

UTILIZAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO TANK PARA PREVISÃO DE MOVIMENTO DE MASSA EM CARAGUATATUBA, SP

Graziela Balda Scofield^{1} & Leonardo Bacelar Lima Santos¹ & Javier Tomasella¹ & Anderson Sene Gonçalves¹ & Rochane de Oliveira Caram¹ & Aline Garcia Duarte¹ & Márcio Augusto Ernesto de Moraes¹*

Resumo – No Brasil, a maioria dos desastres naturais ocorrem devido a eventos extremos de tempo causando inundações e movimento de massa. O Cemaden foi constituído com a missão de implementar um sistema de previsão da ocorrência de desastres naturais em áreas suscetíveis em vários municípios brasileiros. Com relação à possibilidade de ocorrência de movimento de massa, foram definidos e são aplicados vários limiares de precipitação para emissão de alertas. Para complementar a informação dos limiares, está sendo estudado o procedimento desenvolvido e aplicado no Japão, que utiliza o modelo hidrológico tanque para obter a água armazenada no solo. Tendo a linha crítica de deslizamento, o índice de umidade do solo e a precipitação acumulada, é possível acompanhar e determinar se a área de risco estará suscetível ao movimento de massa. Para estimar os parâmetros do modelo *Tank*, o Algoritmo Genético foi empregado, tendo como função de aptidão o coeficiente Nash entre as vazões observada e estimada. Foram testadas duas condições para calcular o Nash: considerando todos os valores de vazões e apenas os valores de vazão superiores à vazão real média. Inicialmente, esta metodologia está sendo calibrada para o município de Caraguatatuba e posteriormente será empregada em outros municípios monitorados.

Palavras-Chave – modelo hidrológico, movimento de massa, precipitação.

THE USE OF THE TANK HYDROLOGICAL MODEL FOR THE FORECAST OF MASS MOVEMENT IN CARAGUATATUBA, SP

Abstract – In Brazil, the majority of natural disasters occur due to extreme events of weather causing floods and mass movement. The mission of Cemaden is to perform a forecast system of natural disaster occurrence in susceptible areas of several Brazilian cities. With regard to the possibility of occurrence of mass movement, several thresholds of precipitation to predict this disaster were defined and are applied to send alerts. To complement the information of thresholds, the procedure developed and applied in Japan is being studied which employs the hydrological model tank to determine the soil water index in the soil. With the critical line of landslide and the data of stored water and the accumulated precipitation, it is possible to follow and determine if the studied area is susceptible to mass movement. In order to estimate the parameters of the model Tank, the Genetic Algorithm was used, having as the fitness function the coefficient Nash between the observed and estimated flows. Two conditions were tested to calculate the Nash: considering all values of flow and only values of flow above the observed average flow. Initially, this methodology is being calibrated for Caraguatatuba and lately it will be applied in several monitored cities.

Keywords – hidrological model, landslide, precipitation.

¹ Cemaden – Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais {graziela.scofield, leonardo.santos, javier.tomasella, anderson.sene, aline.duarte, márcio.moraes}@cemaden.gov.br

INTRODUÇÃO

Os Desastres Naturais podem ser provocados por diversos fenômenos tais como deslizamentos de encostas, inundações, tempestades e erosão, que podem ocorrer naturalmente ou induzidos pelo homem. No Brasil, é expressivo o registro de desastres associados principalmente aos escorregamentos de solos e/ou rochas, as inundações e as enchentes e as tempestades, que acarretam prejuízos e perdas significativas, inclusive de vidas humanas. No estado de São Paulo, no período de 2000 a 2008, foram registrados 1.861 acidentes, distribuídos em torno de 50% (944) de inundações (incluindo enchentes e alagamentos), 19% (367) de escorregamentos, 4% (65) de raios, 27% (485) de acidentes diversos (chuvas fortes, vendavais, desabamentos de casas e muros, etc.) (Tominaga et al., 2009).

