

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL**

**AVALIAÇÃO DA EXPANSÃO URBANA EM ÁREAS
SUSCEPTÍVEIS A DESLIZAMENTOS RASOS
ESTUDO DE CASO: FERCAL-DF**

BRUNA LUISA AMARAL

**ORIENTADOR: MANOEL PORFÍRIO CORDÃO NETO
CO-ORIENTADOR: GEORGE FERNANDES AZEVEDO**

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL II EM ENGENHARIA
AMBIENTAL**

BRASÍLIA/DF, MAIO/2021

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL**

**AVALIAÇÃO DA EXPANSÃO URBANA EM ÁREAS
SUSCEPTÍVEIS A DESLIZAMENTOS RASOS
ESTUDO DE CASO: FERCAL-DF**

BRUNA LUISA AMARAL

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA AMBIENTAL.

APROVADA POR:

**MANOEL PORFÍRIO CORDÃO NETO, PHD (UNB)
(ORIENTADOR)**

**GEORGE FERNANDES AZEVEDO, DOUTOR (UFMA)
(CO-ORIENTADOR)**

**ELEUDO ESTEVES DE ARAUJO SILVA JUNIOR, DOUTOR (UNB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**JORDANA GARRIDO SILVA SEBA, MESTRE (UNB)
(EXAMINADORA EXTERNA)**

BRASÍLIA/DF, 06 DE MAIO DE 2021.

FICHA CATALOGRÁFICA

AMARAL, BRUNA LUISA

Avaliação da Expansão Urbana em Áreas Susceptíveis a Deslizamentos Rasos.
Estudo de Caso Fercal-DF.

ix, 64 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Ambiental, 2021)

Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Movimentos de Massa

2. Estabilidade de Talude

3. Mapa de Susceptibilidade

4. Sistema de Informação Geográfica

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

AMARAL, B.L. (2021). *Avaliação da Expansão Urbana em Áreas Susceptíveis a Deslizamentos Rasos. Estudo de Caso Fercal-DF*. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 64p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DA AUTORA: Bruna Luisa Amaral

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Avaliação da Expansão Urbana em Áreas Susceptíveis a Deslizamentos Rasos. Estudo de Caso Fercal-DF.

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Ambiental / 2021.

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Bruna Luisa Amaral
brunaamaralluisa@gmail.com

Dedico à minha família, que tornaram mais um sonho possível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por estar todos os dias ao meu lado, levantando-me nos dias de fraqueza e me dando forças para prosseguir.

Agradeço ao meu orientador, Manoel Porfírio Cordão Neto, e ao meu coorientador, George Fernandes Azevedo, por acreditar no meu trabalho e na minha capacidade, ajudando-me na busca de novos conhecimentos, incentivando-me a encontrar o melhor caminho para fazer a diferença e por ter se dedicado a esse tempo de pesquisa ao meu lado.

A todos os meus professores da Universidade de Brasília (UNB), que me passaram o conhecimento necessário para chegar até aqui e a todos os amigos e colegas que me auxiliaram e estiveram comigo durante a graduação, principalmente aqueles que ingressaram juntamente a mim no primeiro semestre de 2014.

À minha mãe Francisca Eugênia Oliveira Amaral, ao meu pai Dinamar Amaral e aos meus irmãos por me incentivar e me dar forças para chegar ao fim de mais uma etapa da minha vida, estando presente e me dando todo o apoio necessário.

E ao meu marido, José Fuscaldi Cesilio Neto, que me encorajou a seguir o meu sonho de concluir o curso de engenharia ambiental na Universidade de Brasília, sempre me auxiliando com todo amor e carinho.

Agradeço a todos.

RESUMO

Movimentos de massa constituem eventos desastrosos, especialmente em áreas tropicais e montanhosas, onde esses processos são intensificados pelas atividades antrópicas. A ocupação urbana crescente e indiscriminada em áreas desfavoráveis, sem o planejamento adequado do uso do solo e incorporação apropriada de técnicas de estabilização, tem resultado em acidentes relacionados a processos dessa natureza que, muitas vezes, levam proporções de desastres. O presente trabalho tem como objetivo avaliar a rápida expansão urbana que ocorreu nos últimos anos na Fercal, localizada nas proximidades de Sobradinho, Distrito Federal, situando esse crescimento em relação às áreas com tendência a desenvolvimento de eventos de movimentos de massa. Para tanto, foram utilizadas imagens de satélite da série Landsat para os anos de 2013 e 2019, as quais foram classificadas quanto ao uso e ocupação do solo a partir da avaliação do seu comportamento espectral. De forma paralela, um mapa de susceptibilidade a ocorrência de deslizamentos rasos dado em termos probabilísticos é utilizado e confrontado com a malha urbana estabelecida. O resultado da pesquisa permitiu verificar a tendência de ampliação da malha urbana e observar se o adensamento se direciona no sentido de áreas que apresentam susceptibilidade a ocorrência de movimentos de massa. Como conclusão, pode-se afirmar que a abordagem metodológica baseada em uma ferramenta de detecção remota, combinada com modelos de estabilidade de encostas, estabelecida em Sistemas de Informação Geográfica, se mostra eficiente para estudos de uso e ocupação do solo, assim como para fins de planejamento urbano.

Palavras-chave: Movimentos de massa, Expansão urbana, Fercal e Landsat.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. MOTIVAÇÃO.....	14
1.2. OBJETIVOS DA PESQUISA	15
1.2.1. Objetivo Geral	15
1.2.2. Objetivos Específicos	15
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1. MOVIMENTOS DE MASSA	16
2.1.1. Tipos de movimentos de massa.....	16
2.1.2. Fatores que influenciam nos movimentos de massa	18
2.2. MODELO DE ESTABILIDADE.....	19
2.2.1. Estabilidade de Talude Infinito	19
2.3. ANÁLISE PROBABILÍSTICA DE ESTABILIDADE DE TALUDES.....	21
2.3.1. Definições Gerais	21
2.3.2. Tendência Central	22
2.3.3. Medidas de Variabilidade ou Dispersão.....	23
2.3.4. Tipos de Distribuição de Probabilidade	24
2.3.5. Tipos de Incertezas.....	26
2.3.6. Método Probabilístico FOSM (<i>First Order Second Moment</i>)	27
2.4. SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA (SIG).....	32
2.4.1. Características de um Sistema de Informação Geográfica.....	32
2.4.2. Estrutura de um Sistema de Informação Geográfica.....	32
2.4.3. Imagem de Satélite	34
2.4.4. Características das Imagens de Satélite.....	35
2.4.5. Processamento Digital de Imagem (PDI).....	38
2.4.6. SPRING.....	39
2.4.7. Aplicação do SIG	39
3. METODOLOGIA.....	41
3.1. PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGEM	41
3.2. AVALIAÇÃO DE SUSCEPTIBILIDADE A MOVIMENTOS DE MASSA.....	49
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	52

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FUTURAS.....	58
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60
ANEXO I - ROTINA COMPUTACIONAL	64

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Análise de um talude infinito sem percolação (modificado - Das, 2010).....	19
Figura 2.2 Distribuição estatística das médias das amostras da população (Fabricio, 2006)	22
Figura 2.3 Distribuição Normal da variável aleatória “x” (Fabricio, 2006).....	24
Figura 2.4 Obtenção de uma curva normal padrão a partir de uma curva normal geral (Fabricio, 2006)	25
Figura 2.5 Curva de distribuição Log-Normal (Fabricio, 2006)	26
Figura 2.6 Índice de confiabilidade x Probabilidade de Ruptura (Sandroni e Sayão, 1992)	30
Figura 2.7 Probabilidade de Ruptura Admissível (Baecher, 1982b).....	31
Figura 2.8 Probabilidades de Ruptura (US Army Corps of Engineers, 1995)	31
Figura 2.9 Organização de um SIG (Câmara et al, 1996)	33
Figura 2.10 Resolução Espacial (INPE).....	35
Figura 3.1 Fluxograma PDI (Silva Junior, E.E.A., 2019)	42
Figura 3.2 (a) Banda 8 do ano 2013 sem realce; (b) Banda 8 do ano 2013 com realce	43
Figura 3.3 (a) Composição colorida RGB432 com resolução espacial de 30m; (b) Composição colorida RGB432 com resolução de 15m (após Transformação RGB-IHS).....	44
Figura 3.4 (a) NDVI; (b) NDWI.....	45
Figura 3.5 (a) Componente Principal 1 (PC1) LS8 bandas de 15m; (b) PC4 LS8 15m.....	46
Figura 3.6 (a) Filtragem com Passa-Baixa da B8; (b) Filtragem com Passa Alta da B8. ...	47
Figura 3.7 (a) Segmentação bandas de 30m; (b) Segmentação bandas de 15m.....	48
Figura 3.8 Fluxograma mapa de Probabilidade de Ruptura	49
Figura 3.9 Solos encontrados na região de estudo.....	50
Figura 4.1 Classificação com base na imagem de 2013	52
Figura 4.2 Classificação com base na imagem de 2019	53
Figura 4.3 Mapa de Probabilidade de Ruptura	54
Figura 4.4 Configuração da probabilidade de ruptura frente à ocupação urbana em 2013. 56	
Figura 4.5 Configuração da probabilidade de ruptura frente à ocupação urbana em 2019. 57	

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Descrição dos tipos de movimentos de massa (Cruden e Varnes, 1996)	17
Tabela 2.2 Fatores deflagradores de movimentos de massa (Gerscovich, 2008 - modificado de Varnes, 1978).....	18
Tabela 2.3: Dispersão dos dados de uma mesma área (Maia, 2003).....	23
Tabela 2.4 Coeficiente de variação associado a cada parâmetro geotécnico (traduzido - Duncan, 2000).....	29
Tabela 2.5 Características dos satélites <i>Landsat 5</i> e <i>Landsat 8</i> (modificado - USGS)	38
Tabela 3.1 Dados de input	50
Tabela 4.1 Medida de classes da área de estudo	53
Tabela 4.2 Medida de classes da área de estudo	54
Tabela 4.3 Áreas urbanas e não urbanas para 2013 distribuídas pelas classes de probabilidade de ruptura	55
Tabela 4.4 Áreas urbanas e não urbanas para 2019 distribuídas pelas classes de probabilidade de ruptura	55

LISTA DE ABREVIACÕES, SIGLAS E SÍMBOLOS

c': Coesão

CEPSRM: Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia

CV: Coeficiente de Variação

E[FS]: Esperança do fator de segurança

FOSM: Primeira Ordem e Segundo Momento - First Order Second Moment

FS: Fator de Segurança

H: Espessura da camada de solo

HPGL: Linguagem de controle da impressora - *Hewlett Packard Graphics Language*

IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INPE: Instituto Nacional de Pesquisa Espacial

L: Largura

n: Número de medidas aleatórias

OLI: *Operational Terra Imager*

PDI: Processamento Digital de Imagens

P_R: Probabilidade de Ruptura

SGBD: Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados

SIG: Sistema de Informação Geográfica

SPRING: Sistema de Processamento de Informações Georeferenciadas

TC: Tensão cisalhante ao longo da superfície crítica de ruptura

TIRS: *Thermal Infrared Sensor*

TM: *Thematic Mapper*

TR: Tensão de resistência cisalhante média

USGS: *United States Geological Survey*

$V[FS]$: Variância da função de performance

\bar{x} : Média da amostra

x: Variável aleatória

x_i : Valor individual de cada medida da amostra

z: Variável aleatória padronizada

β : Inclinação do talude

β' : Índice de confiabilidade

$\frac{dFS}{dx_i}$: Derivadas parciais

$f(x)$: Função de distribuição de probabilidade

μ : Média da distribuição

σ : Desvio padrão

$\Phi(\beta')$: Curva normal padronizada

ϕ' : Ângulo de Atrito

γ : Peso específico do solo

1. INTRODUÇÃO

A ocupação urbana de forma irregular é geradora dos principais transtornos enfrentados nas cidades. Dentre os problemas provocados por essa situação, encontram-se os deslizamentos rasos que ocorrem em áreas de risco geotécnico. Esses apresentam-se como obstáculos para as atividades humanas, causando perdas econômicas, altos custos de manutenção, lesões ou mortes (Das, 2010).

A urbanização crescente e indiscriminada em áreas desfavoráveis à ocupação humana, sem planejamento adequado do uso do solo e incorporação adequada de técnicas de estabilização, tem resultado em acidentes relacionados a processos dessa natureza (Tominaga, 2007). Isso justifica a necessidade de criar metodologias novas e mais eficientes para melhorar a compreensão do risco de deslizamentos de terras, visando um melhor processo de decisão em relação à alocação de recursos para gerenciamento de risco (Guzzetti, 2000).

O principal objetivo deste trabalho consiste na aplicação de uma metodologia capaz de averiguar o rápido crescimento na área da cidade Fercal-DF, situada nas proximidades de Sobradinho, visando a compreensão do fenômeno de expansão urbana na região. De forma adicional, na tentativa de fornecer uma abordagem focada em intervenções voltadas para o planejamento urbano, este trabalho também procura realizar uma comparação entre a área urbana da cidade em dois momentos distintos e uma Carta de Susceptibilidade a eventos de movimento de massa, observando se há uma tendência de direcionamento da ocupação para pontos considerados críticos em termos de estabilidade.

1.1. MOTIVAÇÃO

De acordo com um levantamento feito pela Subsecretaria do Sistema de Defesa Civil (2019), o Distrito Federal apresenta 41 áreas de risco, distribuídas em 19 regiões administrativas, estando entre elas algumas regiões críticas, como por exemplo a Fercal. Isso se deve principalmente à existência de ocupações irregulares e desordenadas.

No Brasil, a Lei nº 6.766, de 19 de dezembro de 1979, dispõe sobre o parcelamento do solo urbano e proíbe que áreas de risco sejam loteadas para fins urbanos. Apesar disso, muitas vezes o próprio poder público tem levado infraestrutura a essas áreas, contribuindo, assim, para o adensamento da ocupação.

As residências, normalmente construídas em condições impróprias e em terrenos irregulares, constituem uma ameaça às famílias próximas e à comunidade local. Com o objetivo de reduzir os desastres naturais, muitas medidas podem ser adotadas, algumas de natureza estrutural e outras de caráter não estrutural.

As medidas estruturais podem ter um resultado mais satisfatório, no entanto muitas vezes não são executadas devido ao seu alto custo, já que se traduzem na execução de obras complexas e de grande porte. Já as medidas não estruturais são mais acessíveis, como por exemplo, o planejamento e controle do uso do solo, que consiste basicamente em compatibilizar as características físicas de cada área com as restrições à ocupação.

Dessa forma, torna-se necessário tomar medidas mitigadoras a fim de controlar essa urbanização e avaliar o risco da região em questão. O presente trabalho vem como uma medida não estrutural, pois tem como objetivo fazer uma análise do uso e ocupação do solo mostrando a probabilidade de ruptura associada a cada região da Fercal-DF.

1.2. OBJETIVOS DA PESQUISA

1.2.1. Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a rápida expansão urbana que ocorreu nos últimos anos na cidade Fercal, localizada nas proximidades de Sobradinho, Distrito Federal, situando esse crescimento em relação às áreas com tendência a desenvolvimento de eventos de movimentos de massa.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Classificação das imagens de satélite da série *Landsat 8*, para os anos de 2013 e 2019, quanto ao uso e ocupação do solo a partir da avaliação espectral.
- Elaboração de um mapa de susceptibilidade através de uma rotina modificada do *software RiskLab*[®] desenvolvido por Azevedo (2015).
- Sobreposição entre o Mapa de Susceptibilidade e a classificação de cada imagem respectivamente, para se verificar a tendência de ampliação da malha urbana e observar se o adensamento se direciona no sentido de áreas que apresentam susceptibilidade a ocorrência de movimentos de massa.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. MOVIMENTOS DE MASSA

Movimentos de massa é um termo geral para designar todos aqueles movimentos ao longo de uma encosta de uma massa de rocha, solo ou detritos por efeito da força gravitacional (Cruden, 1991).

2.1.1. Tipos de movimentos de massa

Os movimentos de massa têm sua origem relacionada a uma variedade extensa de atividades geológicas, hidrometeorológicas, químicas e mecânicas que têm lugar na crosta terrestre (Entralgo, 2013). As encostas, visando a um estado central compatível com o equilíbrio em relação aos processos nelas atuantes, no sentido de obter um arranjo mais eficiente possível, apresentam uma tendência frequente a mudanças (Bloom, 1988). Nesse sentido, segundo Azevedo (2015), existem dois tipos de movimentos, aqueles de natureza tectônica que tendem a originar montanhas e, em contrapartida, outros que proporcionam uma desestabilização e conseqüente alteração do relevo, na tentativa de impor uma condição mais plana, como as ações do intemperismo, dos sismos, das chuvas e de demais eventos (como a própria ação antrópica).

Tendo isso em mente, García (2004) destaca que uma diretriz básica na realização de uma análise que envolva o risco e as conseqüências do deslizamento está vinculada à identificação dos tipos de movimentos de massa, uma vez que esses episódios podem diferir em termos de forma, dimensão, velocidade, materiais envolvidos, estado de atividade, entre outras características, atentando, ainda, que esse reconhecimento pode ser realizado por intermédio de técnicas de sensoriamento remoto ou estudos de campo.

Atualmente, as classificações dos movimentos de massa propostas por Varnes (1958, 1978) e Hutchinson (1968, 1988) são sistemas amplamente aceitos na comunidade científica. De acordo com as prerrogativas expostas por esses autores, o critério principal na sua classificação é o tipo de movimento e a natureza do material, podendo ser dividido em cinco categorias distintas: quedas (*falls*), tombamentos (*topless*), deslizamentos (*slides*), espalhamentos (*spreads*), corridas, escoamentos ou fluxos (*flows*); e duas classes de material: rocha e solo, este último subdividido em detritos e terra. Porém, os movimentos de massa podem formar uma falha complexa envolvendo mais do que um tipo de movimento e

material ao mesmo tempo ou durante a vida do movimento, formando subcategorias menos comuns (Highland e Bobrowsky, 2008, Guzzetti, 2012).

