

Previsão do risco de escorregamentos de taludes a partir de um Modelo Fuzzy

M.A. da Silva, L.B. Neto, A.C.C.F. Sieira, R.L. Feijó

Recibido: Marzo 2008, Aceptado: Junio 2008

©Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España 2011

Resumen 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, entre 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 Fuzzy para criação de um modelo que, de forma qualitativa, forneça uma previsão do risco de escorregamento de taludes. Para a elaboração do modelo, foi analisado um extenso banco de dados de escorregamentos na cidade do Rio de Janeiro, disponibilizado pelo Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro (Fundação Geo-Rio). Dentre as principais conclusões, destaca-se a potencialidade da Lógica Fuzzy na previsão de risco de escorregamentos de taludes, aparecendo como uma ferramenta capaz de auxiliar na detecção de áreas de risco.

PREDICTION OF LANDSLIDES RISK WITH FUZZY LOGIC

Summary The stability of slopes is a topic of great interest to the geotechnical engineer, given the significant economic losses, and even human, resulting from the slopes collapse. It's estimated that the landslides outbreak has already caused thousands of deaths and tens of billions of dollars in annual losses worldwide. The phenomena of instability of slopes are conditioned by many factors, such as climate, the lithology and structures of rock, the morphology, the anthropic and others. The analysis of geological and geotechnical conditions of landslides provides an appraisal of each of the factors involved in the processes of instability of slopes, allowing the achievement of results of interest with regard to the mode of action of factors. The current work aims at the use of Fuzzy Logic to create a model that, in qualitative form, provide an estimate of the risk of landslides on the slope of residual soil. To the development of the model was examined an extensive database of landslides in Rio de Janeiro, provided by the Geo-Rio Foundation. Among the main findings includes the capability of Fuzzy Logic in predicting risk of landslides on the slope of residual soil, appearing as a tool capable of assisting in the detection of areas of risk.

1. Introdução

Movimentos de massa são episódios de extrema importância, resultantes da atuação de processos geomorfológicos nas mais diversas escalas temporais. Dentro deste cenário, destacam-se os escorregamentos, ou deslizamentos nas encostas, os quais trazem enormes pre-

juízos econômicos, bloqueiam vias expressas e, com frequência, levam à perda de muitas vidas [1].

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 fatores condicionantes naturais associados à geomorfologia e à geologia [2, 4]. Conseqüentemente, torna-se muito 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 [11].

Somente um estudo minucioso dos condicionantes possibilita o conhecimento necessário para o desenvolvimento de novas abordagens e modelos capazes de prever o risco de escorregamentos. Em geral, os métodos de análise de estabilidade necessitam do conhecimento dos parâmetros de resistência dos materiais envolvidos. A possibilidade de previsão de deslizamentos de massa de solo com dados retirados de laudos de vistoria no campo aparece como uma alternativa atraente para um parecer preliminar do comportamento da encosta.

O presente trabalho tem como objetivo a utilização da Lógica Fuzzy para criação de um modelo que, de forma qualitativa, forneça uma previsão do risco de escorregamento de taludes. A área estudada foi o Estado do Rio de Janeiro, Brasil, tão susceptível à ocorrência de escorregamentos de massas de solo residual.

2. Condicionantes geológico-geotécnicos envolvidos na estabilidade de taludes

Os fenômenos de instabilização de encostas envolvem uma variedade de processos e fatores que dispõem possibilidades ilimitadas de classificação. O termo escorregamento é utilizado no sentido de abranger todo e qualquer movimento coletivo de materiais terrosos e/ou rochosos, independentemente da diversidade de processos, causas, velocidades, formas e demais características [7].

Os condicionantes geoambientais à ocorrência de escorregamentos são aqueles que compõem o meio ambiente, e que influenciam no desenvolvimento dos movimentos de massa. Pode-se incluir entre esses condicionantes os que formam os agentes preparatórios ou predisponentes dos eventos, compreendendo os aspectos lito-estruturais, geomorfológicos e climáticos. Distinguem-se ainda, as conseqüências da interação desses condicionantes, constituindo elementos como os per-



Figura 1. Localização dos pluviômetros na cidade do Rio de Janeiro: Alerta Rio

fis de intemperismo, vegetação e hidrogeologia das encostas, diretamente ligados à deflagração de escorregamentos, sob determinadas condições. A ação antrópica, em geral, constitui um importante condicionante de instabilização de encostas.

O papel do clima relaciona-se, principalmente, à precipitação. A elevada umidade provoca o encharcamento do solo, favorecendo os movimentos de massa. As medidas de pluviosidade fornecem uma aproximação da intensidade da chuva [6]. Com uma precipitação pluvial prolongada, a infiltração é contínua. Como conseqüência, ocorre a saturação do solo, reduzindo a coesão, e a resistência desse material à erosão. Augusto Filho e Virgili [2] comentam que as chuvas atuam como o principal agente não antrópico na deflagração de escorregamentos no Brasil.

Com este objetivo, a Fundação Geo-Rio criou o Sistema Alerta Rio, na cidade do Rio de Janeiro. Este sistema foi idealizado em 1996, com 32 estações distribuídas pela cidade, como mostra a Figura 1, com o objetivo de emitir boletins de aviso à população sobre a chegada de chuvas intensas, capazes de gerar inundações de vias públicas ou deslizamentos em encostas. Cada estação pluviométrica tem seus dados repassados após o intervalo de 15min, via rádio, à Estação Central. A intensidade das chuvas é classificada de acordo com a Tabela 1. O sistema permite a elaboração de mapas com as condições de chuva na cidade (Figura 2).

Tabela 1. Intensidade das chuvas: Alerta Rio

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



Figura 2. Condições de chuvas na cidade do Rio de Janeiro: Alerta Rio

A vegetação, de maneira geral, protege o solo de fatores que condicionam os deslizamentos, como o aumento de escoamento superficial. A cobertura vegetal intercepta as águas pluviais reduzindo a energia cinética e favorecendo a infiltração.

Nos períodos de elevada pluviosidade, a água das chuvas penetra entre as discontinuidades do estrato superior da formação vegetal, atingindo o solo, gerando ravinas e canais de primeira ordem, que ocorrem especialmente se não houver uma cobertura composta de flora de porte arbustivo [6].

A presença de vegetação em taludes e encostas naturais é de grande importância no processo de estabilização. As raízes das plantas tendem a melhorar a qualidade do solo, aumentando sua resistência através do reforço mecânico das raízes e reduzindo o teor de umidade do solo, função desenvolvida pelas plantas através dos processos de transpiração e absorção.

Kanji [8], no entanto, salienta que esta contribuição fica restrita à espessura alcançada pelo comprimento das raízes. De acordo com Suarez [7], a influência da vegetação na estabilidade de taludes tem sido muito debatida nos últimos anos, deixando dúvidas na quantificação dos efeitos de estabilização da vegetação. No entanto, o autor comenta que o desmatamento tem sido identificado como um importante agente na instabilização de encostas urbanas.

A existência das diferentes formas de relevo, assim como dos diferentes tipos de estratos terrosos, depende fundamentalmente da litologia dos materiais constituintes ou que lhes deram origem.

Os condicionantes de caráter litológico são fundamentais nos processos de formação dos solos residuais e, portanto, nos fenômenos de instabilidade que ocorrem nos taludes constituídos por este tipo de solo.

O tipo de rocha define as características de permeabilidade e, portanto, o tipo de drenagem e textura, além da resistência ao intemperismo. A presença de fraturas tectônicas, ou resultantes de alívio de pressão, pode

gerar pontos de descontinuidade e menor resistência, constituindo-se em caminhos preferenciais à erosão e movimentos de massa [20].