A possibilidade de previsão dos movimentos de massa, com antecedência apropriada, é importante para ações de prevenção e respostas que poderão reduzir ou eliminar as perdas humanas e materiais. Vários estudos foram desenvolvidos que correlacionaram os dados de duração e os índices pluviométricos à ocorrência de deslizamentos (Tatizana et al., 1987; Crosta e Frattini, 2001; Riekmann et al., (2011); Clarizia et al., 1996; e Guzzetti et al. 2008). Segundo Pereira et al. (2010), a principal vantagem operacional dos limiares de precipitação, que justifica a sua definição e aplicação aos sistemas de alerta, é a facilidade de obtenção dos dados de precipitação a baixo custo e para extensas áreas.

A partir das críticas em que não é a quantidade de precipitação, mas a quantidade de água que infiltra e se move no solo que causam as falhas, outros métodos para determinar o provável movimento de massa foram desenvolvidos. No Japão, os critérios de emissão de alertas são baseados no índice de umidade de solo e na taxa de precipitação acumulada. Este trabalho tem como objetivo estimar os parâmetros do modelo *Tank*. Inicialmente, os parâmetros foram estimados por tentativa e erro e neste trabalho, foi testado o Algoritmo Genético, implementado na linguagem C++ sob o paradigma da orientação a objetos, no código aberto POGA (Santos et al., 2011; Cortivo e Santos, 2012). A área de estudo é o município Caraguatatuba, localizado no litoral norte do estado de São Paulo. Este método poderá ser utilizado operacionalmente pelo Cemaden para gerar alertas de deslizamento inicialmente para a região estudada e posteriormente para outros municípios brasileiros.

ÁREA DE ESTUDO E DADOS UTILIZADOS

A área de estudo é o município de Caraguatatuba situado no Litoral Norte de São Paulo, como mostra a Figura 1. Nesta região, a presença da Serra do Mar traz complexidade para o escoamento atmosférico e causa fenômenos como chuvas orográficas, movimento de ar ascendente localizado e forçado, bloqueio das frentes frias ou quentes, entre outras. Esta área foi escolhida devido à ocorrência de muitos movimentos de massa principalmente durante o período chuvoso que acontece de 1º de dezembro até 31 de março.

Os dados de precipitação utilizados foram dos postos pluviométricos de Caraguatatuba e Porto Novo e fluviométrico da Fazenda Rio Claro. Na Tabela 1 é apresentada a localização. A bacia estudada é do rio Claro, sub-bacia do rio Juqueriquerê (419 Km²) localizada nos municípios de São Sebastião e Caraguatatuba, que possui uma área de drenagem de aproximadamente de 72 Km². Segundo Amaral (2011), esta região possui o relevo definido pelos contornos escarpados da Serra do Mar, denominada de Serra do Juqueriquerê. De acordo com a classificação proposta por Almeida (1964), a bacia do rio Claro pertence à formação geomorfológica da Serrania Costeira, região do litoral norte drenada diretamente para o mar.

Tabela 1 – Postos pluviométricos e fluviométrico utilizados

Postos	Código	Nome do posto	Latitude	Longitude
pluviométrico	E2-046	Caraguatatuba	23°38'	45°26'
pluviométrico	E2-128	Porto Novo	23°42'	45°27'
fluviométrico	2E-048	Fazenda Rio Claro	23°41'58"	45°29'05"