Posteriormente, Cruden e Varnes (1996) propuseram modificações para a classificação de Varnes (1978). Apesar de ela continuar com os mesmos cinco tipos de movimentos e os dois tipos de materiais, passaram a levar em consideração dois aspectos mensuráveis, que são o conteúdo de água e a velocidade, o que acaba por configurar uma grande quantidade de movimentos distintos que podem surgir pela combinação desses critérios. Os diferentes critérios de classificação dos movimentos de massa segundo a classificação de Cruden e Varnes (1996) encontram-se resumidos na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 Descrição dos tipos de movimentos de massa (Cruden e Varnes, 1996)

DESCRIÇÃO DO PRIMEIRO MOVIMENTO			
TIPO	MATERIAL	CONTEÚDO DE ÁGUA (COMPORTAMENTO)	VELOCIDADE
Quedas		Seco (sólido)	Extremamente rápido (> 3m/s)
Tombamentos			Muito rápido (3m/s - 0.3m/min)
Deslizamentos ou Escorregamentos	Rocha	Úmido (plástico)	Rápido (0.3m/min - 1.5m/dia)
			Moderado (1.5m/dia - 1.5m/mês)
Espalhamentos	Solos (Terra ou Detritos)	Molhado (líquido)	Lenta (1.5m/mês - 1.5m/ano)
Fluxos, Corridas ou Escoamentos			Muito lenta (1.5m/ano - 60mm/ano)
		Muito molhado (líquido)	Extremamente lenta (< 60mm/ano)

De acordo com Highland e Bobrowsky (2008), quedas são desprendimentos de rocha ou terra, ou ambos, de penhascos ou taludes com aclividade elevada. O material descendente geralmente bate nas paredes inferiores do talude num ângulo menor que o ângulo da queda, causando saltos. A massa em queda pode quebrar no impacto, pode iniciar um rolamento em taludes mais íngremes e pode continuar até a cota mais baixa do terreno.

O tombamento é um tipo de movimento de massa no qual tem lugar uma rotação, geralmente em sentido perpendicular a um plano de ruptura e em torno de um eixo ou ponto abaixo do centro de gravidade da massa deslocada. Ocorre pela ação da gravidade e esforços de empuxo de unidades adjacentes ou fluidos dentro de fraturas (Varnes, 1978).

Deslizamento ou escorregamento é um movimento descendente de uma massa de solo ou rocha que ocorre predominantemente ao longo de uma superfície de falha ou de uma delgada zona de deformação e de cisalhamento intenso (Highland e Bobrowsky, 2008).

Os espalhamentos são um tipo de movimento de massa no qual o deslocamento ocorre predominantemente por deformação interna do material (PMA:GCA, 2007). O referido

movimento se dá em solos coesivos ou maciços rochosos e com subsidência de um material mole subjacente.

A última forma de movimentação de massa apresentada por Cruden e Varnes (1996) são as corridas de massa, que, de acordo com os autores, acontecem com o escoamento rápido do solo, de natureza hidrodinâmica. Nesses casos, o excesso de água é responsável pela diminuição da resistência do substrato. Dessa forma, a massa se movimenta como se fosse um líquido viscoso.

2.1.2. Fatores que influenciam nos movimentos de massa

De acordo com Varnes (1978) *apud* Gerscovich (2008), os movimentos de massa têm sua distribuição de ocorrência atrelada a fatores que podem ser agrupados em duas categorias: aquela que tende a aumentar as forças de sollicitação e outra que tende a reduzir as forças resistentes. Ambas possuem fatores desencadeadores e os respectivos fenômenos que podem ocasionar tal desequilíbrio. Abaixo encontra-se a Tabela 2.2 com as respectivas associações.

Tabela 2.2 Fatores deflagradores de movimentos de massa (Gerscovich, 2008 - modificado de Varnes, 1978)

AÇÃO	FATORES	FENÔMENOS
Aumento da sollicitação	Remoção de massa (lateral ou base)	Erosão, Escorregamentos e Cortes
	Sobrecarga	Peso de água de chuva, neve, granizo. Acúmulo natural de material (depósitos). Peso da vegetação. Construção de aterros
	Sollicitação dinâmica	Terremotos, ondas, vulcões. Explosões, tráfego, sismos induzidos
	Pressões laterais	Água em trincas, Congelamento, Materiais expansivos
Redução da resistência	Características do material	Características geomecânicas do material, tensões
	Mudanças ou fatores variáveis	Intemperismo: redução na coesão, ângulo de atrito, variação nas poropressões

2.2. MODELO DE ESTABILIDADE

A estabilidade de um talude nada mais é do que a resultante entre as forças a favor do movimento e as forças resistentes de um talude. Enquanto a primeira induz o movimento de massa ao longo da superfície de ruptura, a segunda se opõe a ação do movimento de massa.

2.2.1. Estabilidade de Talude Infinito

Quando se fala em estabilidade de taludes é fundamental definir um índice ou indicador que forneça a quantificação da proximidade de ruptura de uma determinada encosta em função de um conjunto de parâmetros. Segundo Das (2010), esse fator é obtido, matematicamente, pela razão entre a tensão de resistência cisalhante média (T_R) e a tensão cisalhante ao longo da superfície crítica de ruptura (T_C), sendo conhecido como fator de segurança (FS). Lembrando que a T_R pode ser escrita em função da coesão (c') e ângulo de atrito (ϕ') do solo e a T_C também pode ser definida em função dos mesmos parâmetros, respectivamente (c'_c) e (ϕ'_c), obtém-se a equação (2.1).

$$FS = \frac{T_R}{T_c} = \frac{c' + \sigma' \cdot \text{tg}\phi'}{c'_c + \sigma' \cdot \text{tg}\phi'_c} \quad (2.1)$$

Uma forma de se representar o fator de segurança é através do modelo de talude infinito. Este, é assim chamado, pois a relação entre as suas grandezas geométricas, extensão e espessura é muito grande. Além disso, assume-se que a poropressão é nula. Na Figura 2.1 encontra-se o diagrama de corpo livre utilizado para determinar as forças que atuam na encosta.

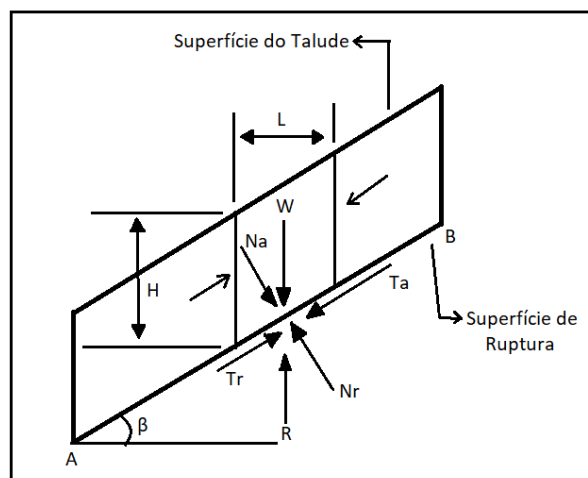


Figura 2.1 Análise de um talude infinito sem percolação (modificado - Das, 2010)

Considerando uma possível ruptura do talude no plano AB, localizado a uma profundidade H e acontecendo da direita para a esquerda. O peso de cada elemento de solo pode ser determinado da seguinte forma:

$$W = \gamma \cdot H \cdot L \cdot 1 \quad (2.2)$$

Onde 1 trata-se do comprimento unitário na direção perpendicular ao plano da seção mostrada, γ é o peso específico do solo e L a largura da fatia considerada para a análise.

O peso W pode ser decomposto em duas componentes:

1. Perpendicular ao plano AB:

$$N_a = W \cdot \cos\beta = \gamma \cdot H \cdot L \cdot \cos\beta \quad (2.3)$$

2. Paralelo ao plano AB:

$$T_a = W \cdot \sin\beta = \gamma \cdot H \cdot L \cdot \sin\beta \quad (2.4)$$

Como tensão é igual a força distribuída em uma área, as tensões normal e cisalhante podem ser descritas, respectivamente, da seguinte forma:

$$\sigma' = \frac{N_a}{\text{Área da base}} = \frac{\gamma \cdot H \cdot L \cdot \cos\beta}{\frac{L}{\cos\beta}} = \gamma \cdot H \cdot \cos^2 \beta \quad (2.5)$$

$$\tau = \frac{T_a}{\text{Área da base}} = \frac{\gamma \cdot H \cdot L \cdot \sin\beta}{\frac{L}{\cos\beta}} = \gamma \cdot H \cdot \sin\beta \cdot \cos\beta \quad (2.6)$$

Como consequência, surge uma força de reação igual e oposta a W, chamada R que pode ser decomposta em N_r e T_r como mostrado na Figura 2.1.

$$N_r = R \cdot \cos\beta = W \cdot \cos\beta \quad (2.7)$$

$$T_r = R \cdot \sin\beta = W \cdot \sin\beta \quad (2.8)$$

Como mencionado anteriormente, a tensão cisalhante crítica pode ser escrita como:

$$\tau_c = c'_c + \sigma' \cdot \text{tg}\phi'_c \quad (2.9)$$

Assim, substituindo a equação (2.5) e (2.6) na equação (2.9) obtém-se:

$$\gamma \cdot H \cdot \text{sen}\beta \cdot \text{cos}\beta = c'_c + \gamma \cdot H \cdot \text{cos}^2 \beta \cdot \text{tg}\phi'_c \quad (2.10)$$

Reorganizando a equação (2.10), encontra-se a seguinte função:

$$c'_c = \gamma \cdot H \cdot \text{cos}^2 \beta (\text{tg}\beta - \text{tg}\phi'_c) \quad (2.11)$$

Por fim, substituindo a equação (2.11) e (2.5) na equação (2.1), obtém-se a equação de fator de segurança para talude infinito:

$$FS = \frac{c'}{\gamma \cdot H \cdot \text{cos}^2 \beta \cdot \text{tg}\beta} + \frac{\text{tg}\phi'}{\text{tg}\beta} \quad (2.12)$$

Ou seja, o fator de segurança, nesse caso, depende apenas de cinco variáveis: coesão (c'), ângulo de atrito (ϕ'), peso específico (γ), espessura da camada de solo (H) e inclinação do talude (β).

2.3. ANÁLISE PROBABILÍSTICA DE ESTABILIDADE DE TALUDES

Na tentativa de reproduzir as condições de campo nos estudos geotécnicos, muitas vezes, se depara com incertezas advindas dos parâmetros que são utilizados na verificação de estabilidade. Essa incerteza, dependendo de sua magnitude, pode levar a uma análise sub ou superdimensionada do problema em questão, podendo até mesmo caracterizar erroneamente uma ruptura. Dessa forma, os métodos probabilísticos surgem como uma alternativa sistemática de incorporar a variabilidade dos parâmetros de projeto.

2.3.1. Definições Gerais

Quando se fala em análise estatística, tem-se como alvo um grupo denominado universo ou população. Em estabilidade de taludes, o universo engloba todos os parâmetros geotécnicos envolvidos direta ou indiretamente com o fator de segurança.

De acordo com Fabricio (2006), variável aleatória é o conjunto dos valores possíveis de serem medidos, relacionados a uma mesma característica. No caso de estudo de estabilidade de taludes, peso específico, coesão, ângulo de atrito, podem ser considerados como variáveis aleatórias que compõem o universo.

O valor atribuído para cada elemento do universo estudado é chamado de unidade de amostragem. No estudo da população “ângulo de atrito”, cada respectivo valor encontrado

para o parâmetro em questão corresponde a uma unidade de amostragem. Já o conceito de amostra pode ser entendido como a união de várias unidades de amostragem.

Frequentemente em estudos geotécnicos, utiliza-se a amostragem aleatória, que consiste na escolha de um determinado número de unidades de amostragem, de forma que todas tenham a mesma probabilidade de serem escolhidas, afirma Rezende (2013).

2.3.2. Tendência Central

Tendência central nada mais é do que um valor típico para uma distribuição de probabilidade. Se forem realizadas uma série de determinações com “n” medidas aleatórias de uma determinada população, pode-se calcular a média aritmética para cada série de medida a partir da seguinte equação:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} x_i}{n} \quad (2.13)$$

Onde: “ \bar{X} ” é a média da amostra, “n” o número de medidas aleatórias e “ x_i ” o valor individual de cada medida da amostra.

Após obter a média da amostra para cada série de medidas de uma população em questão pode-se criar um histograma específico para a distribuição, como mostra a Figura 2.2.

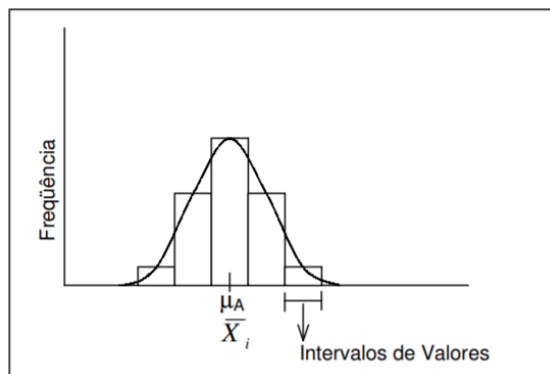


Figura 2.2 Distribuição estatística das médias das amostras da população (Fabricio, 2006)

No gráfico, o eixo “x” representa os valores diversos de intervalos das médias aritméticas e o eixo “y” as porcentagens de valores encontrados em cada intervalo.

Além disso, o histograma demonstra o fato de que as maiores porcentagens de valores ocorrem em torno do intervalo de valor central μ , que corresponde à média da população estudada.

Como dificilmente é possível medir todas as unidades de amostragem de uma população, a média \bar{X} , correspondente a “n” unidades, obtidas de maneira aleatória, representa a melhor estimativa possível da média μ da população.

Assim, μ pode ser escrito matematicamente da seguinte forma:

$$\mu = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot f(x) dx \quad (2.14)$$

$f(x)$: função de distribuição de probabilidade;

μ : primeiro momento probabilístico.

A média é uma informação importante quando se fala em variável aleatória. Geralmente, em análises determinísticas de estabilidade, esse valor é assumido para os parâmetros envolvidos. Já em estudos probabilísticos, torna-se necessário conhecer sobre a distribuição de frequência dessas variáveis.

2.3.3. Medidas de Variabilidade ou Dispersão

Trata-se de uma forma de medir o grau de afastamento ou dispersão dos dados observados em torno de um valor central conhecido como média. Assim, dois conjuntos de dados que possuem a mesma média podem divergir em termos de variação (desvio padrão e variância), como pode ser observado na Tabela 2.3.

Tabela 2.3: Dispersão dos dados de uma mesma área (Maia, 2003)

Equipe	Pesos Específicos (KN/m ²)						Média	Variância	Desvio Padrão
1	15,0	15,4	15,8	16,2	16,6	17,0	16,0	0,56	0,75
2	15,8	15,8	15,8	16,2	16,2	16,2	16,0	0,05	0,22

O desvio padrão é a raiz quadrada da soma das diferenças ao quadrado em torno da média aritmética dividida pelo tamanho da amostra menos 1, como definido na equação (2.15):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{X})^2}{n - 1}} \quad (2.15)$$

Onde: \bar{X} é a média das amostras, n é o número de valores (tamanho das amostras) e xi os valores individuais.

Ou seja, o desvio padrão mostra quão uniforme é um conjunto de dados. Quanto mais próximo de 0 for a resultante, mais homogêneo são os dados.

Já a variância é o quadrado do desvio padrão (σ^2). Ela mostra quão distante cada valor do conjunto de dados está do valor médio. Quanto menor a variância, mais próximo os valores estão da média.

Por fim, tem-se o coeficiente de variação (CV) que representa o desvio padrão amostral como porcentagem da média conforme a equação (2.16).

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \quad (2.16)$$

2.3.4. Tipos de Distribuição de Probabilidade

A distribuição de probabilidade representa a probabilidade que cada valor de uma variável aleatória pode assumir. Uma variável aleatória só poderá assumir um valor numérico com uma probabilidade associada ou uma probabilidade assumida. Na literatura existem diversos tipos de distribuição, no entanto as mais comumente utilizadas em problemas geotécnicos são normal e log-normal, que serão explicadas logo em seguida.

A distribuição normal, também conhecida como distribuição Gaussiana, é bastante utilizada em probabilidade. Essa função tem uma característica típica, apresenta uma curva simétrica em forma de sino, como exemplificado na Figura 2.3.

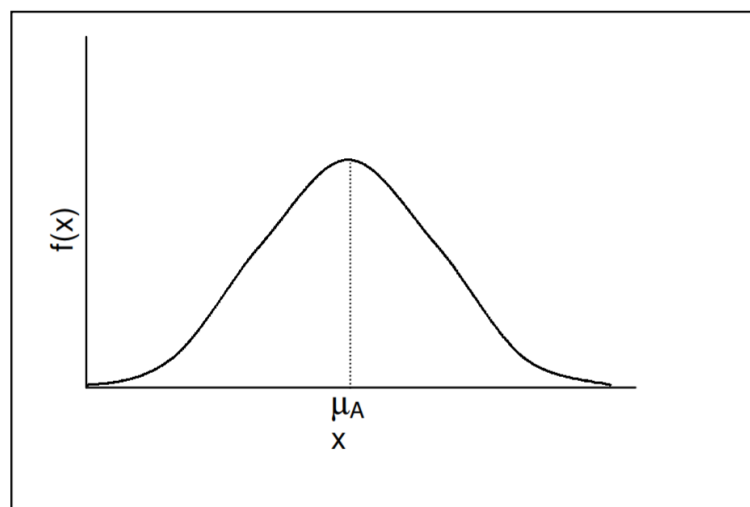


Figura 2.3 Distribuição Normal da variável aleatória “x” (Fabricio, 2006)

Matematicamente a função pode ser escrita da seguinte forma:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\left[\frac{-(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]} \quad (2.17)$$

Onde: σ é o desvio padrão, μ a média da distribuição e x a variável aleatória associada.

Para saber a probabilidade de uma variável ser menor que um determinado valor “a”, integrase a equação (2.17) entre o intervalo $(-\infty, a)$.

$$\int_{-\infty}^a f(x)dx = \int_{-\infty}^a \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\left[\frac{-(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]} dx \quad (2.18)$$

Como não existe solução analítica para a equação (2.18), faz-se necessário o uso de métodos numéricos afim de encontrar uma solução. Essa técnica consiste em obter uma curva de distribuição normal padrão, com valores de $\mu = 0$ e $\sigma = 1$, a partir da transformação de uma curva de distribuição normal qualquer, como mostra a Figura 2.4.

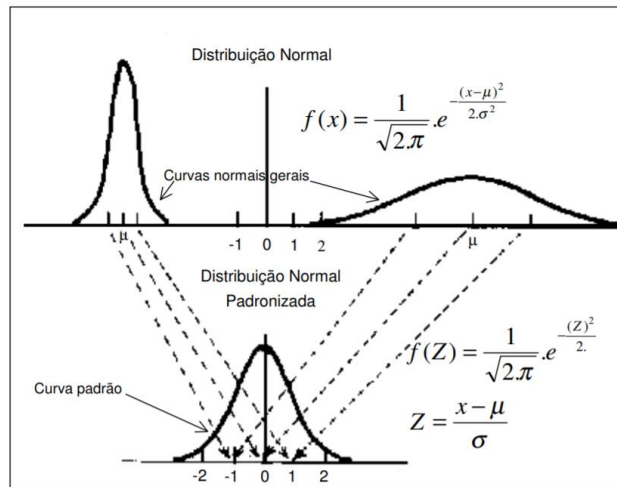


Figura 2.4 Obtenção de uma curva normal padrão a partir de uma curva normal geral (Fabricio, 2006)

Substituindo os valores padrões de média e desvio padrão, a probabilidade de uma variável aleatória “x” ser menor ou igual a “z” é dada por:

$$f(z) = \int_{-\infty}^z \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-x^2}{2}} dx \quad (2.19)$$

Onde “z” trata-se de uma variável aleatória padronizada:

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (2.20)$$

Já a distribuição log-normal ocorre quando o logaritmo de uma variável aleatória segue uma distribuição normal. Trata-se de uma função que apresenta uma assimetria em relação a μ e sempre é positiva, como pode ser observado na Figura 2.5.

