

A VULNERABILIDADE A ESCORREGAMENTOS DE TERRA DA BACIA DO RIO BENGALAS - NOVA FRIBURGO - BRASIL SOB AS PROJEÇÕES DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS DO ETA-HADGEM-ES RCP 4.5

The Vulnerability to Landslides in the Basin of the Bengalas River - Nova Friburgo - Brazil Regarding the Climate Change Projection of the Eta-HadGEM-ES RCP 4.5

Luiz Tadeu da Silva¹, Daniel Andres Rodriguez¹, José Marcio da Silva Britto², José Lázaro de Siqueira Júnior¹, Elsa Paula Figueira Ferreira Morgado de Sampaio³, João Alexandre Medina Corte-Real³ & Pedro Ivo Mioni Camarinha¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE

Centro de Ciência do Sistema Terrestre - CCST

Rodovia Presidente Dutra, km. 40, CEP: 12.630-000, Cachoeira Paulista, SP, Brasil
{luiz.tadeu, daniel.andres, pedro.camarinha}@inpe.br, joselazarosiqueira@gmail.com

²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE

Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos - CPTEC / Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais - DSA

Rodovia Presidente Dutra, km. 40, CEP: 12630-000, Cachoeira Paulista, SP, Brasil
marcio.britto@cptec.inpe.br

³Universidade de Évora – UNEV

Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais Mediterrânicas - ICAAM

Largo dos Colegiais 2, 7004-516, Évora, Portugal
{sem, jmcr}@uevora.pt

Recebido em 29 de Outubro, 2015/Aceito em 22 de Agosto, 2016

Received on October 29, 2015/Accepted on August 22, 2016

RESUMO

O documento final da Conferência Mundial para a Redução de Desastres ocorrida em Kobe - Japão, no ano de 2005, chama a atenção para a necessidade de desenvolver sistemas de indicadores de risco e vulnerabilidade a níveis nacional e subnacional como forma de permitir aos tomadores de decisão um melhor diagnóstico das situações de risco e vulnerabilidade. Áreas urbanas em sua expansão avançam para áreas geologicamente instáveis e topograficamente inclinadas, como é o caso da Bacia do Rio Bengalas, localizada no Município de Nova Friburgo, Brasil. Em janeiro de 2011, com a ocorrência de fortes chuvas na Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro, foram registrados 183 escorregamentos de terra somente na Bacia do Rio Bengalas, causando perdas humanas, econômicas e ambientais. Sob o efeito das mudanças climáticas são esperadas mudanças na frequência e magnitude dos eventos de precipitação extrema que afetam a vulnerabilidade a desastres e podem se tornar preocupantes à condição de vida das populações que vivem principalmente em áreas de riscos a escorregamentos de terra. Neste contexto, este trabalho tem por objetivo estudar a vulnerabilidade a escorregamentos de terra da Bacia do Rio Bengalas para o período de 01/01/2016 a

30/12/2040, utilizando índices de vulnerabilidade a escorregamentos de terra que se mostraram eficazes na prevenção, monitoramento e previsão a estes tipos de desastres. Os índices indicam apenas a ocorrência de um evento de vulnerabilidade escorregamentos na Bacia, associado com a ocorrência de um evento de alta intensidade de precipitação. Este resultado está de acordo com a diminuição das precipitações médias e extremas na região associadas com as projeções Eta-HadGEM-ES RCP 4.5 e relatadas na literatura científica.

Palavras Chave: Desastres Naturais, Deslizamentos de Terra, Eta-HadGEM-ES RCP 4.5, Alterações Climáticas, Nova Friburgo, Vulnerabilidade.

ABSTRACT

The final document of the World Conference for the Reduction of Disasters held in Kobe - Japan, in the year of 2005, calls the attention to the necessity on developing national and subnational risk and vulnerability indicators systems as a way to allow the decision makers, better diagnosis of risk and vulnerability situations. Urban areas in its expansion go to geologically unstable and topographically inclined areas, such as the case of the Basin of the Bengalas River, located in the city of Nova Friburgo, Brazil. In January of 2011, with the occurrence of storms in the Mountain Region of State of Rio de Janeiro, it was recorded 183 landslides only in the Basin of Bengalas River, causing human, economic and environmental losses. Under the effect of the climate changes are expected changes in the frequency and magnitude of the extreme precipitation events that affect the vulnerability to landslides and can become a warning to the lives of the population who live mainly in the risky areas. In this context, this paper has as a goal the study of vulnerability to landslides in the Basin of Bengalas River for the period of 01/01/2016 to 12/30/2040, using vulnerability to landslides indexes that presented to be efficient in the prevention, monitoring, and forecast to these kind of disasters. The indexes only indicates the occurrence of one event of vulnerability to landslides in the Basin, associated with the occurrence of one event of high intensity of precipitation. This result it is according to the decrease of the medium and extreme precipitations in the related regions with the Eta-HadGEM-ES RCP 4.5 projections and reported in the scientific literature.

Keywords: Natural Disasters, Landslides, Eta-HadGEM-ES RCP 4.5, Climate Changes, Nova Friburgo, Vulnerability.

1. INTRODUÇÃO

Ano após ano os desastres naturais resultam em um grande número de mortos e feridos, além das onerosas perdas econômicas. A literatura indica um incremento na frequência e na intensidade dos desastres naturais (DILLEY *et al.*, 2005; BRAUCH, 2005; CARDONA, 2005), como também para a conscientização e engajamento da comunidade internacional em torno do problema.

Segundo relatório do UNDP (2004), 75% da população mundial habita em áreas que foram afetadas por pelo menos uma vez por ciclones, enchentes, secas ou terremotos entre os anos de 1980 e 2000, ocasionando inúmeras mortes, impactos na agricultura, nos recursos hídricos, na saúde, na economia etc. (BRAGA *et al.*, 2006).

De acordo com o documento do Núcleo de Assuntos Estratégicos da Presidência da República do Brasil (NAE), a base das projeções de desastres naturais para as próximas décadas encontra-se na mudança do clima que se tem se manifestado ultimamente. Este mesmo documento revela que os países em desenvolvimento como o Brasil encontram-se mais vulneráveis à mudança

do clima, em função de terem historicamente uma menor capacidade de responder à sua variabilidade natural (NAE, 2005).

Segundo Kobiyama *et al.* (2006), nas últimas décadas o número de registros de desastres naturais em várias partes do mundo vêm aumentando consideravelmente. Isto se deve, principalmente, ao aumento da população, à ocupação desordenada do solo e ao intenso processo de urbanização e industrialização. Dentre os principais fatores que contribuem para desencadear estes desastres nas áreas urbanas destacam-se a impermeabilização do solo, o adensamento das construções, a conservação de calor e a poluição do ar, enquanto que nas áreas rurais, destaca-se a compactação dos solos, o assoreamento dos rios, os desmatamentos e as queimadas.

No Brasil, os desastres naturais são em sua maioria de origem atmosférica (BARBIERI *et al.*, 2009).

A precipitação, tanto em excesso como na escassez, é o principal responsável pelos impactos à sociedade, atingindo diversos setores socioeconômicos. Entre as consequências mais drásticas das chuvas intensas estão os

escorregamentos de terra e as inundações, agravadas em determinadas situações por outros fenômenos como ventos fortes e granizo (TEIXEIRA & SATYAMURTY, 2004).

Dos desastres naturais ocorridos no Brasil, os escorregamentos têm sido responsáveis por maior número de vítimas fatais e por importantes prejuízos materiais, com destaque para aqueles ocorridos no ano de 1967 na Serra das Araras (Estado do Rio de Janeiro) e em Caraguatatuba (Estado de São Paulo), resultando na morte de 1.320 pessoas e na destruição de centenas de edificações (AUGUSTO FILHO, 1994) apud (TOMINAGA *et al.*, 2009).

Segundo o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT, 2009), 3.287 pessoas morreram no Brasil por escorregamentos, entre os anos de 1988 e 2012 conforme se observa na Figura 1.