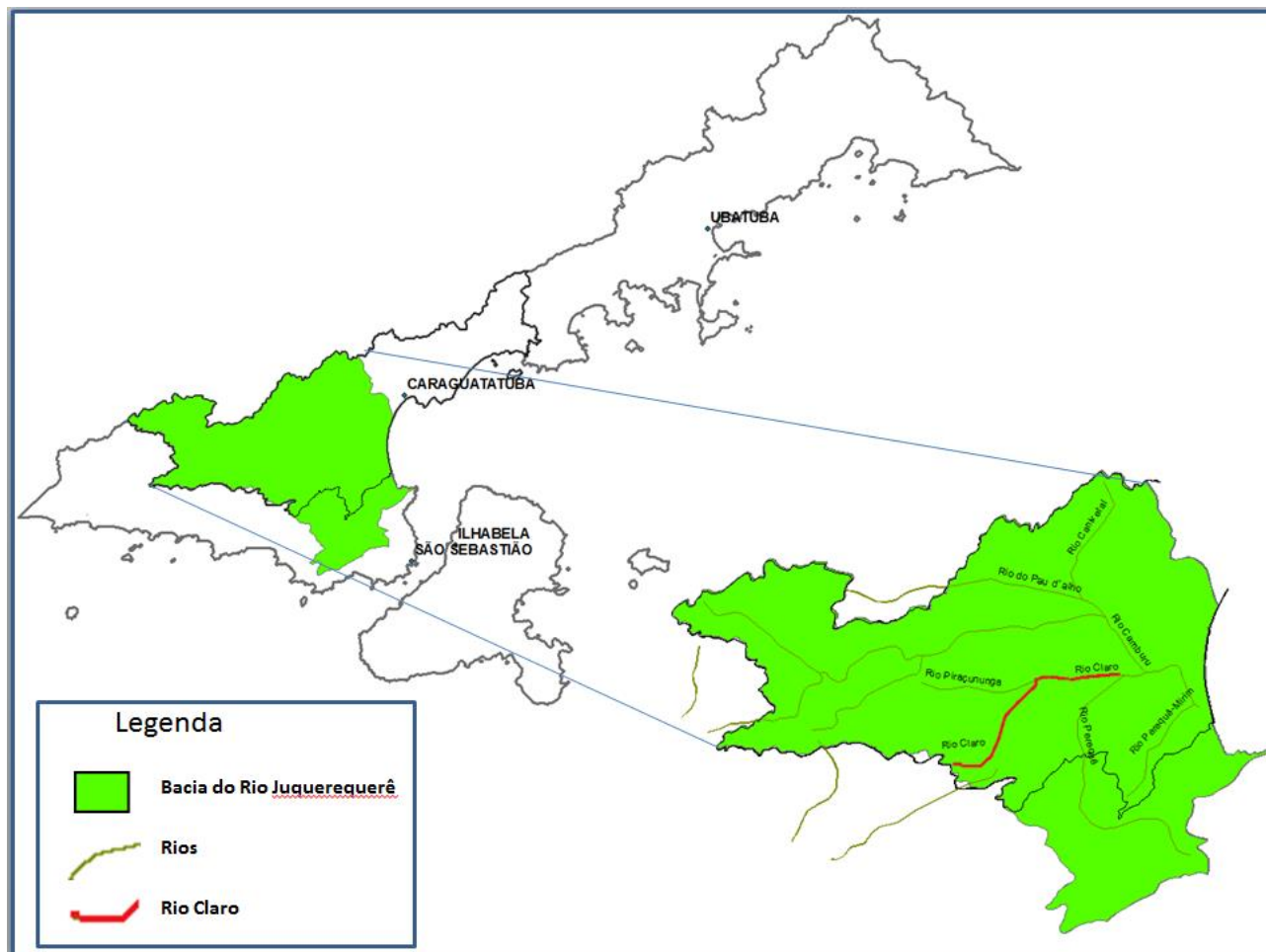


Figura 1 – Localização do Rio Claro no município de Caraguatatuba, no Litoral Norte de São Paulo.

MODELO TANQUE – *Tank Model*

O modelo hidrológico *Tank Model*, determinístico, concentrado, conceitual, de multicomponentes e não linear foi desenvolvido por Sugawara (Sugawara et al., 1974; Sugawara, 1995). Para Stanescu e Musy (2006), o *Tank Model* é um modelo quase distribuído, do tipo reservatório, em que a bacia é dividida em áreas de umedecimento sucessivo, com a precipitação considerada sobre cada uma dessas áreas.

