Média dos valores de área de contribuição do MDS nas cicatrizes.....	31
Tabela 7: Rank das diferentes combinações dos valores dos parâmetros de solo das 72 simulações para a modelagem com o uso do modelo digital de terreno. ....	36
Tabela 8: Rank das diferentes combinações dos valores dos parâmetros de solo das 72 simulações para a modelagem com o uso do modelo digital de superfície. ....	36

## **Lista de Gráficos:**

Gráfico 1: Média dos Dados Termo Pluviométricos de Niterói. Fonte: <a href="http://www.climate-data.org">www.climate-data.org</a> .....	7
Gráfico 2: Precipitação Diária. Fonte: INMET .....	24
Gráfico 3: Gráfico com a frequência do número de pixels nas cicatrizes entre os valores de 0 à 200 mm/dia dividido pelo total de pixels da cicatrizes. ....	37



# 1.Introdução

A ocupação humana, quando feita de forma desordenada, pode ocasionar o agravamento das condições de risco. O uso da terra pode provocar desastres que envolvem perdas humanas, econômicas e ambientais quando feito de forma desordenada. Dentre os problemas causados pelo uso desordenado da terra estão os movimentos de massa. Apesar de ser um fenômeno natural, os movimentos de massa podem ser agravados pela ocupação humana. Estes fenômenos são muito comuns em diversas partes do mundo onde o relevo é acidentado e com grandes volumes de chuvas em um curto espaço de tempo (DOWLING et al., 2014). De acordo com Kirschbaum et al. (2010), a combinação entre as áreas de relevo acidentado com precipitação elevada são considerados os principais condicionantes para o desencadeamento de movimentos de massa.

A delimitação e definição das áreas mais susceptíveis a este tipo de fenômeno é de extrema importância e têm sido desenvolvidas por diversas linhas de pesquisa. Isto é de fundamental importância para as tomadas de decisões dos gestores das cidades. O Brasil devido ao seu relevo acidentado e ocorrência de grandes volumes de chuva num curto espaço de tempo possui as condições necessárias para a ocorrência dos movimentos de massa (FERNANDES E AMARAL, 1996).

O município de Niterói, no estado do Rio de Janeiro, é uma área com alta ocorrência desse tipo de fenômeno. Recentes eventos, como o ocorrido no Morro do Bumba em 2010, mostram que ainda é necessário se investir em estudos que objetivem a delimitação de áreas susceptíveis para que os impactos dos desastres sejam minimizados e para que vidas humanas sejam poupadas. A Figura 1 mostra uma visão geral do movimento de massa ocorrido no Morro do Bumba em 2010, no qual 47 pessoas morreram. Exemplos como esse mostram que ainda é necessário se investir em formas de delimitar áreas de susceptibilidade com o intuito de melhorar a ocupação nessas áreas de risco. Fica bastante claro que ainda são necessárias providências e políticas públicas visando uma realocação desses moradores.

Neste intuito o desenvolvimento de metodologias de previsão dos movimentos de massa, se torna essencial como uma ferramenta de subsídio para políticas de

prevenção de danos. Esta delimitação de áreas que são mais susceptíveis permite a tomada de decisões que visem à prevenção ou a diminuição de prejuízos humanos e econômicos.



Figura 1: Visão Geral do Deslizamento do Morro do Bumba. Fonte: <http://noticias.terra.com.br/>

Este tipo de trabalho pode servir de subsídio para políticas públicas de uso e ocupação da terra. Mapas de susceptibilidade são peças chave na gestão de risco e representam a probabilidade de ocorrência de um evento catastrófico (PENNA, et al. 2014). Fica clara a importância e a necessidade de estudos que apontem áreas de risco eminente e mostrem as áreas com real probabilidade de ocorrência.

Já existem no Brasil políticas públicas de prevenção de danos decorrentes de desastres naturais. O convênio entre a Caixa Econômica Federal e o Ministério das Cidades criou o Programa de Urbanização, Regularização e Integração de Assentamentos Precários (Ministério das Cidades, 2017). O programa tem por objetivo a adequação e a regularização de assentamentos precários com o intuito de minimizar danos socioeconômicos decorrentes de eventos naturais.

Outra política foi a criação do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais - CEMADEN, que é vinculado à Secretaria de Políticas e Programas de Pesquisas e Desenvolvimento – SEPED, tem por objetivo testar e implementar sistemas de monitoramento e previsão de eventos desastrosos em regiões que contenham áreas susceptíveis. A prevenção e a redução de danos são os principais focos da CEMADEN (CEMADEN, 2017).

A Lei Nº 12.608, de 10 de Abril de 2012, institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil - PNPDEC. Além disso, dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil - SINPDEC e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil - CONPDEC. A Lei em questão autoriza a criação de sistema de informações e monitoramento de desastres, além de deixar claro que é dever da União, dos Estados, do Distrito Federal e dos Municípios adotar as medidas necessárias à redução dos riscos de desastres naturais. O capítulo 2 do Artigo 22 da Lei 12.608 estabelece que é dever dos municípios elaborar um mapeamento contendo as áreas suscetíveis à ocorrência de movimentos de massa com grande impacto, inundações bruscas ou processos geológicos ou hidrológicos correlatos. Isso mostra a importância desse tipo de trabalho em ambientes que estão susceptíveis à ocorrência desse tipo de evento.

Em 2009, no estado do Rio de Janeiro, foi criado o Núcleo de Análise e diagnóstico de Escorregamento – NADE. Esse órgão faz parte do DRM-RJ e visa o aprimoramento dos estudos e das tomadas de decisões em situações de movimentos de massa. Esse órgão foi criado, pois o estado apresenta um grande número de municípios em área de risco e ainda carece de um mapeamento preciso para todos.

O município de Niterói (RJ) foi escolhido como área de pesquisa desta dissertação por apresentar uma grande população residente em áreas de risco. Assentamentos como favelas tendem a ocupar áreas de morros de forma desordenada e sem planejamento, isso faz que a população de baixa renda seja muito mais vulnerável a esse tipo de desastre.

A Figura 2 mostra um mapa dos municípios do Rio de Janeiro que apresentam maior risco de escorregamento desenvolvido pelo Departamento de Recursos Minerais do Rio de Janeiro DRM – RJ no Plano de Contingência 2015/2016. Nesse mapa é possível observar que o município de Niterói está no grupo com maior número de

setores de risco. Isso faz que a área seja propensa ao desenvolvimento desse tipo de estudo, já que faz parte de uma área de risco, contendo mais de 100 regiões consideradas instáveis e propensas ao escorregamento de solo.

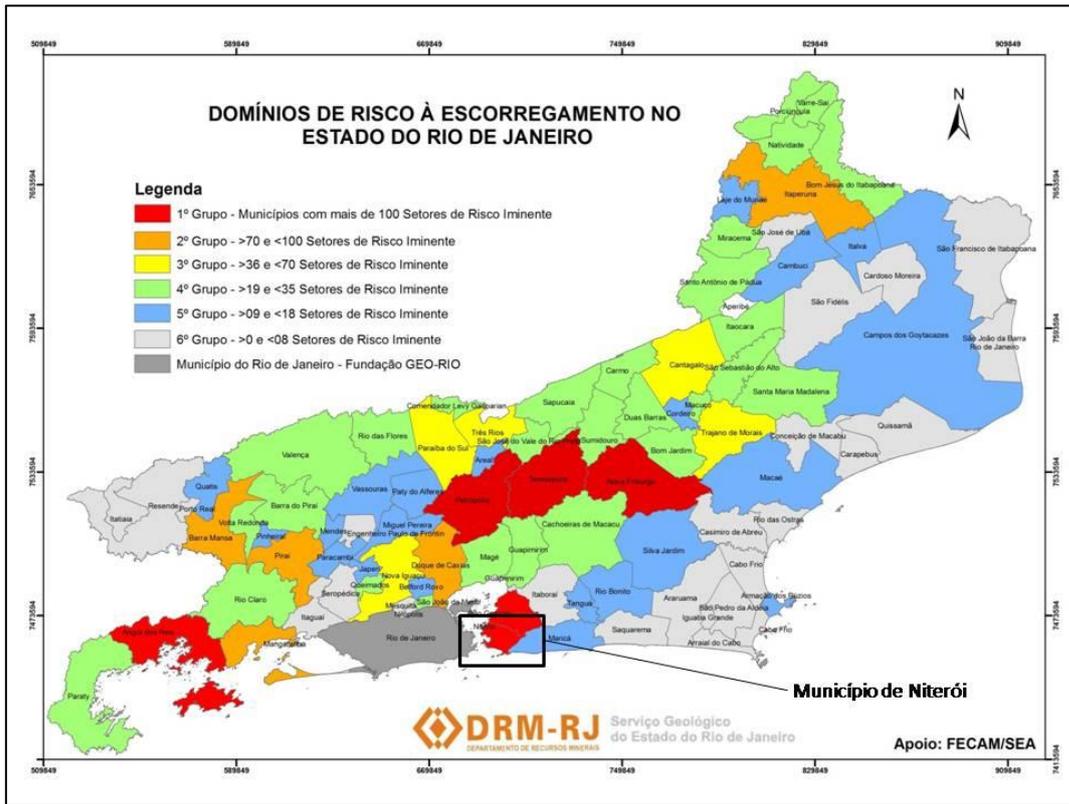


Figura 2: Mapa de Domínios de Risco a Escorregamento no Rio de Janeiro. Adaptado de DRM, 2015.

No entanto, um grande obstáculo ao desenvolvimento deste tipo de metodologia é a definição de qual tipo de movimento de massa a ser modelado. Diversas classificações têm sido propostas, sendo a de Selby (1993) a mais aceita e utilizada no meio técnico-científico. Selby (1993), divide os movimentos de massa conforme seu fator condicionador, o processo e o material mobilizado. De acordo com Amaral (1996) e Borga et al. (1998), os movimentos de massa que mais ocorrem na paisagem são os escorregamentos e as corridas. Os escorregamentos podem ser divididos em dois tipos: os translacionais e os rotacionais. Os escorregamentos translacionais possuem plano de ruptura bem definido, planar e abrupto, ocorrendo em movimento de curta duração. Já os rotacionais possuem plano de ruptura curvo (podem ter mais de um plano) e podem ocorrer num espaço de tempo mais prolongado (SELBY, 1993).

Os escorregamentos são geralmente ativados por eventos de precipitação altos, e, podem, devido a sua natureza, dar origem às corridas de massa nas encostas causando

enormes prejuízos. As corridas de massa provenientes dos escorregamentos podem causar danos à população e na estrutura das construções. Estas corridas são de difícil observação por ocorrerem de forma esporádica em um curto espaço de tempo (BELLUGI, et al 2015; TAKAHASHI, 1981).

Deste modo, é necessário que as áreas susceptíveis a esse tipo de evento estejam bem delimitadas e validadas, para que seja possível fazer a realocação da população. A validação deve ser bastante criteriosa para que medidas não sejam tomadas desnecessariamente e nem que populações em risco sejam deixadas de forma continuada em áreas onde existe probabilidade alta desse tipo de evento.

Existem diversos modelos de predição de áreas susceptíveis à escorregamento, dentre eles: *Distributed Shallow Landslide Analysis Model* - dSLAM (WU & SIDLE, 1995), *Stability Index MAPPING* - SINMAP (PACK et al., 1998), SEEP/W e SLOPE/W (GEOSTUDIO, 2005), *Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Analysis* - TRIGRS (BAUM et al., 2008), *High Resolution Slope Stability Simulator* - HIRESSES (ROSSI et al., 2013), além do *Shallow Landsliding Stability Model* – SHALSTAB (MONTGOMERY & DIETRICH, 1994). Todos estes modelos têm em comum serem desenvolvidos com base num Modelo Digital de Terreno (MDT).

Recentemente, os produtos de Modelos Digitais de Terreno – MDTs provenientes de levantamentos aerofotogramétricos têm se tornado cada vez mais populares por produzirem resultados bem detalhados e precisos no que concerne ao mapeamento do relevo (GORSEVSKI et al. 2016).

Deste modo, a presente dissertação tem por objetivo aplicar a metodologia do modelo SHALSTAB para a delimitação e o mapeamento das áreas mais susceptíveis à ocorrência de escorregamentos no município de Niterói, RJ, com base nos modelos de terreno e de superfície provenientes do levantamento a laser (*Light Detection and Ranging* – LiDAR) a fim de comparar os resultados provenientes dos dois modelos. A natureza da área onde Niterói está inserida justifica o esforço comprometido no presente estudo. A disponibilidade de dados laser por aerolevantamento de forma gratuita pela prefeitura também é um facilitador na confecção da modelagem presente no estudo em questão.

## 2. Área de Estudo

O município de Niterói localiza-se no estado do Rio de Janeiro entre as coordenadas 22°51'50"S e 43°08'32"W e 22°59'36"S e 43°00'59"W (Figura 3). Apresenta um dos maiores Índice de Desenvolvimento Humano - IDHs do Brasil, tem área territorial de 129,38 Km<sup>2</sup> e população de 495.470 habitantes (IBGE, 2014). O Bioma presente na área do município é a Mata Atlântica.

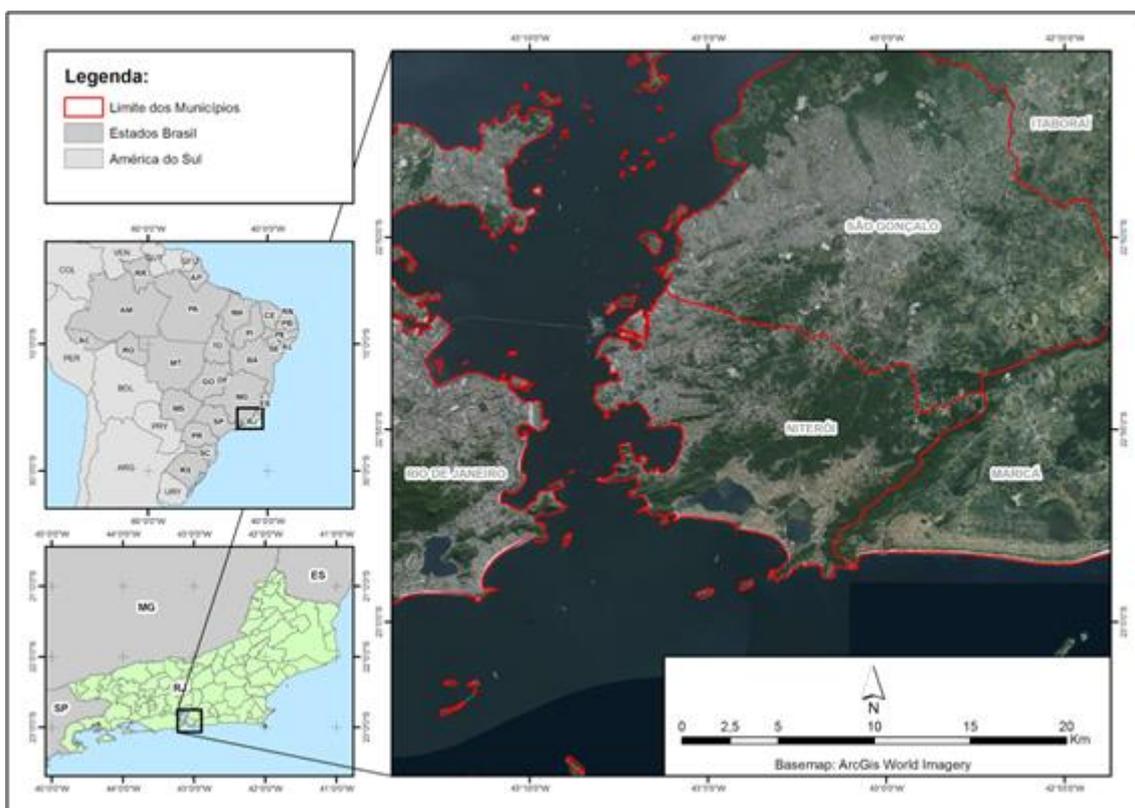


Figura 3: Mapa de Localização de Niterói

Atualmente, Niterói é um dos principais centros financeiros, comerciais e industriais do estado do Rio de Janeiro, seu produto interno bruto nominal foi de 11,7 bilhões de reais em 2014, figurando como o 5º município com maior produto interno bruto - PIB do estado e o 45º município mais rico do Brasil (IBGE, 2016). Além disso, Niterói possui o melhor índice de desenvolvimento humano - IDH do Estado e o terceiro do país (IBGE, 2010).

De acordo com os dados do Climate Data ([www.climate-data.org](http://www.climate-data.org)), Niterói é uma área regida por um clima tropical. Apresenta chuvas prioritariamente no verão e no inverno tem a época mais seca. A classificação do clima é Aw de acordo com a Köppen e Geiger. A temperatura média no município é de 23.4 °C. A pluviosidade média anual é 1204 mm. O Gráfico 1 mostra os dados termopluviométricos médios e demonstram como a área do município é regida climaticamente.

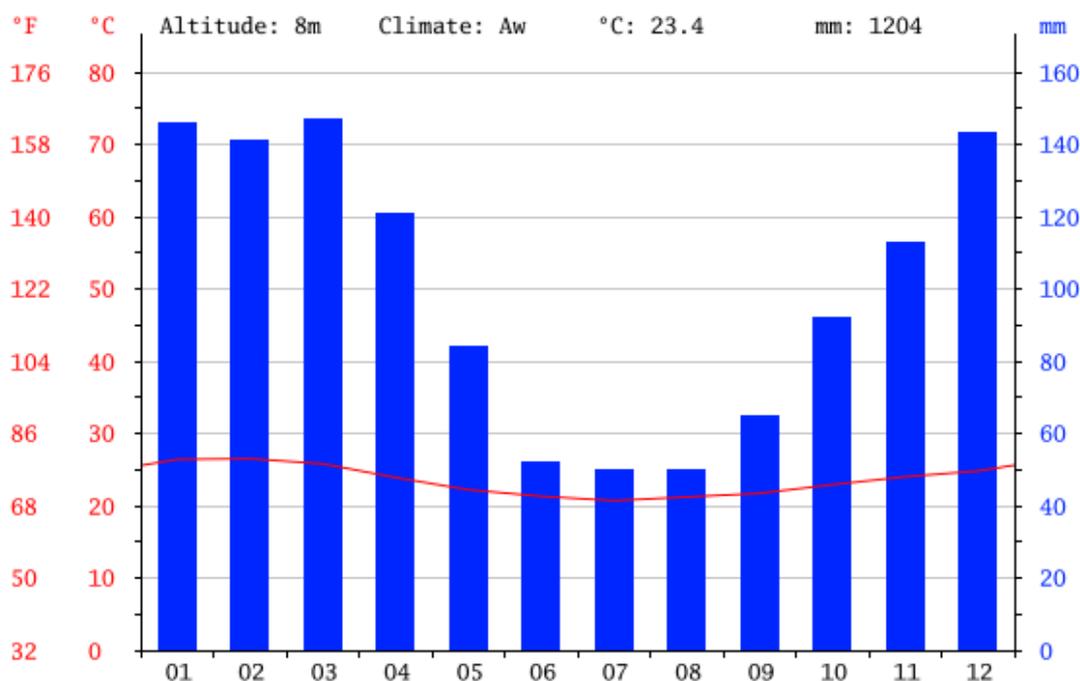


Gráfico 1: Gráfico Termo Pluviométricos dos Valores Médios Anuais de Niterói. Fonte: [www.climate-data.org](http://www.climate-data.org)

Fica clara a diferença de pluviosidade nas diferentes épocas do ano. Entre Novembro a Abril, o município apresenta maior precipitação, sendo seu pico em Março. Em virtude da natureza dos escorregamentos de encosta estar fortemente ligada à precipitação diária, os meses de chuva são os períodos mais críticos.

De acordo com a classificação climática de Köppen, o município de Niterói enquadra-se no clima Aw. Isso corresponde a uma área regida por um clima tropical com chuvas concentradas na época do verão. Nessa classificação, a letra A refere-se ao

clima tropical e o a letra w corresponde às chuvas concentradas no verão (ROLIM et al. 2007).

Os dados de precipitação mostram que Niterói é localizado numa área com grande ocorrência de precipitação nos meses de verão, além disso apresenta relevo bastante movimentado com declividades bem acentuados. Isso faz que a área do município seja bastante propensa à ocorrência de escorregamentos.

A área do município de Niterói é composta por 3 grupos de solos. Argissolos, Espodosolos e Gleissolos. A Figura 4 mostra um mapa com as ordens dos solos no município.

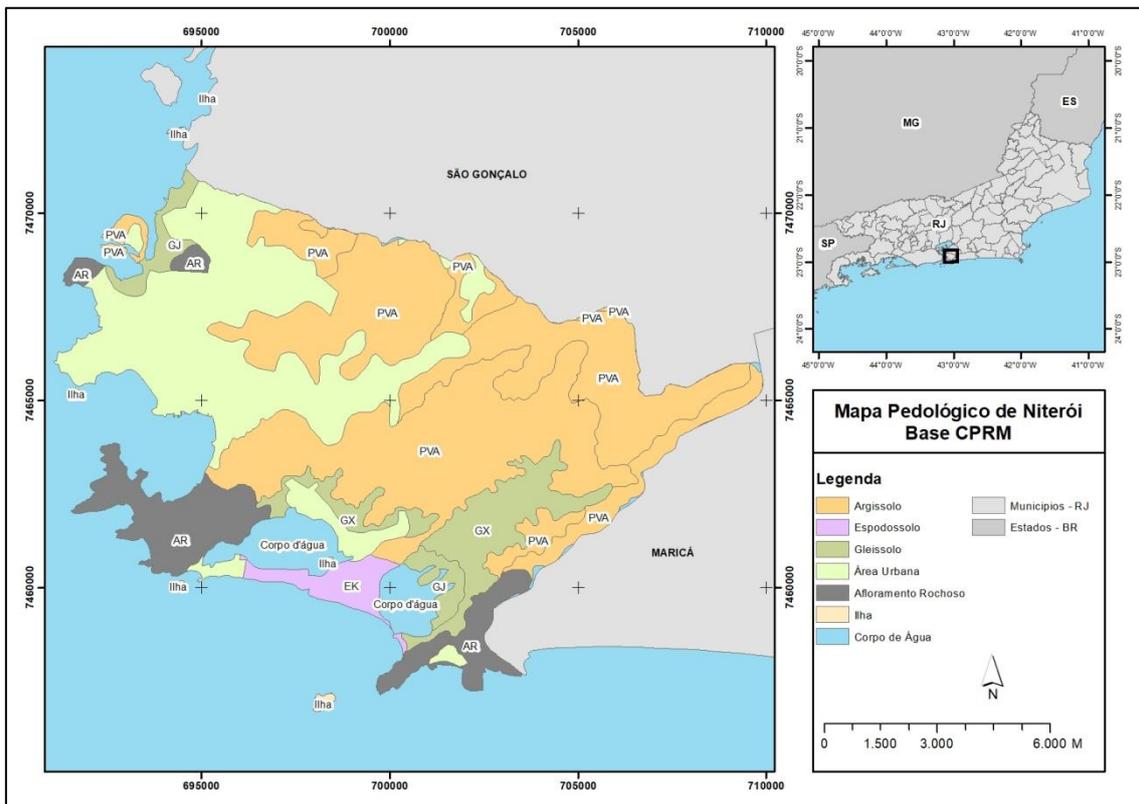


Figura 4: Mapa Pedológico de Niterói. Fonte: CPRM.

O argissolos são compostos por material mineral e apresentam o horizonte B textural. Apresenta argila de atividade baixa ou argila de atividade alta (SANTOS, 2006). Sua ocorrência pode se dar por diferentes condições climáticas ou material de origem. Além disso, estão associados a paisagens com relevo acidentado.

Os espodossolos fazem parte do grupamento de solos com horizonte B espódico. Apresenta processo de podzolização com eluviação de compostos de alumínio podendo ou não apresentar ferro em presença de húmus ácido (SANTOS, 2006).

Os gleissolos fazem parte do grupo de solos que apresentam uma expressiva gleização resultante do processo de redução intensa dos compostos de ferro na presença de matéria orgânica. Pode apresentar alternância de oxidação em virtude do efeito de flutuação do nível do lençol freático (SANTOS, 2006).

Como já citado, a Defesa Civil do município de Niterói faz mapeamentos de áreas com risco de escorregamentos junto com o NADE do DRM-RJ. A Figura 5 mostra um mapa de Niterói confeccionado pelo NADE com as áreas de escorregamentos vistoriados pela Defesa Civil.

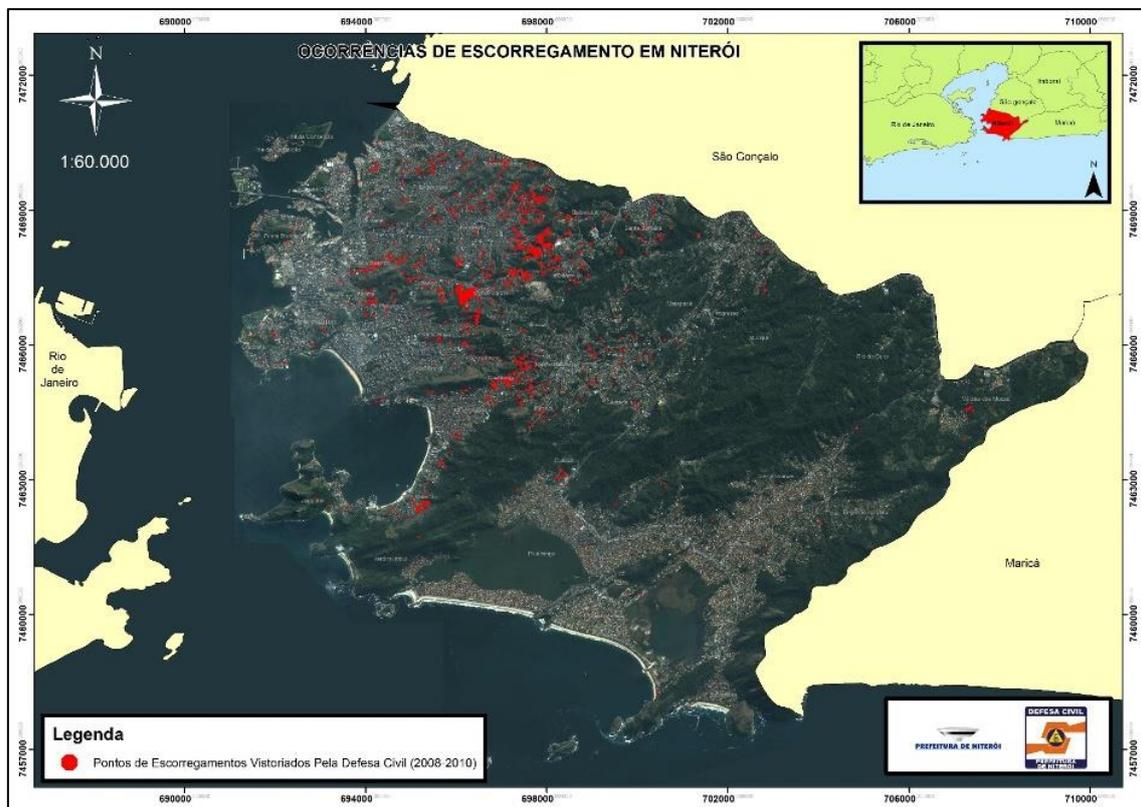


Figura 5: Mapa de Escorregamentos Vistoriados em Niterói Pela Defesa Civil. Fonte: [www.defesacivil.niteroi.rj.gov.br](http://www.defesacivil.niteroi.rj.gov.br)

A Figura 4 mostra que a maior parte das áreas de risco está localizada na região noroeste do município. Além disso, é possível observar que quase todas as áreas estão localizadas em ambientes com relevo bastante movimentado e acidentado. Esse tipo de relevo costuma ser habitado por pessoas de baixa renda e, muitas vezes, as construções são feitas de maneira desordenada e não utilizam estruturas adequadas.

