



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

CRISTIANE RIBEIRO DE MELO

**UTILIZAÇÃO DE INFORMAÇÕES ESPACIAIS DE ALTA RESOLUÇÃO PARA
ANÁLISE DE SUSCETIBILIDADE DE DESLIZAMENTO SOB SITUAÇÃO DE
PRECIPITAÇÕES INTENSAS**

Recife

2021

CRISTIANE RIBEIRO DE MELO

**UTILIZAÇÃO DE INFORMAÇÕES ESPACIAIS DE ALTA RESOLUÇÃO PARA
ANÁLISE DE SUSCETIBILIDADE DE DESLIZAMENTO SOB SITUAÇÃO DE
PRECIPITAÇÕES INTENSAS**

Tese apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutora em Engenharia Civil.

Área de concentração: Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. José Almir Cirilo.

Recife

2021

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

M528u Melo, Cristiane Ribeiro de.
Utilização de informações espaciais de alta resolução para análise de suscetibilidade de deslizamento sob situação de precipitações intensas / Cristiane Ribeiro de Melo - 2021.
159 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. José Almir Cirilo.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2021.
Inclui Referências e Apêndices.

1. Engenharia Civil. 2. SINMAP. 3. HYDRUS. 4. Suscetibilidade a deslizamento. 5. Balanço hídrico. 6. Formação Barreiras. I. Cirilo, José Almir (Orientador). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.) BCTG/2021-66

CRISTIANE RIBEIRO DE MELO

**UTILIZAÇÃO DE INFORMAÇÕES ESPACIAIS DE ALTA RESOLUÇÃO PARA
ANÁLISE DE SUSCETIBILIDADE DE DESLIZAMENTO SOB SITUAÇÃO
DE PRECIPITAÇÕES INTENSAS**

Tese apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutora em Engenharia Civil.

Aprovada em 27/01/2021

BANCA EXAMINADORA

participação por videoconferência
Prof. Dr. José Almir Cirilo (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência
Prof. Dr. Marcos Aurélio Vasconcelos de Freitas (Examinador externo)
Universidade Federal do Rio de Janeiro

participação por videoconferência
Prof. Dr. Samuel França Amorim (Examinador externo)
Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência
Prof. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral (Examinador interno)
Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência
Prof. Dr. Alfredo Ribeiro Neto (Examinador interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Aos meus amados pais, Alvacir P. de Melo (In Memoriam) e
Maria Leonora R. Melo, meu companheiro de jornada Paulo
Abadie Guedes, meus amados filhos Davi e Heloísa e a todos
que de alguma forma contribuíram para esta conquista,
DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Ao SENHOR DEUS, pela vida e possibilidade de empreender esse caminho evolutivo, por propiciar tantas oportunidades de crescimento e por colocar, em meu caminho, pessoas amigas e preciosas.

À MINHA FAMÍLIA, especialmente aos meus pais, Alvacir e Leonora, ao meu esposo, Paulo, companheiro incondicional; ao meu irmão, Alvacir Júnior, e demais parentes que se mantiveram incansáveis em suas manifestações de apoio e carinho; aos meus sogros, Vilma Abadie e Rubem Guedes, pelos quais tenho grande carinho, respeito e admiração, e que contribuíram e me incentivaram nessa empreitada.

Ao MEU ORIENTADOR, prof. José Almir Cirilo, um agradecimento carinhoso por todos os momentos de paciência, compreensão e competência.

Ao ETERNO PROFESSOR Washington Amorim, pelo qual tenho muito respeito e estima, agradeço a enorme disponibilidade e prestatividade em transferir sua vasta experiência técnica e contribuir, assim, para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao PROFESSOR SAMUEL AMORIM por todo o conhecimento e experiência técnica compartilhados com muita generosidade e competência, contribuindo valiosamente para o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao PROFESSOR ARTUR COUTINHO pela importante contribuição técnica que permitiu o avanço das pesquisas desenvolvidas e aqui apresentadas.

Ao CORPO TÉCNICO Bruno Silva e Cícero Chaves Júnior que participaram ativamente com aprendizado mútuo, auxiliando-me nas atividades de campo e escritório.

Aos AMIGOS e companheiros de caminhada que compartilharam comigo esses momentos de aprendizado, especialmente ao colega Fellipe Alves pela sua amizade e disponibilidade em me socorrer, tantas vezes, em minhas dificuldades técnicas.

Ao SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (SGB/CPRM), pela oportunidade dada e por todo apoio oferecido para a realização deste trabalho.

Aos AMIGOS da CPRM que sempre se fizeram presentes com ensinamentos técnicos, palavras de encorajamento e amor. Especialmente, a Daniel Oliveira, Cleide Moura, Keyla Santos, Solange Melo, Mercília Barros, Carlos Alberto Magalhães (*In Memoriam*), e tantos, tantos outros aos quais peço desculpas, pela impossibilidade de citá-los todos.

Às SECRETÁRIAS da Pós-graduação em Engenharia Civil da UFPE, Andréa, Jecicleide e Claudiane, pela amizade e disponibilidade.

Enfim, agradeço pela grande oportunidade do convívio enriquecedor com todos que acima citei e com aqueles que, de alguma forma, contribuíram com este trabalho.

RESUMO

Na Região Metropolitana do Recife (RMR) são rotineiros os deslizamentos de encostas, quando áreas suscetíveis são submetidas a chuvas intensas (precipitação acumulada em 24 horas acima de 18,6mm). A comunidade de Lagoa Encantada (Recife/PE), localizada em área de Formação Barreiras, é uma das localidades que sofre com deslizamentos no Município. Estudos mostram que, na localidade, com chuva acumulada maior que 60mm em 72h, registrou-se 75% dos deslizamentos na Região Sul da RMR, para o ano de 2009. Entre os anos de 2013 e 2017 foram cadastrados pela Defesa Civil 2.141 chamados na comunidade. Este trabalho tem como objetivo avaliar a suscetibilidade a deslizamentos e o balanço hídrico no solo, na comunidade de Lagoa Encantada, utilizando de forma combinada as simulações dos modelos computacionais SINMAP e Hydrus-1D. Os parâmetros de entrada do SINMAP foram as características físicas e hidrodinâmicas do solo, localização de escorregamentos e o DEM; no caso do modelo Hydrus-1D, os parâmetros hidráulicos do solo. Com o suporte de ambos os programas também foram realizadas simulações, com base nas chuvas registradas na região, entre os anos de 2013 e 2017. Os solos foram classificados pelo Sistema Unificado de Classificação de Solo (USCS). Para avaliar os processos de infiltração que provocam deslizamentos, foi utilizado o Hydrus-1D, nos mesmos cenários de chuva simulados pelo modelo SINMAP e também na avaliação do volume infiltrado, em deslizamentos reais. Os resultados do SINMAP (mapas de suscetibilidade) mostram um aumento de 71% na área suscetível ($SI < 1$) entre os dois cenários de precipitação e são consistentes com evidências de deslizamentos. Os resultados do Hydrus-1D complementam os resultados do SINMAP e sugerem que os valores de infiltração, para cenários simulados, foram semelhantes aos de deslizamentos reais. Os resultados também mostram que a precipitação acumulada, nos dias que antecedem os deslizamentos, são de extrema importância na previsão de desastres; e que acidentes ocorridos, fora do período de inverno, podem ser consequência da fragilização do solo causada pela incidência de águas servidas. Conclui-se que é possível zonestar áreas de maior instabilidade e prever possíveis escorregamentos, em diferentes cenários de chuva, observando a diferença entre os mapas de suscetibilidade para níveis de precipitações diferentes e avaliando quantitativamente o volume infiltrado que contribui para a desestabilização do solo.

Palavras-chave: SINMAP. HYDRUS. Suscetibilidade a deslizamento. Balanço hídrico. Formação Barreiras.

ABSTRACT

In the Metropolitan Region of Recife (MRR), sliding landslides are routine, when MRR-susceptible areas are subjected to intense rains (accumulated precipitation in 24 hours above 18.6mm). The Lagoa Encantada community, which is located in the Barreiras Formation area, is one of the MRR-localities that suffer from frequent landslides. In 2009, with accumulated rain greater than 60mm in 72h, this locality accounted for 75% of the landslides in the Southern Region of RMR. In the period from 2013 to 2017 the State Civil Defense Service registered 2,141 landslide-calls in this community. This study aimed to evaluate the soil susceptibility to landslides and the water balance in the soil, in the Lagoa Encantada community. To do that, we used, in a combined way, the simulations of two computational models: SINMAP and Hydrus-1D. The SINMAP input parameters were the physical and hydrodynamic characteristics of the soil, the location of landslides and the DEM, while for the Hydrus-1D model we used the hydraulic parameters of the soil. For both programs, simulations were also carried out, based on the rainfall events that were recorded in the region, between the years 2013 and 2017. The soil was classified according to the Unified Soil Classification System (USCS). To evaluate the infiltration processes that cause landslides, we used Hydrus-1D in the same rain scenarios that were simulated by the SINMAP model, and also in the assessment of the infiltrated volume, in real landslides. The SINMAP data (susceptibility maps) showed a 71% increase in the susceptible area ($SI < 1$) between the two precipitation scenarios, and are consistent with evidence of real landslides. The results of HYDRUS-1D complemented the SINMAP results and suggest that the infiltration values, for simulated scenarios, were similar to those of real landslides. Data also have shown that the accumulated precipitation, in the days immediately before the landslides, is extremely important for the prediction of disasters. Furthermore, accidents that occurred outside the winter period may be a consequence of the weakening of the soil that is caused by the incidence of wastewater. We conclude that it is possible to zone areas of greater instability and predict possible landslides, in different rain scenarios, from the difference between the susceptibility maps for different precipitation levels, and the quantitatively assessed rain-water volume that infiltrates into the soil and contributes to its destabilization.

Keywords: SINMAP. HYDRUS. Landslide susceptibility. Water balance. Barreiras Formation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estados do Nordeste Monitorados pelo CEMADEN.....	31
Figura 2 - Prancha com a setorização de riscos e descrição dos processos.....	33
Figura 3 - Mapa de suscetibilidade ao deslizamento de terra em relação à precipitação ocorrida em novembro de 2007 em Santo Stefano d'Aveto – Itália.....	40
Figura 4 - Mapa de Estabilidade da Bacia do Rio Cunha - SC (SHALSTAB)..	41
Figura 5 - Mapa de Estabilidade de Encostas da Bacia do Yung – MG (SINMAP).....	42
Figura 6 - Modelo HAND utilizado para identificação das áreas suscetíveis a inundação e deslizamento na RMSP (HAND).....	45
Figura 7 - Esquema do modelo de estabilidade do talude.....	47
Figura 8 - Conceitos dos fatores de coesão adimensional.....	49
Figura 9 - Definição da área específica da bacia.....	50
Figura 10- Índice de estabilidade - relação de contribuição versus ângulo da encosta.....	53
Figura 11- Carta de plasticidade de Casagrande (Gráfico de plasticidade).....	57
Figura 12- Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS).....	59
Figura 13- Método de obtenção de pontos a partir de perfilamento a laser.....	61
Figura 14- Localização da Comunidade de Lagoa Encantada.....	72
Figura 15- Principais Unidades Geológicas da RMR.....	75
Figura 16- Afloramento da Formação Barreiras no município de Camaragibe..	76
Figura 17- Lonas plásticas na localidade de Lagoa Encantada.....	78
Figura 18- Prisma de monitoramento instalado pelo CEMADEN.....	82
Figura 19- Totais pluviométricos, série 2000 a 2019, da Estação Pluviométrica Recife/CPRM.....	84
Figura 20- Precipitação média mensal, série 2000 a 2019, da Estação Pluviométrica Recife/CPRM.....	84
Figura 21- Correlação entre a intensidade da chuva e a chuva acumulada para as encostas da Formação Barreiras em Olinda (RMR).....	86
Figura 22- Visão geral da estrutura de trabalho.....	89

Figura 23-	Local onde se situava a igreja, destruída pelo deslizamento ocorrido em 28/06/2011.....	94
Figura 24-	Localização dos pontos de perfuração em Lagoa Encantada.....	100
Figura 25-	Perfil do subsolo - Ponto 1 (perfurações 1 a 3).....	101
Figura 26-	Perfil do subsolo - Ponto 2 (perfurações 4 e 5).....	102
Figura 27-	Curva Granulométrica – Furo 1.....	102
Figura 28-	Curva Granulométrica – Furo 2.....	103
Figura 29-	Curva Granulométrica – Furo 3.....	104
Figura 30-	Curva Granulométrica – Furo 4.....	104
Figura 31-	Curva Granulométrica – Furo 5.....	104
Figura 32-	Perfil do subsolo – Ponto 1 (Furos 1 a 3).....	106
Figura 33-	Perfil do subsolo – Ponto 2 (Furos 4 e 5).....	107
Figura 34-	(A) Ortofoto, e (B) Mapa de declividade de Lagoa Encantada.....	109
Figura 35-	Precipitação diária no mês de junho, para os anos de 2015 a 2017..	111
Figura 36-	Precipitação diária no mês de novembro, para os anos de 2015 e 2016.....	111
Figura 37-	Índice de estabilidade e saturação (Cenário 1 - chuva de todo mês novembro).....	113
Figura 38-	Resultado do modelo de validação SINMAP (cicatrices mapeadas pela SEDEC em vermelho e pontos aleatórios do programa em preto) - Cenário 1 - chuva de todo mês novembro.....	114
Figura 39-	Índice de estabilidade e saturação (Cenário 2 - chuva máxima de 48 horas).....	115
Figura 40-	Resultado do modelo de validação SINMAP (cicatrices mapeadas pela SEDEC em vermelho e pontos aleatórios do programa em preto) - Cenário 2 - chuva máxima de 48 horas.....	115
Figura 41-	Índice de estabilidade e saturação (Cenário 3 - chuva máxima de 24 horas).....	116
Figura 42-	Resultado do modelo de validação SINMAP (cicatrices mapeadas pela SEDEC em vermelho e pontos aleatórios do programa em preto) - Cenário 3 - chuva máxima de 24 horas.....	117
Figura 43-	Índice de estabilidade e saturação (Cenário 4 - chuva máxima de 12 horas).....	118

Figura 44-	Resultado do modelo de validação SINMAP (cicatrizes mapeadas pela SEDEC em vermelho e pontos aleatórios do programa em preto) - Cenário 4 - chuva máxima de 12 horas.....	118
Figura 45-	Evolução percentual dos pontos mapeados em áreas instáveis.....	120
Figura 46-	Evolução percentual das áreas instáveis por cenário.....	121
Figura 47-	Precipitação mensal para os anos de 2014 e 2015.....	126
Figura 48-	Balanço hídrico no solo para o ano de 2014.....	128
Figura 49-	Balanço hídrico no solo para o ano de 2015.....	128
Figura 50-	Infiltração acumulada no solo em 2014.....	129
Figura 51-	Infiltração acumulada no solo em 2015.....	130
Figura 52-	Precipitação mensal para o ano de 2016.....	132
Figura 53-	Balanço hídrico no solo para o ano de 2016.....	133
Figura 54-	Infiltração acumulada no solo em 2016.....	133
Figura 55-	Infiltração acumulada no solo em 2016, simulada para os diversos modelos.....	135

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 -	Classificação dos movimentos, Varnes (1978).....	24
Quadro 2 -	Classificação dos movimentos de encosta, Augusto Filho (1992)...	25
Quadro 3 -	Graus de riscos de deslizamento.....	29
Quadro 4 -	Definições das classes de estabilidade de encostas.....	46
Quadro 5 -	Valores padrão fornecidos para todos os parâmetros SINMAP.....	55
Quadro 6 -	Classificação dos solos apresentada pelo professor Milton Vargas...	58
Quadro 7 -	Critério para estabelecimento do grau de risco.....	79
Quadro 8 -	Registro de deslizamentos em Lagoa Encantada (2014 – 2015).....	80
Quadro 9 -	Índice pluviométrico registrado em acidentes ocorridos em Lagoa Encantada.....	85
Quadro 10-	Classificação da precipitação acumulada em 24 horas para Recife.....	87
Quadro 11-	Parâmetros de resistência ao cisalhamento de solos provenientes da Formação Barreiras no Ibura.....	95
Quadro 12-	Valores dos coeficientes de permeabilidade de solos no Ibura.....	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Furos de sondagem a trado realizados em Lagoa Encantada.....	101
Tabela 2 -	Composição granulométrica das amostras.....	105
Tabela 3 -	Parâmetros de entrada utilizados no modelo SINMAP em Lagoa Encantada.....	110
Tabela 4 -	Recarga considerada para os cenários de precipitação e relação T/R....	112
Tabela 5 -	Incremento de precipitação em mm/h para cada cenário.....	112
Tabela 6 -	Estatística SINMAP – Cenário 1 (chuva de todo mês novembro).....	122
Tabela 7 -	Estatística SINMAP – Cenário 2 (chuva máxima de 48 horas).....	122
Tabela 8 -	Estatística SINMAP – Cenário 3 (chuva máxima de 24 horas).....	122
Tabela 9 -	Estatística SINMAP – Cenário 4 (chuva máxima de 12 horas).....	123
Tabela 10-	Balanço hídrico no solo no dia do deslizamento em 2014 e 2015.....	130

LISTA DE SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
APAC	Agência Pernambucana de Águas e Clima
CEMADEN	Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais
CODECIR	Coordenadoria de Defesa Civil do Recife
ETR	Estação Total Robotizada
FAO	Food and Agriculture Organization
GRASS	Geographic Resources Analysis Support System
HAND	Height Above the Nearest Drainage
IAEG	Internacional Association of Engineering Geology
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
LiDAR	Light Detection and Ranging
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDT	Modelos Digitais do Terreno
PCD	Plataforma de Coleta de Dados
PE3D	Programa Pernambuco Tridimensional
RMR	Região Metropolitana do Recife
SEDEC	Secretaria-Executiva de Defesa Civil
SEINFRA	Secretaria de Infraestrutura do Estado de Pernambuco
SGB/CPRM	Serviço Geológico do Brasil / Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
SI	Stability Index
SHALSTAB	Shallow Landslide Stability Model
SINMAP	Stability INdex MAPping
SPT	Standard Penetration Test
TRIGRS	Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope- Stability Model
TRIM	Transient Water Release and Imbibition Method
URs	Unidades Residenciais
USCS	Unified Soil Classification System
USDA	United States Department of Agriculture

LISTA DE SÍMBOLOS

g	Aceleração da gravidade
ϕ	Ângulo de atrito interno do solo
θ	Ângulo de inclinação da encosta
cm	Centímetro
cm/ano	Centímetros por ano
cm^3/cm^3	Centímetro cúbico por centímetro cúbico
C_r	Coesão da raiz
C_s	Coesão do solo
D_w	Altura vertical de água dentro da camada de solo
ρ_s	Densidade do solo úmido
FS	Fator de Segurança
$^{\circ}\text{C}$	Grau Celsius
ha	Hectare
ρ_w	Massa específica do solo
mm	Milímetro
mm/d	Milímetro por dia
m/h	Metros por hora
m/s	Metros por segundo
m/s^2	Metros por segundo ao quadrado
m^3/m^3	Metro cúbico por metro cúbico
N/m^2	Newton por metro quadrado
IE	Índice de estabilidade
K	Condutividade hidráulica do solo
kg/m^3	Quilograma por metro cúbico
km^2	Quilômetro quadrado
kPa	Quilopascal
R	Recarga do solo em m/h
θ_r	Teor de água residual no solo
θ_s	Teor de água saturada
T	Transmissividade do solo em m^2/h

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	OBJETIVO GERAL.....	22
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
1.3	ESTRUTURAÇÃO DO ESTUDO	23
2	REVISÃO DA LITERATURA	24
2.1	TIPOS DE MOVIMENTOS DE MASSA	24
2.1.1	Influência da chuva na deflagração dos movimentos de massa	26
2.1.2	Interferência da ação antrópica na deflagração dos movimentos de massa	27
2.2	ANÁLISE DE RISCO DE DESLIZAMENTO.....	28
2.3	GESTÃO DE RISCOS DE DESLIZAMENTO NO BRASIL.....	30
2.3.1	Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais – CEMADEN	30
2.3.2	Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM) - Plano de Gestão de Riscos	32
2.3.3	Plano Municipal de Redução de Riscos (PMRR) em assentamentos precários do município de Recife-PE e outros programas	34
2.4	ESTUDOS SOBRE DESLIZAMENTOS NO ESTADO DE PERNAMBUCO E RMR.....	35
2.5	VEGETAÇÃO E DESLIZAMENTOS	37
2.6	MODELOS COMPUTACIONAIS PARA ANÁLISE DE DESLIZAMENTO.....	39
2.7	STABILITY INDEX MAPPING – SINMAP.....	45
2.7.1	Metodologia SINMAP	45
2.7.1.1	Equação de talude infinito	47
2.7.1.2	Índice topográfico de umidade	49
2.7.1.3	Definição do índice de estabilidade.....	51
2.7.2	Parâmetros SINMAP	54
2.7.2.1	Parâmetros físicos.....	55
2.7.2.2	Parâmetros hidrodinâmicos	55
2.7.2.3	Classificação Unificada do Solo.....	56
2.7.3	Determinação da chuva necessária para causar deslizamentos	60
2.8	TECNOLOGIA LIDAR - LIGHT DETECTION AND RANGING	60
2.8.1	Programa Pernambuco Tridimensional – PE3D	64

2.9	BALANÇO HÍDRICO NO SOLO.....	64
2.9.1	Software Hydrus-1D.....	67
2.9.2	Simulação de movimento de água.....	68
3	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA.....	72
3.1	FORMAÇÃO BARREIRAS.....	73
3.1.1	Características da Formação.....	74
3.2	FATORES QUE INFLUENCIAM NOS DESLIZAMENTOS EM LAGOA ENCANTADA.....	76
3.3	O PAPEL DA DEFESA CIVIL NA COMUNIDADE.....	78
3.4	CARACTERÍSTICAS CLIMATOLÓGICAS.....	82
3.4.1	Monitoramento da precipitação em Lagoa Encantada.....	83
3.4.2	Valores de precipitação limiar necessários para causar deslizamentos no Recife.....	85
4	METODOLOGIA.....	88
4.1	MAPA DE SUSCETIBILIDADE.....	90
4.1.1	Tratamento das imagens utilizadas no modelo SINMAP.....	92
4.1.2	Parâmetros físicos do solo.....	93
4.1.3	Ensaio para classificação de amostras do solo (USCS).....	94
4.1.4	Características físicas dos solos na região.....	94
4.1.5	Características hidrodinâmicas: transmissividade e recarga do solo.....	96
4.1.6	Pontos de deslizamento.....	96
4.2	BALANÇO HÍDRICO NO SOLO.....	97
4.2.1	Parâmetros de entrada Hydrus-1D.....	98
4.3	ANÁLISE COMBINADA SINMAP E HYDRUS-1D.....	99
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	100
5.1	RECONHECIMENTO DO PERFIL DE SOLO E CLASSIFICAÇÃO USCS.....	100
5.2	RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES SINMAP.....	107
5.2.1	Resultados de suscetibilidade ao deslizamento utilizando SINMAP para MAPWINDOW.....	108
5.2.1.1	Avaliação dos resultados – Cenário 1 (chuva de todo mês novembro).....	112
5.2.1.2	Avaliação dos resultados – Cenário 2 (chuva máxima de 48 horas).....	114
5.2.1.3	Avaliação dos resultados – Cenário 3 (chuva máxima de 24 horas).....	116
5.2.1.4	Avaliação dos resultados – Cenário 4 (chuva máxima de 12 horas).....	117

5.2.1.5	Avaliação dos cenários.....	119
5.3	RESULTADOS DO BALANÇO HÍDRICO NO SOLO UTILIZANDO O HYDRUS - 1D	124
5.3.1	Simulação Hydrus-1D para situações reais de deslizamento nos anos de 2014 e 2015	125
5.3.2	Simulação do Hydrus – 1D para o Cenário 2 da análise SINMAP.....	131
5.3.3	Comparação entre os modelos hidráulicos analíticos oferecidos pelo modelo Hydrus-1D.....	134
6	CONCLUSÃO	136
6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	137
	REFERÊNCIAS.....	139
	APÊNDICE A - MÓDULO PADRÃO HYDRUS-1D	149
	APÊNDICE B - BALANÇO HÍDRICO NO SOLO	152

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a ocorrência de inundações e deslizamentos de encostas são os riscos geológicos mais frequentes, correspondendo a 58% e 11%, respectivamente. Dessa forma, os agentes deflagradores mais comuns são as chuvas intensas de longa duração e as tempestades (Camargo, 2013). As mudanças climáticas podem afetar significativamente o planeta aumentando os riscos relacionados a precipitações extremas (IPCC, 2018). Eventos extremos, em áreas próximas a costa da região Nordeste do Brasil, ocorrem quando Distúrbios Ondulatórios de Leste associam-se a desvios positivos de temperatura das águas do mar, podendo modular a intensificação de sistemas convectivos responsáveis pela produção de precipitações intensas (Machado et al., 2012). Dessa forma, os eventos extremos de chuva quando associados às formas de ocupação do espaço pelo homem originam diversos problemas de ordem socioambiental (Wanderley et al., 2018).

Visando melhorar a prevenção de desastres, de forma a proteger a sociedade e o ambiente, informações importantes devem ser geradas e atualizadas, periodicamente, para determinar vários níveis de ameaça. Estas informações podem auxiliar os serviços de emergência, criando sistemas de alerta, e o planejamento global do crescimento habitacional das comunidades, evitando seu crescimento desordenado. No entanto, a confiabilidade do processo é limitada por fatores críticos, como a disponibilidade e qualidade dos dados (Dragicevic et al., 2014).

Para evitar catástrofes futuras causadas por movimentos de massa é necessário avaliar tecnicamente as áreas suscetíveis aos deslizamentos e estudar, criteriosamente, as áreas onde já ocorreram acidentes. É importante compreender o mecanismo fundamental dos escorregamentos para, em seguida, utilizar mapas que mostrem, com detalhes, os diferentes níveis de predisposição do terreno a tais ocorrências.

Um movimento de massa não é um evento isolado, mas na realidade é causado por um conjunto de fatores locais associados. A soma das informações existentes sobre o solo, a vegetação, a ação antrópica e estudos da precipitação tornam-se fatores condicionantes importantes, ferramentas na previsão de deslizamentos e suporte às defesas civis. A importância é observada tanto na gestão do espaço para o uso e ocupação do território, como para criação de sistemas de alerta, para proteger a população que vive em áreas de perigo. Lima (2015) ressalta que é importante entender como ocorrem os eventos de deslizamento, seus agentes desencadeadores e suas características, pois esta compreensão auxilia as decisões dos gestores e fornecem informações necessárias para a adoção de medidas preventivas.

Um fator que deve ser considerado é a influência da vegetação. O desmatamento da vegetação natural para construção de casas e, muitas vezes, o plantio realizado pela população de culturas frutíferas, de grande porte, para obtenção de alimento com baixo custo, porém inadequadas para a estabilidade da região, são comuns. Guoa et al. (2019) citam que os tipos de vegetação têm uma influência significativa nos deslizamentos de terra pouco profundos e devem ser considerados. A erosão, em encostas cobertas de árvores pode apresentar intensidade maior do que em regiões gramadas ou arbustivas, dependendo do tipo de solo existente.

Segundo Baum & Godt (2010), a base de dados mínima para a elaboração de previsões de deslizamento são:

- a) mapas de suscetibilidade ou de risco de deslizamento de terra, para indicar quais áreas estão expostas e quais se encontram livres do problema. Entenda-se a suscetibilidade como a possibilidade da ocorrência do evento e o risco, a probabilidade do evento com consequências sociais e/ou econômicas;
- b) níveis prévios de água subterrânea no solo, indutores da ocorrência de deslizamento;
- c) intensidade e duração da chuva que deflagra o início do deslizamento de terra; e
- d) dados e previsões meteorológicas, em tempo real.

Para melhor entender a origem das catástrofes causadas por deslizamentos de terra é necessária uma avaliação técnica das áreas suscetíveis aos deslizamentos. A utilização da tecnologia LiDAR (Light Detection and Ranging), para obtenção detalhada do Modelo Digital de Elevação (MDE) é um recurso essencial, para melhorar a qualidade dos resultados apresentados pelos modelos computacionais de previsão de deslizamentos que os utilizam como dados de entrada.

A soma das tecnologias de informação de terreno de alta precisão, das características físicas e hidrodinâmicas do solo e de precisas previsões de chuva tornam-se importantes ferramentas na previsão de deslizamentos e suporte às defesas civis. A importância é observada tanto na gestão do espaço para o uso e ocupação do território, como para criação de sistemas de alerta, visando proteger a população que vive em áreas de perigo.

Uma das dificuldades mais antigas enfrentadas pelos recifenses, moradores das regiões de encosta, são os desmoronamentos de barreiras em épocas de chuva (Gomes et al., 2017). A cidade do Recife encontra-se em uma região de Clima Tropical Litorâneo do Nordeste Oriental, com chuvas concentradas durante o outono e o inverno. Em seu trabalho Wanderley et al. (2018) cita que para a cidade todos os meses do ano são propícios a ocorrência de valores diários

extremos, mas o período entre março e agosto apresenta maior probabilidade.

Segundo o censo de 2010, Recife, capital do estado de Pernambuco ocupa a 5ª posição entre as cidades brasileiras com maior número de habitantes que vivem em áreas montanhosas, com propensão a deslizamentos de terra. Conhecer os problemas urbanos é de extrema importância para o planejamento das estratégias de gerenciamento, pois entender as áreas de risco e sua dimensão é o primeiro passo para a tomada de decisões (Bandeira & Coutinho, 2015). Na Região Metropolitana do Recife, por exemplo, os deslizamentos, em sua maioria, são do tipo planar, movimento típico de camadas pouco espessas compostas de materiais diferentes e se localizam, principalmente, sobre áreas constituídas por sedimentos da Formação Barreiras (Pfaltzgraff, 2007).

A comunidade de Lagoa Encantada, definida como área de estudo, localizada no bairro do Ibura, na cidade do Recife, foi escolhida para avaliação da suscetibilidade ao deslizamento, por ser um dos lugares com maior incidência desse tipo de evento na RMR. Dentre os estudos existentes sobre deslizamentos na localidade, pode-se citar Rocha & Schuler (2016), que estudaram a região e avaliaram a dinâmica da expansão urbana, nos setores de risco de movimentos de massa, nas microrregiões do Jordão e Ibura. O referido estudo concluiu que, após a análise da modelagem multitemporal (2007 - 2013) da suscetibilidade a movimentos de massa nestes bairros, as áreas com suscetibilidade baixa obtiveram redução de abrangência territorial de 4,42%; áreas com suscetibilidade média, um acréscimo de 0,57%; e áreas com suscetibilidade alta, uma elevação de 3,84%.

1.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo geral propor o uso, de forma combinada, de um modelo de previsão de deslizamento e de um modelo de análise de infiltração. O modelo de previsão de deslizamento utiliza informações geotécnicas (físicas e hidráulicas do solo), climatológicas de precipitações intensas e modelos digitais do terreno de alta resolução. O segundo modelo auxilia na compreensão dos processos de infiltração e acumulação de água (balanço hídrico no solo), causadores de deslizamentos.

Portanto, busca-se contribuir com as técnicas de avaliação da suscetibilidade a escorregamentos, disponibilizando uma metodologia que pode ser útil para futuras análises de risco e para a criação de sistemas de alerta para a comunidade estudada.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Identificar e utilizar um modelo de deslizamento adequado que leve em consideração não só aspectos geotécnicos, mas hidrológicos e topográficos;
- b) Avaliar e escolher um modelo computacional de acesso livre e código aberto, para previsão de deslizamento, integrando informações geotécnicas, espaciais e climatológicas; e utilizar exclusivamente base de dados acessíveis;
- c) Validar a metodologia em uma área de estudo suscetível a deslizamentos, dentro da Região Metropolitana do Recife;
- d) Simular o balanço hídrico no solo, utilizando modelo computacional de acesso gratuito, para auxiliar na determinação do acúmulo de água, em uma situação de deslizamento; e avaliar os resultados em situação indicada pelo modelo de deslizamento e em situação real de deslizamento, na área estudada;
- e) Avaliar as áreas e situações passíveis de deslizamento, com base na análise conjunta do relevo e da infiltração da água no solo.

1.3 ESTRUTURAÇÃO DO ESTUDO

No presente trabalho são apresentados no Capítulo 2 (Revisão da literatura) uma breve discussão sobre movimentos de massa, análise de risco de deslizamentos, gestão de risco de deslizamento no Brasil, deslizamentos no estado de Pernambuco (Formação Barreiras), modelos computacionais para análise de deslizamento, tecnologia LiDAR (Programa PE3D) e modelo computacional para simulação do balanço hídrico no solo.

O Capítulo 3 (Caracterização da área) descreve as características da área de estudo, histórico de ocorrência de desastres na área estudada, características do solo e climatológicas.

No Capítulo 4 (Metodologia) é feita uma explanação sobre o tratamento das imagens utilizadas, análises para caracterização dos parâmetros físicos e hidrodinâmicos do solo na área de estudo, uso dos modelos de deslizamento e balanço hídrico do solo; em complemento, é feita a apresentação da proposta de análise de suscetibilidade, empregando os modelos computacionais.