A Figura 1 mostra a representação esquemática do *Tank Model* em relação ao perfil de uma encosta. No modelo *Tank Model* a precipitação (P) é adicionada e a evapotranspiração real (ETR) é subtraída. Se não ocorre água no reservatório superior ou de topo, a ETR é retirada do segundo tanque. Se não houver água nos reservatórios superior e segundo, a ETR é retirada do terceiro reservatório, e assim por diante. As saídas dos orifícios laterais são responsáveis pelos escoamentos. As saídas do reservatório de topo são consideradas como escoamento superficial e subsuperficial, a saída do segundo reservatório como escoamento intermediário, do terceiro reservatório como

escoamento de sub-base e a saída do quarto reservatório como escoamento de base (Sugawara, 1995).

Os parâmetros de armazenamento de cada reservatório governam a infiltração e o escoamento, dependendo da posição da saída e da profundidade de armazenamento. O escoamento somente ocorre quando o nível de água representado pelo armazenamento de cada reservatório (S_1, S_2, S_3 e S_4) for maior do que a sua saída lateral (HA_1, HA_2, HB_1, HC_1 e HD_1). Nota-se que HD_1 foi considerado igual a zero, já que a saída do tanque D se encontra no fundo do mesmo. O escoamento de cada saída é dependente dos coeficientes de escoamento superficiais A_1, A_2, B_1, C_1 e D_1 e dos coeficientes de infiltração A_0, B_0 e C_0 . O escoamento total (Q) é a soma do escoamento dos escoamentos das saídas horizontais dos reservatórios. Após o cálculo do armazenamento dos 4 reservatórios, é calculado o índice de umidade (IU) que é a soma do armazenamento de cada um dos reservatórios (S_1, S_2, S_3 e S_4).

A calibração do *Tank Model* consiste na comparação dos dados observados com os resultados da simulação, se os dados de vazão observados e estimados não se ajustarem de acordo com uma função de erro, é necessário o ajuste dos parâmetros. Setiawa; Fukuda e Nakano (2003) buscaram o sucesso da técnica de otimização dos parâmetros do *Tank Model* utilizando o coeficiente de correlação linear (R), Erro Relativo (RE), erro médio quadrático (*Root Mean Square Root* - RMSE), coeficiente de Nash Sutcliffe (Nash) e coeficiente de Nash para os logaritmos das vazões (Nashlog).

