

PREVISÃO DO RISCO DE ESCORREGAMENTOS DE TALUDES A PARTIR DE UM MODELO FUZZY

Sieira, A. C. C. F.^a, Silva, M. A.^a, Neto, L. B.^a

^a*Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, PGECIV, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, sieira@uerj.br*

Keywords: Estabilidade de Taludes; Condicionantes Geológicos e Geotécnicos; Lógica Fuzzy.

Abstract. A estabilidade de taludes naturais é um tema de grande interesse ao engenheiro geotécnico, face às significativas perdas econômicas, e até mesmo humanas, resultantes da ruptura de taludes. Estima-se que a deflagração de escorregamentos já provocou milhares de mortes, e dezenas de bilhões de dólares em prejuízos anuais em todo o mundo. Os fenômenos de instabilização de encostas são condicionados por muitos fatores, como o clima, a litologia e as estruturas das rochas, a morfologia, a ação antrópica e outros. A análise dos condicionantes geológicos e geotécnicos de escorregamentos proporciona a apreciação de cada um dos fatores envolvidos nos processos de instabilização de encostas, permitindo a obtenção de resultados de interesse, no que diz respeito ao modo de atuação destes fatores. O presente trabalho tem como objetivo a utilização da Lógica Nebulosa (Fuzzy) para criação de um Modelo que, de forma qualitativa, forneça uma previsão do risco de escorregamento de taludes em solos residuais. Como “experiência” do especialista para a elaboração do modelo, foi analisado um extenso banco de dados de escorregamentos na cidade do Rio de Janeiro, disponibilizado pela Fundação Geo-Rio. Dentre as principais conclusões, destaca-se a potencialidade da lógica nebulosa na previsão de risco de escorregamentos de taludes em solo residual, aparecendo como uma ferramenta capaz de auxiliar na detecção de áreas de risco.

1 INTRODUÇÃO

Movimentos de massa são episódios de extrema importância, resultantes da atuação de processos geomorfológicos nas mais diversas escalas de tempo. Dentro deste cenário, destacam-se os escorregamentos, ou deslizamentos nas encostas, os quais trazem enormes prejuízos econômicos, e, com frequência, levam à perda de muitas vidas (Amaral, 1997).

Nos grandes centros urbanos, os escorregamentos assumem frequentemente proporções catastróficas, uma vez que os inúmeros cortes, aterros, depósitos de lixo, desmatamentos, modificações na drenagem, entre outras agressões, geram novas relações com os condicionantes naturais (Augusto Filho e Virgili, 1998). Conseqüentemente, torna-se difícil a efetiva previsão destes fenômenos em uma determinada paisagem.

A utilização de modelos matemáticos de previsão de áreas susceptíveis a escorregamentos depende, diretamente, de uma melhor compreensão dos diferentes mecanismos e fatores condicionantes envolvidos. Somente um estudo minucioso dos fatores geotécnicos e geológicos torna possível o desenvolvimento de novos modelos capazes de prever o risco de escorregamentos.

Este trabalho apresenta o uso de Lógica Fuzzy para a criação de um modelo que, de maneira qualitativa, fornece uma previsão do risco de escorregamentos a partir de dados de inspeção de campo. A área estudada foi a Cidade de Rio de Janeiro, Brasil, tão suscetível à ocorrência deste tipo de fenômeno.

2 LÓGICA FUZZY

2.1 Fonte de Dados e Experiência

A Fundação Geo-Rio, órgão da Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro, foi escolhida como fonte de dados, e principalmente, fonte de experiência a ser capturada pela lógica fuzzy. Os técnicos desta Fundação efetuam em média 2.200 vistorias anuais. Desde sua criação, mais de 3.500 obras de contenção foram executadas nas encostas da Cidade, contribuindo para o aumento da segurança e o aprimoramento do conhecimento da Geotecnia no Rio de Janeiro.