A declividade natural ou resultante da intervenção humana nas encostas influencia no desencadeamento de movimentos de massa. Os condicionantes geomorfológicos incluem as formas de vertentes, a declividade, o aspecto, a amplitude de relevo, etc. Conforme observado por Netto [12], a drenagem exerce papel fundamental sobre o modelamento do relevo (formas de vertentes e vales), sendo uma variável especialmente importante em regiões tropicais úmidas.

A declividade fornece a medida de inclinação do relevo em relação ao plano do horizonte. A velocidade de deslocamento de material e, portanto, a capacidade de transporte de massas sólidas e líquidas, é diretamente proporcional à declividade. As declividades acima de 30° apresentam risco de deslizamentos mais frequente. Acima de 60° , a camada de solo residual é menos espessa o que, teoricamente, diminuiria o risco de escorregamentos.

A amplitude de relevo refere-se à variação de altura. Quando esta variação tem como cota mínima o nível de base geral, tem-se a altitude. A amplitude está relacionada ao encaixamento dos vales. Quanto mais elevado o valor da amplitude, maior a energia cinética aplicada às vertentes e, conseqüentemente, maior é a capacidade de deslocamento de material, principalmente se associada a elevadas declividades [19].

O tipo de material depositado sobre as vertentes também é importante. A presença tanto de mantos espessos de solo residual quanto de tálus contribuem para a ocorrência de escorregamentos [5]. Os depósitos de tálus são resultantes de movimentos de massa pretéritos e servem de fonte para novos movimentos de massa, principalmente em períodos de elevada pluviosidade [7].

O homem constitui o mais importante agente modificador da dinâmica das encostas. O avanço de diversas formas de uso e ocupação, para áreas naturalmente

susceptíveis aos movimentos de massa, acelera e amplia os processos de instabilização. As principais interferências antrópicas indutoras de escorregamentos são: modificação da geometria do talude, através de cortes ou aterros; alteração do regime hidrológico; eliminação ou modificação da cobertura vegetal da encosta.

Tais modos de atuação podem ser favoráveis ou desfavoráveis à manutenção da estabilidade, dependendo das peculiaridades da encosta. Em geral, a intervenção humana contribui para uma aceleração dos processos de denudação.

Os cortes de estradas e outras obras em áreas de declividade desfavorável e/ou que possuam características geológicas e geomorfológicas sujeitas a deslizamentos, aceleram estes processos [5, 6]. Além disso, o tráfego de veículos pesados provoca vibrações que detonam processos de instabilização de encostas [7]. O papel das atividades antrópicas como indutoras de deslizamentos é muito significativo, sendo muito frequentes os deslizamentos em encostas ocupadas durante períodos de chuvas intensas. O volume de material removido e transportado por água pluvial está relacionado à densidade de cobertura vegetal e à declividade, de forma que com o desmatamento, esses processos se tornam mais intensos, principalmente em pontos de alta declividade.

3. Lógica Fuzzy

A Teoria dos Conjuntos Fuzzy, Nebulosos ou Difusos, desenvolvida por Zadeh [21] executa o tratamento de informações incertas, imprecisas e vagas comumente encontradas nos problemas cotidianos e fornece a base matemática que permite o manuseio destas incertezas por intermédio da lingüística e cognição humanas.

A Lógica de Boole (Lógica Padrão) usa apenas os valores 0 e 1 para representar o grau de pertinência “ μ ” de uma variável, isto é “ $\mu=0$ ” não pertence ao conjunto e “ $\mu=1$ ” pertence ao conjunto. Na Teoria de Zadeh [21], um Conjunto Fuzzy é uma coleção de objetos com características comuns. No entanto, estes objetos, além de pertencer ou não ao conjunto, possuem diversas maneiras de se relacionarem ao conjunto, pois estão associados ao mesmo através de um grau de pertinência (μ), variável de 0 a 1. Com isso, há uma suavização na transição entre as condições de pertinência e não pertinência.

Um tratamento Fuzzy possui as seguintes etapas principais: fuzzificação, inferência, e defuzzificação. Tanscheit [18] sintetizou na Figura 3 um sistema típico de inferência Fuzzy. A fuzzificação é a primeira etapa do tratamento Fuzzy. Através da fuzzificação se efetua a transformação das variáveis que se encontram na forma determinística (número) em forma Fuzzy (pertinência).

A segunda etapa é a inferência Fuzzy, que consiste na avaliação das regras que relacionam as variáveis, conduzindo à conclusão final do sistema. Em um raciocínio Fuzzy o conhecimento é representado através de regras ou proposições. O raciocínio é efetuado através da inferência, que permite tirar conclusões (deduzir, concluir) partindo de fatos conhecidos.

A inferência possui duas fases distintas: a avaliação da implicação de cada regra, e a composição das conclusões de todas as regras em um valor consolidado. Existem muitos procedimentos inferenciais na Lógica Fuzzy, sendo mais utilizados os procedimentos Mandani e Takagi-Sugeno-Kang [10].

A defuzzificação é última etapa do tratamento Fuzzy. Nesta etapa, ocorre a transformação das variáveis que se encontram na forma fuzzificada para a forma determinística, definindo o valor real da saída. Os principais métodos para efetuar a defuzzificação são o Centro-de-Área (Centróide), o Centro-do-Máximo, a Média-do-Máximo e a Média-Ponderada [15].

A modelagem de um sistema Fuzzy será tão melhor quanto mais precisas forem as regras que mapeiam o comportamento do fenômeno em estudo. Para tanto, o conhecimento e a experiência de especialistas são levados em consideração, transformando subjetividade em graus de pertinência, raciocínio em base de regras, tomada de decisão em inferência/defuzzificação [13].

4. Elaboração da Lógica Fuzzy

4.1. 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 Nebulosa. 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 aprimorando 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.

Segundo dados fornecidos pela Geo-Rio, foram realizadas 1.179 vistorias, nos anos de 1998 a 2002, associadas aos principais eventos pluviométricos. A Figura 4 fornece o percentual de cada tipologia dos laudos supracitados. Observa-se que os escorregamentos em taludes

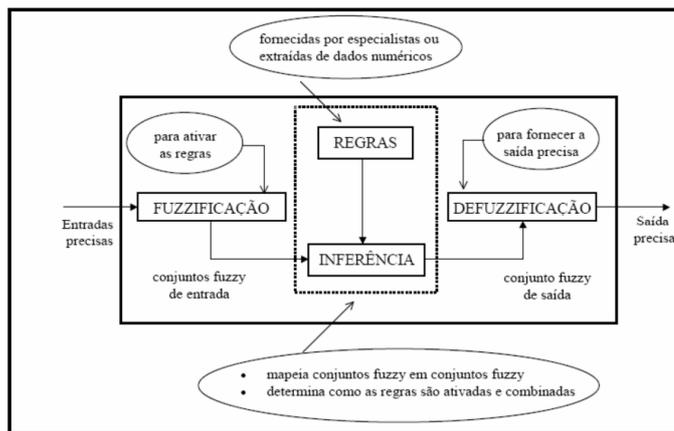
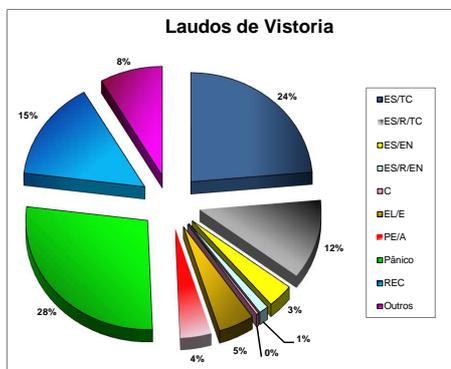