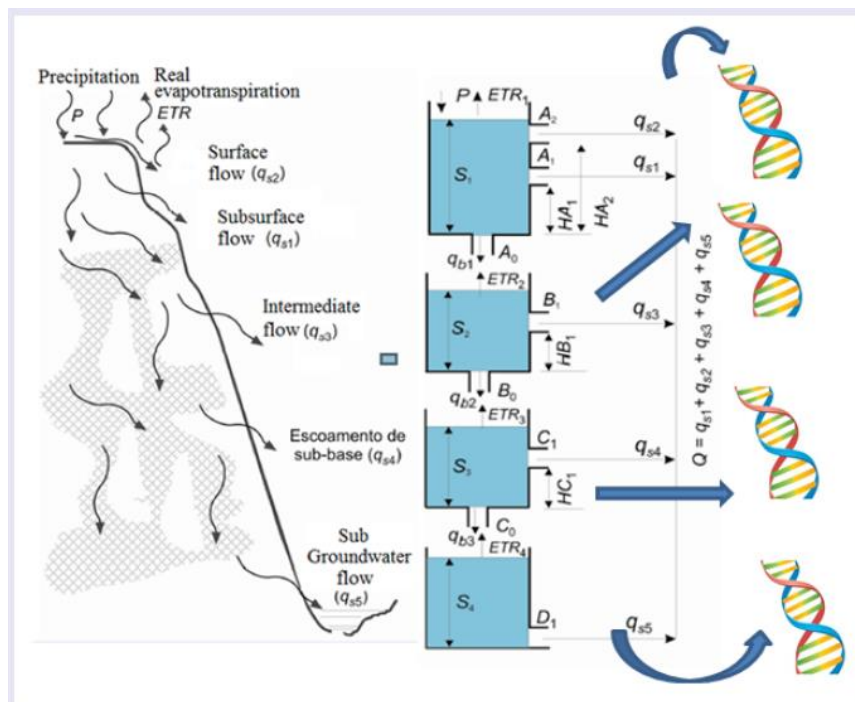


Figura 2 – Modelo Tank. Representação esquemática do “Tank Model” em relação ao perfil de uma encosta. S_i é a altura de água do reservatório i ; q_{si} é o escoamento lateral do reservatório i ($i=1, 2, 3$ e 4); $A_0, A_1, A_2, B_0, B_1, C_0, C_1, D_1, HA_1, HA_2, HB_1$ e HC_1 são coeficientes do modelo de acordo com as características físicas da bacia; t é o tempo; P é a precipitação; ETR_i é a evapotranspiração real do reservatório i ; e q_{bi} é a infiltração e/ou percolação do reservatório i ($i=1, 2$ e 3) para as camadas inferiores do solo (FONTE: Modificado de Lindner, 2007).

No Japão, os critérios de emissão de alertas aplicados ao movimento de massa são baseados em modelo empírico que utiliza o índice de umidade de solo (IU) e a taxa de precipitação acumulada. As etapas necessárias para a obtenção da linha crítica do diagrama de índice de umidade do solo x chuva acumulada para as áreas estudadas são: a obtenção dos dados horários e dos acumulados de

chuva a partir dos dados de radar meteorológico ou estação pluviométrica para cada evento de deslizamento; a determinação do número de reservatórios a serem utilizados para a área de estudo; a determinação de todos os coeficientes do *Tank Model* para a obtenção do índice de umidade do solo; a validação do *Tank Model*, analisando a sensibilidade de cada coeficiente; e construção do diagrama de índice de umidade do solo e chuva acumulada. Para se determinar a linha crítica (CL), devem-se utilizar os dados históricos de chuva referente à ocorrência de movimento de massa.

POGA

Problemas inversos (PI), de forma geral, e problemas de estimação de parâmetros, em particular, podem ser utilizados quando se tem um “efeito” (uma medida) e é preciso encontrar as suas “causas” (parâmetros) (Santos et al., 2011). Ao encontrar os valores de tais parâmetros e aplicá-los ao problema direto (“causas” gerando “efeitos”) é possível obter os observáveis em questão. O acompanhamento e a previsão de séries temporais de chuva e vazão dos principais rios brasileiros configura recurso fundamental para sistemas de monitoramento e alertas de desastres naturais (DN) (Santos e Linhares, 2012).

O PI é resolvido como um problema de otimização, com o emprego de um Algoritmo Genético - implementado na linguagem C++ sob o paradigma da orientação a objetos, no código aberto POGA. A codificação genética leva cada parâmetro do modelo hidrológico *Tank* em um gen com as devidas restrições físicas, e a função *fitness* (função de aptidão) retorna o coeficiente Nash entre a vazão observada e a estimada, considerando todos os valores de vazões do período e também tomando apenas os valores de vazão superiores à vazão real média. No POGA, é usada a codificação binária e a mutação aleatória uniforme.

RESULTADOS

A calibração do modelo *Tank* consiste na comparação dos dados observados com os resultados simulados, através do POGA, no qual o desempenho do conjunto de dados gerados pelo algoritmo genético é obtido através da função *fitness*, que retorna o coeficiente Nash entre as vazões.

A Figura 3(a) apresenta o hidrograma para o Rio Claro para o período de 5 de dezembro de 1980 a 5 de dezembro de 1981. O Nash encontrado pelo POGA para as vazões real e estimada foi de 0,70. Este melhor valor foi encontrado para os valores de vazão superiores à vazão real média.