Da necessidade de avaliar, cadastrar e mapear criteriosamente as condições das encostas do município do Rio de Janeiro, a Geo-Rio criou um Banco de Dados de Acidentes Geológicos/Geotécnicos, o Inventário de Escorregamentos do Rio de Janeiro, que é uma fonte de consulta importante sobre escorregamentos de taludes no município.

2.2 Ferramenta Numérica e Fatores Adotados na Concepção do Modelo

O software utilizado para a implementação da lógica fuzzy foi o MATLAB, que é uma ferramenta que dispõe de recursos gráficos úteis para um bom gerenciamento na criação do modelo.

Na elaboração do modelo, foram inseridas oito variáveis de entrada, associadas aos condicionantes envolvidos na instabilização de taludes, e uma variável de saída, que é a previsão do risco de escorregamento (PRE). Adicionalmente, foram definidas as regras que fazem parte do processo de inferência Fuzzy (Figura 1).

As variáveis consideradas no modelo foram: altura e inclinação da encosta, ângulo de atrito do solo, pluviosidade, drenagem, vegetação, ocupação da encosta e espessura de solo (Silva, 2008). A Tabela 1 apresenta os termos lingüísticos (adjetivos) que foram adotados para cada variável. A escolha das variáveis de entrada e dos adjetivos procurou considerar as informações coletadas sobre estabilidade de taludes, e as particularidades a respeito do meio tropical úmido brasileiro. Adicionalmente, o julgamento de engenharia e a experiência da Geo-Rio foram fundamentais na definição de cada variável e nos pesos correspondentes,

tendo em vista que algumas variáveis são mais significativas do que outras no desencadeamento de processos de escorregamento.

No estabelecimento dos adjetivos das variáveis geométricas da encosta (Altura e Inclinação), a lógica fuzzy baseou-se na literatura existente e, principalmente, em observações de campo da Geo-Rio, tomando como base as alturas e inclinações mais suscetíveis a escorregamentos. Para ambas as variáveis, foram atribuídos os adjetivos Baixa, Média e Alta.

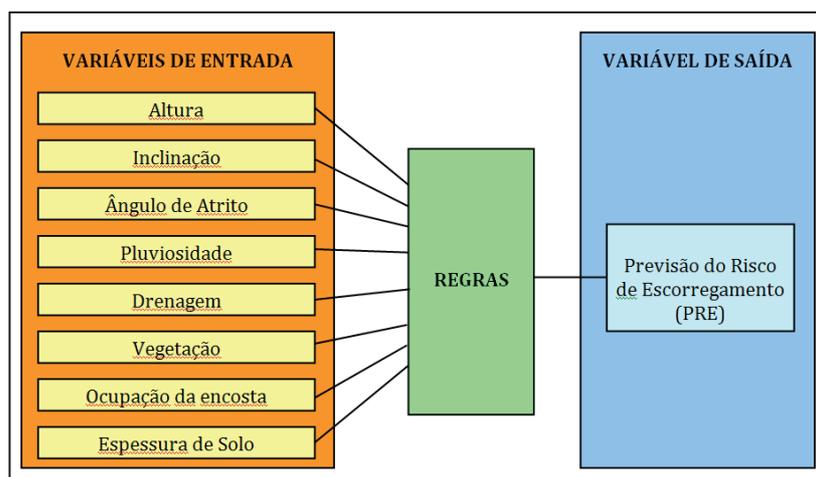


Figura 1. Modelo de Inferência Fuzzy

Variável Lingüística	Termos Lingüísticos (Adjetivos)			
Entrada				
Altura	Baixa	Média	Alta	
Inclinação	Baixa	Média	Alta	
Ângulo de Atrito	Baixo	Médio	Alto	
Pluviosidade	Leve	Moderada	Forte	
Drenagem	Ineficiente	Pouco Eficiente	Eficiente	
Vegetação	Rasteira	Arbustiva	Arbórea	
Ocupação da Encosta	Desordenada	Pouco Ordenada	Ordenada	
Espessura de Solo	Delgada	Espessa	Muito Espessa	
Saída				
Previsão do Risco	Inexistente	Baixo	Médio	Alto

Tabela 1. Valores lingüísticos propostos para as variáveis

A faixa de valores de ângulo de atrito (20° a 44°) foi definida com base em valores disponíveis na literatura, representativos de solos residuais do Rio de Janeiro (Sandroni, 1985). Para esta variável, foram atribuídos os adjetivos Baixo, Médio e Alto.