Figura 3. Sistema de inferência Fuzzy [18]



Legenda:

- ES/TS: Escorregamento em solo em talude de corte
- ES/R/TC: Escorregamento de solo/Rocha em talude de corte
- ES/EN: Escorregamento de solo em encosta natural
- C: Corrida de detritos
- EL/E: Escorregamento de lixo e entulho
- PE/A: Processo erosivo
- REC: Ruptura de estruturas de contenção

Figura 4. Percentual de cada tipo de movimento (Fonte: Geo-Rio)

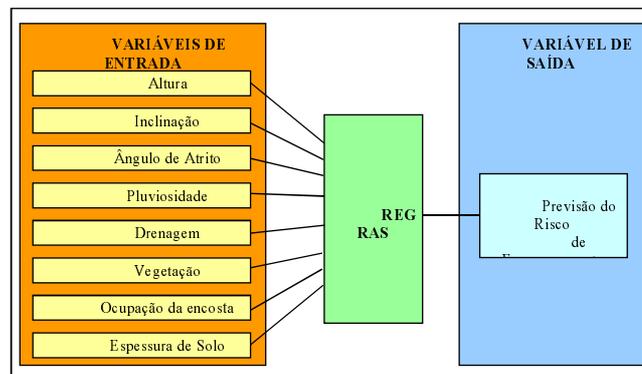


Figura 5. Modelo de inferência Fuzzy

de corte ou naturais, quando agrupados, representam 40% das vistorias.

4.2. 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. Adicionalmente, foram definidas as regras que fazem parte do processo de inferência Fuzzy (Figura 5).

Tabela 2. Valores lingüísticos propostos para as variáveis

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

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 [16]. A Tabela 2 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 susceptíveis a escorregamentos. Para ambas as variáveis, foram atribuídos os adjetivos Baixa, Média e Alta.

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 e Campos, 1974). Para esta variável, foram atribuídos os adjetivos Baixo, Médio e Alto.

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

Tabela 3. Intensidade das chuvas: Alerta Rio

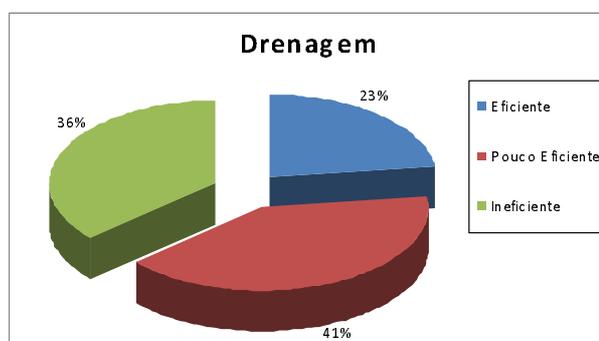
Classificação	Intensidade da chuva (mm/h)
Leve	1,1 a 5,0
Moderada	5,1 a 25,0
Forte	25,1 a 50,0
Muito forte	> 50,0

Para a definição dos adjetivos e pertinências da variável pluviosidade, tomou-se como base a classificação apresentada na Tabela 3. 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.

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 susceptibilidade à ocorrência de escorregamentos. A partir da análise de laudos de vistoria (Figura 6), 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 susceptibilidade 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

**Figura 6.** Eficiência da drenagem nas encostas vistoriadas pela Geo-Rio

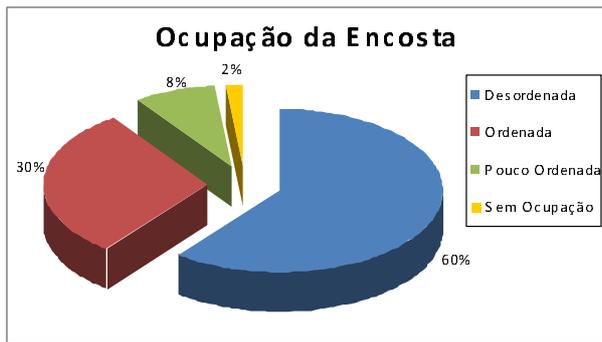


Figura 7. Tipo de ocupação nas encostas vistoriadas pela Geo-Rio

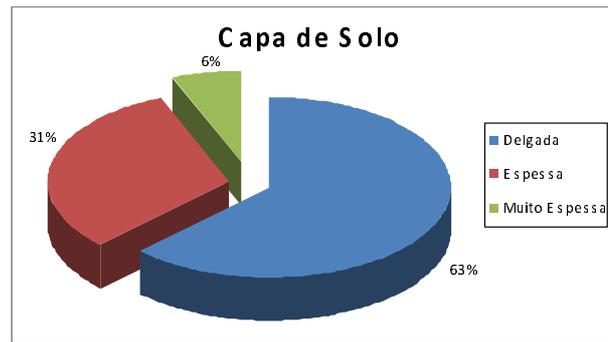


Figura 8. Tipo de ocupação nas encostas vistoriadas pela Geo-Rio

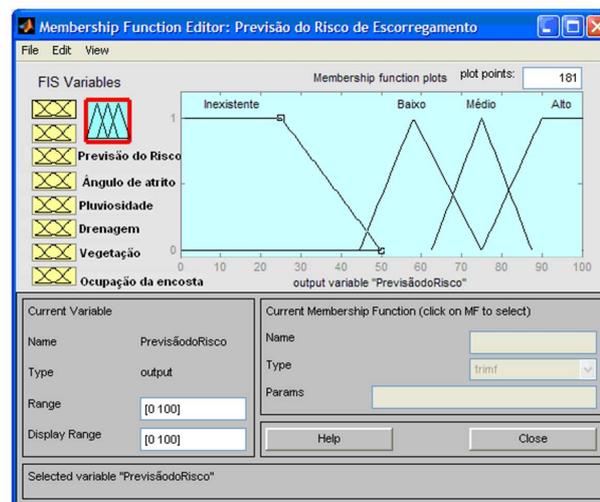


Figura 9. Espessuras de capa de solo das encostas vistoriadas pela Geo-Rio

laudos da Geo-Rio (Figura 7), 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 susceptibilidade 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 8) mostra que 63% das encostas vistoriadas apresentam espessura de solo delgada, sugerindo que camadas delgadas são mais susceptíveis à ocorrência de escorregamentos. Por outro lado, quanto maior for a espessura de solo, maior

será o volume de material disponível para escorregamento. Pinto (2002) assume que quanto maior a espessura, maior a susceptibilidade a escorregamentos. Neste trabalho, no entanto, 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.

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 Figura 9 apresenta as funções de pertinência dos adjetivos da variável de saída (PRE). O adjetivo Inexistente apresenta uma função de pertinência trapezoidal, com grau de pertinência igual a 1, para PRE inferiores a 20. Os adjetivos Baixo e Médio são representados por

Tabela 4. Valores dos números *fuzzy* das variáveis da Lógica Nebulosa [16]

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

funções triangulares, e o adjetivo Alto apresenta função trapezoidal, com grau 1, para PRE superiores a 90.

A Tabela 4 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.

4.3. Inferência Fuzzy, regras e defuzzificação

O Sistema de Inferência Fuzzy (SIF) adotado neste trabalho foi baseado no Método de Mandani e Assilian [9]. 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 análise dos dados da Geo-Rio, foram estabelecidas as 144 regras lógicas que fazem parte da base de regras do Sistema de Inferência Fuzzy.