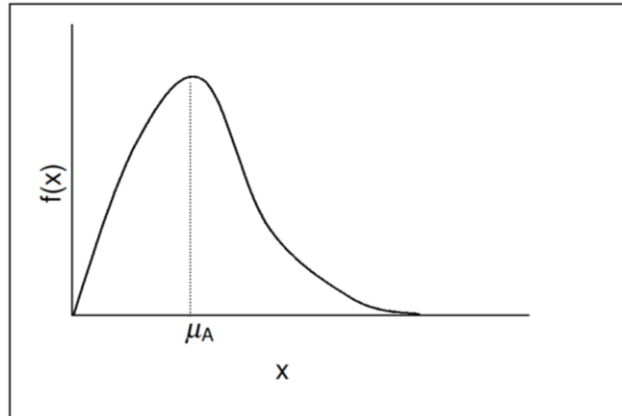


Figura 2.5 Curva de distribuição Log-Normal (Fabricio, 2006)

Matematicamente ela pode ser escrita conforme equação (2.21).

$$f(x) = \frac{1}{x \sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.21)$$

2.3.5. Tipos de Incertezas

Conforme Griffiths e Fenton (2007), incerteza, nada mais é do que a diferença entre o valor medido e o valor verdadeiro de uma grandeza, ou seja, representa uma faixa de valores, no qual espera-se que o valor verdadeiro esteja contido. Dessa forma, as incertezas podem ser divididas em duas categorias: incertezas sistêmicas e incertezas aleatórias, isso não levando em consideração os erros humanos, que seriam um terceiro grupo.

O primeiro tipo de incerteza, chamado sistêmica, trata-se daquele referente a falta de conhecimento de uma variável, que é resultado da combinação de outras duas incertezas:

- Incerteza estatística, devido a um número insuficiente de ensaios ou medições.
- Incerteza de medição, devido a, por exemplo, imperfeições de um instrumento, e falta de qualificação da equipe.

As incertezas sistêmicas podem ser eliminadas ou reduzidas, através de melhores técnicas de medição, um maior número de informações, bem como qualificação das equipes, dentre outros.

Já as incertezas aleatórias podem ser exemplificadas pela variação espacial de um parâmetro de solo dentro de uma mesma camada geológica, ou seja, devido à heterogeneidade natural das camadas. Essa incerteza não pode ser reduzida e nem eliminada.

Vale lembrar que o tratamento estatístico de um conjunto de medidas realizadas para a determinação de um parâmetro pode quantificar suas incertezas e chegar a valores aceitáveis de intervalo de confiança. Como visto anteriormente, as propriedades incertas de um solo são definidas como variáveis aleatórias e são representadas estatisticamente por sua média, desvio padrão e distribuição de probabilidade da função.

2.3.6. Método Probabilístico FOSM (*First Order Second Moment*)

Tradicionalmente os métodos determinísticos são mais utilizados na engenharia geotécnica. Nessas análises, os parâmetros envolvidos são considerados fixos, ou seja, não levam em consideração a grande dispersão que apresentam. Em contrapartida, na tentativa de tornar mais confiáveis as análises de estabilidade, encontram-se os métodos probabilísticos. Estes, por sua vez, permitem quantificar as incertezas oriundas das variáveis geotécnicas.

O método FOSM (Primeira Ordem e Segundo Momento) é assim chamado pois utiliza a primeira derivada da série de Taylor (linear) e o segundo momento da função de performance (variância) em sua análise. Sendo essa função de performance, no caso de estabilidade de taludes, o fator de segurança. A fundamentação matemática foi abordada por Harr (1987) como pode ser observado a seguir:

Dada uma função de performance definida como:

$$g = g(x_1, x_2, x_3 \dots x_n) \quad (2.22)$$

E os respectivos valores médios da função e do vetor x :

$$\mu_x = (\mu_{x1}, \mu_{x2}, \mu_{x3} \dots \mu_{xn}) \quad (2.23)$$

Por meio da expansão da função de performance em torno dos seus valores médios realizada com base na fórmula de Taylor tem-se:

$$g(x) = g(\mu_x) + \frac{1}{1!}(x - \mu_x) \frac{dg}{dx} + \frac{1}{2!}(x - \mu_x)^2 \frac{dg^2}{dx^2} \dots \quad (2.24)$$

Mantendo-se somente o termo linear da série de Taylor acima:

$$g(x) - g(\mu_x) = \frac{1}{1!}(x - \mu_x) \frac{dg}{dx} \quad (2.25)$$

Em seguida, elevando a equação (2.25) ao quadrado e aplicando as manipulações algébricas pertinentes, obtém-se a variância da função de performance (fator de segurança).

$$V[FS] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \rho_{x_i x_j} \sigma_{x_i} \sigma_{x_j} \frac{dFS}{d_{x_i}} \frac{dFS}{d_{x_j}} \quad (2.26)$$

A equação (2.26) expandida pode ser escrita como:

$$V[FS] = \sum_{i=1}^n \left(\frac{dFS}{d_{x_i}} \sigma_{x_i} \right)^2 + 2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \rho_{x_i x_j} \sigma_{x_i} \sigma_{x_j} \left(\frac{dFS}{d_{x_i}} \frac{dFS}{d_{x_j}} \right) \quad (2.27)$$

Onde ρ trata-se do coeficiente de correlação e σ do desvio padrão.

Vale lembrar que a equação (2.27) é indicada para os casos em que as variáveis x_i e x_j são correlacionadas. No caso em que estas são independentes, ela pode ser reduzida e escrita da seguinte forma:

$$V[FS] = \sum_{i=1}^n \left(\frac{dFS}{d_{x_i}} \sigma_{x_i} \right)^2 = \left(\frac{dFS}{dc'} \right)^2 \sigma_{c'}^2 + \left(\frac{dFS}{d\phi'} \right)^2 \sigma_{\phi'}^2 + \dots \quad (2.28)$$

O cálculo das derivadas parciais $\frac{dFS}{d_{x_i}}$ é feito a partir da variação do fator de segurança devido a pequenas variações nas variáveis independentes, em que cada variável é incrementada separadamente, enquanto as demais são mantidas fixas e iguais aos valores médios. Ou seja, utilizando algum dos métodos:

- 1) Método das diferenças divididas (ascendentes ou descendentes) sugerido por Christian et al (1992) e Sandroni e Sayão (1992);
- 2) Método das diferenças finitas centrais recomendado por Mostyn e Li (1993).

Já para o cálculo do desvio padrão σ_{xi} utiliza-se a relação:

$$CV = \frac{\sigma_{xi}}{\mu_{xi}} \quad (2.29)$$

Onde: CV é o coeficiente de variação e μ_{xi} a média de cada parâmetro envolvido no cálculo do fator de segurança.

O coeficiente de variação apresenta valores pré-definidos como pode ser observado na Tabela 2.4 retirada do trabalho de Duncan (2000).

Tabela 2.4 Coeficiente de variação associado a cada parâmetro geotécnico (traduzido - Duncan, 2000)

Parâmetros Geotécnicos ou Resultados de Teste in situ	Coeficiente de Variação	Fonte
Peso específico (γ)	3% a 7%	Harr (1984), Kulhaway (1992)
Peso específico seco (γ_b)	0% a 10%	This paper, Lacasse and Nadim (1997)
Ângulo de atrito efetivo (ϕ')	2% a 13%	Harr (1984), Kulhaway (1992)
Resistência não drenada (S_u)	13% a 40%	This paper, Kulhaway (1992), Harr (1984), Lacasse and Nadim (1997)
Relação de força não drenada ($S_u/\sigma'v$)	5% a 15%	This paper, Lacasse and Nadim (1997)
Índice de compressão (Cc)	10% a 37%	This paper, Kulhaway (1992), Harr (1984)
Pressão de pré consolidação (pp)	10% a 35%	This paper, Harr (1984), Lacasse and Nadim (1997)
Coeficiente de permeabilidade, solo saturado (k)	68% a 90%	This paper, Harr (1984)
Coeficiente de permeabilidade, solo insaturado (k)	130% a 240%	Harr (1984), Benson et al. (1999)
Coeficiente de adensamento vertical (Cv)	33% a 68%	This paper
Número de golpes no SPT (N)	15% a 45%	Harr (1984), Kulhaway (1992)
Penetração de cone Teste elétrico (qc)	5% a 15%	Kulhaway (1992)
Penetração de cone Teste mecânico (qc)	15% a 37%	Harr (1984), Kulhaway (1992)
Resistência de ponta Teste do dilatômetro (qdm)	5% a 15%	Kulhaway (1992)
Resistência ao cisalhamento não drenada Teste da palheta (Sv)	10% a 20%	Kulhaway (1992)

A aproximação feita pelo método FOSM fornece a estimativa da variância e da média, o que não é suficiente para a avaliação da probabilidade de falha. Dessa forma, faz-se o uso do índice de confiabilidade (β') que pode ser relacionado com a probabilidade de ruptura.

Matematicamente β' pode ser escrito como:

$$\beta' = \frac{E[FS] - 1}{\sigma_{FS}} \quad (2.30)$$

Onde, $E[FS]$ é a esperança do fator de segurança.

Por fim, a probabilidade de ruptura pode ser obtida a partir de:

$$P_r = 1 - \Phi(\beta') \quad (2.31)$$

Onde, P_r trata-se da probabilidade de ruptura e $\Phi(\beta')$ da curva normal padronizada.

Assim:

$$P_r = 1 - \int_{-\infty}^{\beta'} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} dx \quad (2.32)$$

Observando a equação (2.32) é possível concluir que a probabilidade de ruptura pode ser escrita como 1 menos a probabilidade de ocorrência de valores menores que o índice de confiabilidade para uma função que obedece a uma distribuição normal padrão. Deste modo, percebe-se a importância do índice β' que também pode ser correlacionado com a P_r através da Figura 2.6 apresentada abaixo:

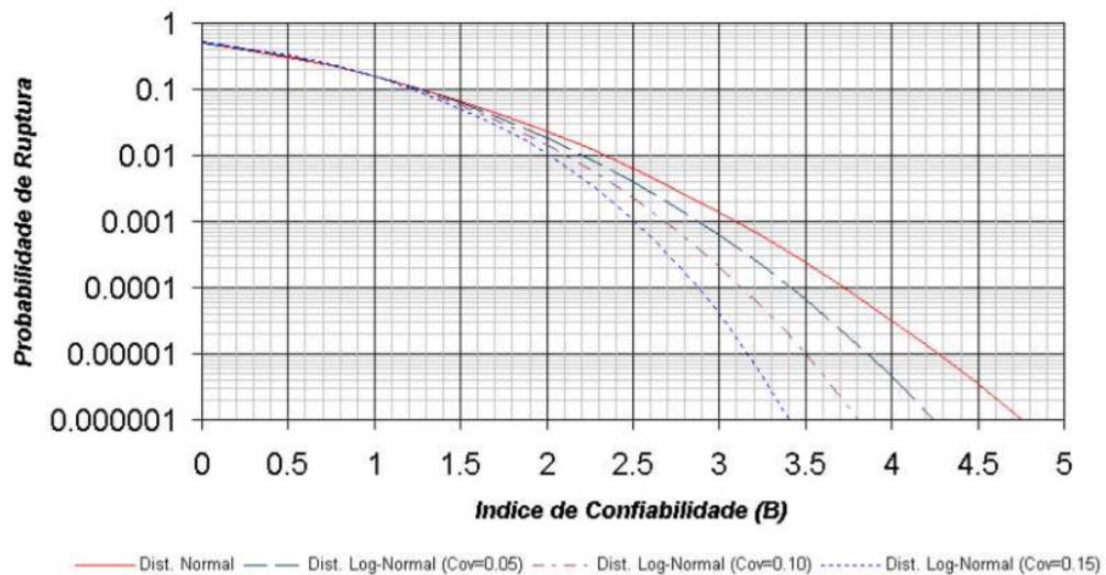


Figura 2.6 Índice de confiabilidade x Probabilidade de Ruptura (Sandroni e Sayão, 1992)

A probabilidade de ruptura obtida por meio do fator de segurança não indica a probabilidade real de ruptura, pois se trata de uma análise bastante complexa que envolve além de variáveis geotécnicas, fatores externos que podem influenciar a falha. Portanto, para melhor assegurar a segurança do local analisado é necessário estabelecer limites para os valores de probabilidade de ruptura, a depender do tipo de empreendimento, como mostra a Figura 2.7. Tomando como base retro análises e experiências advindas de projetos antigos, alguns autores estabelecem valores aceitáveis para o índice de confiabilidade, como pode ser observado na Figura 2.8.

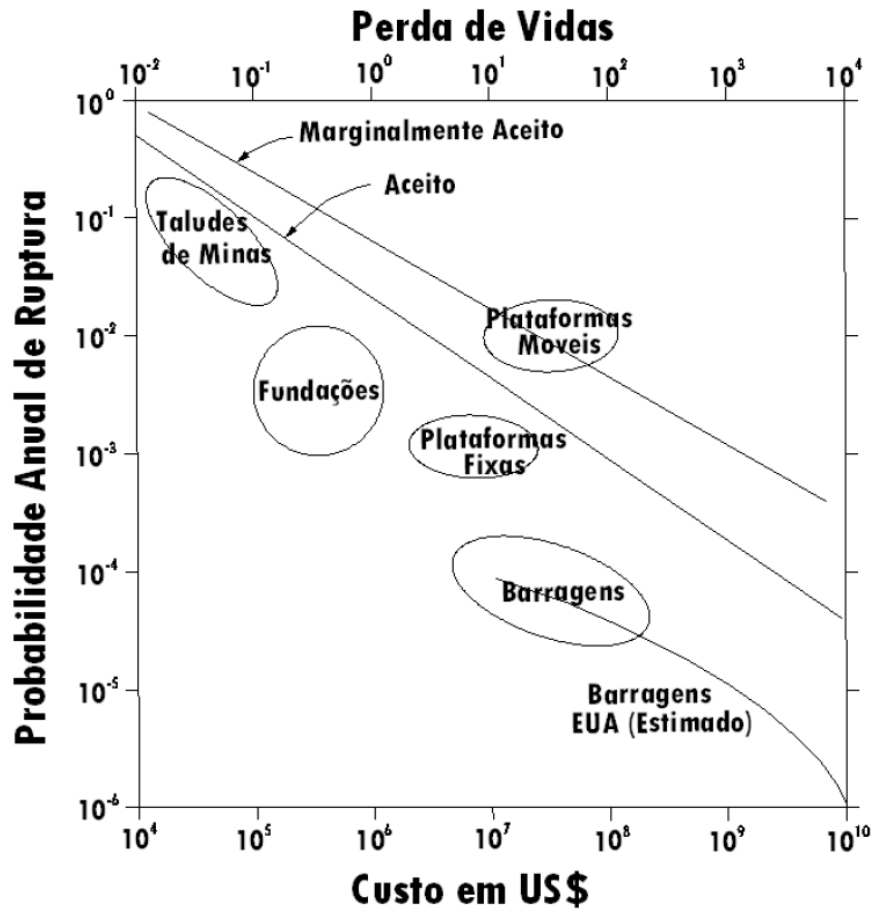


Figura 2.7 Probabilidade de Ruptura Admissível (Baecher, 1982b)

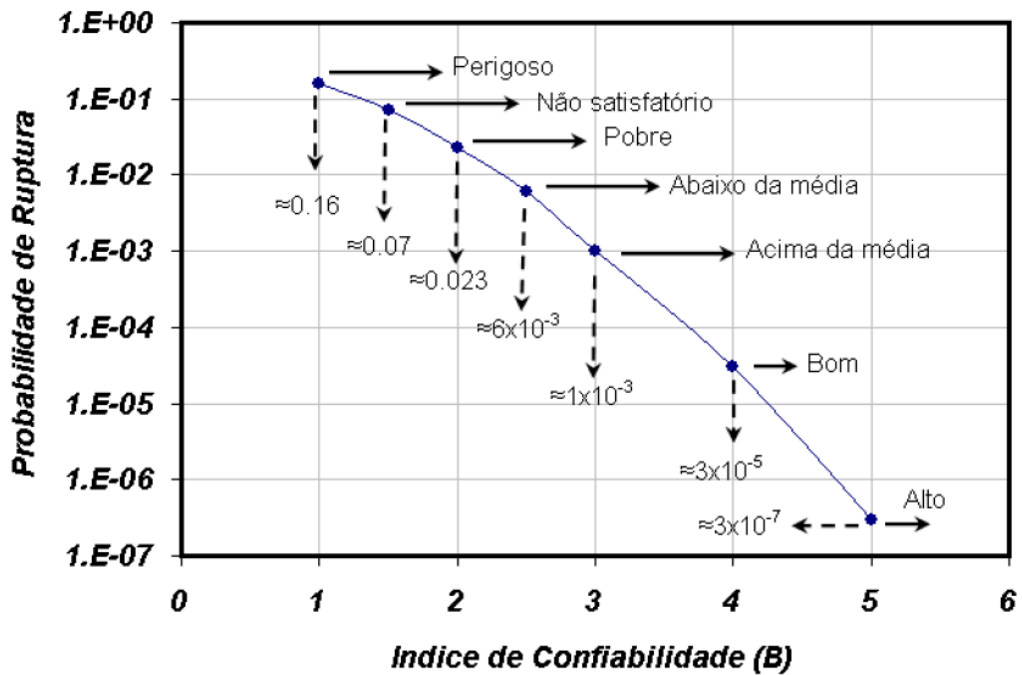


Figura 2.8 Probabilidades de Ruptura (US Army Corps of Engineers, 1995)

Assim, segundo Baecher e Christian (2003), pode-se resumir o método nas seguintes etapas:

- Identificar as variáveis, seus valores médios e variâncias.
- Calcular as derivadas parciais da função F em relação aos parâmetros.
- Calcular o valor esperado da função, $E[F]$, e sua variância, σ^2_F .
- Calcular o índice de confiabilidade β' e a probabilidade de ruptura.