A pluviosidade é um fator preponderante na avaliação da suscetibilidade a escorregamentos de taludes, pois uma precipitação prolongada implica em uma infiltração contínua, com conseqüente saturação do solo e perda de resistência.

Para a definição dos adjetivos e pertinências da variável pluviosidade, tomou-se como base a classificação apresentada na Tabela 2. No entanto, de forma a minimizar o número de adjetivos e conseqüente número de regras, optou-se por agrupar as classificações Forte e Muito Forte, sem que haja perda na eficiência do modelo.

Classificação	Intensidade da chuva (mm/h)
Leve	1,1 a 5,0
Moderada	5,1 a 25,0
Forte	25,1 a 50,0
Muito Forte	> 50,0

Tabela 2. Intensidade das Chuvas: Alerta Rio

A drenagem é um fator que tem influência direta na dinâmica dos processos erosivos e dos movimentos de massa. Quanto mais eficiente for o sistema de drenagem, menor será a infiltração de água no solo e, portanto, menor será a suscetibilidade à ocorrência de escorregamentos. A partir da análise de laudos de vistoria (Figura 2), observou-se que apenas 23% dos casos analisados ocorreram em taludes com drenagem eficiente, salientando a importância da drenagem, seja natural ou construída. Para a variável drenagem, foram atribuídos os adjetivos: Ineficiente, Pouco Eficiente e Eficiente.

Com relação à variável vegetação, adotou-se com premissa a altura da vegetação para a definição dos adjetivos Rasteira, Arbustiva e Arbórea. O modelo fuzzy considerou que quanto maior for a altura da vegetação, menor será a suscetibilidade de escorregamentos.

A forma de ocupação de uma encosta influencia diretamente na estabilidade, podendo criar, acelerar, e/ou ampliar processos de instabilização. Segundo análise dos laudos da Geo-Rio (Figura 3), 60% das vistorias foram realizadas em áreas onde a ocupação da encosta é desordenada. Nestas áreas, são realizados desmatamentos, cortes e aterros para a construção de moradias, sem acompanhamento técnico. Como implicações, observam-se taludes de corte sem a devida estabilização e áreas irregulares de descarte de lixo. Ou seja, as áreas com ocupação desordenada apresentam maior suscetibilidade a escorregamentos. Para esta variável, foram atribuídos os adjetivos: Ordenada, Pouco Ordenada e Desordenada.

A espessura de solo residual também é um fator importante no desencadeamento de escorregamentos. Em regiões de clima tropical, é usual a ocorrência de camadas espessas, tendo em vista o favorecimento dos fenômenos de intemperismo químico.

A experiência da Geo-Rio (Figura 4) mostra que 63% das encostas vistoriadas apresentam espessura de solo delgada, sugerindo que camadas delgadas são mais suscetíveis à ocorrência de escorregamentos. Por outro lado, quanto maior for a espessura de solo, maior será o volume de material disponível para escorregamento. Neste trabalho, considerou-se que camadas de solo delgadas apresentam risco de escorregamento, e camadas muito espessas também, existindo uma faixa intermediária mais favorável à estabilidade. Para a variável Espessura de Solo, foram atribuídos os adjetivos: Delgada, Espessa e Muito Espessa.