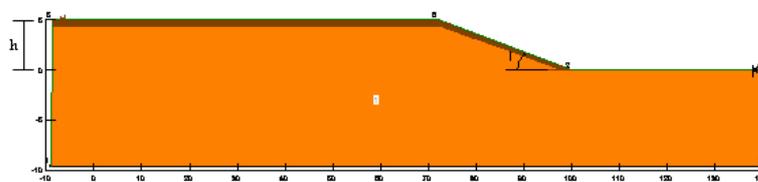
Durante a definição das regras, procurou-se excluir as regras que não se aplicavam a nenhuma situação

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 susceptibilidade 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).

5. Resultados do Modelo Fuzzy

Análises paramétricas foram executadas de forma a verificar a coerência do modelo e a influência de cada uma das variáveis adotadas na previsão do risco de escorregamento. Para tanto, foi definida uma geometria

Tabela 5. Valores iniciais das variáveis[16]

Legenda: h = Altura da encosta; I = Inclinação da face do talude

Variáveis	Variável lingüística	Valor Adotado
Altura (m)	Baixa	5
Inclinação (°)	Baixo	10
Ângulo de atrito (°)	Baixo	20
Pluviosidade (mm/h)	Leve	5
Drenagem (%)	Ineficiente	3
Vegetação (m)	Rasteira	0,5
Ocupação da encosta	Desordenada	15
Espessura de solo (m)	Delgada	1

padrão, com condições de drenagem, vegetação, pluviosidade, capa de solo e ocupação pré-estabelecidas.

A Tabela 5 apresenta os valores iniciais das variáveis do modelo. Após a inserção dos dados iniciais na caixa Input do programa, a Lógica Nebulosa forneceu uma Previsão do Risco de Escorregamento de 61,7 %, correspondendo a uma condição de Risco Baixo de Escorregamento, conforme definido na Tabela 4.

Uma vez determinada a previsão de risco de escorregamento do caso padrão, procedeu-se à variação de cada variável de influência do modelo: altura, inclinação, ângulo de atrito, pluviosidade, drenagem, vegetação, ocupação da encosta e espessura de solo.

A Figura 10 reúne os resultados das análises paramétricas. Observa-se que, variando-se a Altura do talude de 1m a 50m, foram obtidos PREs variando de 61,5 % (altura de 1m) a 78,3 % (altura de 50m). Os resultados apresentados na Figura 10a indicam que, mantidas as demais condições do caso padrão, ocorre um aumento significativo de PRE na faixa de transição entre taludes considerados médios e altos. Cabe ressaltar que o caso padrão analisado apresenta inclinação baixa, fato que justifica a faixa de valores de PRE entre os adjetivos Baixo e Médio.

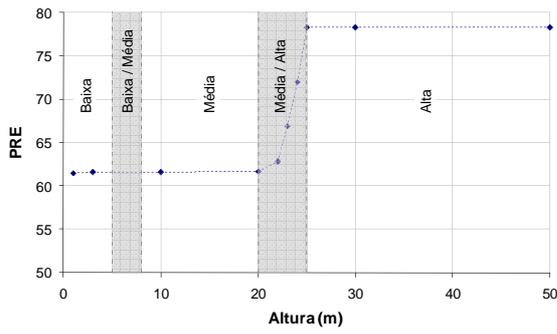
Na Figura 10b estão apresentados os resultados referentes à variação da Inclinação da face do talude. Variando-se a inclinação entre 0 e 50°, verificou-se que o PRE é baixo quando a inclinação é baixa e aumenta significativamente quando a inclinação aproxima-se e situa-se na zona de transição Baixa/Média, sendo então constante para inclinações iguais ou superiores à inclinação média. Certamente a constância do valor de PRE em 78,3 %, para inclinações médias e altas, está relacio-

nada à constância das demais variáveis utilizadas no modelo.

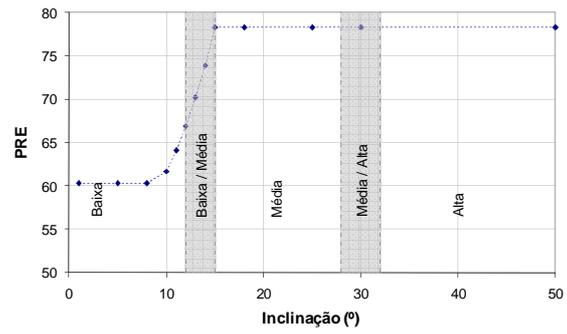
A Figura 10c mostra o efeito da variação do Ângulo de Atrito no valor de PRE. Uma variação de 20° a 45° provoca uma redução suave de PRE, sem ocorrência de variações abruptas entre as transições Baixo/Médio e Médio/Alto. Coerentemente, maiores valores de ângulo de atrito acarretam em menores riscos de ruptura.

Para analisar o efeito da pluviosidade, considerou-se uma variação de 1mm/h (pluviosidade leve) a 30mm/h (pluviosidade forte). Observa-se, na Figura 10d que o risco aumenta significativamente na transição entre pluviosidade leve e moderada, mantendo-se constante quando ocorre a transição entre pluviosidade moderada e forte. Certamente, a constância do valor de PRE em 79,4 %, para pluviosidades moderadas e fortes, está relacionada ao fato das variáveis capa de solo, drenagem, vegetação e geometria se manterem constantes. Nota-se que o talude padrão apresenta altura e inclinação baixas, o que justifica que este talude se mantenha estável, mesmo em épocas de pluviosidade alta.

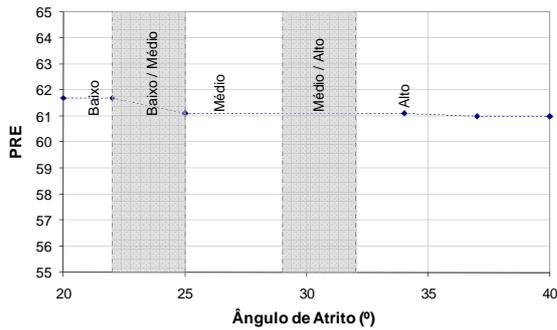
Na Figura 10e, apresenta-se a resposta do modelo para variações na eficiência do sistema de drenagem (0 a 100 %). Observa-se que a redução do risco de escorregamento ocorre na transição entre os sistemas de drenagem pouco eficiente e eficiente. No intervalo de eficiência entre 0 e 60 % (ineficiente a pouco eficiente), o valor de PRE manteve-se constante e igual a 61,7 %, uma vez que existem outras variáveis intervenientes no modelo que permaneceram constantes. Este valor representa um baixo risco de escorregamento. Para um sistema de drenagem eficiente, o valor de PRE de 47,6 % indica um risco na faixa de transição entre Baixo e Inexistente.