2.4. SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA (SIG)

O surgimento das técnicas de Sensoriamento Remoto (SR) possibilitou aos usuários trabalharem um conjunto de informações cada vez maior. Dessa forma tornou-se possível integrar em uma única base de dados informações que representassem vários aspectos do estudo de uma região. Além disso, permitiu a entrada de dados de diversas formas gerando novas informações e conseqüentemente relatórios e documentos gráficos de diversos tipos.

2.4.1. Características de um Sistema de Informação Geográfica

De acordo com Rosa e Brito (1996) um SIG pode ser definido como sendo uma combinação de recursos humanos (*peopleware*) e técnicos (*hardware/software*), em concordância com uma série de dados e metodologias que tem como objetivo a aquisição, armazenamento, manipulação, análise e apresentação de dados referenciados espacialmente.

- Recursos Humanos: São as pessoas responsáveis por desenvolver, operar e administrar o sistema, desenvolvem novas ferramentas e o conhecimento científico.
- Hardware: trata-se dos elementos físicos que dão suporte ao funcionamento do sistema, como processador, scanners, impressoras, dentre outros.
- Software: É o elemento responsável por permitir a manipulação de ferramentas e funções para geração da informação geográfica, como por exemplo, Spring[®] e ArcGIS[®].
- Dados: São registros de fenômenos com referência espacial.
- Metodologia: Conjunto de procedimentos que cada usuário constrói em um SIG.

2.4.2. Estrutura de um Sistema de Informação Geográfica

O SIG pode ser dividido internamente conforme Figura 2.9.

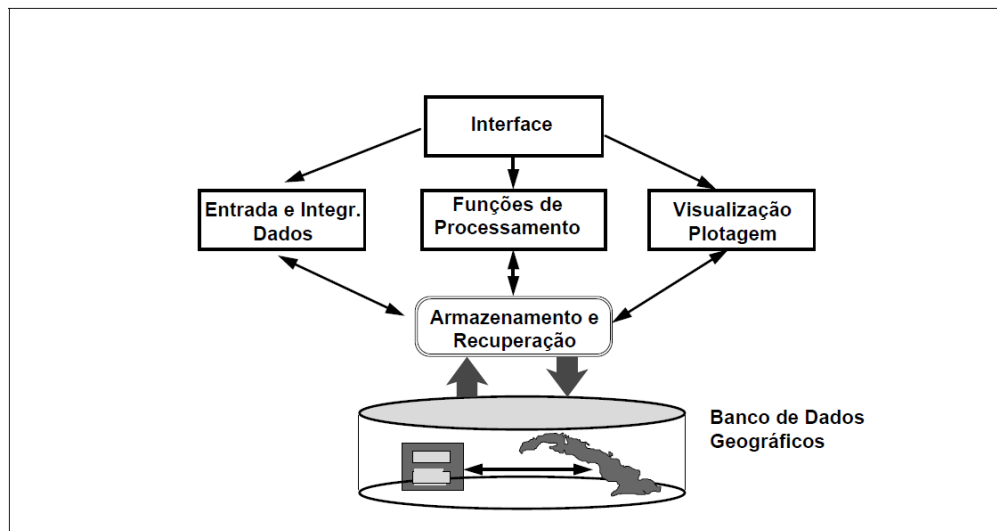


Figura 2.9 Organização de um SIG (Câmara et al, 1996)

Numa visão geral, pode-se considerar que um SIG tem os seguintes componentes: interface com usuário; entrada e integração de dados; funções de processamento; visualização e impressão; e armazenamento e recuperação de dados. Cada sistema, em função de seus objetivos e necessidades, implementa esses componentes de forma distinta, mas todos estão usualmente presentes em um SIG.

A interface mais utilizada atualmente é aquela baseada em menus, por serem mais fáceis de operar. Anteriormente se utilizava a linguagem de comandos, no entanto, à medida que o sistema vai crescendo em funcionalidade torna-se uma tarefa extremamente complexa com relação a operação, o que acaba por dificultar o seu uso.

Com relação a entrada de dados, podem ser distinguidos quatro tipos: entrada de dados via caderneta de campo, a digitalização em mesa, a digitalização ótica e a leitura de dados na forma digital, incluindo a importação de dados em outros formatos. Vale lembrar que, na importação de dados digitais, é muito importante aproveitar o investimento já feito, eventualmente por outras instituições, na coleta e armazenamento de dados geográficos. No Brasil, as principais fontes de dados são as bases do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), do INPE (Instituto Nacional de Pesquisa Espacial) e do Centro de Cartografia Automatizada do Exército.

As funções de processamento são dependentes dos tipos de dados envolvidos. A análise geográfica engloba funções como superposição, ponderação, medidas (área, perímetro), mapas de distância, tabulação cruzada, dentre outras. O Processamento Digital de Imagens (PDI) envolve funções como contraste, realce e classificação. Modelos Numéricos de

Terreno (MNT) permitem a geração de mapas de declividade e aspecto, cálculo de volumes, análise de perfis, além da própria geração do modelo a partir de pontos esparsos ou linhas, entre outras funções.

Os ambientes de visualização de um sistema são consequência do paradigma adotado para a interface. Quanto à produção cartográfica, alguns sistemas dispõem de recursos altamente sofisticados de apresentação gráfica, englobando a definição de uma área de plotagem, colocação de legendas, textos explicativos e notas de crédito. Já o aparecimento de padrões “de facto”, como o PostScript e o HPGL, vêm para facilitar o desenvolvimento de funções de plotagem.

Os dados de um SIG são geralmente organizados sob a forma de um banco de dados geográficos. Tradicionalmente, os SIG's armazenam os dados geográficos em arquivos internos. Este tipo de solução vem sendo substituída pelo uso cada vez maior de SGBD (Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados). Esses componentes se relacionam de forma hierárquica. No nível mais próximo ao usuário, a interface homem-máquina define como o sistema é operado e controlado. No nível intermediário, um SIG deve ter mecanismos de processamento de dados espaciais (entrada, edição, análise, visualização e saída). No nível mais interno do sistema, um sistema de gerência de bancos de dados geográficos oferece armazenamento e recuperação dos dados espaciais e seus atributos.

2.4.3. Imagem de Satélite

Imagem de satélite é um arquivo de imagem obtido por SR a partir de um satélite artificial. Esse processo poderia ser explicado de maneira simples como a obtenção de uma fotografia da Terra de uma máquina localizada no espaço dentro de um satélite.

A aquisição de imagens de satélite pode ser realizada por meio da plataforma *Earth Explorer*, responsável por armazenar um banco de dados relativo a imagens satelitais, fotografias aéreas e outras informações de sensoriamento remoto, operado pelo *United States Geological Survey* (USGS), inclusive aquelas da série *Landsat*. Este trata-se de um satélite responsável pelo mapeamento multiespectral em alta resolução da superfície terrestre. Existem diversas versões, desde o *Landsat 1* até o 8.

2.4.4. Características das Imagens de Satélite

As imagens de sensores remotos possuem estrutura matricial, onde seu elemento principal é denominado pixel, esse termo é a aglutinação de *picture* e *element* e trata-se da menor unidade de uma imagem digital. Quando se fala de imagem um conceito importante é o termo resolução, em sensoriamento remoto, pode ser atribuído a quatro diferentes parâmetros:

- Resolução Espacial:

Refere-se ao tamanho que esse pixel representa na realidade. Vale ressaltar que para um mesmo sensor remoto cada pixel representa sempre uma mesma área com as mesmas dimensões na superfície da Terra e quanto menor for o tamanho real deste pixel, maior será a resolução espacial desta imagem, o que significa que maior será a capacidade de registrar objetos dispostos na superfície terrestre, como ilustrado na Figura 2.10.

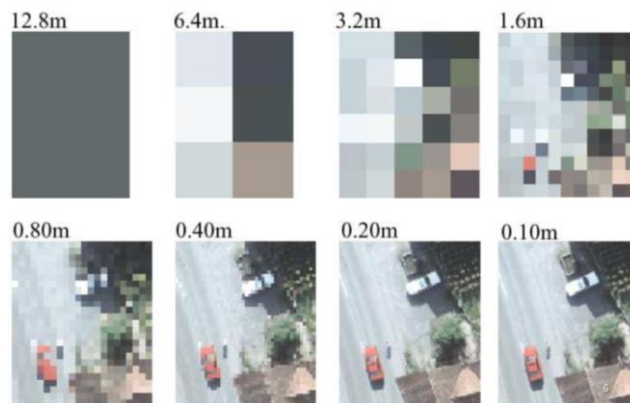


Figura 2.10 Resolução Espacial (INPE)

No caso do *Landsat 5*, as bandas de 1 a 5 e 7 possuem resolução espacial de 30 m, enquanto a banda 6 possui resolução de 120 m. Já no *Landsat 8* a banda pancromática e as 2 bandas do infravermelho termal possuem resolução espacial de 15 e 100 m respectivamente, enquanto as demais de 30 m.

- Resolução Espectral

Já a resolução espectral tem a ver com o número de bandas que os sensores existentes nos satélites conseguem discretizar. Como, por exemplo, o *Landsat 5* que conta com sete bandas captadas pelo sensor *Thematic Mapper* (TM), tendo cada uma a sua especificidade de acordo com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE):

- Banda 1 (azul) apresenta grande penetração em corpos d'água, sendo particularmente interessante para estudos batimétricos. Permite detalhar a turbidez da água. Boa para mapeamento de águas costeiras. Apresenta sensibilidade a plumas de fumaça oriundas de queimadas ou atividade industrial.
- Banda 2 (verde) apresenta grande sensibilidade a presença de sedimentos em suspensão na água, sendo utilizada para estudos de qualidade d'água e mapeamento de correntes em corpos d'água. Tem boa penetração em corpos d'água. Boa para mapeamento de vegetação e áreas onde ocorrem atividades antrópicas.
- Banda 3 (vermelho) apresenta bom contraste entre áreas cobertas com vegetação e solo exposto, bem como discrimina diversos tipos de vegetação. É a banda mais utilizada para a delimitação das “manchas” urbanas e traçado do sistema viário. É adequada também para mapeamento de uso do solo, agricultura e estudos de qualidade d'água.
- Banda 4 (infravermelho próximo) apresenta bom contraste entre solo e corpos d'água, permitindo o mapeamento de rios de grande porte, lagos, lagoas, reservatórios e áreas úmidas. É também sensível a morfologia do terreno, sendo muito utilizada para mapeamentos de geologia e geomorfologia. Serve para mapear a vegetação que foi queimada e permite ainda a visualização de áreas ocupadas por macrófitas aquáticas (por exemplo, aguapé). Banda muito sensível à absorção da radiação eletromagnética pelos óxidos de ferro e titânio, muito comuns nos solos tropicais muito intemperizados.
- Banda 5 (infravermelho médio) permite observar o teor de umidade nas plantas e detectar possíveis estresses na vegetação causados por falta de água. Utilizada também para obter informações sobre a umidade do solo, no entanto, pode sofrer perturbações se ocorrem chuvas um pouco antes de a cena ser imageada pelo satélite.
- Banda 6 (infravermelho termal) pode ser utilizada para mapeamento de estresse térmico em plantas, estudos de propriedade termal dos solos, mapeamento da temperatura de superfície de águas oceânicas superficiais, informações importantes para pesca e clima. Pode ser utilizada para estudos de ilhas urbanas.
- Banda 7 (infravermelho médio) apresenta sensibilidade à morfologia do terreno, servindo para estudos nas áreas de geologia, solos e geomorfologia. Utilizada também para a identificação de minerais e detecção de umidade no solo e na vegetação.

Já o Landsat-8 opera com dois instrumentos imageadores: *Operacional Terra Imager* (OLI) e *Thermal Infrared Sensor* (TIRS). Produtos OLI consistem de nove bandas multiespectrais, sendo duas delas uma novidade se comparadas as versões anteriores, a banda 1 (*coastal aerosol*) projetada especificamente para estudos dos recursos hídricos e investigação da zona costeira e a banda 9 projetada para observar nuvens de alta altitude (*cirrus clouds*), conforme *Science for a Changing World*. Há também o acréscimo de uma banda de garantia de qualidade (Banda QA) que apresenta informações sobre a presença de nuvens, água e neve. Vale lembrar que a banda 8 é a pancromática, ou seja, imagem obtida por um radiômetro capaz de registrar a energia eletromagnética numa única banda de frequências que inclui a maior parte da zona da luz visível. A partir do sensor termal TIRS foram criadas duas bandas espectrais para o comprimento de onda antes coberto por uma única banda nos sensores TM e ETM, sendo elas as bandas 10 e 11. Tais adições provocaram mudanças nos intervalos dentro do espectro dos canais de todas as bandas.

- Resolução Radiométrica

De acordo com Crosta (1993) cada pixel possui também um atributo Z, que indica o seu nível de cinza, que vai variar do preto ao branco. O nível de cinza representa a intensidade de energia eletromagnética (refletida/emitida) média medida pelo sensor para a área da superfície da Terra correspondente ao tamanho do pixel. Cada sensor possui um limite de tons de cinza que consegue detectar e armazenar. Esse limite é mensurado em bits. Como os computadores utilizados para esse propósito possuem um sistema binário, o número de tons de cinza que o sensor conseguirá captar sempre será igual ao sistema elevado ao número de bits. No caso do *Landsat 5*, será 2 elevado ao número de bits do sensor, sendo que ele possui sensores de 8 bits, por isso sua resolução radiométrica será de 2^8 , o que corresponde a 256 níveis de cinza. Já o *Landsat 8* possui sensores de 16 bits, logo 65.536 níveis de cinza. Quanto maior o número de bits, maior o poder de contraste e de discriminação das imagens, inclusive nas áreas de sombra.

- Resolução Temporal

O Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia (CEPSRM) define resolução espacial como a frequência de passagem do sensor em um mesmo local, em um determinado intervalo de tempo. Tanto o *Landsat 5* quanto o 8 demoram 16 dias revisitar a mesma região.

A Tabela 2.5, logo abaixo, mostra um resumo das características dos dois satélites listados anteriormente.

Tabela 2.5 Características dos satélites *Landsat 5* e *Landsat 8* (modificado - USGS)

Características	SATÉLITE LANDSAT-5	SATÉLITE LANDSAT-8
	Sensor	Sensores
	Thematic Mapper (TM) Bandas 1 a 7	Operational Land Imager (OLI) Bandas 1 a 9 Thermal Infrared Sensor (TIRS) Bandas 10 e 11
Largura de Faixa	170x185 Km	170x185 Km
Bandas Espectrais / Resolução Espacial	Banda 1 Blue (0,45 - 0,52 μm) - 30 m Banda 2 Green (0,52 - 0,60 μm) - 30 m Banda 3 Red (0,63 - 0,69 μm) - 30 m Banda 4 Near Infrared NIR (0,76 - 0,90 μm) - 30 m Banda 5 Mid-Infrared (1,55 - 1,75 μm) - 30 m Banda 6 Thermal (10,4 - 12,5 μm) - 120 m Banda 7 Mid-Infrared (2,08 - 2,35 μm) - 30 m	Banda 1 Coastal aerosol (0,43 - 0,45 μm) - 30 m Banda 2 Blue (0,45 - 0,51 μm) - 30 m Banda 3 Green (0,53 - 0,59 μm) - 30 m Banda 4 Red (0,64 - 0,67 μm) - 30 m Banda 5 Near Infrared NIR (0,85 - 0,88 μm) - 30 m Banda 6 SWIR 1 (1,57 - 1,65 μm) - 30 m Banda 7 SWIR 2 (2,11 - 2,29 μm) - 30 m Banda 8 Panchromatic (0,50 - 0,68 μm) - 15 m Banda 9 Cirrus (1,36 - 1,38 μm) - 30 m Banda 10 Thermal Infrared TIRS 1 (10,6 - 11,19 μm) - 100 m Banda 11 Thermal Infrared TIRS 2 (11,5 - 12,51 μm) - 100 m
Resolução Radiométrica	8 bits	16 bits
Projeção	UTM, Datum WGS 1984	UTM, Datum WGS 1984
Revisita	16 dias	16 dias
Órbita	Heliossíncrona (altitude de 705 Km)	Heliossíncrona (altitude de 705 Km)

2.4.5. Processamento Digital de Imagem (PDI)

Por PDI entende-se a manipulação de uma imagem por computador de modo que a entrada e a saída do processo sejam imagens. O objetivo de se usar processamento digital de imagens é melhorar o aspecto visual de certas feições estruturais para o analista humano e fornecer outros subsídios para a sua interpretação. O processamento permite gerar produtos que possam ser posteriormente submetidos a outros processamentos (SPRING, 1996).

Conforme Silva (2001), a função primordial do processamento digital de imagens de sensoriamento remoto é a de fornecer ferramentas para facilitar a identificação e a extração da informação contida nas imagens, para posterior interpretação. Nesse sentido, sistemas dedicados de computação são utilizados para atividades interativas de análise e manipulação das imagens brutas. O resultado desse processo é a produção de outras imagens, estas já contendo informações específicas, extraídas e realçadas a partir das imagens brutas.

O processamento de imagens pode ser dividido em três etapas: pré-processamento, realce e classificação.

- Pré-processamento: refere-se ao processamento inicial de dados brutos para calibração radiométrica da imagem, correção de distorções geométricas e remoção de ruído.
- Realce: visa melhorar a qualidade da imagem, permitindo uma melhor discriminação dos objetos presentes na imagem.
- Classificação: onde são atribuídas classes aos objetos presentes na imagem.

2.4.6. SPRING

O SPRING (Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas) é um software livre e um SIG que combina uma interface interativa com o usuário de banco de dados ao modelar a metodologia de trabalho em estudos ambientais e manipulação unificada de dados espaciais. Integra o processamento de imagens, a análise espacial e a modelagem digital do terreno, além de interface com os bancos de dados Postgres e Ingres (Rosa e Brito, 1996). O SPRING opera como um banco de dados geográficos sem fronteiras, suportando um volume de dados sem limitações de escala, projeção e fuso, além de manter a identidade dos objetos geográficos ao longo de todo o banco. Administra tanto dados vetoriais como dados matriciais e realiza a integração de dados de SR (Cruz e Barros, 2001). Ele é um projeto do INPE/DPI em parceria com outras empresas e órgãos governamentais. A versão 5.5.6 do Spring conta com todas as ferramentas necessárias para a execução plena do projeto, desde a montagem da base de dados até as operações cartográficas realizadas.

2.4.7. Aplicação do SIG

De acordo com Machado e Zacarias (2016), os movimentos de massa são influenciados por diversos agentes mobilizadores, podendo ser originados na natureza ou provocado pelo ser humano. Sua ocorrência pode ser pontual ou generalizada. Podem trazer consequências econômicas, sociais, naturais e principalmente ameaçar a vida de milhares de pessoas. Dessa forma, uma maneira de reduzir o impacto desses fenômenos na sociedade é a realização de gestão de risco, que tem como passo inicial a avaliação da probabilidade de falha.

