



ESTUDO PLUVIOMÉTRICO DOS ESCORREGAMENTOS DEFLAGRADOS NO VERÃO DE 2009/2010 NO PLANALTO DO PARAITINGA (SP)

Rodrigo Augusto Stabile^(a), Antonio Carlos Colângelo^(b)

^(a) Departamento de Geografia, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo / Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais, rodrigo.stabile@cemaden.gov.br

^(b) Departamento de Geografia, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, accolang@usp.br

Eixo: GEOGRAFIA FÍSICA E DESASTRES NATURAIS

Resumo

Considerando que tanto a chuva antecedente como a intensidade do evento pluviométrico deflagrador são descritos como significativos na geração de escorregamentos nas encostas, e utilizando a abordagem de limiares de chuva ou envoltórias de escorregamentos, este trabalho demonstrou que a densidade de escorregamentos do evento de 2009/2010 no Planalto do Paraitinga está relacionada à algumas características da pluviosidade. Os procedimentos envolveram o mapeamento das cicatrizes de escorregamentos, o cálculo de isoietas de precipitação acumulada em 96 horas, a estimativa da precipitação instantânea com dados de Radar Meteorológico e a avaliação das envoltórias de escorregamentos, assim como sua espacialização na área de estudo no momento analisado. Avaliou-se também que, apesar das limitações metodológicas inerentes a estudos deste tipo, a possibilidade de espacialização dos limiares exibe potencial para ser empregada, por exemplo, no monitoramento de desastres naturais em tempo real.

Palavras chave: escorregamentos; limiares; precipitação acumulada; Planalto do Paraitinga; pluviometria.

1. Introdução

A chuva pode ser considerada como o principal fator deflagrador de escorregamentos, principalmente em locais de relativa estabilidade tectônica. Tanto a geração de condições críticas de poro-pressão positiva relacionadas à saturação do solo (Fernandes e Amaral, 1996; Fernandes *et al.*, 2001), como a perda de sucção e da coesão aparente associadas ao aumento da umidade do solo decorrente do avanço de uma frente de infiltração (Wolle e Carvalho, 1989), são mecanismos de deflagração que dependem da água para a instabilização das encostas.

Os escorregamentos são fenômenos limiares (Schumm, 1973; 1979), como ressalta Colângelo (2005), ao fazer uma revisão histórica dos mecanismos de ruptura. Assim, todos os grandes eventos de movimentos de massa registrados no Brasil estão vinculados a chuvas excepcionais (Tabela I), de modo que tanto a chuva antecedente como a intensidade do evento pluviométrico deflagrador são descritos como significativos na geração de escorregamentos nas encostas. Tatizana *et al.* (1987a) propuseram que a chuva acumulada atua na redução da resistência ao cisalhamento e no aumento das



forças solicitantes. Da mesma forma, Wolle e Carvalho (1989) explicam que a configuração de uma situação crítica vincula-se às condições de saturação do solo prévias, sendo que quanto mais úmido o solo mais rapidamente ocorre a saturação em superfície. Já as precipitações de curta duração estão vinculadas aos fenômenos instantâneos que detonam os processos de escorregamento, como linhas de fluxos que geram forças de percolação, erosão e saturação do solo em descontinuidades hidráulicas (Tatizana *et al.*, 1987a; Fernandes *et al.*, 2001).

Tabela I – Estimativa de precipitação de alguns dos principais eventos de movimentos de massa no Brasil

Evento	Chuva (mensurada ou estimada)	Fonte
Serra do Mar em Caraguatatuba/SP (1967)	420 mm em 24 horas	Cruz (1974)
Serra do Mar em Cubatão/SP (1985)	400 mm em 96 horas	Tatizana <i>et al.</i> (1987b)
Maciço da Tijuca no Rio de Janeiro/RJ (1996)	250 mm em 48 horas	Vieira e Fernandes (2004)
Vale do Itajaí/SC (2008)	400 mm em 48 horas	Tomazzoli (2012)
Angra dos Reis/RJ (2009/2010)	417 mm em 72 horas	Dourado e Fernandes (2013)
Região Serrana/RJ (2011)	200 mm em 10 horas	Coelho Netto <i>et al.</i> (2011)
Serra da Prata em Morretes/PR (2011)	321 mm em 24 horas	Silveira <i>et al.</i> (2014)
	575 mm em 72 horas	
Itaoca/SP (2014)	150 mm em 06 horas	Instituto Geológico (2015)

Guzzetti *et al.* (2007), em uma revisão global dos estudos pluviométricos deflagradores de movimentos de massa, definem que os limiares de chuva podem ser baseados em processos, mas que pela comum ausência de dados em escala adequada, normalmente os estudos apresentam limiares de chuva empíricos. Estes, por sua vez, podem ser subdivididos entre aqueles que consideram as condições antecedentes ou que utilizam apenas um evento de chuva específico. Estes últimos são os mais difundidos mundialmente, sendo os limiares do tipo intensidade-duração os mais comuns (Caine, 1980; Guzzetti *et al.*, 2008).