No Capítulo 5 (Resultados e Discussão) são apresentados os resultados e discussão das simulações (deslizamento e recarga do solo) para os cenários de recarga estimados (situações de pouca precipitação e máximas de 48 horas, 24 horas e 12 horas); e análise da infiltração da água em situações reais de deslizamento registradas pela Defesa Civil.

O Capítulo 6 traz a conclusão e as sugestões para estudos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 TIPOS DE MOVIMENTOS DE MASSA

O movimento de massa pode acontecer de formas diversas, a depender do tipo de material movimentado, mecanismo de ruptura, volume, trajetória, velocidade e formato do percurso da massa movimentada (Silva, 2016).

Dentre as classificações de movimentos gravitacionais de massa, a mais utilizada mundialmente e considerada como a oficial pela *Internacional Association of Engineering Geology* (IAEG) é a proposta por Varnes (1978), reafirmada em WP/WLI1 (1993), e apresentada no Quadro 1.

Quadro 1 - Classificação dos movimentos segundo Varnes (1978)

Tipo de Movimento		Tipo de material		
		Rocha	Solo (engenharia)	
			de detrito	fino
Quedas		de rocha	de detritos	de terra
Tombamentos		de rocha	de detritos	de terra
Escorregamentos	Rotacional	abatimento de rocha	abatimento de detritos	abatimento de terra
		de blocos rochosos	de blocos de detritos	de blocos de terra
	Translacional	de rocha	de detritos	de terra
Expansões laterais		de rocha	de detritos	de terra
Corridas / escorregamentos		de rocha (rastejo profundo)	de detritos	de terra
			rastejo de solo	
Complexos: Combinação de 2 ou mais dos principais tipos de movimentos				

Fonte: Varnes, 1978.

Entretanto, esta classificação não apresenta as características do movimento, material e geometria mobilizadas. Tais características são apresentadas por Augusto Filho (1992) conforme se indica no Quadro 2, sendo uma das mais completas classificações de movimentos gravitacionais. As informações aqui representam a melhor classificação adaptada ao idioma

português, pois respeitam a Classificação de Varnes (Quadro 1) que tem as características dos movimentos. Para melhor compreensão dos mecanismos de ruptura, vide USGS (2008).

Quadro 2. Classificação dos movimentos de encosta, de acordo com Augusto Filho (1992)

PROCESSOS	CARACTERÍSTICAS DO MOVIMENTO, MATERIAL E GEOMETRIA
Rastejo (CREEP)	<ul style="list-style-type: none"> • Vários planos de deslocamento (internos) • Velocidade muito baixa (cm/ano) a baixas e decrescentes com a profundidade • Movimentos constantes, sazonais ou intermitentes • Solo, depósito, rocha alterada/fratura • Geometria indefinida
Escorregamentos (SLIDES)	<ul style="list-style-type: none"> • Poucos planos de deslocamento (externos) • Velocidade média (m/h) e altas (m/s) • Pequenos a grandes volumes de material • Geometria e material variáveis • Planares – solos pouco espessos, solos e rochas com um plano de fraqueza • Circulares – solos espessos homogêneos e rochas muito fraturadas • Em cunha – solos e rochas com dois planos de fraqueza
Quedas (FALLS)	<ul style="list-style-type: none"> • Sem planos de deslocamentos • Movimentos tipo queda livre ou em plano inclinado • Velocidades muito altas (vários m/s) • Material rochoso • Pequenos a médios volumes • Geometria variável: lascas, placas, blocos, etc. • Rolamento de matacão • Tombamento
Corridas (FLOWS)	<ul style="list-style-type: none"> • Muitas superfícies de deslocamentos (internas e externas à massa em movimentação) • Movimento semelhante ao de um líquido viscoso • Desenvolvimento ao longo das drenagens • Velocidades médias e altas • Mobilização de solo, rocha, detritos e água • Grandes volumes de material • Extenso raio de alcance mesmo em áreas planas

Fonte: Augusto Filho, 1992.

Um dos mais frequentes movimentos de massa ocorridos no Brasil é o do tipo *escorregamentos translacionais rasos*. São deflagrados pela diminuição da resistência ao cisalhamento dos solos superficiais, em médias e altas encostas, submetidos a chuvas intensas (Sausen & Lacruz, 2015).

Os escorregamentos gravitacionais de massa podem ser subdivididos em três tipos: rotacionais ou circulares, translacionais ou planares e em cunha. Entretanto, observa-se que a

combinação de um ou mais dos movimentos citados também pode ocorrer (Rodrigues, 2013).

- a) Escorregamentos rotacionais - Os escorregamentos rotacionais caracterizam-se por uma superfície de ruptura curva, ao longo da qual se dá um movimento rotacional do maciço de solo;
- b) Escorregamentos translacionais – ocorrem quando se formam superfícies de ruptura planar associadas às heterogeneidades dos solos e rochas que representam descontinuidades mecânicas e/ou hidrológicas, derivadas de processos geológicos, geomorfológicos ou pedológicos;
- c) Escorregamentos em cunha - São associados aos maciços rochosos pouco ou muito alterados, nos quais a existência de duas estruturas planares, desfavoráveis à estabilidade, condiciona o deslocamento de um prisma ao longo do eixo de intersecção destes planos.

2.1.1 Influência da chuva na deflagração dos movimentos de massa

Movimentos de encostas são gerados, muitas vezes, por uma quantidade excessiva de água, geralmente devida a fortes precipitações ou mesmo por chuvas de média ou baixa intensidade precipitadas em solos já saturados ou quase saturados. Estas resultam em uma maior quantidade de águas subterrâneas, saturação, aumento temporário da poropressão no solo e diminuição da tensão efetiva. Ou seja, a principal ação da chuva, na instabilidade das encostas, é o agente deflagrador dos deslizamentos.

Há dois tipos de abordagens relacionadas às características da precipitação e da recarga associadas a escorregamentos. A primeira relaciona os escorregamentos à umidade antecedente, ocasionada por prolongados períodos de intensas precipitações. A segunda relaciona curtos períodos de precipitação, extremamente intensas, demonstrando a importância da relação entre as características do evento de precipitação com as características topográficas e pedológicas que deflagram os escorregamentos. Apesar dos diversos estudos a partir das duas abordagens, a relação entre as características da precipitação (duração e volume) e a deflagração dos escorregamentos ainda não é clara (Dhakal & Sidle, 2004).

Os índices pluviométricos críticos para a deflagração dos movimentos de massa variam com o regime de infiltração do solo, a dinâmica das águas subterrâneas no maciço e o tipo de instabilização. Os escorregamentos em rocha tendem a ser mais suscetíveis a chuvas

concentradas, enquanto os processos em solo dependem também dos índices pluviométricos acumulados nos dias anteriores (Gusmão Filho, 1990).

As precipitações contribuem diretamente para as instabilizações de encosta, em decorrência do aumento do nível de água e da geração de forças de percolação; do preenchimento temporário de fendas e/ou estruturas em solos saprolíticos (argila/silte) e rochas com geração de pressões hidrostáticas e da formação de frentes de saturação, sem a elevação ou formação de nível d'água (solos não saturados), reduzindo a resistência dos solos pela perda da coesão (Lima, 2002).

2.1.2 Interferência da ação antrópica na deflagração dos movimentos de massa

Em terrenos que apresentam uma predisposição natural ao deslizamento, as alterações causadas pelo homem (ex: mudança no relevo, retirada da vegetação, mudança da drenagem etc.) quando somadas à presença da chuva, aumentam a suscetibilidade aos movimentos de massa.

A ação do homem, nas áreas de morros e encostas, é um grande indutor de escorregamentos, que podem ser agravados com a ação da precipitação. Em comunidades instaladas em tais terrenos, a remoção da cobertura vegetal, o lançamento e concentração de águas servidas e a presença de fossas contribuem para o agravamento da situação. A modificação das condições naturais do terreno é observada, nos cortes e aterros, para construção de casas realizada de forma irregular, além do lançamento de lixo.

Santos (2012) afirma que os escorregamentos relacionados a algum tipo de interferência humana precisam de um nível de intensidade pluviométrica muito menor para sua ocorrência, quando comparada àquela necessária ao desencadeamento de escorregamentos em terrenos nas condições naturais. A ação antrópica desordenada aumenta a suscetibilidade e os deslizamentos ocorrerão para um deflagrador de menor intensidade.

Entretanto, é importante observar que ações humanas ligadas à prevenção e remediação, com ações de forma ordenada, são importantes para evitar ou mitigar os possíveis danos causados.

2.2 ANÁLISE DE RISCO DE DESLIZAMENTO

Os deslizamentos de terra são influenciados pela ação antrópica, inclinação do terreno e, também, pela quantidade de água superficial e subterrânea coletadas pela área que drena até o ponto suscetível, ou seja, a bacia de contribuição que vai dos talvegues até o ponto onde ocorre a ruptura. A influência hídrica inserida no processo é importante, pois quanto maior a quantidade de água, mais profundo será o estrato do solo a ser fluidizado. A variável mais importante destacada por Amorim (2012) é a espessura da camada de solo. Segundo o autor, só ocorrerão deslizamentos onde o substrato rochoso é bastante profundo.

Os mapas temáticos de risco podem representar métodos qualitativos ou quantitativos, como apresentado por Aleotti & Chowdhury (1999). Em geral, os métodos qualitativos são baseados no julgamento do profissional (ou equipe) que está realizando a avaliação. São métodos muito subjetivos e exigem amplo conhecimento do assunto por parte do profissional que irá realizar o levantamento em campo. Nestes métodos qualitativos, a análise, a avaliação e o zoneamento de risco são realizados diretamente no campo, com base em sua experiência de outras situações similares. Isto permite avaliação de uma dada área, cada lote individualmente, levando em consideração um grande número de fatores predisponentes. Pode ser utilizada em variadas escalas e adaptada aos atributos específicos de cada região (Rodrigues, 2013).

Ainda segundo Rodrigues (2013), a análise quantitativa é baseada em levantamentos de dados quantitativos e dos processos que atuam na região, permitindo uma melhor análise numérica representativa da área. Tal método deve ser capaz de classificar o respectivo grau de risco em que a área analisada se encontra. Dentre os métodos quantitativos, pode-se citar a análise estatística (ex: bivariante ou multivariada), a avaliação geológico geotécnica (ex: determinística ou probabilística), e a análise por rede neural.

A análise do risco depende de dois condicionantes essenciais: a suscetibilidade e a vulnerabilidade. A suscetibilidade indica a potencialidade de ocorrência de processos destrutivos em uma dada área. Ou seja, expressa a propensão do meio físico para a ocorrência do processo. Já a vulnerabilidade é descrita como indicador do grau de perdas sociais (mortes), econômicas (prejuízos financeiros) e ecológicos (danos ambientais) para um dado elemento, grupo ou comunidade, na área passível de ser afetada pelo processo destrutivo (Silva, 2016).

De acordo com CPRM (2012), o risco é uma medida da ameaça e das consequências que um evento poderá causar num dado intervalo de tempo. O risco pode ser diferenciado ou classificado de diferentes formas ou graus, como categorizados, de forma qualitativa, no

Quadro 3. A Carta de Riscos serve para delimitar, em uma área, as zonas expostas a um determinado risco. Esta define os diferentes graus de risco e as medidas a adotar relacionadas com cada um deles.

Entretanto, é importante frisar que a análise de risco quantifica a possibilidade de ocorrência de um evento e as consequências sócio-econômicas adversas causadas pelo mesmo. Dessa forma, o risco é a possibilidade em relação às consequências; e a suscetibilidade, apenas, a possibilidade de tal ocorrência. No Quadro 3 apresentado, o autor não relaciona a avaliação das ocorrências às possíveis perdas econômicas e humanas.

Quadro 3 - Graus de riscos de deslizamento

Graus de Risco	Descrição
R1 Baixo	Não há indícios de desenvolvimento de processos destrutivos em encostas e margens de drenagens. Mantidas as condições existentes, não se espera a ocorrência de eventos destrutivos.
R2 Médio	Observa-se a presença de alguma(s) evidência(s) de instabilidade (encostas e margens de drenagens), porém incipiente(s). Mantidas as condições existentes, é reduzida a possibilidade de ocorrência de eventos destrutivos, durante episódios de chuvas intensas e prolongadas.
R3 Alto	Observa-se a presença de significativa(s) evidência(s) de instabilidade (trincas no solo, degraus de abatimento em taludes etc.). Mantidas as condições existentes, é perfeitamente possível a ocorrência de eventos destrutivos, durante episódios de chuvas intensas e prolongadas.
R4 Muito Alto	As evidências de instabilidade são expressivas e estão presentes em grande número e/ou magnitude. Mantidas as condições existentes, é muito provável a ocorrência de eventos destrutivos, durante episódios de chuvas intensas e prolongadas. Exemplos de evidências comuns são: trincas no solo, degraus de abatimento em taludes, trincas em moradias ou em muros de contenção, árvores ou postes inclinados, cicatrizes de escorregamento, feições erosivas, proximidade da moradia em relação ao córrego etc.

Fonte: CPRM, 2012.

2.3 GESTÃO DE RISCOS DE DESLIZAMENTO NO BRASIL

Um sistema de alerta, uma das ferramentas da gestão de risco, deve prover as bases técnicas e estratégias necessárias para reduzir os impactos causados pelos desastres e criar ações, em todos os níveis de governo e nas organizações sociais, servindo de fonte de informação. Para tal, são necessárias ações relacionadas a monitoramento, sistema de alerta e análise de risco (mapas de vulnerabilidade de áreas de risco), divulgação de informações e de apoio à tomada de decisões.

No Brasil, em todas as esferas (federal, estadual e municipal) são realizados estudos e colocados em prática projetos destinados à mitigação e prevenção de deslizamentos.

2.3.1 Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais –CEMADEN

O Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais – CEMADEN, criado em 2011 e vinculado ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, emite alertas para o Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres – CENAD, auxiliando o Sistema Nacional de Defesa Civil.

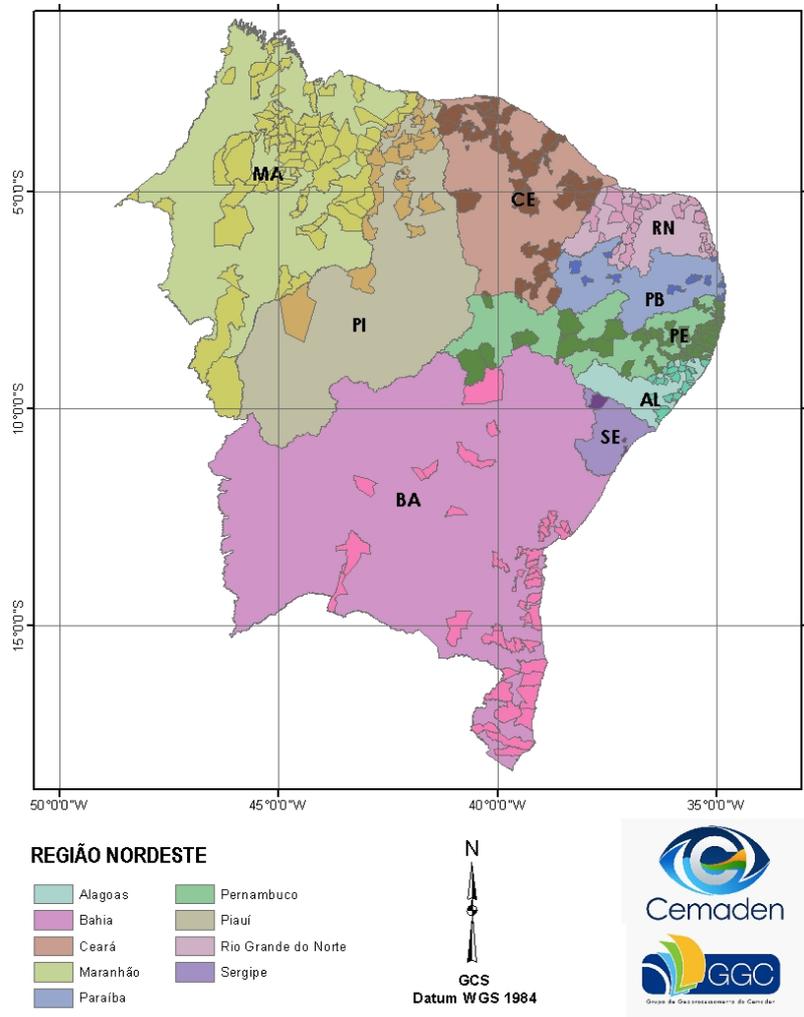
O CEMADEN tem como objetivo principal desenvolver atividades de pesquisa científica, tecnológica e de inovação na área de meteorologia, recursos hídricos, geologia e desastres naturais. Estas atividades têm ênfase na previsão, preparação, prevenção e mitigação do impacto de eventos extremos, em bacias hidrográficas urbanas e rurais, com reduzido tempo de resposta. Tais ações visam reduzir as perdas em termos de vidas humanas, bens materiais e meio ambiente, como decorrência desses eventos.

Atualmente, o CEMADEN monitora 795 municípios nas regiões Sul, Sudeste, Centro Oeste, Norte e Nordeste, sendo 50 deles no estado de Pernambuco, como apresentado na Figura 1. Dentre os municípios pernambucanos, podem ser citados Barreiros, Garanhuns, Caruaru e Recife.

Nas pesquisas ligadas aos desastres naturais, o CEMADEN vem desenvolvendo estudos de ocupação do espaço urbano. Em particular, são estudadas estratégias que permitam mitigar o impacto das enxurradas e escorregamentos de massa. Também são estudadas metodologias para avaliar o evento, no momento de emitir o alerta ou estudar o impacto. Estas estratégias e métodos visam propor recomendações que minimizem os efeitos dos desastres sobre a população atingida, se o alerta vier a se confirmar. Também há trabalhos sobre ambientes

computacionais para análise de risco e emissão de alertas, através da integração de dados de observação, modelos e mapas de risco, entre outros (CEMADEN, 2014).

Figura 1 - Estados do Nordeste Monitorados pelo CEMADEN



Fonte: CEMADEN, 2014.

O CEMADEN trabalha, em parceria, com outros órgãos, entre eles o Serviço Geológico do Brasil – SGB/CPRM, a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico - ANA e a Agência Pernambucanas de Águas e Clima - APAC. Isto permite que as informações levantadas pela setorização de riscos sejam disponibilizadas para as áreas identificadas como de “alto” e “muito alto” risco a deslizamentos e enchentes, para que seja possível emitir alertas, prevenindo as comunidades sobre a forte possibilidade da ocorrência de desastres.

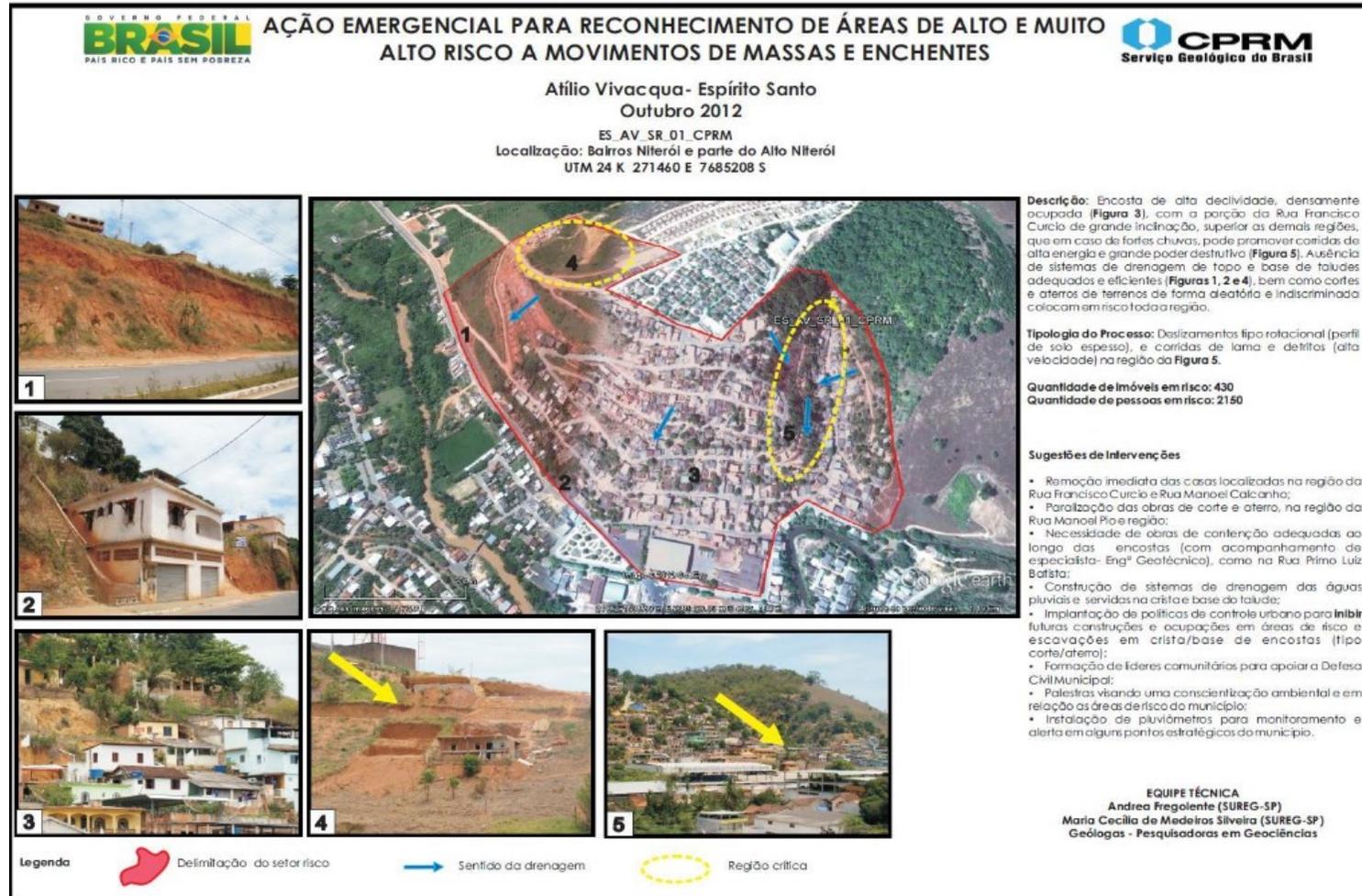
2.3.2 Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM) - Plano de Gestão de Riscos

O Serviço Geológico do Brasil – SGB/CPRM está inserido no Programa Nacional de Gestão de Riscos e Resposta a Desastres do Ministério de Minas e Energia. Em razão do histórico de ocorrência de acidentes resultantes dos processos naturais, somados às intervenções antrópicas no meio ambiente, o SGB/CPRM criou programas e projetos direcionados à análise de riscos de deslizamento. Dentre eles, podem ser destacadas as Cartas de Suscetibilidade a Movimentos Gravitacionais de Massa e Inundações; a Setorização de Riscos Geológicos; a Seleção de Municípios Críticos a Deslizamentos.

De acordo com Santos (2012), foram levantados pela CPRM os municípios brasileiros com maiores possibilidades de ocorrência de acidentes associados a enchentes, deslizamentos e enxurradas, no ano de 2012. Estas ações são parte das providências do Governo Federal para formulação e implementação do Plano de Gestão de Riscos. Foram selecionados 800 municípios, tendo 286 com registros de situações de alto e muito alto risco.

As informações levantadas pela setorização de riscos têm por objetivo indicar para o CEMADEN as áreas identificadas como de alto e muito alto risco a deslizamentos e enchentes, para que o mesmo possa emitir alertas, prevenindo as comunidades da forte possibilidade da ocorrência de desastres (Figura 2). A carta de suscetibilidade a movimento de massa e inundações objetiva disponibilizar aos gestores municipais, estaduais e federais informações para o planejamento adequado da expansão urbana, indicando as áreas inaptas e as adequadas à urbanização. Assim, esses produtos visam evitar o aumento das áreas de riscos nesses municípios, que apresentam suscetibilidade muito alta, alta e média, em relação a movimentos de massa, enchentes e inundações de grande volume (CPRM, 2013).

Figura 2. Prancha com a setorização de riscos e descrição dos processos.



Fonte: CPRM, 2013.

Dentre as ações sociais encontra-se a Cartilha "Comunidade Mais Segura: Mudando Hábitos e Reduzindo Riscos de Movimentos de Massa e Inundações". Ela trata de educação ambiental e desastres (naturais e induzidos), abrangendo principalmente escorregamentos e inundações. A cartilha apresenta, de forma didática, o que provoca e como ocorrem os movimentos de massa e as práticas comuns que condicionam as rupturas e os acidentes. O objetivo é informar a população e diminuir a vulnerabilidade das comunidades, por meio do conhecimento dos processos desencadeadores dos eventos (CPRM, 2017).

2.3.3 Plano Municipal de Redução de Riscos (PMRR) em assentamentos precários do município de Recife-PE e outros programas

A Prefeitura do Recife, através da Coordenadoria de Defesa Civil do Recife (Sedec/CODECIR), elaborou o seu "Plano municipal de redução de riscos em assentamentos precários do município do Recife - PE". O plano é um modelo de gestão de risco, contendo mapeamentos de risco e soluções estruturais (a exemplo da construção de muros de arrimo) e não estruturais para estas áreas. De acordo com dados deste relatório, elaborado em 2006, 469.332 pessoas moravam em áreas de morro, sendo que 10.347 estavam em áreas ameaçadas a desabamentos, ou seja, em edificações localizadas em setores de risco alto e muito alto (Gomes et al., 2017).

Segundo Rocha & Schuler (2016), o plano mapeou os riscos em assentamentos precários. Foram avaliados: 1) Tipos de riscos considerados (escorregamentos e inundações); 2) Delimitação dos setores de risco; 3) Avaliação do nível de probabilidade (perigo); 4) Grau de probabilidade para riscos de escorregamentos; e 5) Avaliação das consequências potenciais.

Outros dois programas também foram implementados na cidade, com objetivos específicos e escopos distintos:

- a) **Programa Viva o Morro:** baseado na ação conjunta do Estado de Pernambuco com os municípios, implementado até 2004. Tinha como prioridades: 1) Recuperar áreas suscetíveis à ocorrência de acidentes; 2) Corrigir situações de risco com obras de estabilização de encosta; 3) Instalar um processo de estruturação urbana das áreas de morro ocupadas com assentamentos precários (CONDERM, 2004).
- b) **Programa Guarda-chuva:** coordenado pela CODECIR, foi implementado em 2003, para controle dos riscos de deslizamentos e alagamentos. Eram realizados mapeamentos das áreas, monitoramentos, vistorias e colocação de lonas plásticas.

2.4 ESTUDOS SOBRE DESLIZAMENTOS NO ESTADO DE PERNAMBUCO E RMR

A possibilidade de ocorrência de acidentes, nas áreas de encosta, depende de um conjunto de fatores geotécnicos, climáticos e antrópicos. A maior parte das abordagens existentes sobre os deslizamentos, frequentemente, está ligada a análises geológicas e geotécnicas, sendo necessária uma maior contribuição através da visão hidrológica dos processos.

A drenagem nos morros, quando existe, poucas vezes é bem dimensionada para a vazão gerada por grandes precipitações. Na maioria das áreas, as águas pluviais e servidas escoam livremente, infiltrando-se e/ou percolando pelas encostas e provocando erosão. Em outras situações, as águas servidas são lançadas nas redes de coletas de águas pluviais que, muitas vezes, não suportam a vazão.

A invasão acelerada das encostas do Recife e Região Metropolitana, sem o devido planejamento, sem suporte técnico nem avaliação dos riscos, coloca a população em uma constante situação de alerta, principalmente nos períodos chuvosos. Tal situação é consequência da ocupação desordenada e desestruturada, que corrobora para o crescimento do número de acidentes, com vítimas, causados pelos deslizamentos (Lima, 2002).

Rocha & Schuler (2016) avaliaram a dinâmica da expansão urbana nos setores de risco de movimentos de massa nas microrregiões do Jordão e Ibura, inseridas no município de Recife. A ênfase foi dada na análise espaço-temporal do mapeamento de suscetibilidade de movimentos de massa, utilizando modelagem espacial multicritério, baseada na análise qualitativa do Processo Analítico Hierárquico (AHP). Foram utilizadas ortofotocartas para obter informações sobre a dinâmica do uso e cobertura do solo, para a série multitemporal de 1975, 1986, 2007 e 2013. O estudo mostrou que as áreas com suscetibilidade baixa obtiveram redução de abrangência territorial de 4,42%; áreas com suscetibilidade média, um acréscimo de 0,57% e áreas com suscetibilidade alta, uma elevação de 3,84%.

Fernandes (2014) analisou a estabilidade da Encosta do Alto do Padre Cícero, no município de Camaragibe (PE) e buscou determinar uma precipitação, ou padrão de precipitação, que provocasse instabilidade. O solo existente, na encosta em questão, foi caracterizado, do ponto de vista hidráulico, para suprir uma lacuna existente nos trabalhos anteriores. Os resultados mostraram que as instabilidades criadas pelas precipitações resultam do efeito acumulado das chuvas de 3 ou 4 meses antecedentes, combinados com chuvas pontuais, seguindo a mesma linha de análise dos estudos realizados por Gusmão Filho (1997), nas encostas de Olinda.

Bandeira (2010) buscou melhorar o gerenciamento de áreas de risco da RMR por meio de: entendimento dos mecanismos dos principais processos atuantes nas encostas (erosão e escorregamento); estudo dos materiais (sedimentos das fácies da Formação Barreiras e os solos residuais de granito e de milonito); da chuva crítica que deflagra processos nas áreas de risco. Os resultados permitiram compreender a influência dos materiais presentes nas encostas, a identificação da chuva crítica e, também, subsidiar os gestores de defesas civis, para ações não estruturais de redução de riscos.

Através do levantamento das informações para a construção da base de dados dos deslizamentos, ainda de acordo com Bandeira (2010), verificou-se que a maioria das ocorrências foi registrada em Lagoa Encantada. O trabalho também mostrou que, na Regional Sul da RMR, 69% de instabilidade de encostas foram registradas com chuva acumulada maiores que 60mm em 72h. Com este acumulado, registrou-se 75% das ocorrências dos deslizamentos de Lagoa Encantada. Este trabalho sugere que o índice de chuva acumulada citado poderia ser considerado como crítico para a zona sul do Recife, dentro das condições do estudo.

Pfaltzgraff (2007) objetivou diminuir os custos da elaboração de mapas de suscetibilidade a deslizamentos, utilizando ferramentas de geoprocessamento e sensoriamento remoto, tais como: imagens de radar e de satélite, além de outras informações sobre o meio físico, disponíveis gratuitamente na Internet. Utilizando o método da álgebra de mapas (superposição de diversos temas), foi possível gerar o mapa de suscetibilidade a deslizamentos. Segundo o autor, este mapa é bastante confiável, quando comparado com o produzido por Alheiros (1998), que utilizou métodos analíticos, e os mapeamentos de áreas de risco existentes. A maior das restrições diz respeito à escala utilizada (1: 100.000), abordando a sua utilização no planejamento territorial. Logo, não é recomendado para situações que precisam de mapas de maior escala, como é o caso da determinação das áreas de risco.

Bandeira (2003) estudou as características físicas e ambientais do município de Camaragibe (PE), para avaliação do potencial de risco de erosão e escorregamento das encostas com ocupações precárias. O método utilizado consistia em ir a campo e definir, através de formulário, o risco de cada lote. A conclusão mostra que o município apresenta cerca de 62ha de área de risco alto a muito alto (21% dos setores de encostas avaliados), 116ha de área com risco médio (40%) e 115ha de área com risco baixo (39%). Nos setores constituídos por sedimentos da Formação Barreiras, verificou-se que o fator predominante de risco é o geológico. Nos setores constituídos pelo solo residual, as ações antrópicas, expressas no fator ambiental, são as mais importante para a deflagração dos escorregamentos.

Lima (2002) caracterizou o comportamento geomecânico dos solos e analisou a estabilidade de uma encosta, no Alto do reservatório em Nova Descoberta, também em Recife. Foram realizadas sondagens de simples reconhecimento com determinação da resistência dinâmica, coleta de amostras indeformadas, determinação da condutividade hidráulica e monitoramento dos deslocamentos horizontais. O método consistiu em análise de estabilidade de taludes, a partir de parâmetros de resistência do solo e modelos de equilíbrio limite (escala local).

O trabalho concluiu que o acréscimo do teor de umidade causa a redução da coesão, enquanto o ângulo de atrito é pouco influenciado. A superfície potencial de deslizamento, no período de chuvas intensas, é mais superficial, alcançando uma profundidade máxima de 6m e um fator de segurança de aproximadamente 1,0 (iminência de ruptura); no verão, a superfície potencial de deslizamento é mais profunda, com profundidade de 9m e fator de segurança próximo de 2,0 (considerado estável).

2.5 VEGETAÇÃO E DESLIZAMENTOS

Segundo Souza et al. (2015), a remoção da vegetação original e a ocupação urbana tendem a tornar mais frágil o equilíbrio, naturalmente precário, do solo das regiões íngremes, principalmente na época das chuvas, fazendo com que os deslizamentos passem a ser cada vez mais frequentes. A presença ou ausência de vegetação, nas encostas, tem um efeito profundo nos mecanismos que iniciam o deslizamento baseados na precipitação, pois os solos superficiais, nessas áreas, estão expostos ao impacto total da precipitação e do escoamento.