Tendo em vista esse cenário, o geoprocessamento e suas tecnologias têm contribuído para a tomada de decisão na gestão e planejamento ambiental a nível federal, estadual e municipal perante os órgãos e mais variadas instituições, na resolução de problemas ambientais, e na estratégia de previsão de riscos e melhoria de qualidade ambiental. Essa tecnologia

automatiza tarefas até então realizadas manualmente e facilita, assim, a realização de análises complexas, por intermédio da integração de dados de diversas fontes (Rosa e Brito, 1996).

Silveira e Ramos (2007) destacam que o SIG se sobressai no conjunto dessas geotecnologias pelo fato de possibilitar a integração de um volume substancial de informações geográficas e alfanuméricas correlacionadas. Dessa forma, as possibilidades de análise são ampliadas, juntamente com a otimização do tempo de recuperação e tratamento dos dados inter-relacionados. Avanços alcançados na tecnologia dos sistemas de informação geográfica e em ferramentas matemáticas e estatísticas voltadas para a modelagem e simulação têm permitido a crescente aplicação de técnicas de caráter quantitativo em vários campos das ciências da Terra (Carrara e Pike, 2008).

Conforme Reis et al. (2003), a elaboração de modelos de avaliação de suscetibilidade cada vez mais complexos fundamentados em métodos quantitativos foi permitida pelo uso de sistemas de informação geográfica, uma vez que propicia o cruzamento de um grande número de temas cartográficos e a análise estatística da relação entre os deslizamentos identificados e as variáveis independentes espacializadas.

Desta forma, a fusão entre um bom modelo de avaliação de suscetibilidade de movimentos de massa e os sistemas de informação geográfica gera um instrumento poderoso para os profissionais das áreas envolvidas na mitigação dos riscos e no controle do crescimento das cidades (García, 2004).

3. METODOLOGIA

No sentido de se obter a tendência de crescimento das áreas urbanas, a metodologia empregada no presente trabalho contemplou a execução do processamento digital de duas imagens advindas de satélites, referentes às datas de 11 de junho de 2013 e 18 de outubro de 2019 para a região da Fercal. Ambas foram captadas pelos sensores presentes no satélite Landsat-8. Paralelamente, foi feito um mapa de susceptibilidade a movimentos de massa. Logo em seguida, cruzou-se as informações contidas nesses dois planos de informação, a fim de verificar a tendência de crescimento da região Fercal para áreas que tenham maiores probabilidades de ruptura. A seguir, encontram-se as etapas desenvolvidas na pesquisa.

3.1. PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGEM

A aquisição das imagens de satélite foi realizada por meio da plataforma Earth Explorer, responsável por armazenar um banco de dados relativo a imagens satelitais, fotografias aéreas e outras informações de sensoriamento remoto, operado pelo *United States Geological Survey* (USGS), inclusive aquelas da série Landsat.

As cenas fornecidas pelos satélites abrangem toda a área do Distrito Federal, de forma que se fez necessária a delimitação da área de interesse no ambiente de sistema de informação geográfica (SIG). Desta forma, foram criados, inicialmente, um banco de dados e um projeto no software SPRING 5.4.3 específicos para esta pesquisa e voltados para a estruturação das informações espaciais essenciais para a elaboração das análises. Destacam-se as seguintes informações referentes às principais características deste projeto:

- Projeção e datum utilizados: UTM/ SIRGAS2000, Fuso 23S;
- Retângulo envolvente estabelecido em coordenadas planas:

$$X_1 = 189094.00 \text{ m}; Y_1 = 8270494.00 \text{ m};$$

$$X_2 = 193738.00 \text{ m}; Y_2 = 8275937.00 \text{ m};$$

A partir disso inicia-se o Processamento Digital de Imagem para a região em questão, que leva em consideração os seguintes passos apresentados no fluxograma representado na Figura 3.1.

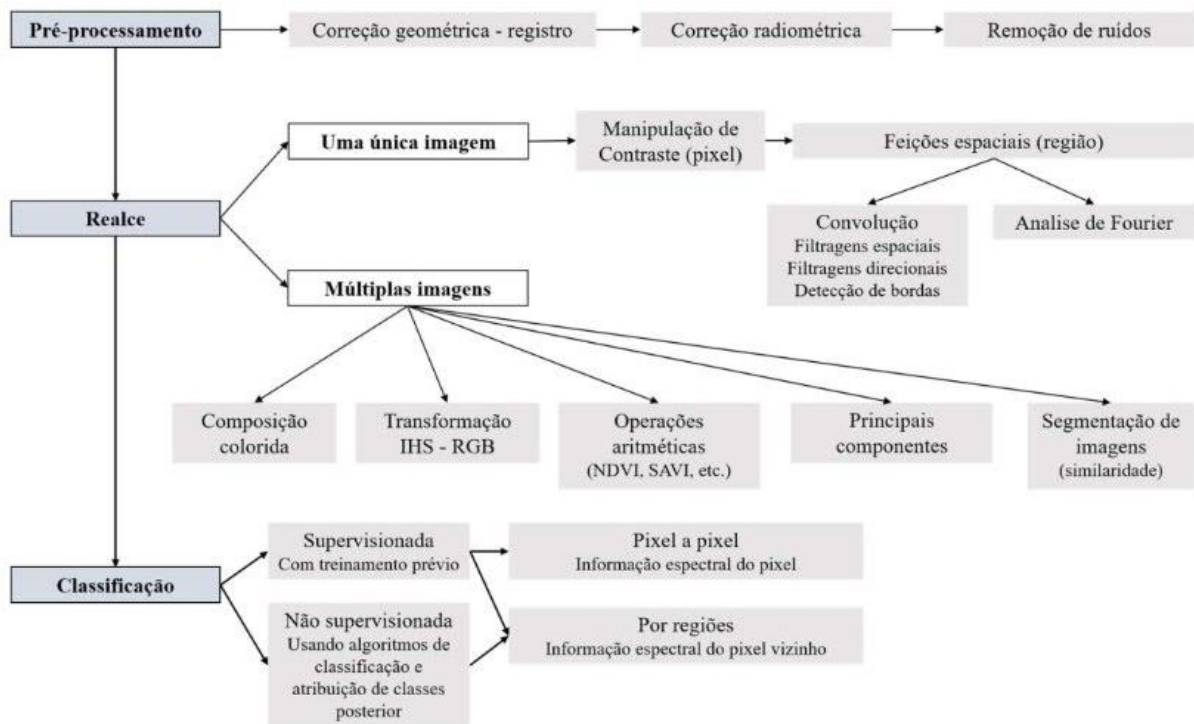


Figura 3.1 Fluxograma PDI (Silva Junior, E.E.A., 2019)

Em um procedimento inicial, essas imagens foram melhoradas através de um processo empregado nas suas bandas, conhecido como realce linear de contraste. Essa operação pretende melhorar a qualidade visual da imagem, modificando os seus níveis de cinza. Para isso, manipula-se o histograma (distribuição estatística dos níveis de cinza) original, distribuindo melhor os valores digitais da imagem. Percebe-se que com a distribuição do histograma, a imagem se torna mais nítida. Amplia-se assim, a obtenção e a interpretação das informações contidas nas imagens, conforme mostrado na Figura 3.2.

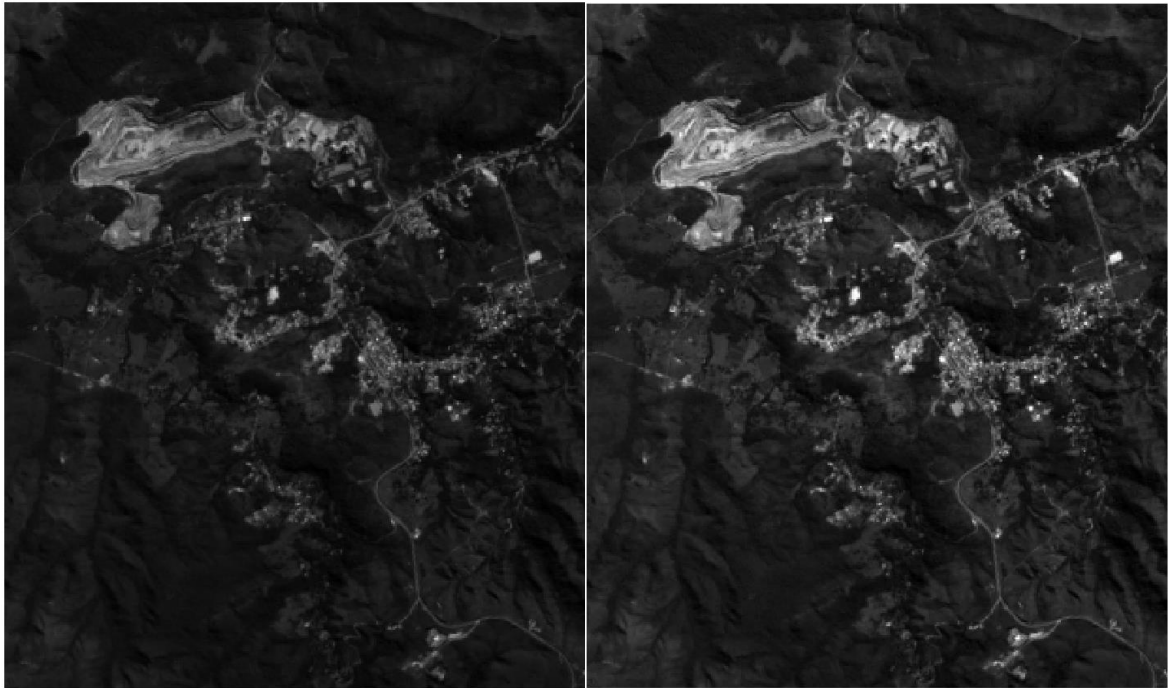


Figura 3.2 (a) Banda 8 do ano 2013 sem realce; (b) Banda 8 do ano 2013 com realce

Além disso, para melhor aproveitamento das informações produzidas pelos diferentes sensores, outros métodos de processamento de imagens foram aplicados, como por exemplo, a transformação $RGB \leftrightarrow IHS$. A cor de um objeto em uma imagem pode ser representada pelas intensidades das componentes vermelho (R), verde (G) e azul (B), no sistema de cores RGB, ou pela intensidade (I), cor ou matiz (H) e saturação (S) no espaço IHS. A transformação RGB em IHS permite descrever a amplitude de possíveis variações na tonalidade das cores. Além disso, intensidade, matiz e saturação são parâmetros independentes, ou seja, podem ser analisados separadamente, permitindo um melhor ajuste das cores às características do sistema visual. Como resultado, a transformação de volta de IHS para RGB produz uma imagem com maior resolução espacial em relação a uma composição colorida entre as bandas originais. Vale lembrar que esse melhoramento somente pode ser aplicado as imagens obtidas através do Landsat-8, visto que o seu sensor oferece uma banda pancromática com melhor resolução espacial, o que permite fazer a conversão de uma composição RGB de 30 metros para uma de 15 metros. Isso pode ser observado na Figura 3.3.



Figura 3.3 (a) Composição colorida RGB432 com resolução espacial de 30m; (b) Composição colorida RGB432 com resolução de 15m (após Transformação RGB-IHS)

Existem, ainda, dois importantes componentes que fazem uma grande diferença no processamento de imagens: vegetação e água. Para que pudesse ser feita uma melhor análise destes elementos, foram efetuados os cálculos do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e do Índice de Diferença Normalizada da Água (NDWI). O primeiro é um índice que analisa a condição da vegetação no campo por meio de sensoriamento remoto, tendo como objetivo o realce da vegetação em detrimento dos outros atributos da imagem. É obtido por operações matemáticas dos valores de refletância nas bandas do espectro eletromagnético correspondente as bandas 4 e 5 no caso do Landsat-8, afirma Bilar (2018). Já o segundo mede o teor de umidade da vegetação. Ele é calculado através da refletância obtida nas bandas 5 e 6 quando se utiliza imagens do Landsat-8, ainda de acordo com Bilar (2018). Esse efeito pode ser observado na Figura 3.4.

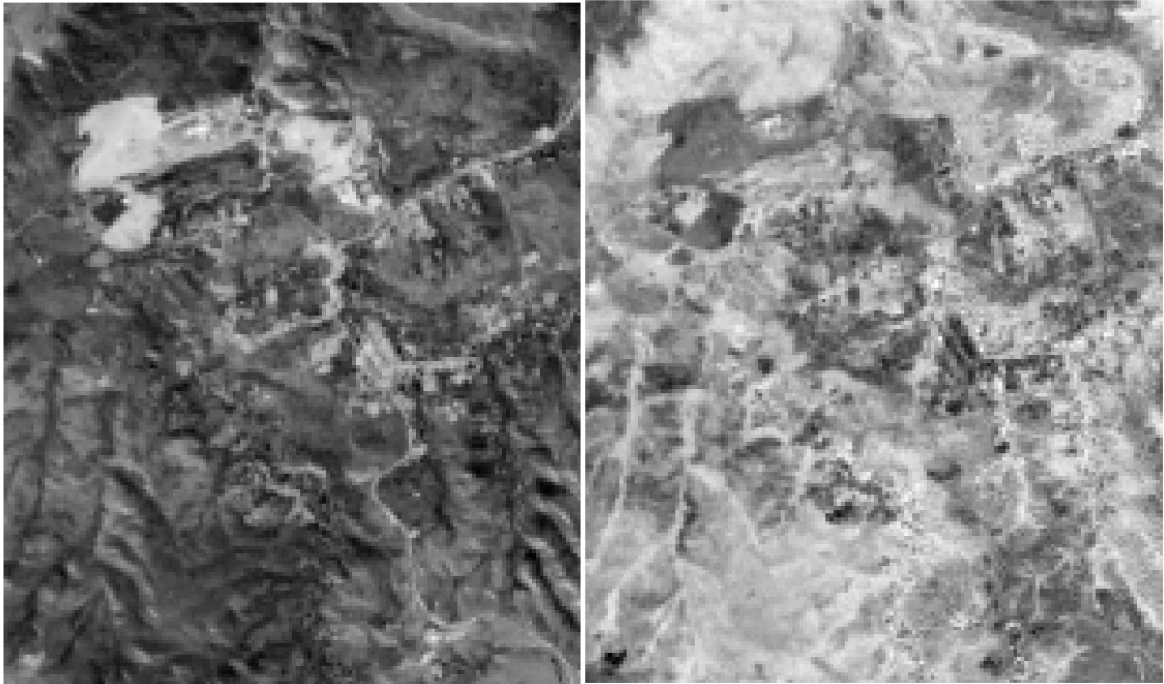


Figura 3.4 (a) NDVI; (b) NDWI

Na Figura 3.4 (a), os lugares mais escuros representam áreas com menor quantidade de vegetação, enquanto as regiões mais claras representam áreas com uma vegetação mais abundante. Na Figura 3.4 (b) os lugares mais escuros representam áreas com menor quantidade de umidade, enquanto as áreas mais claras representam áreas mais úmidas. Nota-se que os lugares mais úmidos correspondem a regiões em que se encontra a vegetação.

Também foram geradas as componentes principais (CP). Esse processo tem o intuito de remover as redundâncias espectrais que possam existir nas imagens utilizadas. Isso significa que as componentes principais produzidas são novas imagens cujos resultados apresentam informações não disponíveis em outras bandas. Com as bandas de 30 metros do Landsat-8, B1 a B7 e os índices NDVI e NDWI, todos realçados, foram compostas as componentes principais da área de estudo para o ano de 2013. Também foi utilizado o mesmo procedimento para as bandas de 15 metros, B8 com realce linear de contraste e as 3 bandas provenientes da composição RGB432. Abaixo dois componentes distintos estão representados na Figura 3.5.

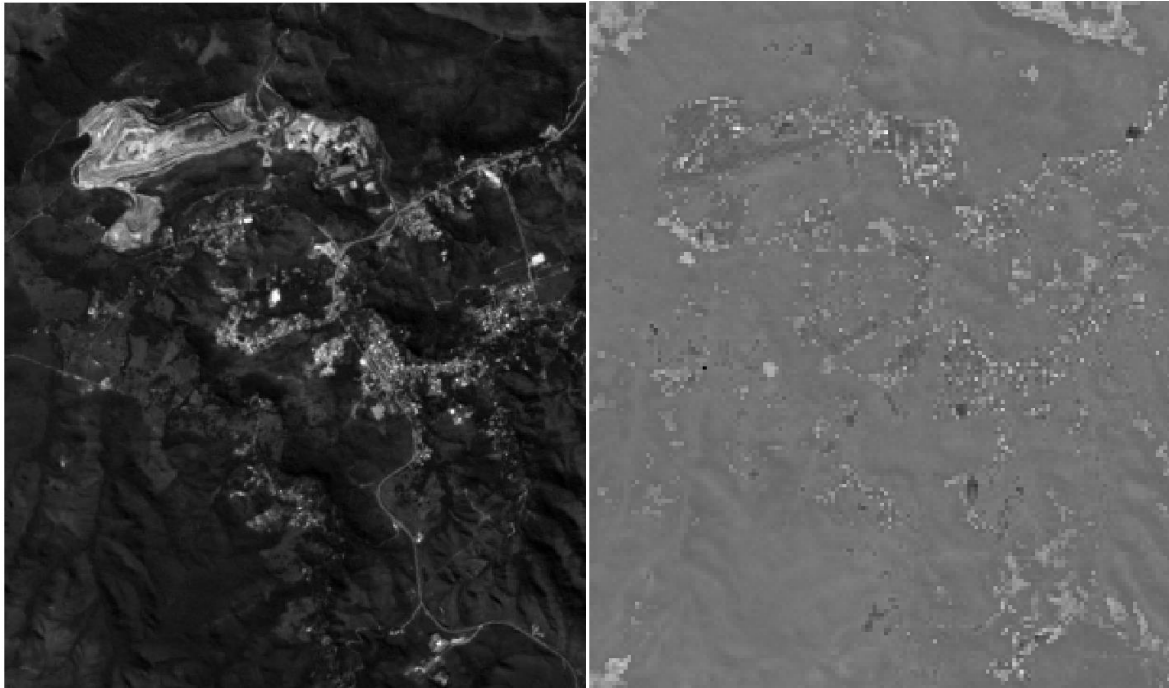


Figura 3.5 (a) Componente Principal 1 (PC1) LS8 bandas de 15m; (b) PC4 LS8 15m

Nota-se que o PC1 tem uma melhor qualidade no que diz respeito a visão humana e o PC4 tem a pior qualidade, no entanto para o Spring, ambas fornecem características importantes.