No Brasil, o trabalho mais clássico na definição de limiares de chuva é o de Tatizana *et al.* (1987a), para os escorregamentos ocorridos na Serra do Mar em Cubatão (SP), utilizando uma abordagem que leva em conta a chuva antecedente. Nesse estudo, relacionando a precipitação acumulada em 4 dias com precipitações horárias, os autores puderam definir envoltórias de escorregamentos para quatro classes ou intensidades de eventos: escorregamentos induzidos, escorregamentos esparsos, escorregamentos generalizados e corridas de lama, por meio da seguinte equação:

$$I = K \times Ac^{-b}$$

, onde I é a intensidade horária, Ac é a precipitação acumulada em 4 dias e K e b são constantes da relação geométrica, variando com as características geotécnicas das encostas e as condições climáticas.

Entre o final de 2009 e início de 2010, o Planalto de Paraitinga (SP) foi atingido por um evento pluviométrico intenso acompanhado de alta precipitação acumulada, gerando inúmeros movimentos de massa. Tendo em vista a distribuição desigual das cicatrizes de escorregamentos ao longo desta



área, o objetivo deste trabalho foi avaliar se a densidade de escorregamentos no Planalto do Paraitinga está diretamente relacionada à pluviosidade, a partir da espacialização dos limiares elaborados por Tatizana *et al.* (1987a) adaptados à disponibilidade dados de chuva do evento de 2009/2010.

2. Área de estudo

O Planalto do Paraitinga insere-se no domínio geomorfológico dos mares de morros com serras localizadas, embasado a nordeste por unidades quartzíticas e paragnaisses dos Complexos Costeiro e Embu e a sudoeste por granitos (CPRM, 2006). São comuns no manto de intemperismo normalmente profundo cicatrizes e depósitos correlativos a movimentos de massa quaternários de grandes proporções, principalmente nas vertentes laterais, visto que nos anfiteatros normalmente as evidências foram apagadas pela ação do escoamento superficial (Colângelo, 1995).

Os movimentos de massa do evento de 2009/2010 atingiram uma área de quase 1000 km² na região dos municípios de Cunha, Lagoinha e São Luiz do Paraitinga (Figura 1), concentrando-se principalmente nas declividades maiores que 23° e nos setores côncavos das vertentes (Stabile *et al.*, 2013). De acordo com CPTEC (2010a) as chuvas responsáveis por esse episódio estiveram associadas ao aumento da convergência de umidade no setor central do Brasil, intensificada pela formação de um centro de baixa pressão adjacente à costa e pela configuração de vórtices ciclônicos na média e alta troposfera (Figura 2). CPTEC (2010b) descreve que a persistência deste sistema de baixa pressão por mais de 24 horas e os altos teores de umidade do ar foram responsáveis pelos grandes volumes de chuva, que segundo CPTEC (2010a), excederam em até 100 mm a média climatológica mensal.

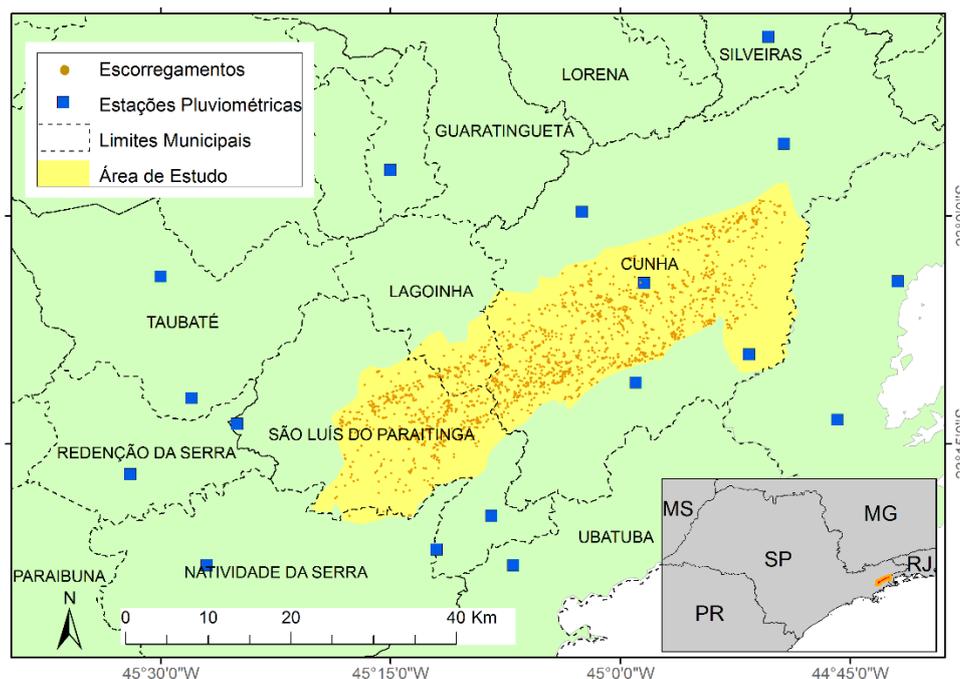




Figura 1 – Localização da área de estudo e das estações pluviométricas utilizadas na elaboração das isoietas de precipitação acumulada em 96 horas.