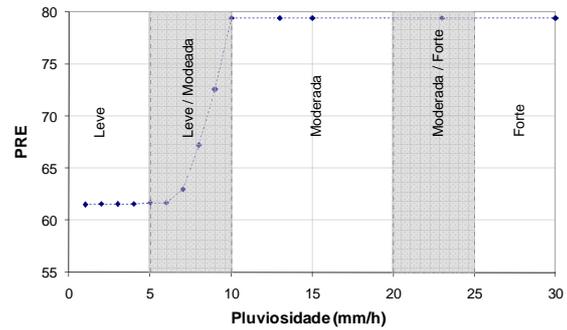
(a)



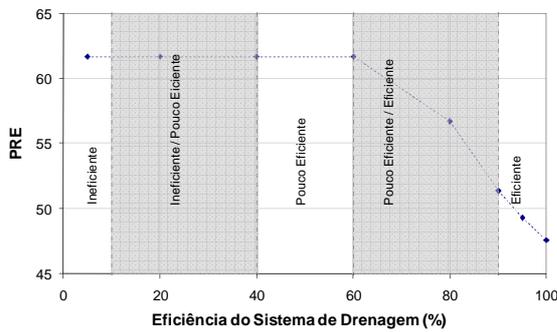
(b)



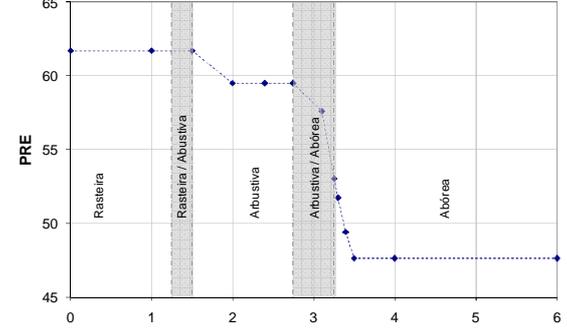
(c)



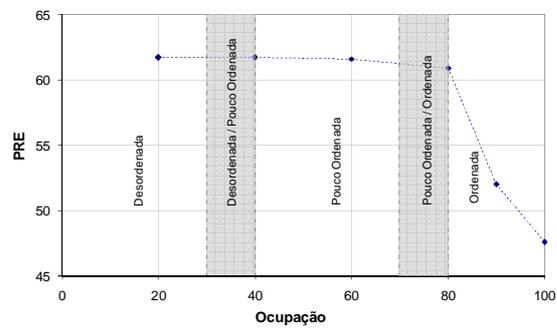
(d)



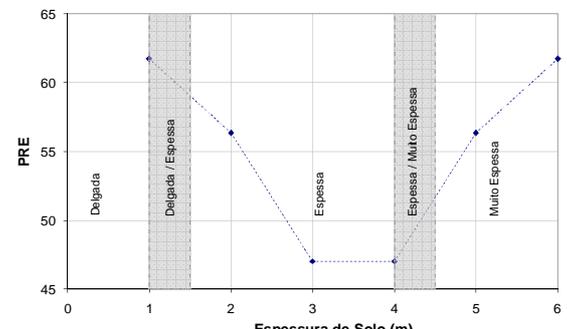
(e)



(f)



(g)



(h)

Figura 10. Funções de pertinência da variável de saída (PRE)

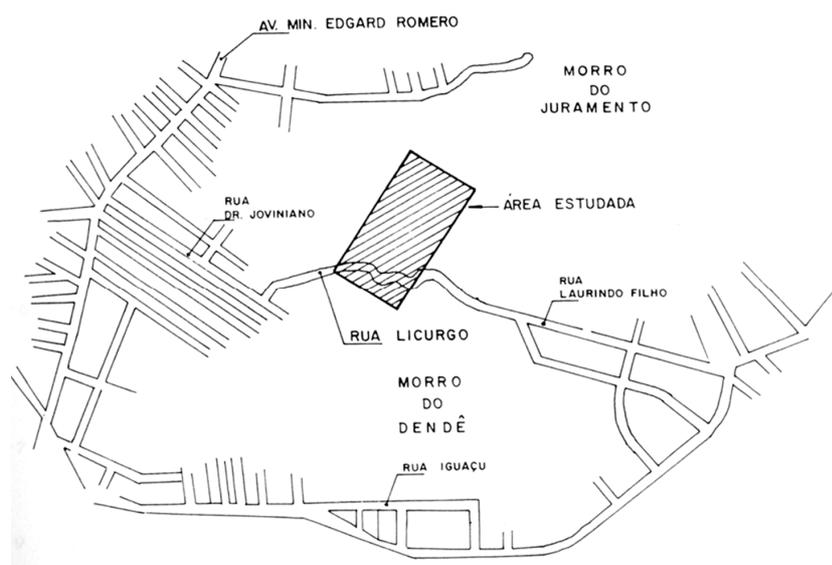


Figura 11. Localização do acidente [14]

Analisando a variação de PRE com a altura da Vegetação (Figura 10f), verificou-se que a redução do risco de escorregamento inicia na vegetação Arbustiva, ocorrendo um decréscimo abrupto na transição entre as vegetações Arbustiva/Arbórea. Para a vegetação Arbórea, a previsão de risco de escorregamento permanece constante e igual a 47,6%, indicando um risco na faixa de transição entre baixo e inexistente. No intervalo de vegetação Rasteira, com altura entre 0 a 1,5 m, o valor de PRE manteve-se constante e igual a 61,7%, representando um risco Baixo de escorregamento. Mais uma vez, cabe ressaltar as condições geométricas favoráveis à estabilidade do caso padrão, que apresenta altura e inclinação baixas.

A Figura 10g ilustra o impacto da variável Ocupação na previsão do risco de escorregamento. Observa-se uma redução suave de PRE entre os limites Desordenada (61,7%) e Pouco Ordenada (60,9%), tornando-se mais acentuada quando a ocupação é Ordenada (47,6%). Ressalta-se que o caso padrão analisado, com as condições de geometria, capa de solo, vegetação, pluviosidade, resistência e drenagem pré-estabelecidas, apresenta baixo risco de escorregamento, mesmo em condições de ocupação desordenada.

No que tange à espessura da camada de solo, nota-se que à medida que a espessura de solo aumenta, o risco de escorregamento diminui, enquanto a espessura da camada encontra-se na faixa “Espessa”, como indica a Figura 10h. Quando a espessura passa para a faixa “muito espessa” o risco aumenta com a espessura da camada. A variação de PRE com a espessura da camada se mostrou coerente, tendo em vista a consideração de que camadas espessas (1,5 m a 4,5 m) são

mais favoráveis à estabilidade do que camadas delgadas ou muito espessas.

As análises paramétricas, apresentadas na Figura 10, mostraram a coerência da resposta do modelo Fuzzy a variações nos valores das variáveis: geometria, ocupação da encosta, espessura de solo, vegetação, ângulo de atrito, pluviosidade e eficiência do sistema de drenagem.

Em todas as análises, o modelo forneceu valores de PRE consistentes, mostrando-se capaz de avaliar com eficiência a influência de cada uma das variáveis adotadas na concepção do modelo.

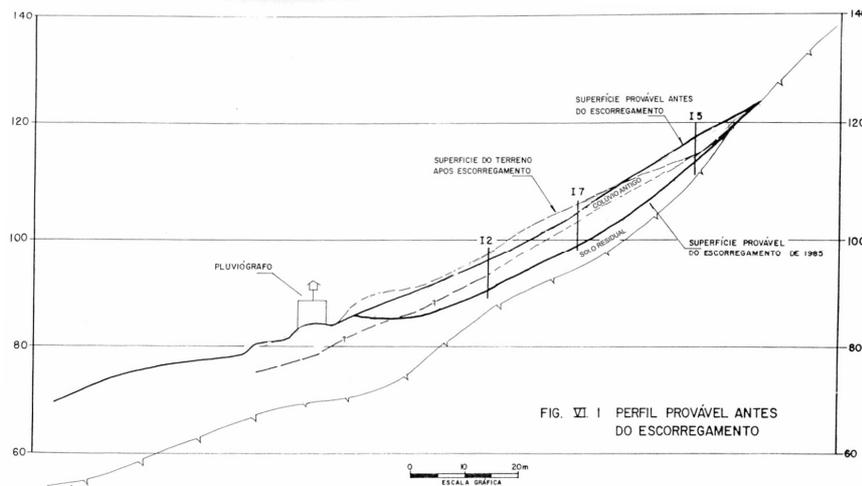
6. Estudo de caso

6.1. Descrição

A Figura 11 mostra a localização da área estudada [14]. 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 [14].

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



Legenda: I2, I5 e I7 - Inclinômetros

Figura 12. Perfil simplificado da encosta [14]

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.