Por fim utilizou-se o método de filtragem de imagens que é realizado em níveis de cinza, considerando o pixel e sua vizinhança, e objetiva o realce de detalhes e a remoção de ruídos que possam existir. O processo de filtragem consiste na aplicação de uma máscara sobre determinado plano de informação. Essa máscara é uma matriz, que quantifica cada pixel e substitui seu valor por um novo, dependente do valor do pixel vizinho e da relevância da máscara aplicada. Neste caso foram utilizados dois tipos de filtragem: passa baixa e passa alta. O primeiro, mistura os tons vizinhos e gera uma nova tonalidade combinada, enquanto o segundo realça o pixel central, como se observa na Figura 3.6.

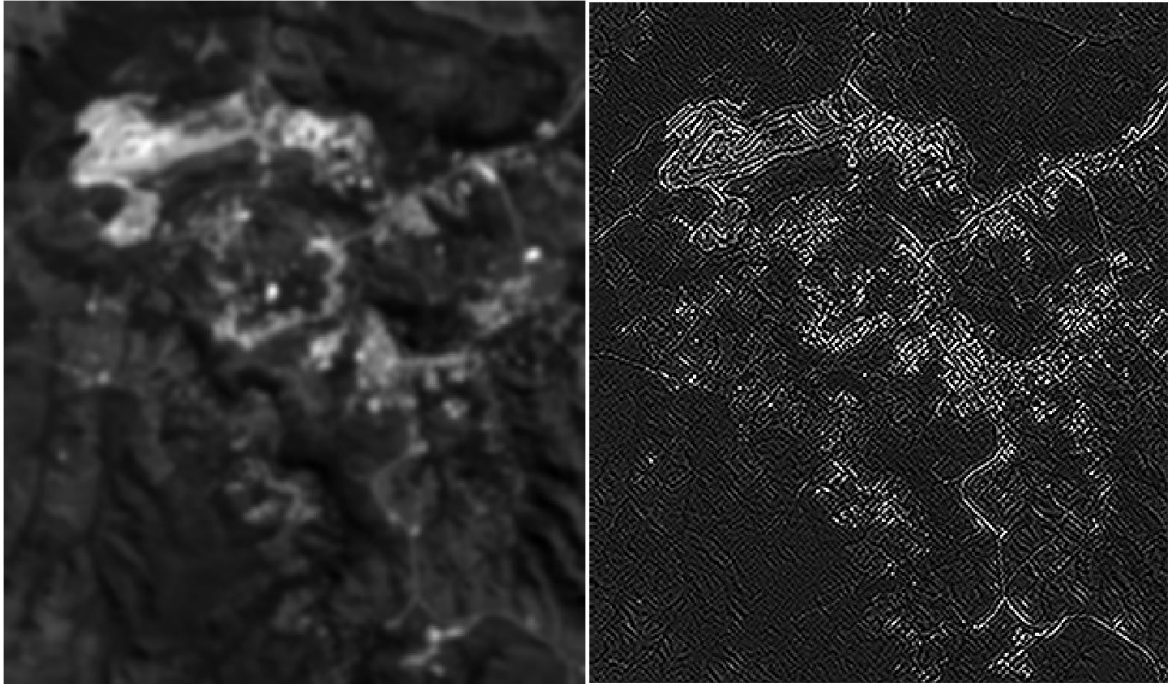


Figura 3.6 (a) Filtragem com Passa-Baixa da B8; (b) Filtragem com Passa Alta da B8.

Depois de todo o trabalho para melhorar a qualidade das imagens e das informações contidas nelas, foram feitas segmentações por crescimento de regiões de um grupo de imagens pré-selecionadas. Esse procedimento rotula cada pixel como uma região distinta, agrupando os territórios adjacentes com características similares. Quanto maior o número de similaridades, mais dividida ficará a imagem.

Primeiramente a tentativa de segmentação foi com todas as bandas de 30 metros, incluindo PC1, PC2, PC3, NDVI e NDWI citados anteriormente, com grau de similaridade 50 e tamanho do pixel 100. O resultado foi o mostrado na Figura 3.7 (a). Um segundo teste foi com as bandas de 15 metros incluindo a transformação RGB e os respectivos componentes principais (PC1, PC2 e PC3), como mostra a Figura 3.7 (b), ainda com grau de similaridade 50 e tamanho do pixel 100, dentre diversas outras experiências. No entanto, a segunda opção foi a que melhor se encaixou ao projeto, como pode ser observado na Figura 3.7, pois como as bandas de 15 metros apresentam uma resolução espacial melhor, foi possível dividir mais detalhadamente o plano de informação, agrupando de forma mais eficiente as características semelhantes.

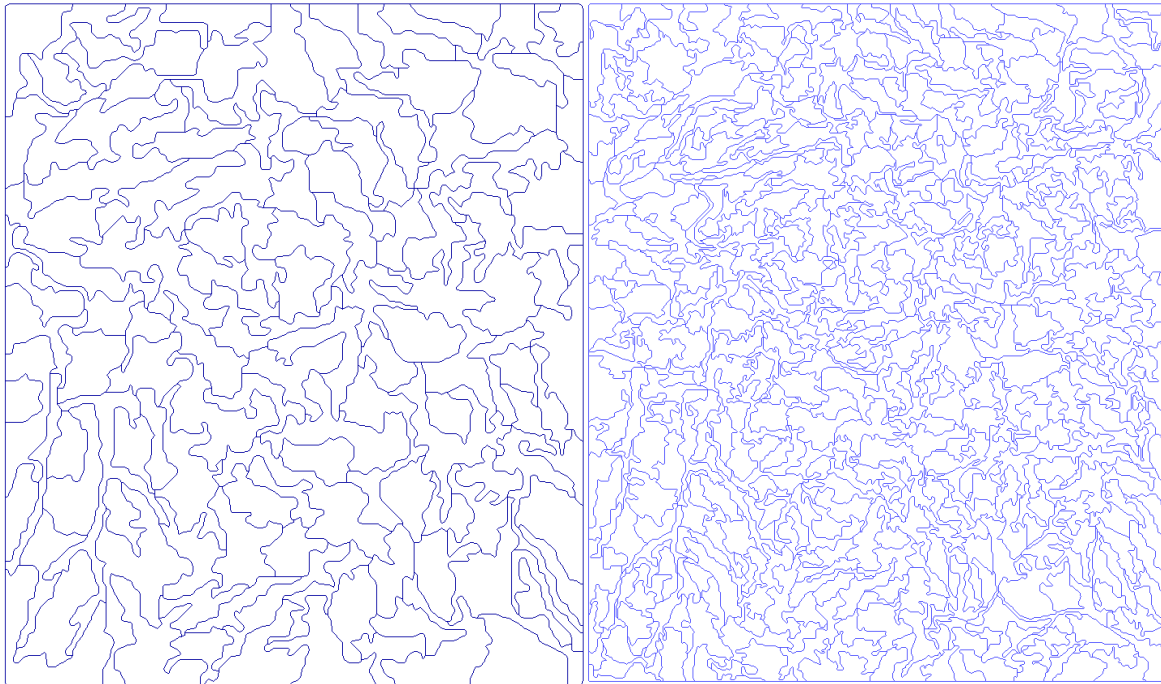


Figura 3.7 (a) Segmentação bandas de 30m; (b) Segmentação bandas de 15m.

Logo em seguida, iniciou-se o processo de classificação. Segundo o manual do Spring, o método de classificação de imagens é um processo de extração de informações de imagens para reconhecer padrões e objetos homogêneos e utilizá-los em sensoriamento remoto para o mapeamento de superfícies. Pode ser realizada de quatro maneiras: pixel a pixel, por regiões, supervisionada e não supervisionada. Cada uma delas é baseada em diferente conceito de classificação.

- a) Pixel a pixel: informação espectral de cada pixel individualmente;
- b) Por regiões: informação do pixel e também da vizinhança;
- c) Supervisionada: realização de treinamento prévio para atribuição de classes;
- d) Não supervisionada: classificação eletrônica que necessita de posterior atribuição de classes.

Nesse projeto utilizou-se dois tipos de classificações: supervisionada por regiões e supervisionada pixel a pixel. No entanto, depois de inúmeras tentativas, a que apresentou um melhor resultado foi a supervisionada pixel a pixel, ou seja, alguns pixels foram previamente classificados em urbano, não urbano e mineração e o algoritmo do software Spring os agrupou por similaridade. O tipo de classificador utilizado foi o Maxver, com limiar de aceitação de 99,9%.

No que se refere ao processamento digital das imagens de satélites para o ano de 2019, os procedimentos foram os mesmos, chegando às duas classificações distintas.

3.2. AVALIAÇÃO DE SUSCEPTIBILIDADE A MOVIMENTOS DE MASSA

Uma vez estabelecidas as classificações para elaboração da carta de uso e cobertura, fez-se necessário observar se a expansão urbana se processou em direção a áreas com potencial de ocorrência de deslizamentos. Para tanto, utilizou-se a rotina modificada do trabalho de Azevedo (2013), onde foi gerada uma carta de susceptibilidade a movimentos de massa para a região em estudo em termos de probabilidade de ruptura.

Para encontrar o mapa de probabilidade de ruptura foi seguido os seguintes passos mostrados no fluxograma abaixo, Figura 3.8:

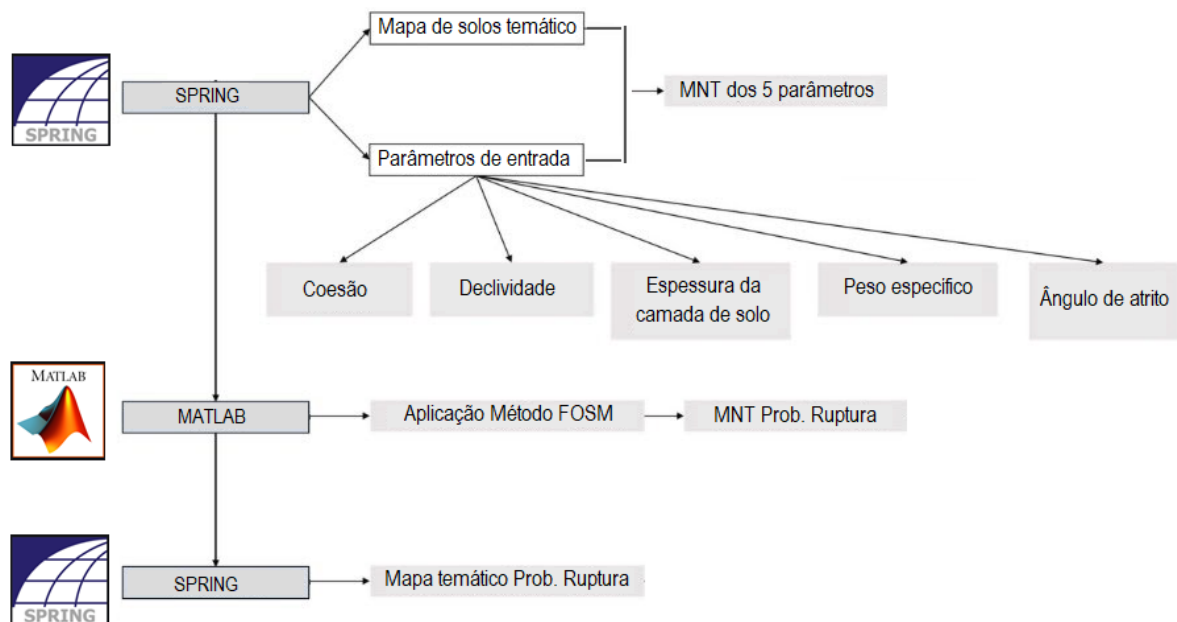


Figura 3.8 Fluxograma mapa de Probabilidade de Ruptura

Primeiramente foi necessário levar para a plataforma Spring um mapa de solos temático do Distrito Federal que em seguida foi delimitado apenas para a região de estudo da Fercal, a fim de identificar quais solos compõem a localidade. A Figura 3.9 mostra que a Fercal é composta de 4 solos, sendo eles: argissolo vermelho, cambissolo haplico, latossolo vermelho e nitossolo vermelho.

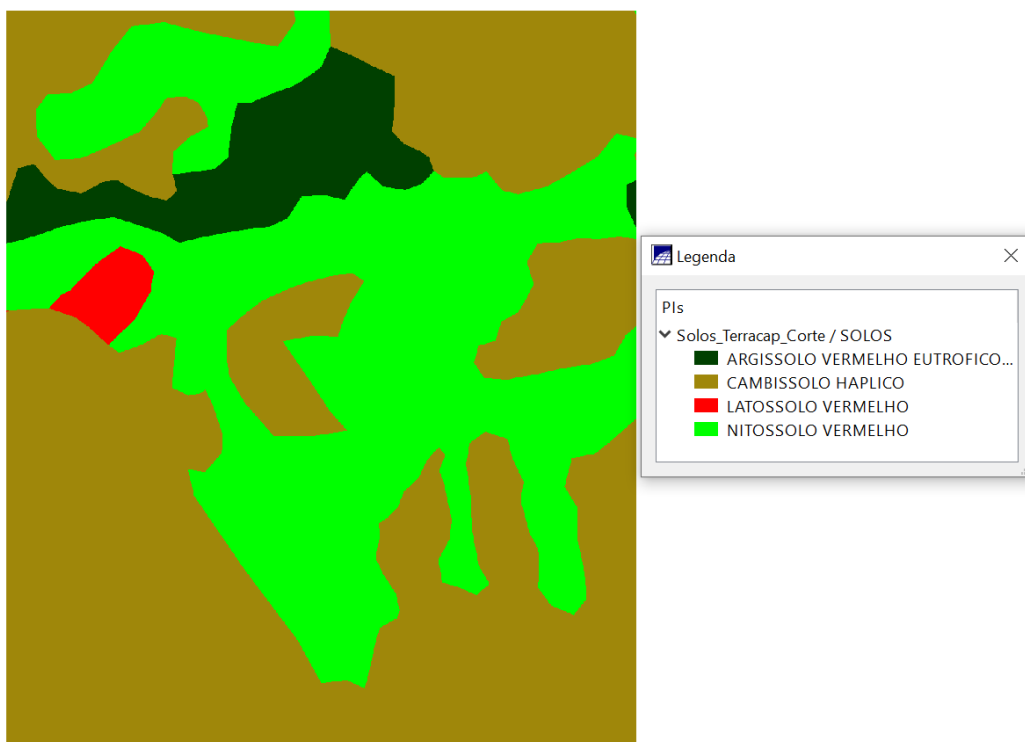


Figura 3.9 Solos encontrados na região de estudo

Em seguida definiu-se, através da literatura, os parâmetros de entrada, como mostrado na Tabela 3.1. Como para o cálculo do fator de segurança utilizou-se o modelo de estabilidade de talude infinito, os dados de input passaram a ser: coesão, ângulo de atrito, peso específico, espessura da camada de solo e declividade. Obteve-se os valores de coesão e ângulo de atrito para o cambissolo haplico e latossolo vermelho tomando-se como base o trabalho desenvolvido por Roque e Souza (2008), já a espessura da camada de solo tomou como referência a descrição dos solos expressa por Reatto et al. (2004), enquanto os dados de peso específico foram obtidos de Castro (2011). Já para os solos, argissolo vermelho e nitossolo vermelho, c' e ϕ' foram obtidos por meio de Braida et al. (2007), enquanto o peso específico foi por meio de dados de experiência local adquirida pelo orientador Manoel Porfírio. Por fim, a espessura da camada de solo do argissolo vermelho e do nitossolo vermelho foram encontradas no trabalho de Demattê J. (2017).

Tabela 3.1 Dados de input

SOLOS/ PARÂMETROS	Coesão	Ângulo de Atrito	Peso Especifico	Espessura da
	(c')	(ϕ')	(γ)	camada de solo
	KPa	°	KPa	(H) m
Argissolo Vermelho	10	30	15	1,0
Cambissolo Haplico	5	25	15	0,7
Latossolo Vermelho	10	20	15	3,0
Nitossolo Vermelho	20,5	27,9	15	1,5

Com relação a declividade do terreno, esta foi conseguida através da base cartográfica do Distrito Federal, gerando uma matriz com 1089 linhas e 929 colunas.

A partir da combinação entre o mapa de solos e os dados de entrada criou-se um plano de informação em formato matricial para cada parâmetro restante (c' , ϕ' , τ e H), ou seja, na matriz de coesão, onde se encontra argissolo vermelho o algoritmo do Spring irá colocar o valor de 10 KPa, já para a região que está localizado o cambissolo haplico será atribuído 5 KPa e assim sucessivamente até que seja preenchida toda a área de estudo. Os dados saem do plano temático para um modelo numérico de terreno (MNT), assim as informações contidas deixam de ser apenas qualitativas e passam a ser quantitativas.

Após feita a manipulação dos dados, exportou-se em formato ASC (Arquivos Comunicação Script) o MNT de cada parâmetro respectivamente, totalizando cinco arquivos. Essas matrizes foram trabalhadas no *software* Matlab, lá encontra-se presente a rotina modificada do trabalho de Azevedo (2015). Essa rotina consiste em uma ferramenta escrita em linguagem de programação que tem como objetivo utilizar esses dados de entrada para o cálculo do fator de segurança determinístico e logo em seguida aplicar o método FOSM a fim de encontrar dados probabilísticos de índice de confiabilidade e probabilidade de ruptura. Após feito todo o procedimento, importou-se os dados obtidos no Matlab para o Spring o que gerou como produto final o mapa de susceptibilidade.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como resultados iniciais obtiveram-se as classificações das imagens de 11 de junho de 2013 e 18 de outubro de 2019 em áreas urbanas e não urbanas, mostradas nas Figura 4.1 e Figura 4.2 abaixo.