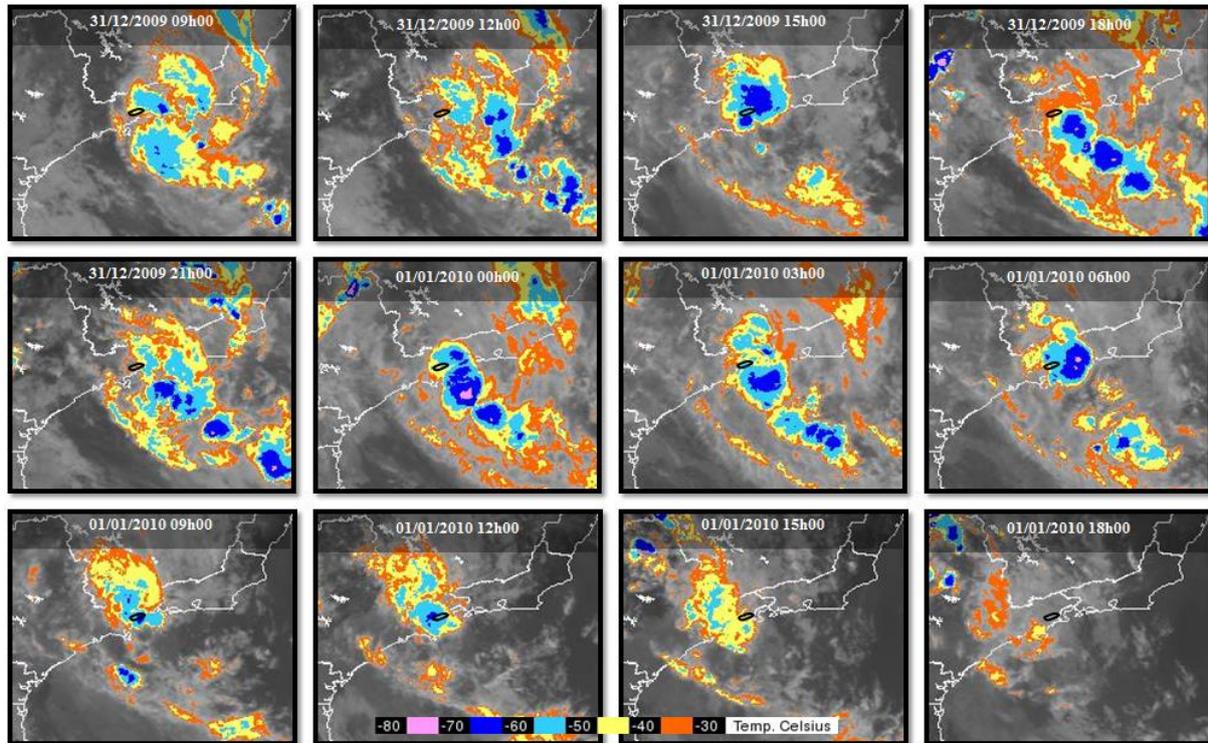


Figura 2 – Composição de imagens do satélite GOES-12 (imagem T realçada alta) entre as 09:00 horas (GMT) do dia 31/12/2009 e as 18:00 horas (GMT) do dia 01/01/2010, mostrando a temperatura e a circulação das nuvens durante o evento de precipitação deflagrador dos movimentos de massa. Fonte: INPE/CPTEC/DSA.

3. Materiais e métodos

Os escorregamentos foram mapeados por meio de pontos em imagens de satélite disponíveis no *Google Earth*. A grande maioria das cicatrizes foi identificada em imagens de abril ou maio de 2010. A fim de se assegurar que se tratavam de escorregamentos deflagrados recentemente, além das chaves de interpretação normalmente utilizadas (solo exposto nas áreas de ruptura e passagem, e fácil visualização dos depósitos), as imagens foram comparadas com outras anteriores ao evento de 2009/2010 no Planalto do Paraitinga.

A precipitação acumulada em 96 horas foi definida a partir da interpolação (critério = *spline*, tipo = *tension*, peso = 1, número de pontos = 12) dos dados (período entre 29/12/2009 e 01/01/2010) de 18 estações pluviométricas de diversos órgãos (DAEE, ANA/CPRM, INPE e INMET), cuja localização pode ser visualizada na Figura 1. Apenas duas das 18 estações estão efetivamente no interior da área de estudo, ambas no setor leste.



A precipitação instantânea foi determinada a partir dos dados do Radar Pico do Couto disponíveis na Rede de Meteorologia da Aeronáutica (REDEMET). Não há motivo para crer que os escorregamentos ocorreram simultaneamente em uma área tão extensa, onde os picos de chuva indubitavelmente tiveram significativa variação de um local para outro. A maioria dos relatos encontrados afirmam que muitos dos escorregamentos ocorreram entre a madrugada e a manhã do dia 01/01/2010, sendo que o único testemunho de horário depõe que um dos escorregamentos ocorreu aproximadamente às 05:00 horas (Isto É, 2010). Portanto, foi selecionada a imagem de radar com horário de 07:24 GMT (05:24 horário local) como a mais próxima do evento relatado. A imagem de radar foi processada através de uma classificação não supervisionada do tipo *Isocluster* (classes = 50, número de células mínimo = 2, intervalo de amostragem = 1) e os valores de precipitação instantânea foram atribuídos manualmente de acordo com as legendas disponíveis em REDEMET (<http://www.redemet.aer.mil.br/>) e Cemaden (<http://www.cemaden.gov.br/mapainterativo/#>).