Guoa et al. (2019) citam que a raiz tem papel de liderança no deslizamento, pois há um aumento do teor de umidade no solo raso, através da zona radicular, criando caminhos preferenciais de fluxo de infiltração. A profundidade e a intensidade da erosão aumentam, linearmente, com o aumento da profundidade da raiz principal, indicando que a profundidade da raiz da vegetação determina a intensidade da erosão durante a chuva prolongada.

A ação antrópica para mudança da paisagem natural elimina a vegetação nativa, cobertura natural da encosta, e a substitui muitas vezes por plantas com raízes inadequadas para conter os movimentos de massa. Tais mudanças podem acelerar o deslizamento e/ou torná-lo mais acentuado.

As características da vegetação para conter os deslizamentos devem ser sempre associadas ao tipo de solo, pois segundo Guoa et al. (2019), a profundidade das raízes, a

porosidade do solo e a capacidade de retenção de água promovem erosão, enquanto a densidade seca e a resistência ao cisalhamento inibem esse processo.

A ação do homem, nas áreas de morros e encostas, é um grande indutor de escorregamentos, que podem ser agravados com a ação da precipitação. Em comunidades instaladas em tais terrenos, a remoção da cobertura vegetal, o lançamento inadequado e concentração de águas servidas, além da presença de fossas contribuem para o agravamento da situação. A modificação das condições naturais do terreno é observada nos cortes e aterros, para construção de casas realizada de forma irregular, além do lançamento de lixo.

A vegetação tem sido associada a fatores benéficos e adversos para a estabilidade de taludes. Os principais fatores benéficos são representados pela diminuição da infiltração de água, que protege o solo do poder erosivo da chuva direta; a redução da progressão da erosão em ravinas e barrancos; o entrelaçamento das raízes da vegetação, com o consequente aumento da resistência do solo. A erosão costuma ser um problema anterior, que pode ser agravado por chuvas contínuas ou sazonais e pode causar o aumento da suscetibilidade a deslizamentos. Na direção oposta, os fatores adversos mais frequentes são o aumento da espessura da raiz, que insere tensões adicionais no solo, devido ao efeito cunha, e o momento criado nas raízes pelos ventos que atuam nas copas das árvores. Ambos os fatores são aumentados na medida que as plantas se tornam maiores.

A aparente coesão proporcionada pela rede radicular é um forte fator para a estabilidade das áreas, uma vez que o reforço radicular é de grande importância em relação aos demais fatores, que também podem exercer influência, durante eventos de chuva extrema (McGuire et al., 2016).

Para proteger o solo exposto, muitas vezes, em ações preventivas, o solo é coberto por lonas instaladas pela Defesa Civil, buscando minimizar os danos provocados pela retirada da vegetação nativa. Para tentar diminuir a erosão causada pelas fortes chuvas, sugere-se a restauração da vegetação com espécies adequadas: plantas que possuam raízes capazes de conter o solo e diminuir a erosão hídrica. Um estudo deve ser realizado para identificação da vegetação mais adequada para o local e tipo de solo, pois de acordo com Guoa et al. (2019), há uma forte correlação entre a erosão e as características do solo (densidade seca, capacidade de retenção de água, porosidade, resistência ao cisalhamento e condutividade hidráulica saturada), principalmente em condição de precipitação contínua.

2.6 MODELOS COMPUTACIONAIS PARA ANÁLISE DE DESLIZAMENTO

Existem modelos computacionais, tais como o *Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Model* - TRIGRS (USGS, 2009), o *Shallow Landslide Stability Model* - SHALSTAB (Dietrich & Montgomery, 1998) e o *Stability INdex MAPping* - SINMAP (Pack et al., 2005), que permitem avaliar a propensão para deslizamento devido a eventos de chuva e características do solo. Entretanto, poucos apresentam a característica de software livre (programas gratuitos e de código aberto), para acesso amplo à comunidade e órgãos gestores, interessados em estudar áreas suscetíveis a deslizamentos. Essa é uma condição importante para uso na gestão pública, pela necessidade de constante atualização imposta pelos desenvolvedores dos programas corporativos e a criação de dependência com o software. Além disso, naturalmente há a questão dos custos.

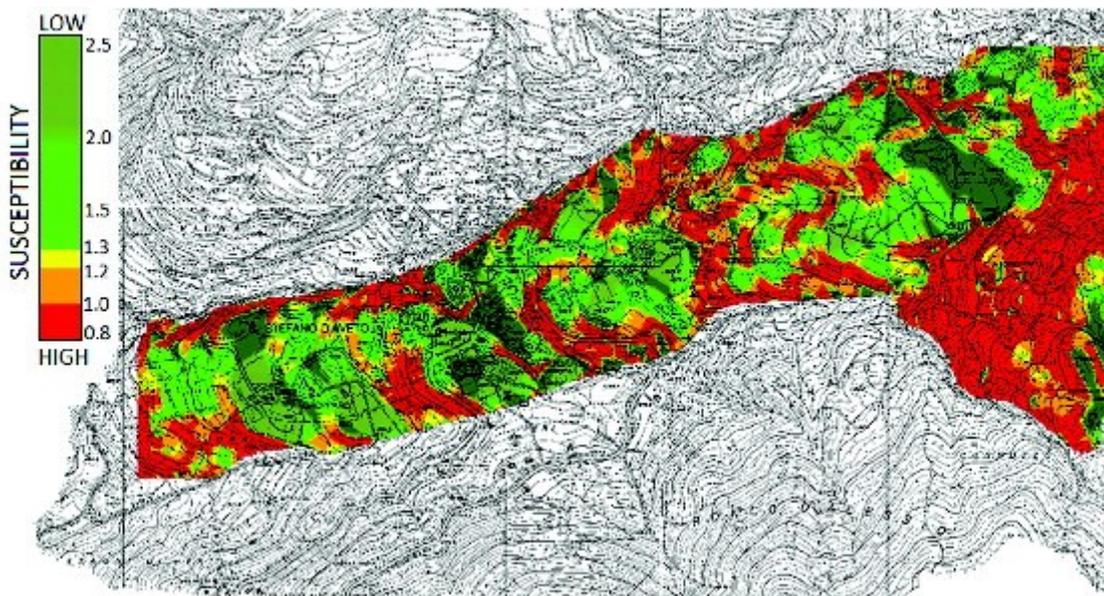
Os principais limites dos modelos de base física residem no fato de que eles são, frequentemente, otimizados para pequenas bacias hidrográficas e condições locais, pois usam equações constitutivas que representam os mecanismos de ruptura envolvidos e dependem de um grande número de parâmetros que devem ser conhecidos, em toda a extensão do território a ser avaliado. Ou seja, requerem conhecimento, em profundidade, do solo local e parâmetros climatológicos. Métodos empíricos são baseados, principalmente, na estimativa de limiares relacionados com padrões de precipitação, que resultam na ocorrência de deslizamentos de terra (Bosco & Sander, 2014).

O *Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Model* – TRIGRS é um programa desenvolvido em linguagem Fortran projetado para modelar no tempo a distribuição de deslizamentos superficiais, induzidos por precipitação pluviométrica. O programa calcula as mudanças transitórias da pressão dos poros e as mudanças no fator de segurança devido à infiltração de precipitação. O TRIGRS usa um modelo de talude infinito simples, para calcular fator de segurança por célula. Uma fórmula aproximada para o estresse efetivo, em materiais não saturados, auxilia a computação do fator de segurança em solos insaturados. A heterogeneidade horizontal é contabilizada ao permitir que as propriedades do material, a precipitação e outros valores de entrada variem, de célula para célula. Este programa de linha de comando é usado, em conjunto com o programa do Sistema de Informação Geográfica (SIG), para preparar grades de entrada e visualizar os resultados do modelo (USGS, 2009).

O *Geographic Resources Analysis Support System* – GRASS (Grohmann, 2008) é um SIG livre, de código aberto, que permite avaliar a propensão para deslizamento, devido a eventos de chuva. O modelo analisa a estabilidade de taludes generalizada, através de um método de equilíbrio global realizado célula por célula, levando em conta parâmetros que variam em sentidos vertical e horizontal.

Além disso, os históricos de chuva e a condição de umidade do solo antecedente são levados em conta. Para cada célula unitária é feito um balanço hídrico, com base no método de Curva Número - CN modificado (*Soil Conservation Service, 1972*), a fim de calcular a evolução do nível da água subterrânea, como resultado de precipitação. Em seguida, verifica-se a superação, ou não, das condições de limite de equilíbrio dos solos soltos, apresentando mapa 3D como resposta (Grohmann, 2008). Federici et al. (2015) utilizaram o GRASS, em um extenso fenômeno cinemático, em torno da cidade de *Santo Stefano d'Aveto* (Ligúria, Itália), como mostrado na Figura 3. As cores vermelha e verde-clara indicam suscetibilidade alta ($F_s < 1$) e baixa ($F_s > 1,3$), respectivamente.

Figura 3 - Mapa de suscetibilidade ao deslizamento de terra em relação à precipitação ocorrida em novembro de 2007 em *Santo Stefano d'Aveto* - Itália.

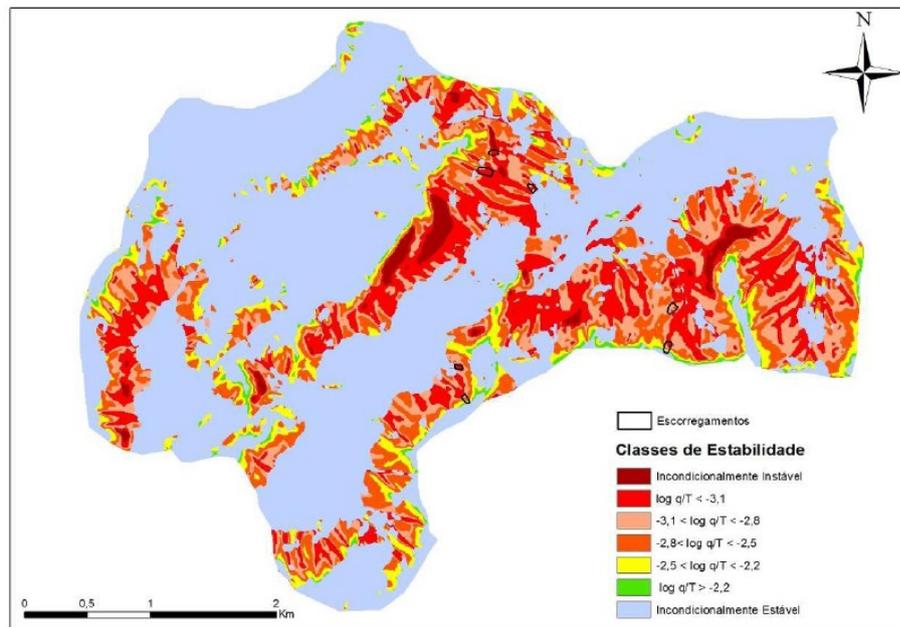


Fonte: Federici *et al.*, 2015.

O *Shallow Landslide Stability Model* – SHALSTAB é um software livre que calcula a suscetibilidade a escorregamentos rasos, considerando parâmetros topográficos e do solo. Vem sendo amplamente utilizado pela comunidade científica, em regiões de clima temperado. Este método combina um modelo hidrológico com um de estabilidade de encosta, para calcular a

quantidade de chuva necessária para romper o estado de equilíbrio da encosta. O modelo de estabilidade de encosta utilizado pelo SHALSTAB tem, como base, a teoria do talude infinito, que considera o plano de escorregamento retilíneo (Guimarães et al., 2009). A Figura 4 apresenta o mapa de estabilidade da Bacia do Rio Cunha (Santa Catarina) estudado por Michel et al. (2014).

Figura 4. Mapa de Estabilidade da Bacia do Rio Cunha - SC (SHALSTAB).

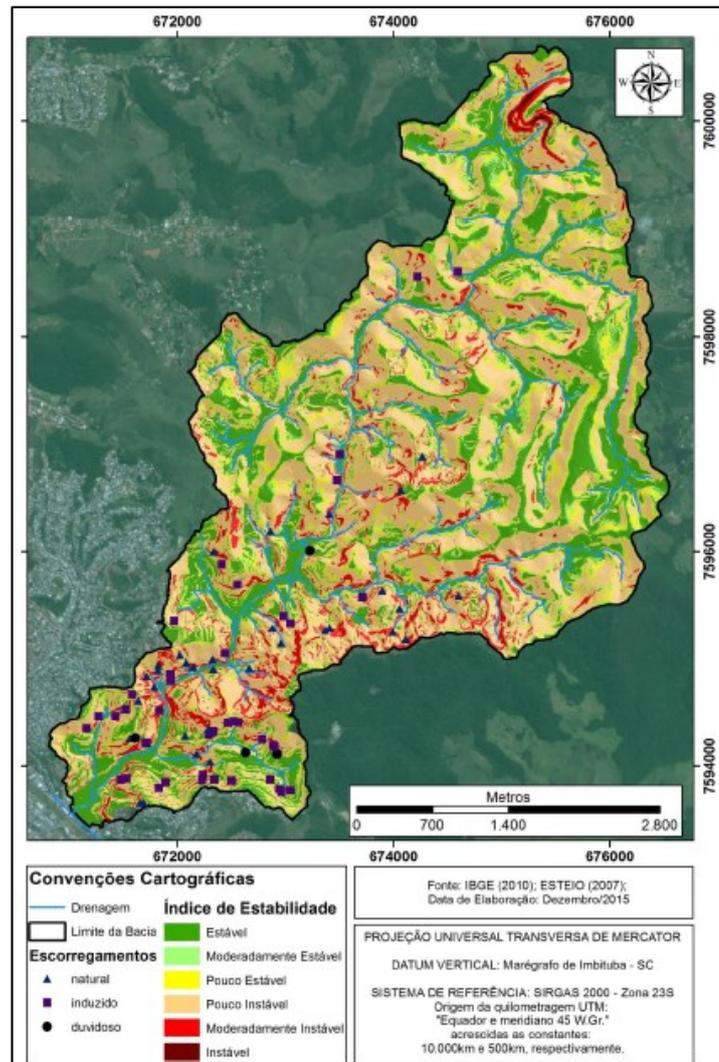


Fonte: Michel et al., 2014.

O *Stability Index Mapping* – SINMAP é um modelo matemático determinístico, configurado e manipulável em ambiente SIG, que viabiliza a classificação de áreas suscetíveis a escorregamentos translacionais rasos. Está relacionado a fatores hidrológicos e a fatores relacionados à fragilidade do solo, tendo como parâmetros de entrada a precipitação, o tipo de solo e o relevo. Sua concepção teórica é aplicável a regiões que experimentam escorregamentos translacionais controlados pela convergência de fluxo de águas subterrâneas rasas (*landsliding*).

A precisão dos resultados do programa é, fortemente, dependente da precisão da entrada de dados modelo digital do terreno (MDT). A saída principal desta abordagem de modelagem é um mapa de índices de estabilidade, valores numéricos que são usados para classificar ou categorizar a estabilidade do terreno, em cada local da área de estudo (Pack et al., 2005). A Figura 5 apresenta o mapa de estabilidade de encostas da Bacia do Córrego Yung (Juiz de Fora – MG) estudado por Menon Júnior (2016).

Figura 5. Mapa de Estabilidade de Encostas da Bacia do Córrego Yung – MG (SINMAP)



Fonte: Menon Júnior, 2016.

Dentre os modelos computacionais muito difundidos, os modelos mais atualizados, em consonância com as atuais ferramentas de Geoprocessamento, são o SINMAP e o SHALSTAB. Ambos possuem bom suporte para uso.

Existem diversos trabalhos técnico-científicos utilizando os programas SINMAP e SHALSTAB, para verificar questões relacionadas à estabilidade de encostas. Segundo Michel et al. (2014), os resultados obtidos na simulação de ambos os modelos são satisfatórios para previsão de deslizamentos na bacia estudada. Porém, o índice de sucesso do SINMAP foi maior do que o do SHALSTAB.

Apesar de o SHALSTAB utilizar os mesmos conceitos para a análise de vulnerabilidade, que o SINMAP, a aplicação das equações é realizada de maneira diferente. A calibração dos modelos SHALSTAB e SINMAP é normalmente realizada através da verificação da

coincidência espacial entre as cicatrizes de escorregamento, anteriormente mapeadas, e as áreas designadas instáveis. Quanto maior a coincidência entre o inventário de escorregamentos e a área designada instável pelo modelo, melhor é considerado seu desempenho. Porém, a variação do valor dos parâmetros do modelo, também, gera modificações no total de área classificada como instável e um aumento muito grande desta área leva a resultados que não condizem com a realidade, inviabilizando o seu uso. Portanto, deve-se sempre ponderar a variação dos parâmetros, para que o total de área classificada como instável não tome proporções inconsistentes (Michel et al., 2014).

Segundo Witt (2005), embora o SHALSTAB permita ajustes em certos parâmetros do solo, para combinar melhor as condições existentes, o modelo não fornece limites superiores e inferiores para parâmetros como o SINMAP. A autora comparou as vantagens e desvantagens dos modelos SHALSTAB e SINMAP, concluindo que:

- a) O SINMAP possui como vantagens: uma gama de valores que podem ser inseridos no modelo, permitindo variações nos parâmetros do solo, transmissividade e recarga; pode executar grandes Modelos Digitais do Terreno (MDT), sem apresentar problemas ou causar erros. Como desvantagens: eventuais presenças de erros "*no data*", alterando efetivamente a área calculada pelo modelo.
- b) O SHALSTAB possui como vantagens: Quando executado com os valores padrões, o usuário precisa de pouco conhecimento dos parâmetros reais do solo, ou até deslizamentos mapeados, para produzir um mapa de instabilidade relativa; nenhuma célula de grade é "perdida" no cálculo. Como desvantagens: não permite variedade de valores das características do solo.
- c) Nenhum dos dois modelos leva em consideração a umidade antecedente ou o efeito que a estrutura geológica pode ter na concentração do fluxo de águas subterrâneas.

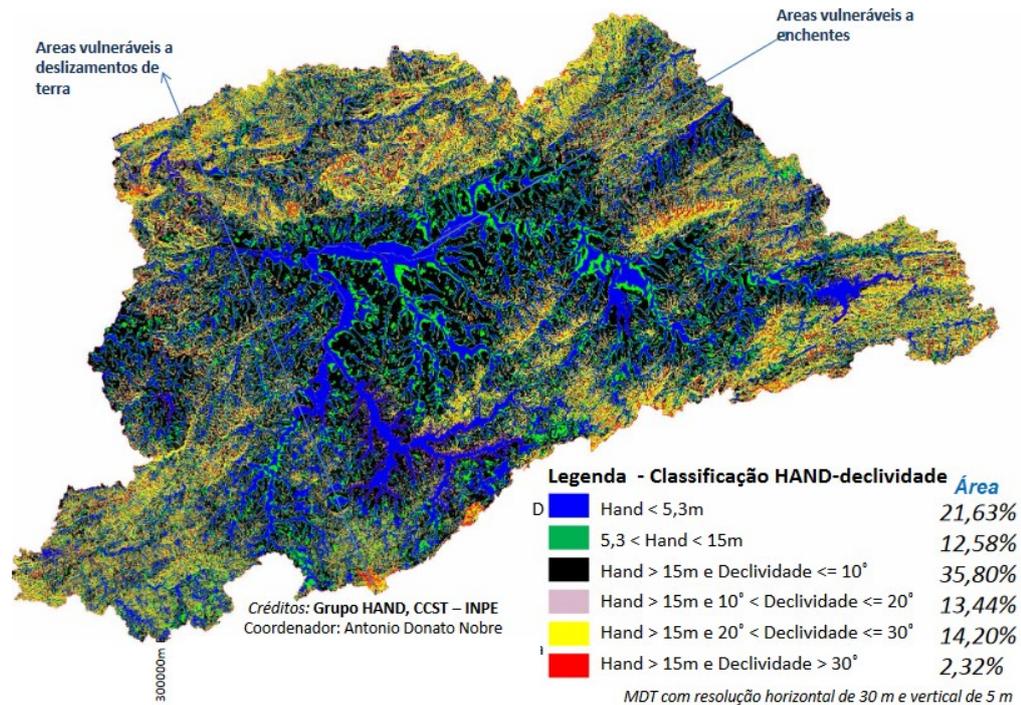
Um modelo desenvolvido no Brasil, utilizado na área de pesquisa em desastres naturais, é o Modelo HAND. Ele foi desenvolvido pelo Grupo de Modelagem de Terrenos do Centro de Ciência do Sistema Terrestre, no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. O Modelo HAND (do inglês *Height Above the Nearest Drainage*, ou Altura Acima da Drenagem mais Próxima) é um novo tipo de superfície, produzida matematicamente a partir da superfície da terra, capturada em maquetes digitais de terreno. O Modelo tem sido empregado em várias áreas, entre elas a delimitação de zonas de risco de enchentes e deslizamentos, gerando mapas de proximidades topográficas ou desníveis relativos a cursos d'água (HAND, 2014).

Pires & Borma (2013) aplicou o Modelo HAND em uma bacia hidrográfica, localizada no ambiente de Cerrado, em uma escala macro e micro, e os resultados foram classificados, de acordo com quatro categorias com significado hidrológico. O modelo foi calibrado com base na rede de drenagem e com as medidas realizadas, no campo de águas subterrâneas. O HAND mostrou-se viável para representar a drenagem da bacia, localizada em ambiente de Cerrado, com a maioria das áreas com altitudes elevadas, em comparação com a hidrografia disponibilizada pela ANA.

INPE (2010) aplicou o Modelo HAND, modelo de paisagem, para identificar as áreas suscetíveis ao risco de enchentes, inundações e deslizamentos. O modelo foi processado a partir de um Modelo Digital do Terreno (MDT) e apresentou, com grande precisão, os contrastes do terreno em termos fisiográficos, ressaltando as localidades potencialmente suscetíveis a esses riscos. Para risco de deslizamento, foram consideradas categorias acima de 30 graus de declividade. A desestabilização das encostas, por processos de escorregamento, está relacionada a episódios de chuva de alta intensidade e volume, geralmente deflagrados por eventos pluviométricos acima de 100mm. O Modelo HAND utilizado para identificação das áreas suscetíveis a inundação e deslizamento, na Região Metropolitana de São Paulo – RMSP, é ilustrado na Figura 6.

Como em qualquer investigação de deslizamento de terra, usando programa de modelagem, os resultados do modelo devem ser comparados com os locais de deslizamento mapeados e, sempre que possível, de preferência, que não foram utilizados para gerar o modelo.

Figura 6 - Modelo HAND utilizado para identificação das áreas suscetíveis a inundação e deslizamento na RMS (HAND).



Fonte: INPE, 2010.

2.7 STABILITY INDEX MAPPING – SINMAP

Além de todas as suas vantagens, o SINMAP se destaca em relação aos outros modelos, por atender à exigência de ser ferramenta de livre acesso e código aberto. Os modelos, em geral, são criados como *plug-ins* para o programa ArcGis. Entretanto, o SINMAP apresenta a opção de ser utilizado na plataforma MapWindow (software SIG de código aberto), utilizado nesta pesquisa.

O SINMAP pode ser obtido a partir do sítio eletrônico da Universidade do Estado de Utah (<http://hydrology.usu.edu/sinmap/>).

2.7.1 Metodologia SINMAP

O programa SINMAP computa e mapeia áreas de instabilidade de inclinação potencial, com base em dados de elevação digital e locais de deslizamento observados. Combina conceitos hidrológicos de estado estacionário e uma análise de estabilidade de talude infinito com um Modelo Digital do Terreno (MDT), para calcular um fator de segurança, isto é, um potencial de instabilidade estimado.

O conjunto de parâmetros ligados ao solo e à precipitação possui uma série de incertezas associadas, relacionadas tanto aos métodos de determinação quanto à variabilidade espacial e necessidade de regionalização dos valores dos parâmetros. As incertezas nos parâmetros de entrada são modelados através de funções de distribuição de probabilidade. Por isso, o modelo trabalha em termos de limites máximos e mínimos para seus parâmetros.

Dessa maneira, o Índice de Estabilidade ou *Stability Index* (“SI”) é definido como a probabilidade de uma região ser estável, assumindo distribuições uniformes de parâmetros, sobre esses intervalos de incerteza. Normalmente, os valores de SI podem variar entre 0 (menos estável) e 1 (mais estável). No entanto, em locais onde se adotam valores de parâmetros mais conservadores (no sentido de favorecer a desestabilização) e, ainda assim, resultar em estabilidade, o SI assumirá valores superiores à unidade, quando considerados os valores médios dos parâmetros (Michel et al., 2014).

O Quadro 4 apresenta as definições das classes de estabilidade, modificado de Pack et al. (2005), apresentado por Menon Júnior (2016).

Quadro 4 - Definições das classes de estabilidade de encostas

Condição	Classe	Estado Prévio	Margem de Parâmetro	Influências possíveis de fatores não modelados	Classes sugeridas
$SI > 1,5$	1	Estável	Margem de instabilidade não modelada	Significantes fatores desestabilizadores são exigidos para a instabilidade	Estável
$1,5 > SI > 1,25$	2	Moderadamente Estável	Margem de instabilidade não modelada	Moderados fatores desestabilizadores são exigidos para a instabilidade	Moderadamente Estável
$1,25 > SI > 1,0$	3	Quase estável	Margem de instabilidade não modelada	Fatores desestabilizadores são exigidos para a instabilidade	Pouco Estável
$1,0 > SI > 0,5$	4	Limiar Inferior	Margem de média pessimista exigida para instabilidade	Fatores desestabilizadores não são exigidos para a instabilidade	Pouco Instável
$0,5 > SI > 0,0$	5	Limiar Superior	Margem de média otimista exigida pela estabilidade	Fatores estabilizadores podem ser responsáveis pela instabilidade	Moderadamente Instável
$0,0 > SI$	6	Instável	Margem de estabilidade não modelada	Fatores de estabilidade são exigidos para a estabilidade	Instável

Fonte: A autora, 2018.

2.7.1.1 Equação de talude infinito

De acordo com Pack et al. (2005), o fator de declive do modelo de estabilidade do talude, relação entre a estabilização de forças desestabilizadora, segundo Hammond et al. (1992), apresenta-se de forma simplificada no modelo (Equação 1):

$$FS = \frac{Cr + Cs + \cos^2 \theta [\rho_s g (D - D_w) + (\rho_s g - \rho_w g) D_w] \tan \varphi}{D \rho_s g \sin \theta \cos \theta} \quad (1)$$

Onde:

C_r é a coesão da raiz (N/m^2);

C_s é a coesão do solo (N/m^2);

θ é o ângulo de inclinação da encosta;

ρ_s é densidade do solo úmido (kg/m^3);

ρ_w é massa específica (kg/m^3);

g é a aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m/s}^2$);

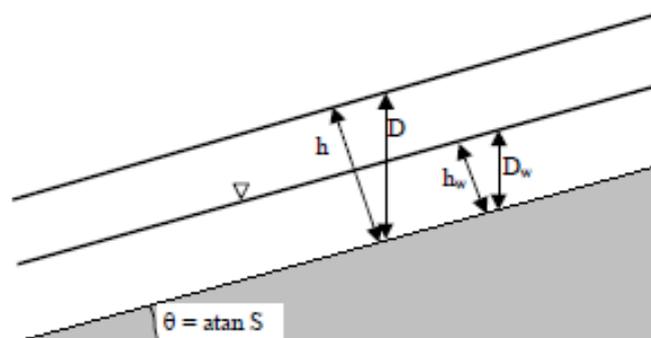
D é a profundidade do solo (m);

D_w é a altura vertical de água dentro da camada de solo (m);

φ é o ângulo de atrito interno do solo;

A Figura 7 apresenta a geometria assumida na Equação 1. No SINMAP, a espessura do solo (h), em metros, é especificada perpendicular à inclinação, em vez de verticalmente para baixo, como a profundidade (D).

Figura 7. Esquema do modelo de estabilidade do talude.



Fonte: Pack et al., 2005.

A abordagem apresentada na Figura 8 interpreta a espessura do solo, perpendicular à inclinação, em vez de profundidade do solo medida na vertical. A variável h (m) é a espessura do solo; D (m) a profundidade do solo; h_w (m) a espessura de solo saturado; D_w (m) a altura vertical de água; e S a inclinação expressa como uma redução decimal, por unidade de distância horizontal. Considerando a Equação 2, onde é feita a relação de h em função de D , tem-se o fator de segurança reduzido à Equação 3:

$$h = D \cos \theta \quad (2)$$

$$FS = \frac{C + \cos \theta [1 - wr] \tan \varphi}{\sin \theta} \quad (3)$$

Onde: C = coesão (N/m^2); θ = ângulo da encosta ($^\circ$); w = umidade relativa; r = razão de densidade; φ = ângulo de atrito do solo.

A umidade relativa define a profundidade relativa da água, no interior da camada de solo, com limite igual a 1. Qualquer valor acima desse máximo é assumido como excesso, para formar escoamento superficial. Considerando a umidade relativa, como apresentado na Equação 4, tem-se:

$$w = \frac{D_w}{D} = \frac{h_w}{h} \quad (4)$$

Onde: w = umidade relativa; D_w = altura vertical da coluna de água no solo (m); D = espessura vertical do solo (m); h_w = espessura da coluna d'água perpendicular ao solo (m); e h = a espessura perpendicular ao solo (m).

A coesão adimensional combinada, relativa à espessura perpendicular do solo, é expressa pela Equação 5:

$$C = \frac{(C_r + C_s)}{(h\rho_s g)} \quad (5)$$

Onde: C = coesão adimensional; C_r = coesão das raízes (N/m^2); C_s = coesão do solo

(N/m²); h = espessura perpendicular do solo (m); ρ_s é densidade do solo úmido (kg/m³); e g = aceleração da gravidade (m/s²).

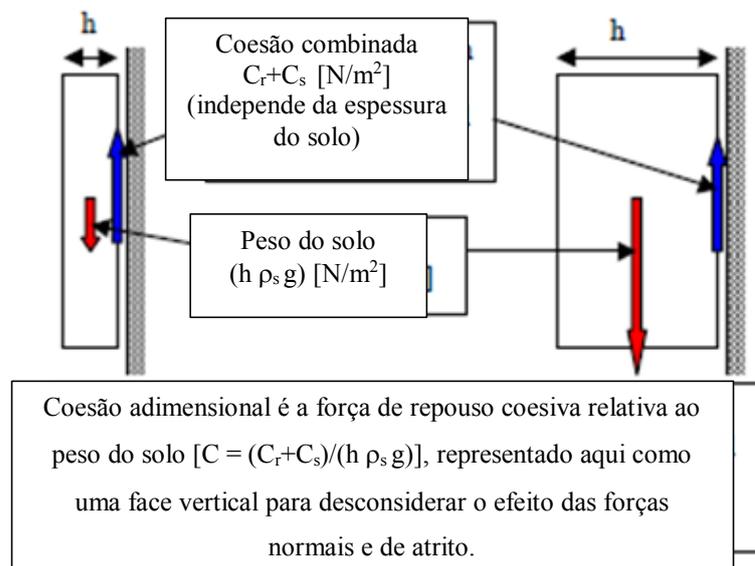
A razão entre a densidade da água e do solo é expressa na Equação 6:

$$r = \frac{\rho_w}{\rho_s} \quad (6)$$

Onde: r = razão de densidade; ρ_w = densidade da água.

Pack et al. (2005) afirmam que a Equação 3 é a forma adimensional do modelo de estabilidade do Talude Infinito. Tal operação mostra-se conveniente, pois a coesão (devido a propriedades do solo das raízes) é combinada com a densidade do solo e da espessura, em um fator de coesão adimensional, C. Portanto, a coesão é assumida como um dado contínuo para tais fatores, independentemente da altura ou da espessura do material (Figura 8).

Figura 8. Conceitos dos fatores de coesão adimensional.



Fonte: Pack et al, 2005.

2.7.1.2 Índice topográfico de umidade

Para entender a função da recarga (R) e transmissividade do solo (T) inseridas na análise realizada pelo programa SINMAP, são necessários alguns conceitos importantes.

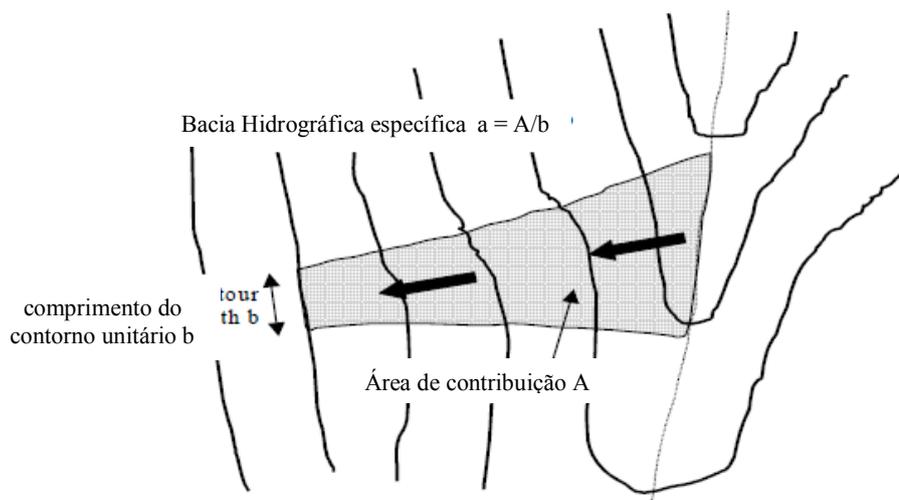
O índice topográfico de umidade descreve o efeito da topografia da região sobre o potencial de um ponto para receber o escoamento superficial. Ele depende da área acima que

pode contribuir com fluxo superficial (área de captação) e também da inclinação. Assim, pontos mais altos vão possuir um baixo índice, enquanto que pontos mais abaixo, com ampla área de captação, vão apresentar um índice bem maior. Este índice é de fácil implementação e emprega princípios físicos simples. Devido às suas características, é utilizado amplamente na modelagem de processos hidrológicos e também para outros fins.