Nota-se na Figura 1 que o número de mortes saltou de 239 no ano de 2010 para 975 no ano de 2011. É importante lembrar que das 975 mortes ocorridas em 2011 por escorregamentos de terra no Brasil, 918 (94%) delas aconteceram na Região Serrana do Rio de Janeiro. Somente em Nova Friburgo, um dos Municípios que também faz parte da Região Serrana do Rio Janeiro, foram

registadas 429 mortes, o que representa 47% do total de óbitos da Região (SILVA *et al.*, 2015).

Para tanto, há uma crescente importância em desenvolver análises e métodos que busquem operacionalizar diferentes dimensões de vulnerabilidade no contexto de mudanças climáticas, considerando as diferentes escalas de ocorrência dos fenômenos, que incluem agregações de dados que interagem de múltiplas maneiras e em distintas situações.

Há uma crescente importância em desenvolver análises e métodos que busquem operacionalizar diferentes dimensões de vulnerabilidade no contexto de mudanças climáticas, considerando as diferentes escalas de ocorrência dos fenômenos, que incluem agregações de dados que interagem de múltiplas maneiras e em distintas situações. Para isso, tem sido cada vez mais evidente uma abordagem interdisciplinar (MELLO *et al.*, 2010), que pode ser construída através de um indicador que deve ser prático o suficiente para se adaptar às necessidades locais e limitações das várias partes que os empregam, mas robusto o suficiente para manter uma entidade comum entre as partes (STAR & GRIESEMER, 1989).

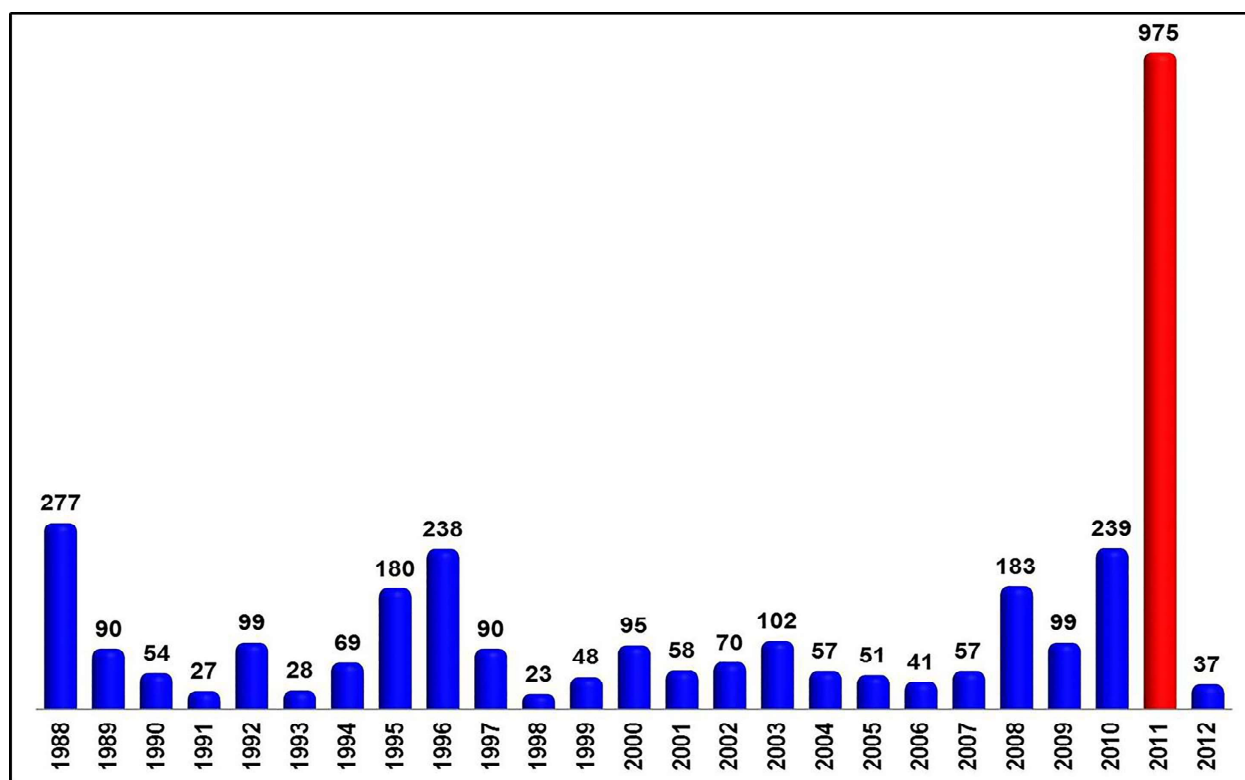


Fig. 1 - Distribuição anual do número de mortes por escorregamentos no Brasil.
Fonte: IPT (2009), adaptada por Silva *et al.* (2015).

No contexto das mudanças climáticas e na intensificação da trajetória de urbanização brasileira é extremamente importante aprimorar e criar novas ferramentas que permitam avaliações detalhadas dos seus impactos no Brasil. Estas ferramentas são importantes para prover bases científicas para tomadas de decisões sobre regiões vulneráveis e processos críticos da segurança social, econômica e da conservação ambiental.

O objetivo deste artigo é estudar a vulnerabilidade a escorregamentos de terra da Bacia do Rio Bengalas, município de Nova Friburgo - Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro - Brasil, para o período de 01/01/2016 a 30/12/2040, utilizando índices de vulnerabilidade a escorregamentos de terra que se mostraram eficazes na prevenção, monitoramento e previsão a estes tipos de desastres, utilizando as projeções climáticas Eta-HadGEM-ES RCP 4.5 (CHOU *et al.*, 2014).

2. SUSCETIBILIDADE

Para um ordenamento do território eficaz e uma gestão equilibrada do risco, é necessário conhecer a instabilidade geomorfológica presente e passada e a predisposição do território para a ocorrência de movimentos (ZÊZERE, 2007). Este conhecimento implica a avaliação da suscetibilidade, entendida por Soeters e Van Westen (1996) como a propensão do território para a ocorrência de um tipo particular de movimento de terra, com base em um conjunto de fatores de predisposição à instabilidade geomorfológica.

Conforme Varnes (1984) e Carrara *et al.* (1999) os futuros movimentos de terra deverão ocorrer sob as mesmas condições que determinaram a instabilidade no passado. Esta relação origina do princípio do uniformitarismo, ou seja, “o passado e o presente são as chaves para o futuro”, pressupondo as mesmas causas são suscetíveis de gerar os mesmos efeitos (VARNES, 1984; VAN WESTEN *et al.*, 2008; BATES & JACKSON, 1980). A avaliação da suscetibilidade é dominada pelo recurso a métodos de cartografia indireta, de onde se destacam aqueles de base estatística (GUZZETTI *et al.*, 2000; CHACÓN *et al.*, 2006).

Com a utilização destes métodos, a ponderação dos fatores (neste artigo são

as variáveis ambientais) que condicionam a instabilidade é obtida por meio da sua representação cartográfica e da análise das suas relações espaciais com a distribuição dos movimentos de terra ocorridos. Segundo Silva *et al.* (2015) a suscetibilidade a escorregamentos de terra é entendida como sendo a disposição, a tendência ou a sensibilidade que uma determinada área geográfica tem em sofrer este tipo de desastre. Para que a suscetibilidade a escorregamentos de terra de qualquer área seja medida, são necessárias análises detalhadas de variáveis ambientais, como a declividade, a pedologia, a litologia, o uso e cobertura do solo, a curvatura vertical e a curvatura horizontal. Ainda, de acordo com Silva *et al.* (2015) o mapeamento da suscetibilidade é o primeiro passo na abordagem para a efetiva redução de áreas suscetíveis a escorregamentos de terra, minimizando assim as consequências negativas desses eventos na sociedade.