As envoltórias de escorregamentos propostas por Tatizana *et al.* (1987a) para o setor Refinaria em Cubatão/SP (Figura 3) foram especializadas a partir da aplicação das equações nos dados de precipitação acumulada em 96 horas e de sua comparação com a precipitação instantânea às 05:24 horas do dia 01/01/2010. Foram utilizadas as equações para escorregamentos induzidos, escorregamentos esparsos e escorregamentos generalizados. Adicionalmente, as áreas que se encontravam abaixo da envoltória para escorregamentos induzidos foram divididas entre as que estavam até 10 mm/h ou que faltavam mais de 10 mm/h para atingir o limiar.

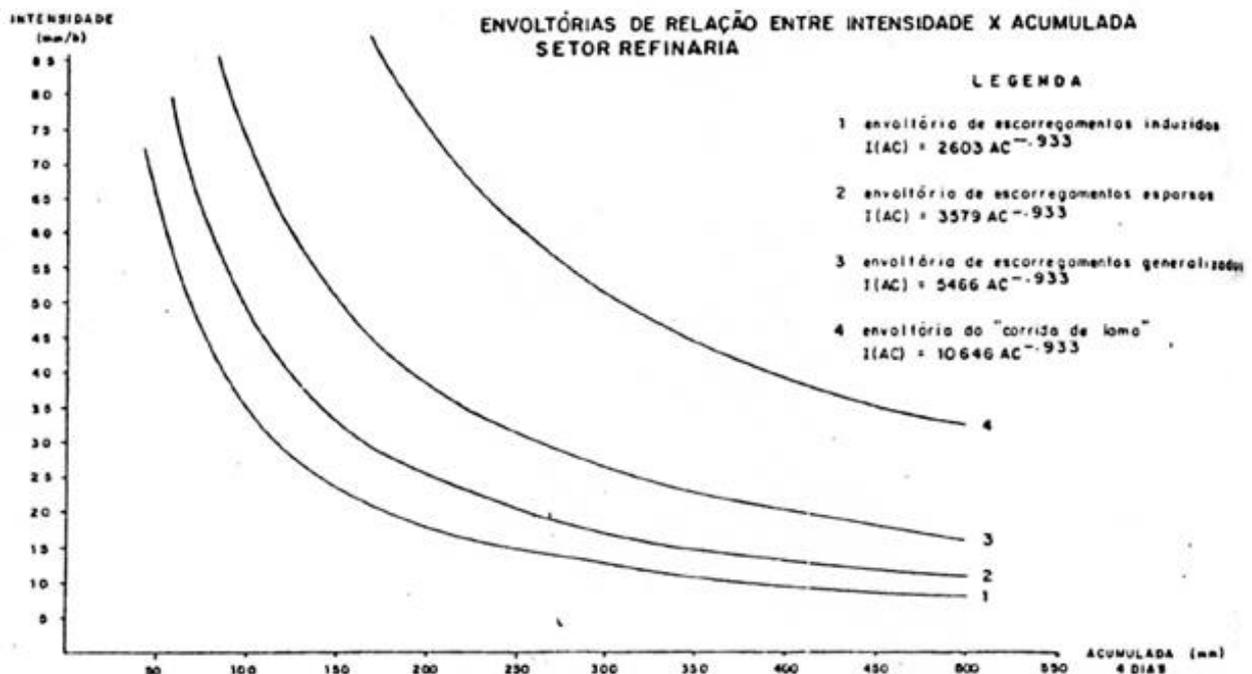


Figura 3 – Envoltórias de escorregamentos (intensidade da chuva x precipitação acumulada em 96 horas) do Setor Refinaria em Cubatão/SP. Fonte: Tatizana *et al.* (1987a).



Por fim, foi calculada a densidade de escorregamentos para as diversas classes de precipitação acumulada, precipitação instantânea e padrões espaciais de envoltórias de escorregamentos, de modo a se determinar o poder explicativo da pluviosidade nos escorregamentos do Planalto do Paraitinga.

4. Resultados e discussões

As Figuras 4, 5, 6 apresentam as cicatrizes de escorregamentos mapeadas (total de 2.265 feições) e a distribuição da precipitação acumulada em 96 horas, da precipitação instantânea às 05:24 do dia 01/01/2010, e das envoltórias de escorregamentos, respectivamente. A Tabela II exhibe as densidades de escorregamento calculadas.