Vale salientar que o POGA foi executado a fim de executar os parâmetros do modelo *Tank* e não as suas condições iniciais. Desta forma, os armazenamentos iniciais foram simulados de tal forma que os tanques 1 e 2 encontram-se vazios, enquanto que os outros tanques possuem 100 e 200 mm, respectivamente para o tanque 3 e 4. Desta forma, a primeira parte da série de dados foi, portanto desprezada, para evitar a forte influência das condições iniciais. Portanto, o período analisado foi de 5 de dezembro de 1980 a 5 de dezembro de 1981, sendo um ano de observações - conjunto que propiciou o melhor NASH. A Tabela 1 apresenta os valores dos parâmetros do modelo *Tank* encontrados para obter o Nash de 0,7.

O índice de água no solo é a soma dos armazenamentos nos quatro tanques. Com relação ao armazenamento, presente na Figura 3(b) notou-se a presença de uma oscilação sazonal, ou seja, o aumento significativo no verão devido as maiores taxas de precipitação nesta estação e a diminuição no inverno quando ocorre a estiagem no Litoral Norte de São Paulo.

Tabela 1- Valores dos parâmetros do modelo *Tank* encontrados para obter NASH de 0,7.

Tanque	Armazenamento Inicial (mm)		Altura dos tanques (mm)		Coeficientes laterais (mm)		Coeficientes de fundo (mm)	
	Tanque 1	S_1	0	HA_2	116	A_2	0,05	A_0
			HA_1	0,2	A_1	0,04	-	-
Tanque 2	S_2	0	HB	125	B_1	0,62	B_0	0,16
Tanque 3	S_3	100	HC	51.25	C_1	0,39	C_0	0,28
Tanque 4	S_4	200	-	-	D_1	0,06	-	-