3. VULNERABILIDADE

Baseado em Varnes (1984), Einstein (1988) e UN-ISDR (2004) vulnerabilidade é um conjunto de processos e condições resultantes de fatores físicos, sociais, econômicos e ambientais, o qual aumenta a suscetibilidade de uma comunidade (elemento em risco) ao impacto dos perigos. A vulnerabilidade compreende tanto aspectos físicos (resistência de construções e proteções da infraestrutura) como fatores humanos, tais como, econômicos, sociais, políticos, técnicos, culturais, educacionais e institucionais. Segundo Kztzman *et al.* (1999) o termo vulnerabilidade nos últimos anos tem sido utilizado com certa frequência por grupos acadêmicos e entidades governamentais da América Latina. A noção de vulnerabilidade, ao considerar a insegurança e a exposição a riscos e perturbações provocadas por eventos ou mudanças econômicas, daria uma visão mais ampla sobre as condições de vida dos grupos sociais mais pobres e, ao mesmo tempo, consideraria a disponibilidade de recursos e estratégias das próprias famílias para enfrentarem os impactos que as afetam.

Outra linha de análise sobre vulnerabilidade tem origem nos estudos sobre desastres naturais (natural hazards) e avaliação de risco (risk assessment). Nesta perspectiva, a vulnerabilidade pode ser vista como a interação entre o risco

existente em um determinado lugar (hazard of place) e as características e o grau de exposição da população lá residente (CUTTER & FINCH, 2008).

A vulnerabilidade também se tem tornado, nos últimos anos, um foco central para as comunidades científicas de mudanças ambientais globais (IPCC, IGBP, IHDP) e uma categoria analítica importante para instituições internacionais, como algumas agências das Nações Unidas (PNUD, PNUMA e FAO) e o Banco Mundial (KASPERSON & KASPERSON, 2001).

Para as áreas urbanas, segundo o Fundo de População das Nações Unidas - UNFPA, o principal aumento do risco que irá advir das mudanças climáticas será o aumento no número e intensidade de eventos extremos, tais como tempestades, secas, ciclones e furacões. As consequências das mudanças climáticas para as áreas urbanas dependerão de diversos fatores, incluindo a vulnerabilidade e a resiliência das populações. Os impactos das mudanças ambientais globais, particularmente os riscos relacionados ao clima, afetam desproporcionalmente as populações pobres e vulneráveis, moradores de favelas e de invasões nas encostas, em áreas mal drenadas ou baixadas litorâneas. Portanto, as situações de vulnerabilidade às mudanças climáticas, principalmente devido ao aumento da intensidade e frequência dos eventos climáticos extremos, poderão se tornar muito graves, especialmente para os grupos populacionais de baixa renda (UNFPA, 2007).

De acordo com o Coastal Services Center (CSC) da National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, 1999), a vulnerabilidade é definida como sendo a “susceptibilidade de um meio ao impacto negativo com relação a um determinado risco”. Para a Agência os estudos da frequência de desastres, riscos e probabilidades têm sido componentes importantes para a análise da vulnerabilidade, e esta constitui uma informação necessária para priorizar as ações de mitigação aos fenômenos naturais destrutivos.

No contexto de uma agenda brasileira de estudos sobre população e mudança climática, é fundamental que haja um esforço para o desenvolvimento de metodologias e indicadores para a identificação e caracterização das áreas de maiores riscos e mais vulneráveis às mudanças

climáticas nas áreas urbanas. A vulnerabilidade a escorregamentos de terra é entendida como sendo a condição de risco que uma determinada área geográfica tem em sofrer tais desastres, a partir de expressiva ocorrência de precipitação de chuvas nesta área (SILVA *et al.*, 2015).

4. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo é a Bacia Hidrográfica do Rio Bengalas que se encontra no Município de Nova Friburgo, Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro, Brasil (Figura 2), com uma área de 191 km². A sede do município de Nova Friburgo está localizada a 22° 16' 55" (S) e a 42° 31' 52" (W), distante a 136 km da capital do Estado do Rio de Janeiro (GRISEL & ASSIS, 2015).

Ainda, a sede do município de Nova Friburgo está a uma altitude de 856,6 metros em relação ao nível do mar, cercada por montanhas, possui um clima tropical de altitude, com invernos frios e secos e verões amenos e úmidos. Segundo as normais climatológicas para o período 1961-1990 do município de Nova Friburgo, publicadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2009), a temperatura média anual foi de 18°C e a precipitação acumulada anual foi de 1.279,8 mm. O Município está localizado na chamada zona intertropical e sofre a atuação de diferentes massas de ar, que têm suas características determinadas pela região de sua gênese (COMPERJ, 2011), como: Massa de ar Equatorial Continental: atua no verão, provocando tempo quente e chuvoso; Massa de ar Tropical Continental: atua no verão, na primavera e no outono, ocasionando dias muito ensolarados com uma amplitude térmica diária alta e baixa humidade do ar; Massa de ar Polar Atlântica: mais frequente no inverno, também atua no outono e na primavera provocando dias frios. O ponto de contato desta massa com outra massa de ar mais quente, origina as frentes frias que provocam dias com ventos frios, redução da temperatura e chuvas fracas e demoradas; e Massa de ar Tropical Atlântica: atua em qualquer época do ano e provoca precipitações leves.

O relevo do Município de Nova Friburgo é montanhoso e faz parte da unidade Serra dos Órgãos e na região observam-se três tipos predominantes de formas de relevo: colinas dissecadas, escarpas serranas e domínio montanhoso que é responsável por uma alta

densidade de canais de drenagem, a qual, somada a altos índices de precipitação, propicia a existência de um grande número de riachos, córregos e rios (COMPERJ, 2011), porém,

segundo Silva *et al.* (2015), com a descida de grande volume de terra das encostas em janeiro de 2011, o relevo das montanhas sofreu modificações, transformando a paisagem local.

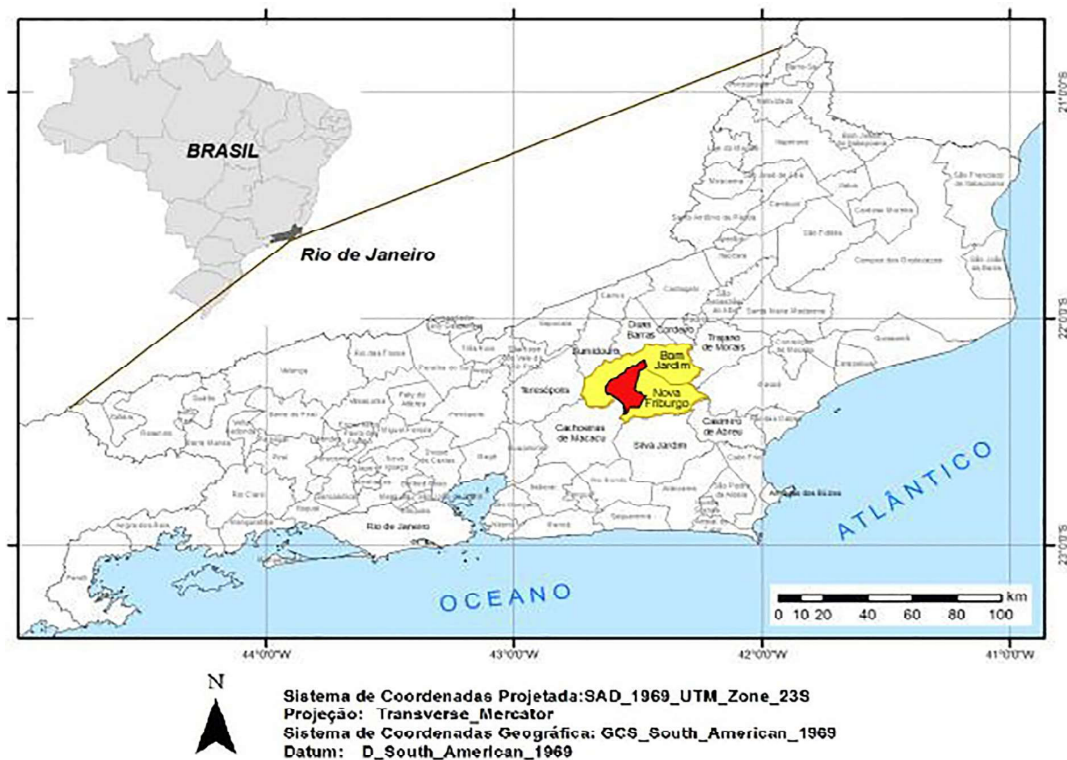


Fig. 2 - Localização da Bacia do Rio Bengalas. Fonte: Adaptada por Silva *et al.* (2015).