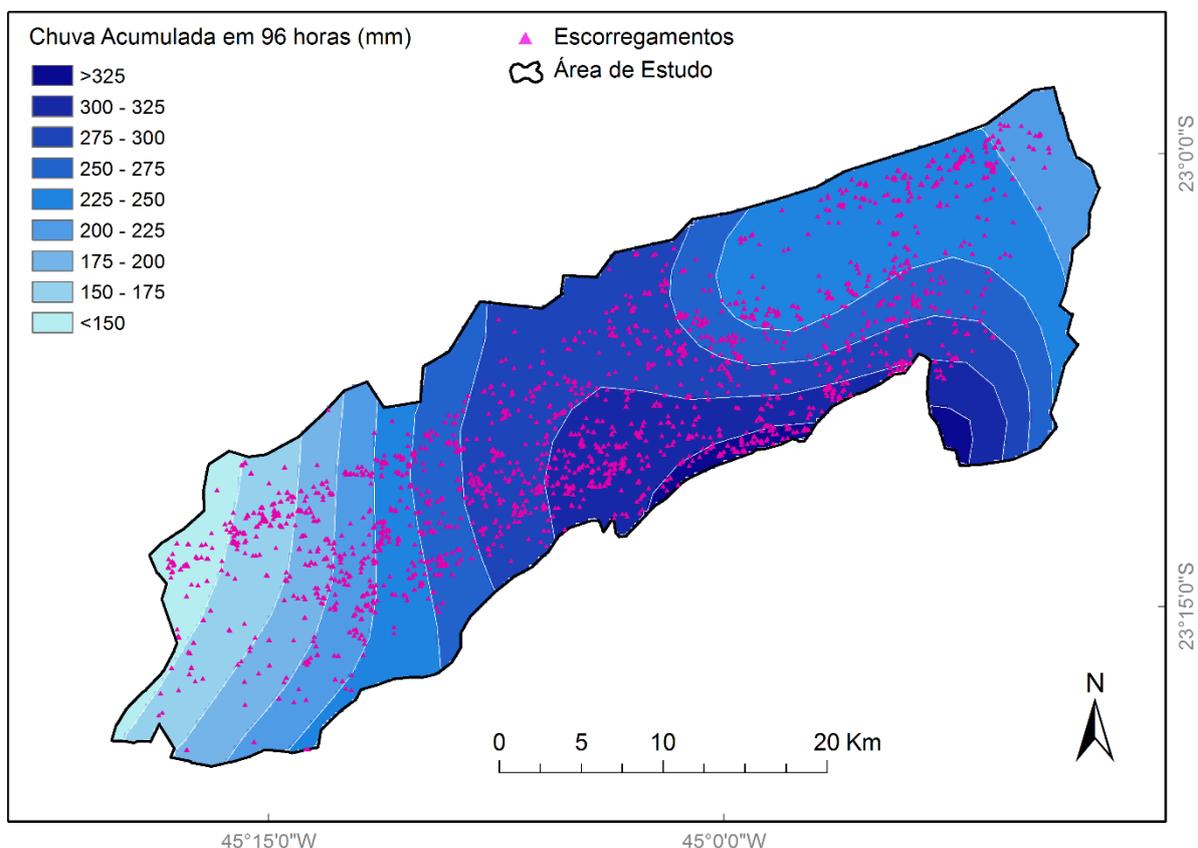


Figura 4 – Mapa de isoietas de precipitação acumulada em 96 horas (entre os dias 29/12/2009 e 01/01/2010).

Fonte: dados pluviométricos do DAEE, ANA/CPRM, INPE e INMET.