## **3.Revisão Bibliográfica**

### **3.1. Mecanismos dos Escorregamentos**

Os tipos mais recorrentes de movimentos de massa, no Brasil, são os escorregamentos e as corridas de massa. Esses movimentos são acionados, em termos gerais, por eventos de precipitação elevados ou por um rápido descongelamento causando a saturação do solo. O encharcamento do solo pode ocasionar rompimentos em áreas íngremes fazendo que a porção de solo solta desça pela encosta (BORGA et. al, 1998).

Os escorregamentos ocorrem de forma natural e são condicionados por relações geológicas, geomorfológicas, climáticas e antrópicas. Apesar de poderem ser deflagrados pela ação antrópica, deve-se lembrar que os escorregamentos são fatores importantes em muitas paisagens e estão presentes na evolução natural do relevo ao longo do tempo (FERNANDES et al, 2001; GUERRA et al, 2014).

Os escorregamentos podem ser definidos como translacionais quando apresentam um plano abrupto de ruptura planar bem definido com duração bastante curta e apresentam movimentação relativamente rápida. Vários fatores influenciam a ocorrência de escorregamentos, dentre eles: morfologia do terreno, propriedades do solo e da rocha, cobertura vegetal, tipo de uso e ocupação da terra, dinâmica hidrológica das encostas, além de outros fatores. Em geral, os escorregamentos translacionais são limitados por uma descontinuidade plana, isso pode ser representado pelo contato de camadas distintas de solo ou pelo limite entre o manto e a rocha (GUIDICINI e NIEBLE, 1984; IPT, 1991; SELBY, 1993).

Um dos mecanismos que geram instabilidade nas encostas é a perda de sucção do solo relacionada ao aumento da umidade do solo, isso se dá pelo avanço do agente de infiltração, que pode levar a uma ruptura antes da condição de saturação ser alcançada (FERNANDES et al. 2001). Os escorregamentos rasos ocorrem em sua maioria em zonas de convergência de fluxo, o que favorece a concentração do material transportado em superfície (GUIMARÃES et al. 2003).

## 3.2. LiDAR

A tecnologia aplicada nos dados LiDAR é bastante similar à tecnologia utilizada nos sensores remotos do tipo radar (sensores ativos). A principal diferença entre os dois é o tipo de radiação utilizada para obtenção de informação do alvo. Enquanto os sensores radar utilizam ondas de rádio, o sistema LiDAR utiliza pulsos laser para se obter a informação altimétrica dos alvos.

O resultado gerado pelo levantamento LiDAR é uma nuvem de pontos extremamente densa contendo a informação de coordenadas X, Y e Z. Entretanto, a distribuição dos pontos é desordenada e não segue um padrão espacial regular. Os arquivos gerados contêm áreas mais densas e áreas menos densas em diferentes pontos, dependendo da natureza da região imageada.

A radiação utilizada pelo LiDAR pode penetrar o dossel vegetal trazendo informações de altimetria bastante precisas do solo em áreas com cobertura vegetal, pois em virtude da sua alta densidade e distribuição de pontos, alguns pulsos podem ser refletidos no solo em ambientes de vegetação densa (GORSEVSKI et al., 2016). Outra vantagem de utilização de um sensor ativo é que estes independem da luz solar como fonte de energia, já que produzem a própria radiação para fazer a coleta de dados. Áreas de sombra de edifícios, vegetação e nuvens não afetam a altimetria do resultado final do imageamento a laser.

Existem dois principais tipos de técnicas empregadas em imageamento com utilização de laser. Pode ser utilizado aerotransportado - *airborne laser scanner*; e/ou tendo o sensor utilizado em solo - *ground-based scanning lidar*. A técnica LiDAR utilizada em solo apresenta resolução espacial boa e tem a vantagem de ser portátil,

entretanto, a câmera acoplada a um avião pode mapear uma área relativamente maior em menos tempo (WANG et al., 2013).

Existem diversos usos para dados provenientes de imageamento laser, principalmente nas seguintes áreas: florestal, planejamento costeiro, avaliação de risco de inundações, telecomunicações, agricultura, petróleo, transportes, urbano, mineração, entre outros (GIONGO et al., 2010).

Em detrimento da precisão e da qualidade dos dados provenientes dos sensores imageadores a laser, além dos diversos usos possíveis supracitados, um dos objetivos recorrente no uso da tecnologia LiDAR tem sido para a confecção de mapas e modelagem de susceptibilidade, como pode ser visto em: Wang et al. (2013); Gorsevski et al. (2016); Cavalli (2008); Jaboyedoff et al. (2012); Palenzuela, et al. (2015).

O sistema aerotransportado de imageamento laser trabalha basicamente registrando o tempo que um feixe de luz emitido pelo sensor demora a retornar e assim calcula a distância entre o alvo e o sensor para conseguir definir a altimetria do ponto (JABOYEDOFF et al. 2012). Além disso, é preciso uma base GPS terrestre e um outro no avião trabalhando de forma integrada para coleta das coordenadas dos pontos (GIONGO et al., 2010).

Uma das principais limitações do imageamento a laser na confecção de MDTs é a técnica de remoção dos pontos de vegetação, que pode ser feito de maneira automatizada ou manual. Caso a vegetação seja muito densa e não permita que os pontos atinjam o solo no local, esse modelo pode não representar de forma eficaz o relevo da região.

### **3.3. Modelos Digitais (de Terreno e de Superfície)**

Os Modelos Digitais de Terreno - MDTs são diferentes dos Modelos Digitais de Superfície - MDSs. Os MDSs representam a superfície terrestre considerando os objetos presentes no local. Os prédios e a vegetação vão estar representados nos MDSs, já os MDTs, são tratados e representam a superfície terrestre sem considerar a vegetação ou as edificações.

Os modelos digitais são por natureza imagens com a informação do número de linhas e colunas armazenadas em uma matriz podendo conter diversas informações em cada pixel, sendo que cada pixel corresponde a um ponto X-Y. No caso dos modelos digitais de terreno, a informação contida em cada pixel é a altitude do terreno corrigido no nível de solo, já no caso dos modelos digitais de superfície, a informação contida em cada pixel é a altitude da superfície no local considerando a vegetação e/ou as edificações. Geralmente o MDT é representado contendo a informação espacial e de elevação.

Os Modelos Digitais de Terreno e/ou de Superfície são componentes extremamente fundamentais na confecção de modelos de suscetibilidade a escorregamento. A utilização destes rasters nos modelos de predição de áreas susceptíveis é de fundamental importância, pois estes fornecem os fatores chave no modelo de suscetibilidade em questão. Os fatores topográficos de declividade e de área de contribuição, por exemplo, são derivados destes Modelos.

O mapa derivado de declividade é calculado de acordo com o valor altimétrico das células vizinhas. Para cada célula, a ferramenta de declividade calcula a maior diferença de altitude entre as 8 células vizinhas e identifica a declividade de acordo com a distância entre os pixels. O resultado da declividade pode ser dado em porcentagem ou em radianos (BURROUGH & MCDONELL, 1998).

A área de contribuição de cada célula do grid é definida pela área correspondente à montante de cada célula específica, isto é, toda a área na qual a água conflui para o ponto central do pixel. De acordo com Moore et al.(1991), a área de contribuição de um ponto é medida de acordo com a convergência de escoamento superficial de um dado ponto da sua bacia hidrográfica que é integrado de acordo com a sua área de escoamento. As duas formas mais recorrentes de se avaliar a área de contribuição de um grid são: *Single flowdirection* (Fluxo de Direção Única) e *Multiflow direction* (Fluxo de Direção Múltipla). O Fluxo de Direção Única trata o fluxo de escoamento superficial de forma unidirecional, ou seja, segue somente de uma célula para outra. Já o Fluxo de Direção Múltipla trata o fluxo de escoamento como multidirecional, ou seja, este pode seguir de uma célula para mais de uma célula vizinha ao mesmo tempo (JENSON & DOMINGUE, 1988; TARBOTON et al., 1991).

### 3.4. A Modelagem de Susceptibilidade a Escorregamento

Existem diversos modelos matemáticos que fazem o mapeamento de áreas susceptíveis a escorregamentos. Dentre eles, o modelo SHALSTAB (MONTGOMERY & DIETRICH, 1994) tem se mostrado bastante efetivo e tem sido amplamente utilizado em trabalhos que visam o mapeamento de áreas susceptíveis a escorregamento raso.

SHALSTAB é uma abreviação do nome *Shallow Stability* e foi desenvolvido por Montgomery e Dietrich (1994). O modelo determina a susceptibilidade de escorregamento em função da quantidade de chuva necessária. A quantidade de chuva necessária para um escorregamento no pixel é dada pelas características da topografia e propriedades do solo do local.

O SHALSTAB é um modelo matemático que se baseia na combinação de um modelo de estabilidade de encosta e um modelo hidrológico. O modelo hidrológico é baseado nos trabalhos de Beven e Kirkby (1979) e O'Loughlin (1986), que determinam a condição de saturação do solo a partir da relação entre concentração de água e a transmissividade do solo. Já o modelo de estabilidade, simula o grau de estabilidade do solo com base na altura da coluna de água e, é baseado nos trabalhos de Carson e Kirkby (1956).

O modelo de estabilidade tem como base a teoria do talude infinito e define que a tensão tangencial pode ser definida pela Equação 1 (GUIMARAES et al, 2003).

$$T = C' + (\sigma - \mu) \tan \phi \quad (1)$$

Onde: T é a tensão tangencial, C' é a coesão do solo,  $\sigma$  é a tensão normal,  $\mu$  é a poro-pressão e  $\phi$  é o ângulo de atrito interno.

Na análise feita pela teoria do talude infinito, o efeito do atrito na lateral e nas extremidades deve ser ignorado, já que esta é feita considerando um plano inclinado infinito. A análise por talude infinito pode ser utilizada em locais onde o comprimento da encosta é significativamente maior que a espessura do solo e é melhor utilizada em áreas com contato abrupto entre o solo e a rocha matriz (GUIMARAES et al 2003). Deste modo, podemos definir o modelo SHALSTAB pela Equação 2:

$$Q_c = \frac{T \sin \theta}{(a/b)} \left[ \frac{C'}{\rho_w g z \cos^2 \theta \tan \phi} + \frac{\rho_s}{\rho_w} \left( 1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) \right] \quad (2)$$

Onde  $Q_c$  é a chuva crítica necessária para a ruptura,  $T$  é a transmissividade do solo (produto entre a condutividade hidráulica saturada e a espessura do solo),  $a$  é a área de contribuição,  $\theta$  é a declividade do local,  $\rho_w$  é a densidade da água,  $g$  é a aceleração da gravidade,  $z$  é a espessura do solo,  $\rho_s$  é a densidade global do solo saturado,  $\phi$  é o ângulo de atrito do solo, e  $C'$  é a coesão efetiva do solo.

Fica claro então que a modelagem matemática do SHALSTAB identifica a quantidade de chuva necessária para causar um escorregamento no local para cada pixel da área analisada. O modelo gera um raster em que o valor das células é a quantidade de chuva necessária para se causar um escorregamento. É comum utilizar 7 classes de estabilidade de solo quando se trabalha com o SHALSTAB, indo de incondicionalmente instável até incondicionalmente estável. As classes são separadas em milímetros de chuva precipitada necessária por dia para ocorrência de escorregamento e podem ser vistas na Tabela 1.

Q (mm/dia)	Valor do Pixel Para Cada Classe de Instabilidade
Incondicionalmente Instável	1
0 a 50	2
50 a 100	3
100 a 200	4
200 a 400	5
>400	6
Incondicionalmente Estável	7

Tabela 1: Classes de Estabilidade dos Pixels no Modelo SHALSTAB.

Não existe consenso nos trabalhos quanto a relação entre a eficácia do modelo de escorregamento e a resolução do MDT utilizado na confecção dos mapas de susceptibilidade. Em Zhang e Montgomery (1994), fica evidenciado que um modelo com resolução espacial de 10 metros é o ideal para aplicações de delimitação de áreas de susceptibilidade a escorregamento raso. Gomes et al. (2005) fizeram teste de diferentes resoluções espaciais de MDTs provenientes de cartas topográficas na escala de 1:10.000 e 1:50.000. Neste trabalho, os autores chegaram a conclusão que a escala de 1:10.000 possui maior eficácia do que a escala de 1:50.000, no entanto esta última escala obteve resultados bastante satisfatórios para a definição das áreas susceptíveis a escorregamentos. Tarolli e Tarboton (2006) deixam claro no seu trabalho que modelos digitais de terreno com resolução espacial muito alta podem, na verdade, prejudicar o resultado final, sendo mais adequado a utilização de modelos com resolução espacial mais baixa. Isso se deve ao fato de que modelos com resolução espacial maior (mais detalhada) podem representar de forma mais adequada a topografia e a forma como a água se comporta no relevo. Já De Sy et al. (2013), demonstrou que, para a sua área de estudo na Nova Zelândia, o melhor resultado, depois de calibrar e testar diferentes resoluções espaciais na confecção dos modelos, seria de 1 metro, o que é considerado uma resolução espacial bastante alta para Modelos Digitais de Terreno. Penna et al (2014), fez um estudo da forma como a resolução espacial do pixel no modelo tratado influi na qualidade do mapeamento de áreas susceptíveis a escorregamento em uma área na Sicília, Itália. O trabalho foi feito comparando Modelos Digitais de Terreno com

resoluções espaciais distintas, de 2m, 4m, 10m e 20m. Os resultados mostraram que o tamanho do pixel influencia diretamente na área de contribuição, representada, de uma bacia. Isso faz que o resultado seja mais preciso quando utilizado com um MDT com resolução espacial maior. Entretanto, MDTs com resolução espacial menor (com menos detalhes) geram resultados satisfatórios e exigem menos capacidade computacional para geração dos mapas.

## **4. Materiais e Métodos**

### **4.1. Coleta e Tratamento dos Dados**

Foram utilizados no presente trabalho arquivos provenientes do levantamento a laser do Modelo Digital de Terreno e do Modelo Digital de Superfície e também as ortofotos do município de Niterói. A partir do MDT e do MDS, foram gerados os mapas de área de contribuição e de declividade, utilizados para delimitação das áreas de risco.

#### **4.1.1. Confecção do MDT e do MDS**

Em virtude da natureza dos dados provenientes do levantamento a laser é necessário um tratamento prévio dos dados antes de utilizá-los para a delimitação de áreas de susceptibilidade a escorregamento com o modelo SHALSTAB. O modelo utiliza dados em formato raster, entretanto, os dados LiDAR não são disponibilizados nesse formato.

Diferente de imagens no formato raster, o arquivo .las que apresenta os pontos contendo a altimetria e as coordenadas, não seguem uma lógica espacial definida e são espalhados de maneira desordenada por toda a área do levantamento. Para se criar uma grade regular com a altimetria da região foi necessário fazer uma interpolação dos pontos para que fosse possível utilizá-los.

A Figura 6 mostra a distribuição de pontos dos arquivos .las em uma área de Niterói que apresenta solo exposto, edificação, área de vegetação densa e área de vegetação rasa dispostos em um grid regular de 5m x 5m. A Figura 6A apresenta

somente pontos que foram levantados em nível de solo, ou seja, não representando os pontos de topo de vegetação ou de edificações. A Figura 6B mostra os pontos que foram levantados em nível de solo e também os pontos que refletiram no topo das edificações e vegetação. A Figura 6C mostra a ortofoto da mesma área na grade de 5m x 5m.

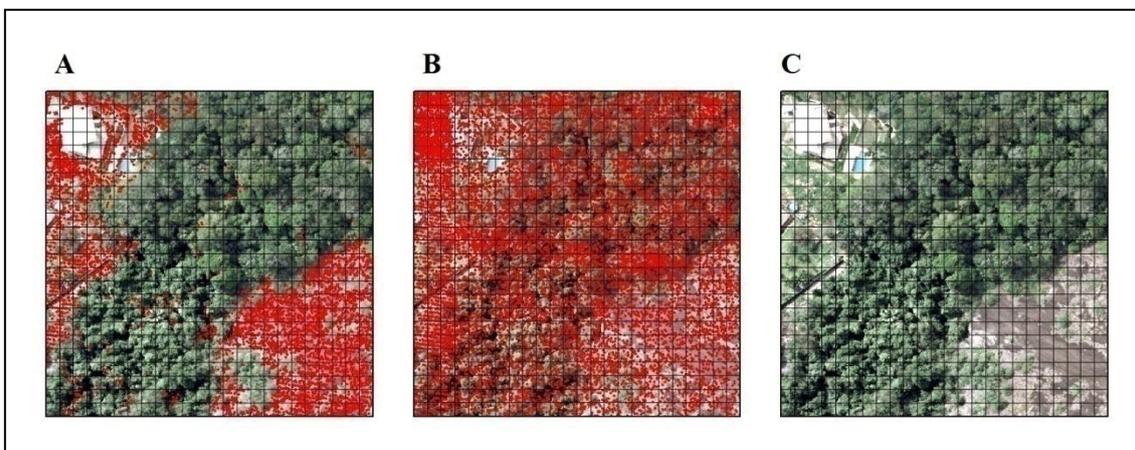


Figura 6: Grade 5m x 5m mostrando a distribuição de densidade dos pontos provenientes de um levantamento laser. A: MDT; B: MDS; C: Ortofoto.

É possível observar na Figura 6 que a disposição geográfica dos pontos é completamente irregular tanto no MDT quanto no MDS. Existem áreas sem a cobertura de pontos na Figura 6A, pois esta representa somente os pontos que refletiram no solo. A Figura 6B apresenta uma densidade consideravelmente grande em toda a extensão da área, isso se dá, por todos os pulsos serem abarcados no MDS, tanto os que foram refletidos no solo quando os que foram refletidos na vegetação e nas edificações.

Mesmo nas áreas que apresentam vegetação densa é possível observar que existem pontos que conseguem ser refletidos no nível do solo e trazem a altimetria da região sem a interferência da vegetação. Essas características dos levantamentos a laser fazem deles ferramentas bastante adequadas para a confecção de Modelos Digitais de Terreno.

A nuvem de pontos dos dados LiDAR é bastante densa, mesmo se trabalhando somente com os pontos que foram refletidos no solo. Em uma área extensa como a do município de Niterói, os arquivos gerados apresentam um volume de dados

significativamente grande para serem processados por hardwares comerciais, sem que precisem ser divididos em arquivos menores.

Originalmente esses dados eram armazenados com o formato .ascii, entretanto, o formato binário .las passou a ser padrão em levantamentos a laser, por permitir um maior volume de dados guardados e assim poder ser lido e importado de forma mais eficiente.

O primeiro passo do processamento dos dados, nesta pesquisa, foi criar um visualizador dos arquivos .las para que estes pudessem ser processados e visualizados no software ArcGis 10.4, já que este não reconhece o formato .las sem um processamento prévio. Os arquivos foram criados com a ferramenta Create LAS Dataset do ArcGis 10.4. Essa ferramenta cria um LAS Dataset, que é um arquivo que possibilita a leitura dos arquivos em las. Somente depois de criar um LAS Dataset é possível trabalhar com os arquivos laser com o ArcGis.

O LAS Dataset guarda e visualiza o caminho para um ou mais arquivos em formato las. Ele permite uma leitura rápida e simples, além de ser possível analisar algumas estatísticas detalhadas. A criação de um LAS Dataset não importa a nuvem de pontos contida nos arquivos, ela somente guarda a referência do diretório, por isso são construídos de maneira bastante rápida e não exigem um nível de processamento grande do hardware.

O método utilizado para interpolar a altimetria dos pontos foi o da ferramenta Topo to Raster do ArcGis 10.4. Essa ferramenta foi desenvolvida para gerar um Modelo Digital de Terreno hidrológicamente correto, baseado no software ANUDEM, desenvolvido por Hutchinson et al. (2011). A metodologia interpola os valores de altimetria, com restrições, para que seja assegurada uma estrutura de drenagem conectada e correta, além de garantir a correta representação dos divisores de águas. Ela trabalha com dados de entrada em formato de pontos ou linhas de altimetria. No presente trabalho, somente foram utilizados pontos com valores altimétricos.

Após a geração do MDT foi necessário aplicar a ferramenta Fill para preencher pequenas depressões residuais que ficaram representadas no MDT. A ferramenta Fill preenche as depressões e suaviza os picos representados no arquivo gerando um modelo que representa melhor o fluxo de drenagem superficial.

## 4.2. Mapeamento das Cicatrizes

Com as ortofotos devidamente organizadas e mosaicadas, foi feito o mapeamento das cicatrizes de escorregamentos anteriores a 2014, a partir de fotointerpretação das imagens, junto com arquivos de pontos de escorregamentos do banco de dados da CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais.

Foi criado um arquivo de polígonos contendo o contorno das cicatrizes que puderam ser fotoidentificáveis. Tudo isso foi compilado e guardado em um banco de dados para que fosse possível fazer a análise estatística das cicatrizes e avaliar o resultado obtido com o modelo SHALSTAB.

As cicatrizes foram classificadas quanto ao tipo de escorregamento. Além das cicatrizes de deslizamentos naturais, foram delimitadas áreas de encosta que sofreram deslizamento induzido. As cicatrizes foram obtidas com apoio do arquivo de pontos da CPRM. As cicatrizes de deslizamentos naturais são aquelas nas quais os escorregamentos ocorreram de forma natural, ou seja, sem a intervenção antrópica direta. Já as cicatrizes de escorregamentos induzidos representam as áreas em que o solo foi removido intencionalmente por apresentar risco de rompimento na encosta.

Ao todo foram mapeadas 34 cicatrizes de escorregamentos espalhadas pelo município de Niterói, sendo a maioria delas presente na região noroeste do município. A distribuição das cicatrizes pode ser vista na Figura 7. A figura mostra o centroide dos polígonos das cicatrizes utilizadas no presente trabalho.

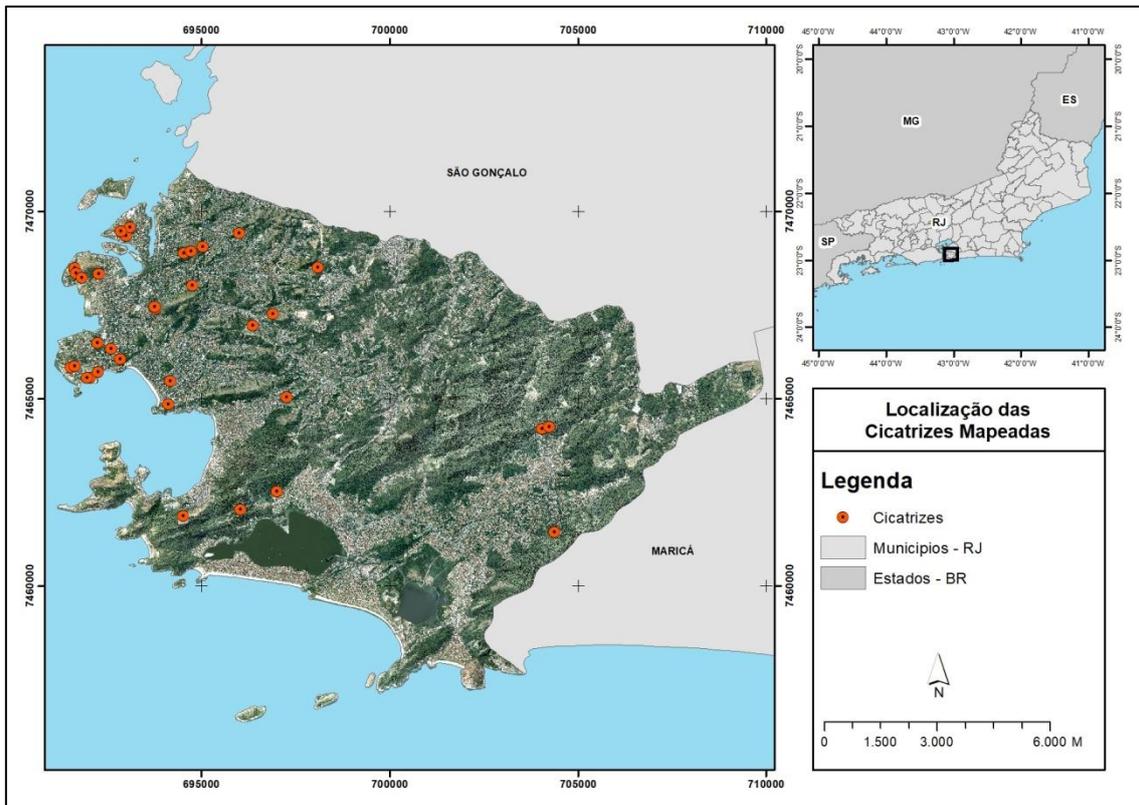


Figura 7: Localização das 34 Cicatrizes Mapeadas no Presente Trabalho.

### 4.3. Elaboração do Modelo SHALSTAB

O modelo SHALSTAB utiliza, como parâmetro de entrada, os mapas de declividade e de área de contribuição, além dos dados de solo de densidade, transmissividade, espessura, ângulo de fricção e coesão do solo. Os mapas derivados de declividade e de área de contribuição foram gerados a partir do Modelo Digital de Terreno e de Superfície com resolução espacial de 5m obtidos a partir da interpolação dos pontos de altimetria do levantamento laser.

O mapa de declividade foi gerado utilizando o método Least Squares Fit Plane proposto por Costa-Cabral & Burgess (1994). O mapa de área de contribuição foi gerado utilizando o método Multiple Flow Direction, proposto por Quinn et al. (1991), que define que o fluxo de escoamento superficial pode partir de um pixel para n pixels.

Os mapas de declividade e área de contribuição foram únicos parâmetros com variação de seus valores em cada pixel, ou seja, espacializados. Os parâmetros do solo

referentes à densidade, transmissividade, coesão e ângulo de atrito não foram especializados, por isso foram utilizados valores fixos para toda a área nos diferentes cenários.

Os parâmetros de ângulo de atrito ( $\phi$ ), coesão ( $C'/z$ ) e densidade do solo ( $\rho_s/\rho_w$ ) foram modificados criando 72 cenários possíveis no modelo SHALSTAB para com os parâmetros derivados do MDT (declividade e de área de contribuição) e, outros 72 cenários para os parâmetros derivados do MDS (declividade e de área de contribuição). O valor de transmissividade do solo foi o único que não variou, sendo utilizado o valor de 65m/dia em todos os 72 cenários (tanto para o MDT como para o MDS).

Os valores de densidade do solo ( $\rho_s/\rho_w$ ), foram entre 1,5, 2 e 2,5 ( $g/cm^3$ ), os valores de ângulo de atrito ( $\phi$ ) foram entre 20, 25, 30, 35, 40 e 45 (graus) e, os valores de coesão por espessura ( $C'/z$ ) foram entre 0, 2, 4 e 8 (KPa). Os valores foram selecionados para abarcar toda a amplitude dos parâmetros de solo possíveis para a região. Essa amplitude foi selecionada por abarcar o espectro de valores possíveis para os solos presentes na região de acordo com a bibliografia disponível. A combinação de todos os valores gerou os 72 cenários que podem ser observados na Tabela 2.

num	$\rho_s/\rho_w$	$\varphi$	C'/z	num	$\rho_s/\rho_w$	$\varphi$	C'/z	num	$\rho_s/\rho_w$	$\varphi$	C'/z
1	1,5	20	0	25	2	20	0	49	2	20	0
2	1,5	20	2	26	2	20	2	50	2	20	2
3	1,5	20	4	27	2	20	4	51	2	20	4
4	1,5	20	8	28	2	20	8	52	2	20	8
5	1,5	25	0	29	2	25	0	53	2	25	0
6	1,5	25	2	30	2	25	2	54	2	25	2
7	1,5	25	4	31	2	25	4	55	2	25	4
8	1,5	25	8	32	2	25	8	56	2	25	8
9	1,5	30	0	33	2	30	0	57	2	30	0
10	1,5	30	2	34	2	30	2	58	2	30	2
11	1,5	30	4	35	2	30	4	59	2	30	4
12	1,5	30	8	36	2	30	8	60	2	30	8
13	1,5	35	0	37	2	35	0	61	2	35	0
14	1,5	35	2	38	2	35	2	62	2	35	2
15	1,5	35	4	39	2	35	4	63	2	35	4
16	1,5	35	8	40	2	35	8	64	2	35	8
17	1,5	40	0	41	2	40	0	65	2	40	0
18	1,5	40	2	42	2	40	2	66	2	40	2
19	1,5	40	4	43	2	40	4	67	2	40	4
20	1,5	40	8	44	2	40	8	68	2	40	8
21	1,5	45	0	45	2	45	0	69	2	45	0
22	1,5	45	2	46	2	45	2	70	2	45	2
23	1,5	45	4	47	2	45	4	71	2	45	4
24	1,5	45	8	48	2	45	8	72	2	45	8

Tabela 2: Tabela contendo a combinação dos valores que geraram os 72 cenários.