Segundo Pack et al. (2005), a área de captação específica (a) é a área de inclinação (A) por unidade de comprimento de contorno (b), como apresentado na Figura 9. A definição é baseada em observações de campo, mostrando que a maior umidade do solo ou áreas com tendência a uma superfície de saturação tendem a ocorrer em áreas convergentes de fluxo. Baseado no exposto, são feitas as seguintes suposições:

- Fluxo lateral subsuperficial seguindo gradientes topográficos. Ou seja, a área de contribuição (a) para o fluxo, em qualquer ponto, é dada pela área específica da bacia, definida a partir da superfície topográfica;
- A descarga lateral em cada ponto está em equilíbrio com uma recarga de estado constante R (m/h);
- A capacidade de fluxo lateral em cada ponto é dada por “ $T \text{ sen } \theta$ ”, onde T é a transmissividade (m^2/h), ou seja, condutividade hidráulica (m/h) vezes a espessura do solo h (m).

Figura 9. Definição da área específica da bacia.



Fonte: Pack et al., 2005.

Ainda segundo Pack et al. (2005), quando combinadas, as duas primeiras suposições abordadas implicam que na descarga lateral (q) expressa pela Equação 7 em m^2/h :

$$q = R \cdot a \quad (7)$$

Onde: q = descarga lateral; R = recarga em estado constante (m/h) e a = área específica da bacia (m^2/m).

A terceira proposição mostra que a condutividade hidráulica é assumida pelo programa como constante e, portanto, uniforme para todo o perfil do solo, não diminuindo e nem aumentando com a profundidade. Assume-se a condutividade uniforme de um manto de solo, sobre o substrato rochoso relativamente impermeável. Dessa forma, a umidade relativa é apresentada na Equação 8:

$$w = \text{Min} \left(\frac{R a}{T \text{ sen } \theta}, 1 \right) \quad (8)$$

Onde: w = umidade relativa; R = recarga em estado constante (m/h); a = área específica da bacia (m^2/m); θ = ângulo de inclinação da encosta e T = transmissividade do solo (m^2/h). O valor máximo da umidade relativa é 1, pois a umidade excedente se torna escoamento superficial.

A relação R/T , que foi tratada como um único parâmetro, combina o clima e fatores hidrológicos. O valor do seno de (T/R) pode ser pensado como o comprimento de uma vertente plana, não convergente, indispensável para desenvolver a saturação em um período crítico de clima considerado úmido. Assim, este conceito pode ser útil para estabelecer estimativas do valor R/T , durante a identificação, em campo, dos limites de superfície da saturação.

2.7.1.3 Definição do índice de estabilidade

Uma das saídas do programa é o mapa de índices de estabilidade. Para determiná-lo, é necessário incorporar o índice de umidade, definido na Equação 8, ao fator adimensional de segurança, definido na Equação 3. O resultado é a Equação 9, combinada a partir do modelo de estabilidade com o modelo hidrológico proposto por Pack et al. (2005).

$$FS = \frac{C + \cos \theta \left[1 - \min \left(\frac{R}{T} \frac{a}{\text{sen } \theta}, 1 \right) r \right] \tan \varphi}{\text{sen } \theta} \quad (9)$$

As variáveis a e θ são relacionadas à topografia e possuem parâmetros de análise C , $\tan\varphi$, r e R/T . A razão de densidade r é considerada como constante – valor de 0,5. Entretanto, permitem-se incertezas nos outros três parâmetros, durante as especificações dos limites inferiores e superiores. Estes limites definem uma distribuição uniforme, em que esses valores são assumidos para variar aleatoriamente. Sendo $R/T = x$, $\tan\varphi = t$, e a distribuição uniforme com limites inferiores e superiores, como:

$$\begin{aligned} C &\sim U(C_1, C_2) \\ x &\sim U(x_1, x_2) \\ t &\sim U(t_1, t_2) \end{aligned} \quad (10)$$

Os limites inferiores de C e t , ou seja, C_1 e T_1 , juntamente com o limite superior de x , isto é, x_2 , definem o pior caso, cenário mais conservador, levando-se em consideração a incerteza ou variabilidade do parâmetro. Áreas sob este tipo de cenário, quando $FS > 1$, serão incondicionalmente estáveis, sendo FS_{\min} definido na Equação 11:

$$SI = FS_{\min} = \frac{C_1 + \cos \theta \left[1 - \min \left(x_2 \frac{a}{\text{sen } \theta}, 1 \right) r \right] t_1}{\text{sen } \theta} \quad (11)$$

Quando $FS < 1$ há a possibilidade ou probabilidade de ruptura. Portanto, esta é uma probabilidade espacial devido às incertezas, variabilidade espacial em C , $\tan\varphi$ e T . Esta probabilidade tem um elemento temporal R que, simulado automaticamente pelo programa, caracteriza a umidade variando com o tempo e as incertezas em x combinam probabilidades espaciais e temporais. Nessas regiões (com $FS_{\min} < 1$) define-se a Equação 12:

$$IE = Prob(FS > 1) \quad (12)$$

Quando os limites superiores de C , x e t combinam-se, o melhor cenário é dado por $C = C_2$, $x = x_2$, $t = t_2$, de acordo com a Equação 13:

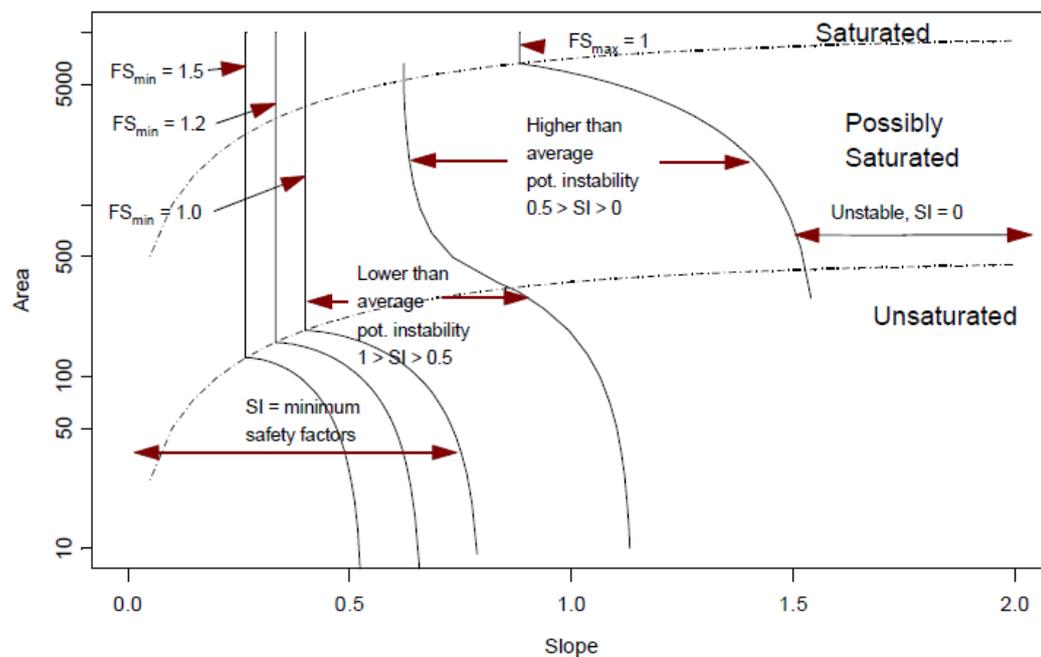
$$FS_{max} = \frac{C_2 + \cos \theta \left[1 - \min \left(x_1 \frac{a}{\sin \theta}, 1 \right) r \right] t_2}{\sin \theta} \quad (13)$$

Neste caso $FS_{max} < 1$, e daí:

$$IE = Prob(FS > 1) = 0 \quad (14)$$

A composição do índice de estabilidade é dada pela relação da área de contribuição e ângulo da encosta (Figura 10), e corresponde às regiões que definem o fator de segurança do modelo, ou seja, $IE > 1$ ($FS_{min} > 1$), $0 < IE < 1$ e $IE = 0$ ($FS_{max} < 1$). Observa-se que a análise do índice de estabilidade (IE) ou *Stability Index* (SI) exige um maior entendimento a respeito dos fatores que compõem suas formulações, assim como uma compreensão mais apurada sobre tais índices (Pack et al., 2005).

Figura 10. Índice de estabilidade - relação de contribuição *versus* ângulo da encosta.



Fonte: Pack et al., 2005.

2.7.2 Parâmetros SINMAP

O MDT utilizado como entrada do modelo contribui com informações sobre inclinação topográfica e área de captação. As informações sobre pontos de deslizamentos ocorridos na área são adicionadas para comparar locais de instabilidade prevista com áreas de instabilidade real e avaliar a precisão do modelo.

As características pedológicas exercem grande influência sobre a estabilidade das encostas, já que ditam a resistência ao cisalhamento dos solos e a capacidade de fluxo da água que se infiltra durante um período chuvoso. No caso dos parâmetros do solo e das propriedades climatológicas que são considerados mais incertos, os mesmos são especificados em termos de faixa de valores, com limite superior e inferior.

Os parâmetros, mesmo sendo apresentados em uma faixa de valores, são considerados médios para toda a área em análise. Caso a generalização não possa ser feita, torna-se necessária a subdivisão do MDT e adequação dos parâmetros para cada área respectiva, sendo necessário utilizar o programa em blocos.

Os valores padrão são fornecidos para todos os parâmetros (Quadro 5), por isso, para um teste inicial, não é necessário que o usuário dê valores de parâmetros de entrada. No entanto, parâmetros da região calibrados terão que ser modificados pelo usuário, para fornecer valores realistas da área de estudo do usuário.

A saída padrão do modelo SINMAP é uma série de mapas que definem áreas de instabilidade potencial do terreno e um gráfico que classifica a instabilidade e suas causas. Nas imagens, as áreas verdes sombreadas são consideradas estáveis, enquanto as áreas vermelhas escuras têm uma alta probabilidade de falha, com base nas entradas de parâmetros (Pack et al., 2005).

A SA-Plot é a saída do programa que exhibe todos os pontos de deslizamento de terra na área do estudo, mas apenas números limitados de células da grade, sem deslizamentos de terra, são normalmente exibidos, para acelerar cálculos e simplificar a saída gráfica.

Quadro 5. Valores padrão fornecidos para todos os parâmetros SINMAP

Parâmetros do SINMAP	Valores	
Índice de umidade inferior - SA Plot (%)	10	
Número de pontos no SA Plot	2000	
Massa específica da água (Kg/m^3)	1000	
Ângulo de atrito interno do solo (ϕ em $^\circ$)	Mínimo	Máximo
	30	45
Coesão adimensional (C)	Mínimo	Máximo
	0,0	0,25
Massa específica do solo (ρ_s em kg/m^3)	2000	
Aceleração da gravidade (g em m/s^2)	9,81	
Relação entre transmissividade e taxa de recarga (T/R em m)	Mínimo	Máximo
	2000	3000

Fonte: Pack et al., 2005.

2.7.2.1 Parâmetros físicos

A coesão adimensional (C) é a razão entre a força coesiva do solo e da zona de raízes em relação ao peso de uma espessura saturada de solo, ou a contribuição da coesão para a estabilidade de uma encosta (Equação 5).

Michel et al. (2014) afirma que a coesão das raízes não foi considerada pois, no caso de sua área estudada, as superfícies de ruptura formaram-se em profundidades não afetadas por este parâmetro.

O atrito interno (ϕ em graus) é o atrito entre os grãos individuais, dentro de uma massa de material. O ângulo é constante para um material especificado e depende do tamanho, forma e rugosidade da superfície dos grãos, densidade do solo, teor de umidade e saturação do material.

A densidade do solo expressa a relação entre a quantidade de massa de partículas sólidas por unidade de volume do solo (peso específico seco). É utilizada como indicador da compactação, sendo assim um parâmetro que depende das alterações da estrutura e porosidade do solo.

2.7.2.2 Parâmetros hidrodinâmicos

A condutividade hidráulica é a quantidade de água que se deslocará, através de um meio poroso, por unidade de tempo. Os solos com uma alta condutividade hidráulica têm a capacidade de transmitir água mais rapidamente. Isso melhora a capacidade de drenagem do

solo. Normalmente um solo não consolidado, grosso e bem arredondado terá um maior valor de condutividade hidráulica (Fetter, 2001).

A transmissividade (Equação 15) corresponde à quantidade de água que pode ser transmitida, horizontalmente, por unidade de largura do aquífero. A taxa de transmissividade (m^2/h) foi calculada usando a equação básica:

$$T = K \cdot b \quad (15)$$

Onde: T é a transmissividade (m^2/dia ; m^2/s); K (m/s ; m/h ; mm/h ; m/dia) é a condutividade hidráulica do solo e b (m) é a profundidade do solo.

Recarga é o movimento de percolação da água da zona insaturada para a zona saturada que está abaixo. No bairro do Ibura admite-se que tal processo ocorre por infiltração direta da água da chuva, após os processos de evapotranspiração e escoamento direto.

A nomenclatura das variáveis hidrodinâmicas utilizadas varia de acordo com a área de atuação para a qual a análise é realizada. Ou seja, um determinado parâmetro pode ter definições diferentes de acordo com a área, por exemplo: permeabilidade intrínseca, termo utilizado pela agronomia, também pode ser referenciado como coeficiente de permeabilidade.

2.7.2.3 Classificação Unificada do Solo

Determinar os parâmetros físicos de um solo requer ensaios de solos específicos, principalmente os ensaios ditos de caracterização e classificação dos solos, como granulometria e limites de consistência. Quando não é possível executar todos os ensaios necessários para determinar os parâmetros de resistência do solo, como coesão e ângulo de atrito, uma solução encontrada é realizar a Classificação Unificada do Solo para a área de estudo. Classificar um solo significa incluí-lo em um determinado grupo composto por solos de características e propriedades geotécnicas similares, tornando possível a utilização de informações existentes na literatura.

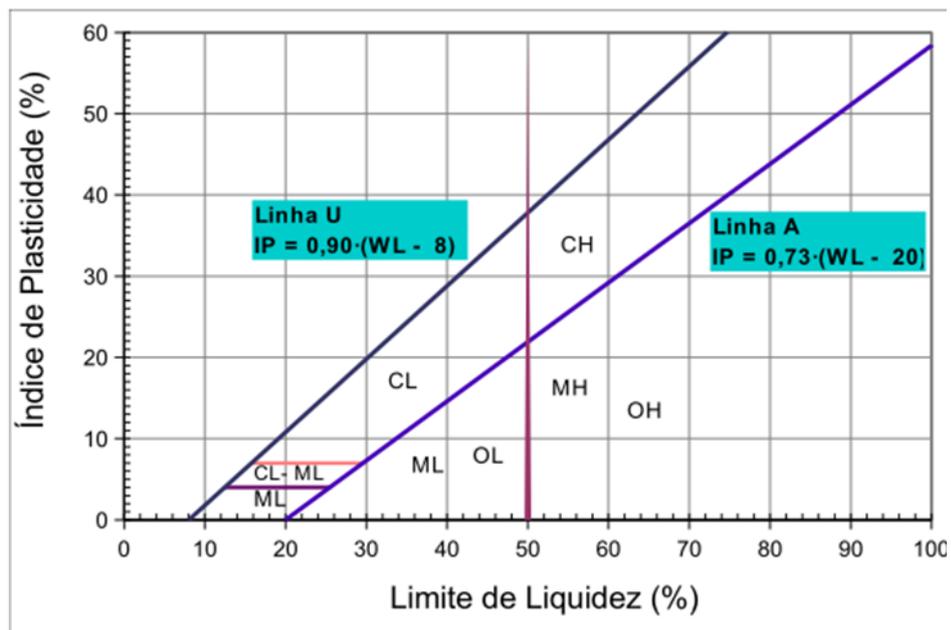
O Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), desenvolvido pelo professor A. Casagrande (Casagrande, 1948), baseia-se na distribuição granulométrica e nos limites de consistência dos solos. Na referida análise, os solos nos quais a fração fina não existe em quantidade suficiente para afetar o seu comportamento são classificados de acordo com a sua curva granulométrica, enquanto que os solos nos quais o comportamento é controlado pelas

suas frações finas (silte e argila), são classificados de acordo com as suas características de plasticidade (UFBA, 2017).

O ensaio é realizado em duas etapas. Na primeira, fase de peneiramento, a classificação é realizada na fração de solo que passa na peneira de 75mm, devendo-se anotar a quantidade de material eventualmente retida nesta peneira. São denominados solos grossos aqueles que possuem mais do que 50% de material retido na peneira 200 e solos finos aqueles que possuem mais de 50% de material passando na peneira 200. Os solos orgânicos e as turfas são geralmente identificados visualmente.

Na segunda fase, a classificação é realizada através da plotagem, na carta de plasticidade de Casagrande (Figura 11), dos limites de Albert Atterberg (limite de liquidez e de plasticidade). O Limite de Liquidez (WL) é o valor de umidade para o qual o solo passa do estado plástico para o fluido. O Limite de Plasticidade (WP) é o valor de umidade para o qual o solo passa do estado semissólido para o estado plástico (vide NBR 9180).

Figura 11. Carta de plasticidade de Casagrande (Gráfico de plasticidade).



Fonte: Casagrande, 1948.

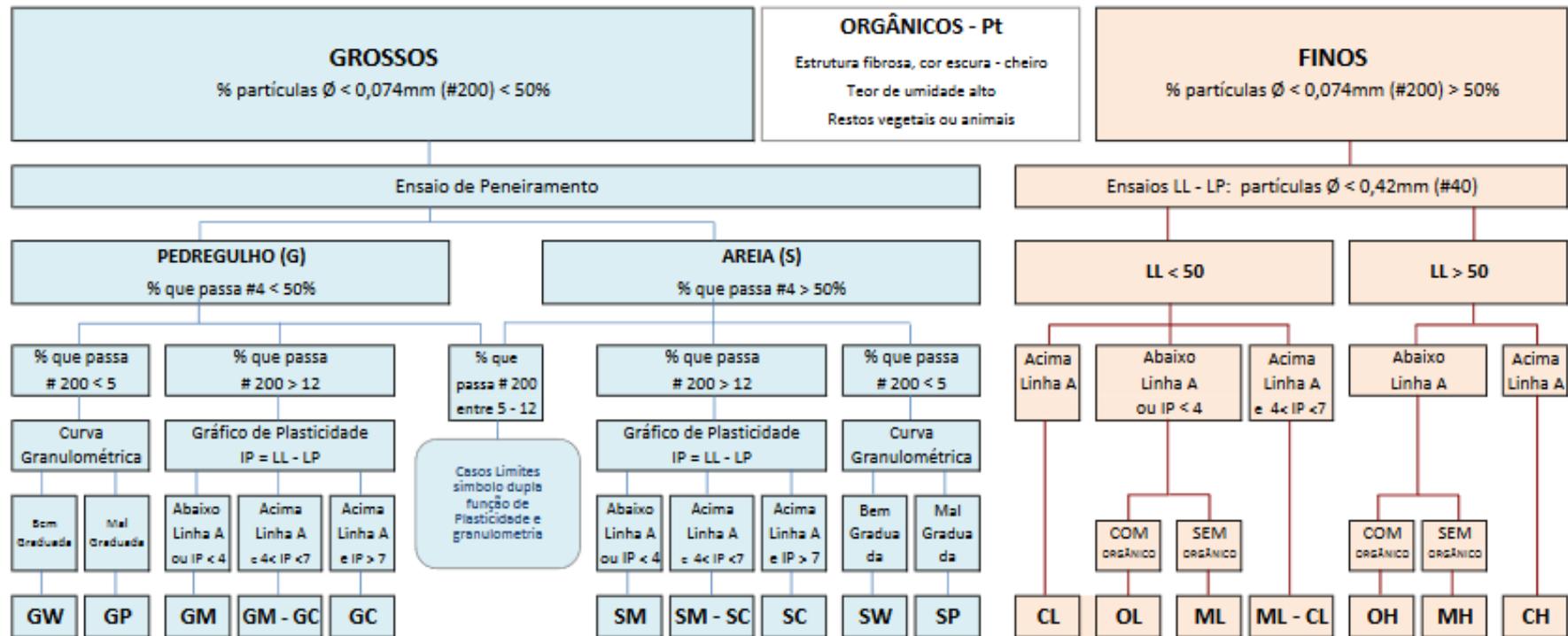
Segundo UFJF (2004), a classificação visual dos solos pode ser feita com a ajuda do Quadro 6, apresentada no livro do professor Milton Vargas "Introdução à Mecânica dos Solos" de 1977. Para classificar uma amostra no Quadro 6 é necessário percorrer o mesmo da direita para a esquerda e de cima para baixo. A classificação do solo através do sistema SUCS é apresentada de forma resumida na Figura 12.

Quadro 6. Classificação dos solos apresentada pelo professor Milton Vargas.

Processo para identificação no campo				Grupo	Designação característica		
SOLOS DE GRANULAÇÃO GROSSA Mais de metade é maior que a abertura da peneira de malha nº 40	PEDREGULHOS Mais de metade da fração grosseira e maior que a # nº 10	PEDREGULHOS PUROS (pouco ou nenhum fino)	Grãos cobrindo toda a escala de granulação com quantidade substancial de todas as partículas intermediárias		GW	Pedregulhos bem graduados, misturas de areia e pedregulho com pouco ou nenhum fino.	
			Predominância de um tamanho de grão ou graduação falhada (ausência de alguns tamanhos de grão)		GP	Pedregulhos mal graduados, misturas de pedregulho e areia com pouco ou nenhum fino.	
		PEDREGULHOS COM FINOS (apreciável quantidade de finos)	Finos não plásticos (ML ou MH).		GF	Pedregulhos siltosos, misturas de pedregulho, areia e silte mal graduados.	
			Finos plásticos (CL ou CH)		GC	Pedregulhos argilosos, misturas de pedregulho, areia e argila bem graduados.	
	AREIAS Mais de metade da fração grosseira menor que a # nº 10	AREIAS PURAS (pouco ou nenhum fino)	Grãos cobrindo toda a escala de granulação com quantidade substancial de todas as partículas intermediárias		SW	Areias bem graduadas, areias pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino.	
			Predominância de um grão ou graduação falhada		SP	Areias mal graduadas, areias pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino.	
		AREIAS COM FINOS (apreciável quantidade de finos)	Finos não plásticos (ML ou MH)		SF	Areias siltosas, misturas mal graduadas de areia e silte.	
			Finos plásticos (CL ou CH ou OH)		SC	Areias argilosas, misturas bem graduadas de areia e argila.	
	SOLOS DE GRANULAÇÃO FINA Mais de metade do material é menor que a abertura de malha da # 200	Processo de identificação executado sobre a fração < # nº 40				A abertura da malha # nº 200 corresponde aproximadamente à menor partícula visível a olho nu	
		ENSAIO EXPEDITO ↓	RESISTENCIA a SECO (esmagamento pelos dedos)	DILATANCIA (DILAÇÃO) (sacudindo na palma da mão)	RIGIDEZ (consistência na proximidade do LP)		
SILTES E ARGILAS Limite de Líquidez menor que 50		nenhuma a pequena	rápida a lenta	nenhuma	ML	Siltos inorgânicos e areias muito finas, alteração de rocha, areias finas, siltos ou argilosas com pequena plasticidade.	
		média a elevada	Nenhuma a muito lenta	média	CL	Argilas inorgânicas de baixa e média plasticidade, argilas pedregulhosas, argilas arenosas, argilas siltosas, argilas magras.	
		Pequena à média	lenta	pequena	OL	Siltos orgânicos e siltos argilosos orgânicos de baixa plasticidade	
SILTES E ARGILAS Limite de Líquidez maior que 50		Pequena a média	Lenta a nenhuma	Pequena a média	MH	Siltos inorgânicos, micáceos ou diatomáceos, finos arenosos ou solos siltosos, siltos elásticos.	
		Elevada a muito elevada	nenhuma	elevada	CH	Argilas inorgânicas de alta plasticidade, argilas gordas.	
		Média a elevada	Nenhuma a muito lenta	Pequena a média	OH	Argilas orgânicas de média e alta plasticidade	
TURFAS		Facilmente identificáveis pela cor, cheiro, porosidade e freqüentemente pela textura fibrosa.			Pt	Solos com elevado teor de matéria orgânica	

Fonte: UFJF, 2004

Figura 12. Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS)



GW: $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$ e $C_c = \frac{(D_{40})^2}{D_{10} \cdot D_{60}}$ entre 1 e 3
 GP: quando não são satisfeitos os requisitos de GW
 SW: $C_u > 6$ e C_c entre 1 e 3
 SP: quando não são satisfeitos os requisitos de SW

SOLOS GROSSOS:
 G = gravel (pedregulho)
 S = sand (areia)
 W = well graded (bem graduado)
 P = poorly graded (mal graduado)
 C = clay (com argila)

TURFAS (Pt):
 Solos altamente orgânicos, geralmente fibrilares e muito compressíveis.

SOLOS FINOS:
 L = low (baixa compressibilidade)
 H = high (alta compressibilidade)
 M = mo (silte em sueco)
 O = organic (silte ou argila, orgânicos)
 C = clay (argila inorgânica)

Fonte: UDESC, 2017

2.7.3 Determinação da chuva necessária para causar deslizamentos

Pack et al. (2005) afirmam que, para o programa SINMAP, a recarga uniforme não está relacionada com a chuva média de um longo período (um ano, por exemplo) e sim com um período crítico de precipitação capaz de desencadear eventos de escorregamento.

Witt (2005) utilizou o modelo e comparou seus resultados para quatro limiares de precipitação, a saber: 50mm/d, 125mm/d, 250mm/d e 375mm/d. A taxa de 50mm/d foi escolhida como uma taxa mínima, isto é, uma taxa em que SINMAP não deveria indicar significativa área de instabilidade. Os valores de 125mm/d e 250mm/d são considerados como a faixa de precipitação necessária para gerar deslizamentos na área estudada, de acordo com a literatura para a região. A quantidade limiar, 375mm/d, é utilizada como um máximo, isto é, um exemplo extremo da precipitação que pode produzir fluxos de detritos na bacia hidrográfica. Apenas algumas vezes, registraram-se totais de precipitação que ultrapassaram efetivamente esta taxa, no estudo de Witt (2005).

Michel et al. (2014), para cálculo da recarga efetiva na bacia do rio Cunha, em Santa Catarina, utilizou os valores de precipitação ocorridos a partir de 01/08/2008, até o momento em que ocorreram os escorregamentos na bacia, em 23/11/2008. A precipitação acumulada, neste período, chegou a 1.200mm, que representa 2/3 da média anual. Este intervalo de tempo foi selecionado pois a partir de 01/08/2008 a série de chuvas da região começou a apresentar significativa diferença incremental em relação à média de precipitação para a região.

Menon Júnior (2016) utilizou como precipitação crítica (capaz de causar deslizamentos), os dados pluviométricos dos dias 29 e 30/11/15 (48h), considerados os dias mais críticos, em termo de precipitação, referentes à série de dados disponíveis no INMET para o ano de 2015 e totalizando 101,4 mm de chuva acumulados.

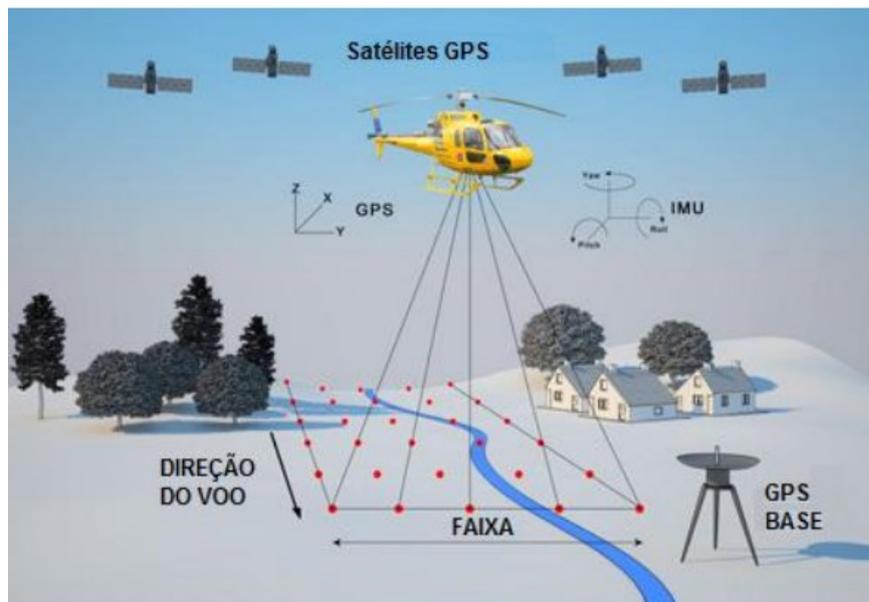
2.8 TECNOLOGIA LIDAR - LIGHT DETECTION AND RANGING

Os primeiros estudos sobre *Light Detection and Ranging* (LiDAR) datam das décadas de 1970 e 1980, na *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), com registros de outras pesquisas nos Estados Unidos e Canadá. Segundo Cirilo (2014), embora a tecnologia LiDAR tenha tido as primeiras aplicações no final do século passado, ainda há poucas regiões do mundo que aproveitaram o potencial da ferramenta para cobrir integralmente o seu território.

Segundo Masaharu et al.(2001), o LiDAR aerotransportado mede a distância entre o

sensor (acoplado na aeronave) para o alvo, a partir do reflexo de um feixe de laser. Os levantamentos são feitos por aeronaves que possuem a bordo um sistema de *Global Positioning System* (GPS) e uma unidade de medição inercial (UMI), para medir a posição e altitude do sensor, respectivamente. O ângulo de varredura do feixe também é, simultaneamente, medido na aeronave. As posições tridimensionais de alvos terrestres são obtidas, através da combinação destes parâmetros, com distâncias medidas a partir do sensor (Figura 13).

Figura 13. Método de obtenção de pontos a partir de perfilamento a laser.



Fonte: Alves, 2017.

Sato & Sekiguchi (2005) afirmam que o sistema oferece as seguintes vantagens:

- a) Obtenção rápida de MDE detalhado em forma digital, quando comparado com fotogrametria digital; o MDT pode ser calculado por geoprocessamento;
- b) Medição do solo com cobertura vegetal, desde que não seja muito densa;
- c) Obtenção de vários pontos por metro quadrado; e
- d) Possibilidade de medição à noite.

Glenn et al. (2006) relatam que a precisão vertical absoluta obtida dos dados LiDAR, em relação a um sistema padrão geográfico de coordenadas, é de 16cm (com nível de confiança de 95%), dependendo da altitude do voo. A precisão vertical relativa, determinada para medir o desvio padrão de um grupo de pontos que são conhecidos para formar uma superfície plana,

pode chegar à da ordem de 5cm.

Estudos mostram que os dados de elevação LiDAR têm sido usados para avaliar a rugosidade da superfície, para detectar áreas de deslizamento de terra, caracterizar e diferenciar a morfologia e a atividade deslizamento e, também, para identificar o tamanho ideal da célula para a avaliação dos escorregamentos rasos (Cavalli et al., 2008).

Sato & Sekiguchi (2005) utilizaram uma grade de cinco metros do MDT, para mapear a suscetibilidade de deslizamento de terra, em *Kuchisakamoto*, Japão. Foi construído um mapa inventário sobre o deslizamento de terra na região e as células foram separadas em células onde ocorre e onde não ocorre escorregamento. Inicialmente a declividade do terreno e a área de drenagem a montante de cada célula foram determinadas. Em seguida estes parâmetros foram classificados em 48 seções e a densidade de deslizamento de terra foi calculada para cada seção. A densidade de deslizamento de terra é o número de células de deslizamento dividido pelo número total de células. Esta foi classificada em quatro categorias: muito baixa (0-1% na densidade), baixa (1-5%), alta (5-10%) e, muito elevada (> 10%). Por fim, a suscetibilidade foi mapeada com base nas quatro categorias.

Glenn et al. (2006) analisaram a morfologia da superfície de dois deslizamentos no sul de *Idaho*, USA. Os dados topográficos de alta resolução, com uso do LiDAR, foram usados para calcular a rugosidade da superfície, inclinação, semivariância e dimensão fractal. Estes dados foram combinados com dados históricos do movimento, Sistemas de Posicionamento Global (GPS), e também com observações de campo, para o deslizamento de terra atualmente ativo. Os resultados demonstram que a alta resolução de dados topográficos tem o potencial para se diferenciar componentes morfológicos, dentro de um deslizamento de terra, além de fornecer informações sobre o tipo e a atividade de material do deslizamento. As análises e os resultados obtidos, neste estudo, não teriam sido possíveis com o uso de modelos de elevação mais grosseiros.