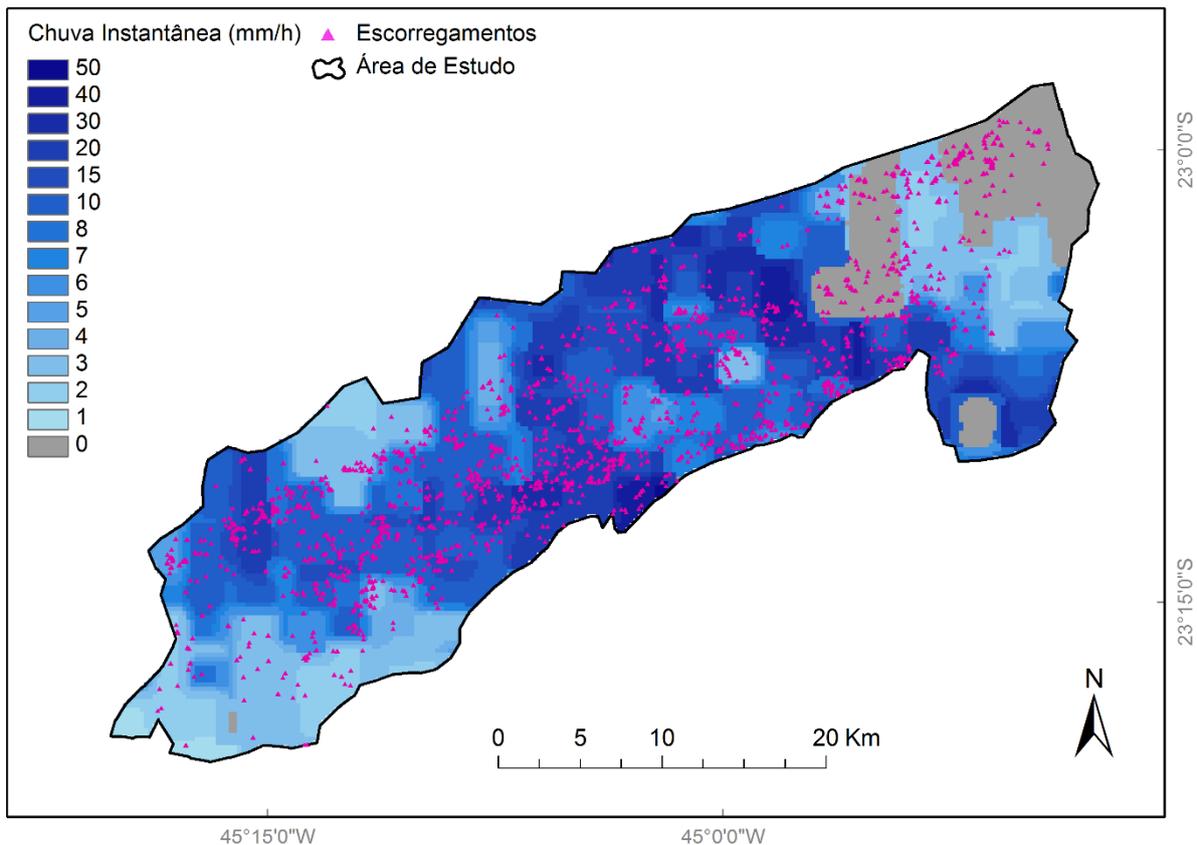


Figura 5 – Mapa de precipitação instantânea as 07:24 GMT do dia 01/01/2010. Fonte: dados do Radar Pico do Couto (REDEMET).

Quanto à precipitação instantânea, é possível verificar que há uma relação positiva, ainda que um tanto irregular, com a densidade de escorregamentos, que somente é francamente desrespeitada nas classes extremas de 0 e 50 mm/h. Por outro lado, a precipitação acumulada em 96 horas não demonstra qualquer correlação com a densidade de escorregamentos, com classes de menor chuva (150 – 175 mm) com densidade elevada de escorregamentos/km² enquanto em locais com maior precipitação (>325 mm) os escorregamentos são mais rarefeitos.

Sobre as envoltórias de escorregamentos, é possível verificar que processos foram deflagrados, inclusive de maneira generalizada, em locais muito abaixo até das envoltórias para escorregamentos induzidos. Por outro lado, há uma afinidade, mesmo que tímida, entre as classes de envoltórias e a densidade de escorregamentos, com o aumento da densidade ocorrendo nos locais onde se esperava que existissem mais processos.

Tatizana *et al.* (1987a) já haviam enfatizado a importância da intensidade da precipitação na densidade de escorregamentos em Cubatão/SP. Guzzetti *et al.* (2008), analisando um conjunto de dados de movimentos de massa de várias partes do mundo, concluíram que eventos de escorregamentos mais generalizados estão associados a chuvas com maior tempo de duração. Coelho Netto *et al.* (2011), por

sua vez, observaram que maiores acumulados de precipitação em 24 horas estavam associados a escoamentos de maior área em Nova Friburgo/RJ.

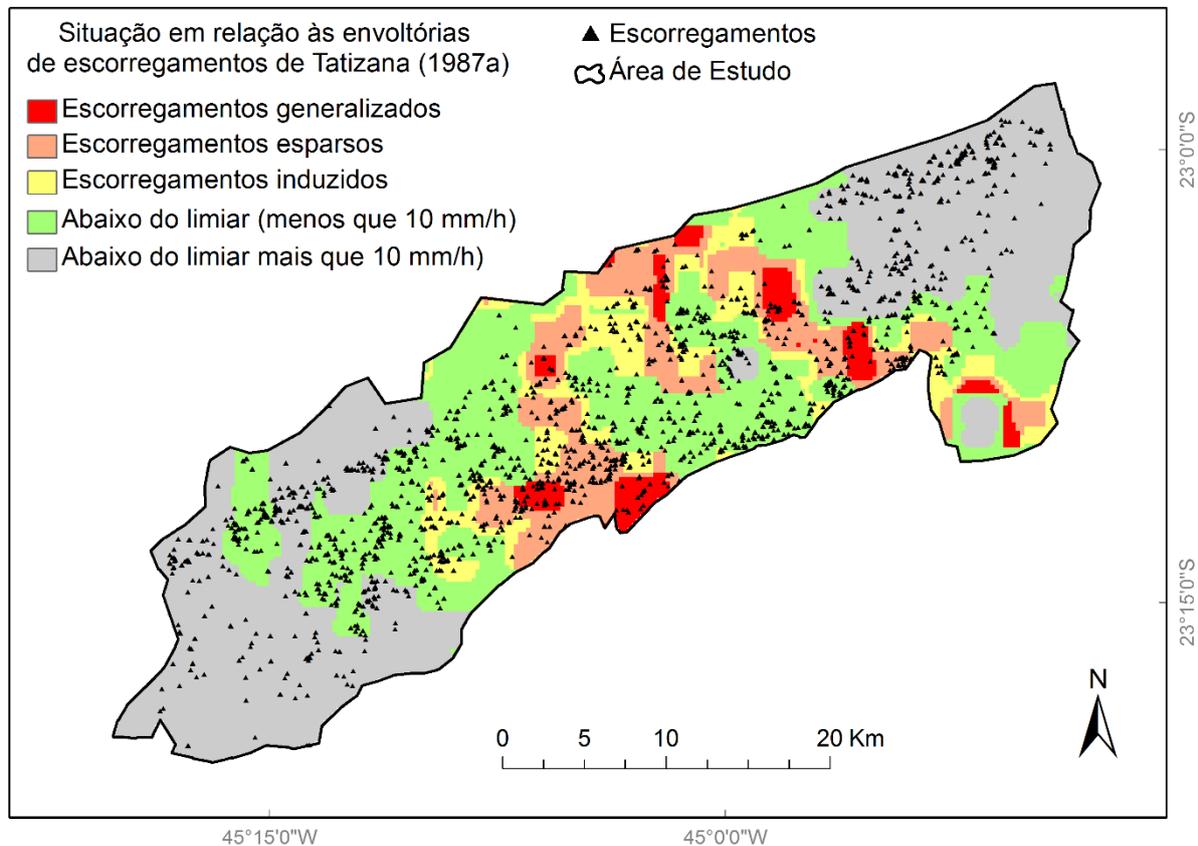


Figura 6 – Espacialização da situação pluviométrica da área de estudo em relação às envoltórias de escoamentos (baseadas em Tatizana *et al.*, 1987), utilizando os dados de precipitação acumulada e instantânea das Figuras 4 e 5.