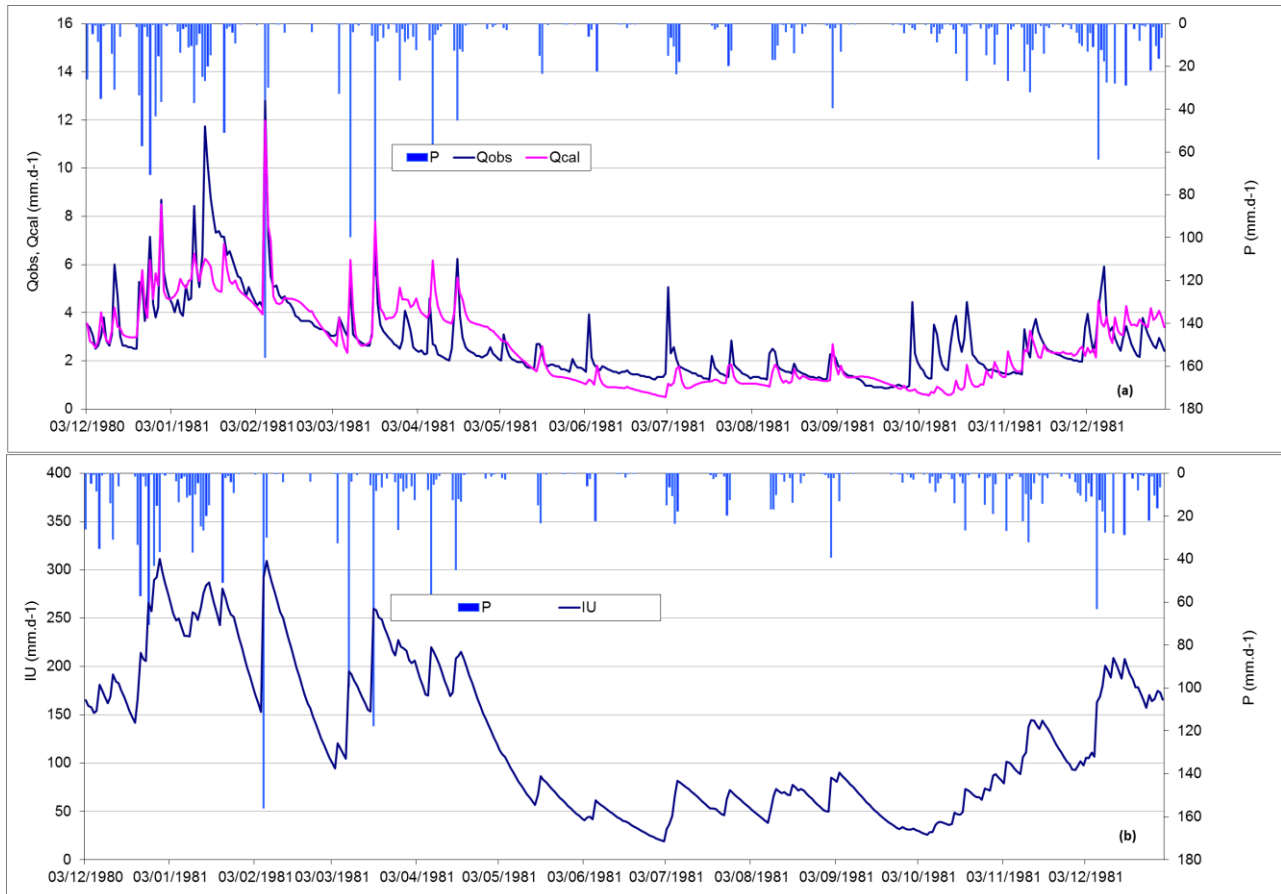


Figura 3 – (a) Hidrograma e (b) índice de água no solo para o Rio Claro para o período de 5 de dezembro de 1980 a 5 de dezembro de 1981.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Inicialmente, os parâmetros do modelo *Tank* foram encontrados por tentativa e erro, e com isso o Nash não ultrapassava o valor de 0,26. Com o emprego do POGA, o Nash alcançou o valor de 0,70. Dentre as perspectivas em relação ao POGA, está o uso de operadores genéticos não tradicionais para o processo de otimização - ex. operador epidêmico (Santos et al., 2011), com o intuito de melhorar o valor do Nash obtido.

Outros testes para a calibração dos parâmetros do modelo *Tank* serão feitos utilizando o POGA e o método *Shuffled Complex Evolution* (SCE-UA) (Duan; Gupta; Sorooshian, 1993). O SCE-UA baseia-se na combinação de abordagens probabilísticas e determinísticas, conceito de aglomerado, conceito de evolução sistemática de pontos englobados no espaço e conceito de evolução competitiva.

Após a determinação dos parâmetros do modelo *Tank*, é necessário realizar a análise histórica dos movimentos de massa ocorridos no município de Caraguatatuba para a obtenção do diagrama com a linha crítica de deslizamento. Estes deslizamentos estão sendo encontrados nos relatórios das instituições responsáveis pelo Plano Preventivo de Defesa Civil (PPDC) de São Paulo, na Defesa Civil do município e nos jornais de circulação municipal, estadual e nacional.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte financeiro do CNPq (402240/2012-0).