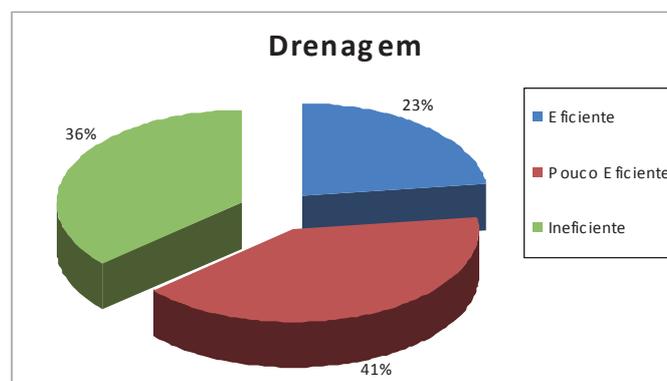


Figura 2. Eficiência da drenagem nas encostas vistoriadas pela Geo-Rio

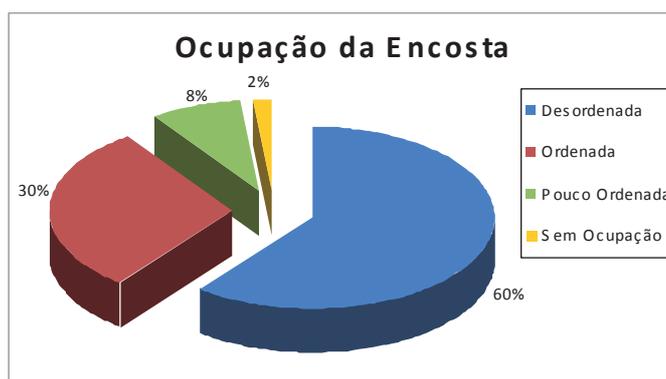


Figura 3. Tipo de ocupação nas encostas vistoriadas pela Geo-Rio

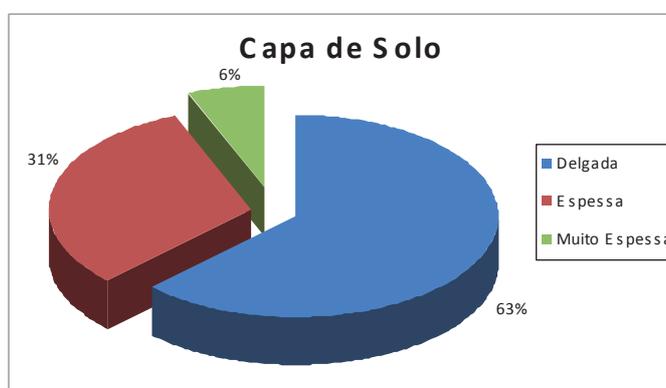


Figura 4. Espessuras de capa de solo das encostas vistoriadas pela Geo-Rio

Finalmente, para a variável de saída do sistema, denominada Previsão do Risco de Escorregamento (PRE), foram definidos quatro adjetivos: Inexistente, Baixo, Médio, e Alto. Para esta variável, adotou-se uma escala de 0 a 100, onde se convencionou que quanto menor o valor desta variável, menor será o risco de escorregamento.

A Tabela 3 reúne as funções de pertinência de cada um dos adjetivos das variáveis utilizadas na concepção da lógica fuzzy, e os correspondentes valores dos números fuzzy.

2.3 Inferência Fuzzy, Regras e Defuzzificação

O Sistema de Inferência Fuzzy (SIF) adotado neste trabalho foi baseado no Método de Mandani e Assilian (1975). Este método foi escolhido pela facilidade em expressar as regras lógicas, aproximando-se do modo de raciocínio dos especialistas.

Após o estudo dos diversos fatores condicionantes e dos dados da Geo-Rio, foram definidas 144 regras que fazem parte da base de regras do Sistema de Inferência Fuzzy.

Durante a definição das regras, procurou-se excluir as regras que não se aplicavam a nenhuma situação possível, como [Se Drenagem é Eficiente E Pluviosidade é Leve Então a Previsão é de Risco Alto], e as regras que não influenciam de forma significativa o risco de escorregamento, como [Se Inclinação é Baixa E Capa de Solo é Espessa Então a Previsão é de Risco Baixo].