No laudo de vistoria, os técnicos ressaltaram a importância de execução de investigações geotécnicas e instrumentação de campo, com posterior realização de análises de estabilidade, uma vez que a tipologia do local se repete em vários pontos da cidade do Rio de Janeiro.

Segundo Ramos [14], a campanha de investigações geotécnicas de campo e a instrumentação instalada no local procuraram definir os seguintes aspectos da encosta:

- (1) Perfil geológico-geotécnico do subsolo, identificando as camadas de colúvio, solo residual e rocha alterada, com dados de resistência à penetração (SPT), nível d'água, etc;
- (2) Permeabilidade dos diferentes horizontes de solo e rocha;
- (3) Conhecimento do volume e da intensidade das precipitações pluviométricas ocorridas na área;
- (4) Obtenção de dados sobre a carga piezométrica atuante nas diferentes camadas de solo e no contato solo/rocha, e correlação com as precipitações pluviométricas, variação do nível d'água freático, etc;
- 5) Registro de movimentos na encosta e sua correlação com a variação dos níveis piezométricos e com as chuvas.

Para atingir estes objetivos, o programa de investigações geotécnicas de campo constou de:

- levantamento topográfico com curvas de nível a cada metro;

- sondagens mistas em diversos pontos do maciço;
- ensaios de permeabilidade "in situ";
- ensaios de perda d'água;
- coleta de amostras indeformadas.

A instrumentação de campo consistiu na instalação de pluviômetro, piezômetros, inclinômetros e medidores de N.A [14].

6.2. Resultados das investigações de campo

O subsolo no local do escorregamento 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, micáceo, 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.

O manto rochoso é constituído por gnaiss, granito e pegmatito. O granito predomina nas cotas mais altas, enquanto o gnaiss é encontrado nas cotas mais baixas e em maior profundidade. O pegmatito constitui uma intrusão no gnaiss no pé do escorregamento e aparece também em cota mais baixa, juntamente com o granito. A Figura 12 ilustra o perfil geotécnico da área em estudo.

6.3. Resultados da instrumentação

Durante o período de 2 a 22 de fevereiro de 1988 ocorreram no Rio de Janeiro chuvas intensas e contínuas,

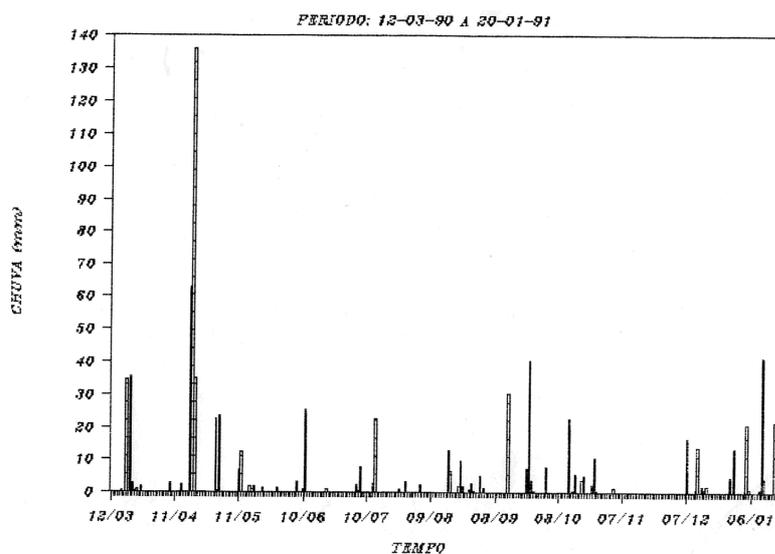


Figura 13. Pluviometria – Licurgo [14]

com registros de inúmeros casos de deslizamentos de taludes. Na ocasião, a Diretoria de Geotécnica do município realizou cerca de 1700 vistorias.

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 pluviógrafo 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 13.

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.

Ramos [14] salienta que a partir das leituras dos piezômetros instalados, pode-se verificar que a água penetra na parte alta da encosta mais rapidamente do que consegue drenar nas cotas mais baixas. Uma consequência deste fenômeno é o efeito cumulativo que pode ocorrer sobre as poropressões geradas nas cotas mais baixas do maciço por uma chuva intensa e prolongada.

6.4. Parâmetros de resistência ao cisalhamento

Resultados de ensaio de cisalhamento direto, executados por Clementino (1993), forneceram ângulo de atrito da camada de solo residual igual a 28°. Estes ensaios foram realizados em amostras indeformadas, para tensões normais entre 25 a 200kPa.

6.5. Análises de estabilidade por equilíbrio limite

Ramos [14] executou análises de estabilidade pelo método de Janbu, com o uso do software Stabl-5, desenvolvido pela Universidade de Purdue. As análises foram executadas para três tempos distintos: após o escorregamento e após o projeto de estabilização.

6.5.1. Análise do talude após o escorregamento

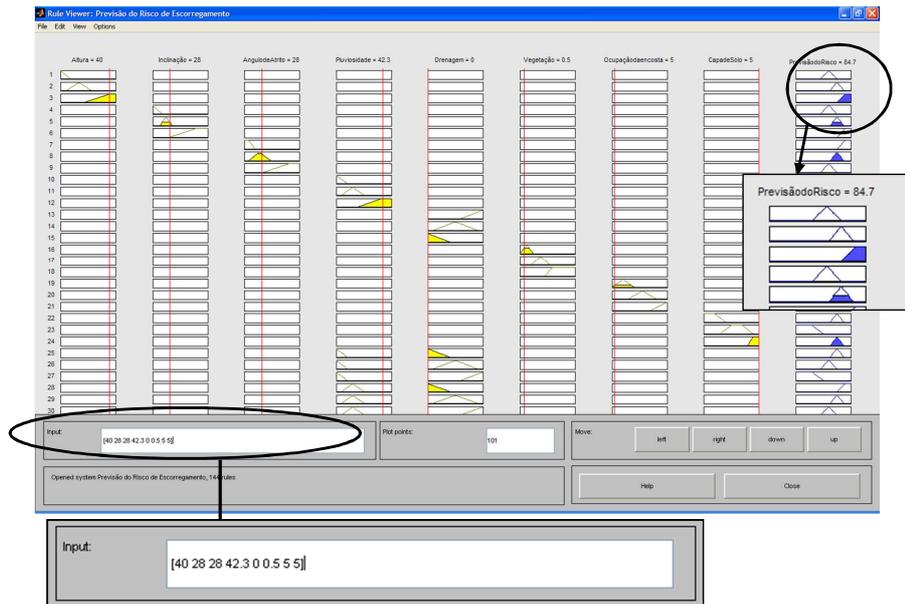
Para o talude após o escorregamento foram estudadas duas situações do ponto de vista de fluxo d'água. A primeira situação é baseada nos níveis piezométricos registrados durante as chuvas de Abril de 1990. Durante estas chuvas, observou-se movimentação na parte superior do talude, com aparecimento de trincas. A segunda situação corresponde ao caso de chuva intensa e prolongada.

A análise foi procedida por Ramos [14] 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 ($c=8kPa$).

Desta forma, Ramos [14] concluiu que o talude após o escorregamento é instável para as situações formula-

Tabela 6. Valores iniciais das variáveis [16]

Variáveis	Variável lingüística	Valor adotado	Caixa input
Altura (m)	Alta	40	
Inclinação (°)	Média	28	
Ângulo de atrito (°)	Médio	28	
Pluviosidade (mm/h)	Forte	42,3	[40 28 28 42.3 0 0.5 5 12]
Drenagem (%)	Ineficiente	0	
Vegetação (m)	Rasteira	0,5	
Ocupação da encosta	Desordenada	5	
Capa de solo (m)	Espessa	12	

**Figura 14.** Análise Fuzzy para a situação após o escorregamento [16]

das, sendo necessária a execução de obras de estabilização.