A Bacia do Rio Bengalas tem uma área de 70,52 km² (36,85%) que apresenta declividade que varia de 30 a 47%, e outra área de 55,20 km² (28,85%) com declividade > 47%. Respectivamente, consideradas neste trabalho, como sendo áreas de “alta declividade” e de “muito alta declividade”. Juntas somam 125,72 km², o que equivale a 65,70% do total da área (SILVA *et al.*, 2015). Os solos que predominam na Bacia do Rio Bengalas são, em ordem alfabética, os Argissolos (0,43%), Cambissolos (45,35%), Latossolos (30,3%), Neossolos (2,32%) e Afloramentos Rochosos (16,6%).

A litologia da Bacia conforme estudos de Silva *et al.* (2015), é composta por grupos de Rochas Ígneas, Rochas Metamórficas e Rochas Sedimentares.

5. METODOLOGIA

Para calcular a vulnerabilidade a escorregamentos de terra, inicialmente é necessário avaliar a suscetibilidade da Bacia do Rio Bengalas a estes desastres.

Portanto, os processos metodológicos realizados para a execução deste trabalho foram:

- ✓ Levantamento “in loco” e georreferenciamento dos pontos de escorregamentos de terra que desencadearam os desastres ocorridos na Bacia Hidrográfica do Rio Bengalas, no Município de Nova Friburgo, em janeiro de 2011;
- ✓ Compreender como os elementos naturais e antrópicos da área de estudo estão relacionados com a dinâmica local dos desastres, no que diz respeito às suas interferências na indução dos escorregamentos de terra;
- ✓ Compilação dos dados georreferenciados da área de estudo e tratá-los por meio de Sistema de Informação Geográfica (SIG), para que as informações espaciais representem da melhor forma possível a sua suscetibilidade a escorregamentos de terra; e
- ✓ Desenvolver metodologia, calcular e analisar o grupo de indicadores de suscetibilidade “físico-ambiental” da área de estudo, baseados nas características das variáveis ambientais “declividade, pedologia, litologia, uso e

cobertura do solo, curvatura vertical e curvatura horizontal”.

Para cada variável ambiental “declividade, pedologia, litologia, uso e cobertura do solo, curvatura vertical e curvatura horizontal” foram adotados pesos de acordo com suas classes, podendo variar de 0,00 a 1,00, sendo que aqueles mais próximos de 0,00 indicam classes de baixa relação com a suscetibilidade a escorregamentos de terra, enquanto que àqueles mais próximos de 1,00 indicam classes de elevada relação.

Ressalta-se que a interação dos planos de informações destas variáveis ambientais está fundamentada com os princípios da ecodinâmica, que estabelece uma gradação entre a morfogênese, prevalecendo os processos erosivos modificadores das formas de relevo, e a pedogênese, onde os processos formadores de solos prevalecem.

Silva *et al.* (2015) adaptaram os critérios de observação e análise das variáveis ambientais da Bacia do Rio Bengalas segundo a linha de Tagliani (2002), sendo que a declividade teve como referência o ângulo do terreno; a pedologia a espessura e a densidade do solo; a litologia a tipologia das rochas; o uso e cobertura do solo o tipo de proteção do solo; e as curvaturas vertical e horizontal as formas de terreno.

Segundo Silva *et al.* (2015) os índices de suscetibilidade que variam de “0,00” a “1,00” foram calculados proporcionalmente ao número de escorregamentos de terra que ocorreram na Bacia, e atribuídos às classes de cada variável ambiental conforme dispostos na Tabela 1.

A metodologia desenvolvida por Silva *et al.* (2015) para calcular a suscetibilidade a escorregamentos de terra é expressa na equação 1.

Tabela 1: Escala das variáveis e seus pesos adotados

Variáveis Ambientais	Índices	Variáveis Ambientais	Índices
Declividade		Pedologia	
< 5%	0,02	Cambissolos	0,13
5 a 12%	0,03	Área Urbana	0,20
12 a 30%	0,38	Latossolos	0,68
30 a 47%	0,41	Afloramentos Rochosos	0,00
> 47%	0,16	Argissolos	0,00
Litologia		Neossolos	0,00
Rochas Ígneas		Uso e Cobertura do Solo	
Gabro	0,00	Lagos	0,00
Gnaisse	0,00	Floresta (Mata Atlântica)	0,04
Granito, diorito e granodiorito; e Metadiorito, metatonalito, metagabro e gnaisse granulítico	0,65	Eucaliptos e Pinheiros	0,01
		Floresta Inicial e Média	0,26
Quartzito	0,00	Pastagens e Forragens	0,19
Ortognaisse de composição granítica.	0,14	Agricultura	0,01
Rochas Metamórficas		Área Degradada	0,01
Anfibólio gnaisse	0,00	Afloramentos Rochosos	0,00
Biotita gnaisse	0,04	Área Urbana	0,48
Rochas Sedimentares		Curvatura Horizontal	
Colúvio; e Sedimentos aluvionar e coluvionar	0,17	Muito Divergente	0,10
Curvatura Vertical		Divergente	0,10
Muito Convexa	0,03	Planar	0,19
Convexa	0,08	Convergente	0,33
Retilínea	0,27	Muito Convergente	0,28
Côncava	0,39		
Muito Côncava	0,23		

$$S = \frac{\sqrt{Vdc} + \sqrt{Vpd} + \sqrt{Vli} + \sqrt{Vus} + \sqrt{Vcv} + \sqrt{Vch}}{NVA} \quad (1)$$

onde:

S: Suscetibilidade a Escorregamentos de Terra

\sqrt{Vdc} : Raiz Quadrada da Variável Declividade

\sqrt{Vpd} : Raiz Quadrada da Variável Pedologia

\sqrt{Vli} : Raiz Quadrada da Variável Litologia

\sqrt{Vus} : Raiz Quadrada da Variável Uso e Cobertura do Solo

\sqrt{Vcv} : Raiz Quadrada da Variável Curvatura Vertical

\sqrt{Vch} : Raiz Quadrada da Variável Curvatura Horizontal

NVA: Número de Variáveis (6)

Visivelmente o mapa gerado por Silva *et al.* (2015) após o cálculo de suscetibilidade, mostra que das áreas da Bacia do Rio Bengalas, 114,22 km² são classificadas como sendo de média suscetibilidade a escorregamentos de terra, 52,72 km² são de baixa suscetibilidade e 22,73 km² são de alta suscetibilidade.

Imperceptíveis no mapa, 1,15 km² da Bacia são áreas de muito baixa suscetibilidade e 0,19 km² são de muito alta suscetibilidade a estes tipos de desastres conforme Figura 3.

Com os índices de suscetibilidade a escorregamentos de terra calculados, inicia-se o processo de cálculo dos índices de vulnerabilidade a estes tipos de desastres a partir da equação 2 também desenvolvida por Silva *et al.* (2015).