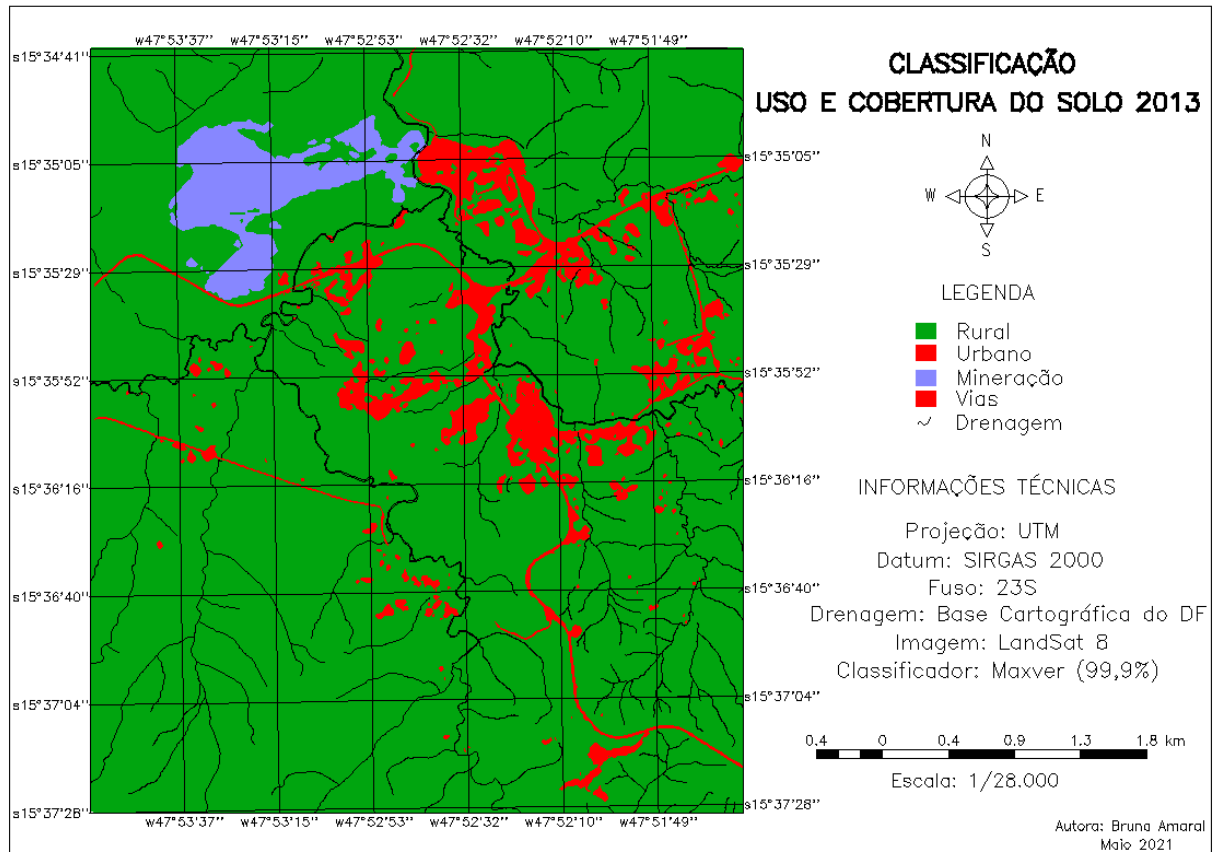


Figura 4.1 Classificação com base na imagem de 2013

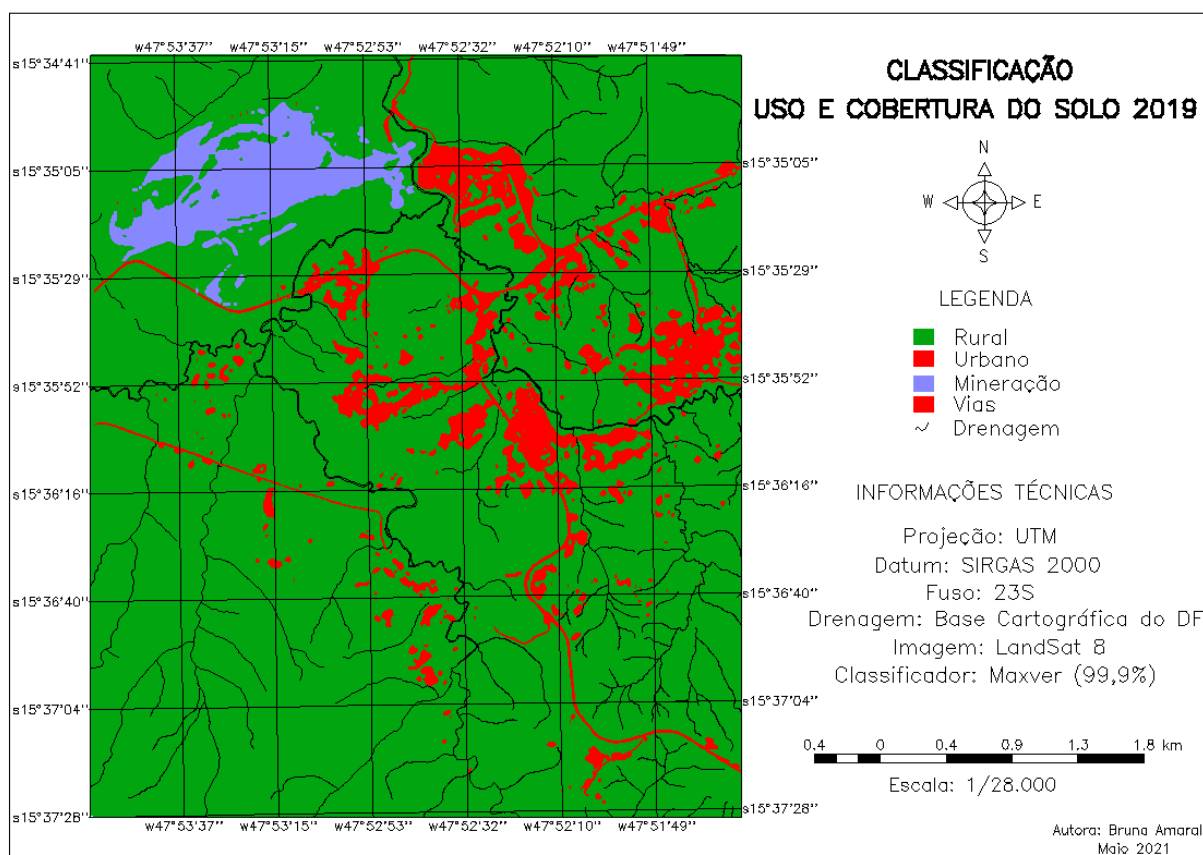


Figura 4.2 Classificação com base na imagem de 2019

Nas figuras acima, a área em vermelho representa a região urbana, em verde, não urbana e em azul trata-se de uma área específica destinada a mineração. Nota-se um aumento da área urbana entre as duas datas, fato constatado pelos dados explicitados na Tabela 4.1, oriunda da medida de classe efetuada nos respectivos planos de informação.

Tabela 4.1 Medida de classes da área de estudo

Ano	Área Urbana (km ²)	Área Não Urbana (km ²)	Mineração (km ²)
2013	1,413600	22,895950	0,776550
2019	1,725775	22,475700	0,884950

Pelos dados apresentados, houve um crescimento de aproximadamente 312.175 m² em 6 anos. Observa-se que as ocupações foram feitas ao redor das zonas já construídas. Pode-se dizer que a região que teve um maior crescimento está localizada em torno das coordenadas w47°51'49''/s15°35'52''. Assim, no panorama geral prevalece o aumento da urbanização de forma desordenada.

Como segundo resultado obteve-se o mapa de probabilidade de ruptura através da aplicação do método FOSM ao modelo de estabilidade de taludes infinitos, como mostra a Figura 4.3.

O mapa representa na região de estudo, os pontos em que se encontram as maiores e menores probabilidades de ruptura. O azul escuro representa probabilidades mais baixas e o marrom probabilidades mais altas de ruptura. Optou-se por reunir as probabilidades maiores que 20% em uma mesma classe pelo fato de a área não ter apresentado grandes espaços com probabilidades tão altas a ponto de ser necessário a discretização em um maior número de camadas no intervalo de 20% a 100%.

Além disso, de acordo com a Figura 4.3 e a medida de classe da Tabela 4.2 é possível concluir que a maior parte da região analisada encontra-se com probabilidade de ruptura entre 0% e 3% e esse valor cai respectivamente para os intervalos subsequentes. Especialmente as regiões com probabilidade de ruptura mais altas estão localizadas próximas a dois pontos: a drenagem existente e ao local destinado a atividades de mineração.

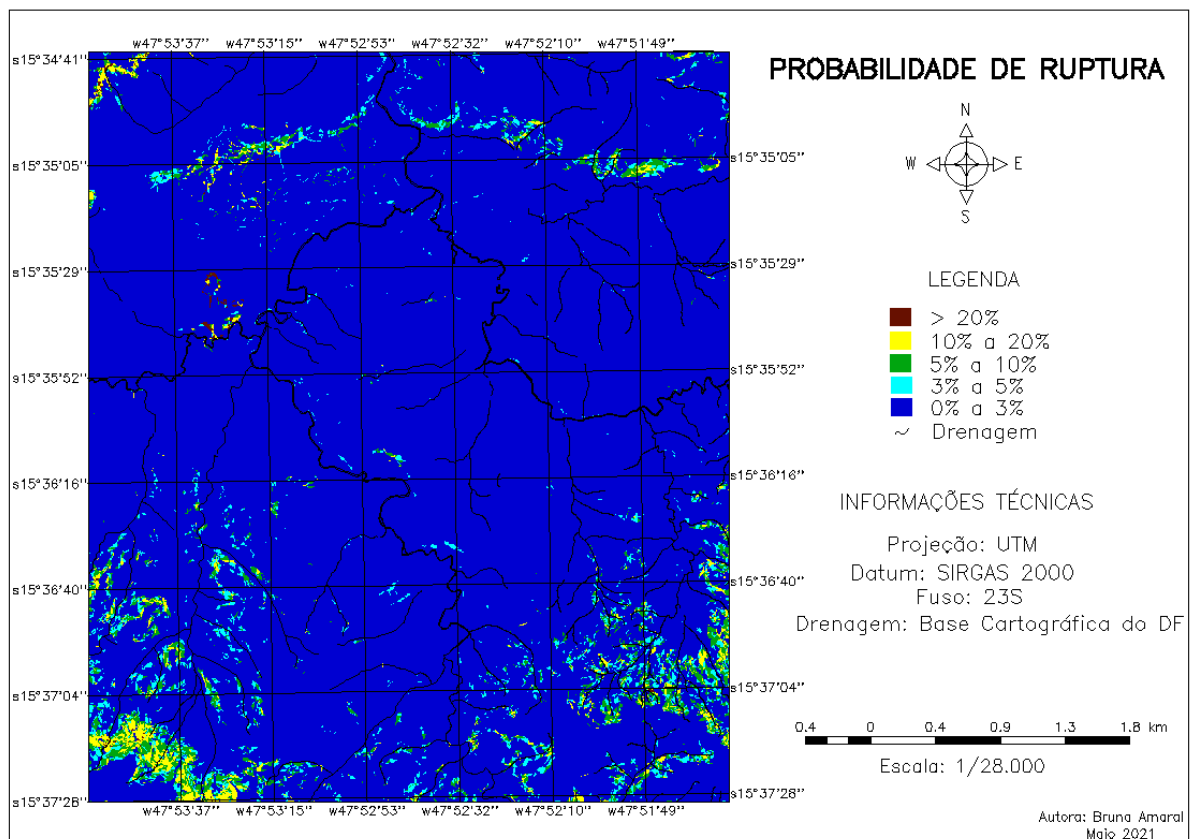


Figura 4.3 Mapa de Probabilidade de Ruptura

Tabela 4.2 Medida de classes da área de estudo

Porcentagem	0% a 3%	3% a 5%	5% a 10%	10% a 20%	> 20%
Área (km ²)	23,517625	0,696450	0,689750	0,359675	0,028525

Como foi observado um crescimento desordenado no local de estudo, fez-se necessário avaliar se essa expansão começou a atingir locais que apresentam ameaça de ocorrência de eventos relacionados a deslizamentos. Para isso, foi utilizada a ferramenta de tabulação cruzada entre o plano de informação de probabilidade de ruptura e aqueles relacionados a cada uma das classificações. Os resultados encontram-se nas Tabela 4.3 e Tabela 4.4.

Tabela 4.3 Áreas urbanas e não urbanas para 2013 distribuídas pelas classes de probabilidade de ruptura

Porcentagem	0% a 3%	3% a 5%	5% a 10%	10% a 20%	> 20%
Urbano	1,1418	0,0025	0,0013	0,0011	0,0003
Rural	21,2089	0,6703	0,6575	0,3368	0,0226
Mineração	0,7226	0,016	0,0204	0,0127	0,0048
Vias	0,265	0,0005	0,0005	0,0001	0,0004

Tabela 4.4 Áreas urbanas e não urbanas para 2019 distribuídas pelas classes de probabilidade de ruptura

Porcentagem	0% a 3%	3% a 5%	5% a 10%	10% a 20%	> 20%
Urbano	1,4542	0,0016	0,0017	0,0008	0,0003
Rural	20,8031	0,6626	0,6518	0,3347	0,0236
Mineração	0,8159	0,0245	0,0255	0,0152	0,0038
Vias	0,2653	0,0006	0,0007	0,0001	0,0004

Verifica-se que a maior parte das construções estão localizadas em áreas que possuem uma probabilidade de ruptura entre 0% e 3% (classe de menor ameaça registrada) para ambas as datas. O crescimento mais expressivo se deu na faixa de menor ameaça.

Observa-se também que houve uma diminuição na área ocupada em duas classes distintas (3% a 5% e 10% a 20%) entre os anos de 2013 e 2019. Por se tratar de um assentamento constituído essencialmente por construções irregulares, muitas vezes tais moradias estão sujeitas a demolições executadas pelo poder público, sob ações de desocupação promovidas da Agência de Fiscalização do Distrito Federal (AGEFIS). Esses espaços podem ter sido desse tipo de procedimento, seja por estar invadindo territórios de preservação ou de riscos naturais, dentre diversas outras explicações. Há possibilidade de casos em que o algoritmo de classificação possa ter considerado algumas áreas de solo exposto como regiões com edificação, fato constatado a partir de uma averiguação com base em imagens de satélite disponíveis no Google Earth com resolução espacial maior em alguns pontos onde essa tendência foi observada.

Além disso, na classe em que a probabilidade de ruptura está entre 5% e 10% houve um aumento da ocupação, ratificando a tendência de expansão para locais com maior potencial de ocorrência de movimentos de massa. Por fim, a última classe se manteve constante nesse período.

Visualmente, é possível averiguar que, a maior parte das construções estão localizadas em zonas de baixo risco, no entanto, em um futuro próximo, quando estas áreas forem esgotadas, a população pode começar a habitar locais que apresentam uma maior ameaça, caso nenhum planejamento ou intervenção governamental seja feito. Isso pode ser notado na Figura 4.5, observando os pontos demarcados com setas brancas, pois é possível perceber que no ano de 2019 a população começou a se direcionar para regiões que apresentam uma maior probabilidade de falha. Nessa mesma imagem existe um ponto crítico que foi demarcado com uma elipse em branco. Nota-se que a ocupação apresentou uma tendência para alocação da área de maior probabilidade de ruptura registrada (> 20%).

Logo abaixo, nas Figura 4.4 e Figura 4.5, encontram-se os mapas de distribuição da área urbana com relação a probabilidade de ruptura para que seja feita uma melhor avaliação do fenômeno.

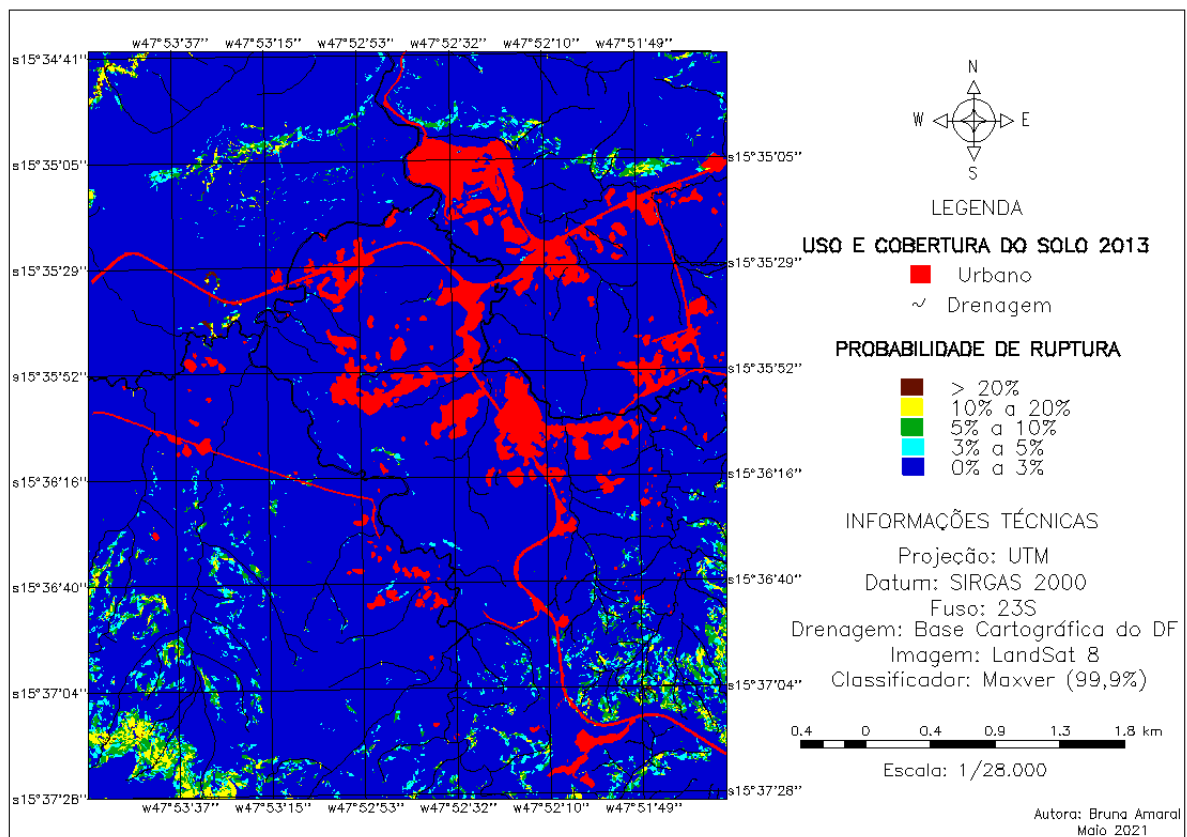


Figura 4.4 Configuração da probabilidade de ruptura frente à ocupação urbana em 2013

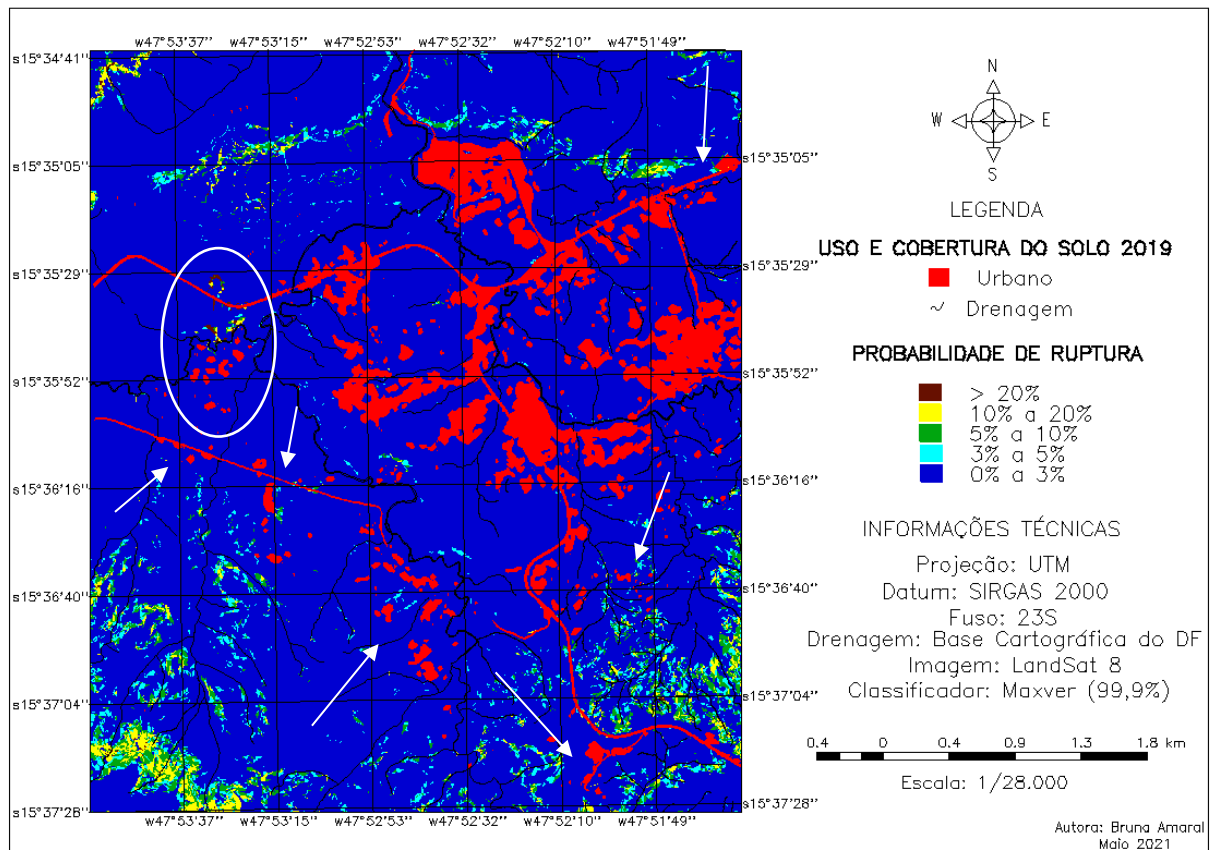


Figura 4.5 Configuração da probabilidade de ruptura frente à ocupação urbana em 2019

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FUTURAS

Pode-se estabelecer algumas conclusões sobre os resultados alcançados no trabalho. A comparação entre os resultados da classificação para as imagens dos anos de 2013 e 2019 permitiu averiguar o crescimento na cidade Fercal.