## 4.4. Validação do SHALSTAB

Para a validação do modelo foi feita a sobreposição do resultado criado pelos diferentes cenários com as cicatrizes para obter as estatísticas de instabilidade dentro da área das cicatrizes. Para gerar as tabelas com os resultados da validação dos cenários, foi feita uma estatística zonal que avalia a situação de risco de cada cicatriz.

Os dados de precipitação diários também foram utilizados para analisar os eventos mapeados para as cicatrizes que apresentam data de ocorrência no banco de dados da CPRM. No entanto, esta data de ocorrência não é precisa e observou-se somente os anos que estão cadastrados no banco de cicatrizes. Deste modo, verificou-se as chuvas diárias dos anos que ocorreram os escorregamentos para a identificação das máximas de chuva.

A precipitação diária foi retirada do BDMEP - Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa do INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. O Gráfico 2 mostra a precipitação diária na série histórica entre 1961 e

2015. Infelizmente existe um vazio entre os anos de 1984 e 2002. Nenhuma das estações de monitoramento dentro de Niterói possuíam uma série histórica tão extensa quando a estação do INMET.

É possível observar pela série diária histórica que a precipitação da área não passa de 200 mm/dia. O fenômeno das chuvas orográficas é um fator a se considerado no cálculo de precipitação de regiões acidentadas, como Niterói. Logo, a validação das cicatrizes deve levar em conta que os deslizamentos ocorreram com eventos de precipitação abaixo de 200 mm/dia.

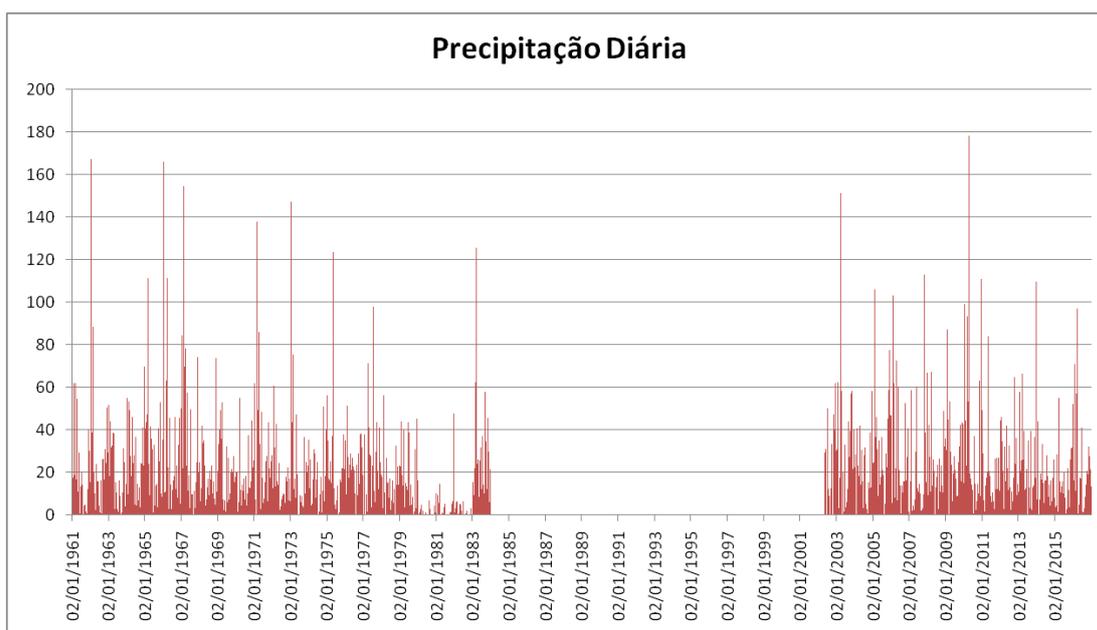


Gráfico 2: Precipitação Diária. Fonte: INMET

## 5. Resultados e Discussões

Os dados LiDAR geraram o MDT e o MDS com resolução espacial de 5 metros com boa qualidade (Figura 8 e 9). Foi gerado o MDT e o MDS apenas para a porção noroeste do município como mostrado nas Figura 8 e 9. A região abarcada pelo modelo foi selecionada por conter a maior concentração de cicatrizes. Podemos verificar que o MDT possui uma topografia mais suavizada do que o MDS. Para melhor entender isso, foi feita a visualização dos MDT e do MDS em 3D (Figura 10 e Figura 11). Nota-se que com maior presença de ruído se deve a existência de prédios e árvores que o MDS representa. Além da visualização em 3D foram feitos os perfis topográficos para análise

(Figura 12 e 13). Podemos verificar que o perfil do MDS possui variações altimétricas em maior quantidade no mesmo perfil. Isto ocorre, devido aos artefatos que são mapeados pelo MDS. Já o MDT possui um topografia mais suavizada bem mais próxima da topografia do local.

As áreas com presença de edificações são um problema para se representar a topografia corretamente no MDS, além disso, áreas com presença de vegetação também impactam no resultado. No perfil da Figura 13, o local não possui edificações, somente vegetação natural. Mesmo nestas áreas verificamos a presença de variações altimétricas maiores o que gerará posteriormente problemas nos mapas de declividade e de área de contribuição. A figura mostra que mesmo a vegetação rasa traz um impacto significativo no resultado final.

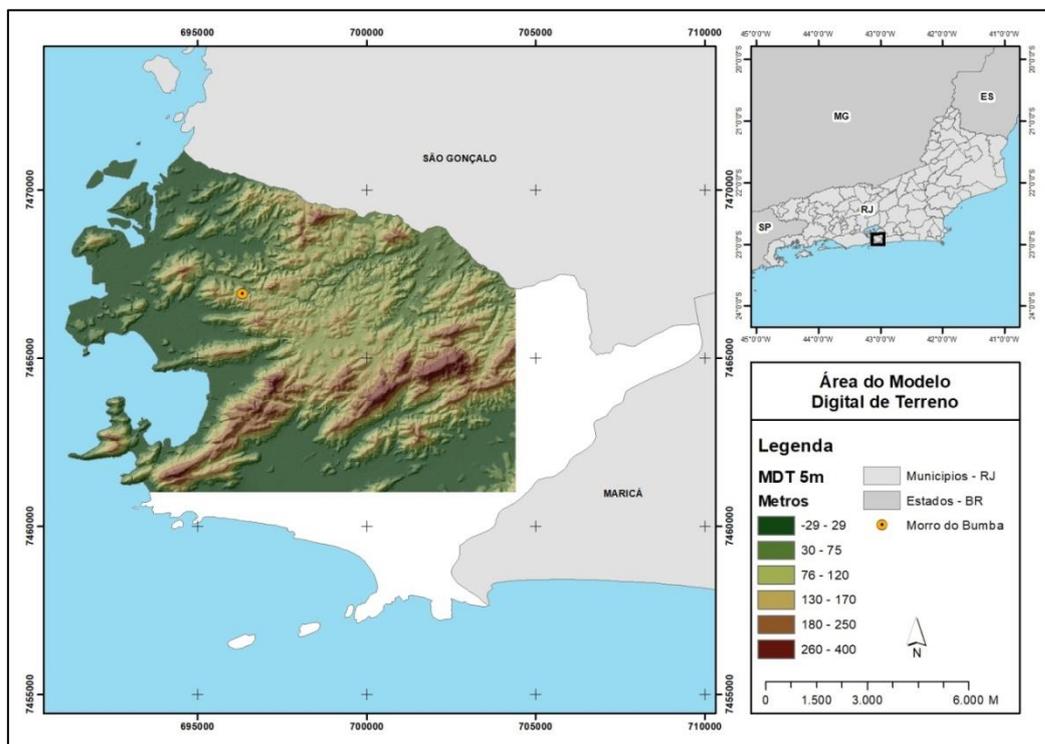


Figura 8: MDT Gerado no Município

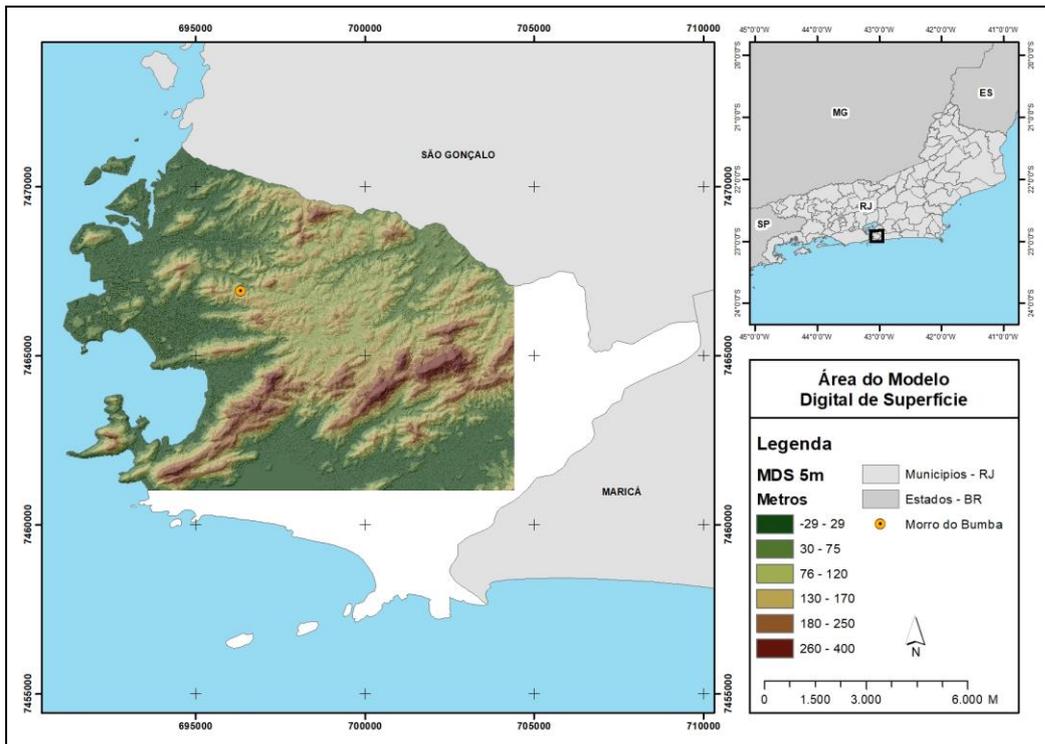


Figura 9: MDS Gerado no Município

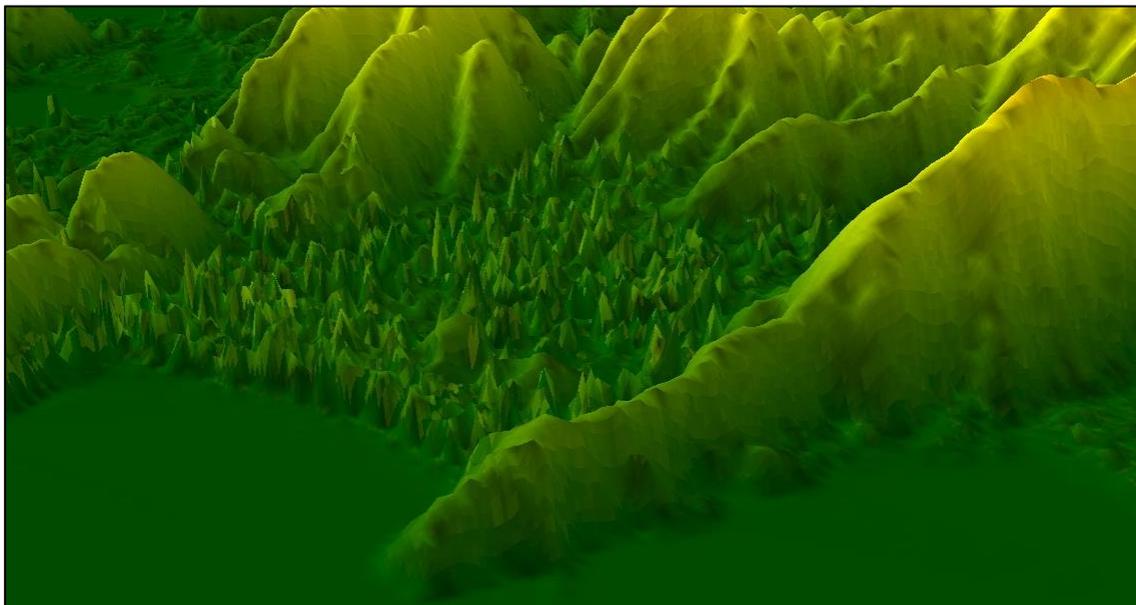


Figura 10: Visão 3D do MDS com exagero vertical de 4x.

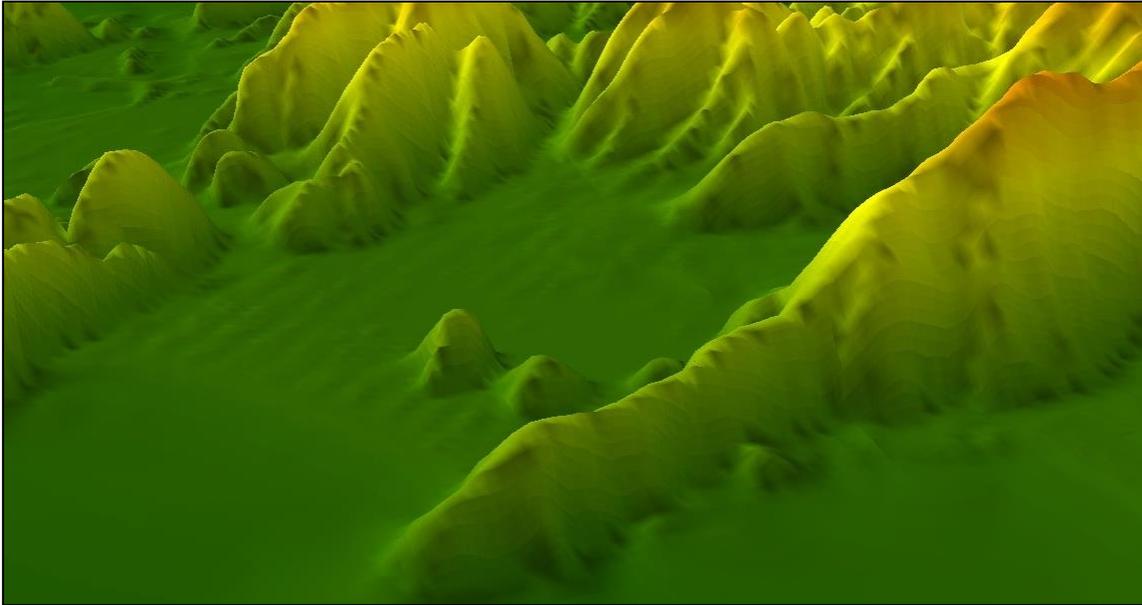


Figura 11: Visão 3D do MDT com exagero vertical de 4x.

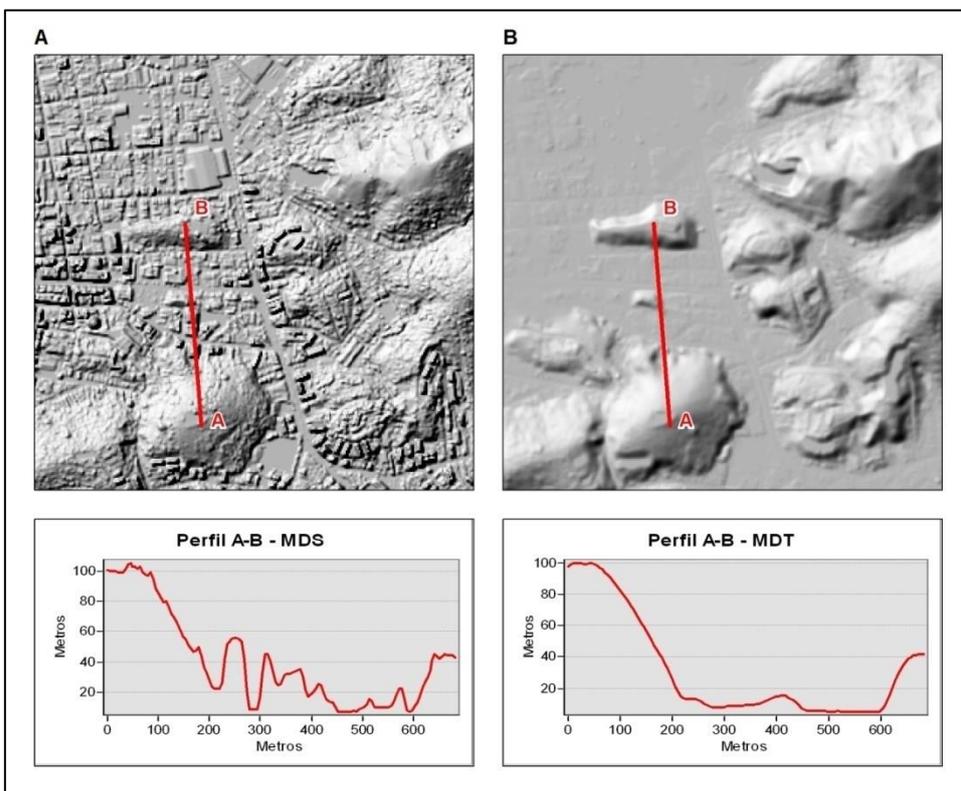


Figura 12: Comparação do perfil topográfico do MDS e do MDT em área com presença de edifícios.

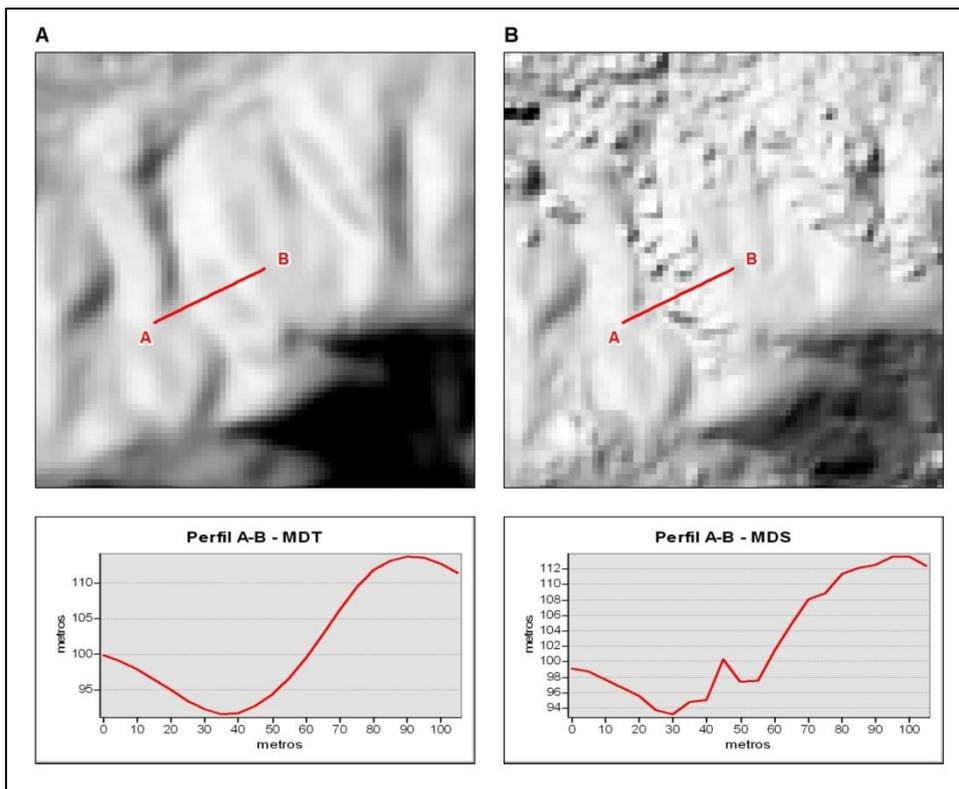


Figura 13: Comparação do perfil topográfico do MDS e do MDT em área com presença de vegetação.

Pode-se observar pelo perfil topográfico que a representação do relevo fica bastante afetada nas áreas com presença de vegetação e edificações (Figura 11 e 12). Tendo em vista que o Modelo SHALSTAB utiliza a topografia como parâmetro fundamental para a delimitação das áreas suscetíveis a escorregamento, fica claro que é necessária a utilização de um modelo que represente a topografia de forma fidedigna, sem a criação de áreas de declividade acentuada onde existe a transição entre vegetação ou edificações e solo (Figura 11 e 12).

Comparando a declividade gerada pelos dois modelos fica clara a maior efetividade de um modelo corrigido a nível de solo para a aplicação do SHALSTAB. A Figura 14 mostra uma comparação entre a declividade gerada pelo MDT e pelo MDS junto com a ortofoto da área. É possível observar na imagem que os locais onde existem edificações apresentam uma declividade acentuada que não corresponde ao relevo real da área. As áreas com vegetação também são bastante afetadas, pois a superfície do dossel vegetal não é suave e regular, além disso, alguns pontos da área de vegetação trazem a altimetria do solo. Isso cria áreas de declividade bastante acentuada que não representam a situação real do relevo.

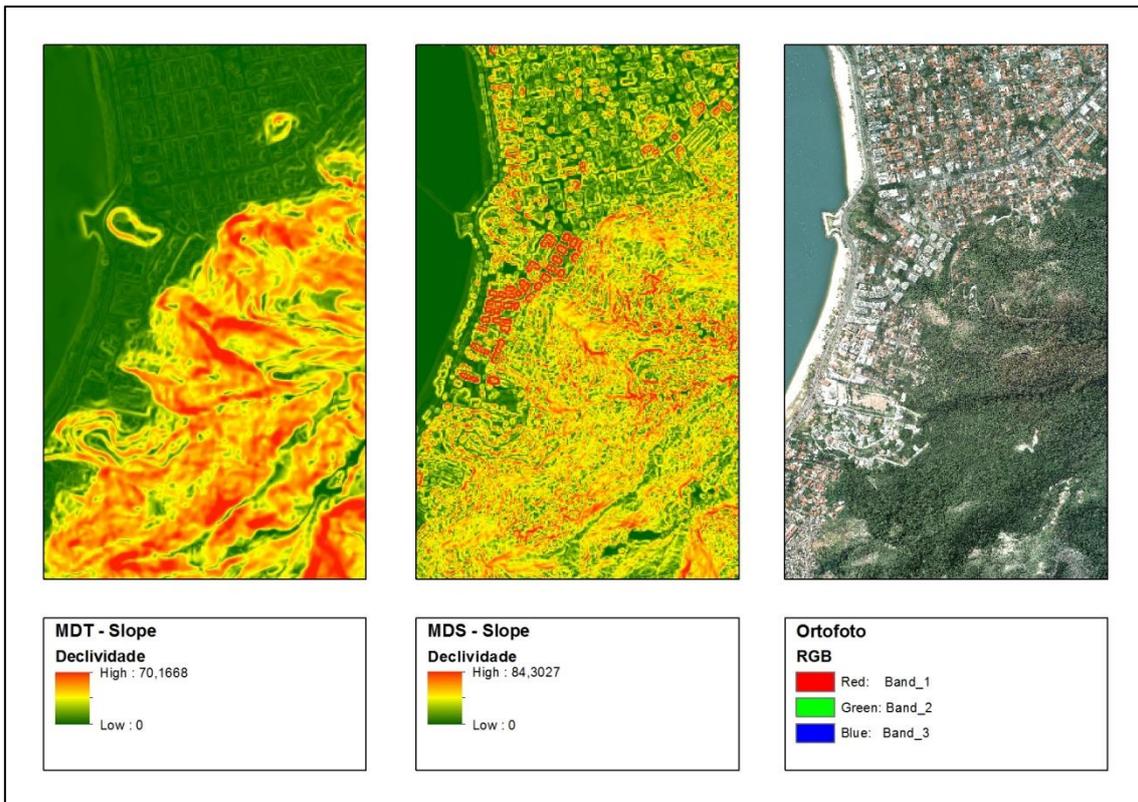


Figura 14: Comparação entre a declividade do MDT e do MDS.

Como o MDS apresenta em seus pixels a informação de altimetria dos prédios e da vegetação, existem áreas com declividade bastante acentuadas nos mapas derivados, entretanto, essa declividade não condiz com a realidade do relevo. Além disso, a área de contribuição das bacias fica completamente comprometida, no mapa derivado proveniente do MDS.

Fazendo a comparação da área de contribuição gerada pelos dois modelos também fica clara a maior efetividade do modelo corrigido a nível de solo. A Figura 15 mostra uma comparação entre a área de contribuição gerada pelo MDT e pelo MDS junto com a ortofoto da área. É possível observar na imagem que toda a área observada é bastante irregular no resultado obtido com o MDS, enquanto o resultado obtido com o MDT é mais coerente com o fluxo superficial.

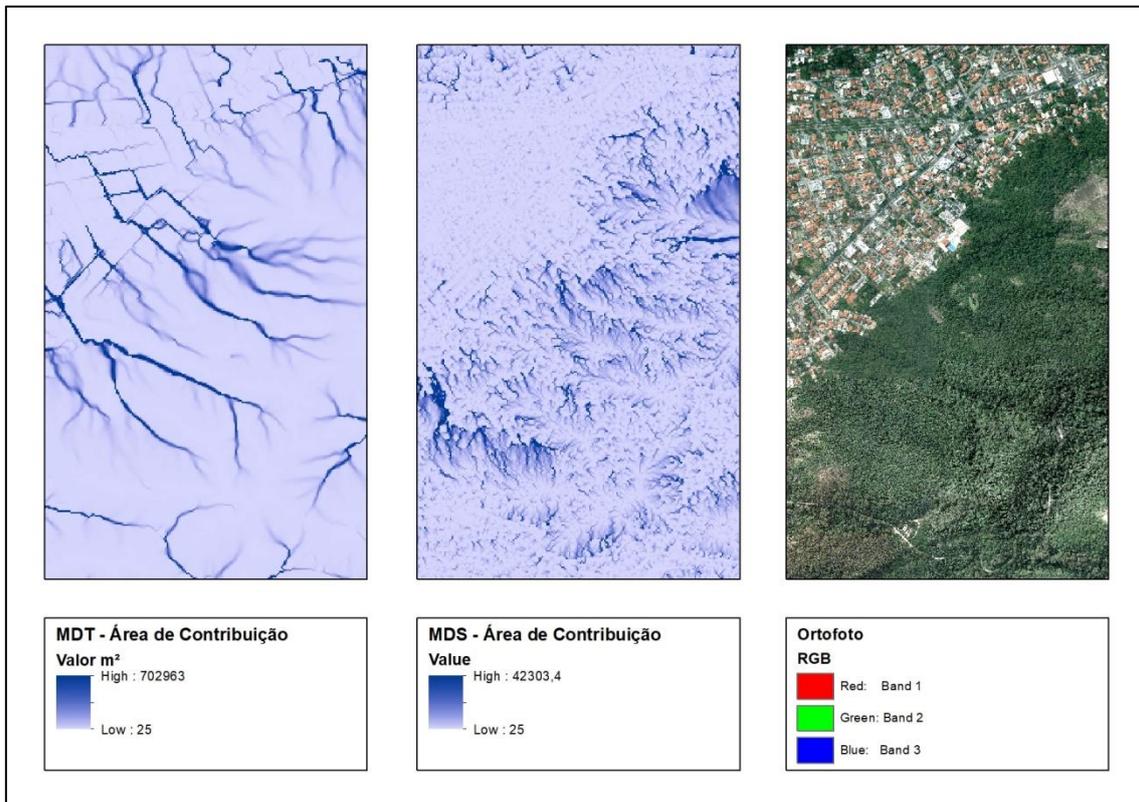


Figura 15: Comparação entre a área de contribuição do MDT e do MDS

Foi feito o cruzamento das cicatrizes com os valores de declividade proveniente do MDT e do MDS. O cruzamento gerou a Tabela 3 e a Tabela 4, que mostra os valores médios de declividade nas cicatrizes. As tabelas mostram a média do valor mínimo, a média do valor máximo, a média da amplitude, a média em cada cicatriz e a média do desvio padrão.