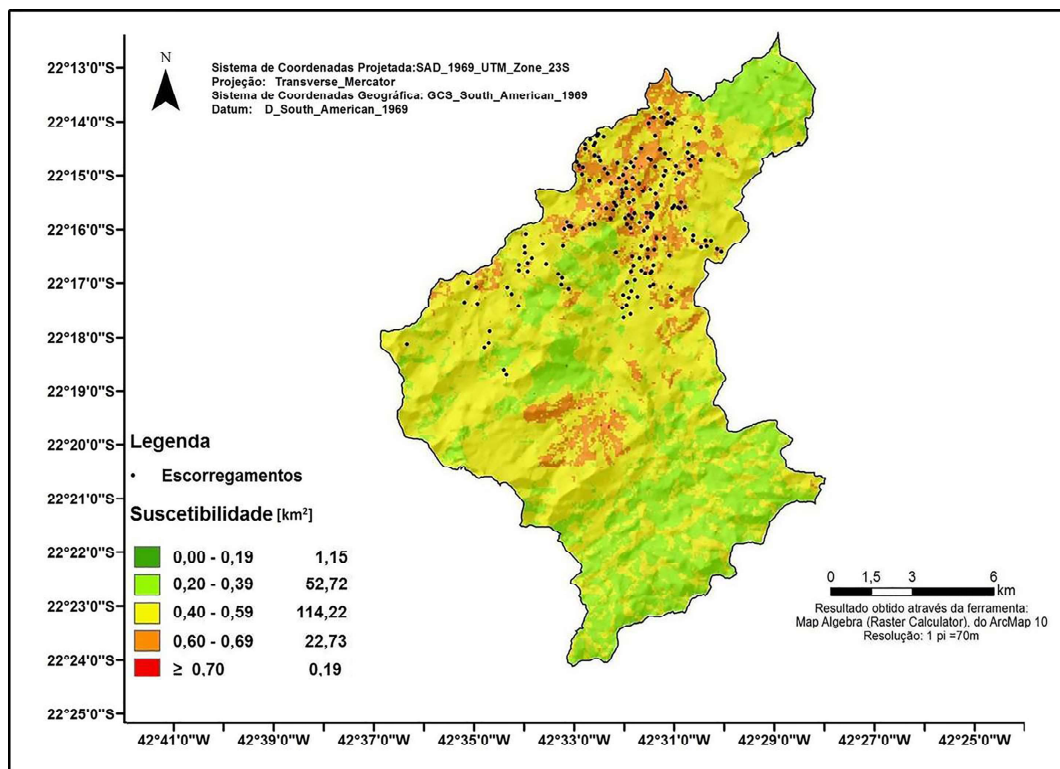


Fig. 3 - Mapa de Suscetibilidade da Bacia do Rio Bengalas a Escorregamentos de Terra. Fonte: Silva *et al.* (2015).

$$V = \frac{S + \sqrt{\left[\frac{\left(\frac{PD}{CPC} \right) + \left(\frac{PA5}{MAXPA5} \right)}{2} \right]}}{2} \quad (2)$$

onde:

S: Suscetibilidade a Escorregamentos de Terra

V: Vulnerabilidade a Escorregamentos de Terra

PD: Precipitação Diária

CPC: Coeficiente de Precipitação Crítica (70 mm/24 horas)

PA5: Precipitação Acumulada de 5 dias

MAXPA5: Máxima Precipitação Acumulada de 5 dias da série 01/01/1995 a 19/03/2013 (260,53 mm)

É importante ressaltar que o 1º termo matemático da equação 2 (V: Vulnerabilidade) refere-se à S: Suscetibilidade (equação 1), ou seja, para calcular a vulnerabilidade a

escorregamentos de terra é necessário antes de tudo calcular a suscetibilidade da área a estes tipos de desastres.

Em relação ao 2º termo matemático da equação 2, os dados para o cálculo dos índices de precipitação foram obtidos das projeções climáticas desenvolvidas pelo Eta-INPE (CHOU *et al.*, 2014), utilizando como condição de borda as projeções do modelo climático global HADGEM-ES (COLLINS *et al.*, 2011).

As projeções correspondem a um cenário RCP 4.5 (Representative Concentration Pathway - IPCC 2014) considerado de severidade média em termos de incremento da temperatura média global. O modelo regional Eta tem mostrado um bom desempenho em simulações do clima da América do Sul, conseguindo reproduzir as principais características da variabilidade climática no período mais recente - 1960-2005 (CHOU *et al.*, 2014), assim como em estudos de paleoclimatologia (MARCHI, 2013).

O método adotado neste trabalho baseia-se no estudo da Análise Empírica da Fragilidade dos Ambientes Naturais e Antropizados propostos por Tricart (1977) e Ross (1994), adaptados por Silva *et al.* (2015), em que sistematiza uma hierarquia nominal de fragilidade representada por valores ou pesos, ou seja, os índices de suscetibilidade e de vulnerabilidade a escorregamentos de terra, após serem calculados, serão sistematizados por classes conforme Tabela 2.

Tabela 2: Classes da Suscetibilidade/Vulnerabilidade a Escorregamentos de Terra e seus Índices

Classes da Suscetibilidade/Vulnerabilidade	
Classes	Índices Adotados
Muito Baixa	0,00 a 0,19
Baixa	0,20 a 0,39
Média	0,40 a 0,59
Alta	0,60 a 0,69
Muito Alta	≥ a 0,70

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os índices de vulnerabilidade a escorregamentos de terra, segundo os dados de precipitação de chuvas futuras gerados pelo

modelo regional Eta HadGEM-ES 20km-RCP 4.5 para a Bacia do Rio Bengalas, para o período de 01/01/2016 a 30/12/2040, foram calculados.

Os resultados mostram a ocorrência de um único evento com índices maiores ou iguais (\geq) a 0,70 para os 183 pontos de escorregamentos de terra da Bacia, que neste trabalho é chamado de “dia do evento de alta precipitação de chuvas”.

É importante registrar que de acordo com o modelo regional Eta HadGEM-ES 20km-RCP 4.5 para Bacia do Rio Bengalas, no dia do evento é caracterizado por uma precipitação de 64,32 mm e uma precipitação acumulada de 5 dias de 86,17 mm.

Ressalta-se ainda que para este evento os índices de vulnerabilidade a escorregamentos de terra variam de 0,70 a 0,84, considerados como sendo de “muito alta vulnerabilidade” a estes tipos de desastres, conforme Figura 4.

Nesta mesma Figura 4 observa-se que todos os índices do “dia do evento de alta precipitação de chuvas” estão na linha e acima do índice 0,70 (\geq que 0,70) conforme traçado por Silva *et al.* (2015).

Em relação às condições anteriores ao evento, os índices de vulnerabilidade calculados foram completamente diferentes, tendo em vista que a precipitação é de 5,12 mm e a acumulada de 5 dias de 28,26 mm.

Também na Figura 4 observa-se que todos os índices do “dia anterior ao dia do evento de alta precipitação de chuvas” estão abaixo da linha limítrofe de vulnerabilidade, o que significa que neste caso não há indícios de escorregamentos de terra para o período estudado. Conseqüentemente os índices de vulnerabilidade a escorregamentos de terra no dia anterior ao evento também caíram e variaram de 0,30 a 0,44.

Dos 183 pontos (48%) de escorregamentos, 88 deles tiveram índices considerados como sendo de “baixa vulnerabilidade”, pois variaram de 0,30 a 0,39, enquanto os demais 95 pontos (52%) tiveram índices de “média vulnerabilidade”, pois variaram de 0,40 a 0,44 (Figura 5).

A Figura 6 apresenta o mapa de vulnerabilidade da Bacia gerado para o “dia anterior ao dia do evento de alta precipitação de chuvas” e observa-se também que a maior parte da Bacia apresenta média vulnerabilidade (52%) a escorregamentos de terra.

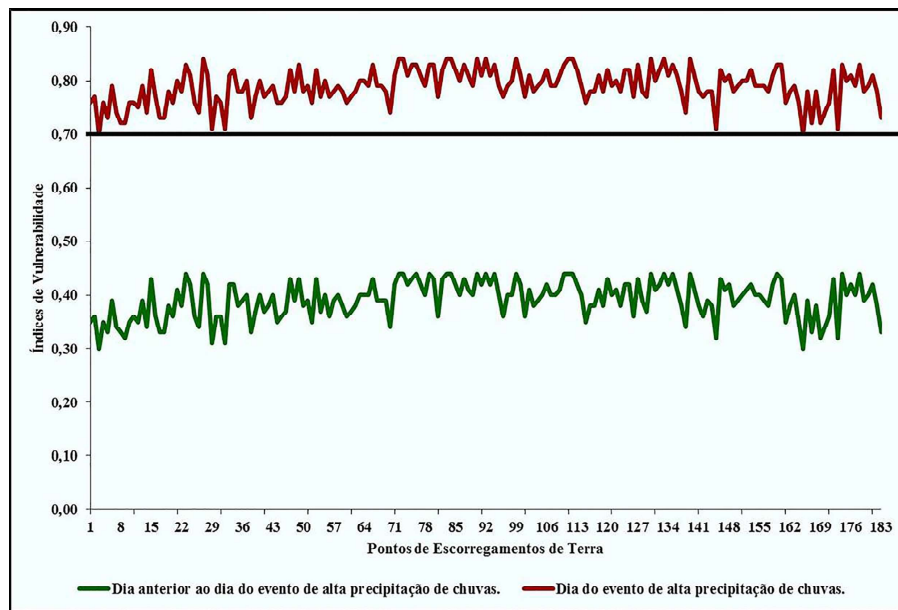


Fig. 4 - Índices de vulnerabilidade da Bacia do Rio Bengalas a escorregamentos de terra calculados para o “dia do evento de alta precipitação de chuvas” e para o “dia anterior ao dia do evento de alta precipitação de chuvas”.