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, F. F. M. (1964). Fundamentos geológicos do relevo paulista. In: SÃO PAULO INSTITUTO GEOGRÁFICO E GEOLÓGICO. Geologia do Estado de São Paulo. São Paulo. pp. 169-263. (Boletim, 41).
- AMARAL, J.F. (2010) Análise do Transporte de Sedimentos na Bacia do Rio Claro. Trabalho de Graduação – Divisão de Engenharia Civil – Instituto Tecnológico de Aeronáutica. http://www.civil.ita.br/graduacao/tgs/resumos/2010/TGIEI_004_Joice.pdf
- CLARIZIA, M, GULLA, G, SORBINO, G (1996). Sui meccanismi di innesco dei soil slip. In *Proceedings of I International conference Prevention of Hydrogeological Hazards: the role of scientific research*. pp. 585–597.
- CORTIVO, F. D. ; SANTOS, L. B. L. (2012). Comparação entre um Algoritmo Genético e uma Rede Neural Artificial na Estimativa de Parâmetros em Oscilações Harmônicas. In *Anais DO XXXIV Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional, 2012, Águas de Lindóia*.
- CROSTA, G. B.; FRATTINI, P. (1983). Rainfall thresholds for triggering soil slips and debris flow. In *Proceedings of II Egs Plinius Conference On Mediterranean Storms, Siena. 1983*, pp. 463-487.
- DUAN, Q.; GUPTA, V.K.; SOROOSHIAN, S. (1993). A Shuffled Complex Evolution Approach for Effective and Efficient Global Minimization. *Journal of Optimization Theory and its Applications* 76(3), pp 501-521.
- GUZZETTI F., PERUCCACCI S. ROSSI M. STARK C.P. (2008). The rainfall intensity duration control of shallow landslides and debris flows: an update. *Landslides* 5(1), pp. 3-17.
- LINDNER, E. A. (2007). Estudo de eventos hidrológicos extremos na bacia do rio do Peixe–SC com aplicação de índice de umidade desenvolvido a partir do Tank Model. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).
- PEREIRA, S.; ZÊZERE, J. L.; BATEIRA C. (2010). Potencialidades dos limiares empíricos de precipitação para o desencadeamento de fluxos de detritos e de lama na região Norte. In *Anais do VI Seminário Latino-americano de Geografia Física, Portugal*. Disponível em: <<http://www.uc.pt/fluc/cegot/VISLAGF/actas/ind4>>. Acesso em: 09 jan. 2012.
- RIEKMANN, C. G.; PINHEIRO, A.; TACHINI, M. (2010). Estudo da relação entre precipitações e deslizamentos em áreas de risco em Blumenau – SC. In *I Anais do Simpósio de Águas da AUGM, Blumenau, 2010*.
- SCOFIELD, G. B.; D’ANGELIS, C.F.; SOUSA JR., W. C. (2011). Climatologia da precipitação para o município de Caraguatatuba, SP. In *Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Maceió*.
- SANTOS, L.B.L.; CAMPOS VELHO, H. F. ; CHIWIACOWSKY, L.D. (2011) Análise de robustez do método híbrido de estimação de dano estrutural. *TEMA. Tendências em Matemática Aplicada e Computacional*, 13, pp. 245-252.

SANTOS, L. B. L.; LINHARES, C.A. (2012). Avaliando eficácia e eficiência na delimitação de bacias hidrográficas usando diferentes fontes de dados altimétricos. In *Anais do Simpósio Brasileiro Sobre Desastres Naturais*, Rio Claro. (ISBN - 978-85-61203-18-4).

SETIAWAN, B., FUKUDA, T.; NAKANO, Y. (2003). Developing Procedures for Optimization of Tank Model's Parameters. *Agricultural Engineering International: the CIGR Journal of Scientific Research and Development*. Manuscript LW 01 006.

STANESCU, V. A.; MUSY, A. (2006). VICAIRE – Module 1B. In *Virtual Campus In Hydrology and Water Resources VICAIRE project*. Disponível em: http://hydram.epfl.ch/VICAIRE/mod_1b/chapt_8/text.htm. Acesso em: 10 jun 2012.

SUGAWARA, M. (1995) Tank Model. In *Computer models for watershed hydrology*. Org. by SINGH, V.P. Water Resource Publications, Colorado - USA, pp.165 - 214.

SUGAWARA, M., OZAKI, E., WATANABE, I. E Y. KATSUYAMA (1974). Tank model and its application to Bird Creek, Wollombi Brook, Bikin River, Sanaga River and Nam Mune. *Research Notes of the National Research Center for Disaster Prevention (Tokyo)*, 11, pp.1-64,

TATIZANA, C., OGURA, A. T., CERRI, L. E. S.; ROCHA, M.C.M. (1987). Análise de correlação entre chuvas e escorregamentos na Serra do Mar, município de Cubatão. In: *Anais do V Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia*, São Paulo, 1987, p.225-236,

TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL R. (2009) *Desastres naturais: conhecer para prevenir*. Instituto Geológico: São Paulo. 196p. Disponível em: http://www.igeologico.sp.gov.br/ps_down_outros.asp. Acesso em: 20 jun. 2012.

(ISBN 978-85-87235-09-1).