Valores Médios de Declividade no MDT					
	Mínimo	Máximo	Amplitude	Média	Desvio Padrão
Valores em Graus	27,71	41,23	13,53	35,97	3,40

Tabela 3: Média dos valores de declividade do MDT nas cicatrizes.

Valores Médios de Declividade no MDS					
	Mínimo	Máximo	Amplitude	Média	Desvio Padrão
Valores em Graus	69,09	100,13	31,04	84,16	8,39

Tabela 4: Média dos valores de declividade do MDS nas cicatrizes.

Fica evidente analisando as duas tabelas (Tabela 3 e Tabela 4), que o MDS apresenta valores significativamente maiores de todas as estatísticas analisadas. Isso se deve pelo fato de que o MDS gera inúmeras áreas de declividade acentuada em regiões com presença de vegetação.

Foi feito também o cruzamento das cicatrizes com os valores de área de contribuição proveniente do MDT e do MDS. O cruzamento gerou a Tabela 5 e a Tabela 6, que mostra os valores médios de área de contribuição nas cicatrizes. As tabelas mostram a média do valor mínimo, a média do valor máximo, a média da amplitude, a média em cada cicatriz e a média do desvio padrão.

Valores Médios de Área de Contribuição no MDT					
	Mínimo	Máximo	Amplitude	Média	Desvio Padrão
Valores em m <sup>2</sup>	67,86	97,04	29,18	82,19	7,95

Tabela 5: Média dos valores de área de contribuição do MDT nas cicatrizes.

Valores Médios de Área de Contribuição no MDS					
	Mínimo	Máximo	Amplitude	Média	Desvio Padrão
Valores em m <sup>2</sup>	80,58	1690,12	1609,54	399,31	303,40

Tabela 6: Média dos valores de área de contribuição do MDS nas cicatrizes.

Nota-se que na Tabela 6 os valores são bem distintos não seguindo um padrão, o que demonstra um erro no cálculo. Conforme, já demonstrado por Fernandes et al. (2004), os parâmetros topográficos tendem a seguir um padrão com valores bem próximos nas áreas susceptíveis. Este padrão dos valores topográficos se assemelha mais com os valores obtidos do MDT (Tabela 6).

Nas 144 simulações feitas, 72 utilizando como base o MDT e 72 utilizando o MDS (Anexo), verifica-se que a modelagem feita a partir do MDT possui uma maior continuidade (Figura 16, Figura 17 e Anexo). Já nas simulações feitas a partir do MDS nota-se uma maior quantidade de áreas com a classe instável (Figura 16, Figura 17 e Anexo). Quando analisamos a modelagem feita pelo SHALSTAB considerando

somente valores de até 200mm/dia verificamos também uma diferença dos resultados obtidos a partir do MDT e do MDS (Gráfico 3 e Anexo). Nota-se que o resultado a partir do MDT possui um índice maior do que o obtido pelo MDS. Este índice é feito a partir da quantidade total de pixels dentro da cicatriz que estão entre 0 e 200 mm/dia divididos pelo total de pixels das cicatrizes na área toda. Foi verificado que em praticamente todas as modelagens os índices são maiores nas simulações feitas a partir do MDT. Isto pode ser melhor analisado na Figura 18 que mostra em detalhe a modelagem a partir do MDT e do MDS. Na Figura 18 A e C verificamos que a modelagem possui uma continuidade e na Figura 18 B e D não percebemos essa continuidade dos valores de instabilidade.

O código presente no Gráfico 3 representa os parâmetros de solo de cada cenário. Sendo os primeiros dois dígitos a densidade, o segundo e o terceiro dígito o ângulo de atrito e os dois últimos dígitos representam a coesão.

As simulações que obtiveram o melhor resultado, tanto para o MDT como para o MDS, foram as que utilizaram a densidade do solo de 1,5 g/cm<sup>3</sup>, coesão 0 e ângulo de atrito 40 e 35, respectivamente (Tabela 7 e 8, e Gráfico 3). Isto ocorre por modelagens que se utilizam de parâmetros de coesão de 0 simularem maior quantidades de áreas instáveis, o que acaba possibilitando obter simulações com maiores índices. De acordo com Guimarães et al. (2003), as modelagens que se utilizam de coesão 0 no modelo SHALSTAB têm grande índice de acerto pois o modelo atribui aos parâmetros topográficos grande importância. Além disso, Guimarães et al. (2003) destacam que as áreas susceptíveis a escorregamentos das regiões típicas da Serra do Mar possuem um alto controle topográfico. Nota-se também um comportamento bem parecido, com de Guimarães et al. (2003), que são as simulações utilizando coesão de 8. Estas simulações sempre aparecem como as de pior resultado entre todas as simulações.

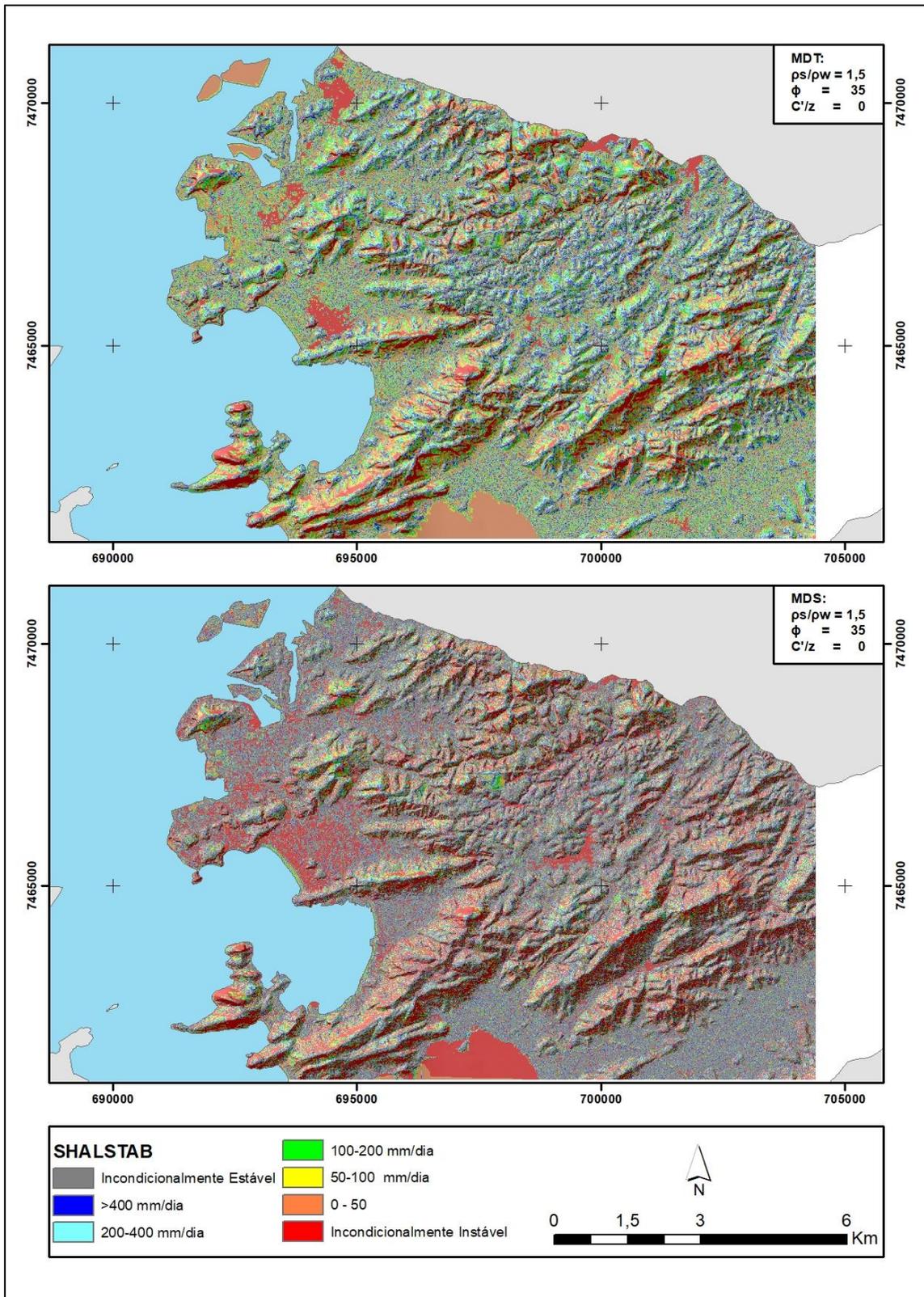


Figura 16: Comparação entre a modelagem feita a partir do MDT (superior) e do MDS (inferior). As duas simulações foram feitas utilizando os valores de densidade do solo de 1,5 g/cm<sup>3</sup>, ângulo de atrito 35 e coesão 0.

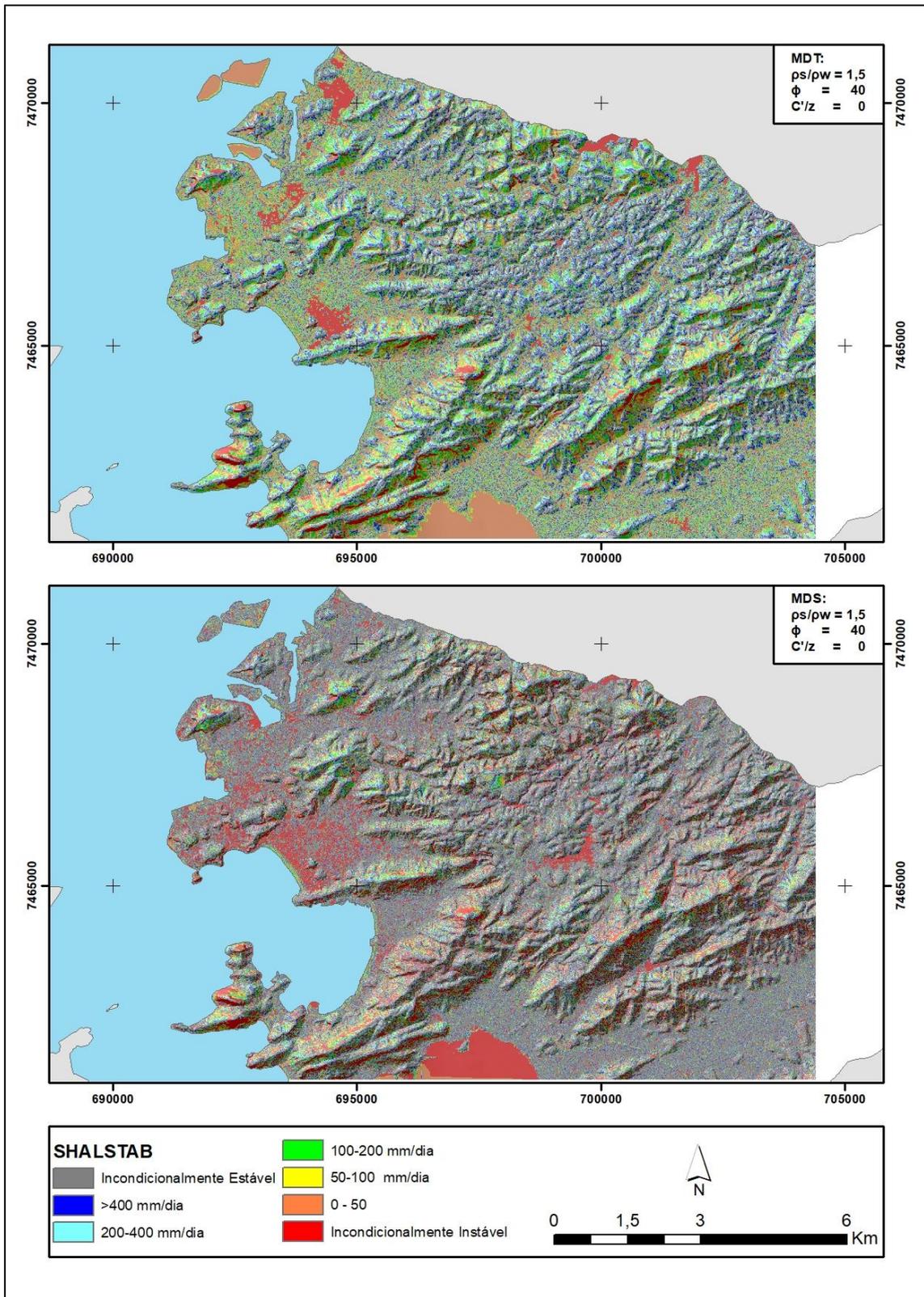


Figura 17: Comparação entre a modelagem feita a partir do MDT (superior) e do MDS (inferior). As duas simulações foram feitas utilizando os valores de densidade do solo de 1,5 g/cm<sup>3</sup>, ângulo de atrito 40 e coesão 0.

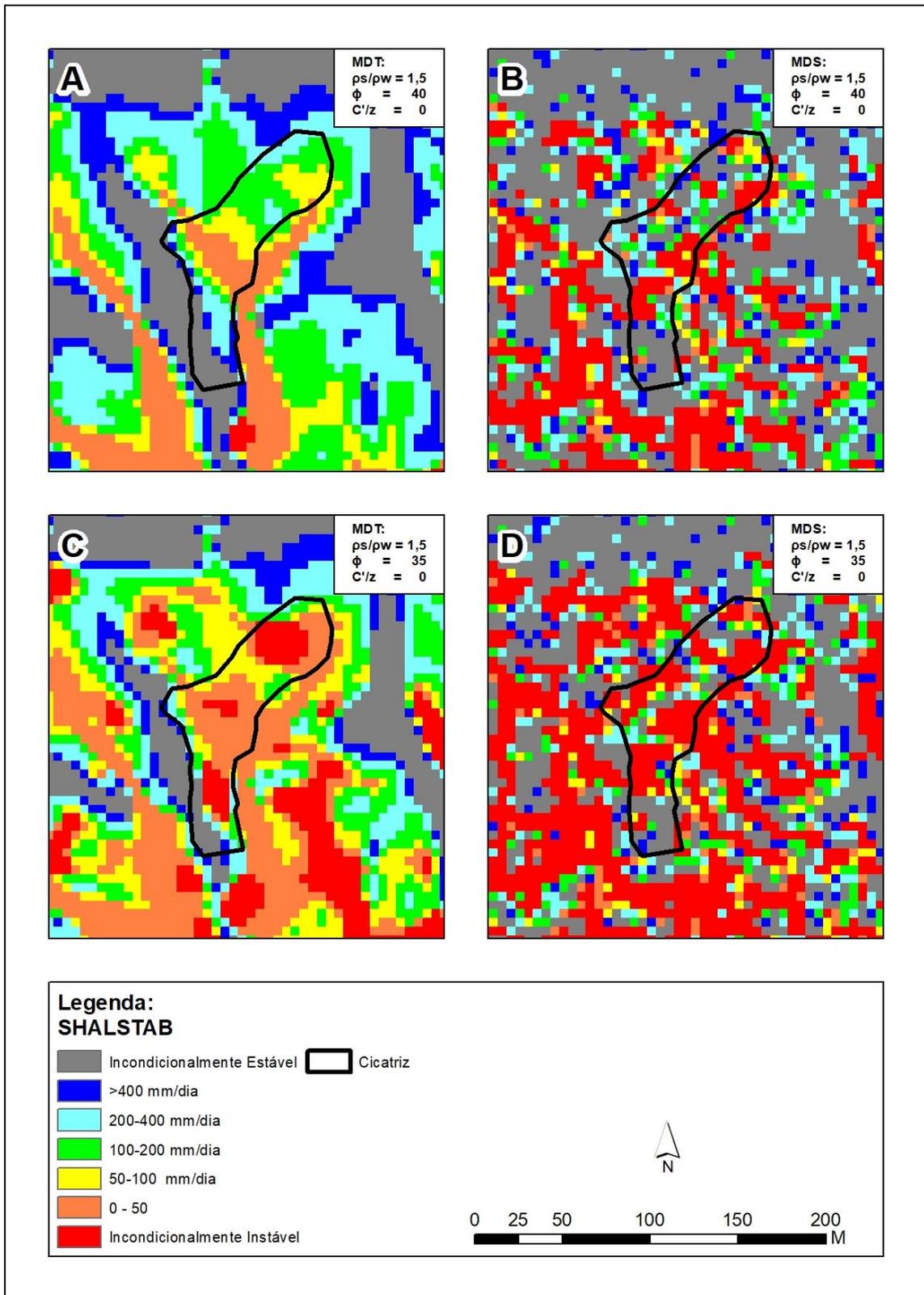


Figura 18: Detalhe das simulações feitas, a partir do MDT (A e C) e do MDS (B e D) utilizando valores de densidade do solo de 1,5 g/cm<sup>3</sup> e ângulo de atrito 35 e 40.

OPF MDT	$\rho_s/\rho_w$	$\phi$	C'/z	OPF MDT	$\rho_s/\rho_w$	$\phi$	C'/z	OPF MDT	$\rho_s/\rho_w$	$\phi$	C'/z
1	1,5	40	0	25	2,5	30	0	49	2,5	25	8
2	1,5	35	0	26	2	30	4	50	2,5	20	8
3	1,5	30	2	27	2,5	30	2	51	2,5	45	2
4	1,5	45	0	28	1,5	30	4	52	2,5	45	4
5	1,5	35	2	29	1,5	45	2	53	2,5	40	4
6	1,5	25	2	30	2	20	2	54	1,5	45	8
7	1,5	30	0	31	2,5	25	4	55	2,5	30	8
8	2	40	0	32	2	20	4	56	1,5	40	8
9	2	35	2	33	1,5	25	0	57	2	20	8
10	2	35	0	34	2,5	25	2	58	2	25	8
11	1,5	20	4	35	2	40	2	59	2	30	8
12	2	30	0	36	2	25	0	60	1,5	20	0
13	1,5	25	4	37	2	45	4	61	2	35	8
14	1,5	20	2	38	2,5	25	0	62	1,5	35	8
15	2	30	2	39	2,5	45	0	63	2	40	8
16	1,5	35	4	40	2,5	20	2	64	2	45	8
17	2,5	40	0	41	2,5	40	2	65	2,5	35	8
18	2	25	4	42	2,5	20	4	66	1,5	30	8
19	2	25	2	43	1,5	40	4	67	2	20	0
20	2	45	0	44	2	35	4	68	2,5	40	8
21	2,5	35	2	45	2	45	2	69	1,5	25	8
22	1,5	40	2	46	2,5	35	4	70	2,5	45	8
23	2,5	35	0	47	2	40	4	71	2,5	20	0
24	2,5	30	4	48	1,5	45	4	72	1,5	20	8

Tabela 7: Rank das diferentes combinações dos valores dos parâmetros de solo das 72 simulações para a modelagem com o uso do modelo digital de terreno.

OPF MDS	$\rho_s/\rho_w$	$\phi$	C'/z	OPF MDS	$\rho_s/\rho_w$	$\phi$	C'/z	OPF MDS	$\rho_s/\rho_w$	$\phi$	C'/z
1	1,5	35	0	25	2,5	40	0	49	1,5	45	4
2	1,5	40	0	26	1,5	35	4	50	2	20	0
3	1,5	30	0	27	2	20	4	51	2,5	20	8
4	1,5	30	2	28	1,5	45	2	52	2,5	45	2
5	1,5	25	2	29	2	30	4	53	2,5	20	0
6	1,5	45	0	30	2,5	35	2	54	2,5	40	4
7	2	30	0	31	2,5	30	2	55	2,5	25	8
8	1,5	35	2	32	2	40	2	56	2,5	45	4
9	2	35	0	33	2,5	20	4	57	1,5	45	8
10	2	25	2	34	2	25	0	58	1,5	40	8
11	2	40	0	35	2,5	30	4	59	1,5	35	8
12	1,5	20	4	36	2	45	4	60	2	45	8
13	1,5	20	2	37	2	20	2	61	1,5	30	8
14	2,5	30	0	38	2,5	45	0	62	2	40	8
15	1,5	25	4	39	2,5	25	4	63	2,5	30	8
16	2	30	2	40	2,5	40	2	64	2	35	8
17	1,5	40	2	41	2,5	25	0	65	2	30	8
18	2	35	2	42	2	35	4	66	2	20	8
19	2	45	0	43	2	45	2	67	2	25	8
20	2,5	25	2	44	1,5	40	4	68	1,5	25	8
21	1,5	30	4	45	2,5	35	4	69	2,5	35	8
22	1,5	25	0	46	2	40	4	70	2,5	40	8
23	2,5	35	0	47	2,5	20	2	71	2,5	45	8
24	2	25	4	48	1,5	20	0	72	1,5	20	8

Tabela 8: Rank das diferentes combinações dos valores dos parâmetros de solo das 72 simulações para a modelagem com o uso do modelo digital de superfície.

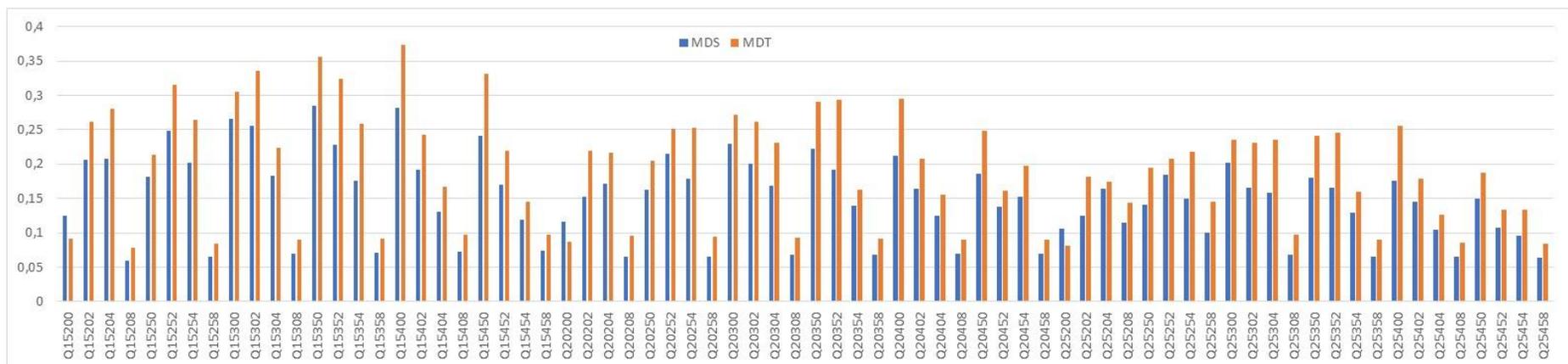


Gráfico 3: Gráfico com a frequência do número de pixels nas cicatrizes entre os valores de 0 à 200 mm/dia dividido pelo total de pixels da cicatrizes.

É possível observar a influência que o relevo gera nos resultados das modelagens. A Figura 19 mostra os resultados utilizando valores de densidade do solo de 1,5 g/cm<sup>3</sup>, ângulo de atrito 45 e coesão 0, sobre o relevo junto com a visualização 3d da classificação. Nota-se que as áreas mais instáveis ocorrem sempre nas áreas de topografia mais acidentada. Na modelagem feita a partir do MDS verificamos que os valores de instabilidade são mais fragmentados e sem continuidade, isso pode ser observado na Figura 20.

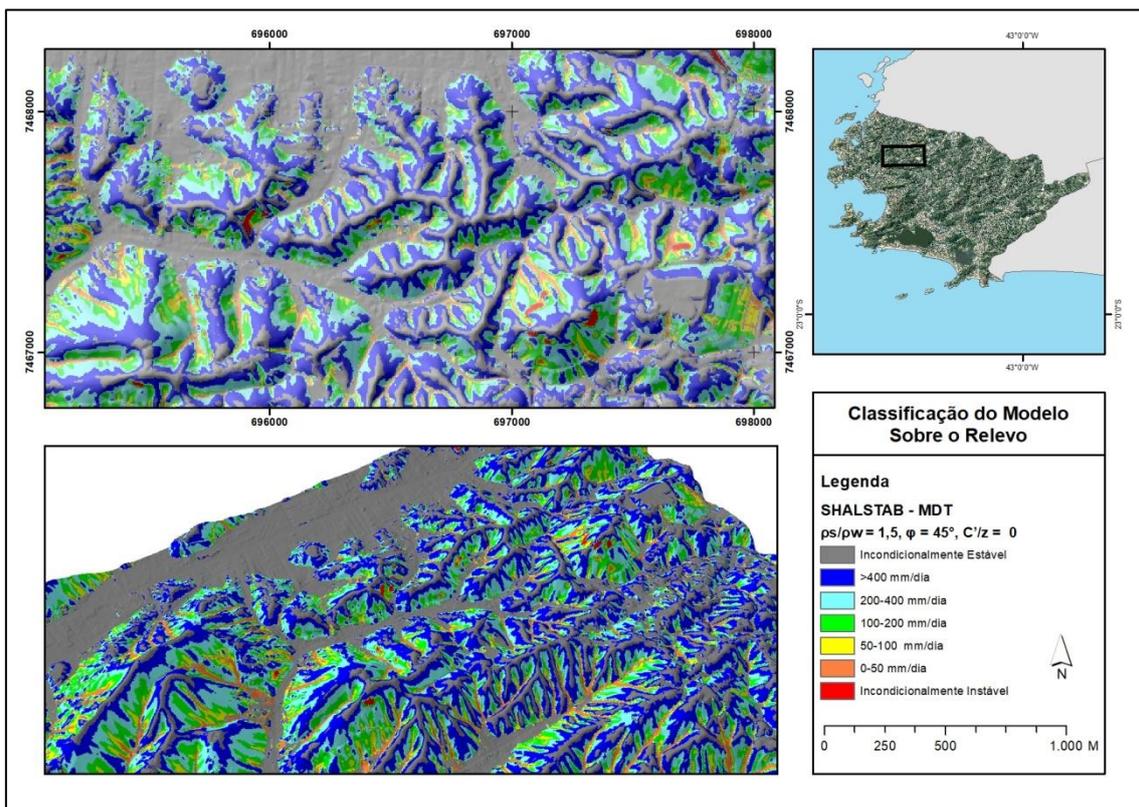


Figura 19: Classificação do modelo SHALSTAB sobre o relevo no MDT.

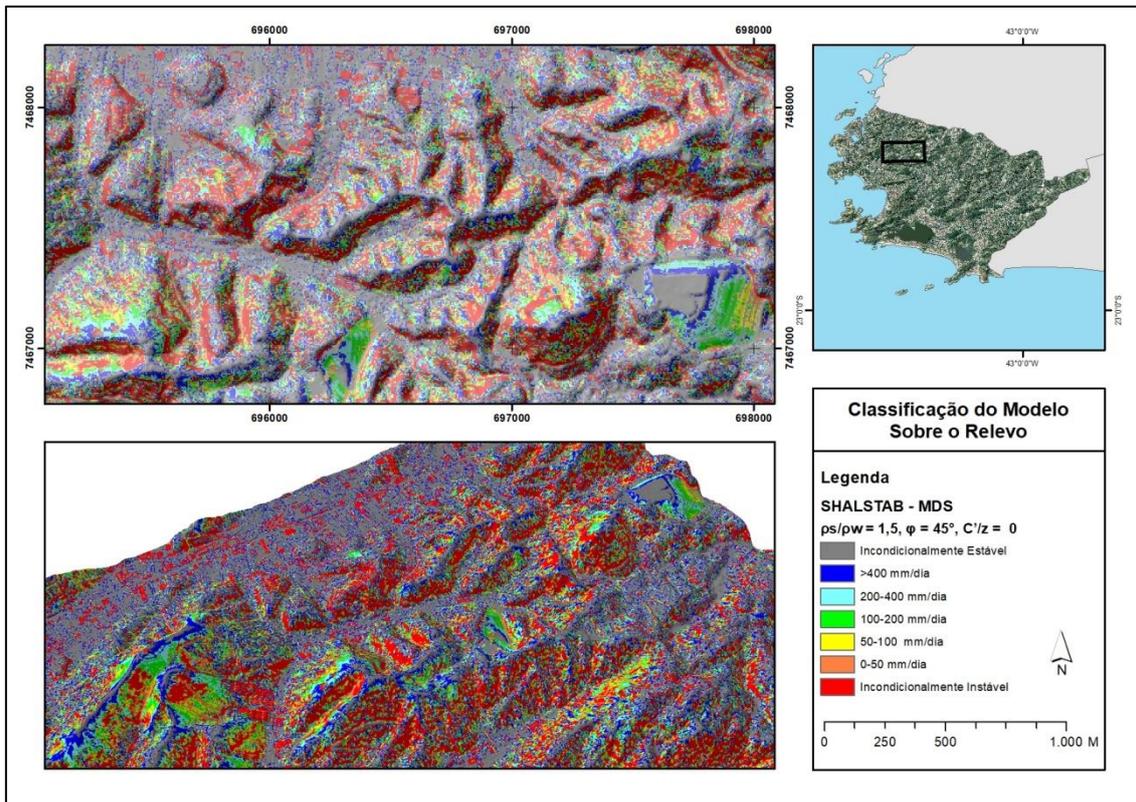


Figura 20: Classificação do modelo SHALSTAB sobre o relevo no MDS.