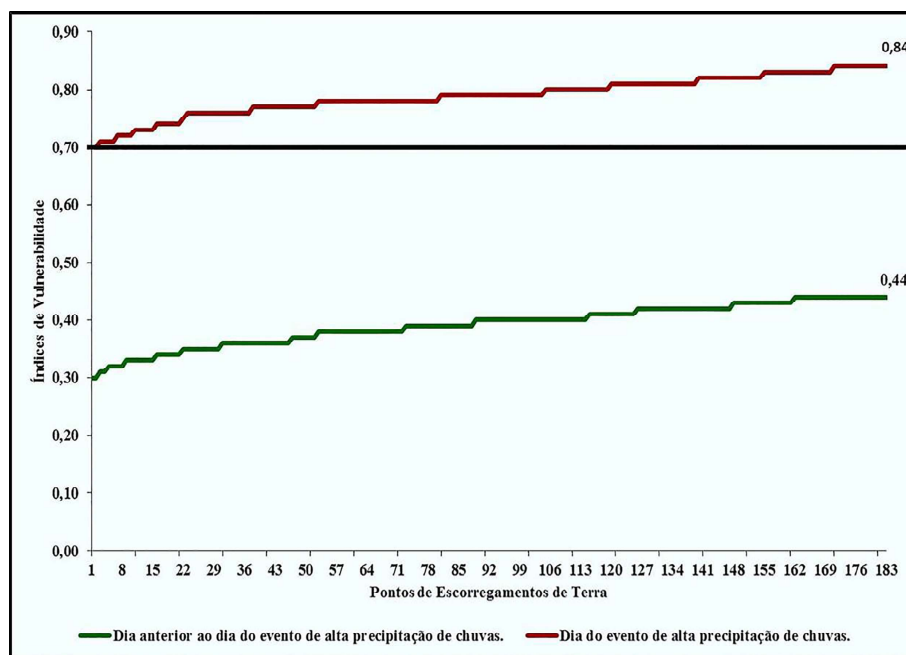


Fig. 5 - Índices de vulnerabilidade da Bacia do Rio Bengalas a escorregamentos de terra, em ordem crescente, calculados para o “dia do evento de alta precipitação de chuvas” e para o “dia anterior ao dia do evento de alta precipitação de chuvas”.

A Figura 7 apresenta o mapa de vulnerabilidade da Bacia gerado para o “dia do evento de alta precipitação de chuvas”.

Na literatura existem diversos estudos validados que indicam que a classe mais crítica de vulnerabilidade ocupa, normalmente, entre 3,5% e 8,0% das bacias analisadas (KAYASTHA *et al.*, 2013; BAI *et al.*, 2009; AYALEW *et al.*,

2004, AKINCI *et al.*, 2011). Assim, o limite para a classe de vulnerabilidade “muito alta” foi traçado para o percentil 95%, como opção de visualização dos resultados apresentados no mapa de vulnerabilidade da Bacia do Rio Bengalas a escorregamentos de terra.

Isto significa que a classe de vulnerabilidade “muito alta” está acima de 95% dos valores

encontrados dentro da Bacia do Rio Bengalas, representando consequentemente os 5% mais críticos da Bacia em relação a escorregamentos de terra conforme representação estatística na Figura 7.

Ressalta-se ainda que quando o índice de vulnerabilidade a escorregamentos de terra for maior ou igual (\geq) a 0,70 (limiar crítico) para dois (2) dias subsequentes, a incidência destes tipos de desastres é “muito alta”.

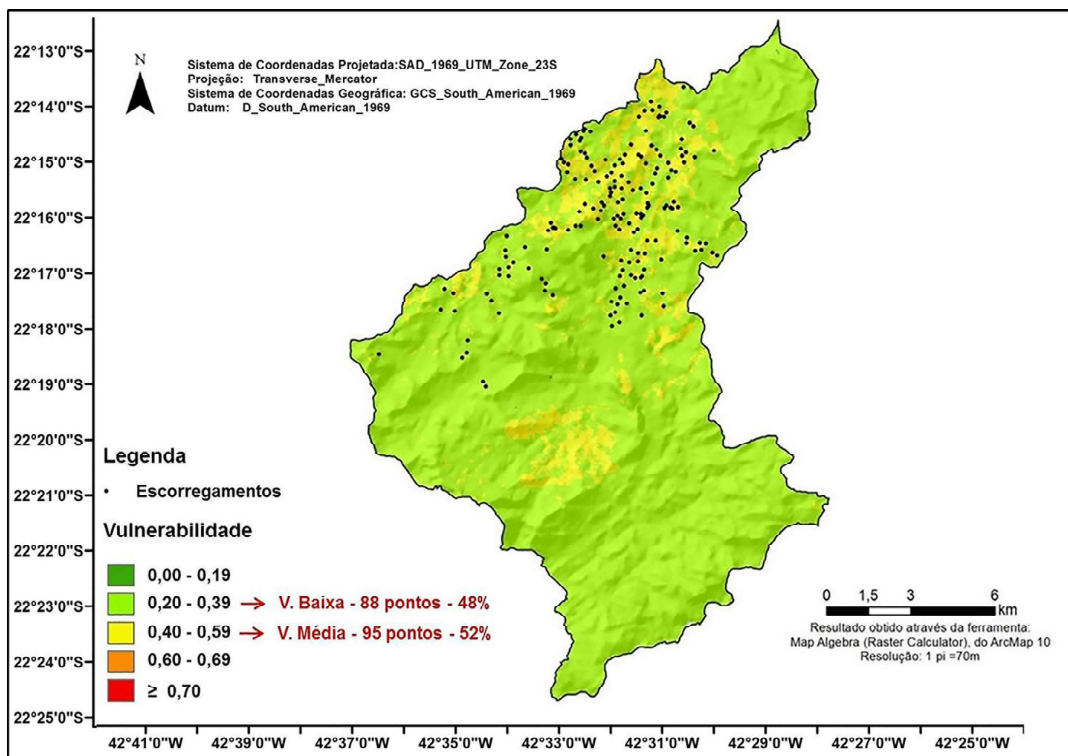


Fig. 6 - Mapa de vulnerabilidade da Bacia do Rio Bengalas a escorregamentos de terra, gerado para o “dia anterior ao dia do evento de alta precipitação de chuvas”.