Tabela II – Distribuição da densidade escoamentos

Precipitação instantânea (radar Pico do Couto às 07h24 GMT)		Precipitação acumulada em 96 horas (calculada a partir das isoietas)		Envoltórias de escoamentos (baseadas em Tatizana <i>et al.</i> 1987a)	
Precipitação (mm/h)	Densidade (cicatriz/km ²)	Precipitação (mm)	Densidade (cicatriz/km ²)	Envoltória	Densidade (cicatriz/km ²)
0	2,5	<150	1,6	Abaixo do limiar (mais que 10 mm/h)	1,8
1	0,3	150 – 175	9,9	Abaixo do limiar (menos que 10 mm/h)	3,1
2	0,7	175 – 200	1,7	Escoamentos induzidos	3,2
3	1,3	200 – 225	3,3	Escoamentos esparsos	3,2
4	1,8	225 – 250	5,1	Escoamentos generalizados	3,5
5	2,6	250 – 275	1,5		
6	2,6	275 – 300	3,9		
7	2,5	300 – 325	2,0		
8	3,4	>325	0,8		
10	2,9				
15	3,5				
20	3,5				
30	2,9				
40	3,1				
50	1,9				



Interessante notar, pois, que a princípio era esperado uma maior relação entre a densidade de escorregamentos e a chuva nos processos ocorridos no Planalto do Paraitinga. Apesar disso, também é importante advertir para as restrições metodológicas que devem ser consideradas na análise dos dados: (a) a baixa densidade de estações pluviométricas e sua quase ausência dentro da área de estudo comprometem uma real visualização da distribuição da chuva acumulada, problema também relatado por Tatizana *et al.* (1987b) ao não encontrar relação entre as precipitações mais elevadas e as maiores densidades de cicatrizes em Cubatão/SP; (b) os dados de radar, utilizados para a estimativa da precipitação instantânea, são medidas indiretas e, portanto, sujeitas a inexatidões; (c) ao não considerar outros fatores controladores, o poder explicativo de um parâmetro isolado (chuva) diminui.

Não obstante, foi possível observar que algumas áreas estavam acima do limiar para escorregamentos generalizados às 05:24 horas do dia 01/01/2010. Não é insensato, portanto, admitir que em outros momentos (antes ou depois) esse limiar também foi atingido em outras áreas do Planalto do Paraitinga, principalmente naqueles locais onde há um maior número de cicatrizes de escorregamento. Ressalta-se que Colângelo (2005), ao comparar a Serra do Mar em Caraguatatuba/SP com o Planalto em Paraibuna/SP, advertiu que os materiais desta última área são mais resistentes ao cisalhamento que a primeira. Deste modo, é provável que as envoltórias aqui utilizadas na verdade estejam subestimando os limiares para deflagração de escorregamentos.

Estudos futuros deverão considerar a elaboração das envoltórias de escorregamento para este compartimento. Para isso deverão ser elaboradas alternativas para superar as dificuldades no registro pluviométrico, assim como no inventário dos processos de escorregamento, sobretudo quanto ao horário das ocorrências. Também deverão ser testadas envoltórias com outros períodos de precipitação acumulada. Guzzetti *et al.* (2007), cita que a discricionarieidade nessa escolha está relacionada a variáveis como a diversidade litológica, geomorfológica e pedológica, assim como com a variação dos regimes climáticos e das condições meteorológicas que levaram à instabilidade das encostas.

5. Conclusão

A pluviosidade está relacionada à distribuição dos escorregamentos e, conseqüentemente, à densidade de cicatrizes do evento de 2009/2010 no Planalto do Paraitinga. Demonstrou-se que, apesar de limitações metodológicas inerentes a estudos deste tipo que envolvem desde falta de informações no inventário dos processos de escorregamento até as restrições instrumentais para mensuração da chuva, estudos pluviométricos por meio de limiares ou envoltórias tem potencial na compreensão das condições geradoras de instabilidade nas encostas.



Os resultados validam o método proposto por Tatizana *et al.* (1987a). Compete sublinhar que para cada área o método deve ser adaptado para o contexto geomorfológico, geotécnico e hidrológico local. Novos estudos, incluindo a definição de envoltórias específicas para o Planalto do Paraitinga, análise de outros momentos de chuva instantânea e inclusão de novas ferramentas para o cálculo da precipitação acumulada, poderão aperfeiçoar os resultados.

A possibilidade de espacialização dos limiares, principal contribuição deste estudo, exhibe potencial para ser empregada, por exemplo, no monitoramento de desastres naturais em tempo real, permitindo determinar com maior detalhe as áreas sujeitas à processos de movimentos de massa, desde que com a adequada calibração dos dados dos radares meteorológicos e apropriada distribuição de estações pluviométricas.