Com base nos fatores de segurança obtidos por Ramos [14], procedeu-se à previsão do risco de escorregamento, para a condição pós-escorregamento, utilizando o modelo Fuzzy.

Os dados de pluviometria são apresentados por Ramos [14] em mm diários, porém o modelo Fuzzy prevê a entrada desta variável em mm/h. Para a entrada da variável Pluviosidade no modelo, foi realizada a conversão do pico pluviométrico de 136 mm, apresentado na Figura 13, ocorrido no dia 19/04/90 para a unidade prevista pelo modelo. Esta conversão foi realizada a partir da relação entre a provável precipitação em 1h (P_{1h}) e a precipitação em 24h (P_{24h}), em mm: $P_{1h} = 10+0,237.P_{24h}$

Desta forma, foi obtido um valor de precipitação de aproximadamente 42,3mm/h, correspondendo a uma pluviosidade forte. A Tabela 6 indica os valores adotados no modelo proposto.

Após a inserção dos dados no modelo fuzzy foi previsto um valor de PRE para a situação após o escorre-

gamento de 84,7% (Figura 14), correspondendo a um risco alto de escorregamento. Este resultado concorda com as análises por equilíbrio limite executadas por Ramos [14].

Em uma análise posterior, variou-se a pluviosidade de alta para baixa, adotando-se um valor de 5 mm/h para esta variável. Neste caso, a Lógica Fuzzy apresentou um resultado de PRE de 78,3 %, prevendo um risco na zona de transição entre médio e alto.

Os resultados indicam que o talude após o escorregamento é instável, tanto pela Lógica Fuzzy (análise qualitativa), quanto pela análise quantitativa executada por Ramos [14].

6.5.2. Análise do talude após projeto de estabilização

Ramos [14] concluiu que o principal agente instabilizante é a água, devido às poropressões geradas no maciço pela percolação. Para a estabilização global do maciço a solução estudada foi a utilização de drenos profundos que garantissem a manutenção de poropres-

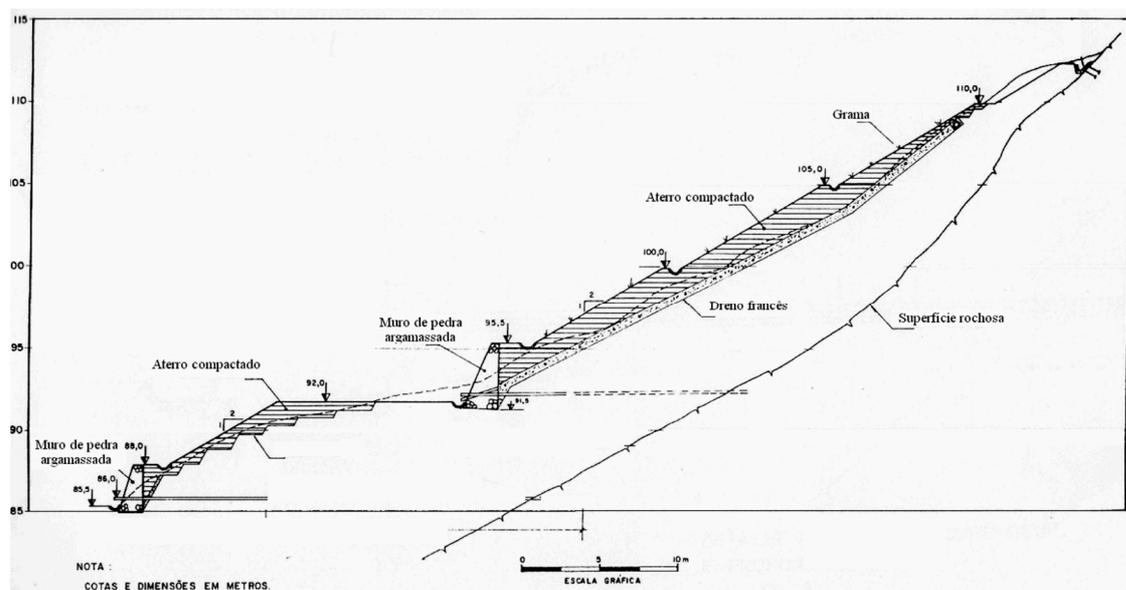


Figura 15. Solução projetada [14]

Tabela 7. Valores adotados para variável drenagem [16]

Variável	Valor Adotado (%)	Caixa input	PRE (%)
Drenagem	5	[40 28 28 50 5 0.5 5 5]	84,7
	20	[40 28 28 50 20 0.5 5 5]	84,7
	40	[40 28 28 50 40 0.5 5 5]	84,7
	60	[40 28 28 50 60 0.5 5 5]	84,7
	62	[40 28 28 50 62 0.5 5 5]	82,1
	66	[40 28 28 50 66 0.5 5 5]	72,0
	70	[40 28 28 50 70 0.5 5 5]	66,2
	75	[40 28 28 50 75 0.5 5 5]	60,8
	80	[40 28 28 50 80 0.5 5 5]	56,6
	90	[40 28 28 50 90 0.5 5 5]	50,6
	95	[40 28 28 50 95 0.5 5 5]	48,3
100	[40 28 28 50 100 0.5 5 5]	46,4	

sões baixas no interior do maciço e no contato solo-rocha. Foram então projetadas duas linhas de drenos profundos entrando 2 metros em rocha, buscando interceptar os veios de pegmatito e de granito alterado.

Segundo Ramos [14] tornava-se necessário, ainda, regularizar o talude, projetar contenções localizadas para resolver problemas de instabilidades superficiais, efetuar o desmonte de blocos de rocha em posições instáveis, e executar obras de drenagem superficial principalmente ao pé da escarpa rochosa. A solução projetada pode ser visualizada na Figura 15.

Nas análises de estabilidade, executadas por Ramos [14], foram utilizados os parâmetros de resistência comentados anteriormente. Adicionalmente, considerou-se uma sobrecarga na área plana, entre os muros, de 20 kPa, correspondente à ocupação da área com uma construção de dois pavimentos. Após a análise por equilíbrio limite, Ramos [14] obteve um fator de segurança após o

projeto de 1,5, que representa um aumento de 60% em relação ao fator de segurança para a mesma superfície analisada na situação após o escorregamento.

Para a avaliação da funcionalidade do modelo proposto, foi realizada uma análise, variando-se a eficiência do sistema de drenagem, tendo em vista que após a obra de estabilização as demais variáveis não sofreram variação significativa.

A Tabela 7 apresenta os valores adotados para a variável drenagem, suas inserções na caixa input e os resultados de PREs computados pela Lógica Fuzzy.

Observa-se que a variável drenagem influenciou, para este caso, todo o processo de estabilização da encosta. Considerando-se um sistema de drenagem ineficiente (5%), a previsão de risco de escorregamento foi de 84,7% (risco alto). No entanto, o valor de PRE reduz-se para 46,4% (risco baixo a inexistente), quando o sistema de drenagem é considerado eficiente.