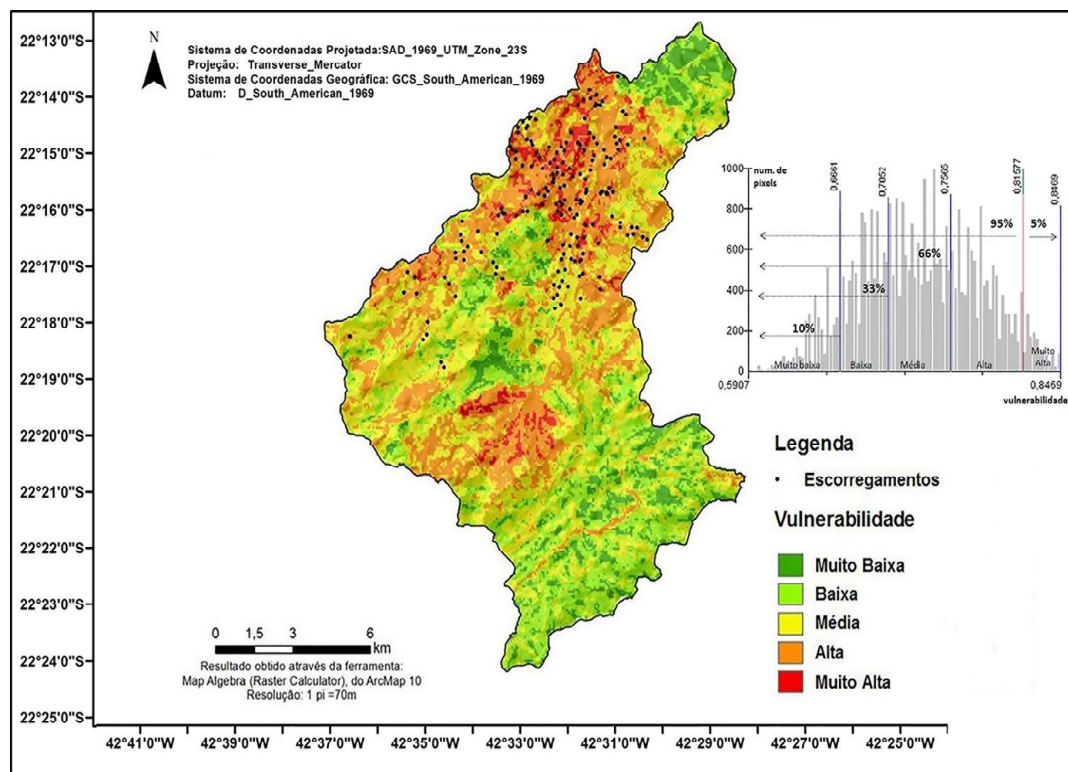


Fig. 7 - Mapa de vulnerabilidade da Bacia do Rio Bengalas a escorregamentos de terra, gerado para o “dia do evento de alta precipitação de chuvas”.

7. CONCLUSÃO

Conclui-se que segundo os dados de precipitação de chuvas futuras gerados pelo modelo regional Eta HadGEM-ES 20km-RCP 4.5 para a Bacia do Rio Bengalas, para o período 01/01/2016 a 30/12/2040, haverá apenas a ocorrência de um único evento com índices maiores ou iguais (\geq) a 0,70 para os 183 pontos de escorregamentos de terra da Bacia, que neste trabalho é chamado de “dia do evento de alta precipitação de chuvas”.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Prof. Dr. Nelson Jesus Ferreira, Chefe da Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais - DSA do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos - CPTEC do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, pelo apoio recebido para a realização deste trabalho.

Agradecemos também a Claudinei de Camargo, Letícia Capucho Luiz, Mayra Calderaro Rocha, Gisele Cristina dos Santos Mira, Franciane de Souza Oliveira Mafra, Marcelo Leme do Prado, Fabielle Mota, Aline Tatiane de Souza e Maurílio de Carvalho Junior, pelo apoio técnico recebido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKINCI, H.; DOĞAN, S.; KILIÇOĞLU, C.; TEMİZ, M. S. Production of landslide susceptibility map of Samsun (Turkey) City Center by using frequency ratio method. *Geomatics Engineering*, Ondokuz Mayıs University, 55139, Kurupelit/Samsun, Turkey. Kavak Vocational School, Ondokuz Mayıs University, Kavak/Samsun, Turkey. **International Journal of the Physical Sciences**, v. 6(5), 4 March, 2011. doi: 10.5897/IJPS11.133. Academic Journals, p. 1015-1025, 2011.

AYALEW, L.; YAMAGISHI, H.; UGAWA, N. Landslide susceptibility mapping using GIS-based weighted linear combination, the case in Tsugawa area of Agano River, Niigata Prefecture, Japan. doi 10.1007/s10346-003-0006-9. **School of Natural Resources. University of Arizona**, p. 73-81, 2004.

BAI, S-B.; WANG, J.; LÜ, G-N.; ZHOU, P-G.; HOU, S-S.; XU, S-N. GIS-Based and Data-Driven Bivariate Landslide-Susceptibility Mapping

in the Three Gorges Area, China. College of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210097 (China). China Institute of Geo-Environment Monitoring, Beijing 100081 (China). **ELSEVIER Geomorphology**, v. 19, Issue, p. 14-20, 2009.

BARBIERI, D. W.; FERREIRA, C. C.; SAITO, S. M.; SAUSEN, T. M.; Hansen, M. A. F. Relação entre os desastres naturais e as anomalias de precipitação para a região Sul do Brasil. **Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. Natal: INPE, p. 3527-3534. 2009. Disponível em: <<http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.17.18.10.30/doc/3527-3534.pdf>>. Acesso em: 02 out. 2015.

BATES, R.; JACKSON, J. **Glossary of Geology**, 2nd edition, American Geological Institute, p. 677, 1980.

BRAGA, T.M.; OLIVEIRA, E.L.; GIVISIEZ, G.H.N. Avaliação de metodologias de mensuração de risco e vulnerabilidade social a desastres naturais associados à mudança climática. **São Paulo em Perspectiva**, São Paulo, Fundação Seade, v. 20, n. 1, p. 81-95, jan./mar 2006.

BRAUCH, H. G. Threats, challenges, vulnerabilities and risks in environmental and human security. **SOURCE 'Studies of the University: Research, Counsel, Education'**, Publication Series of UNU-EHS, Bonn, Germany, n. 1, p. 16, 2005.

CARDONA, O. D. **Indicators of Disaster Risk and Risk Management**. Instituto de Estudios Ambientales - IDEA & Inter-American Development Bank - IDB. Universidad Nacional de Colombia. Manizales - Colombia, p. 18-23. 2005.

CARRARA A.; GUZZETTI F.; CARDINALI M.; REICHENBACK, P. Use of GIS technology in the prediction and monitoring of landslide hazard. **Natural Hazards**, doi:10.1023/A:1008097111310, v. 20, p. 117-135, 1999.

CHACÓN, J.; IRIGARAY, C.; FERNÁNDEZ, T.; HAMDOUNI, R. E. Engineering geology maps: landslides and geographical information systems. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**. doi:10.1007/s10064-006-0064-z, v. 65, Issue 4, p. 341-411, 2006.