## 6. Conclusão

O Modelo Digital de Terreno gerado mostrou-se bastante apropriado para a utilização como parâmetro de entrada de relevo para a confecção de mapas de susceptibilidade com o modelo SHALSTAB. Já o Modelo Digital de Superfície não obteve a mesma performance do que o MDT. As interferências da vegetação e das edificações causam exageros nos mapas de declividade e distorções no mapa de área de contribuição do MDS, fazendo que, nessa escala, o MDT se mostre mais adequado para uma modelagem de susceptibilidade à escorregamento.

Os dados brutos provenientes do levantamento a laser não são matrizes regulares, mas sim uma nuvem de pontos espalhados de forma irregular pelo terreno, isso faz que seja necessários um tratamento prévio e um cuidado na confecção dos rasters (os modelos digitais) que servirão de base para gerar os mapas derivados utilizados pelo SHALSTAB. É fundamental que a representação do relevo seja

hidrológica e topograficamente correta para o mapeamento de susceptibilidade proposto.

Os parâmetros de solo que apresentaram o melhor resultado do modelo com o MDT foram os do cenário com densidade do solo de 1,5 g/cm<sup>3</sup>, ângulo de atrito de 40° e coesão 0 kPa. Outros trabalhos demonstram que a modelagem sem coesão consegue obter resultados bem satisfatórios. Por outro lado, simulações com coesão altas (valores de 8kPa) não possuem a mesma eficácia.

A modelagem SHALSTAB mostrou uma forte influência das áreas instáveis com a declividade mais acentuada. Essa relação não é uma surpresa, já que a natureza do processo mapeado está fortemente ligada à declividade.

O resultado do SHALSTAB mostrou-se bastante adequado para uma análise prévia do grau de instabilidade de uma região. Métodos automatizados são ferramentas que podem poupar tempo e dinheiro, além de tornar possível uma análise em curto período de tempo, com qualidade considerável. Municípios que não podem arcar com os custos de um levantamento de campo podem se beneficiar das técnicas automatizadas de mapeamento de áreas de risco.

O produto gerado pelo presente trabalho teve uma qualidade boa, e foi feito com produtos de levantamento aerofotogramétrico junto com Modelos Digitais de Elevação e de Superfície por imageamento laser. Ainda hoje, esse produto não é acessível para todos os municípios do Brasil, pois tem um custo bastante elevado, entretanto, o modelo SHALSTAB pode ser feito com relativa qualidade com um MDT com uma resolução espacial menor, o que reduz significativamente o valor do processo.

Mesmo que as técnicas automatizadas sejam um facilitador na confecção de mapas de susceptibilidade a escorregamento, é necessário ir a campo para a validação e análise mais detalhada da situação real da área.

## 7. Bibliografia

BAUM, R. L.; SAVAGE, W. Z.; GODT, J. W. **TRIGRS – A Fortran program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis,**

**Version 2.0.** Washigton: U.S. Department of the Interior, U. S. Geological Survey Open-File Report 02-0424, 27, 2008.

BELLUGI, D., MILLEDGE, D. G., DIETRICH, W. E., MCKEAN, J. A., PERRON, J. T., SUDDERTH, E. B., & KAZIAN, B. A spectral clustering search algorithm for predicting shallow landslide size and location. **Journal of Geophysical Research: Earth Surface**, v. 120, n. 2, p. 300-324, 2015.

BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Bulletin of Hydrological Sciences*, v. 24, p. 43-69, 1979.

BORGA, M.; DALLA FONTANA, G.; DA ROS, D.; MARCHI, L. Shallow landslide hazard assessment using a physically based model and digital elevation data. **Environmental Geology**, v. 35, n. 2–3, p. 81-88, 1998.

BURROUGH, P. A.; MCDONNELL, R. A. Creating continuous surfaces from point data. **Principles of Geographic Information Systems. Oxford University Press, Oxford, UK**, 1998.

CAVALLI, M., TAROLLI, P., MARCHI, L., & DALLA FONTANA, G.. The effectiveness of airborne LiDAR data in the recognition of channel-bed morphology. **Catena**, v. 73, n. 3, p. 249-260, 2008.

COSTA-CABRAL, M. C., & BURGESS, S. J.. Digital elevation model networks (DEMON): A model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas. **Water resources research**, v. 30, n. 6, p. 1681-1692, 1994.

DE SY, V., SCHOORL, J. M., KEESSTRA, S. D., JONES, K. E., & CLAESSENS, L. Landslide model performance in a high resolution small-scale landscape. **Geomorphology**, v. 190, p. 73-81, 2013.

DOWLING, C. A., SANTI, P. M. Debris flows and their toll on human life: a global analysis of debris-flow fatalities from 1950 to 2011. **Natural hazards**, v. 71, n. 1, p. 203-227, 2014.

DRM. Plano de Contingência do DRM-RJ Serviço Geológico do Estado do Rio de Janeiro Período Dezembro/2015 – Abril/2016, 2015 Disponível em: < <http://www.drm.rj.gov.br/>>. Acesso em 15 ago. 2016

FERNANDES, N. F., GUIMARÃES, R. F., GOMES, R. A. T., VIEIRA, B. C., MONTGOMERY, D. R. & GREENBERG, H. M. Condicionantes geomorfológicos dos deslizamentos nas encostas: avaliação de metodologias e aplicação de modelo de previsão de áreas susceptíveis. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 2, n. 1, 2001.

FERNANDES, N. F.; AMARAL, C. P. Movimentos de massa: uma abordagem geológico-geomorfológica. In Guerra, A.J.T. e Cunha, S.B. (org.) **Geomorfologia e Meio Ambiente**. Bertrand, Rio de Janeiro, p. 123-194, 1996.

GIONGO, M.; KOEHLER, H.S.; MACHADO, S. do A.; KIRCHNER, F.F.; MACHETTI, M. LiDAR: princípios e aplicações florestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 30, n. 63, p. 231, 2010.

GOMES, R. A. T.; GUIMARÃES, R. F.; CARVALHO JÚNIOR, O. A.; FERNANDES, N. F. Análise de um modelo de previsão de deslizamentos (SHALSTAB) em diferentes escalas cartográficas. **Revista Solos e Rocha**, v. 28, n. 1, p. 85-97, 2005.

GORSEVSKI, P. V., BROWN, M. K., PANTER, K., ONASCH, C. M., SIMIC, A., & SNYDER, J. Landslide detection and susceptibility mapping using LiDAR and an artificial neural network approach: a case study in the Cuyahoga Valley National Park, Ohio. **Landslides**, v. 13, n. 3, p. 467-484, 2016.

GUERRA, A. J. T., FULLEN, M. A., JORGE, M. D. C. O., & ALEXANDRE, S. T. Soil erosion and conservation in Brazil. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 37, n. 1, p. 81-91, 2014.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidades de taludes naturais e de escavação**. São Paulo: Edgard Blucher, 1984.

GUIMARÃES, R. F.; MONTGOMERY, D. R.; GREENBERG, H. M.; FERNANDES, N. F.; GOMES, R. A. T.; DE CARVALHO JÚNIOR, O. A. Parameterization of soil properties for a model of topographic controls on shallow landsliding: application to Rio de Janeiro. **Engineering Geology**, v. 69, n. 1, p. 99-108, 2003

HUTCHINSON, M. F., XU, T., & STEIN, J. A.. Recent progress in the ANUDEM elevation gridding procedure. **Geomorphometry**, v. 2011, p. 19-22, 2011.

IBGE. Censo 2010, 2010. Disponível em: < <http://censo2010.ibge.gov.br/>> Acesso em: 05 abr. 2016

IBGE. Produto Interno Bruto Dos Municípios - 2014, 2016. Disponível em: < <http://http://cidades.ibge.gov.br/>> Acesso em: 15 abr. 2016

JABOYEDOFF, M., OPPIKOFER, T., ABELLÁN, A., DERRON, M. H., LOYE, A., METZGER, R., & PEDRAZZINI, A. Use of LIDAR in landslide investigations: a review. **Natural hazards**, v. 61, n. 1, p. 5-28, 2012.

JENSON, S. K.; DOMINGUE, J. O. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. **Photogrammetric engineering and remote sensing**, v. 54, n. 11, p. 1593-1600, 1988.

KIRSCHBAUM, D. B.; ADLER, R.; HONG, Y.; HILL, S.; LERNER-LAM, A. A global landslide catalog for hazard applications: method, results, and limitations. **Natural Hazards**, v. 52, n.3, p. 561-575, 2010.

MONTGOMERY, D. R.& DIETRICH, W. E. Landscape dissection and drainage area-slope thresholds. In: KIRKBY, M. J. (Ed.). **Process models and theoretical geomorphology**. New York: John Wiley,1994b. p. 221-246.

MOORE, IAN DONALD; GRAYSON, R. B.; LADSON, A. R. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. **Hydrological processes**, v. 5, n. 1, p. 3-30, 1991.

O'LOUGHLIN, E. M. Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis. **Water Resources Research**, v. 22, n. 5, p. 794-804, 1986.

PACK, R. T.; TARBOTON, D. G.; GOODWIN, C. N. **Terrain stability mapping with SINMAP, technical description and users guide for version 1.00**. Report Number 4114-0, Terratech Consulting Ltd., Salmon Arm, Canada, 1998.

PALENZUELA, J. A., MARSELLA, M., NARDINOCCHI, C., PÉREZ, J. L., FERNÁNDEZ, T., CHACÓN, J., & IRIGARAY, C. Landslide detection and inventory by integrating LiDAR data in a GIS environment. **Landslides**, v. 12, n. 6, p. 1035-1050, 2015.

PENNA, D., BORGA, M., ARONICA, G. T., BRIGANDÌ, G., & TAROLLI, P. The influence of grid resolution on the prediction of natural and road-related shallow landslides. **Hydrology and Earth System Sciences** 18.6: 2127-2139, 2014.

QUINN, P. F. B. J., BEVEN, K., CHEVALLIER, P., & PLANCHON, O. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models. **Hydrological processes**, v. 5, n. 1, p. 59-79, 1991.

ROLIM, G. D. S., CAMARGO, M. B. P. D., LANIA, D. G., & MORAES, J. F. L. D. Climatic classification of Köppen and Thornthwaite systems and their applicability in the determination of agroclimatic zoning for the state of São Paulo, Brazil. **Bragantia**, v. 66, n. 4, p. 711-720, 2007.

ROSSI, G.; CATANI, F.; LEONI, S.; SEGONI, S.; TOFANI, V. HIRESSS: a physically based slope stability simulator for HPC applications. **Natural Hazards and Earth System Science**, v. 13, n. 1, p. 151-166, 2013.

SANTOS, H. G.; EMBRAPA SOLOS. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p. ISBN 8585864192.

SELBY, M. J. Hillslope Materials & Processes. **Oxford University Press**, New York, 2<sup>a</sup> ed., 451p., 1993

TAKAHASHI, T. Debris flow. **Annual review of fluid mechanics**, v. 13, n. 1, p. 57-77, 1981.

TARBOTON, D. G.; BRAS, R. L.; RODRIGUEZ-ITURBE, I. On the extraction of channel networks from digital elevation data. **Hydrological processes**, v. 5, n. 1, p. 81-100, 1991.

TAROLLI, P., & TARBOTON, D. G. A new method for determination of most likely landslide initiation points and the evaluation of digital terrain model scale in terrain stability mapping. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, v. 10, n. 5, p. 663-677, 2006.

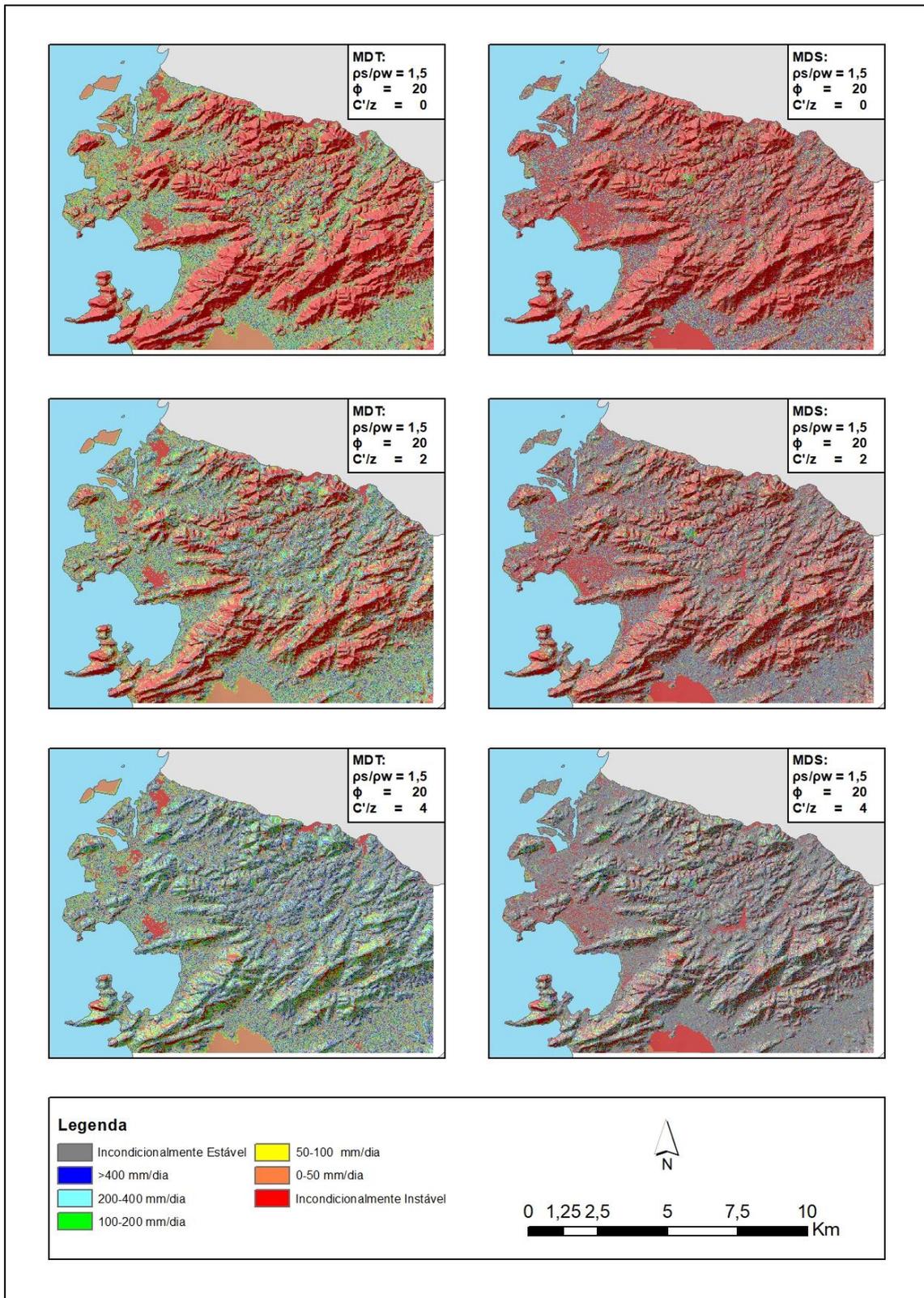
WANG, G., JOYCE, J., PHILLIPS, D., SHRESTHA, R., & CARTER, W. Delineating and defining the boundaries of an active landslide in the rainforest of Puerto Rico using

a combination of airborne and terrestrial LIDAR data. **Landslides**, v. 10, n. 4, p. 503-513, 2013.

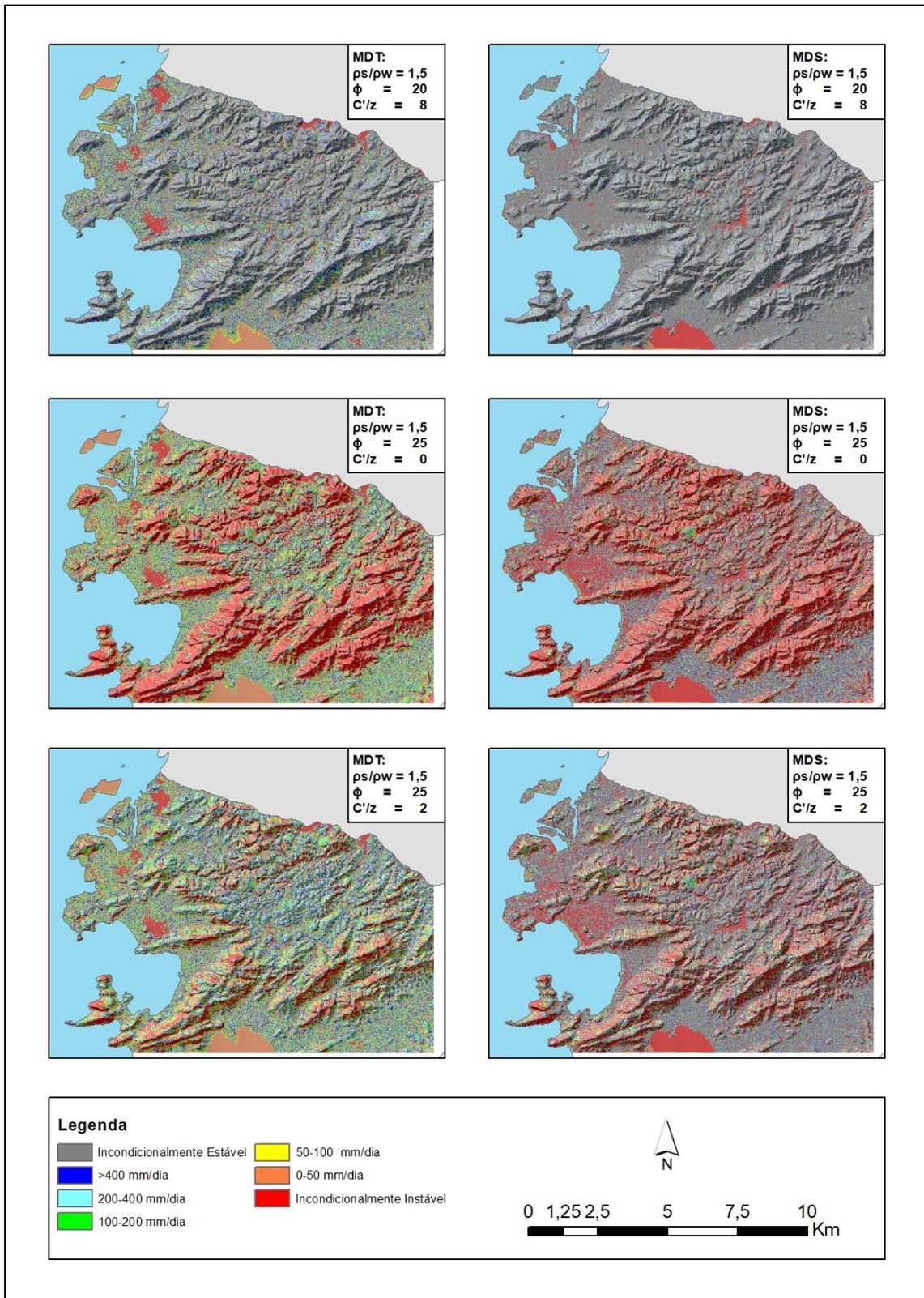
WU, W.; SIDLE, R. C.A distributed slope stability model for steep forested basins. **Water Resources Research**, v. 31, p. 2097-2110, ago. 1995.

ZHANG, W., & MONTGOMERY, D. R. Digital elevation model grid size, landscape representation, and hydrologic simulations. **Water resources research**, v. 30, n. 4, p. 1019-1028, 1994.

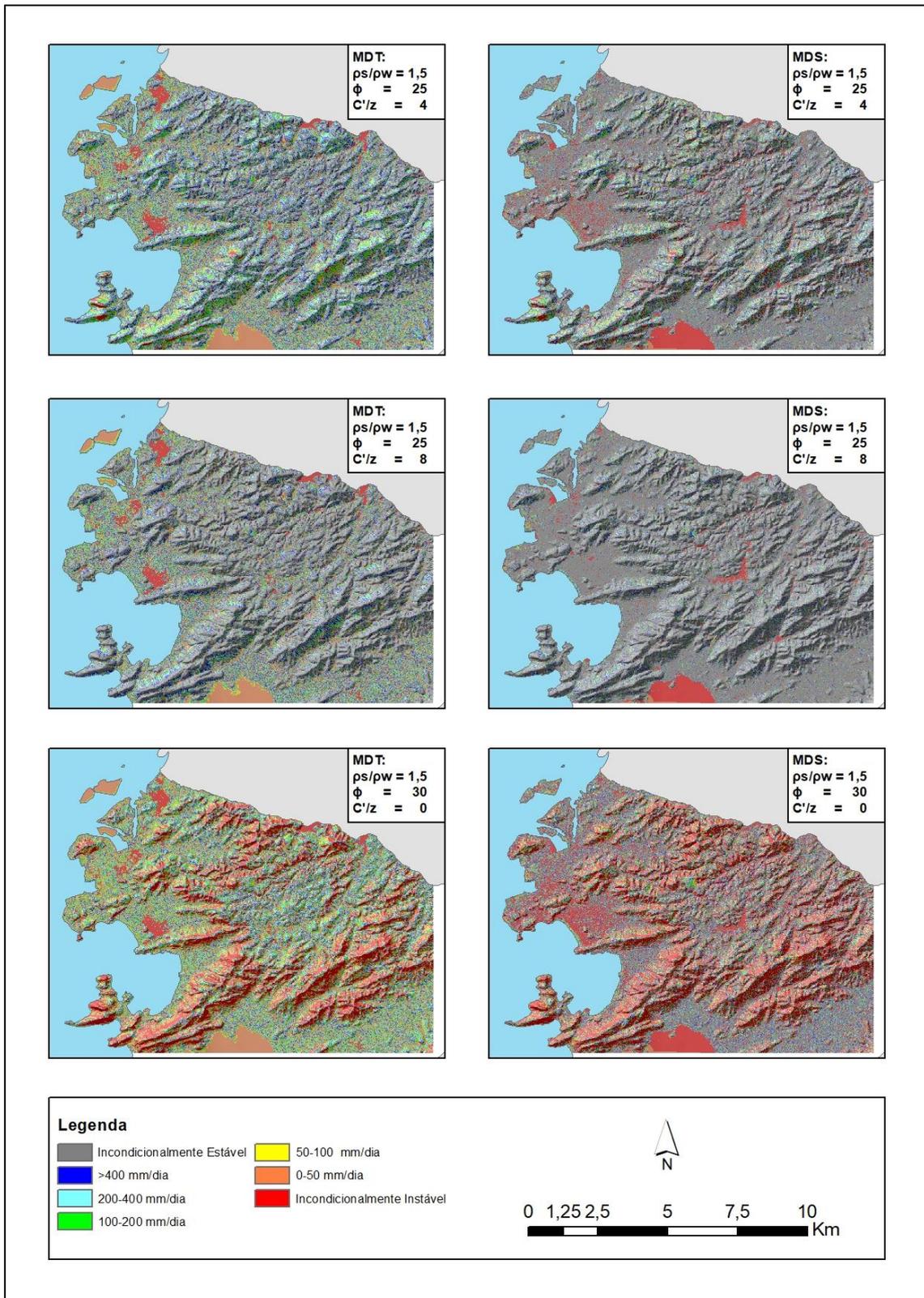
## ANEXO



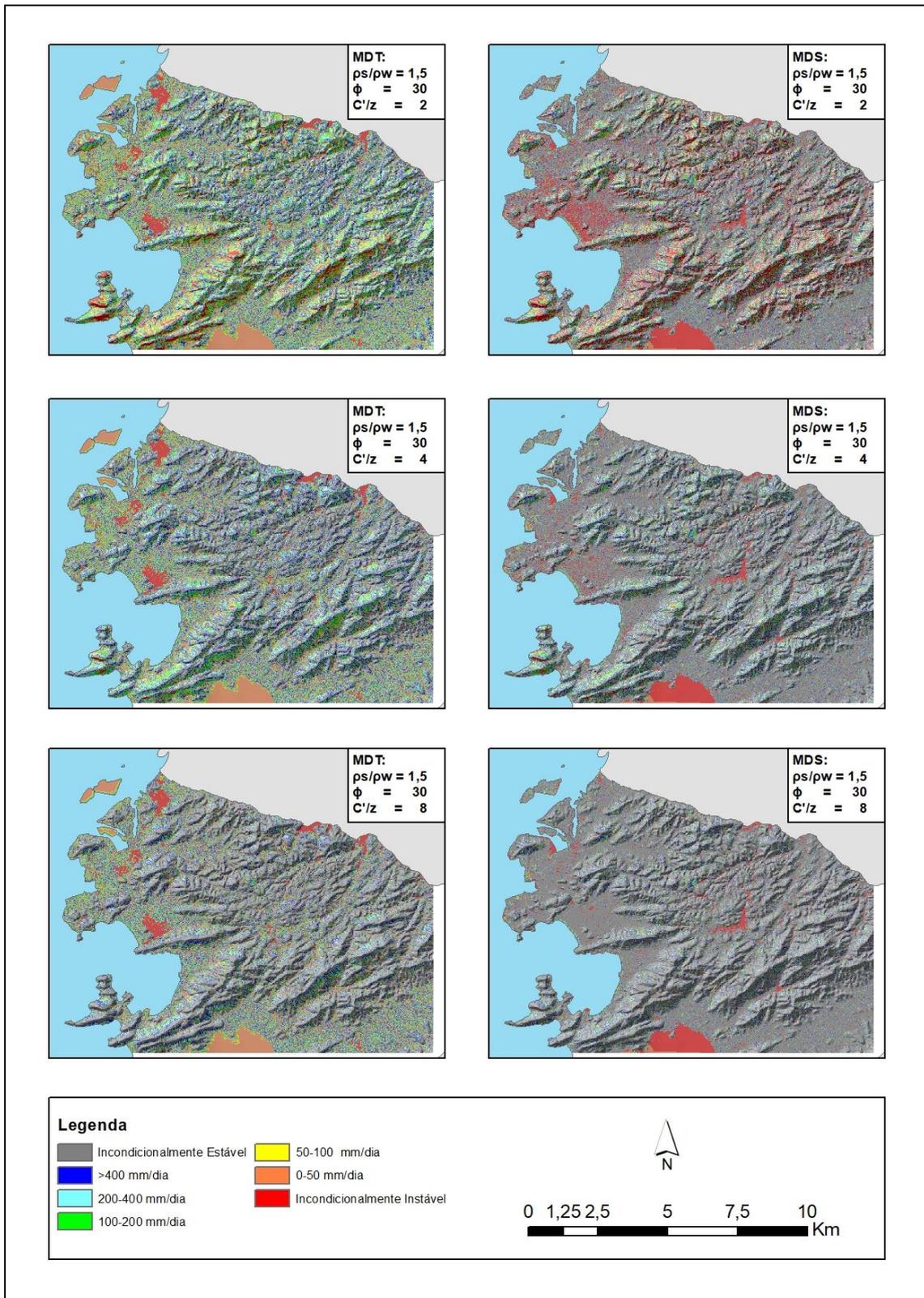
Mapa 1: Modelagem feita a partir do MDT e do MDS nos cenários: ( $ps/pw$  1,5;  $\phi$  20;  $C'/z$  0), ( $ps/pw$  1,5;  $\phi$  20;  $C'/z$  2), ( $ps/pw$  1,5;  $\phi$  20;  $C'/z$  4).