Durante a modelagem verificou-se, também, que algumas regras deveriam possuir pesos inferiores, tendo em vista que a combinação das variáveis dessas regras possuía uma influência menor na suscetibilidade a escorregamentos. Para realizar a defuzzificação foi utilizado o método do centróide, que calcula o centro de gravidade da figura gerada na fase de inferência, obtendo o valor determinístico da variável de saída (PRE).

Adjetivos	Tipo da Função	Valor dos Números Fuzzy		
		$\mu = 0$	$\mu = 1$	$\mu = 0$
Altura (m)				
Baixa	Linear Decrescente	-	0	8
Média	Triangular	5	15	25
Alta	Trapezoidal	20	25 a 45	-
Inclinação (°)				
Baixa	Linear Decrescente	-	0	15
Média	Triangular	12	22	32
Alta	Trapezoidal	28	40 a 90	-
Ângulo de Atrito (°)				
Baixo	Trapezoidal	-	20 a 22	25
Médio	Triangular	22	27	32
Alto	Trapezoidal	29	34 a 45	-
Drenagem (%)				
Ineficiente	Linear Decrescente	-	0	40
Pouco Eficiente	Triangular	10	50	90
Eficiente	Linear Crescente	60	100	-
Vegetação (m)				
Rasteira	Triangular	0	0,75	1,5
Arbustiva	Triangular	1,25	2,25	3,25
Arbórea	Trapezoidal	2,75	3,5 a 6	-
Ocupação da Encosta				
Desordenada	Triangular	0	20	40
Pouco Ordenada	Triangular	30	55	80
Ordenada	Trapezoidal	70	98 a 100	-
Espessura de Solo (m)				
Delgada	Trapezoidal	-	0 a 1	2
Espessa	Trapezoidal	1,5	2,5 a 3,5	4,5
Muito Espessa	Trapezoidal	4	4,5 a 5	-
Previsão do Risco de Escorregamento (%)				
Inexistente	Trapezoidal	-	0 a 25	50
Baixo	Triangular	45	60	75
Médio	Triangular	62,5	75	87,5
Alto	Trapezoidal	75	90 a 100	-

Legenda: μ = Grau de Pertinência

Tabela 3. Valores dos números fuzzy das variáveis da lógica nebulosa (Silva et al, 2009)

3 ESTUDO DE CASO

A Figura 5 mostra a localização da área estudada (Ramos, 1991). No local, conhecido como Parque do Licurgo, existe uma favela com habitações de nível variado, possuindo rede de esgotos e de água, apenas no trecho da rua Licurgo.

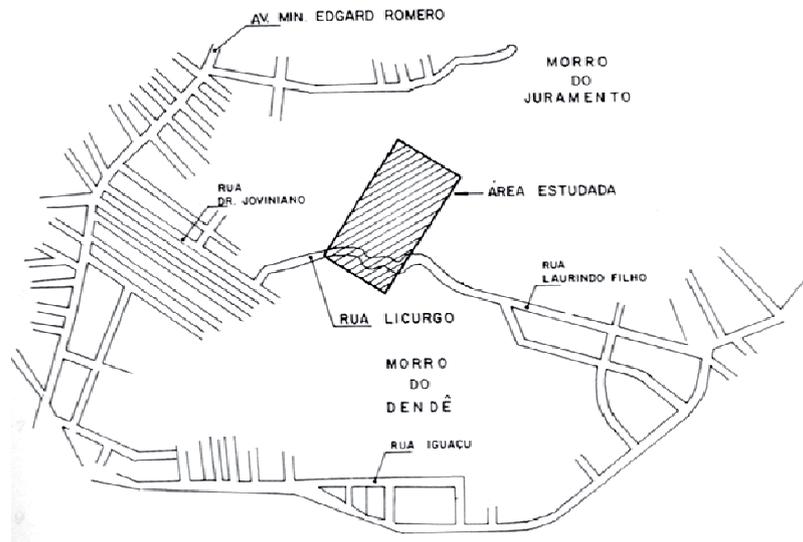


Figura 5. Localização do Acidente (Ramos, 1991)