- CHOU, S. C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DEREZYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J.; BUSTAMANTE, J.; TAVARES, P.; SILVA, A.; RODRIGUES, D.; CAMPOS, D.; CHAGAS, D.; SUEIRO, G.; SIQUEIRA, G.; MARENGO, J. Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios. *American Journal of Climate Change*, v. 3, p. 512-525. 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.4236/ajcc.2014.35043>>. Acesso em: 22 out. 2015.
- COLLINS, W.J.; BELLOUIN, N.; DOUTRIAUX-BOUCHER, M.; GEDNEY, N.; HALLORAN, P.; HINTON, T.; HUGHES, J.; JONES, C. D.; JOSHI, M.; LIDDICOAT, S.; MARTIN, G.; O'CONNOR, F.; RAE, J.; SENIOR, C.; SITCH, S.; TOTTERDELL, I.; WILTSHIRE, A.; WOODWARD, S. Development and evaluation of an Earth-System model - HadGEM2. *Geoscientific Model Development (GMD)*. Met Office Hadley Centre, Exeter, UK. doi:10.5194/gmd-4-1051-2011, v. 4, Issue 4, p. 1051-1075, 2011.
- COMPERJ. Complexo Petroquímico do Rio de Janeiro. **Plano Local de Desenvolvimento Sustentável de Nova Friburgo (PLDS NF)**. Secretaria de Estado do Ambiente (RJ). Ministério do Meio Ambiente. Agenda 21. Petrobras. Rio de Janeiro - RJ, p. 174, 2011.
- CUTTER, S. L.; FINCH, C. (2008). Temporal and spatial changes in social vulnerability to natural hazards. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, n. 105, v. 7, p. 2301-2306, 2008.
- DILLEY, M.R.S.; CHEN, B.; DEICHMANN, U.; LERNER-LAM, A.; ARNOLD, M. **Natural disaster hotspots: a global risk analysis**. Washington, D. C., World Bank Publications, n. 5, p. 17, 2005.
- EINSTEIN, H. H. Landslides risk assessment procedure. **Anais do 5th International Symposium on Landslides**, Lausanne, v. 2, p. 1075-1090, 1988.
- GRISEL, P. N.; ASSIS, R. L. Embrapa Agrobiologia. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Dinâmica agrária da Região Sudoeste do município de Nova Friburgo e os atuais desafios de sua produção hortícola familiar. **Documento 299**. ISSN 1517-8498, p. 26, 2015.
- GUZZETTI, F.; CARDINALI, M. REICHENBACH, P.; CARRARA, A. Comparing landslide maps: a case study in the Upper Tiber River Basin, Central Italy. **Environmental Management**, v. 25, Issue 3, p. 247-263, 2000.
- INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. **Normais Climatológicas do Brasil 1961-1990**. Organizadores: Andrea Malheiros Ramos, Luiz André Rodrigues dos Santos, Lauro Tadeu Guimarães Fortes. Brasília, DF. ISBN: 978-85-62817-01-4, p. 465, 2009.
- IPT. Instituto de Pesquisas Tecnológicas. **Banco de dados de mortes por escorregamentos no Brasil. Banco de Dados Digital**. São Paulo: IPT, 2009. Novos dados obtidos junto ao IPT com o Sr. Eduardo Soares Macedo em 06. fev. 2013. 2009.
- KASPERSON, J.; KASPERSON, R. Introduction. **International workshop on vulnerability and global environmental change**. Stockholm Environment Institute - SEI, Stockholm, Sweden. Report 2001-01, p. 1, 2001.
- KAYASTHA, P.; DHITAL, M. R.; SMEDT, F. Evaluation and Comparison of GIS based Landslide Susceptibility Mapping Procedures in Kulekhani Watershed, Nepal. Department of Hydrology and Hydraulic Engineering, Vrije Universiteit Brussel, Brussels, Belgium. Mountain Risk Engineering Unit, Tribhuvan University, Kirtipur, Kathmandu, Nepal. Central Department of Geology, Tribhuvan University, Kirtipur, Kathmandu, Nepal. **Journal Geological Society of India**, v. 81, p. 219-231. 2013.
- KAZTMAN, R.; BECCARIA, L.; FILGUEIRA, F.; GOLBERT, L.; KESSLER, G. **Vulnerabilidad, activos y exclusión social en Argentina y Uruguay**. Documento de Trabajo 107. Santiago de Chile. Oficina Internacional del Trabajo - OIT. Fundación Ford, ISBN 92-2-311840-9, p. 106, 1999.
- 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. S. F.; RUDORFF,

- F. Prevenção de desastres naturais: Conceitos básicos.** Curitiba: Organic Trading, p. 109, 2006.
- MARCHI, A. C. Simulações do Clima para Holoceno-Médio usando o modelo ETA. **Dissertação de Mestrado. Programa de pós-graduação em meteorologia.** Instituto de ciências atmosféricas. Universidade Federal de Alagoas - UFAL, p. 70, 2013.
- MELLO, A. Y. I.; D'ANTONA, A. O.; ALVES, H. P.; CARMO, R. L. Análise da Vulnerabilidade Socioambiental nas Áreas Urbanas do Litoral Norte de São Paulo. GT11 - Mudança climática e as cidades. **Anais do V Encontro Nacional da Associação Nacional de Pesquisa e Pós-Graduação em Ambiente e Sociedade,** Florianópolis. Anais. Campinas: ANPPAS, p. 18, 2010.
- NAE - Núcleo de Assuntos Estratégicos da Presidência da República. *Mudança do Clima.* Negociações internacionais sobre a mudança do clima. Vulnerabilidade, impactos e adaptação à mudança do clima. Núcleo de Assuntos Estratégicos da Presidência da República, Secretaria de Comunicação de Governo e Gestão Estratégica, Brasília. Cadernos NAE: n° 3, v. I, p. 157, 2005.
- NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration. **Vulnerability assessment.** 1999. Disponível em: <<http://www.csc.noaa.gov/digitalcoast/training/roadma>>. Acesso em: 21 out. 2015.
- ROSS, J. L. S. Análise Empírica da Fragilidade dos Ambientes Naturais e Antropizados. **Revista do Departamento de Geografia,** São Paulo: FFLCH/USP, v. 8, p. 63-74, 1994.
- SILVA, L. T.; SAMPAIO, E. P. F. F. M.; CORTE-REAL, J. A. M.; RODRIGUEZ, D. A.; CARNAUBA MEDEIROS, F.; MORAES, B. E.; FRANÇA, D. G. M. Susceptibility and Vulnerability to Landslides - Case Study: Basin of River Bengalas - City of Nova Friburgo - Brazil. **Engineering Geology for Society and Territory.** ISBN 978-3-319-09299-7. doi 10.1007/978-3-319-09300-0_101. Springer International Publishing Switzerland, v. 1, p. 539-546. 2015.
- SOETERS, R.; VAN WESTEN, C. J. Slope instability recognition, analysis and zonation. Landslides, investigation and mitigation. Transportation Research Board, National Research Council, **TRB Special Report 247.** National Academy Press, Washington D.C., U.S.A., ISBN: 030906208X, p. 129-177, 1996.
- STAR, S. L.; GRIESEMER J. R. Institutional Ecology, 'Translations' and Boundary Objects: Amateurs and Professionals in Berkeley's Museum of Vertebrate Zoology, 1907-39. **Social Studies of Science.** v. 19, p. 387-420, 1989.
- TAGLIANI, C. R. A. Técnica para avaliação da vulnerabilidade ambiental de ambientes costeiros utilizando um sistema geográfico de informações. Anais do XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR. **Anais XI SBSR,** Belo Horizonte, Brasil, 05 - 10 abril 2003, INPE. p. 1657-1664. 2003. Disponível em: <http://marte.sid.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2002/10.31.13.33/doc/13_028.pdf>. Acesso em: 10 out. 2015.
- TEIXEIRA, M. S.; SATYAMURTY, P. Episódios de chuvas intensas na região sul do Brasil. Parte I: configuração sinópticas associadas. **Anais do XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia - CBMET.** Fortaleza: INPE, 2004. Disponível em: <<http://urlib.net/cptec.inpe.br/walmeida/2004/09.21.10.34>>. Acesso em: 03 out. 2015.
- TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. **Desastres naturais: conhecer para prevenir.** São Paulo: Instituto Geológico, ISBN 978-85-87235-09-1, p. 196, 2009.
- TRICART, J. **Ecodinâmica. Recursos Naturais e Meio Ambiente.** Rio de Janeiro: IBGE-SUPREN, p. 91, 1977.
- UNDP - United Nations Development Programme. **Reducing disaster risk: a challenge for development, a global report.** UNDP Bureau for Crisis Prevention and Recovery. New York: UNDP, p. 148, 2004.
- UNFPA - Fundo de População das Nações Unidas. **Situação da População Mundial 2007: Desencadeando o Potencial do Crescimento Urbano.** Fundo de População das Nações Unidas. Nova York: UNFPA, p. 99, 2007.
- UN-ISDR - International Strategy for Disaster Reduction. **Living with Risk. A global review**

of disaster reduction initiatives. Inter-Agency Secretariat International Strategy for Disaster Reduction (ISDR), United Nations. Geneva, Switzerland. ISBN 92-1-101064-0, v.1, p. 431, 2004. Disponível em: <http://www.unisdr.org/files/657_lwr1.pdf>. Acesso em: 25 set. 2015.

VAN WESTEN C. J., CASTELLANOS E., KURIAKOSE S. L. Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: an overview. **Engineering Geology**,

v. 102, p. 112-131, 2008.

VARNES, D. J. **Landslide Hazard Zonation: Review of Principles and Practice.** UNESCO Press. Paris. France, p. 56, 1984.

ZÊZERE, J. L. (2007). Predição probabilística de movimentos de vertente na escala regional. **Actes de les Jornades sobre Terrasses i Previsió de Riscos Naturals.** Departement de Medi Ambient, Consell de Mallorca, p. 17-30, 2007.