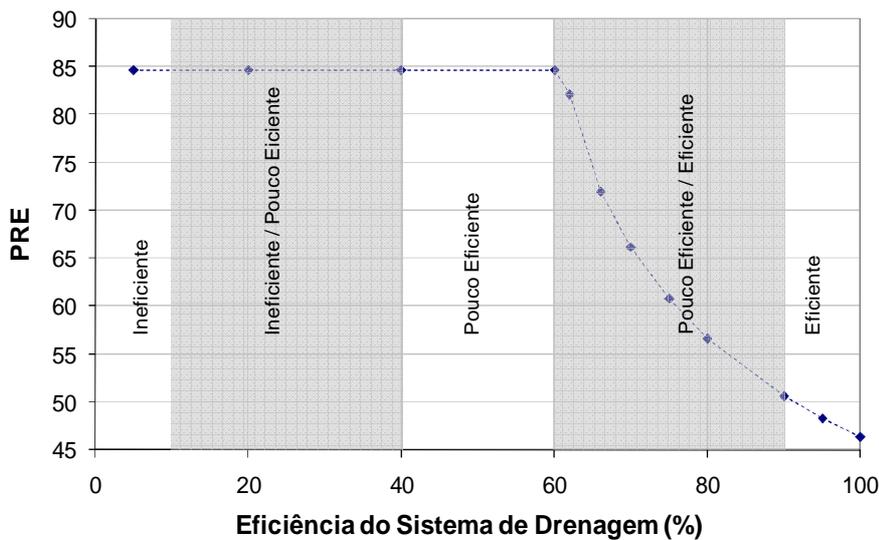


Figura 16. Variação do PRE com a eficiência do sistema de drenagem

A Figura 16 apresenta a variação de PRE com a eficiência do sistema de drenagem. Nota-se que até o limite do sistema de drenagem pouco eficiente, a lógica retornou um PRE constante de 84,7% (risco alto). À medida que a eficiência do sistema de drenagem aumenta (transição entre pouco eficiente e eficiente), há uma queda abrupta no valor do PRE, que chega a 50,6%, o que equivale a um decréscimo de 59,7% em relação ao PRE no limite do sistema de drenagem pouco eficiente. Este valor de PRE igual a 50,6% representa um risco baixo de escorregamento. Quando a drenagem apresenta uma eficiência de 100%, o valor de PRE é 46,4%, situando-se na faixa de risco inexistente.

7. 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 susceptível a escorregamentos de massa de solo residual.

Na idealização do modelo, foram adotadas as seguintes variáveis como condicionantes geológico-geotécnicas envolvidas 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).

A partir da elaboração do modelo, foram realizadas análises paramétricas, visando avaliar o impacto de cada uma das variáveis adotadas no valor de PRE. Adicionalmente, um caso histórico de escorregamento bem documentado foi apresentado, com o objetivo de comparar os resultados fornecidos pela Lógica Nebulosa (análise qualitativa) com os resultados de análises por equilíbrio limite (análises quantitativas).

As análises paramétricas verificaram que o modelo Fuzzy mostrou-se capaz de avaliar satisfatoriamente a influência de cada uma das variáveis adotadas na concepção do modelo.

O estudo do caso histórico mostrou que as análises realizadas utilizando o modelo Fuzzy refletiram satisfatoriamente os resultados apresentados por Ramos [14] em análises por equilíbrio limite.

É interessante comentar que análises por equilíbrio limite fornecem um valor numérico para o fator de segurança, ou seja, é um método essencialmente quantitativo. Neste método, variáveis como ocupação da encosta, eficiência do sistema de drenagem, e vegetação não são avaliadas. Além disso, análises de estabilidade são altamente dependentes dos parâmetros de resistência dos solos, nem sempre disponíveis na prática da Engenharia Geotécnica, tendo em vista os custos envolvidos na execução de ensaios de laboratório.

Cabe comentar que para a aplicação do modelo basta um laudo de vistoria bem elaborado, pois o modelo baseia-se em observações de campo, não necessitando dos parâmetros geotécnicos dos materiais envolvidos. Desta forma, esta ferramenta aparece como uma alternativa que associa eficiência, baixo custo e facilidade de execução, sendo atraente para uma análise preliminar de risco de escorregamento.

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

Referencias

1. Amaral C.P. (1997) Escorregamentos no Rio de Janeiro. Inventário, Condicionantes Geológicas e Redução do Risco. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC/RJ
2. Augusto Filho O., E Virgili J.C. (1998) Estabilidade de Taludes. Geologia de Engenharia. 1ª Ed. São Paulo: Associação Brasileira de Heologia de Engenharia.
3. Chorley R.J., Schumm S.A. e Sugden D.E. (1984) Geomorphology. Cambridge: Methuen
4. Fernandes N. F., Amaral C.P. (1996) Movimentos de massa: uma abordagem geológico-geomorfológica. En: *Geomorfologia e meio ambiente*. Guerra A.J.T., Cunha S. Eds. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil
5. Fernandes N.F., Amaral C.P. (1996) Movimentos de massa: uma abordagem geológico-geomorfológica. En: *Geomorfologia e meio ambiente*. Guerra A.J.T., Cunha S. Eds. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil
6. Guerra A.J.T., Cunha S. (1994) Geomorfologia: uma atualização de conceitos e bases. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil. Cap. 1:23–50
7. Guidicini G., Nieble C.M. (1993) Estabilidade de taludes naturais de escavação. 2ª Ed. São Paulo: Edgard Blücher.
8. Kanji M.A. (1997) Estabilização e Remediação de Taludes. II PSL / II COBRAE. 3:251-259. Rio de Janeiro
9. Mamdani E.H, Assilian S. (1975) An experiment in linguistic synthesis with a Fuzzy Logic Controller. *IEE trans. Internat. J. Man-Machine Studies* 7(1):1-13
10. Mendel J.M. (2001) *Uncertain rule-based fuzzy logic systems: introduction and new directions*. Londres: Prentice Hall P.T.R.
11. Montgomery D.R., Fernandes N.F., Guimarães R.F., Gomes R.A.T., Vieira B.C., Greenberg H. (2001) Condicionantes Geomorfológicos dos Deslizamentos nas Encostas: Avaliação de Metodologias e Aplicação de Modelo de Previsão de Áreas Suscetíveis. *Revista Brasileira de Geomorfologia*. 2(1):51-71
12. Netto A L.C. (1994) Hidrologia de encosta na interface com a geomorfologia. En: *Geomorfologia: uma atualização de conceitos e bases*. Guerra, A.J.T., Cunha S. Eds. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil
13. Oliveira Jr. H.A. (1999) Lógica Difusa: Aspectos práticos e aplicações. Rio de Janeiro: Interciência. 189 p. ISBN 8571931244
14. Ramos M.O. (1991) Instrumentação e Análise de Escorregamento em Solo Residual Ocorrido na Rua Licurgo. Serra da Misericórdia - Rio de Janeiro. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro/UFRJ
15. Shaw I.S., Simões M.G. (1999) *Controle e Modelagem Fuzzy*. 1ª. ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda.
16. Silva (2008) – tese Marcos
17. Suarez J.D. (1997) La Vegetación en la Estabilización de Deslizamientos. II PSL / II COBRAE, Rio de Janeiro. 2:739-746
18. Tanscheit R. (2007) Sistemas Fuzzy. Disponível em: <<http://www.ica.ele.pucRio.br/cursos/download/ICA-Sistemas%20Fuzzy.pdf>>. Acesso em: Jan
19. Thomas M.F. (1979) *Tropical geomorphology: a study of weathering and landform development in warm climates*. 2ª ed. London: MacMillan
20. Wolle C.M. (1988) Análise de escorregamentos translacionais numa região da Serra do Mar no contexto de uma classificação de mecanismos de instabilização de encostas. São Paulo. Tese (Doutorado em Engenharia - Universidade de São Paulo. Escola Politécnica)
21. Zadeh L.A. (1965) Fuzzy Sets. *Inform. and Control* 8: 338-353