Schulz (2007), do *United States Geological Survey* (USGS), utilizou o *Light Detection and Ranging* para criar um mapa de deslizamento de terra para Seattle, usando imagens derivadas do LiDAR. A qualidade do mapa foi comparada com a de mapas anteriores de deslizamento de terra, criados em Seattle, com auxílio de fotografias aéreas. Foi gerado um mapa de suscetibilidade de deslizamento de terra, a partir de imagens de LiDAR e registros históricos de deslizamentos de terra. Por fim, os resultados foram avaliados, no contexto da causa de deslizamento de terra, em Seattle. Para tal, medições de superfície pelo LiDAR para Seattle foram adquiridas, em um espaçamento médio de cerca de 2m. Os dados foram

processados para remover vegetação, construções e outros obstáculos acima do solo, criando, assim, um modelo do relevo (MDT).

Wang et al. (2015) monitorou o deslizamento de terra, utilizando principalmente LiDAR e fotogrametria, desde o início de 2007, em Lushan, Taiwan. Os resultados do monitoramento foram analisados para identificar as condições de deslocamento da encosta, em relação à chuva e à quantidade de água armazenada no solo correspondente. A conclusão sugere o desenvolvimento de uma superfície deslizante mais profunda, a uma profundidade de 108m, em 2007, durante o tufão *Sinlaku*. Os dados do monitoramento forneceram informações sobre a evolução do deslizamento de terra e as condições de deslocamento, tanto os mais profundos, quanto os de escala local pequena.

Palenzuela et al. (2014) realizou um processamento de alta resolução de dados topográficos baseado em *Digital Elevation Model of Differences* (DEM/D) e *High Resolution Digital Elevation Model* (HRDEM) produzidos a partir de LiDAR. Tornou-se possível detectar, delinear, e classificar um total de 47 deslizamentos naturais e 50 falhas de inclinação de corte, ao longo de uma área de 234 km², com base na análise dos produtos LiDAR (DEM e DEM/D) e avaliação de imagens ortofotográficas integradas em um SIG. A maior parte dos deslocamentos detectados, provavelmente, foi gerada durante o inverno de 2009-2010, quando um novo recorde de precipitação acumulada foi alcançado. A taxa de deslocamento desses movimentos não pode ser conhecida com precisão, mas a velocidade mínima obtida foi de 0,3m/ano, em relação ao período entre as duas aquisições de dados realizadas: novembro de 2008 e julho de 2010. Por outro lado, a comparação feita com os mapas de suscetibilidade existentes indica maior frequência de deslizamento de terra em áreas de níveis de suscetibilidade moderada.

Menon Júnior (2016) analisou a evolução das áreas de risco, na Bacia do Córrego do Yung (Juiz de Fora – MG), associada aos processos de escorregamentos em encostas, interpretou a evolução da ocupação urbana e analisou a inter-relação com a legislação de parcelamento e uso do solo. Foram utilizados: imagens aerofotogramétricas, MDE e Declividade com base no modelo LiDAR; legislação de parcelamento e ocupação do solo urbano e modelo SINMAP, na metodologia de análise de riscos. Os resultados mostraram que o processo acelerado de mudança, na paisagem, provocou alterações nas inúmeras classes de uso do solo e que o grau de risco mais comum, para as áreas edificadas, é de risco alto.

2.8.1 Programa Pernambuco Tridimensional – PE3D

O programa Pernambuco Tridimensional (PE3D), da Secretaria de Infraestrutura do Estado de Pernambuco (SEINFRA), tem o objetivo de prover ao estado uma modelagem numérica detalhada do terreno e fotografias aéreas de alta resolução, gerando uma base de dados espaciais. Foi iniciado em março de 2014 e concluído em dezembro de 2016. Estes dados dão suporte à ampliação da infraestrutura hídrica e sanitária e a outras ações como melhoria do planejamento territorial, minimizando os impactos sobre os recursos naturais e os custos decorrentes das intervenções.

O Estado utilizou o sistema LiDAR, logo após as grandes inundações ocorridas em diversas regiões do Estado, principalmente na Mata Sul (2010/2011) e no Agreste Meridional (2010), que provocaram inundações catastróficas em Alagoas e Pernambuco. Esse levantamento inicial foi restrito aos rios e áreas alagáveis adjacentes (compatível com escala 1:5.000) e cidades atingidas (escala 1:2.000) nas bacias hidrográficas dos rios Una, Mundaú e Sirinhaém, em área pouco superior a 1.200km² (Cirilo, 2014).

O PE3D realizou recobrimento aerofotogramétrico e perfilamento a laser de 98.500km², correspondente a toda a área continental de Pernambuco. Alves (2017) cita que, no projeto, foram geradas ortofotos na escala 1:5.000. Os dados de acesso gratuito do mapeamento estão disponibilizados na escala 1:1000 para áreas urbanas de 26 municípios (outros 15, correspondentes à Região Metropolitana de Recife mais o município de Goiana, foram mapeados também nesta escala pela Compesa – Companhia Pernambucana de Saneamento). Foram gerados produtos decorrentes do perfilamento a laser, com resolução espacial de 1 metro e precisão altimétrica melhor que 25cm (para todo o estado) e resolução espacial de 0,5m e vertical da ordem de 10cm (para os 41 municípios escolhidos), sendo este insumo cartográfico para caracterização do terreno utilizado neste trabalho. Entre os produtos do PE3D estão o Modelos Digitais de Terreno (MDT), Modelos Digitais de Elevação (MDE) e Imagens Hipsométricas (PE, 2018). Aplicações detalhadas sobre aplicações desses produtos podem ser obtidas em Dantas et al (2014), Ribeiro Neto et al. (2015), Ribeiro et al. (2020).

2.9 BALANÇO HÍDRICO NO SOLO

Do ponto de vista hidrológico, o solo pode ser entendido como um reservatório cujo volume de água armazenado pode ser bastante variável no tempo, dependendo de muitos

fatores. O balanço de água no solo pode ser resolvido computando-se todas as entradas e as saídas do sistema (Rennó & Soares, 2017).

De modo simplificado, o balanço de água no solo é apresentado na Equação 16.

$$P - E_{int} - E_s - E_p - Q_{saida} + Q_{entrada} - \Delta\theta = 0 \quad (16)$$

Onde: P é a precipitação; E_{int} é a água interceptada pelo dossel que posteriormente é evaporada; E_s é a evaporação do solo; E_p é a transpiração pelas plantas; Q_{saida} é o escoamento de água para fora do sistema; $Q_{entrada}$ é o escoamento de água para dentro do sistema (fluxo ascendente, escoamento superficial e subsuperficial) e $\Delta\theta$ é a variação do estoque de água no solo. Os termos $E_{int} + E_s + E_p$ são denominados evapotranspiração.

A infiltração da água no solo depende da umidade antecedente; da granulometria do solo; da ocupação pelos processos de urbanização e devastação da vegetação; da declividade topográfica e da existência de depressões que provocam a retenção da água, diminuindo o escoamento superficial direto.

Existem programas que auxiliam no cálculo do balanço de massa no solo. Um deles é o Hydrus, que possui o módulo 1D de acesso livre e gratuito, que simula o movimento unidimensional de água. Muitos usos são dados aos resultados das simulações realizadas pelo modelo. O Hydrus-1D foi utilizado para simulação da dinâmica da água no solo, em área sob cobertura vegetal de campo nativo, por Feltrin et al. (2013) que comparou os resultados simulados com dados obtidos em medições de campo e concluiu que os resultados apresentados pelo programa são compatíveis com a drenagem obtida em lisímetro.

Dikshit et al. (2019) analisaram o processo de desencadeamento de deslizamentos superficiais, descrevendo variações no fator de segurança, com duração antes, durante e após o evento de fortes chuvas, no Darjeeling Himalaia, na Índia, utilizando o modelo TRIGRS. Para determinação do fluxo vertical unidimensional pela equação de Richards os autores utilizaram o modelo numérico Hydrus-1D. Os resultados mostraram que, com o uso dos programas, foi possível prever, com sucesso, 71,65% dos pixels estáveis, após o evento de deslizamento de terra, e estabelecer um sistema operacional de alerta precoce das possíveis ocorrências.

Para estimar as propriedades hidráulicas do solo, onde a importância da histerese não é clara, em uma área propensa ao deslizamento de terra na faixa da costa de Oregon (EUA), Ebel et al. (2018) utilizaram o modelo de elementos finitos Hydrus-1D para simular o fluxo de água saturado de maneira variável. Os autores utilizaram o *Transient Water Release and Imbibition*

Method (TRIM) sujeito às condições iniciais e de contorno, com o fluxo de água corrigido para a área transversal da amostra de solo. Os resultados sugerem que as estimativas de parâmetros hidráulicos não saturados, com base em dados de campo *in situ*, em oposição às medições em laboratório, podem levar a uma simulação mais precisa da resposta hidrológica à chuva e que medições laboratoriais de retenção de água, no solo, feitas em condições dinâmicas podem superestimar a histerese hidráulica.

A histerese é uma propriedade dos solos que possuem diferentes ramos de umedecimento e secagem da curva de retenção de água no solo. Ou seja, a relação entre a quantidade de água no solo em volume e o potencial da água no solo que ocorre, à medida que o solo seca, é diferente da mesma relação, à medida que o solo é reumedecido. USP (2020) explica que, quando o solo é umedecido, alguns dos poros de menor tamanho não são preenchidos, deixando ar aprisionado, o que impede a entrada da água. Nessa situação, alguns poros maiores são cercados pelos menores, e o macroporo não será drenado, até que o potencial mátrico seja baixo o suficiente para esvaziar os poros menores que o cercam. Este fenômeno pode ser encontrado na expansão e contração de argilas que, à medida que secam e são reumedecidas, apresentam mudanças na estrutura que afetam as relações entre o solo e a água. Dessa forma, torna-se importante saber se o solo está sendo seco ou umedecido, ao comparar suas propriedades com as de outro solo.

McGuire et al. (2016) avaliaram quantitativamente as interações entre vegetação, interceptação da chuva, hidrologia de superfície e estabilidade de talude, na cordilheira do Colorado (EUA). A Modelagem numérica do fluxo subsuperficial foi realizada, usando Hydrus-1D, através do cálculo da pressão variável no tempo e do teor de umidade em resposta à chuva, durante evento de tempestade. Os resultados sugerem que a coesão aparente fornecida pelas raízes foi responsável pela boa conexão observada, entre o início do fluxo de detritos e a inclinação.

Schilirò et al. (2019) fizeram testes para analisar o processo de acionamento de deslizamentos rasos induzidos por chuva no Monte Mario Hill, Roma. No trabalho foi dado um foco específico ao papel das condições hidráulicas iniciais, alterando a inclinação do solo, utilizando-se sensores de umidade e pressão da água dos poros. Para testar as condições de campo simuladas realizou-se uma análise numérica com o Hydrus-1D. Os resultados mostraram que os tipos de solo SC e CL são os mais influenciados pelo evento de chuva, uma vez que as condições iniciais de umidade mais altas melhoram a formação de uma ampla frente úmida, dentro do perfil do solo.

2.9.1 Software Hydrus-1D

O modelo Hydrus-1D (versão 4.17) resolve, numericamente, a Equação de Richards para o fluxo de água variável (Šimůnek et.al., 2013), oferecendo a opção de modelos hidráulicos analíticos que descrevem a retenção de água no solo, em função da condutividade hidráulica. Maiores informações sobre o Hydrus-1D podem ser obtidas em PC-progress (2019).

Mannich & Guetter (2011) citam que a Equação de Richards é uma equação diferencial parcial parabólica não-linear que governa o processo de infiltração transiente de água no solo. A relação que governa o escoamento não-saturado vertical 1-D é apresentada na Equação 17:

$$\frac{\partial}{\partial Z_*} \left[K_*(\Psi) \frac{\partial(\Psi + Z_*)}{\partial Z_*} \right] = \frac{\partial \theta}{\partial t_*} \quad (17)$$

Onde $Z_*[L]$ é a coordenada vertical, positiva no sentido de baixo para cima; $K_* [L/T]$ é a condutividade hidráulica não saturada, que é função do potencial capilar $\psi [L]$; $\theta [L^3/L^3]$ é a umidade e $t_* [T]$ representa o tempo.

Melo & Louzada (2013) citam que o ponto crucial para a utilização da equação de Richards é a correta medição e descrição das propriedades hidráulicas do meio. Essas propriedades são a curva de retenção de água no solo $\theta(h)$ e a função de condutividade hidráulica $K(\theta)$, onde θ é o conteúdo volumétrico de água, h é o potencial matricial e K é a condutividade hidráulica.

Segundo Šimůnek et.al. (2008), o programa pode ser usado para analisar o movimento de água e soluto, em meios porosos insaturados, parcialmente saturados ou totalmente saturados. O modelo oferece como opção para o solo, onde é feita a simulação, apresentar características como camadas não uniformes e múltiplas. O fluxo e o transporte considerados também podem ocorrer na direção vertical, horizontal ou geralmente inclinada. Entretanto, a versão livre do programa tem a limitação de desconsiderar a topografia, por ter sido projetado, inicialmente, para uso na agricultura,. A desconsideração da declividade do terreno, que contribuiria para a diminuição da infiltração e aumento do escoamento, traz, como consequência, uma infiltração simulada superestimada.

Rassam et. al. (2018) descrevem que o programa pode auxiliar nas análises de situações como:

- a) Fluxo de água com saturação variável em perfis de solo, de camada única e multicamada, com e sem absorção de água pela raiz. Destaca-se o cálculo do balanço hídrico do solo e a recarga das águas subterrâneas, em situações climáticas de curto e longo prazo;
- b) Transporte básico de dispersão advectiva-dispersiva sem interações sólido-líquido e transporte de contaminantes envolvendo reações de absorção de equilíbrio lineares ou não lineares; e
- c) Transporte físico de solutos e análise da combinação de efeitos físicos e químicos.

Os modelos hidráulicos analíticos descrevem a retenção de água e funções de condutividade hidráulica. O programa oferece modelos para as propriedades hidráulicas do solo: a) Modelo de van Genuchten (1980); b) Modelo de van Genuchten Modificado (Mualem, 1976); c) Modelo de Brooks & Corey (1966) e d) Modelo de Kosugi - log-normal (1996).

Segundo Melo & Louzada (2013), dentre os vários modelos que procuram representar analiticamente a condutividade hidráulica em relação com a umidade, ou com o potencial matricial, o mais amplamente utilizado é o de van Genuchten-Mualem (van Genuchten, 1980).

O modelo matemático de van Genuchten (1980) desenvolve-se a partir da Equação 18:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha |\phi_m|)^n]^m} \quad (18)$$

Onde: θ é o conteúdo de água (m^3m^{-3}); θ_r e θ_s são os teores de água residual e de saturação (m^3m^{-3}); ϕ_m é o potencial mátrico da água no solo (kPa); α é o escalonador do ϕ_m e m e n são os parâmetros de ajuste do modelo relacionados ao formato da curva de umidade.

As forças mátricas são aquelas que atuam sobre a água devido à matriz do solo. O potencial é definido pela diferença entre a energia potencial da água livre e a energia em um determinado solo. Quando se considera apenas as forças mátricas atuando na água retida, a diferença de energia potencial é denominada potencial mátrico (Miranda et al., 2021).

2.9.2 Simulação de movimento de água

Dos módulos apresentados pela versão livre do programa, utilizou-se apenas a opção referente à infiltração unidimensional de água em um perfil de solo (módulo padrão). Tal opção

oferece a possibilidade de simular perfis de solo de camada única e multicamada; com fluxo de água com saturação variável em condições climáticas de curto e longo prazo (precipitação, por exemplo); com ou sem absorção de água pela raiz das plantas, caso seja necessário.

São consideradas condições de limite climático de curto prazo os eventos com duração de 1 a 30 dias, e de longo prazo de 1 ano, com foco no cálculo do balanço de água no solo e na recarga de água subterrânea.

O programa necessita, como dados de entrada, informações importantes para execução do processo, tais como:

- a) Geometria do sistema a ser simulado (número de camadas do solo e profundidade e direção do fluxo de água);
- b) Condições de contorno e escalonamento de tempo para valores de dados (anos, dias, horas, minutos ou segundos) de precipitação, evaporação e transpiração;
- c) Critérios para a solução numérica da equação de Richards, que rege o fluxo de água na zona insaturada, podem ser modificados pelo usuário. Entretanto, segundo Rassam et. al. (2018):

Não se deve alterar nenhum desses valores, que controlam o procedimento de escalonamento de tempo autoajustável totalmente automatizado da solução numérica. Os valores padrão são baseados em muitos anos de experiência usando os modelos Hydrus e seus antecessores para uma variedade de aplicativos.

- d) Escolha do modelo hidráulico mais adequado, entre os oferecidos pelo programa, para simular o desequilíbrio ou o fluxo preferencial, como os modelos de dupla porosidade ou permeabilidade dupla e a presença de histerese. Para uso do programa Hydrus-1D, a histerese pode ser limitada apenas à curva de retenção de água no solo ou ser considerada na condutividade hidráulica não saturada.
- e) Os parâmetros hidráulicos do solo devem ser informados com base em dados reais ou uso do catálogo de solos fornecido, como por exemplo: θ_r (teor de água residual), θ_s (teor de água saturada), K_s (condutividade hidráulica saturada).

Os fluxos de evapotranspiração podem ser avaliados, por decisão do usuário, utilizando-se a opção referente à equação de combinação de Penman-Monteith recomendada pela FAO (Monteith, 1981, 1990) ou a Fórmula de Hargreaves (Jensen et al., 1997).

Além da opção do catálogo de solos, o modelo oferece o módulo ROSETTA Lite (Schaap et al., 2001) que usa a distribuição de tamanho de grão do solo para prover os valores dos parâmetros hidráulicos. Segundo Rassam et. al. (2018), para tal utilizam-se as funções de pedotransferência para avaliação dos parâmetros de retenção de água de van Genuchten (1980)

e condutividade hidráulica saturada (K_s) usando classe textural, distribuição textural, densidade aparente e um ou dois pontos de retenção de água como entrada. As amostras foram obtidas de um grande número de fontes e envolvem solos agrícolas e não agrícolas, em zonas de clima temperado do hemisfério norte. Entretanto, o uso de Rosetta para outras zonas climáticas e, portanto, outros processos pedogênicos, pode levar a previsões imprecisas.

Para se obter melhores resultados de simulação torna-se fundamental a entrada de informações hidráulicas de retenção de água no solo e/ou condutividade hidráulica, resultantes de experimentos reais. Como alternativa a dados limitados ou ausentes, o modelo oferece um catálogo de solos que fornece parâmetros hidráulicos médios para doze diferentes classes texturais de solo do United States Department of Agriculture (USDA). As opções de tipos de solos e suas características, fornecidas pelo modelo, foram derivadas de solos agrícolas e podem não ser apropriadas para horizontes de solo relativamente profundos.

O modelo oferece como algumas das opções de saída da simulação:

- a) Informação de balanço de massa;
- b) Evolução da pressão por profundidade e ao longo do tempo;
- c) Avanço da frente de umidade no perfil de solo no tempo;
- d) Quantidade de água no solo no tempo;
- e) Gráficos das funções hidráulicas do solo não saturado.

A opção de saída para acompanhamento da pressão é útil, quando se requer que o modelo produza predições em um local específico para comparar com observações de campo e é particularmente relevante ao se realizar simulações inversas ou calibração do modelo.

O arquivo de saída, contendo as informações de balanço de massa, informa o equilíbrio alcançado no tempo, para cada região ou sub-região do solo, através das colunas:

- a) Length: profundidade do perfil do solo;
- b) W-volume: volume total de água no solo (no perfil do solo ou sub-regiões selecionadas);
- c) In-flow: soma dos fluxos que entram e saem do perfil do solo (ou sub-região);
- d) h Média: pressão média ao longo do perfil do solo (ou sub-região);
- e) Top Flux: fluxo no topo do perfil do solo;
- f) Bot Flux: fluxo na parte inferior do perfil do solo;
- g) WatBalT: erro total (absoluto) no balanço de água para todo o perfil do solo;
- h) WatBalR: erro relativo do balanço hídrico em %.

Uma vez que o limite de umedecimento passa por um determinado ponto, o teor de água torna-se igual ao teor de água saturada (θ_s). O volume total infiltrado é apresentado por meio da Equação 19:

$$W_{volume} = \theta_s \times h \quad (19)$$

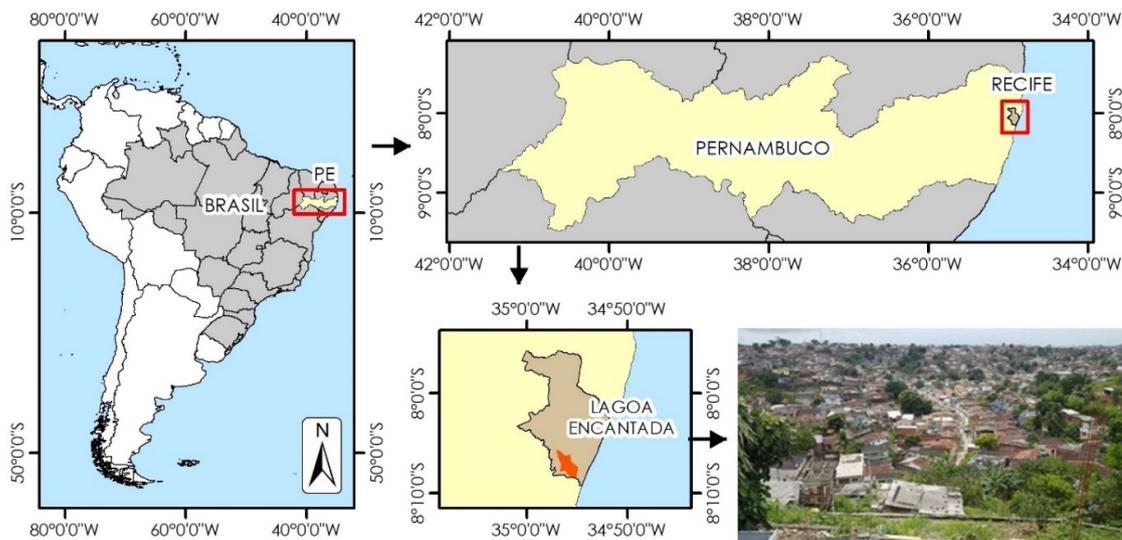
Onde: W_{volume} é o volume total de água, no perfil dos solos em cm; θ_s = teor de água saturada em cm^3/cm^3 ; h = profundidade de solo úmido em cm.

Se “*In-flow*” é positivo, significa que a água está sendo armazenada no perfil do solo; e quando é zero, indica que um estado estacionário foi atingido (o influxo é igual ao fluxo).

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

A localidade de Lagoa Encantada, Unidade Espacial no Bairro da Cohab – Ibura, classificada a partir da divisão das Unidades Espaciais aplicada no Atlas do Desenvolvimento Humano no Recife na RMR, possui uma área de aproximadamente 1km². O bairro do Ibura está localizado em região com morros ocupados a partir da segunda metade do século XX (Miranda, 2018). A ocupação dessas áreas, de acordo com relatos da comunidade, teve início após a construção das Unidades Residenciais (URs) no bairro da Cohab, no final da década de 1960. A população mais carente, que não possuía condições financeiras para adquirir as casas oferecidas pelo poder público, passou a construir, sem autorização e de forma inadequada, às margens da antiga lagoa. A Figura 14 apresenta a localização da área estudada e ilustra a vista de um dos pontos mais altos da comunidade de cota 75 metros.

Figura 14. Localização da Comunidade de Lagoa Encantada.



Fonte: A autora, 2020.

As frequentes ocorrências de deslizamento são consequência do tipo de solo e da precipitação intensa no inverno, em conjunto com as intervenções humanas e moradias construídas sem critérios técnicos. Esta condição torna a região mais vulnerável e propícia a deslizamentos e acidentes quando associada a grandes densidades populacionais que elevam o risco da área.

Apesar dos morros da Zona Sul da RMR, em grande parte urbanizados e transformados em vilas e conjuntos habitacionais, apresentarem residências com acesso a banheiro e água

encanada (Miranda, 2018), na comunidade de Lagoa Encantada as habitações irregulares, com intervenção intensa e inadequada, representam aproximadamente 70% do bairro, como observado em visita de campo.

A Comunidade de Lagoa Encantada está localizada em área de Formação Barreiras, que apresenta grande potencial para movimentos de massa. Quando sujeita à precipitação, a formação torna-se mais frágil, pela pouca coesão das partículas do solo, aumentando o risco de deslizamentos. Nessas áreas, o processo erosivo é mais expressivo, principalmente nas regiões onde foi removida a vegetação local e realizadas escavações indevidas para retirada de material.

Bandeira (2010) mostrou que na Região Metropolitana do Recife Sul, na Formação Barreiras, foi registrada 69% de instabilidade de encosta, com valores de precipitação acumulada superiores a 60mm em 72 horas. Do total de áreas instáveis na região mencionada, 75% dos deslizamentos ocorreram na comunidade Lagoa Encantada.

3.1 FORMAÇÃO BARREIRAS

O termo “Barreiras” é usado, desde o início do século XX, para sedimentos que afloram ao longo da costa brasileira, desde o Amapá até o Rio de Janeiro (Mabesoone et al. 1972; Bigarella, 1975; Alheiros et al., 1988). O conhecimento dessa unidade evoluiu com as ciências geológicas no Brasil e sua primeira documentação foi registrada na redação da carta de Pero Vaz de Caminha ao Rei de Portugal, D. Manoel I. Essa unidade recobre depósitos sedimentares mesozoicos de diversas bacias costeiras e é substrato sobre o qual se desenvolve grande parte do Quaternário costeiro no Brasil. A porção do litoral onde esta unidade ocorre é, na sua maioria, intensamente povoada e é usada, constantemente, para extração de bens minerais, bem como de água subterrânea (Bezerra & Suguio, 2006).

Essa unidade foi denominada como Formação Barreiras, pela primeira vez, por Moraes (1928), quando se referiu aos sedimentos da costa setentrional de Recife como “Formação Barreiras”, possivelmente uma das primeiras denominações dessa forma, mas feita sem qualquer conotação litoestratigráfica formal. No ano de 1930, Moraes Rego, adotando um critério estratigráfico, denominou de “Série Barreiras” os sedimentos que constituíam desde os baixos platôs amazônicos até os tabuleiros da costa brasileira, que se estendiam até o sul do Estado da Bahia (Alheiros et al., 1988).

Se, morfologicamente, podem ser resumidos nas formas dos tabuleiros (costeiros ou interiores) e, na forma de falésias, quando os sedimentos realizam incursões até à zona litorânea,

litológica e, estratigraficamente, os sedimentos Barreiras apresentam um conjunto de complexas questões relativas à sua gênese, aos seus mecanismos de deposição, à sua estratigrafia e ao significado de suas diversas características litológicas

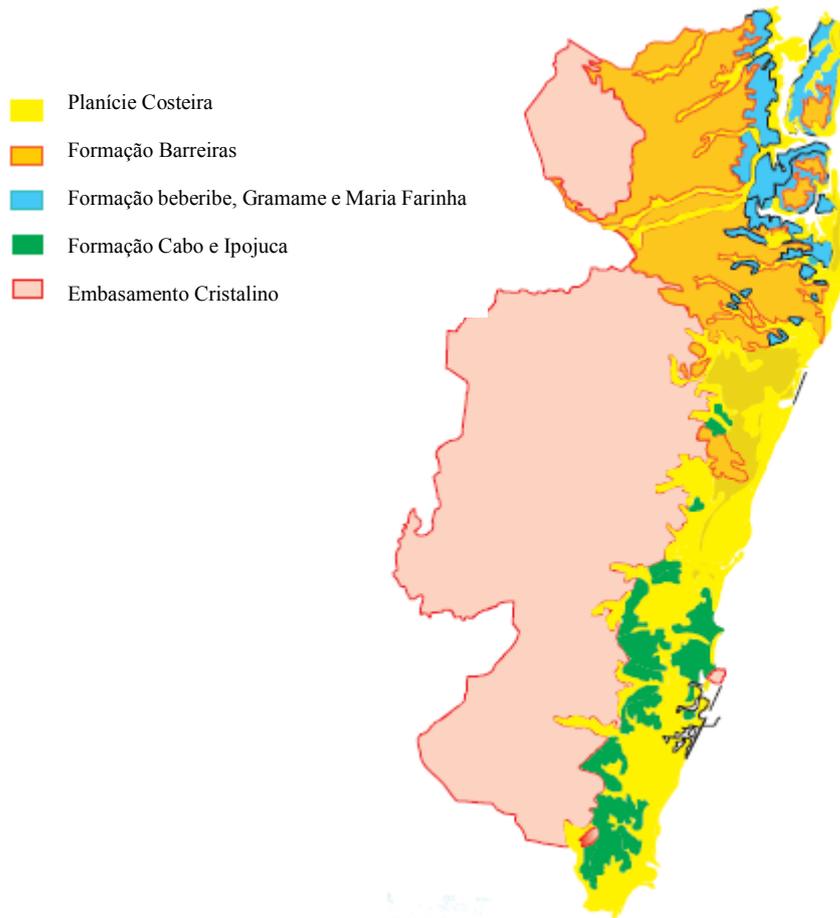
Segundo Mabesoone et al. (1972), o termo Formação Barreiras é usado para nomear sedimentos pouco ou não consolidados, com cores variegadas, litologicamente variando entre argila e conglomerados, com estruturas sedimentares do tipo estratificações irregulares e muito indistinta. Podem ocorrer de forma discordante sobre o embasamento cristalino ou sobre unidades sedimentares cretáceas e terciárias. Já era usado o termo “Barreiras” para estes sedimentos que afloram, ao longo da costa, desde o início do século XX no trabalho de Branner (1902) (apud Mabesoone et al., 1972). Esta denominação foi assumida, gradativamente, como unidade estratigráfica, sem nenhum estudo mais amplo ou uma localidade típica. Assim, Oliveira & Leonardos (1940) denominaram “Série das Barreiras” para esta unidade e, posteriormente, Oliveira & Ramos (1956) e Kegel (1957) usaram o termo “Formação Barreiras”. Bigarella & Andrade (1964) apresentou um trabalho sistemático, através de perfis nos arredores de Recife, observando discordâncias nas seções e subdividiu em duas formações: uma inferior, denominada Formação Guararapes e, a superior, denominada Riacho Morno, que representaria o Grupo Barreiras (Bigarella, 1975). O mesmo observado por Mabesoone (1984), na falésia de Cabo Branco (João Pessoa-PB). Mabesoone et al. (1972) redefinem o Grupo Barreiras (Bigarella & Andrade, 1964), entre o Rio Grande do Norte e Pernambuco e dividem nas formações Serra dos Martins, Guararapes e Macaíba, sendo a Formação Riacho Morno, apenas, um manto de intemperismo da Formação Guararapes. Mabesoone et al. (1991) e Kegel (1957) reposicionam estas rochas denominadas “Barreiras” na categoria de formação, sendo as unidades descritas, anteriormente, fácies distintas.

3.1.1 Características da Formação

A Formação Barreiras que se concentra basicamente ao norte do Lineamento Pernambuco é a unidade geológica sobre a qual foi construída a comunidade de Lagoa Encantada. A Figura 15 ilustra a extensão das unidades geológicas na RMR apresentada por Alheiros (1998).

Segundo Pfaltzgraff (2007), recobrimdo o embasamento cristalino e as unidades sedimentares cretáceas, a formação caracteriza-se por depósitos de areias grossas, intercaladas por estratos rítmicos de areia fina e/ou argila bastante friáveis e facilmente erodíveis.

Figura 15. Principais Unidades Geológicas da RMR.



Fonte: Alheiros, 1998.

A constituição areno-argilosa, pouco consolidada, a torna uma unidade geológica ambientalmente instável, propícia a deslizamentos por ser suscetível à erosão. Quando sujeita à precipitação, a água infiltra pela camada arenosa e encontra a camada argilosa, que é impermeável. A água se acumula na região arenosa que se torna mais frágil pela pouca coesão, aumentando o risco de deslizamentos.

As camadas que a constituem são mais arenosas na base e passam, em direção ao topo, para pacotes onde se intercalam camadas arenosas e argilosas, típicas de depósitos por enxurradas (leques aluviais). As areias dessa formação mostram um alto conteúdo de feldspatos, os quais, sujeitos aos processos de argilização, sob o clima quente e úmido, favorecem episódios de deslizamentos. A ação antrópica sobre os tabuleiros morfologicamente instáveis e os morros com encostas de declividade elevada induzem diferentes processos de desestabilização, com erosão pronunciada nas camadas mais arenosas e com deslizamentos naquelas mais argilosas.