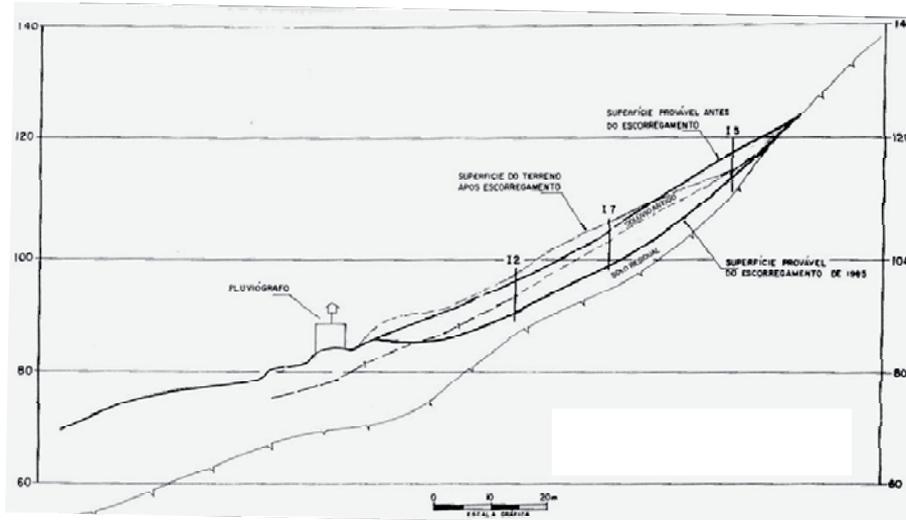
No talvegue esquerdo deste vale ocorreu, em fevereiro de 1988, um escorregamento de grandes proporções na parte superior da encosta. Este escorregamento atingiu cerca de 30 barracos, destruindo-os totalmente. Não houve prejuízo de vidas graças ao tipo de movimento que permitiu que a área fosse desocupada.

Segundo o laudo de vistoria elaborado pela Fundação Geo-Rio, a massa de solo com espessura de 4 a 6 m começou a se movimentar lentamente, com formação de trincas nas casas e tubulações, ganhando uma velocidade maior, posteriormente, quando muitas casas e muros ruíram e postes foram derrubados. À medida que a água existente era drenada naturalmente, a velocidade do movimento foi diminuindo lentamente.

Todo o processo de escorregamento ocorreu em um intervalo de 40 dias. Durante este período, verdadeiras fendas se abriram no solo e blocos rochosos soergueram-se, com surgência de água em vários pontos.

3.1 Descrição do Subsolo

O subsolo no local do escorregamento (Figura 6) é constituído por uma camada de colúvio (silte arenoso e areia fina e média), com espessura máxima de 8 metros, com origem diferenciada, inclinação de 15° e nível d'água alto. Subjacente ao colúvio, ocorre uma camada de solo residual jovem, caracterizado por resistência à penetração alta e crescente com a profundidade. O manto de solo residual é bastante espesso nas cotas mais baixas e de menor declividade, onde apresenta cerca de 12 metros de espessura, mas vai diminuindo nas cotas mais altas, onde a encosta é mais íngreme, até desaparecer. Resultados de ensaio de cisalhamento direto, executados por Clementino (1993), forneceram ângulo de atrito da camada de solo residual igual a 28°.