Apesar dos resultados da tabulação cruzada entre os planos de informação da probabilidade de ruptura e da classificação das áreas urbanas das datas avaliadas não mostrarem um crescimento nítido de regiões ocupadas em valores elevados de ameaça de ocorrência de deslizamento, a tendência observada quando se analisa o aumento urbano de 2013 para 2019 é que este se deu na direção dos pontos com maiores níveis de ameaça. Esta conclusão torna-se de extrema importância para os órgãos competentes que monitoram as áreas de risco do Distrito Federal. É de se esperar que, caso essa tendência não seja interrompida pelo poder público, no sentido de coibir novas ocupações, surjam mais pontos categorizados com risco no local analisado.

Finalmente, enfatiza-se que avaliações dessa natureza, principalmente em regiões que correspondem a ocupações irregulares, fornecem um melhor nível de compreensão do fenômeno da dinâmica associada ao crescimento urbano. Isso contribui para a tomada de decisão tanto do ponto de vista do planejamento territorial, como na implementação de um sistema de ordenamento urbano para essa localidade ou para futuras cidades. A comparação de um cenário de probabilidade de ruptura com a situação da malha urbana mostra-se como mais um elemento para análise dos possíveis impactos nos elementos em risco de uma determinada região, contribuindo para a avaliação da vulnerabilidade da população envolvida.

Por fim, ressalta-se que esse estudo apresenta uma metodologia clara, rápida e de baixo custo que pode ser facilmente replicada em outras localidades, podendo servir como base para posteriores pesquisas em termos de planejamento urbano e análises ambientais para regiões com ocupação urbana sujeitas a eventos de movimentos de massa.

Como sugestão para trabalhos futuros tem-se as seguintes opções:

- Providenciar um sobrevoo com drone nas regiões críticas demarcadas na Figura 4.5, a fim de avaliar a real situação que essa população se encontra e a partir disso tomar providências para que haja uma realocação dessas pessoas, caso necessário;

- Melhorar a metodologia utilizada no fator de segurança, como por exemplo incorporando eventos de chuva as análises;
- Fazer ensaios de campo para obter os valores de cada parâmetro, afim de caracterizar mais precisamente a região;
- Por fim, ensaiar o risco associado aquelas regiões que se encontram em pontos mais vulneráveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AZEVEDO, G.F (2015). Sistema de Análise Quantitativa de Risco por Escorregamentos Rasos Deflagrados por Chuvas em Regiões Tropicais. Tese de Doutorado em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 430 p.
- BAECHER, G.B. e CHRISTIAN, J.T. (2003). Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering. John Wiley, Chichester, UK, 618 p.
- BAECHER, G.B. (1982b). Statistical Methods in Site Characterization. Updating Subsurface Samplings of Soils and Rocks and their In-situ Testing, Santa Barbara, Engineering Foundation, pp. 463-492.
- BLOOM, A.L. (1988). Superfície da Terra. Edgard Blücher, São Paulo, SP, 184 p.
- BRASIL. Lei n.º 6766, de 19 de dezembro de 1979. Dispõe sobre o Parcelamento do Solo Urbano e dá outras Providências.
- CÂMARA, G.; SOUZA, R.C.M.; FREITAS, U.M.; GARRIDO, J. e MITSUO, F. (1996). Spring: integrating remote sensing and gis by object-oriented data modeling. Computers & Graphics, vol. 20, pp. 395-403.
- CARRARA, A. e PIKE, R.J. (2008). GIS technology and models for assessing landslide hazard and risk. Geomorphology, 94(1): 257-260.
- CHRISTIAN, J.T.; LADD, C.C. e BAECHER, G.B. (1992). Reliability Applied to Slope Stability Analysis. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, vol. 120 (12).
- CROSTA, A.P. (1993). Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto. Ed. Ver. Campinas, SP: IG/UNICAMP.
- CRUDEN, D.M. e VARNES, D.J. (1996). Landslide types and processes. Landslides: Investigation and Mitigation, A.K. Turner & R.L. Schuster (eds.), National Academy Press, Washington D.C., USA, pp. 36-75.
- CRUDEN, D.M. (1991). A Simple Definition of a Landslide. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 43(1): 27-29.
- CRUZ, C.B.M. e BARROS, R.S. (2001). Banco de Dados Geográficos no Sistema SPRING; Curso Prático Nível Básico. Rio de Janeiro: UFRJ, 121 p. (mimeo).
- DAS, I.; SAHOO, S.; VAN WESTEN, C.; STEIN, A. e HACK, R. (2010) - Landslide susceptibility assessment using logistic regression and its comparison with a rock mass classification system, along a road section in the northern Himalayas (India). Geomorphology, vol. 114, pp. 627-637.

- DEMATTE, J. A. (2017). Caracterização e Espacialização do meio físico, como base para o planejamento do uso da terra. Departamento de ciência do solo. Universidade de São Paulo. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. 225 p.
- DUNCAN, J.M. (2000). Factors of Safety and Reliability in Geotechnical Engineering. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Volume 126, Number 4, pp 307-316.
- ENTRALGO, J.F.T. (2013). Análise espacial e estatística dos movimentos de massa deflagrados pelas chuvas dos dias 11 e 12 de janeiro de 2011 na região serrana do estado do Rio de Janeiro, Brasil. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 116 p.
- FABRICIO, J.V.F. (2006). Análises Probabilísticas da Estabilidade de Taludes e Contensões, Dissertação de Mestrado, PUC, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- GARCÍA, H.A.G. (2004). Avaliação da susceptibilidade aos movimentos de massa usando Sistemas de Informação Geográfica e Redes Neurais Artificiais. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, 140 p.
- GERSCOVICH, D.M.S. (2008). Notas de Aula - Estabilidade de Taludes, UERJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- GRIFFITHS, D. V. e FENTON, G. A. (2007). Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering. Internacional Centre For Mechanical Sciences, New York.
- GUZZETTI, F. (2000). Landslide fatalities and evaluation of landslide risk. *Engineering Geology*, vol. 53, pp. 89-107
- GUZZETTI, F.; MONDINI, A.C.; CARDINALI, M.; FIORUCCI, F.; SANTANGELO, M. e CHANG, K.T. (2012). Landslide inventory maps: new tools for an old problem. *Earth-Science Reviews*, 112: 42-66. doi: 10.1016/j.earscirev.2012.02.001.
- HARR, M.E. (1987). Reliability-Based Design in Civil Engineering. McGraw-Hill Book Company, New York , EUA, 290 p.
- HIGHLAND, L.M. e BOBROWSKY, P. (2008). The landslide handbook - A guide to understanding landslides: Reston, Virginia, U.S. Geological Survey Circular 1325, 129 p.
- HUTCHINSON, J.N. (1968). Mass Movements. In: Fairbridge, R.W. (ed.). (1968). The Encyclopedia of Geomorphology: New York, Reinhold Book Corporation, pp. 688-695.

- HUTCHINSON, J.N. (1988). General Report: Morphological and geotechnical parameter of landslides in relation to geology and hydrogeology. In: Landslides, Proc. Fifth Int. Symp. on Landslides, (Ed. C. Bonnard), Lausanne, Switzerland, vol. 1: pp. 3-35.
- MACHADO, R. R. e ZACARIAS, G. M. (2016). Análise de risco de deslizamento. Revista Ordem Pública, v. 9, n. 1.
- MAIA, J.A.C. (2003). Métodos probabilísticos aplicados à estabilidade de taludes e cavidades em rocha, Dissertação de Mestrado, UNB, Brasília, DF, Brasil.
- MOSTYN, G.R. e LI, K.S. (1993) Probabilistic Slope Analysis-State of Play. Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering, Li & Lo (eds), Balkema.
- PROYECTO MULTINACIONAL ANDINO: GEOCIENCIAS PARA LAS COMUNIDADES ANDINAS, PMA:GCA. (2007). Movimientos en Masa en la Región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Multinacional, No. 4, 432 p.
- REIS, E.; ZÉZERE, J.L.; VIEIRA, G.T. e RODRIGUES, M.L. (2003). Integração de Dados Espaciais em SIG Para Avaliação da Susceptibilidade à Ocorrência de Deslizamentos. Finisterra, 38(76): 3-34.
- REZENDE, D. A. (2013). Análise probabilística de estabilidade de taludes em barragens de rejeito. Projeto de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 108p.
- ROSA, R. e BRITO, J.L.S. (1996). Introdução ao Geoprocessamento. Sistema de Informação Geográfica. Uberlândia: UFU, 104p.
- SANDRONI, S.S. e SAYÃO, A.S.F.J. (1992). Avaliação Estatística do Coeficiente de Segurança de taludes. 1ª Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Taludes, ABMS, vol. 2.
- SILVA, A. M. (2001). Curso Processamento digital de imagens de satélite. Porto Alegre: Centro de Eventos da PUCRS.
- SILVEIRA, C.S. e RAMOS, J.A.S. (2007). Análise espacial com SIG de parâmetros ambientais e comportamento hidrológico (chuva-vazão) de uma bacia de drenagem montanhosa na serra dos órgãos: bacia do Paquequer, município de Teresópolis, RJ. Revista Brasileira de Geomorfologia, 8(1): 23-34.
- SILVA JUNIOR, E.E.A. (2019). Geotecnologias e Planejamento Urbano: Proposta Metodológica e Avaliação de Dados Obtidos por Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPA) como Contribuição à Cartografia Geotécnica. Tese de Doutorado, Publicação G.TD – 155/19, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 272 p.

- SPRING (2006). Manuais. Tutorial de Geoprocessamento.
- SUBSECRETARIA DO SISTEMA DE DEFESA CIVIL (2019). Distrito Federal tem 41 áreas de risco, segundo Defesa Civil.
- TOMINAGA, L.K. (2007). Avaliação de Metodologias de Análise de Risco a Escorregamentos: Aplicação de um Ensaio em Ubatuba, SP. PhD Thesis, University of São Paulo, 220 p.
- U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (1995). Introduction to Probability and Reliability Methods for Use In Geotechnical Engineering, Engineering Technical Letter ETL 1110-2-547, Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineers, Washington.
- VARNES, D. J. (1958). Landslides types and processes. In: Eckel, E.B., ed., Landslides and engineering practice, Special Report 28: Washington, DC, Highway Research Board, National Academy of Sciences, 28: 20-47.
- VARNES, D. J. (1978). Slope movements types and processes. In: Schuster R.L., y Krizek R.J. (ed.). Landslides analysis and control. Washington D. C, National Academy Press, Transportation Research Board Special Report, 176: 9-33.

ANEXO I - ROTINA COMPUTACIONAL

```
clear all
clc
% Dados de entrada
% Matrizes dos parâmetros do modelo
%mat_decl_grau; mat_contrib; mat_espess; mat_coesao; mat_atrito;
% mat_massa_solo; variancia_coesao; variancia_atrito

%Vetor de dados numéricos das matrizes (relacionados ao SIG)
% dado_espess; dado_coesao; dado_atrito;

mat_decl_grau = load('Decliv.spr');
%mat_contrib = load('contribui.txt');

nodata = 3.40282e+038;

mat_espess = load('dado_espess.txt');
mat_coesao = load('dado_coesao.txt');
% matriz é importada em graus, mas deve ser transformada para radianos
mat_atrito = pi/180*load('dado_atrito.txt');

mat_massa_solo = load('gama.txt');

% Substitui os valores numéricos dos parâmetros para as matrizes de dados
% Matriz de declividade: transformação de grau para radianos

mat_decl = (mat_decl_grau*pi)/180;

% Matrizes das variâncias a partir do coeficiente de variação

cv_coesao = 0.4;

    variancia_coesao = (cv_coesao.*mat_coesao).^2;

cv_atrito = 0.1;

    variancia_atrito = (cv_atrito.*tan(mat_atrito)).^2;

%
%
% Fase de processamento
%
%
% Cálculo da estabilidade média do terreno (a partir dos valores médios
dos parâmetros)
```



```

[lin,col] = size(mat_decl);

for i = 1:lin
    for j = 1:col

        F(i,j) =
(mat_coesao(i,j))/(mat_massa_solo(i,j)*mat_espress(i,j)*sin(mat_decl(i,j))
*cos(mat_decl(i,j)))+(tan(mat_atrito(i,j))/tan(mat_decl(i,j)));

        end % end for
    end % end for

% Variancia da Estabilidade em função da coesão

delta_coesao = 0.1*mat_coesao;

mat_coesao_delta = 1.1.*(mat_coesao);

% Cálculo de delta_F em função do delta_xi
for i = 1:lin
    for j = 1:col

        dF_coesao(i,j) =
mat_coesao_delta(i,j)/(mat_massa_solo(i,j)*mat_espress(i,j)*sin(mat_decl(i
,j))*cos(mat_decl(i,j)))+(tan(mat_atrito(i,j))/tan(mat_decl(i,j)));
        end % end for
    end % end for

for i = 1:lin
    for j = 1:col

        dF_dx_2(i,j) = ((dF_coesao(i,j)-F(i,j))/delta_coesao(i,j))^2;
        V_F_coesao(i,j) = dF_dx_2(i,j)*variancia_coesao(i,j);

        end % end for
    end % end for

% Variancia da Estabilidade em função do atrito

% INCREMENTO DE ATRITO DADO NA TANGENTE, E NÃO NO VALOR DO ATRITO

mat_atrito_delta = 1.1.*tan(mat_atrito);

delta_atrito = 0.1.*mat_atrito;

% Cálculo de delta_F em função do delta_xi

```

```

for i = 1:lin
    for j = 1:col

        dF_atrito(i,j) =
mat_coesao(i,j)/(mat_massa_solo(i,j)*mat_espress(i,j)*sin(mat_decl(i,j))*c
os(mat_decl(i,j)))+(mat_atrito_delta(i,j)/tan(mat_decl(i,j)));

        end % end for
    end % end for

for i = 1:lin
    for j = 1:col

        dF_dx_2_atrito(i,j) = ((dF_atrito(i,j)-F(i,j))/delta_atrito(i,j))^2;
        V_F_atrito(i,j) = dF_dx_2_atrito(i,j)* variancia_atrito(i,j);

    end % end for
end % end for

% Soma-se as variâncias dos parâmetros e calcula-se os desvios padrão

for i = 1:lin
    for j = 1:col

        Variancia_F_total(i,j) = V_F_coesao(i,j) + V_F_atrito(i,j);
        Desvio_F(i,j) = sqrt(Variancia_F_total(i,j));
    end % end for
end % end for

% Matriz com a porcentagem da variância referente à coesão e ao atrito

for i = 1:lin
    for j = 1:col
        Coesao_porcent(i,j) =
(V_F_coesao(i,j)/Variancia_F_total(i,j))*100;
        Atrito_porcent(i,j) =
(V_F_atrito(i,j)/Variancia_F_total(i,j))*100;
    end % end for
end % end for

%
% Cálculo do índice de confiabilidade

for i = 1:lin
    for j = 1:col

        beta_FS(i,j) = (F(i,j)-1)/Desvio_F(i,j);

    end % end for
end % end for

%

```

```

% Cálculo do PROBABILIDADE DE RUPTURA

syms z
%Definição da função de distribuição normal normalizada
%y = (1/sqrt(2*pi)*exp(-0.5*z^2));

PR = zeros(lin,col);

for i = 1:lin
    for j = 1:col
        if mat_decl_grau(i,j) ~= nodata

            if F(i,j) ~= Inf

                x = -10:0.01:(1-F(i,j))/Desvio_F(i,j);

                Y = 1/sqrt(2*pi)*exp(-0.5*x.^2);

                PR(i,j) = trapz(x,Y,2);

            end % end if

        end % end if
    end % end for
end % end for

%
% Saida de Dados
%
dlmwrite('F.txt', F, 'delimiter', '\t', 'newline', 'pc');
dlmwrite('beta_FS.txt', beta_FS, 'delimiter', '\t', 'newline', 'pc');
dlmwrite('PR.txt', PR, 'delimiter', '\t', 'newline', 'pc');
dlmwrite('Desvio_F.txt', Desvio_F, 'delimiter', '\t', 'newline', 'pc');

```