É na Formação Barreiras em que se observa a maior incidência de casos de deslizamentos e erosões na RMR, particularmente em Recife, Camaragibe, Olinda e Jaboatão dos Guararapes, pelo fato de essas áreas terem sido adensadas, através de ocupações espontâneas ou informais (CONDEPE/FIDEM, 2019). A Figura 16 ilustra um afloramento de sedimento da Formação Barreiras no município de Camaragibe.

Figura 16. Afloramento da Formação Barreiras no município de Camaragibe.



Fonte: Pfaltzgraff, 2007.

Alheiros (1998) cita que os processos geológicos que compuseram a formação permitem que esses sedimentos possam ser utilizados como material de construção, através da extração de areias e argilas. Tais características levam à exploração econômica, intensificando o risco de erosão, dada a alta erodibilidade do material. Silva (2016) reforça que estudos realizados na RMR mostram que as encostas constituídas de Formação Barreiras, principalmente aquelas com a presença de solo com textura mais arenosa, como é o caso encontrado em Lagoa Encantada, quando associada à atuação de impactos antrópicos, apresentam maior suscetibilidade à ocorrência de processos erosivos.

3.2 FATORES QUE INFLUENCIAM NOS DESLIZAMENTOS EM LAGOA ENCANTADA

As construções de casas, de forma desordenada e desestruturada nos morros da RMR, colocam a população em uma constante situação de alerta, principalmente nos períodos chuvosos. Vários fatores podem influenciar os deslizamentos em uma região: o relevo, a

precipitação, o uso do solo, a ação antrópica, entre outros. Entretanto, quando associados, podem trazer sérias consequências, aumentando a suscetibilidade aos deslizamentos. Em algumas regiões, apenas a união de dois fatores são suficientes para deflagrar escorregamentos de encostas.

A drenagem nos morros, quando existe, nem sempre é bem dimensionada para a vazão dos volumes de água gerados por grandes precipitações. Em Lagoa Encantada, na maioria das áreas afetadas, as águas pluviais e servidas escoam livremente, infiltrando-se e/ou percolando pelas encostas e provocando erosão. Claghorn et al. (2016) citam que eficientes sistemas de drenagem podem reduzir o risco da saturação do solo, auxiliando na mitigação de deslizamentos, desde que sejam mantidos desobstruídos e bem preservados. Gomes et al. (2017) sugere que, além dos problemas ligados ao escoamento pluvial, já citado, vazamentos nas redes de água e esgoto, presença de fossas e o lançamento de lixo também contribuem para tornar o ambiente mais suscetível ao deslizamento.

Na comunidade foi possível observar problemas de drenagem, indicando a coleta das águas pluviais e o lançamento concentrado na área superior das vertentes, pelos moradores das áreas menos urbanizadas e com moradias mais precárias. As áreas de encosta cobertas pela vegetação nativa não apresentavam deslizamentos identificáveis.

Em Lagoa Encantada a diminuição da vegetação natural provocada pela ação antrópica, para a construção de casas, é observada em todo o lado. Entretanto, torna-se importante observar que nem toda vegetação traz benefícios à estabilidade das encostas, como por exemplo espécies vegetais como a bananeira, muito comum nas comunidades, que facilitam a infiltração da água no solo e também contribuem para a desestabilização.

Um exemplo do problema causado pela ausência da vegetação nativa, ou sua modificação de forma inadequada, é apresentado por Santana et al. (2017). O referido autor cita que, no bairro de Nova Descoberta, Zona Norte do Recife, com intensa ocupação antrópica, a vegetação original de Mata Atlântica foi desmatada, deixando o solo exposto ou apresentando vegetação de pequeno porte. Tais interferências contribuem para que as encostas mais declivosas, como ocorrido também em Lagoa Encantada, concentrem o maior número de escorregamentos na região.

3.3 O PAPEL DA DEFESA CIVIL NA COMUNIDADE

A Defesa Civil na cidade do Recife é representada pela Coordenadoria de Defesa Civil do Recife (CODECIR), que desenvolve ações preventivas com o objetivo de evitar ou minimizar acidentes em situações de calamidades, a partir do monitoramento permanente das áreas de risco que estejam sujeitas a deslizamentos de terra e alagamentos e, também, em edificações que apresentem riscos.

A avaliação e mapeamento dos pontos suscetíveis aos movimentos de massa realizados pela Defesa Civil, além do cadastro dos escorregamentos já ocorridos, são realizados de forma qualitativa. Segundo Silveira (2017), os métodos quantitativos, ideais para as circunstâncias, são baseados no julgamento de especialistas, por meio de dados obtidos em observações de campo, ou interpretação de fotografias aéreas, quando existem, em que se adota uma análise geomorfológica de campo ou análise de combinação de mapas de índices dos fatores que afetam a estabilidade.

Em toda comunidade de Lagoa Encantada é possível ver cicatrizes de deslizamento de barreiras, muros de arrimo e lonas plásticas (Figura 17) Os pontos de deslizamento mapeados pela Defesa Civil são de extrema importância para os estudos de deslizamento na área. A classificação realizada segue o critério para estabelecimento de risco adotado, segundo Brasil (2007), onde é feito o estabelecimento do grau de risco e as ações correspondentes. De acordo com a metodologia, os graus de risco médio, alto e muito alto, mesmo não apresentando indícios de movimentação da encosta ou talude, sugere que as moradias e outras áreas devem ser interditadas (Quadro 7).

Figura 17. Lonas plásticas na localidade de Lagoa Encantada



Fonte: A autora, 2017.

Quadro 7. Critério para estabelecimento do grau de risco

Grau de risco	Caracterização do risco	Condicionante
R1	Risco baixo ou inexistente	Sinais de escavação ou outra atividade antrópica
R2	Risco Médio	Já ocorreu a ruptura remanescente em direção à área de influência
R3	Risco Alto	Não ocorreu a ruptura. Direção de queda provavelmente na área de influência
R4	Risco Muito Alto	Qualquer atividade de uso e ocupação no entorno

Fonte: Brasil, 2007.

Baseada na classificação e critérios apresentados, a Defesa Civil de Pernambuco forneceu um banco de dados com 221 pontos mapeados para o estudo aqui realizado. Tais pontos foram georreferenciados a partir do endereço e correspondem às ocorrências de deslizamentos de barreiras e muros de arrimo, com e sem danos, além das solicitações para vistoria, monitoramento e colocação de lonas plásticas, entre os anos de 2013 e 2017. O cadastramento das ocorrências é realizado por residência, ou seja, de forma pontual e não por setorização de área. A setorização consiste na determinação de uma região, ou porção da encosta (polígono), com potencial para sofrer algum tipo de processo que possa causar danos. Na maioria das vezes são delimitações realizadas, tendo como base imagens, fotografias e/ou mapas.

Contabilizaram-se para a área 65 deslizamentos com solicitação de vistoria, 4 muros de arrimo com danos e 2.072 chamados para colocação ou reposição de lonas plásticas. Em média, metade das ocorrências anuais ocorrem entre os meses de maio e julho, que correspondem ao trimestre mais chuvoso do ano. Analisando as informações fornecidas, observa-se que uma mesma localidade apresenta diversas ocorrências em vários anos.

Após o levantamento de tais dados, observou-se que as ocorrências não caracterizam o tipo do processo de deslizamento acontecido. A maioria dos chamados é citado apenas como deslizamento, não havendo distinção entre processos de escorregamento e de erosão, por exemplo. Neste caso, todas as ocorrências foram registradas como deslizamento, exceto desabamentos de muros de contenção de encostas.

Historicamente, acidentes com vítimas fatais, frequentemente registrados no inverno pela imprensa local, faziam parte da realidade de Lagoa Encantada. O Quadro 8 apresenta os registros de alguns deslizamentos apresentados, no cadastro da Defesa Civil e divulgados pela mídia entre os anos de 2014 e 2015.

Para diminuir o número de ocorrências e auxiliar a comunidade de Lagoa Encantada várias ações têm sido tomadas pela Defesa Civil e pelo poder público, buscando reduzir a suscetibilidade da região ao deslizamento de encostas. A maioria dos deslizamentos de terra na região ocorreu até o início de 2016, quando então diminuíram. Ações preventivas implementadas pelas instituições responsáveis e trabalhos de sensibilização da comunidade têm contribuído para a redução de desastres. Acredita-se que a ação preventiva com conscientização da população, colocação de lonas plásticas, limpeza de canaletas, entre outros, tenham atuado para a diminuição dos eventos.

Durante os períodos de inverno, a CODECIR é solicitada pela comunidade de Lagoa Encantada para colocação de lonas e outros paliativos que possam diminuir os riscos de possíveis deslizamentos. Entretanto, por diversos motivos, nem todos os pontos suscetíveis estão aptos a receber estas ações. Uma opção é a evacuação das populações desses locais, de forma ordenada, para áreas menos perigosas, sem esquecer da necessidade do desenvolvimento de estratégias para que os espaços desocupados não se tornem atraentes para novas ocupações no futuro.

Quadro 8 - Registro de deslizamentos em Lagoa Encantada (2014 – 2015)

Data do deslizamento	Cadastro defesa	Notícias / mídia	Endereço	Latitude e longitude (graus)	
26/06/2014	x	x	Rua Aroldo Barbosa, 45	-8.12106	-34.95133
12/07/2014		x			
19/02/2015	x		Av João Benigno de Vasconcelos, 1025	-8.11895	-34.95196
06/03/2015		x	Av João Benigno de Vasconcelos		
29/06/2015	x		Av. Rio Largo, 68	-8.12203	-34.9516
03/07/2015	x		1º Trav César Montezuma, 55	-8.12821	-34.95153

Fonte: A autora, 2018.

Para diminuir o grande número de solicitações e deslizamentos, muitos deles resultando em prejuízos financeiros e vítimas fatais, ações preventivas foram tomadas. Em maio de 2015, foram instaladas Plataformas de Coleta de Dados (PCD) na comunidade e em seu entorno. A localidade de Lagoa Encantada passou assim a ter a precipitação monitorada através das estações automáticas Ibura e Alto da Bela Vista, ambas operadas pela APAC. A disponibilização de dados de chuva, na própria comunidade, é de substancial importância para os estudos hidrológicos, avaliação de suscetibilidade ao deslizamento, de análise de risco e emissão de alertas. A série de dados de chuva podem ser obtidas em APAC (2020). Antes da instalação das referidas PCDs, a estação pluviométrica mais próxima da área de estudo, Estação Pluviométrica Recife, encontra-se a aproximadamente 10km do Ibura, no bairro do Cabanga.

Claghorn et al. (2016) citam que sensores que podem monitorar fatores de risco de deslizamentos de terra, como chuvas, saturação do solo e movimento da terra, podem ser instalados a um custo relativamente baixo, em locais de alto e médio risco, ao longo da escada. Na cidade do Recife, para prevenir os desabamentos constantes durante o período chuvoso, foram instalados sensores em área consideradas de risco extremo. Tais equipamentos permitem estudar e identificar os momentos preliminares e críticos que antecedem o deslizamento, de forma a obter dados com maior confiabilidade para a emissão de alertas de riscos de deslizamentos. A seleção dos locais vulneráveis a riscos de deslizamentos, para a instalação dos sensores geotécnicos, foi feita com base no histórico de desastres naturais e de seus impactos sociais e econômicos da região. A comunidade de Lagoa Encantada é uma das localidades escolhidas para a implementação deste tipo de monitoramento, iniciado em abril de 2016 e coordenado pelo Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (CEMADEN).

O sistema de monitoramento consta de uma Estação Total Robotizada (ETR) e um sensor geotécnico que emite sinal infravermelho, o qual é refletido nos 100 prismas (ou espelhos), instalados sobre pequenos postes de 1,5m de altura, espalhados estrategicamente nos morros e encostas (Figura 18). Esses sinais emitidos permitem captar até pequenas movimentações de terra dos morros, abrangendo uma área circundada de encostas em 360 graus, cobrindo até 2,5km de extensão (CEMADEN, 2017). Com os dados gerados são definidos os limiares de suscetibilidade e a iminência de um deslizamento.

Figura 18. Prisma de monitoramento instalado pelo CEMADEN.



Fonte: A autora, 2017.

Das muitas ações realizadas para evitar deslizamentos, as ações iniciadas pela CODECIR, no mês de abril, antecedendo o período crítico das chuvas, são de extrema importância na prevenção de desastres. Dentre elas é importante citar o trabalho junto à população, como a conscientização e as ações educativas. Segundo Bandeira (2010), a participação da comunidade, nestas ações, é uma forma de sensibilizar e mobilizar as pessoas para as atividades participativas, com a percepção dos riscos e estimulando a mudança de costumes e hábitos no ambiente em que vivem.

As ações preventivas, estruturais e não estruturais (ex: reparos e construções de muros de arrumo; capinação; monitoramento hidrológico; ações educativas; entre outros), já mostram seus resultados junto à comunidade através da redução do número de chamados. No ano de 2019, as solicitações registradas pela CODECIR apresentam 13 pontos de deslizamentos, nos meses de maio e junho, com necessidade de vistorias no local.

3.4 CARACTERÍSTICAS CLIMATOLÓGICAS

Localizada a aproximadamente 15km do centro da Cidade do Recife, Lagoa Encantada está subordinada aos mesmos processos climáticos característicos de toda a cidade. O Recife

apresenta um clima do tipo As' a Ams', segundo a classificação de Köppen (1940-1946), caracterizando um clima tropical chuvoso, influenciado pelas massas tropicais marinhas. A cidade apresenta altas temperaturas, com temperatura média do ar, sempre, superior a 18°C (Silva et al., 2010).

De acordo com CPRM (2003), a Região Metropolitana do Recife apresenta altas temperaturas, com média anual das máximas de 29,1°C e das mínimas de 21,9°C. A média compensada apresenta uma variação entre 23,9°C e 26,6°C, com uma média anual de 25,5°C. As médias mensais da umidade relativa do ar oscilam entre 74% e 86%, com média anual de 80%. A evaporação total anual medida em evaporímetro de Piché é de 1.323,4mm e, em tanque evaporimétrico classe A, de 2.264,0mm. A insolação total média mensal oscila entre 165,4 horas e 260,9 horas, apresentando um total anual médio de 2.556,4 horas. A direção predominante dos ventos é de sudeste, com velocidade que oscila entre 2,3m/s e 3,4m/s.

3.4.1 Monitoramento da precipitação em Lagoa Encantada

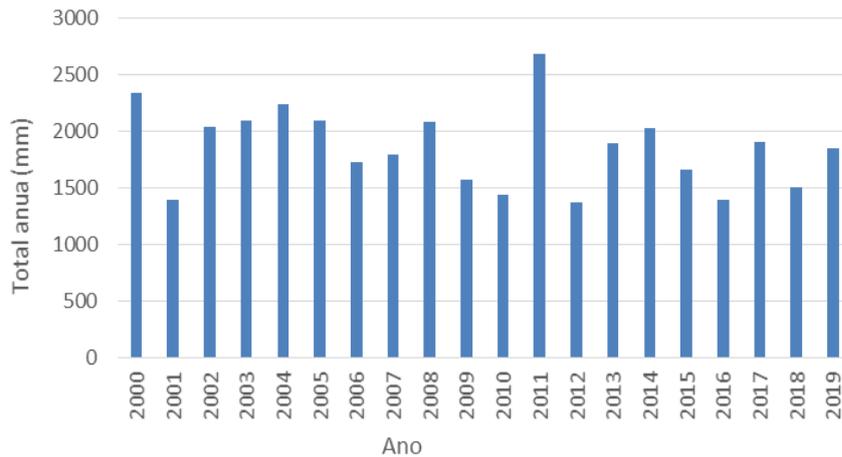
A série de dados usada para o referido estudo é de maio/2015 a outubro/2017, obtida a partir dos registros das PCDs e pode ser obtida no site <http://www.apac.pe.gov.br/meteorologia/chuvas-rmr.php> (APAC, 2017).

A estação pluviométrica mais próxima da área de estudo, inserida na Rede Hidrometeorológica Nacional, é a Estação Pluviométrica Recife (código 00834017). Foi instalada no ano 2000, é operada pelo SGB/CPRM e encontra-se a aproximadamente 10km do Ibura. Dessa forma, para simples caracterização da área, foi utilizada a série da estação pluviométrica Recife da CPRM, pelo fato de possuir uma série de dados mais extensa que a da APAC.

De acordo com os registros fornecidos pela Defesa Civil, durante três invernos consecutivos, anos completos de 2014 a 2016, nos meses de junho, ocorreu o maior número de chamados em Lagoa Encantada. Avaliações estatísticas mostram que, no referido mês, ocorre a maior precipitação mensal no ano.

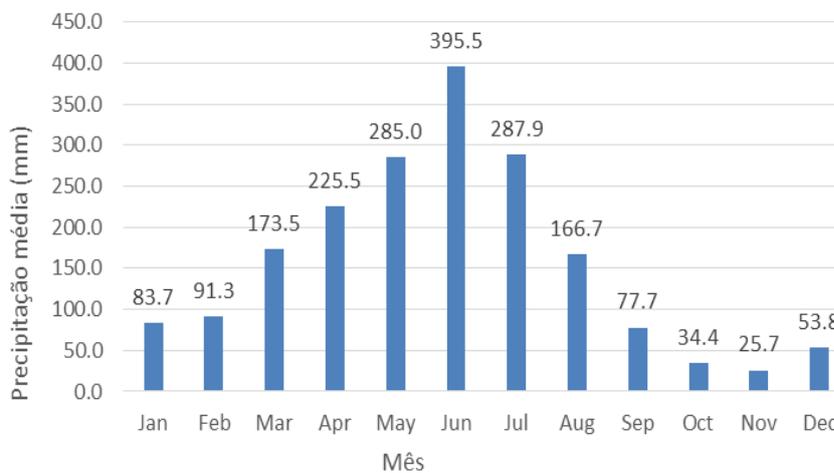
A Figura 19 apresenta a série histórica das precipitações totais anuais registrada pela estação pluviométrica Recife. Os dados estão disponíveis no site <http://hidroweb.ana.gov.br/> da ANA. A Figura 20 ilustra as médias mensais de chuva para a série da referida estação.

Figura 19. Totais pluviométricos, série 2000 a 2019, da Estação Pluviométrica Recife/CPRM



Fonte: A autora, 2018.

Figura 20. Precipitação média mensal, série 2000 a 2019, da Estação Pluviométrica Recife/CPRM



Fonte: A autora, 2018.

O trimestre mais chuvoso para a região engloba, normalmente, os meses de maio, junho e julho, concentrando, em média, 52% dos totais anuais. No trimestre mais seco, que ocorre nos meses de outubro, novembro e dezembro, as chuvas representam apenas 6% dos totais anuais. Observa-se, na Figura 19, que 63% da precipitação anual, de aproximadamente 1.900mm, concentra-se entre os meses de abril e julho. A série pluviométrica mostra que o mês de junho detêm 21% do total anual médio esperado para o ano, ou seja, uma precipitação média esperada de 395mm.

O banco de dados fornecido pela Defesa Civil mostra que os meses com o maior número de deslizamentos foram os de março de 2015 e, os de junho dos anos de 2014 e 2015. O total precipitado, no mês de março de 2015, registrou uma precipitação 40% maior do que a média

esperada para o mês, não havendo registro de precipitação acumulada com valor acima do esperado que pudesse auxiliar no deslizamento. Acredita-se que a chuva diária tenha contribuído para os escorregamentos. Alguns índices pluviométricos registrados em acidentes ocorridos em Lagoa Encantada são apresentados no Quadro 9.

Os meses de junho, com grande número de registros, não apresentaram total mensal precipitado muito acima da média esperada para o mês. Entretanto, o acúmulo de água no solo, entre janeiro e maio, provavelmente auxiliou na desestabilização do solo, causando os acidentes. No ano de 2014, nos meses que antecederam junho, a chuva acumulada foi 11% acima do esperado. Em junho de 2015, apesar de apresentar um número elevado de deslizamentos, mas compatível com o ocorrido no ano anterior de 2014, o acumulado foi 25% abaixo do esperado. Os registros de deslizamentos, como apresentado, mostram que, nem sempre, a chuva é o único agente deflagrador do movimento, havendo escorregamentos em mês de pluviosidade abaixo da esperada, sem acúmulo significativo de água, nos dias que antecederam os movimentos de massa.

Quadro 9. Índice pluviométrico registrado em acidentes ocorridos em Lagoa Encantada

Data do Deslizamento	Horário do deslizamento	Precipitação (mm)	Tempo	Observação
06/03/2015	2h45	86	2 horas	Das 2h às 4h da manhã
26/06/2014	Não informado	110	6 horas	Das 4h às 10h da manhã
12/07/2014	Não informado	85	12 horas	Das 20h às 8h do dia seguinte
19/04/2011	Não informado	99	24 horas	Das 9h às 9h do dia seguinte
31/03/2008	Não informado	116	12 horas	Das 21h às 9h do dia seguinte

Fonte: A autora, 2018.

3.4.2 Valores de precipitação limiar necessários para causar deslizamentos no Recife

De acordo com Santana et al. (2018), o mês de junho apresenta-se, em média, como o mês mais chuvoso. Entretanto, para a série histórica de 1990 a 2017, o mês de maio foi o que

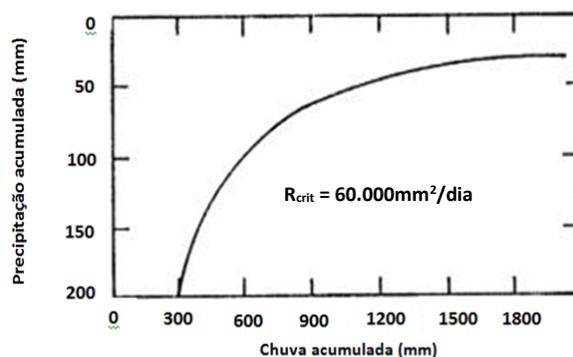
apresentou a chuva máxima, seguido de junho, abril e julho. É importante lembrar que, em localidades onde ocorreram deslizamentos, sem um índice de chuva que o justifique, muitos eventos podem estar associados ao vazamento de tubulações de água, fragilizadas pelas condições locais, e ao descarte inadequado de águas servidas.

Os índices pluviométricos críticos para a deflagração dos movimentos de massa variam com o regime de infiltração do solo, a dinâmica das águas subterrâneas no maciço e o tipo de instabilização. Considerações clássicas, como as citadas por Gusmão Filho (1990), afirmam que os escorregamentos em rocha tendem a ser mais suscetíveis a chuvas concentradas, enquanto os processos em solo dependem, também, dos índices pluviométricos acumulados nos dias anteriores. Dessa forma, a observação do acumulado das chuvas na área estudada é de crucial importância na prevenção de desastres.

Um estudo de destaque sobre a relação entre índice pluviométrico e os deslizamentos para as encostas de Formação Barreiras, realizado para a cidade de Olinda na RMR, Gusmão Filho (1997) concluiu que a instabilidade das encostas é o resultado da combinação entre a intensidade de chuva acumulada (P_{ac}), entre os meses de janeiro até a data do evento avaliado, somando-se à ocorrência de uma chuva diária de intensidade mínima (I), no período. Com tal informação, foi definido o parâmetro R como o produto da chuva de 24 horas pela chuva acumulada até o dia do evento, como apresentado em $R_{crit} = P_{ac} \times I$.

O valor de R_{crit} igual a $60.000\text{mm}^2/\text{dia}$ é o parâmetro que define a iminência do acontecimento do movimento de massa na área estudada pelo autor citado. O valor de R encontrado é representativo para movimento iminente, pois a partir do valor R citado, o nível d'água é máximo. A Figura 21 apresenta a correlação entre a intensidade da chuva e a chuva acumulada para as encostas da Formação Barreiras da cidade de Olinda – PE.

Figura 21. Correlação entre a intensidade da chuva e a chuva acumulada para as encostas da Formação Barreiras em Olinda (RMR).



Fonte: Gusmão Filho, 1997)

Conhecer e classificar a intensidade da chuva diária também contribui para o planejamento municipal, no período chuvoso, auxiliando na mitigação dos impactos associados às chuvas intensas. Souza et al. (2012) classificou a intensidade da precipitação acumulada, em 24 horas, relacionada às ordens quantílicas obtidas para Recife, como apresentado no Quadro 10.

Quadro 10. Classificação da precipitação acumulada em 24 horas para Recife

Classificação	Precipitação (mm)
Dia Seco	$P < 2,2$
Chuva Muito Fraca	$2,2 \leq P < 4,2$
Chuva Fraca	$4,2 \leq P < 8,4$
Chuva Moderada	$8,4 \leq P < 18,6$
Chuva Forte	$18,6 \leq P < 55,3$
Chuva Muito Forte	$P \geq 55,3$

Fonte: Souza et al., 2012.

Bandeira & Coutinho (2015) propuseram parâmetros de precipitação que possam desencadear movimentos de massa na RMR. Os resultados mostraram que deslizamentos de encostas ocupadas estão intimamente relacionados à ocorrência de chuvas concentradas, em 72 h ou menos, e associadas a chuvas acumuladas a longo prazo, como citado por Gusmão Filho (1990). Em estudo mais recente, Cavalcanti et al. (2018) citam que, em Recife, a cada 2 anos ocorrem eventos de chuva iguais ou acima de 125mm em 24 horas e 167mm em 48 horas e que, a cada 5 anos, é provável que ocorram eventos de chuva iguais ou acima de 21mm em 24 horas e 274mm em 48horas.

4 METODOLOGIA

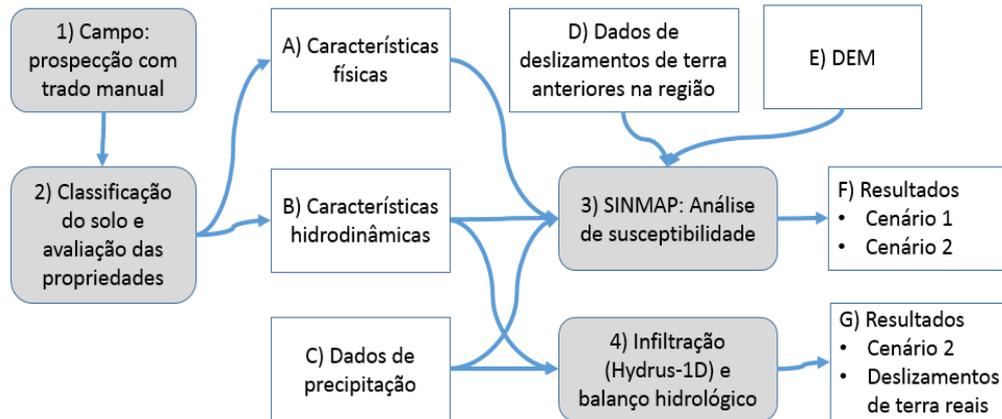
Conforme já citado, foi escolhida a comunidade de Lagoa Encantada, no Ibura, para avaliação da metodologia proposta. Segundo a literatura, estudos já foram realizados no Ibura, como apresentados em Rocha & Schuler (2016) e Bandeira (2010), já citados anteriormente. A área foi adotada por ser um dos lugares com a maior incidência de deslizamentos, na Região Metropolitana do Recife e, também, por ser monitorada pelo sistema de Estação Total Robotizada (ETR) do CEMADEN e pela APAC.

Uma visão geral da estrutura de trabalho é apresentada na Figura 22. Inicialmente, foi escolhida uma área de estudo dentro da RMR e realizados levantamentos das informações sobre o local. Posteriormente, em uma visita de campo, foram determinados dois taludes para fazer os perfis estratigráficos. O primeiro perfil estava localizado em uma área deslizada anteriormente e o segundo em uma área sem histórico de deslizamento. A escolha dos taludes serviu para identificação e comparação dos perfis de solo encontrados.

Em seguida, foi avaliado o tipo de solo, a fim de determinar suas características físicas e hidrodinâmicas. Além disso, dados de precipitação, dados sobre escorregamentos anteriores e o modelo de elevação do terreno também foram obtidos. Com essas informações, foi avaliado o comportamento da área em relação aos deslizamentos para dois cenários distintos: um, representando a situação de pouca chuva e, o outro, a situação de muita chuva (inverno) na região. A avaliação combinada foi realizada usando dois programas, de código aberto, separados: SINMAP e Hydrus. O levantamento feito pelo SINMAP determina o mapa de suscetibilidade a escorregamentos da área; considera a chuva, mas não modela a infiltração ao longo do tempo. A avaliação realizada pela Hydrus complementa a anterior, fornecendo dados de infiltração ao longo do tempo.

O tipo de solo foi determinado por prospecção com trado manual e classificação pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (USCS) (etapas 1 e 2; itens A e B). Os registros de chuva usados no estudo constituem o item C.

Figura 22. Visão geral da estrutura de trabalho.



Fonte: A autora, 2020.

Na metodologia aqui apresentada, devem-se considerar limitações justificáveis relacionadas à fase de campo. As decisões tomadas para simplificar ao máximo a retirada de amostras, para posterior caracterização do solo, não é consequência apenas dos custos. A resistência do solo em camadas mais profundas foi uma restrição para a profundidade atingida na perfuração. Importantes circunstâncias como a falta de segurança pública e a pouca acessibilidade ao local também são fatores limitantes.

A análise de suscetibilidade foi realizada da seguinte forma: os registros de deslizamentos ocorridos, no local, (item D) foram utilizados para gerar e calibrar o modelo SINMAP (etapa 3). Este trabalho também utilizou imagens de alta resolução da área do levantamento do relevo gerado pela tecnologia LiDAR, obtidos do PE3D (item E). Os dados citados (itens A a E) foram utilizados como entrada para o modelo SINMAP, para a avaliação da suscetibilidade a deslizamentos em dois cenários, gerando os resultados do item F.

A análise de infiltração foi realizada com o modelo Hydrus-1D (etapa 4), a partir dos parâmetros hidráulicos do solo (item B) e dos dados de precipitação (item C). O balanço hídrico do solo (etapa 4) foi simulado com dados de precipitação (item C) e infiltração (Hydrus-1D), para duas situações, gerando os resultados do item G. A avaliação conjunta entre as análises dos modelos (etapas 3 e 4) permitiu verificar as áreas suscetíveis a escorregamentos e avaliar o acúmulo de água no solo.

O modelo computacional SINMAP foi adotado por atender aos requisitos esperados e utilizar a precipitação como agente deflagrador do deslizamento, auxiliando na determinação da suscetibilidade a deslizamento.

Para calibração e validação automáticas do modelo foram utilizados registros e

informações reais de deslizamentos fornecidas pela Defesa Civil do Recife, no período de 2013 a 2017, totalizando 5 anos de dados. Mesmo reconhecendo a qualidade e consistência das informações fornecidas, foram realizadas visitas de campo para reconhecimento da área, para fins de observação e, também, de confirmação das informações obtidas.

Os parâmetros físicos e hidrodinâmicos do solo, após à classificação USCS, foram estimados de forma indireta. O solo da área piloto foi classificado e, de posse dessa informação, foram adotados dados correspondentes já existentes na literatura, por correlação de áreas vizinhas ou semelhantes, dispensando a realização de ensaios nesta etapa preliminar. Assim, não foi necessário realizar ensaios específicos de solo. Um exemplo de correlação são os dados apresentados por Santana (2006), que estudou a localidade de UR2, também no Ibura, localizada a aproximadamente 2km de Lagoa Encantada, em área de Formação Barreiras.

A avaliação do balanço hídrico no solo foi realizada para simular o volume acumulado por infiltração, após um evento de chuva que possa ter contribuído para um deslizamento. Para tal, foi utilizado o modelo de infiltração Hydrus-1D, programa de acesso livre que possui pacotes para simulação de movimento unidimensional de água.

No uso do módulo padrão Hydrus-1D, foram utilizadas as características hidrodinâmicas do solo disponibilizadas pelo programa. Para poder observar a acumulação gradativa da água no solo, foram utilizados os dados da estação pluviométrica CPRM/Recife, pertencente à Rede Hidrometeorológica Nacional.

4.1 MAPA DE SUSCETIBILIDADE

O SINMAP está relacionado a fatores hidrológicos, bem como à fragilidade do solo, precipitação, tipo de solo e relevo, como parâmetros de entrada. O modelo foi aplicado em uma região que experimenta deslizamentos de terra translacionais e rotacionais rasos.

A precisão dos resultados do programa é fortemente dependente da qualidade do modelo digital do terreno que é usado (Pack et al., 2005). A validação do modelo depende da verificação da coincidência espacial entre as cicatrizes de deslizamento previamente mapeadas e as áreas designadas como instáveis pelo modelo. Os resultados são apresentados com base no índice de estabilidade (SI), ou fator de segurança, que é a probabilidade de uma área ser considerada estável, assumindo distribuições uniformes dos parâmetros nas faixas de incerteza. Este resultado probabilístico é de grande importância para uso em futuras análises de risco. O fator de segurança apresentado aqui não corresponde ao fator de segurança calculado por modelos

de equilíbrio limite, como os métodos de “fatias” (ex: Método de Fellenius e Método de Bishop / Bishop simplificado), apesar da mesma denominação.

O SI pode variar de 0 (situação mais instável) a 1,5 (situação mais estável). O SINMAP é simulado para 6 classes de SI, conforme mostrado no Quadro 4. Uma vantagem do modelo é que ele não está restrito a um programa e sistema operacional específicos. Ao invés disso, apresenta a opção de ser usado na plataforma MapWindow (software GIS de código aberto). Mais informações sobre o SINMAP podem ser obtidas em USU (2017).