Legenda: I2, I5 e I7 – Inclinômetros

Figura 6. Perfil Simplificado da Encosta (Ramos, 1991)

Durante o período de 2 a 22 de fevereiro de 1988 ocorreram no Rio de Janeiro chuvas intensas e contínuas, com registros de inúmeros casos de deslizamentos de taludes. No posto pluviométrico situado próximo da área em estudo, registrou-se em fevereiro/1988 um índice de 550 mm para uma média anual de 1161 mm. O caráter excepcional desse período chuvoso consistiu não só na grande intensidade das precipitações, como também na longa duração das mesmas. Este último fator foi responsável pelo grande número de casos catastróficos registrados, já que o comportamento das encostas foi normal até o 9º dia de chuva.

Após a instalação do pluviômetro na encosta do Licurgo, foram realizados registros no período de 12/03/90 a 21/01/91, gerando pluviogramas que estão apresentados em forma de gráfico, mostrado pela Figura 7.

O único período de chuvas intensas, mas de curta duração, ocorreu entre os dias 18/04/90 e 02/05/90, tendo-se neste período um volume acumulado de 280mm com intensidade máxima registrada de 20mm/h durante duas horas. Na chuva de 11/01/01 chegou-se a registrar intensidade de 30mm/h durante 1 hora. Nos demais períodos ocorreram apenas chuvas esparsas e de pequena intensidade. No período de 10 meses e 7 dias o volume total de chuva acumulada foi de 809mm para uma média anual de 1161mm nesta área.

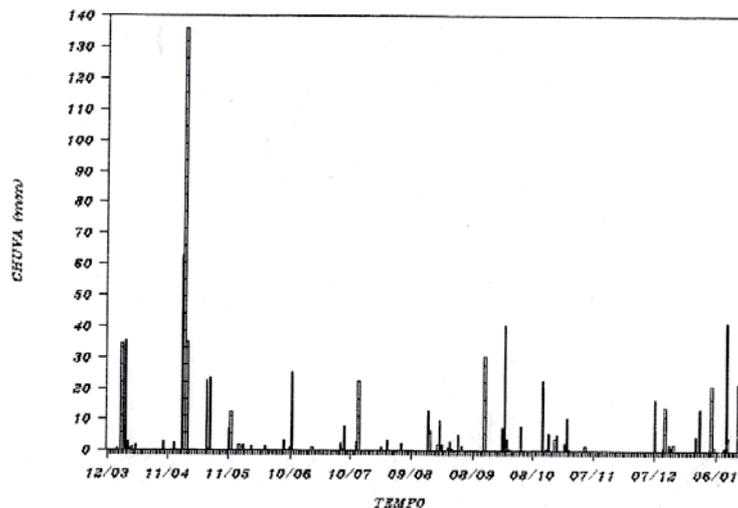


Figura 7. Pluviometria – Licurgo (Ramos, 1991)

3.2 Análises de Estabilidade: Métodos de Equilíbrio Limite x Lógica Fuzzy

Ramos (1991) executou análises de estabilidade por métodos de equilíbrio limite, para a condição pós-escorregamento. Este tipo de análise permite a obtenção de fatores de segurança, para diferentes superfícies potenciais de ruptura. As análises basearam-se nos níveis piezométricos registrados durante as chuvas de Abril de 1990. Durante estas chuvas, observou-se movimentação na parte superior do talude, com aparecimento de trincas.

A análise foi procedida por Ramos (1991) admitindo-se superfícies de ruptura quaisquer. O autor variou o intercepto coesivo do solo entre 0 e 8kPa, e obteve um fator de segurança mínimo de 1,08 ($c=0$) e máximo de 1,36 ($c=8\text{kPa}$). Desta forma, Ramos (1991) concluiu que o talude após o escorregamento é instável para as situações formuladas, sendo necessária a execução de obras de estabilização.

Com base nos fatores de segurança obtidos por Ramos (1991), procedeu-se à previsão do risco de escorregamento, para a condição pós-escorregamento, utilizando o modelo Fuzzy.

Os dados de pluviometria correspondem a uma condição de pluviosidade forte. A Tabela 4 indica os valores adotados no modelo proposto.