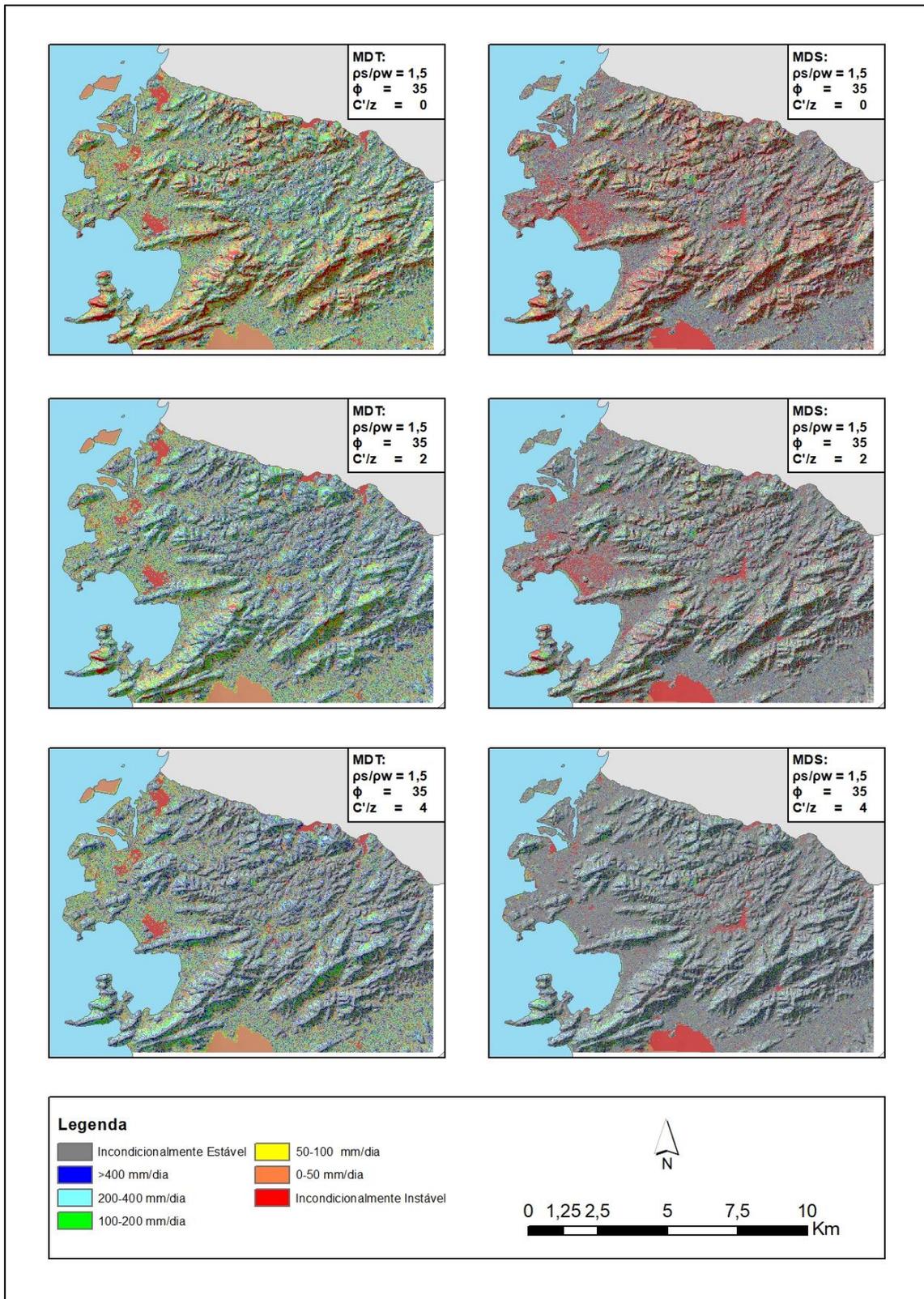
Mapa 2: Modelagem feita a partir do MDT e do MDS nos cenários: ( $ps/pw$  1,5;  $\phi$  20;  $C'/z$  8), ( $ps/pw$  1,5;  $\phi$  25;  $C'/z$  0), ( $ps/pw$  1,5;  $\phi$  25;  $C'/z$  2).



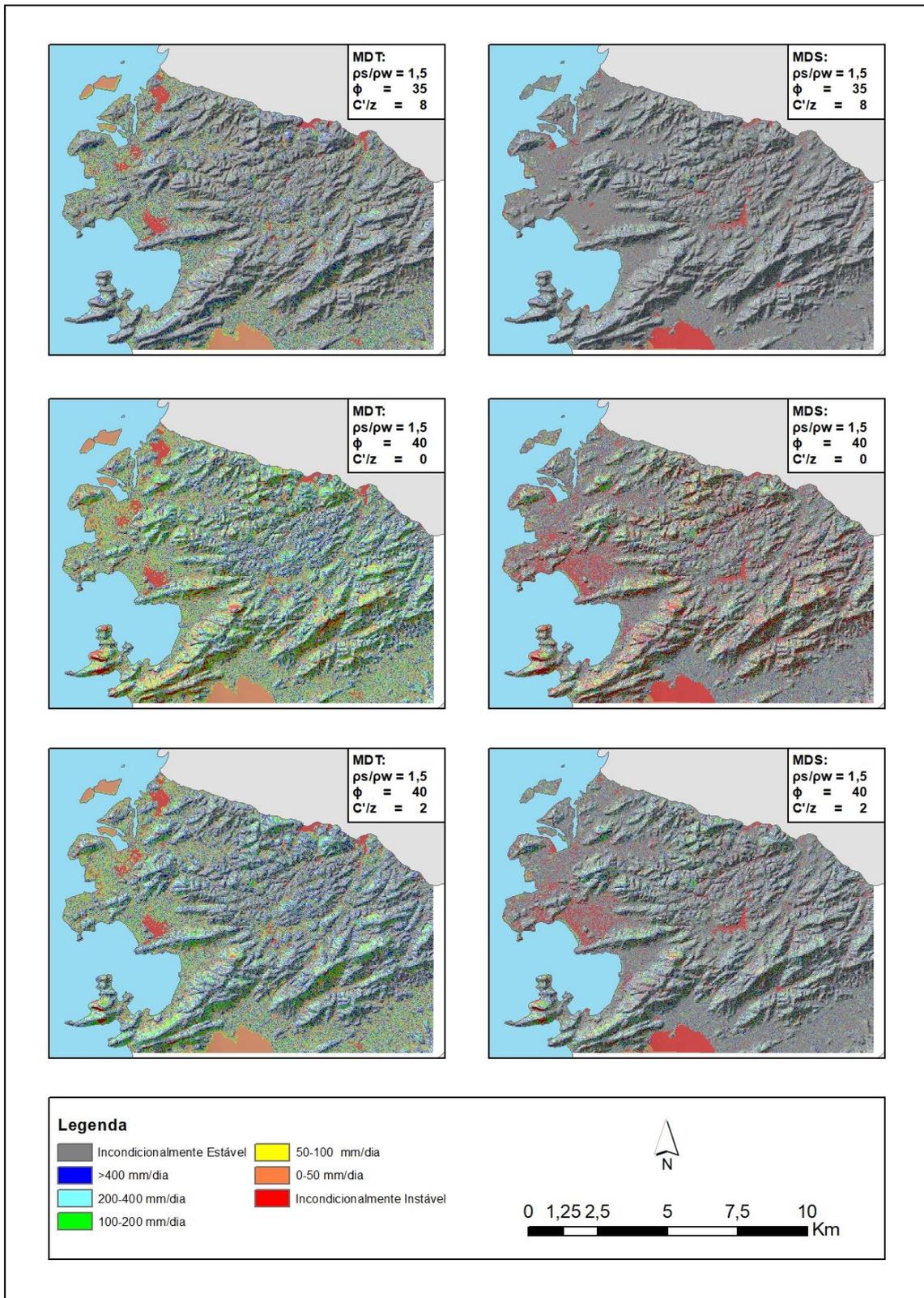
Mapa 3: Modelagem feita a partir do MDT e do MDS nos cenários: ( $\rho_s/\rho_w = 1,5$ ;  $\phi = 25$ ;  $C'/z = 8$ ), ( $\rho_s/\rho_w = 1,5$ ;  $\phi = 25$ ;  $C'/z = 0$ ), ( $\rho_s/\rho_w = 1,5$ ;  $\phi = 30$ ;  $C'/z = 2$ ).



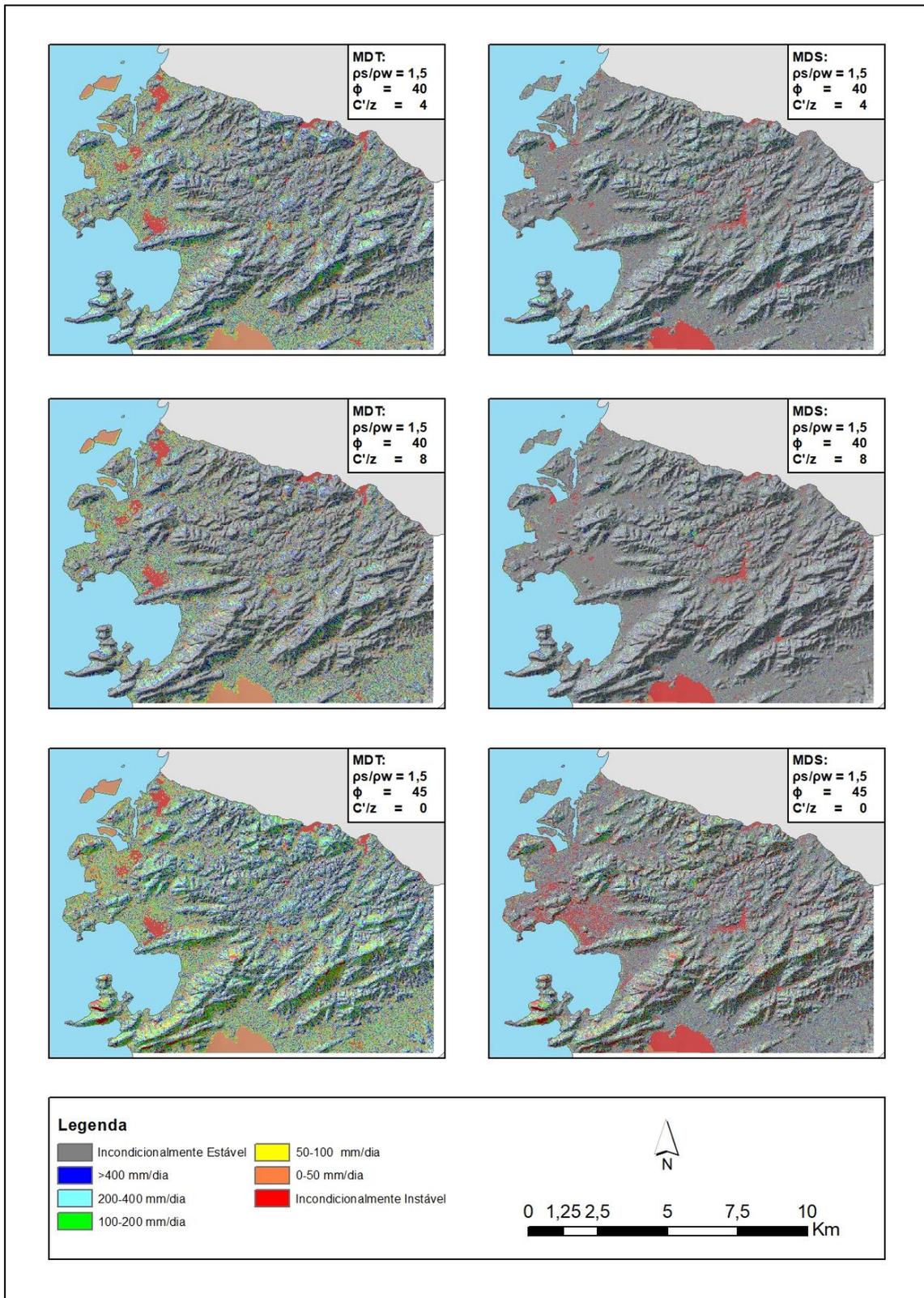
Mapa 4: Modelagem feita a partir do MDT e do MDS nos cenários: ( $\rho_s/\rho_w$  1,5;  $\phi$  30;  $C'/z$  2), ( $\rho_s/\rho_w$  1,5;  $\phi$  30;  $C'/z$  4), ( $\rho_s/\rho_w$  1,5;  $\phi$  30;  $C'/z$  8).



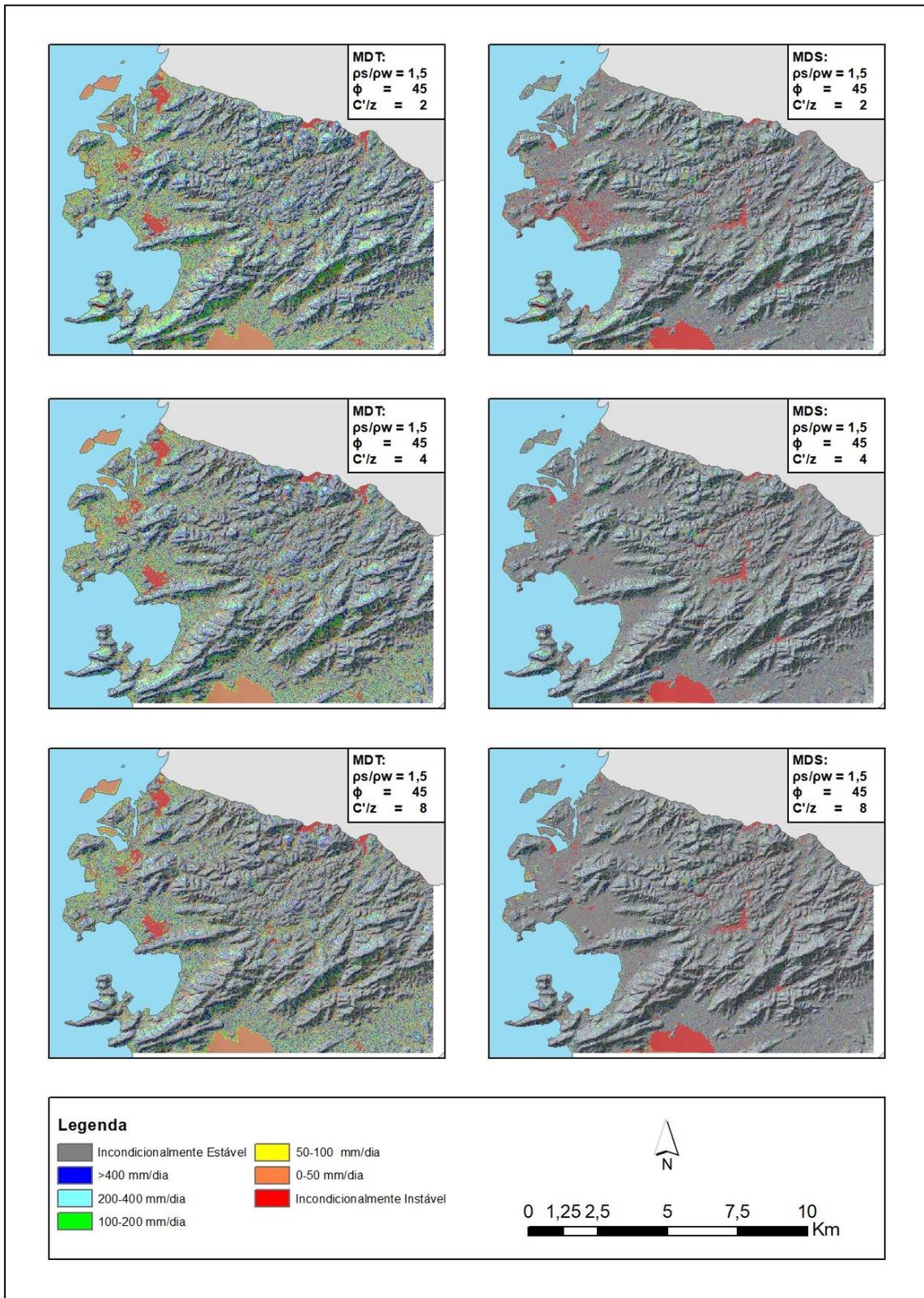
Mapa 5: Modelagem feita a partir do MDT e do MDS nos cenários: ( $\rho_s/\rho_w$  1,5;  $\phi$  35;  $C'/z$  0), ( $\rho_s/\rho_w$  1,5;  $\phi$  35;  $C'/z$  2), ( $\rho_s/\rho_w$  1,5;  $\phi$  35;  $C'/z$  4).



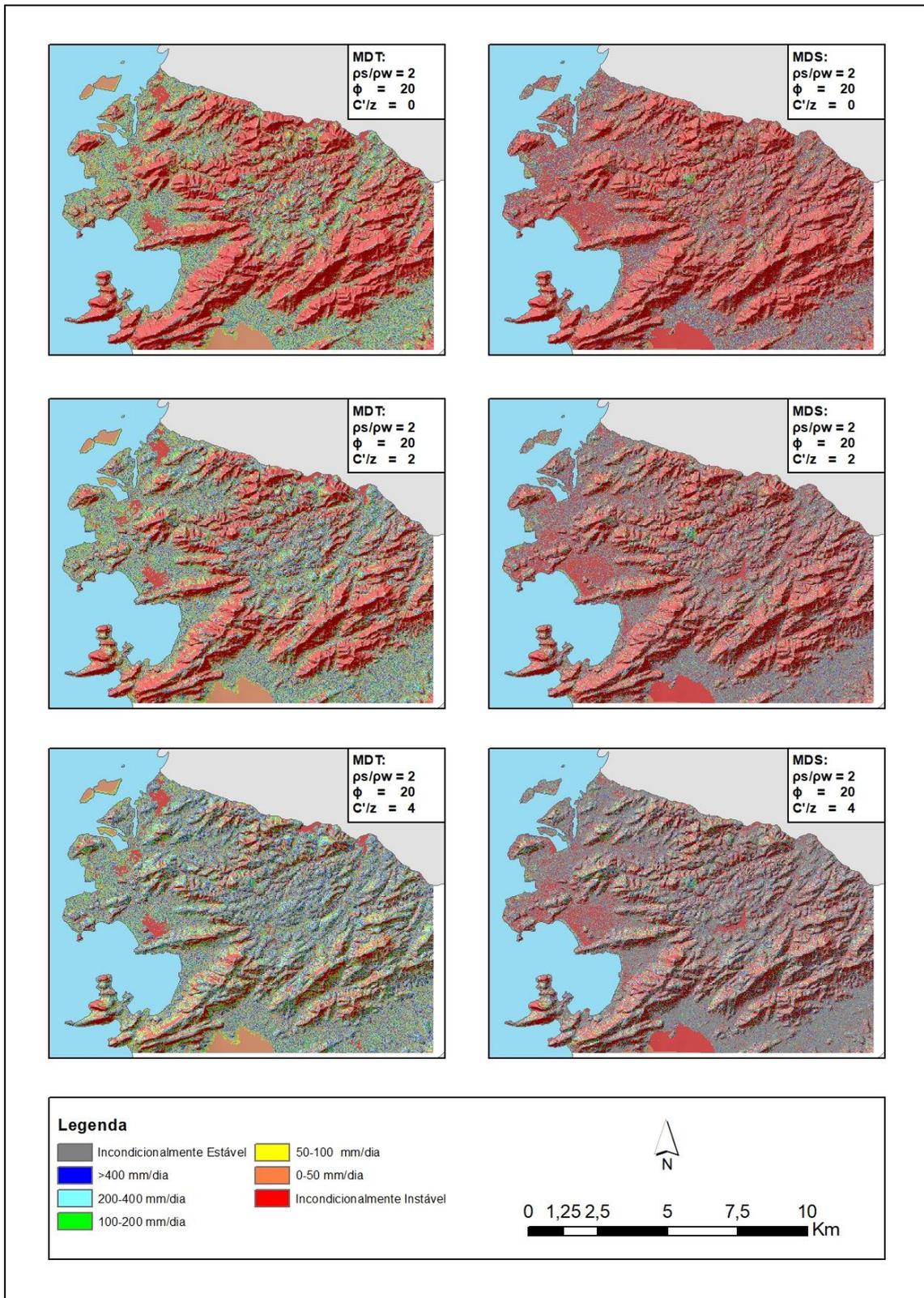
Mapa 6: Modelagem feita a partir do MDT e do MDS nos cenários: (ps/pw 1,5;  $\phi$  35; C'/z 8), (ps/pw 1,5;  $\phi$  40; C'/z 0), (ps/pw 1,5;  $\phi$  40; C'/z 2).



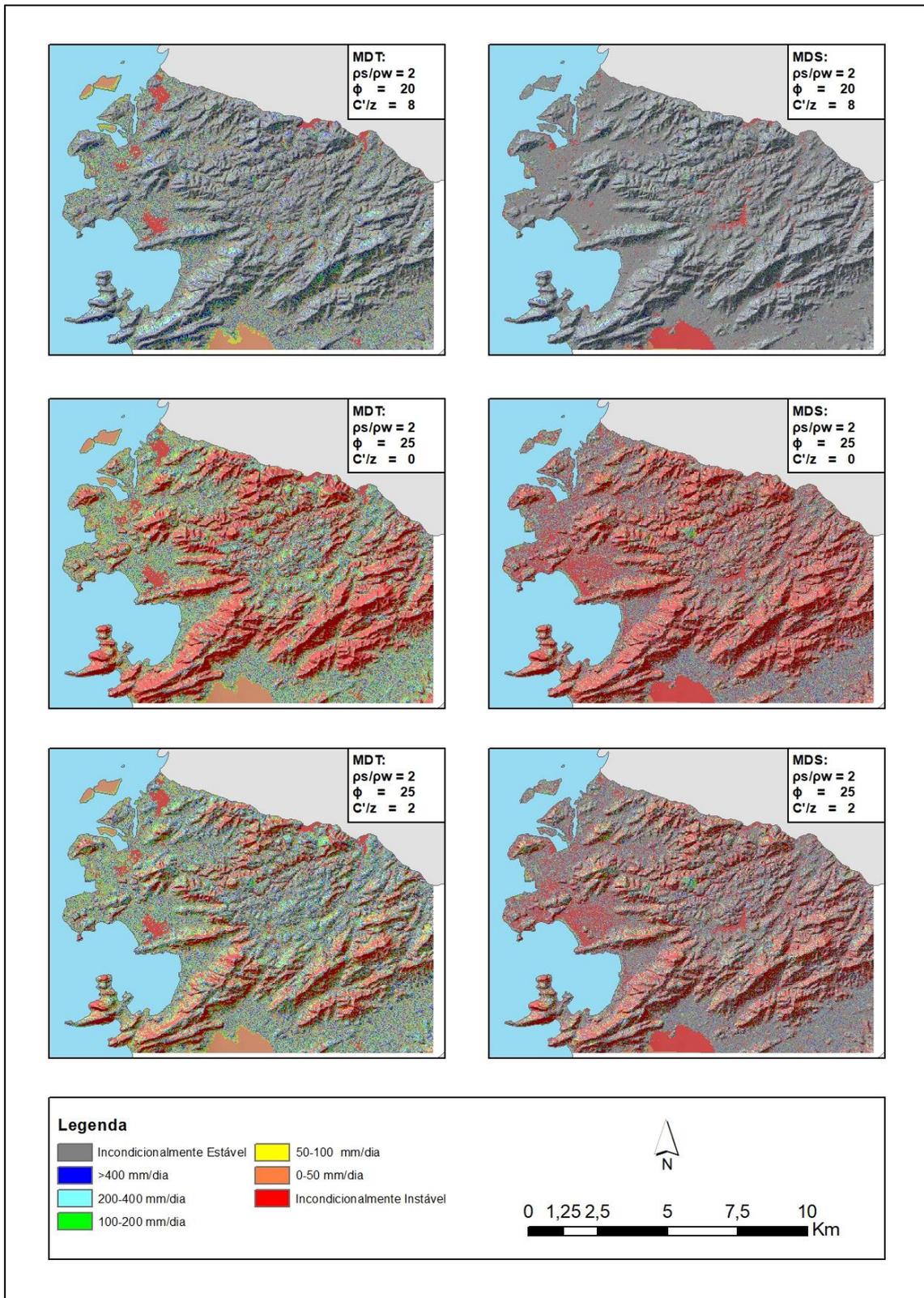
Mapa 7: Modelagem feita a partir do MDT e do MDS nos cenários: ( $\rho_s/\rho_w$  1,5;  $\phi$  40;  $C'/z$  4), ( $\rho_s/\rho_w$  1,5;  $\phi$  40;  $C'/z$  8), ( $\rho_s/\rho_w$  1,5;  $\phi$  45;  $C'/z$  0).



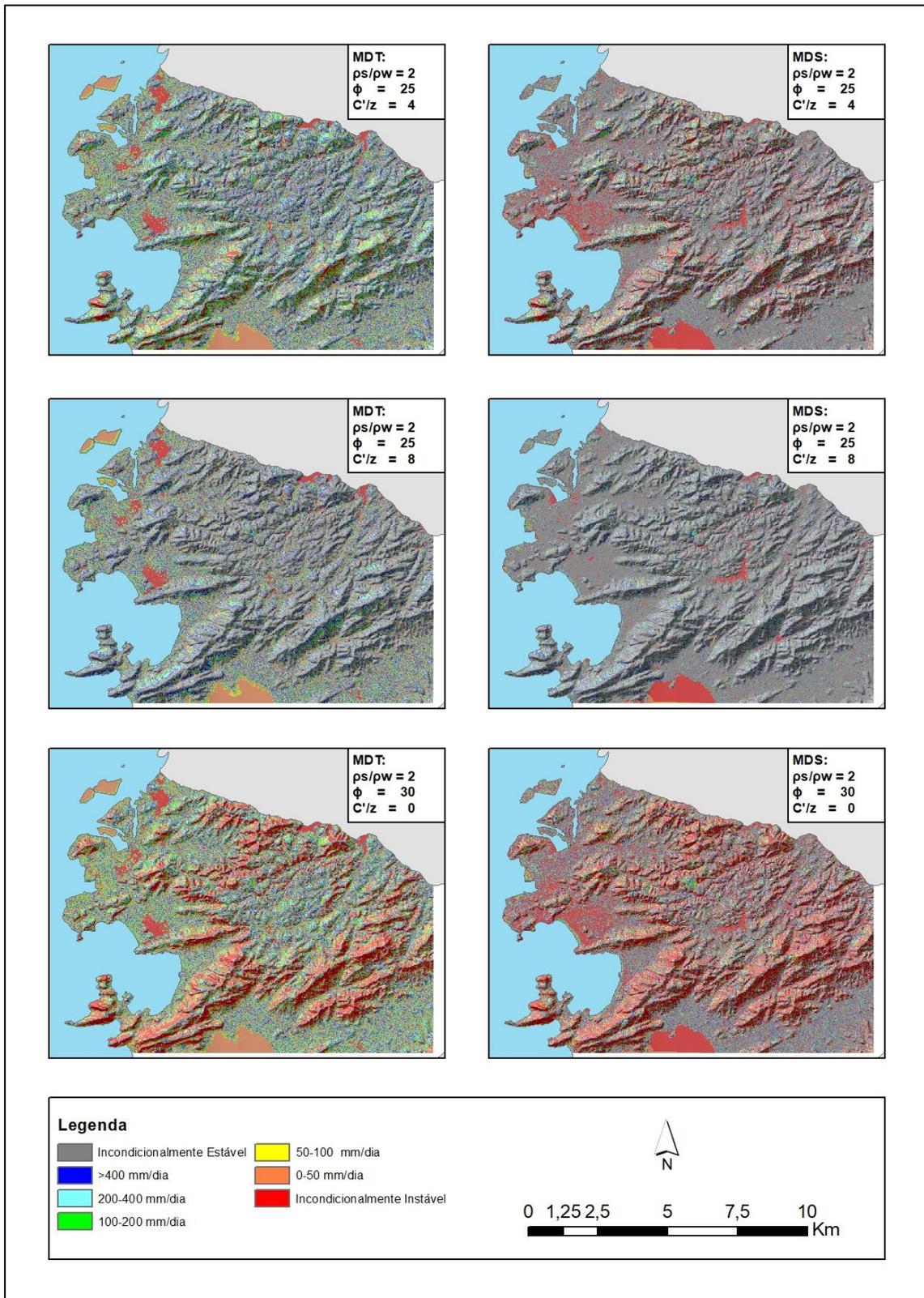
Mapa 8: Modelagem feita a partir do MDT e do MDS nos cenários: ( $ps/pw$  1,5;  $\phi$  45;  $C'/z$  2), ( $ps/pw$  1,5;  $\phi$  45;  $C'/z$  4), ( $ps/pw$  1,5;  $\phi$  45;  $C'/z$  8).