6. Bibliografia

CAINE, N. (1980) The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows. **Geografiska Annaler**, Series A, Physical Geography, v. 62, n. 1/2, pp. 23-27.

COELHO NETTO, A.L. *et al.* (2011) January 2011: the extreme landslide disaster in Brazil. In: **Proceedings of the Second World Landslide Forum**, 2011, Roma, 6p.

COLÂNGELO, A.C. (1995) **Movimentos de massa e evolução geomorfológica das vertentes no alto vale do Paraíba do Sul – São Luís do Paraitinga – SP**. Tese de Doutorado, DG-FFLCH-USP, 250p.

COLÂNGELO, A.C. (2005) Sobre os modelos de magnitude-frequência e de estabilidade de vertentes. **Revista do Departamento de Geografia**, n. 16, pp. 11-23.

CPRM (2006) **Mapa Geológico do Estado de São Paulo**, escala 1:750.000.

CPTEC (2010a) **Infoclima – Boletim de Informações Climáticas do CPTEC/INPE**, ano 17, n. 1, 3p.

CPTEC (2010b) **Chuvas de dezembro de 2009 e janeiro de 2010 em SP e RJ**. Disponível em: http://www7.cptec.inpe.br/~rupload/arquivo/Chuva_fim_de_ano_SP_RJ_2_.pdf. Acesso em 10/01/2017.

CRUZ, O. (1974) **A Serra do Mar e o litoral na área de Caraguatatuba-SP: contribuição à geomorfologia litorânea tropical**. Série teses e monografias, n. 11, IGEOG-USP.

DOURADO, F.; FERNANDES, N.F. (2013) Os escorregamentos da Enseada do Bananal e do Morro da Carioca em Angra dos Reis na baía de Ilha Grande-RJ. In: **Interações Homem-Meio nas zonas costeiras – Brasil/Portugal**, UERJ, pp. 139-146.

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



FERNANDES, N.F. *et al* (2001) 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, pp. 51-71.

GUZZETTI, F. *et al.* (2007) Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe. **Meteorology and Atmospheric Physics**, n. 98, pp. 239-267.

GUZZETTI, F. *et al.* (2008) The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: an update. **Landslides**, n. 5, pp. 3-17.

INSTITUTO GEOLÓGICO (2015) Mapeamento de riscos associados a escorregamentos, inundações e corridas de massa – Relatório Técnico / município de Itaoca, SP. **Boletim do Instituto Geológico**, n. 64, 34p.

ISTO É (2010) Devastados pela fúria da natureza. **Revista Isto É**, n. 2096, 13/01/2010. Disponível em: http://istoe.com.br/38879_DEVASTADOS+PELA+FURIA+DA+NATUREZA/. Acesso em: 08/01/2017.

SCHUMM, S.A. (1973) Geomorphic thresholds and complex response of drainage systems. In: MORISAWA, M (Ed.) **Fluvial Geomorphology**. New York: State University of New York, pp. 299-310.

SCHUMM, S.A. (1979) Geomorphic thresholds: the concept and its applications. **Transactions of the Institute of British Geographers**, v. 4, n. 4, pp. 485-515.

SILVEIRA, C.T. *et al.* (2014) Mapeamento preliminar da suscetibilidade natural a movimentos de massa da Serra do Mar Paranaense apoiado na análise digital do relevo. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 15, n. 1, pp. 3-22.

STABILE, R.A. *et al* (2013) Análise de fatores condicionantes de instabilizações em encostas como subsídio para a modelagem estatística da suscetibilidade a deslizamentos. In: 14º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental – CBGE, 2013, Rio de Janeiro (RJ). **Anais do 14º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental – CBGE**, São Paulo: ABGE, 2013

TATIZANA, C. *et al.* (1987a) Análise de correlação entre chuvas e escorregamentos – Serra do Mar, município de Cubatão. In: **Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia**, 5, 1987, São Paulo. Anais, São Paulo: ABGE, v. 2, pp. 225-236.

TATIZANA, C. *et al.* (1987b) Modelamento numérico de análise de correlação entre chuvas e escorregamentos aplicado às encostas da Serra do Mar, município de Cubatão. In: **Congresso**



Brasileiro de Geologia de Engenharia, 5, 1987, São Paulo. Anais, São Paulo: ABGE, v. 2, pp. 237-248.

TOMAZZOLI, E.R. (2012) Caracterização geológico-geomorfológica dos movimentos de massa ocorridos no Vale do Itajaí (Estado de Santa Catarina) – Brasil – em novembro de 2008. **Memórias e Notícias (Nova Série)** – Publicação do Departamento de Ciências da Terra e do Museu Mineralógico e Geológico da Universidade de Coimbra, v. Especial, pp. 1-20.

VIEIRA, B.C.; FERNANDES, N.F. (2004) Landslides in Rio de Janeiro: the role played by variations in soil hydraulic conductivity. **Hydrological Processes**, n. 18, pp. 791-805.

WOLLE, C.M.; CARVALHO, C.S. (1989) Deslizamentos em encostas na Serra do Mar – Brasil. **Solos e Rochas**, v. 12, pp. 27-36.