Variáveis	Variável Lingüística	Valor Adotado	Caixa Input
Altura (m)	Alta	40	[40 28 28 42.3 0 0.5 5 12]
Inclinação (°)	Média	28	
Ângulo de Atrito (°)	Médio	28	
Pluviosidade (mm/h)	Forte	42,3	
Drenagem (%)	Ineficiente	0	
Vegetação (m)	Rasteira	0,5	
Ocupação da Encosta	Desordenada	5	
Capa de Solo (m)	Espessa	12	

Tabela 4. Valores Iniciais das Variáveis (Silva et al, 2009)

Após a inserção dos dados no modelo fuzzy foi previsto um valor de PRE para a situação após o escorregamento de 84,7% (Silva, 2008), correspondendo a um risco alto de escorregamento. Este resultado concorda com as análises por equilíbrio limite executadas por Ramos (1991).

Os resultados indicam que o talude após o escorregamento é instável, tanto pela lógica fuzzy (análise qualitativa), quanto pela análise quantitativa executada por Ramos (1991).

4 CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou a aplicação da lógica fuzzy na avaliação do risco de escorregamentos de taludes. Como experiência para a introdução das variáveis de influência no modelo, buscou-se analisar uma quantidade significativa de laudos de vistoria da Fundação Geo-Rio. Os laudos concentraram-se na cidade do Rio de Janeiro, tão suscetível a escorregamentos de massa de solo residual.

Na idealização do modelo, foram adotadas as seguintes variáveis como condicionantes geológico-geotécnicos envolvidos em escorregamentos em solo residual: altura e inclinação da encosta, espessura da capa de solo, ocupação da encosta, tipo de vegetação, ângulo de atrito do solo, eficiência do sistema de drenagem e pluviosidade. A estas variáveis foram atribuídos adjetivos e pesos, com base na experiência da Geo-Rio. Como resposta, obteve-se a previsão do risco de escorregamento (PRE).

O estudo do caso histórico mostrou que as análises realizadas utilizando o modelo Fuzzy refletiram satisfatoriamente os resultados apresentados por Ramos (1991) em análises por equilíbrio limite (análises quantitativas).

Face ao exposto, destaca-se a aplicabilidade do Modelo Fuzzy na Previsão do Risco de Escorregamento de Taludes. Esta ferramenta mostra-se válida para ser utilizada no monitoramento das encostas.

REFERÊNCIAS

- Amaral, C.P. *Escorregamentos no Rio de Janeiro. Inventário, Condicionantes Geológicas e Redução do Risco*. 1997. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC/RJ. 1997.
- Augusto Filho, O., Virgili, J.C. 1998. *Estabilidade de taludes* In: Oliveira, A.M.S.; Brito, S.N.A. (Eds.). *Geologia de Engenharia: ABGE*, 1998. Cap.15, p. 15-38.
- Clementino, R. V. *Características dos Solos Coluvionares e Residuais de Granito do Escorregamento da Rua Licurgo – RJ*. 1993. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro/UFRJ, 1993.
- Mamdani, E.H; Assilian, S. *An experiment in Linguistic synthesis with a Fuzzy Logic Controller*. 1975. IEE trans. Internat. J. Man-Machine Studies, v. 7, n. 1, p. 1-13, 1975.
- Ramos, M.O. *Instrumentação e Análise de Escorregamento em Solo Residual Ocorrido na Rua Licurgo, Serra da Misericórdia - Rio de Janeiro*. 1991. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro/UFRJ, 1991.
- Silva, M. A. *Aplicação de lógica nebulosa para previsão do risco de escorregamentos de taludes em solo residual*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civi, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2008
- Silva, M. A.; Biondi Neto, L.; Sieira, A. C. C. F. *Aplicação de Lógica Nebulosa Para Previsão do Risco de Escorregamento de Taludes*. In: Congresso Ibero Latino Americano de Métodos Computacionais em Engenharia, 2009.