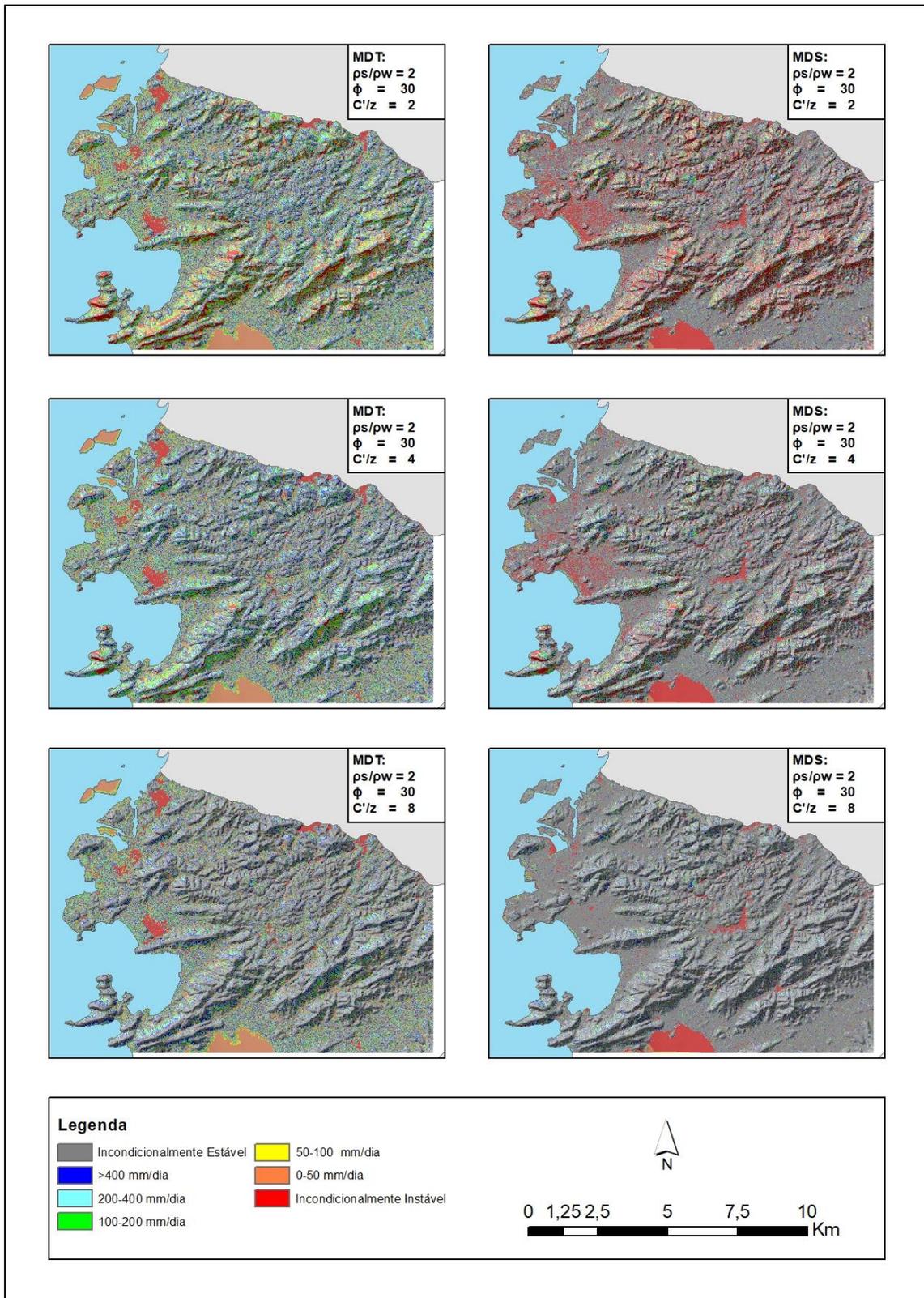
Mapa 9: Modelagem feita a partir do MDT e do MDS nos cenários: ( $ps/pw$  2;  $\phi$  20;  $C'/z$  0), ( $ps/pw$  2;  $\phi$  20;  $C'/z$  2), ( $ps/pw$  2;  $\phi$  20;  $C'/z$  4).



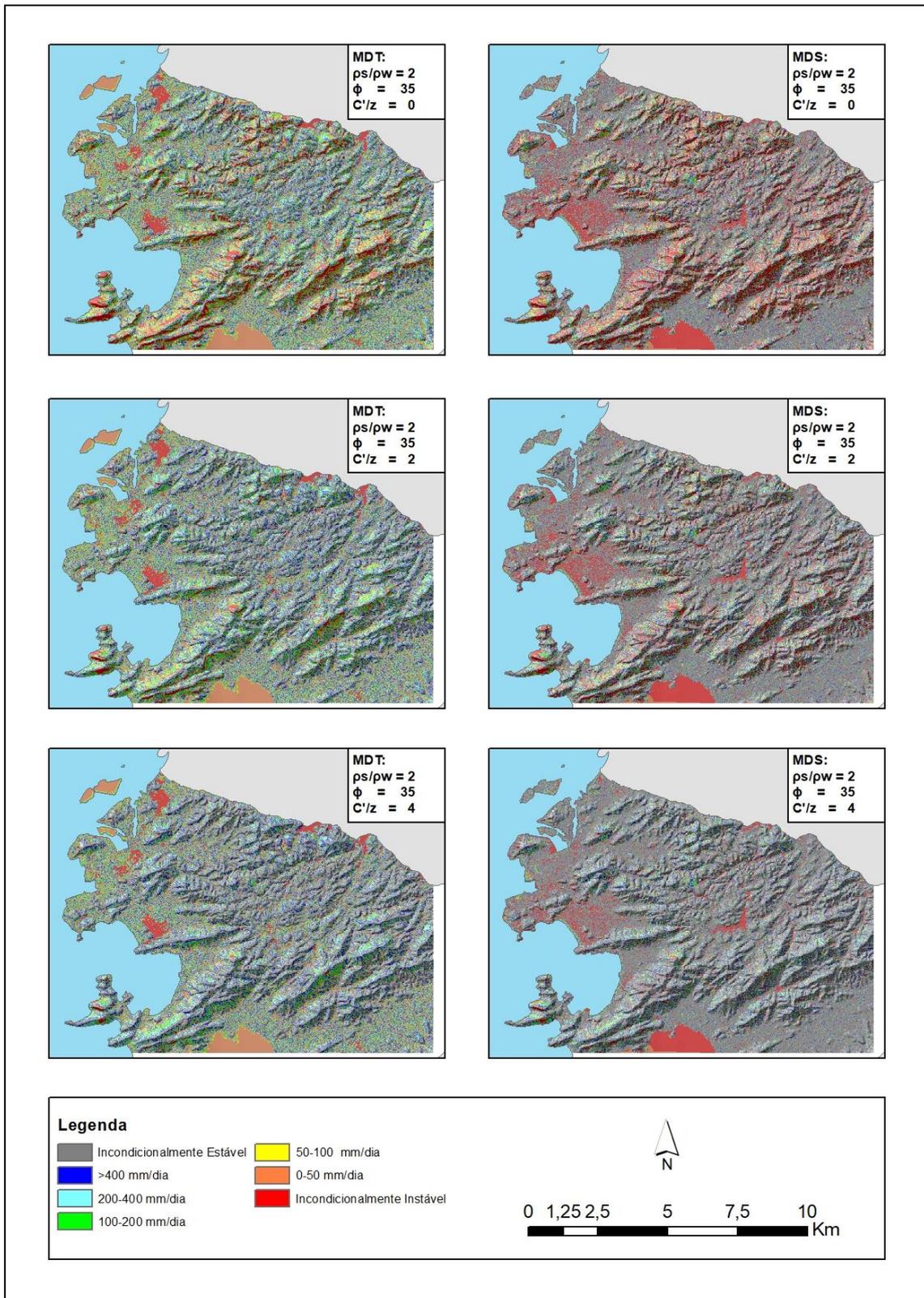
Mapa 10: Modelagem feita a partir do MDT e do MDS nos cenários: ( $\rho_s/\rho_w$  2;  $\phi$  20;  $C'/z$  8), ( $\rho_s/\rho_w$  2;  $\phi$  25;  $C'/z$  0), ( $\rho_s/\rho_w$  2;  $\phi$  25;  $C'/z$  2).



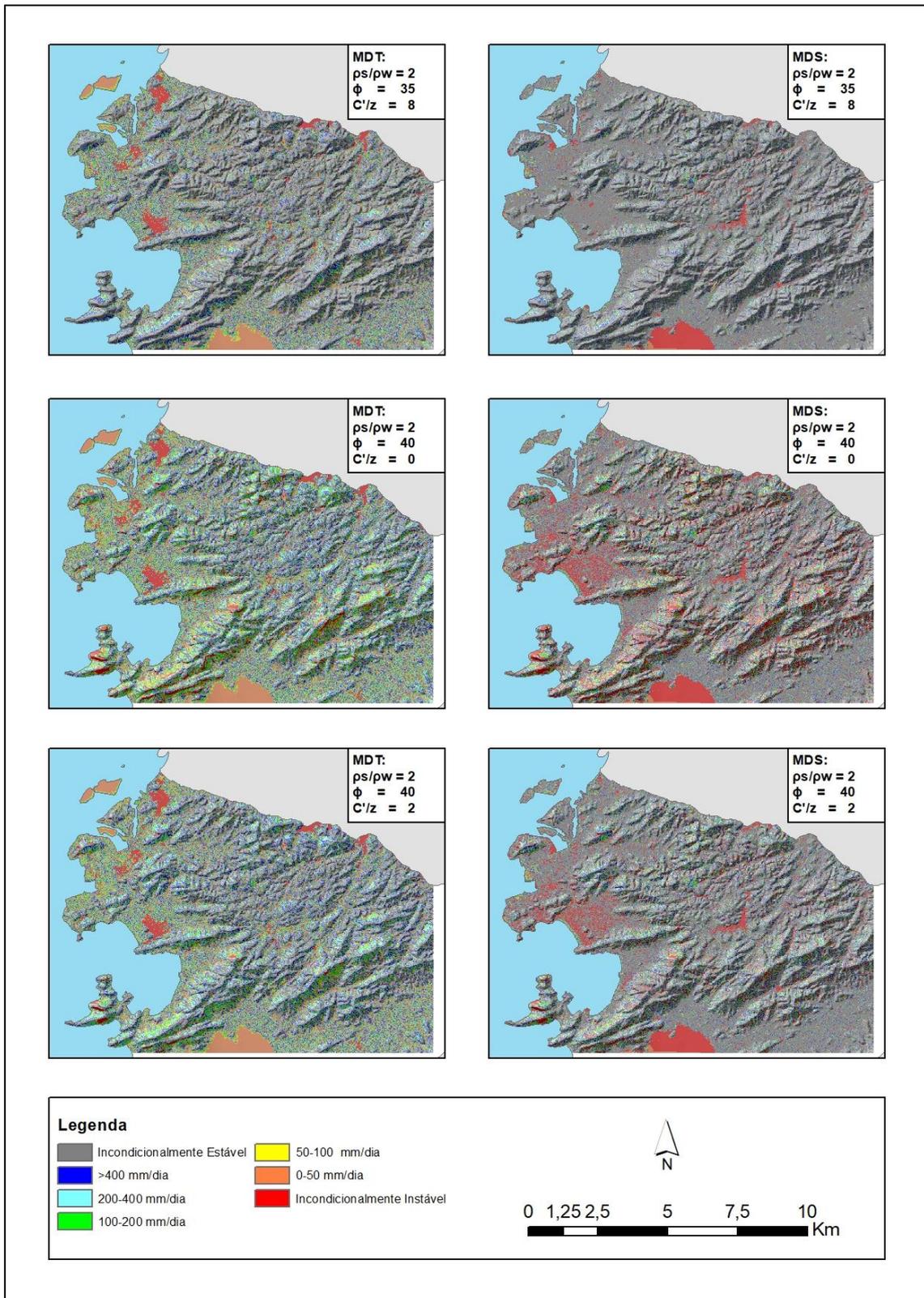
Mapa 11: Modelagem feita a partir do MDT e do MDS nos cenários: ( $\rho_s/\rho_w$  2;  $\phi$  25;  $C'/z$  4), ( $\rho_s/\rho_w$  2;  $\phi$  25;  $C'/z$  8), ( $\rho_s/\rho_w$  2;  $\phi$  30;  $C'/z$  0).



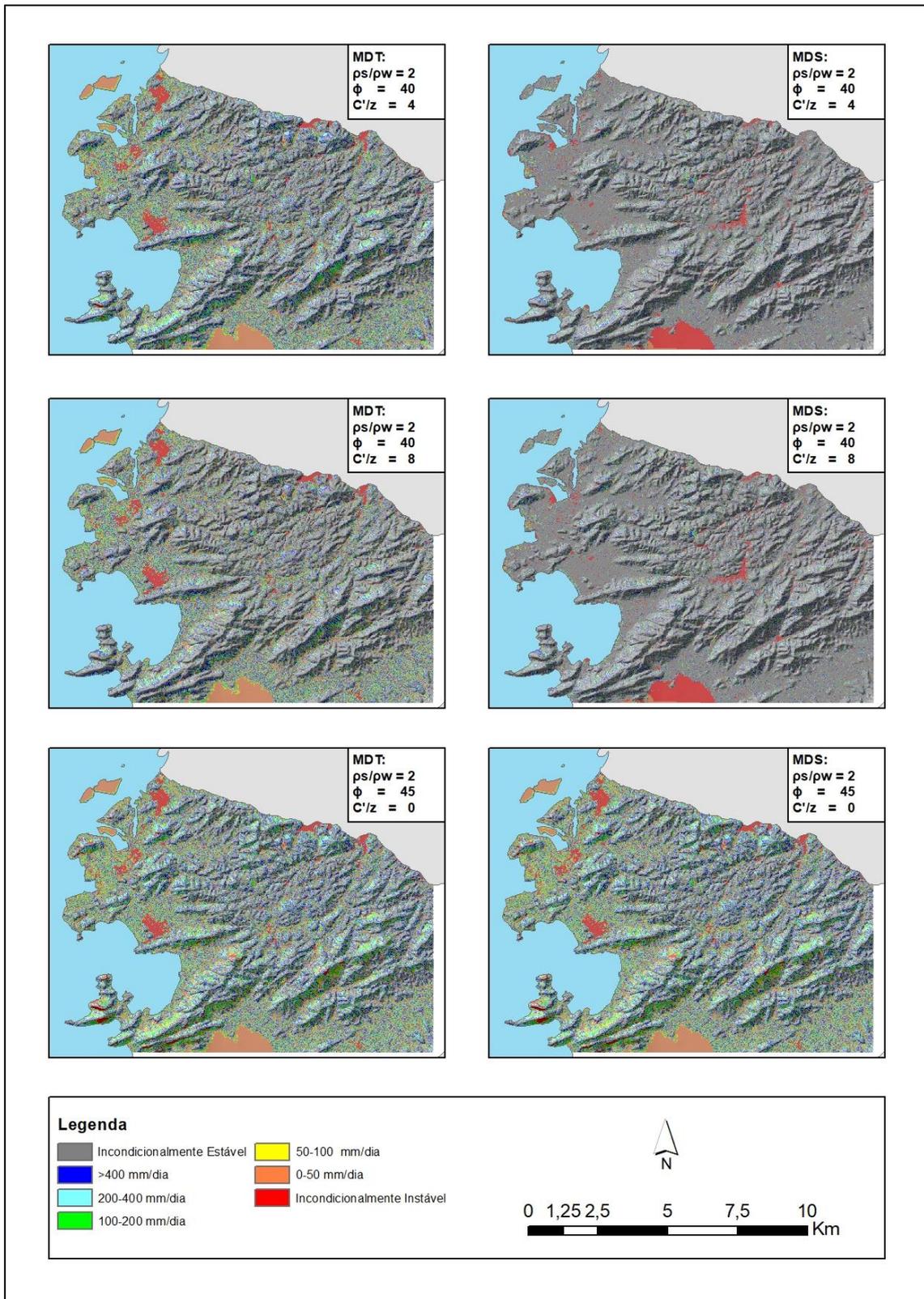
Mapa 12: Modelagem feita a partir do MDT e do MDS nos cenários: ( $ps/pw = 2$ ;  $\phi = 30$ ;  $C'/z = 2$ ), ( $ps/pw = 2$ ;  $\phi = 30$ ;  $C'/z = 4$ ), ( $ps/pw = 2$ ;  $\phi = 30$ ;  $C'/z = 8$ ).



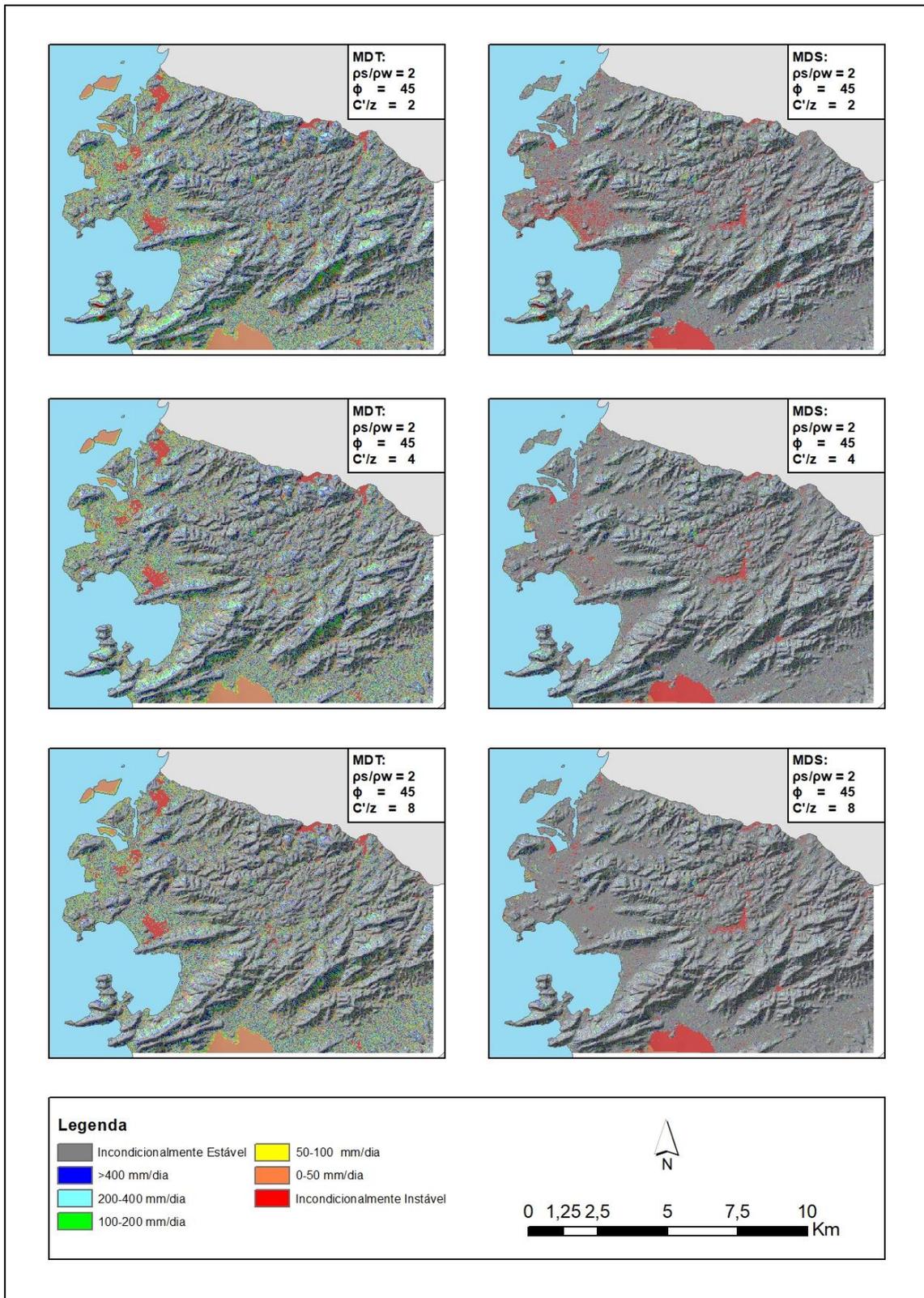
Mapa 13: Modelagem feita a partir do MDT e do MDS nos cenários: ( $ps/pw = 2$ ;  $\phi = 35$ ;  $C'/z = 0$ ), ( $ps/pw = 2$ ;  $\phi = 35$ ;  $C'/z = 2$ ), ( $ps/pw = 2$ ;  $\phi = 35$ ;  $C'/z = 4$ ).



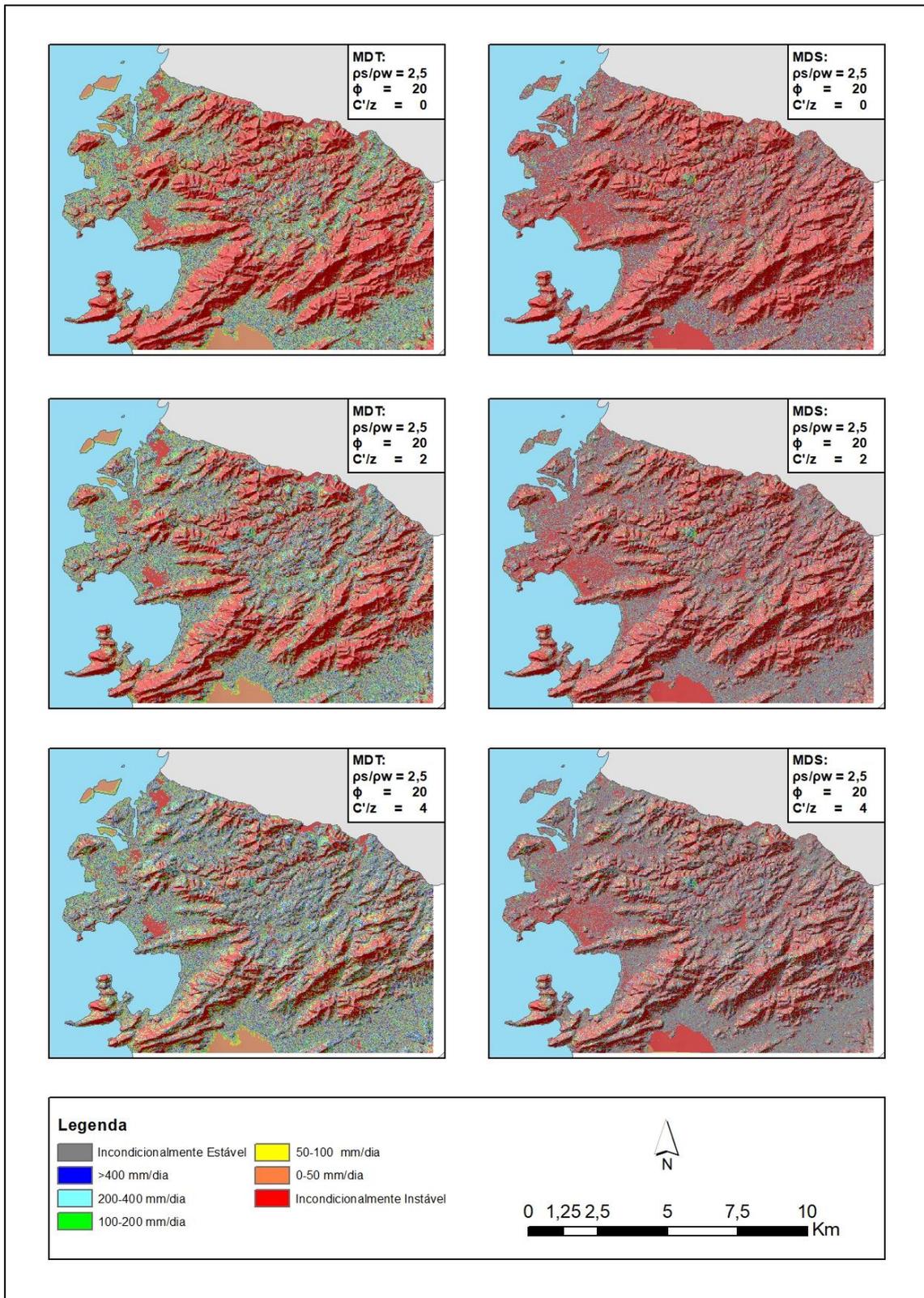
Mapa 14: Modelagem feita a partir do MDT e do MDS nos cenários: ( $ps/pw = 2$ ;  $\phi = 35$ ;  $C'/z = 8$ ), ( $ps/pw = 2$ ;  $\phi = 40$ ;  $C'/z = 0$ ), ( $ps/pw = 2$ ;  $\phi = 40$ ;  $C'/z = 2$ ).