Ebel et. al. (2018) sugeriram que estimativas de parâmetros hidráulicos em meios insaturados, com base em dados de campo *in situ*, em contraste com medições de laboratório, podem levar a uma simulação mais precisa da resposta hidrológica à chuva. Porém, como não foi possível realizar experimentos mais aprofundados para identificar alguns parâmetros do solo e correlacioná-los com as informações existentes, para o local do estudo foram utilizados dados da literatura correspondentes para o mesmo tipo de solo de regiões vizinhas. Experimentos mais específicos, voltados para caracterizar parâmetros de solo, não foram realizados devido ao custo financeiro, acessibilidade precária e falta de segurança na comunidade.

A identificação do tipo de solo em Lagoa Encantada foi feita com base no ensaio de prospecção com trado manual, realizado *in situ*, e posteriormente em ensaios de laboratório para caracterização das amostras deformadas, segundo a classificação USCS. Com o tipo do solo definido foram utilizados os parâmetros apresentados por Santana (2006), que identificaram os mesmos tipos de solo na comunidade UR2, localizada a aproximadamente 2km da área aqui estudada. No estudo, Santana (2006) coletou amostras deformadas para ensaios de caracterização, ensaios de granulometria com sedimentação, limites de Atterberg e densidades; amostras não perturbadas para testes de cisalhamento direto; testes de permeabilidade "Tri-Flex" e permeabilidade *in situ* "Guelph".

Para a Formação Barreiras, em Recife, estudos mostraram que os perfis de umidade, tanto no inverno, quanto no verão, diferem apenas nos primeiros três metros de profundidade, delimitando a superfície potencial de escorregamento na área estudada (Gusmão Filho, 1997). Normalmente, dependendo das intercalações de camadas de areia drenantes e camadas de argila impermeáveis, bem como da característica da camada superficial, na maioria dos casos encontram-se lençóis freáticos muito profundos e franjas de umidificação superficial variável. Essas informações serviram de base para a determinação da profundidade média de ruptura, estimada visualmente em 2 metros em campo.

Para a simulação e formação do mapa de suscetibilidade do Cenário 1 (baixa incidência

de chuva), foi utilizado, como valor de recarga do lençol freático, o volume precipitado em novembro, registrado pela Plataforma de Coleta de Dados (PCD) Alto da Bela Vista. Considerando que o mês de novembro apresentou o menor índice pluviométrico diário na série de dados disponíveis, com valores próximos de zero, optou-se por utilizar, no referido Cenário 1, o total mensal precipitado ocorrido no mês, como recarga máxima e mínima. A situação de chuvas máximas diárias, na região estudada ocorre em média no trimestre mais chuvoso, entre os meses de maio e julho, sendo junho, normalmente, o mês mais crítico. Para o Cenário 2 foi utilizada a maior precipitação ocorrida em 48 horas consecutivas, em todas as séries de chuvas registradas no PCD.

Empregando a mesma série de dados de precipitação utilizada para os Cenários 1 e 2 e seguindo a mesma estratégia de raciocínio, foram simulados os Cenários 3 e 4 para as chuvas máximas de 24 horas e 12 horas consecutivas de chuva, respectivamente.

4.1.1 Tratamento das imagens utilizadas no modelo SINMAP

Witt (2005) e Menon Júnior (2016) citam que a principal restrição para obter resultados com melhor precisão, utilizando o modelo SINMAP, e para uso de outros modelos baseados no Modelo Digital do Terreno (MDT) é a indisponibilidade de dados de elevação digital de alta qualidade.

O programa possui procedimentos para aumentar a precisão e eliminar erros potenciais inerentes à grade MDT. As correções de preenchimento de falhas são executadas automaticamente por interpolação, para eliminar erros criados durante a preparação inicial da imagem (Witt, 2005).

O tempo de processamento para MDTs, com grandes áreas espaciais, pode ser extremamente longo, dependendo da velocidade e disponibilidade de memória do computador do usuário.

Porém, o aumento da qualidade do MDT resulta na presença de áreas com índice de estabilidade não calculado, classificado como “*no data*”. Portanto, o aumento na precisão do MDT pode aumentar também as regiões sem SI calculado. Segundo Thiebes et al. (2016), isso ocorre porque a direção do fluxo e a área de captação específica são calculadas para cada célula. Quando esta área não pode ser calculada, o modelo atribui o valor “*no data*”.

Witt (2005) comparou a área calculada pelo SINMAP para os MDTs de 10m e 30m, mostrando que, para o MDT de 10m, em algumas regiões, os índices de estabilidade não foram

calculados, mas atribuíram valores “*no data*”. Sulaiman et al. (2017) testaram o uso de diferentes resoluções espaciais do MDT (20m, 30m, 40m, 60m e 80m) em relação à precisão do modelo. Os resultados mostraram que o MDT mais grosseiro mostra uma diminuição na identificação da área instável. O mesmo trabalho também menciona que, ao aumentar o tamanho das células do MDT, a área total capturada é reduzida, assim como as áreas com SI. Ou seja, mesmo utilizando o MDT de 1 metro, pode não ser possível contornar os problemas, devido às características do terreno e do programa.

4.1.2 Parâmetros físicos do solo

As sondagens de campo ocorreram em setembro de 2017, logo após o período de chuvas para a região. Nos 10 dias anteriores, assim como na jornada de trabalho, não houve chuvas de volume significativo, o que poderia interferir nos resultados. As chuvas diárias registradas foram consideradas, de acordo com Souza et al. (2012), como dia seco (precipitação < 2,2 mm) ou chuva muito leve ($2,2 \text{ mm} \leq \text{chuva} < 4,2 \text{ mm}$).

Para avaliação do perfil realizaram-se cinco perfurações a trado manual para simples reconhecimento, em três níveis de cota, em dois diferentes locais na comunidade de Lagoa Encantada. Estes locais foram previamente estabelecidos durante a visita de reconhecimento de campo, levando em consideração os locais onde ocorreram anteriormente acidentes considerados relevantes, buscando-se a criação de um perfil de solo na área. Das sondagens a trado foram obtidas amostras deformadas do solo, através de perfurações manuais de pequeno diâmetro.

Os três primeiros furos foram realizados fora de áreas previamente deslizadas, em local identificado como Ponto 1, mas compondo um perfil único de solo, em três cotas diferentes. Os dois seguintes, no Ponto 2, referem-se ao local de deslizamento ocorrido no dia 28/06/2011, onde uma igreja evangélica localizada na Avenida Doutor Benigno Jordão de Vasconcelos foi destruída, como apresentado na Figura 23.

Durante a coleta, sem chuva, foi observada a ocorrência de água servida infiltrando na encosta. A água encontrada no furo 1 apresentou forte cheiro de esgoto e cloro.

Figura 23. Local onde se situava a igreja, destruída pelo deslizamento ocorrido em 28/06/2011.



Fonte: A autora, 2017.

4.1.3 Ensaios para classificação de amostras do solo (USCS)

As amostras foram peneiradas para determinação da classificação granulométrica. Para os Limites de Atterberg, foram realizados procedimentos para determinação do Limite de Liquidez (WL) e Limite de Plasticidade (WP), com uso de amostra preparada com secagem prévia.

Segundo Meira (2008) *apud* De Ploey & Poesen (1985), a granulometria do solo tem relação com a erodibilidade e não pode ser considerada como único parâmetro para explicar as características do solo, porque as frações de areia, silte e argila, normalmente, não são isoladas. As mesmas encontram-se agrupadas, podendo ser estáveis ou não, dependendo da coesão entre as partículas.

4.1.4 Características físicas dos solos na região

Meira (2008) estudou a Localidade de III Carneiros no Ibura, localizada a aproximadamente 3km de Lagoa Encantada, também em área de Formação Barreiras. Foram realizadas sondagens de simples reconhecimento, com determinação de NSPT (*Standard Penetration Test*), para caracterização do perfil *in situ*. Durante a investigação geotécnica também foram determinados perfis de umidade, classificação USCS, entre outras. O estudo classificou o solo como areia siltosa (SM).

Bandeira (2010) realizou ensaio de solos na localidade do Alto II Carneiros, no Ibura, localizada a aproximadamente 3km de Lagoa Encantada, em área igualmente de Formação

Barreiras. Os resultados obtidos, na classificação unificada (USCS), as amostras foram classificadas como CL: argila de baixa plasticidade.

Santana (2006) pesquisou e caracterizou o solo encontrado na UR2, unidade habitacional localizada no bairro do Ibura, a aproximadamente 2km de Lagoa Encantada. Para a realização do estudo foi executada campanha de campo e estudos de laboratório, tais como: coleta de amostras deformadas e indeformadas para ensaio de caracterização, ensaio de cisalhamento direto, ensaios de permeabilidade, entre outros. Os ensaios mostraram que existem três tipos de solo na área: areia argilosa (SC), argila de baixa plasticidade (CL) e silte arenoso (ML).

Outras pesquisas foram também realizadas com amostras de solo da Região Metropolitana do Recife, proveniente da geologia da Formação Barreiras. O Quadro 11 apresenta uma síntese dos parâmetros de resistência.

Quadro 11. Parâmetros de resistência ao cisalhamento de solos provenientes da Formação Barreiras no Ibura

Referência/Local	Tipo de ensaio	Descrição/Classificação	Condição do Corpo de Prova	C (kpa)	ϕ (°)
Meira (2008) / III Carneiros - Ibura	Cis. Direto	Areia siltosa (SM)	Natural	1,0 – 4,2	28 – 34
			Inundado	0,4 – 3,5	23 - 26
Bandeira (2010) / II Carneiros - Ibura	Cis. Direto	Argila de baixa plasticidade (CL)	Inundado	0,0 – 15,0	16 - 36
Santana (2006) / UR2 - Ibura	Cis. Direto	Areia argilosa (SC)	Natural	20,28	31,8
			Inundado	0,0	36,1
		Argila de baixa plasticidade (CL)	Natural	43,57	43,7
			Inundado	0,0	29,0
		Silte arenoso (ML)	Natural	-	-
			Inundado	8,8	29,4

Fonte: A autora, 2018.

4.1.5 Características hidrodinâmicas: transmissividade e recarga do solo

As características hidrodinâmicas ligadas ao solo, em Lagoa Encantada, foram realizadas por correlação, como foi feito com as características físicas. O Quadro 12 apresenta os valores dos coeficientes de permeabilidade de solos da Formação Barreiras, na RMR no Ibura.

Para o cálculo da transmissividade, a estimativa da profundidade do solo da bacia foi realizada através de observações em campo. A profundidade de ruptura é equivalente à franja de umedecimento. Dessa forma, foi adotado como profundidade das superfícies de ruptura o valor de 2m em média.

Quadro 12. Valores dos coeficientes de permeabilidade de solos no Ibura

Referência/Local	Descrição/ Classificação	Permeabilidade (m/s)		Tipo de ensaio
		" <i>in situ</i> "	Laboratório	
Meira (2008) III Carneiros - Ibura	Areia siltosa (SM)	1,3 x 10 ⁻⁵ a 9,1 x 10 ⁻⁷	1,0 x 10 ⁻⁵ a 6,4 x 10 ⁻⁷	Guelph e Triflex
Bandeira (2010) II Carneiros - Ibura	Argila de baixa plasticidade (CL)		3,35 x 10 ⁻²	
Santana (2006) UR2 - Ibura	Areia argilosa (SC)	1,89 x 10 ⁻⁵ a 3,15 x 10 ⁻⁵	2,12 x 10 ⁻⁵	Guelph e Triflex
	Argila de baixa plasticidade (CL)	-	1,45 x 10 ⁻⁶	Triflex
	Silte arenoso (ML)	-	1,89 x 10 ⁻⁵	Triflex

Fonte: A autora, 2018.

4.1.6 Pontos de deslizamento

Os pontos definidos para o estudo correspondem às ocorrências de deslizamentos de barreiras e muros de arrimo com e sem danos, além das solicitações para vistoria, monitoramento e colocação de lonas plásticas, entre os anos de 2013 e 2017.

Analisando as informações fornecidas pela Defesa Civil observa-se que uma mesma localidade apresenta ocorrências em vários anos. Dessa forma, para efeito de calibração do modelo, tal endereço (coordenadas pontuais) é contabilizado como um único ponto, independente dos anos dos diferentes registros.

4.2 BALANÇO HÍDRICO NO SOLO

O modelo SINMAP auxilia na determinação da suscetibilidade ao deslizamento com base na precipitação, declividade do terreno e tipo de solo existentes na área analisada. Entretanto, para auxiliar a análise do perigo existente, é necessário simular o balanço hídrico no solo.

A previsão de um deslizamento de terra depende da pressão da água dos poros, uma consequência da chuva incidente, que é quantificada de forma determinística pela Equação de Richards (van Genuchten, 1980). O balanço hídrico no solo foi simulado buscando determinar o acúmulo de água, em situação que pudesse deslizar, auxiliando na avaliação de áreas e situações de risco, com base na análise conjunta do relevo e da infiltração de água no solo. O software Hydrus-1D (Šimůnek et al., 2013), que visa simular o movimento unidimensional da água, foi selecionado para esta finalidade, conforme citado anteriormente. O modelo oferece a opção de quatro modelos hidráulicos analíticos que descrevem a retenção de água no solo, em função da condutividade hidráulica. Mais informações em PC-progress (2019).

Zhang et al. (2017) aplicaram o modelo SINMAP ao município de Zhouqu, identificando, com sucesso, áreas suscetíveis a deslizamentos, e determinaram a condutividade hidráulica saturada para uso no modelo, usando o software Hydrus-1D. Portanto, é razoável supor que o Hydrus-1D pode ser usado para simular, adequadamente, a infiltração na região estudada.

Neste trabalho, o modelo Hydrus-1D foi utilizado para reproduzir o balanço hídrico no solo, na mesma situação simulada para o uso do SINMAP, no período de inverno (Cenário 2), tornando possível uma avaliação conjunta dos resultados. Numa segunda análise utilizou-se o modelo para simular o balanço hídrico, em situações reais de deslizamento ocorrido na localidade de Lagoa Encantada.

4.2.1 Parâmetros de entrada Hydrus-1D

Para determinação do balanço hídrico no solo utilizou-se o módulo padrão do programa Hydrus-1D para cálculo da infiltração de água, em um perfil de duas camadas do solo. Não foi considerada, nos cálculos, a opção da estimativa da recarga de água subterrânea pois, durante a prospecção, não foi encontrada a presença de lençol freático. Supôs-se, para o modelo, que o lençol freático estivesse localizado muito abaixo do fundo do domínio do solo e, portanto, não afetaria os processos de fluxo no perfil do solo adotado. Como os ensaios específicos não puderam ser realizados para a determinação dos parâmetros necessários ao modelo, além da falta de adequação do módulo Rosetta ao Hemisfério Sul, houve a necessidade de converter a classificação unificada do solo na classificação do sistema agrônomico americano, disponibilizada pelo sistema. Dessa forma, optou-se por utilizar os parâmetros hidráulicos dos solos fornecidos pelo programa, que são estimativas médias para as diferentes classes de textura.

Considerando-se que durante a prospecção realizada o solo encontrado foi classificado pelo Sistema Unificado USCS, utilizou-se a opção de solo *Loamy sand*, no catálogo de solos, como a melhor alternativa para representar a localidade. Não foi utilizado o módulo ROSETTA Lite (Schaap et al., 2001), para classificação do mesmo solo identificado pelo sistema USCS, pois era necessária a distribuição de tamanho de grão para prever os parâmetros hidráulicos e não foram feitos ensaios para classificação das partículas finas do solo. Dessa forma, a reclassificação do solo foi realizada pela utilização do catálogo oferecido, sendo necessário adaptar e utilizar o sistema trilinear de classes de textura do solo do *United States Department of Agriculture (USDA)*.

É importante ressaltar que, na área em estudo, como a camada superficial do solo é submetida a transformações causadas por intempéries e outros agentes, foi observada em campo uma fina camada superficial, mais argilosa, impermeabilizante, produto de um maior intemperismo e com muito húmus.

Dessa forma, nota-se que na área em estudo, como a camada superficial do solo está sujeita a transformações causadas pelo clima, exposição ao sol e outros agentes, uma fina camada impermeável ou semipermeável é formada acima do solo. Assim, para melhor representar as condições reais do solo, considerou-se que o solo estava dividido em duas camadas: 1) uma camada inicial de solo arenoso argilo-franco de 0cm a 12cm de profundidade; e 2) uma segunda camada de 13cm a 200cm de solo arenoso argiloso. A camada mais fina foi

identificada, visualmente, por um profissional experiente da área de geotecnia, durante a visita ao local. A profundidade das duas camadas, que representam o perfil do solo, totalizou 2 metros da superfície de ruptura, mesma profundidade considerada para o SINMAP. O modelo hidráulico analítico escolhido para avaliar a infiltração, na área piloto, foi o de van Genuchten (1980), considerando-se que o escoamento superficial começa, apenas, quando a profundidade da camada de água superficial atinge 3cm.

Durante a prospecção, apenas o Furo 2 apresentou presença de água a 4,95m, mas não há certeza de que corresponda a presença de lençol freático. Dessa forma, não foi considerada a opção da estimativa da recarga de água subterrânea.

A sequência de telas para o cálculo do balanço, utilizando o Hydrus-1D, e suas opções de análise, podem ser observadas no Apêndice A.

4.3 ANÁLISE COMBINADA SINMAP E HYDRUS-1D

A análise combinada dos mapas índice de estabilidade e saturação e seus resultados, para os quatro cenários avaliados, foi realizada para avaliar a resposta do modelo, quando submetido ao aumento da recarga, na comunidade de Lagoa Encantada.

O uso dos resultados obtidos com a simulação Hydrus-1D, em simulações de deslizamentos reais, combinadas com as simulações para o Cenário 2 SINMAP, foram feitas para avaliar se há similaridade entre o volume de água infiltrado em ambas as situações. Havendo semelhança entre as simulações de volume infiltrado, em situações de deslizamento, tem-se a possibilidade de determinação de estados críticos de umidade do solo, causadores de deslizamento.

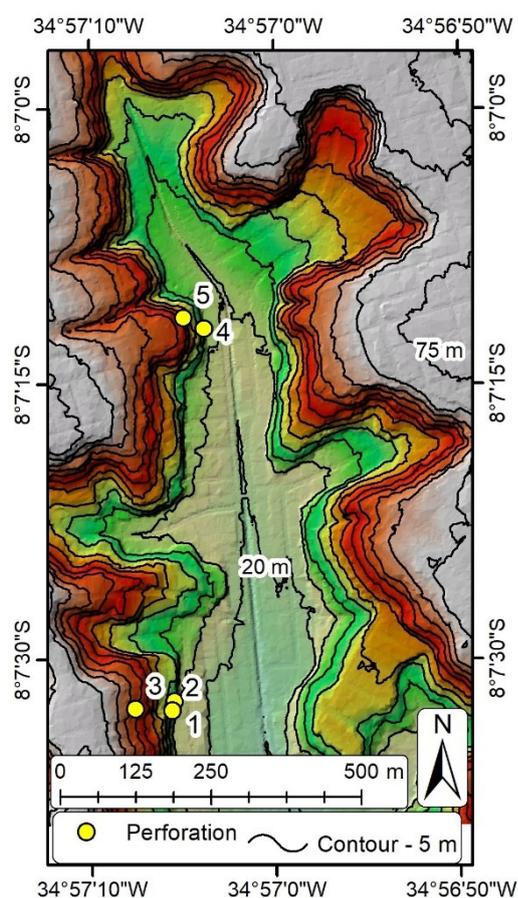
A interseção das respostas entre o volume crítico infiltrado Hydrus-1D e a evolução da instabilidade apresentada pelo SINMAP, quando submetidas à mesma recarga de precipitação no solo, indica uma possível estratégia prática proposta neste trabalho, para melhor compreender as causas dos deslizamentos por infiltração, solo e relevo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 RECONHECIMENTO DO PERFIL DE SOLO E CLASSIFICAÇÃO USCS

As localizações dos pontos de perfuração estão representadas na Figura 24. As coordenadas e profundidades alcançadas em cada uma das perfurações são apresentadas na Tabela 1.

Figura 24. Localização dos pontos de perfuração em Lagoa Encantada.



No Ponto 1 as profundidades alcançadas pela prospecção para os três níveis foram de até 8,90 m e para os dois níveis do Ponto 2, até 7,50m por causa da resistência do solo. O perfil do subsolo para cada perfuração pode ser visto nas Figuras 25 e 26.

Nos furos realizados foram retiradas amostras a cada metro de profundidade, ou mudança visual de camada, para serem posteriormente submetidas a análises laboratoriais de classificação e caracterização. As amostras deformadas foram peneiradas e a classificação granulométrica realizada para uso pela USCS. Não foram realizados ensaios de granulometria

por sedimentação para determinar a porcentagem de partículas de argila e silte. Os Limites de Atteberg (Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade) foram determinados utilizando uma amostra preparada, com secagem prévia, conforme descrito na seção 4.1.3.

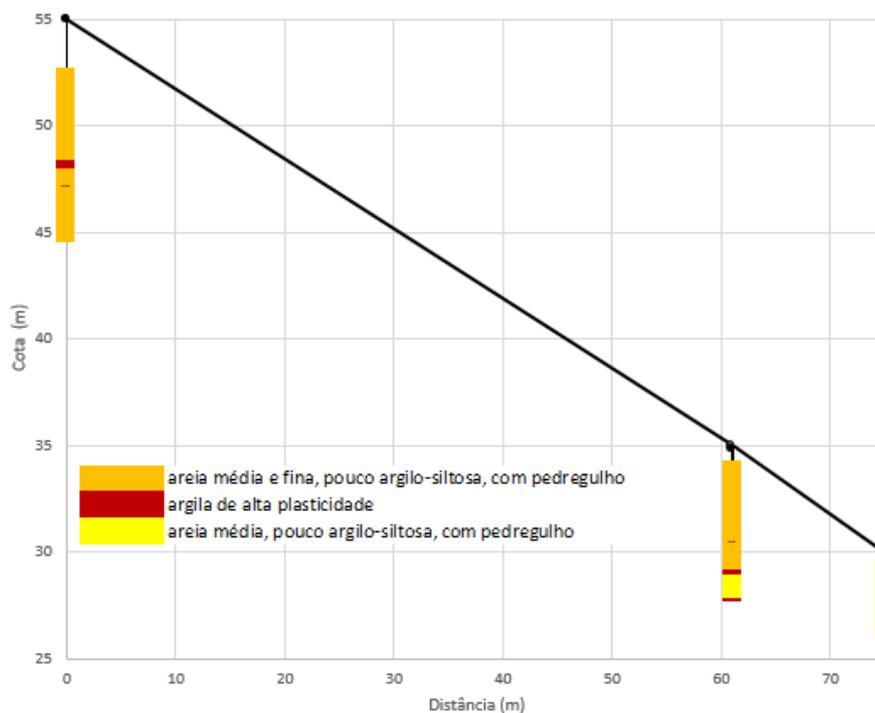
Tabela 1 - Furos de sondagem a trado realizados em Lagoa Encantada

Ponto	Furo	Coordenada		Altitude (cota em m)	Profund. alcançada (m)	Nível da água (m)
		Latitude	Longitude			
1	1	8° 7' 32,32"	34° 57' 5,29"	30,0	3,70	-
	2	8° 7' 32,80"	34° 54' 5,40"	35,0	7,05	-
	3	8° 7' 32,70"	34° 57' 7,40"	55,0	8,90	-
2	4	8° 7' 12,00"	34° 57' 3,60"	30,0	7,00	4,95
	5	8° 7' 11,40"	34° 57' 4,70"	45,0	7,50	-

Fonte: A autora, 2017.

Observa-se que o nível da água encontrado no Furo 4 (Tabela 1) apresentava forte cheiro de esgoto e água sanitária, o que reforça a presença da infiltração de águas servidas no local.

Figura 25. Perfil do subsolo - Ponto 1 (perfurações 1 a 3)



No Furo 2 a amostra de número 1 apresentou as mesmas características da amostra 2.

Para evitar resposta em duplicidade, a amostra 1 foi descartada na avaliação final. As curvas granulométricas para os furos são ilustradas nas Figuras 27 a 31.

Figura 26. Perfil do subsolo - Ponto 2 (perfurações 4 e 5)

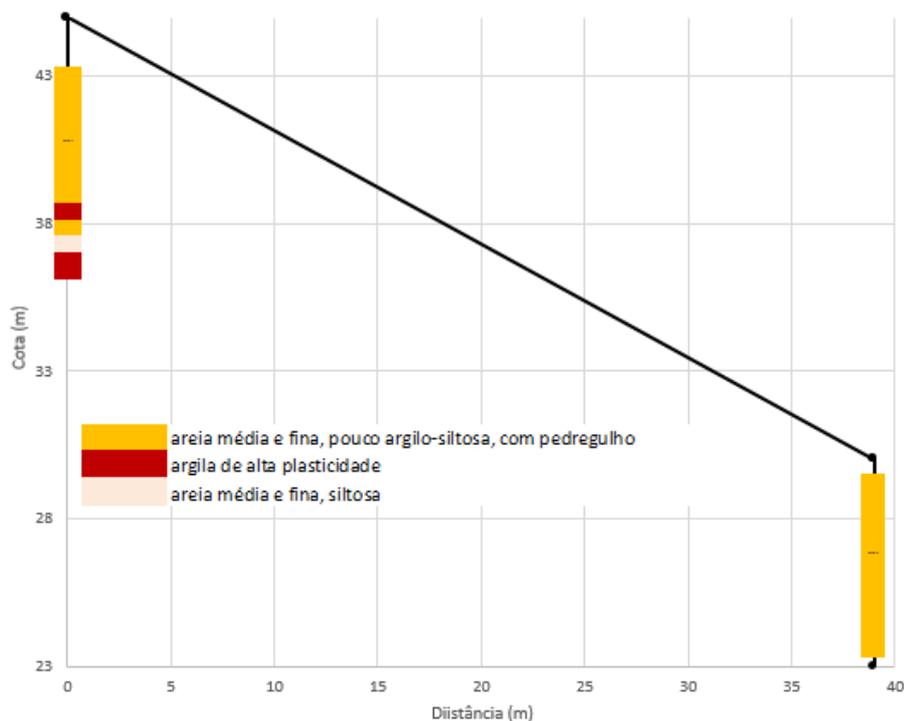


Figura 27. Curva Granulométrica – Furo 1

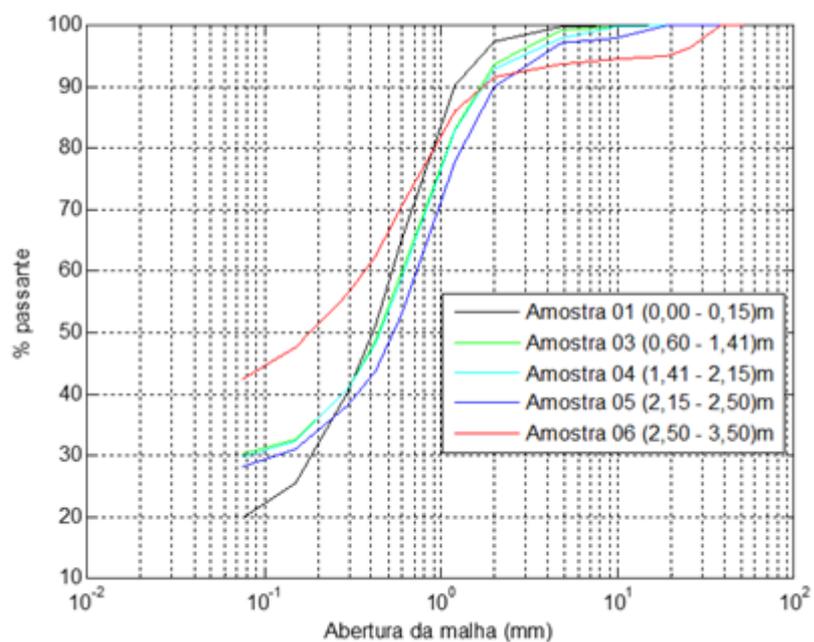


Figura 28. Curva Granulométrica – Furo 2

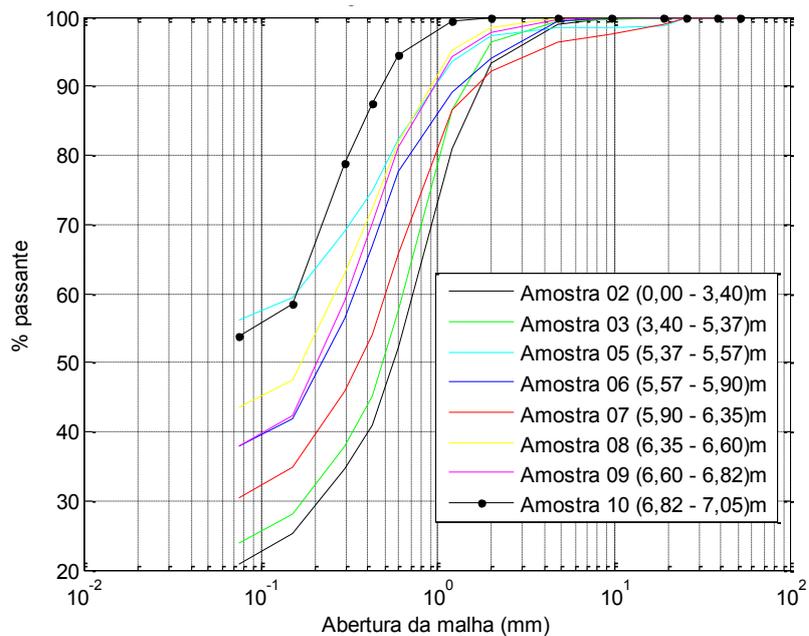


Figura 29. Curva Granulométrica – Furo 3

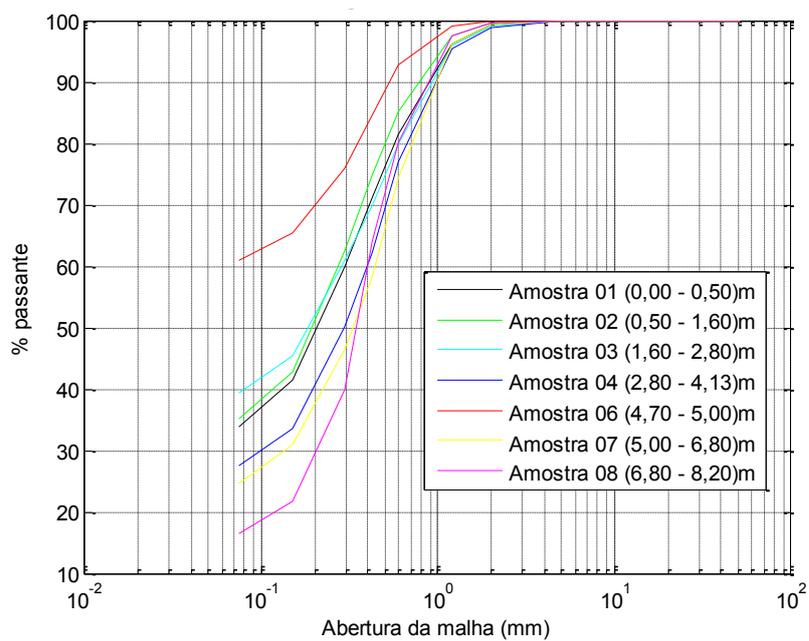


Figura 30. Curva Granulométrica – Furo 4

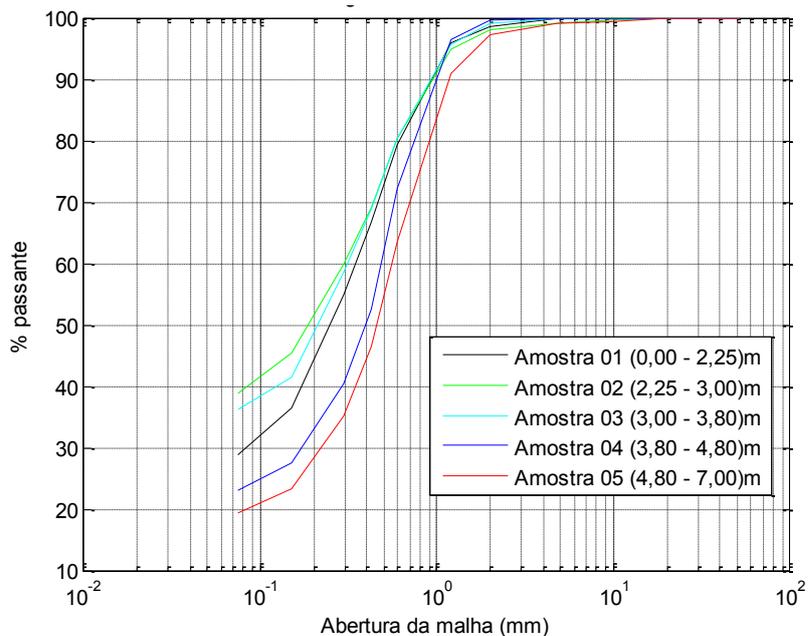
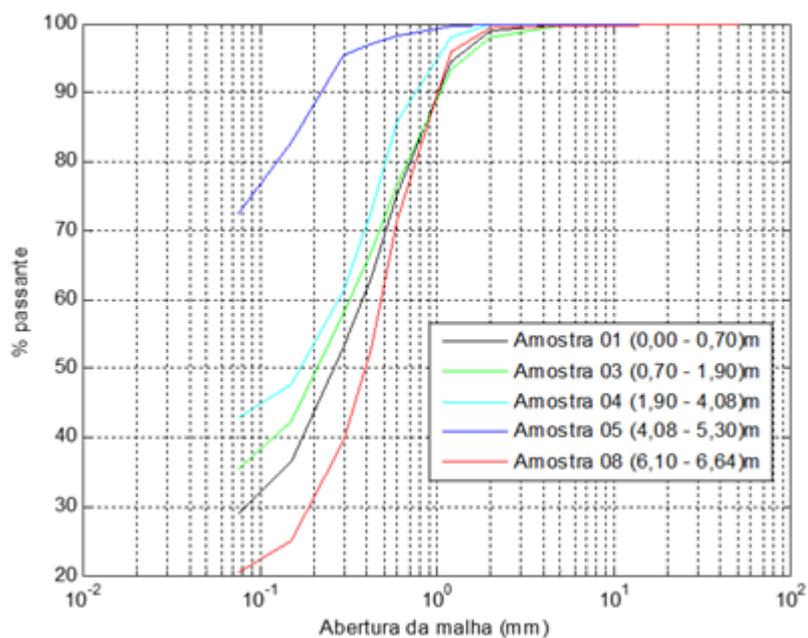


Figura 31. Curva Granulométrica – Furo 5



Os resultados das análises de granulometria e limites dos solos, obtidos a partir das sondagens nos cinco furos, são apresentados na Tabela 2. Observa-se, em suas classificações, que os solos apresentam variações entre areia argilosa (SC), argila de baixa plasticidade (CL) e areia siltosa (SM).