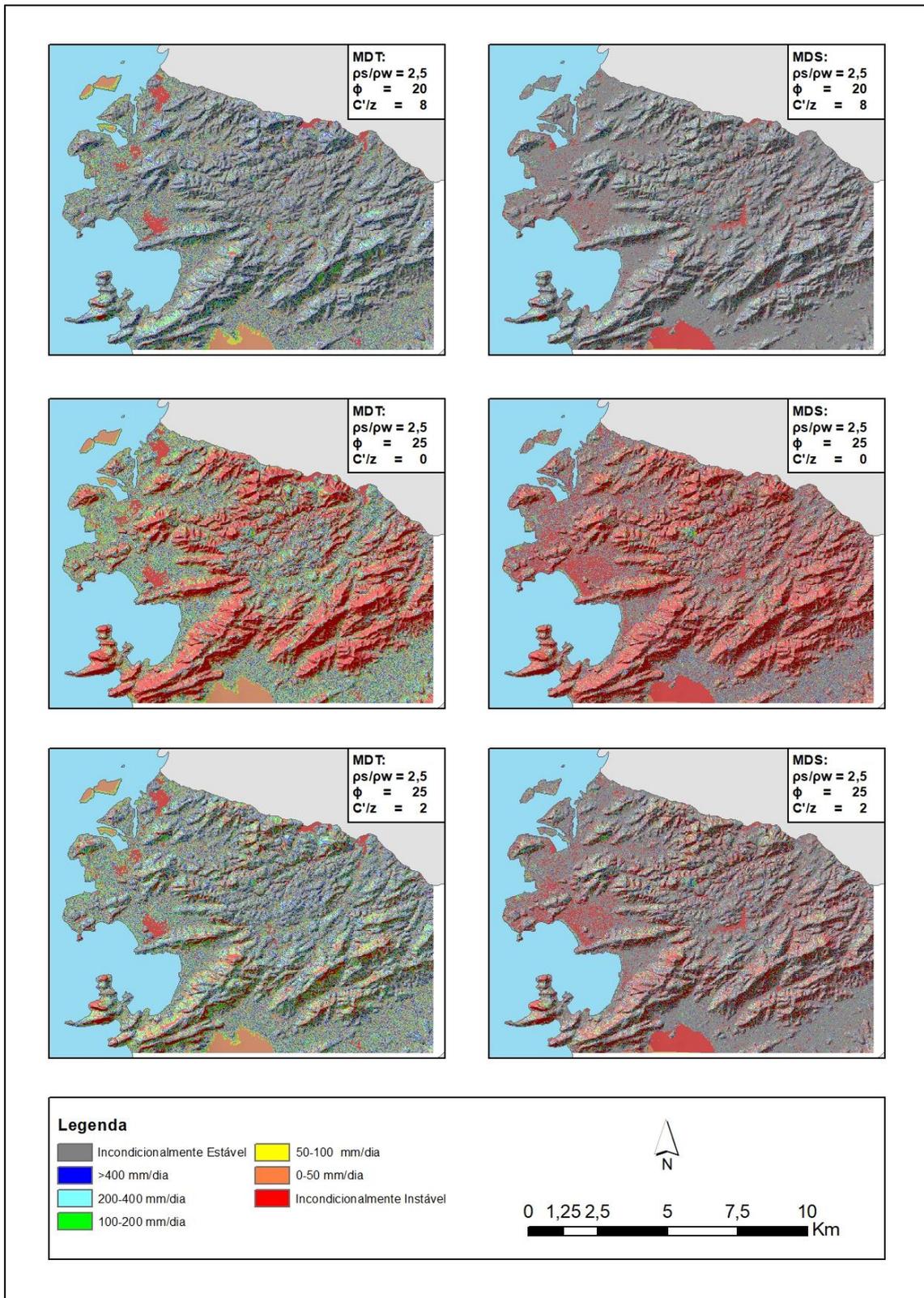
Mapa 15: Modelagem feita a partir do MDT e do MDS nos cenários: ( $ps/pw = 2$ ;  $\phi = 40$ ;  $C'/z = 4$ ), ( $ps/pw = 2$ ;  $\phi = 40$ ;  $C'/z = 8$ ), ( $ps/pw = 2$ ;  $\phi = 45$ ;  $C'/z = 0$ ).



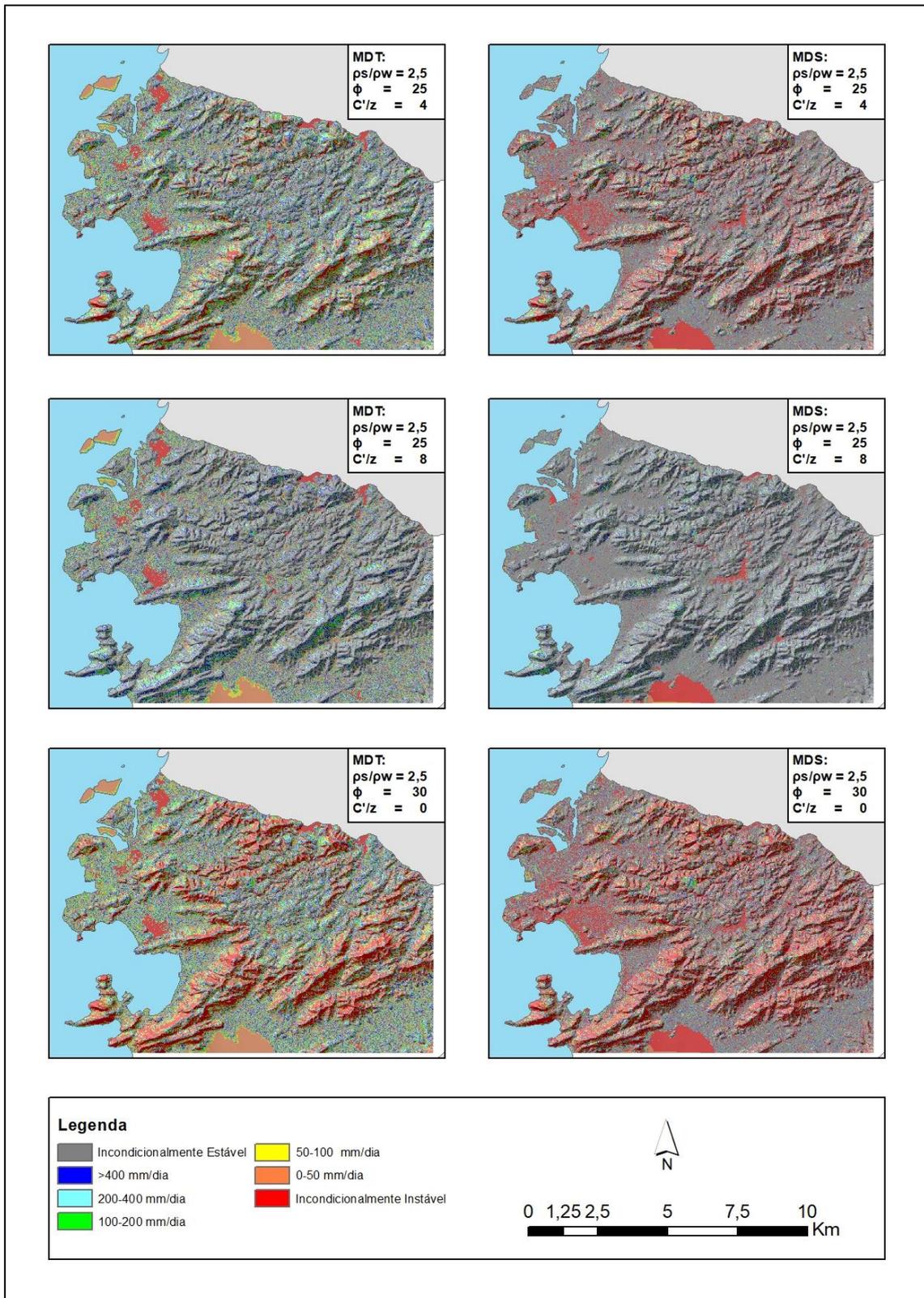
Mapa 16: Modelagem feita a partir do MDT e do MDS nos cenários: ( $ps/pw$  2;  $\phi$  45;  $C'/z$  2), ( $ps/pw$  2;  $\phi$  45;  $C'/z$  4), ( $ps/pw$  2;  $\phi$  45;  $C'/z$  8).



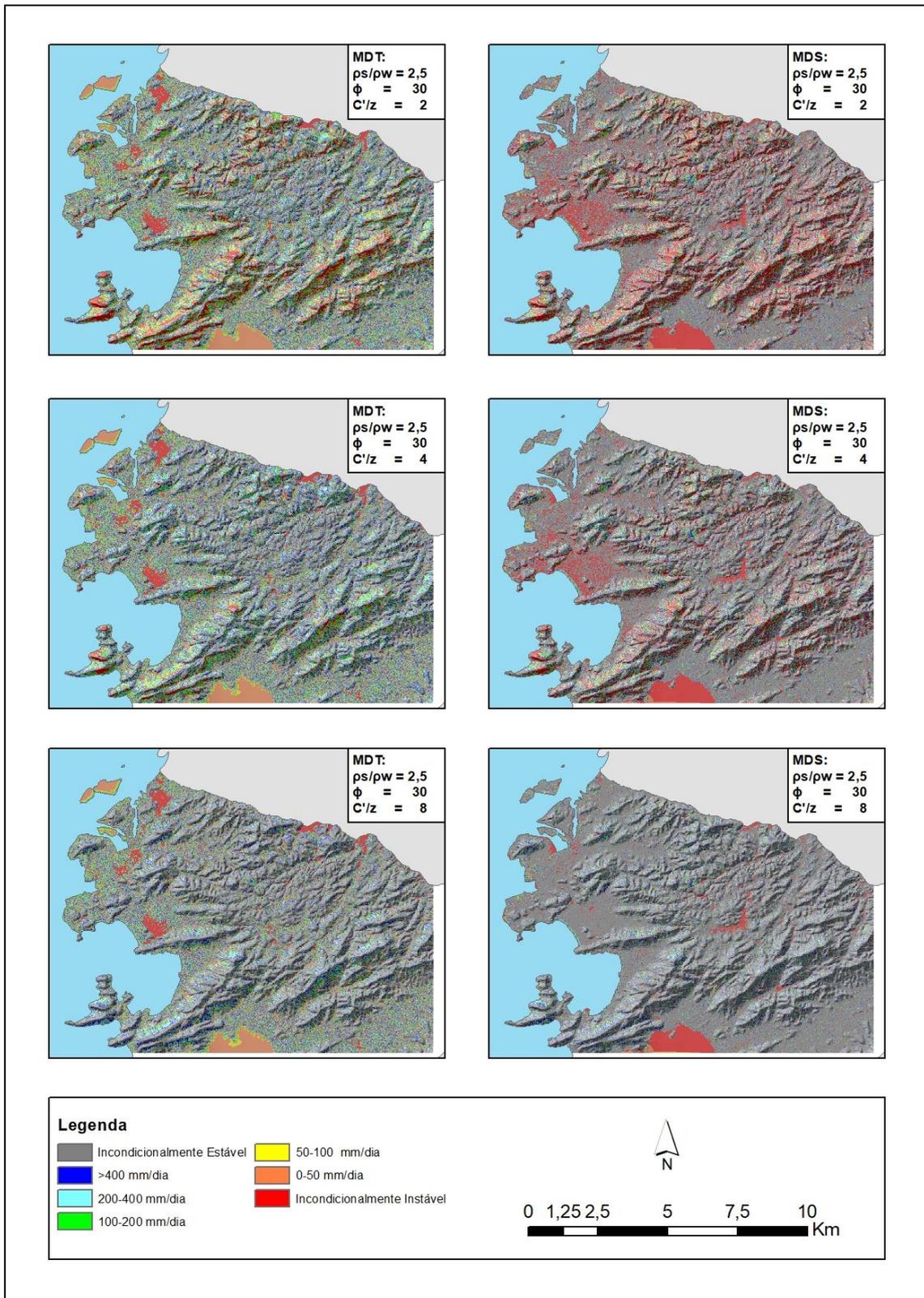
Mapa 17: Modelagem feita a partir do MDT e do MDS nos cenários: ( $ps/pw$  2,5;  $\phi$  20;  $C'/z$  0), ( $ps/pw$  2,5;  $\phi$  20;  $C'/z$  2), ( $ps/pw$  2,5;  $\phi$  20;  $C'/z$  4).



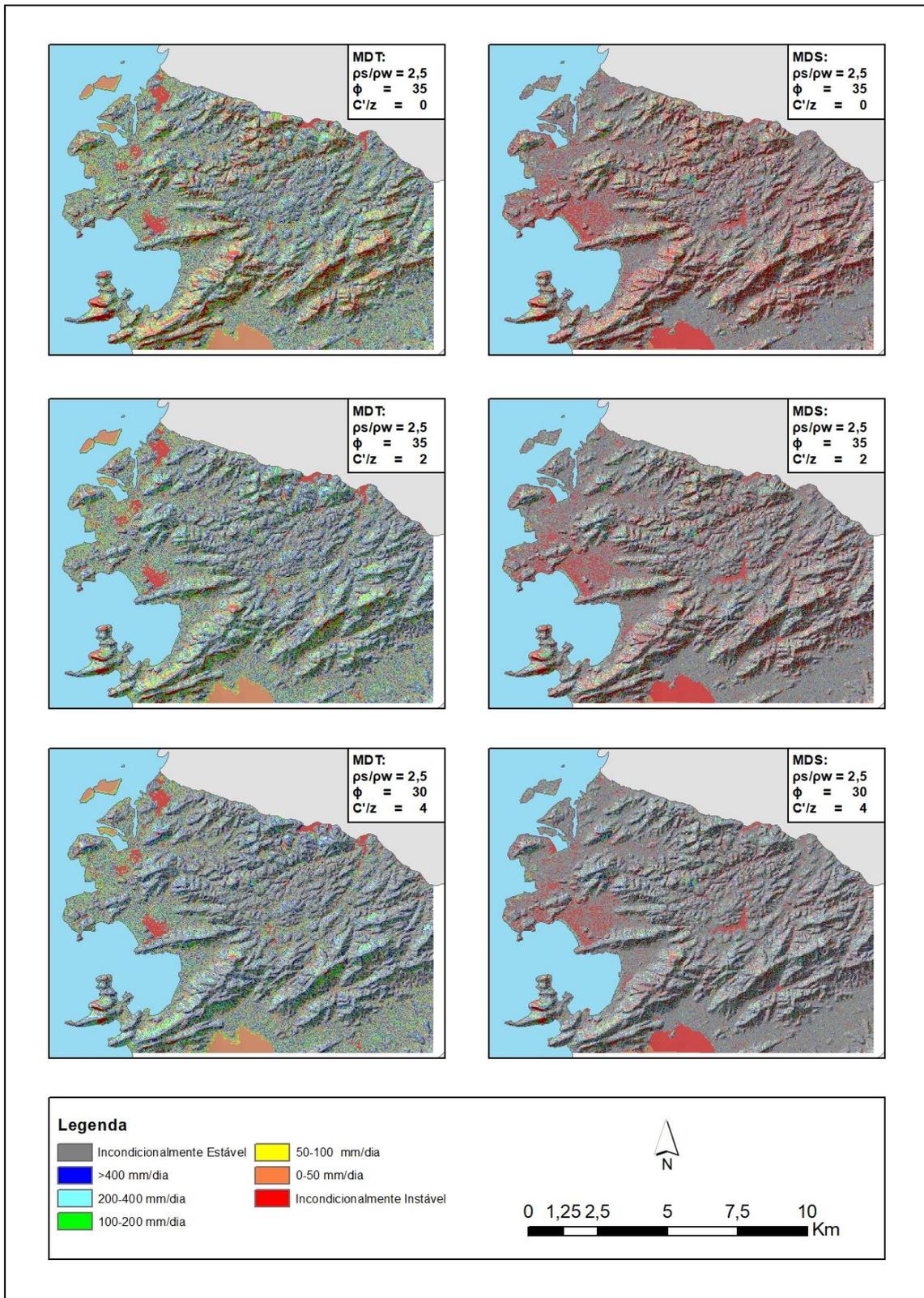
Mapa 18: Modelagem feita a partir do MDT e do MDS nos cenários: ( $\rho_s/\rho_w$  2,5;  $\phi$  20;  $C'/z$  8), ( $\rho_s/\rho_w$  2,5;  $\phi$  25;  $C'/z$  0), ( $\rho_s/\rho_w$  2,5;  $\phi$  25;  $C'/z$  2).



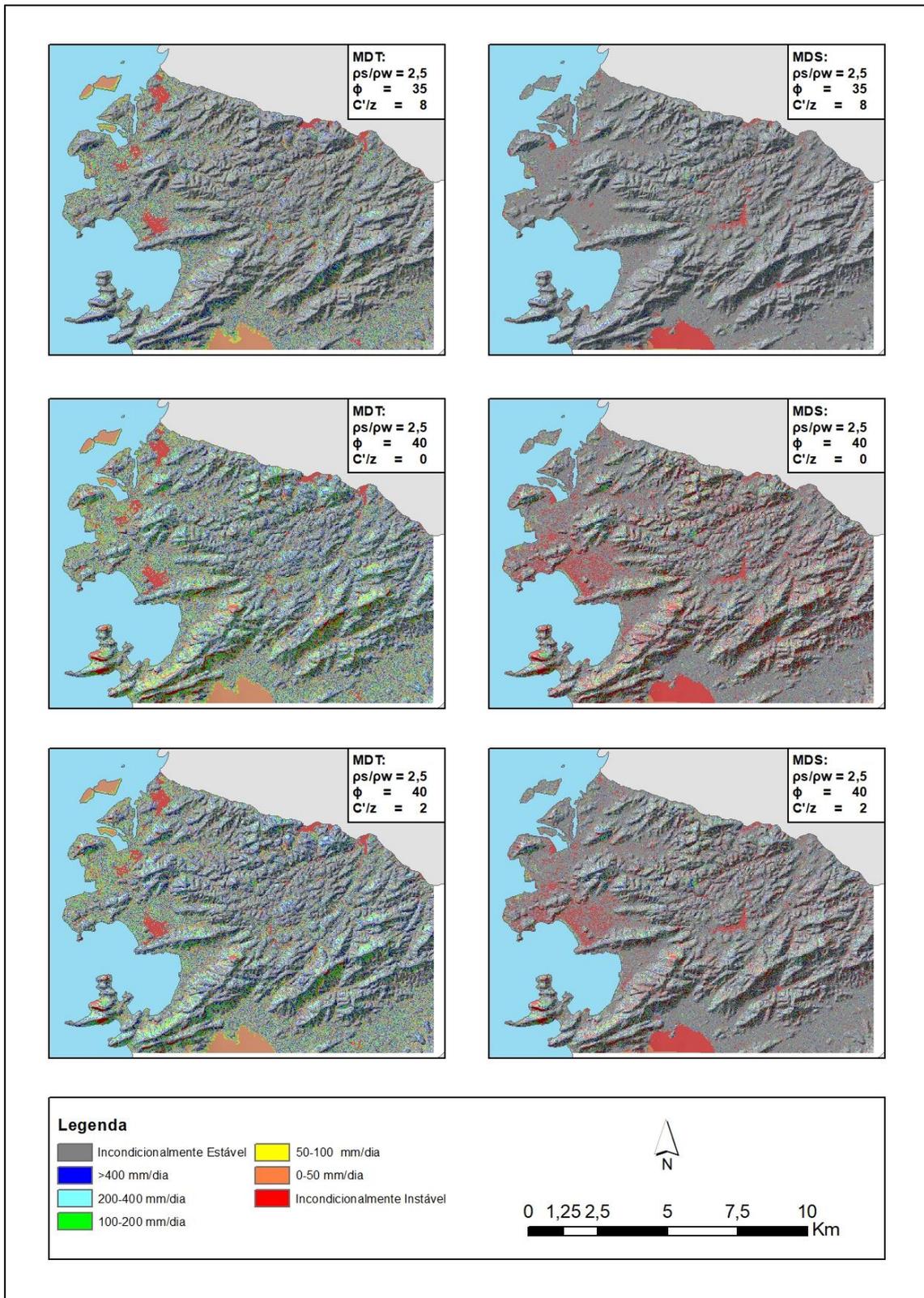
Mapa 19: Modelagem feita a partir do MDT e do MDS nos cenários: ( $\rho_s/\rho_w$  2,5;  $\phi$  25;  $C'/z$  4), ( $\rho_s/\rho_w$  2,5;  $\phi$  25;  $C'/z$  8), ( $\rho_s/\rho_w$  2,5;  $\phi$  30;  $C'/z$  0).



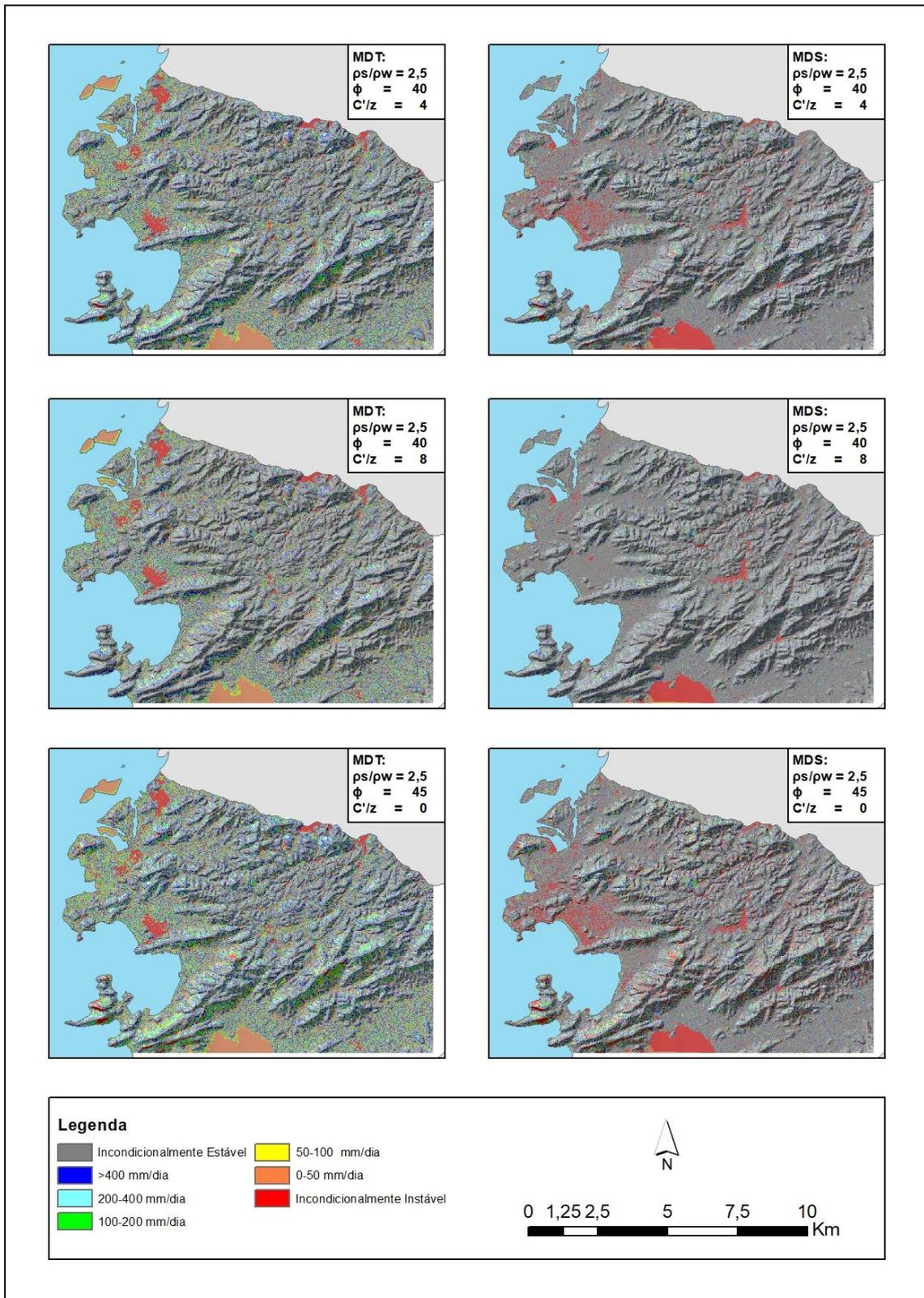
Mapa 20: Modelagem feita a partir do MDT e do MDS nos cenários: ( $\rho_s/\rho_w$  2,5;  $\phi$  30;  $C'/z$  2), ( $\rho_s/\rho_w$  2,5;  $\phi$  30;  $C'/z$  4), ( $\rho_s/\rho_w$  2,5;  $\phi$  30;  $C'/z$  8).



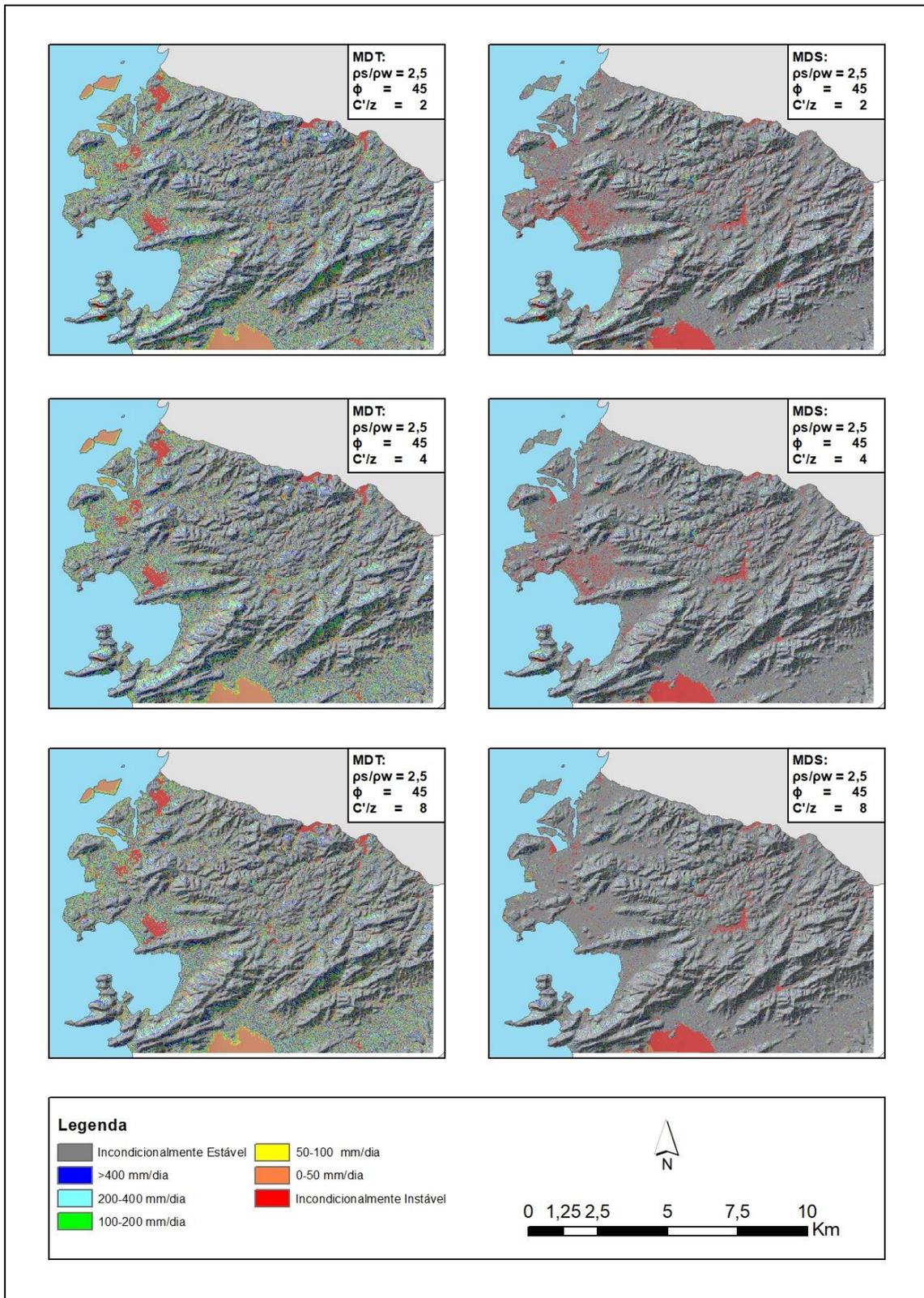
Mapa 21: Modelagem feita a partir do MDT e do MDS nos cenários: ( $\rho_s/\rho_w$  2,5;  $\phi$  35;  $C'/z$  0), ( $\rho_s/\rho_w$  2,5;  $\phi$  35;  $C'/z$  2), ( $\rho_s/\rho_w$  2,5;  $\phi$  30;  $C'/z$  4).



Mapa 22: Modelagem feita a partir do MDT e do MDS nos cenários: ( $\rho_s/\rho_w$  2,5;  $\phi$  35;  $C'/z$  8), ( $\rho_s/\rho_w$  2,5;  $\phi$  40;  $C'/z$  0), ( $\rho_s/\rho_w$  2,5;  $\phi$  40;  $C'/z$  2).



Mapa 23: Modelagem feita a partir do MDT e do MDS nos cenários: ( $\rho_s/\rho_w$  2,5;  $\phi$  40;  $C'/z$  4), ( $\rho_s/\rho_w$  2,5;  $\phi$  40;  $C'/z$  8), ( $\rho_s/\rho_w$  2,5;  $\phi$  45;  $C'/z$  0).



Mapa 24: Modelagem feita a partir do MDT e do MDS nos cenários: ( $\rho_s/\rho_w$  2,5;  $\phi$  44;  $C'/z$  2), ( $\rho_s/\rho_w$  2,5;  $\phi$  45;  $C'/z$  4), ( $\rho_s/\rho_w$  2,5;  $\phi$  45;  $C'/z$  8).