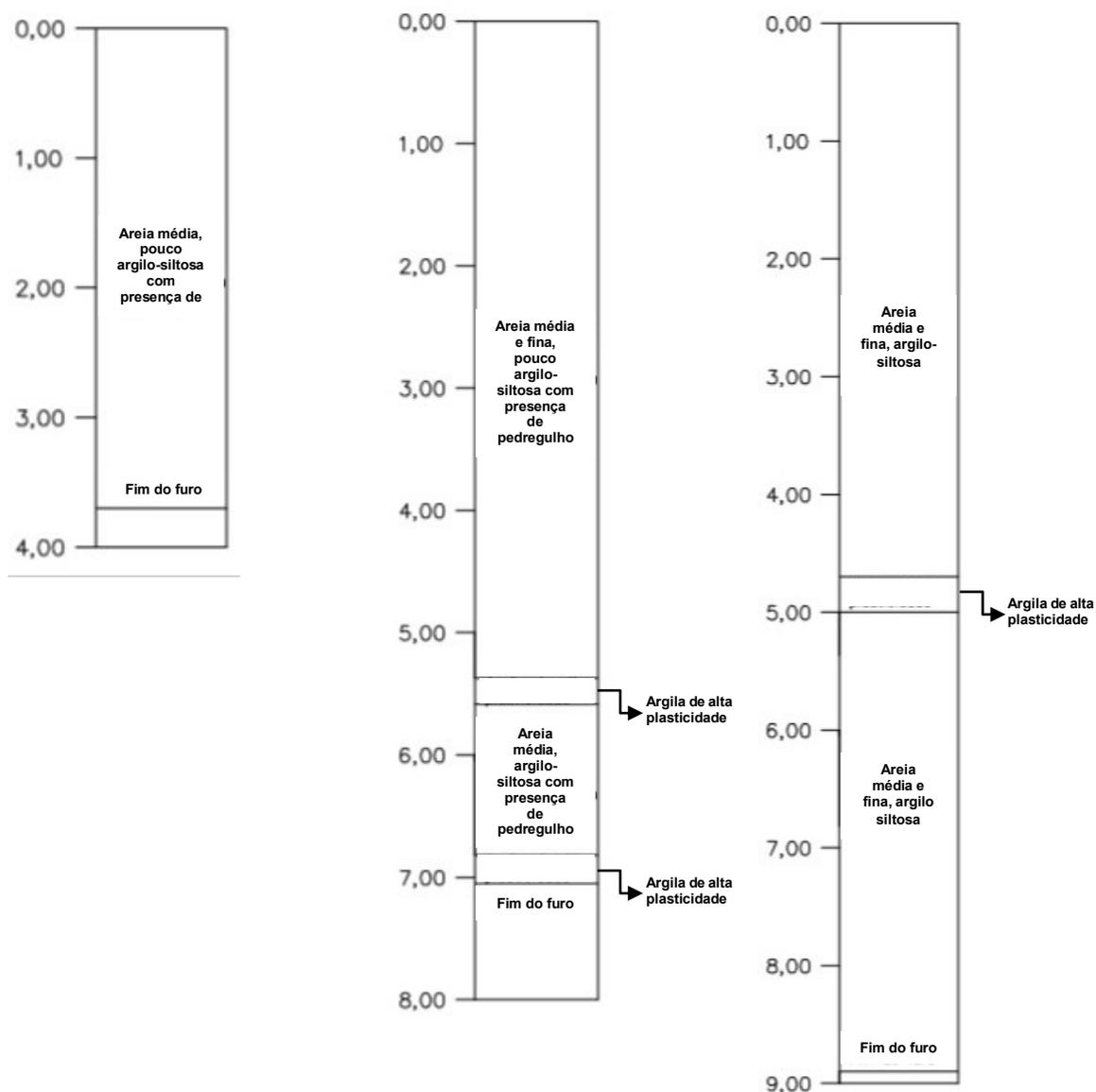
Tabela 2. Composição granulométrica das amostras

Furo/Profundidade (m)	Composição Granulométrica (%)					% Pass. na #200	Consistência (%)	
	Pedregulho	Areia			WL		IP	
		Grossa	Média	Fina				
F 01	0,00 a 0,15	0,5	9,4	49,9	20,4	19,7	22,82	6,73
	0,15 a 0,60	0,1	4,1	35,0	21,6	39,3	25,71	13,26
	0,60 a 1,41	1,0	16,0	42,4	10,5	30,1	31,13	10,61
	1,41 a 2,15	2,4	14,9	42,0	11,2	29,5	35,19	13,80
	2,15 a 2,50	3,1	19,2	39,9	9,8	28,1	35,87	13,79
	2,50 a 3,50	6,5	7,5	29,8	13,9	42,3	46,86	21,07
	3,50 a 3,70	1,0	16,0	42,4	10,5	30,1	31,13	10,61
F 02	0,00 a 3,40	1,0	17,9	46,5	13,7	20,8	19,45	6,15
	3,40 a 5,37	0,6	12,8	48,8	13,8	24,0	25,33	11,85
	5,37 a 5,57	1,5	5,0	24,6	2,8	56,1	44,01	17,21
	5,57 a 5,90	0,6	10,2	32,8	18,5	37,9	38,02	17,05
	5,90 a 6,35	3,6	9,7	40,8	15,4	30,5	31,57	16,77
	6,35 a 6,60	0,2	4,5	32,4	19,4	43,5	42,99	22,24
	6,60 a 6,82	0,3	5,3	35,3	21,1	38,0	36,90	17,26
	6,82 a 7,05	0,0	0,6	20,5	25,1	53,8	44,01	20,59
F 03	0,00 a 0,50	0,1	3,7	36,4	26,0	22,9	27,75	11,83
	0,50 a 1,60	0,0	2,5	34,9	27,5	35,1	25,74	14,50
	1,60 a 2,80	0,1	4,1	35,0	21,6	39,3	25,71	13,26
	2,80 a 4,13	0,1	4,6	45,3	22,6	27,5	17,71	8,07
	4,13 a 4,70	0,1	4,1	35,0	21,6	39,3	25,71	13,26
	4,70 a 5,00	0,0	1,0	23,1	15,1	60,8	29,77	11,95
	5,00 a 6,80	0,1	3,6	49,8	21,8	24,7	17,58	7,45
	6,80 a 8,20	0,1	2,4	57,8	23,3	16,4	19,57	8,82
	8,20 a 8,90	0,1	3,6	49,8	21,8	24,7	17,58	7,45
F 04	0,00 a 2,25	0,2	4,0	40,8	26,3	28,7	22,82	6,73
	2,25 a 3,00	0,8	4,4	35,0	20,9	38,9	24,96	7,22
	3,00 a 3,80	0,1	4,1	37,2	22,3	36,2	20,08	5,55
	3,80 a 4,80	0,0	3,5	56,1	17,4	23,0	16,68	6,15
	4,80 a 7,00	1,0	8,1	55,8	15,6	19,5	17,10	4,70
F 05	0,00 a 0,70	0,1	5,5	41,3	24,3	28,8	22,43	7,37
	0,70 a 1,90	0,4	6,3	35,3	22,6	35,4	25,95	8,69
	1,90 a 4,08	0,0	1,9	36,7	18,6	42,8	28,45	10,48
	4,08 a 5,30	0,0	0,3	4,1	23,4	72,2	35,02	10,75
	5,30 a 6,10	0,0	1,9	36,7	18,6	42,8	28,45	10,48
	6,10 a 6,64	0,3	3,9	56,3	19,2	20,3	NL	-
	6,64 a 7,50	0,0	0,3	4,1	23,4	72,2	35,02	10,75

Fonte: A autora, 2017.

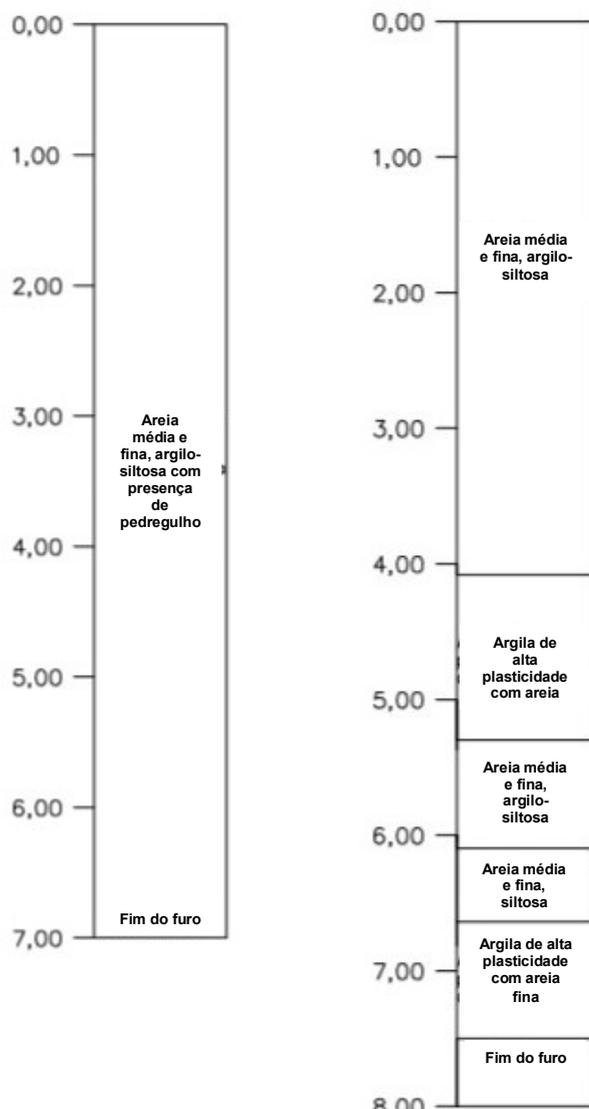
O perfil do subsolo, para cada furo, pode ser observado nas Figuras 32 e 33. Em geral, observa-se diferença de coloração ao longo da profundidade, variando desde tons vermelhos escuros, amarelos, róseos e brancos.

Figura 32. Perfil do subsolo – Ponto 1 (Furos 1 a 3)



De acordo com as amostras obtidas na localidade de Lagoa Encantada, observa-se que o solo na área é, em sua maioria, do tipo SC (areia argilosa), sendo possível a utilização de parâmetros encontrados na literatura para análise no programa SINMAP.

Figura 33. Perfil do subsolo – Ponto 2 (Furos 4 e 5)



5.2 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES SINMAP

Este item apresenta os resultados e a análise dos dados obtidos pela utilização do modelo SINMAP para MAPWINDOW correspondentes a quatro cenários de precipitação: 1) Cenário 1 (chuva de todo o mês novembro); Cenário 2 (chuva máxima de 48 horas); Cenário 3 (chuva máxima de 24 horas); e Cenário 4 (chuva máxima de 12 horas). Os dados de entrada levantados para uso do modelo são apresentados, tais como: parâmetros físicos e hidrodinâmicos do solo e mapeamento dos pontos de deslizamento.

O acúmulo de água no solo, nos dias anteriores aos deslizamentos, é um importante fator desestabilizador. Dessa forma, foi simulado o balanço hídrico no solo, utilizando o Hydrus-1D

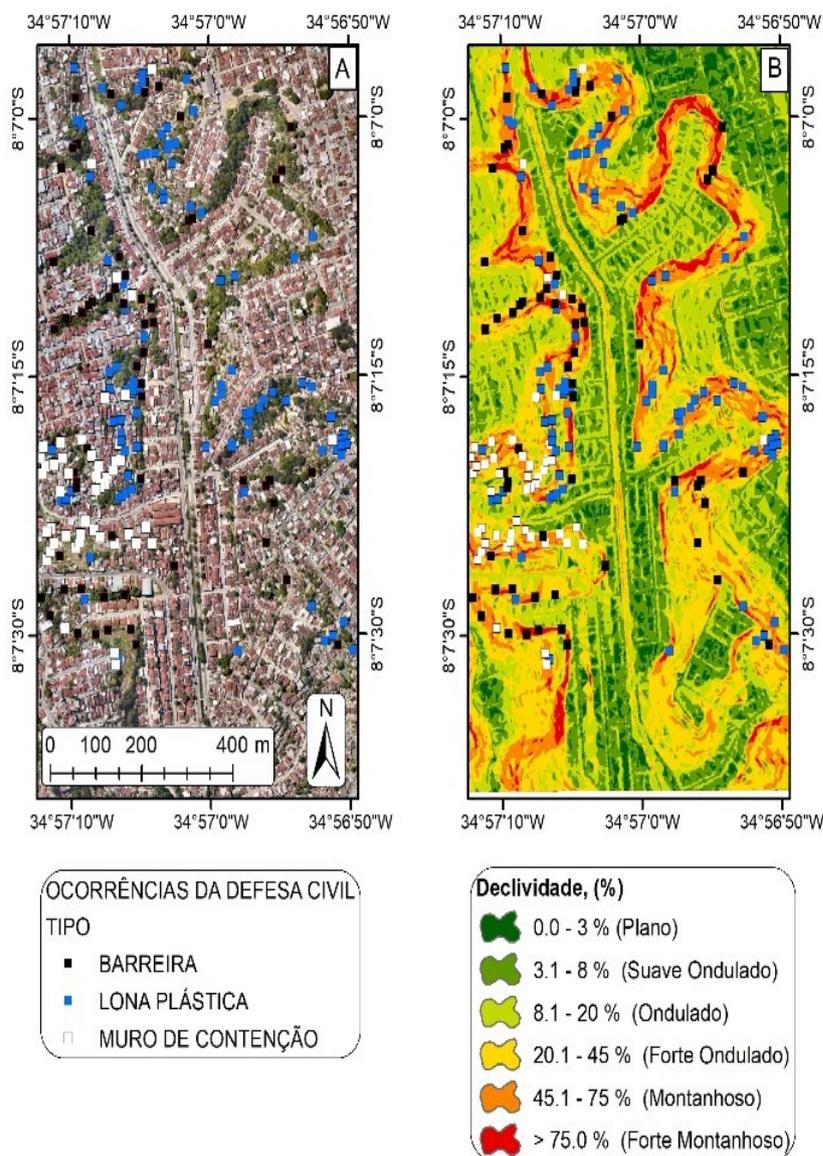
para tentar entender como a água infiltrada contribui para o risco de escorregamentos na região. O balanço foi calculado para duas situações: 1) Cenário 2 simulado pelo SINMAP, onde a chuva máxima por 48 horas, de toda a série registrada na comunidade, foi utilizada como recarga de água no solo; 2) simulação do volume de água acumulado, no solo, em situações reais de escorregamentos ocorridos em 2014 e 2015.

5.2.1 Resultados de suscetibilidade ao deslizamento utilizando SINMAP para MAPWINDOW

O programa SINMAP foi testado para quatro cenários de precipitação capazes de provocar deslizamento na área. Considerando-se toda a localidade de Lagoa Encantada como sendo solo do tipo areia argilosa (SC - *clayey sand*), com base nas informações encontradas em Santana (2006), os parâmetros de entrada para o modelo são apresentados na Tabela 3.

O cálculo foi realizado em uma área total de 0,792km² usando o MDT com resolução espacial de 1 metro. Porém, a área efetivamente calculada pelo modelo SINMAP correspondeu a 0,614km². Ou seja, 22,46% da área total foi classificada pelo programa como “*no data*”. De todos os pontos suscetíveis plotados, apenas 75 deles foram apresentados na área com SI (índice de estabilidade) calculado. Os demais estão na área não calculada, classificados como “*no data*”. O mapa de ortofoto e declive desta região onde se localiza a comunidade (Figura 34), mostra uma região de morros com declives elevados.

Figura 34. (A) Ortofoto, e (B) Mapa de declividade de Lagoa Encantada



De acordo com as Figuras 34 (A) e (B), a vegetação nativa está principalmente nas áreas mais íngremes e não apresentaram deslizamentos identificáveis. Este fato é esperado devido à dificuldade de acesso que impede o uso do solo pela população. Na Lagoa Encantada, por exemplo, a bananeira é comum: facilita a infiltração e a desestabilização. Como alertado por McGuire et al. (2016), já citados, a vegetação pode aumentar ou diminuir a estabilidade. A aparente coesão proporcionada pelas raízes é um forte fator de estabilidade, em relação aos demais fatores, que também podem exercer influência durante eventos de chuvas extremas. Porém, segundo Guoa et al. (2019), alguns tipos de raízes podem facilitar o escorregamento, aumentando a infiltração durante a precipitação.

O valor da transmissividade ($T = 0.1526 \text{ m}^2/\text{h}$) é resultado do produto entre a condutividade hidráulica para o tipo de solo SC ($k = 0.0763\text{m/h}$), (apresentado por Santana, 2006), e a profundidade do solo suscetível a deslizamento ($b = 2\text{m}$), transmissividade essa determinada através de observação no local. A relação T/R depende da recarga do lençol freático (chuva incidente) capaz de causar deslizamento, considerada na análise. A série de precipitação utilizada para o cálculo da recarga (R) corresponde aos dados coletados pela PCD Alto da Bela Vista, operada pelo CEMADEN no Ibura entre os anos de 2015 e 2017. Foram avaliados um cenário com pouca precipitação (mês de novembro), para testar o sistema, e três cenários considerando a precipitação para o mês de junho, observado como o mês de maior pluviosidade de todos os anos.

Tabela 3. Parâmetros de entrada utilizados no modelo SINMAP em Lagoa Encantada

Parâmetros do SINMAP	Valores		Referências utilizadas
Linha de umidade do SA Plot (%)	20		Pack et al., 2005
Número de pontos no SA Plot	1000		Pack et al., 2005
Massa específica da água (kg/m^3)	1000		Padrão Utilizado
Ângulo de atrito interno do solo ($^\circ$)	Mínimo	Máximo	
	29,00	36,10	
Coesão adimensional (Equação 5)	Mínimo	Máximo	Santana, 2006
	0,00	0,17	
Massa específica do solo (ρ_s em kg/m^3)	2.670		
Aceleração da gravidade (g em m/s^2)	9,81		Padrão Utilizado
T/R (m)	Mínimo	Máximo	Valor dependente da recarga para o cenário.
	Variável	Variável	

Fonte: A autora, 2018

As Figuras 35 e 36 ilustram a precipitação diária para os meses de novembro e junho, Estação PCD Alto da Bela Vista, para a série disponível na estação no período de estudo. Observa-se que o mês de junho de 2017 é o mais chuvoso da série, com máximas de 24 horas mais significativas nos dias 15 (60,61mm) e 29 (81,21mm) e o mês de junho de 2016 o menos chuvoso.

Os cenários avaliados, suas respectivas recargas e os valores de T/R são apresentados na Tabela 4. A Tabela 5 mostra o incremento da precipitação, à qual o programa é submetido, em mm/hora. Para cada cenário, o modelo SINMAP apresenta como resultados da análise: um mapa com índices de estabilidade e saturação; uma tabela com a distribuição de área e escorregamentos em cada classe de estabilidade; o resultado gráfico do modelo de validação.

O resultado gráfico (Figura 10) indica uma relação entre a área de contribuição (*Contributing Area*) e a declividade (*Slope*) da área. Apresenta-se uma nuvem de pontos aleatórios (*Random Points*), juntamente com os pontos mapeados das cicatrizes de escorregamento (*Landslide Points*), distribuídos ao longo das curvas de saturação (*Saturated*, *Unsaturated e Wetness*) e curvas de índice de estabilidade (SI) (Menon Júnior, 2016).

Os *Random Points* são pontos escolhidos pelo programa, de forma aleatória, dentro da área analisada. São utilizados para calcular as estatísticas de suscetibilidade, comparando-os à análise dos *Landslide Points*.

Figura 35. Precipitação diária no mês de junho, para os anos de 2015 a 2017

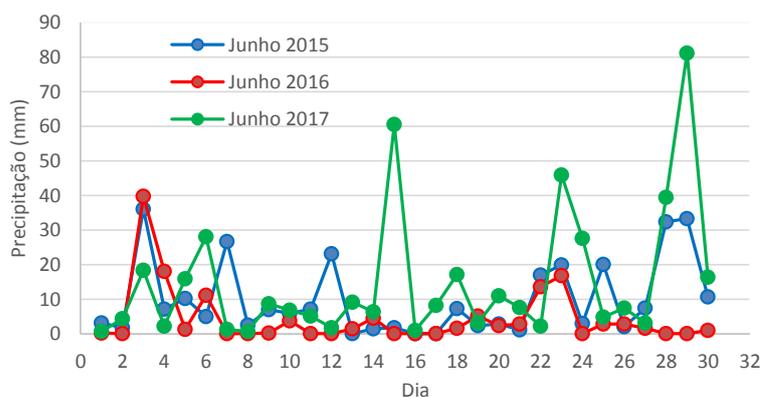


Figura 36. Precipitação diária no mês de novembro, para os anos de 2015 e 2016.

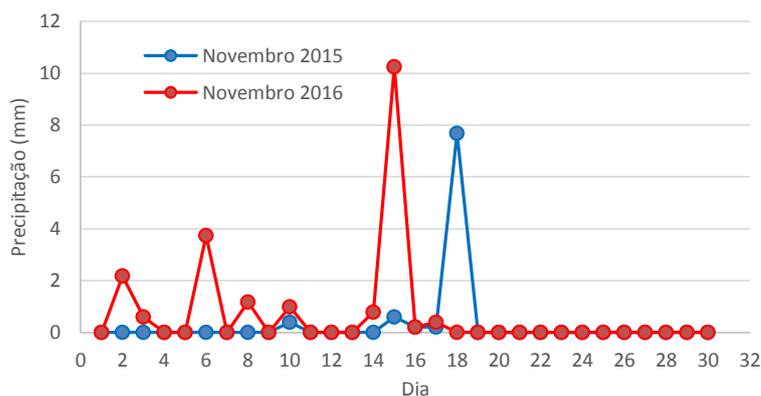


Tabela 4. Recarga considerada para os cenários de precipitação e relação T/R

Cenários	Recarga (mm)		Dia da ocorrência		T/R	
	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima	Máximo	Mínimo
Cenário 1 – chuva de todo mês novembro	20,31	9,09	11/2016	11/2015	12.090	5.411
Cenário 2 – chuva máxima de 48 horas	120,59	57,73	03 e 04/06/2016	28 e 29/06/2017	127	61
Cenário 3 – chuva máxima de 24 horas	81,21	36,01	29/06/2017	03/06/2015	102	45
Cenário 4 – chuva máxima de 12 horas	58,96	35,22	Das 5hs às 16hs do dia 29/06/2017	Das 12hs às 23hs do dia 03/06/2015	52	31

Tabela 5. Incremento de precipitação em mm/h para cada cenário

Cenários	Incremento de precipitação (mm)	
	Máxima	Mínima
Cenário 1 – chuva de todo mês novembro	0,03	0,01
Cenário 2 – chuva máxima de 48 horas	2,51	1,20
Cenário 3 – chuva máxima de 24 horas	3,38	1,50
Cenário 4 – chuva máxima de 12 horas	4,91	2,94

5.2.1.1 Avaliação dos resultados – Cenário 1 (chuva de todo mês novembro)

Para avaliar o comportamento do programa e simular situações reais de baixa precipitação, optou-se inicialmente por utilizar as menores precipitações mensais de toda a série da estação PCD Alto da Bela Vista, ocorridas em novembro de 2015 e 2016.

O mapa do índice de estabilidade gerado pelo SINMAP, para o referido cenário, está apresentado na Figura 37. O gráfico gerado, a partir do resultado do modelo de validação, é demonstrado na Figura 38. Observa-se que quase toda a área está em baixa umidade e apresenta fator de segurança estável ou moderadamente estável.

Na Figura 38 nota-se que os escorregamentos indicados pelo SINMAP ocorreram em intervalos de declividade entre 20° e 44°, ou seja, locais com declividades mais acentuadas, com

área de contribuição de até 100 m².

A maior parte dos pontos de risco mapeados encontram-se em condições de pouca umidade (*Wetness*) e índice de estabilidade (SI) inferior a 1,25. Caso ocorra deslizamento na região, o mesmo não será causado exclusivamente pela chuva, mas pela inclinação do terreno e outros fatores associados, pois 41 pontos (55%) encontram-se em área potencialmente instável (SI<1,0).

Figura 37. Índice de estabilidade e saturação (Cenário 1 - chuva de todo mês novembro)

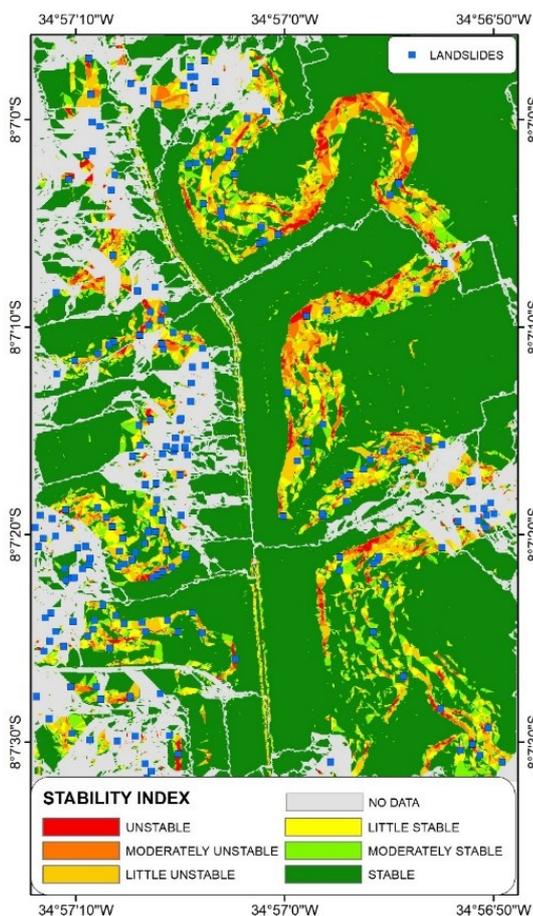
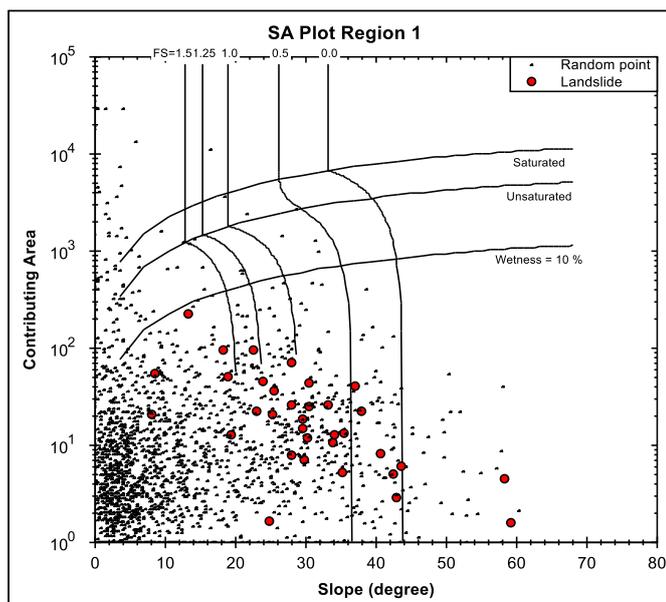


Figura 38. Resultado do modelo de validação SINMAP (cicatrizas mapeadas pela SEDEC em vermelho e pontos aleatórios do programa em preto) - Cenário 1 - chuva de todo mês novembro.



5.2.1.2 Avaliação dos resultados – Cenário 2 (chuva máxima de 48 horas)

O cenário representa a maior precipitação ocorrida em 48 horas seguidas, em toda a série de chuva registrada. Este caso ilustra uma recarga menor, em relação aos cenários 3 e 4, mais diluída no tempo, em relação à transmissividade constante. O mapa do índice de estabilidade gerado pelo SINMAP está apresentado na Figura 39. A Figura 40 mostra o gráfico gerado a partir do resultado do modelo de validação.

Observa-se a transformação de áreas estáveis (em verde), em pouco estável (em amarelo) nas áreas íngremes. A Figura 40 mostra que parte dos escorregamentos também ocorreriam em intervalos de declividade entre 20° e 44°: as mesmas apresentadas como de risco pelo Cenário 1. Entretanto, os 58 pontos de risco mapeados (77%), encontram-se na zona com maior saturação (*Saturated*), com índice de estabilidade (SI) inferior a 1,0. Tal situação mostra aumento esperado da instabilidade em relação ao Cenário 1, causado pela presença da chuva nos processos de deslizamento.

Figura 39. Índice de estabilidade e saturação (Cenário 2 - chuva máxima de 48 horas)

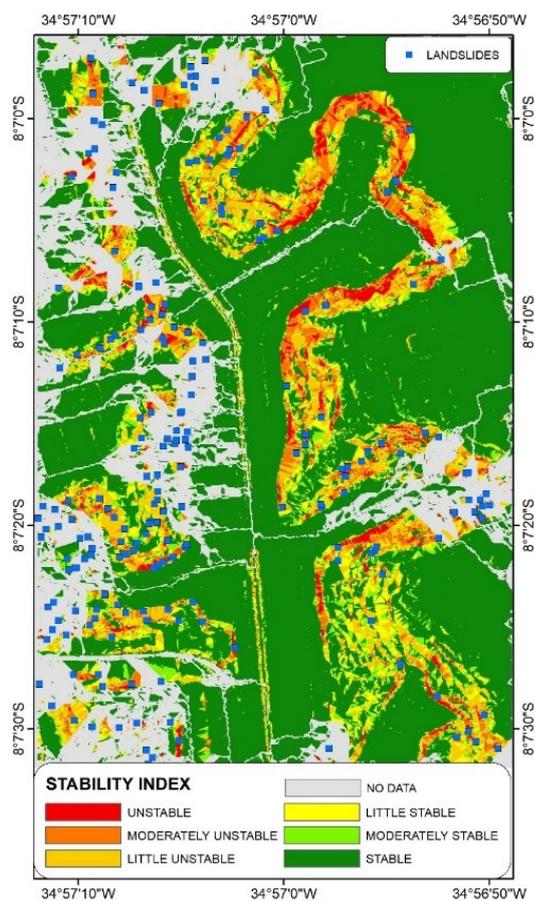
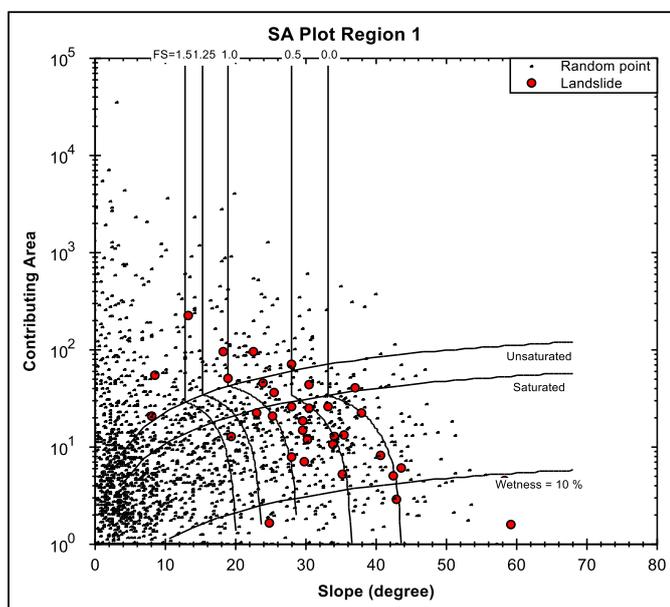


Figura 40. Resultado do modelo de validação SINMAP (cicatriz mapeadas pela SEDEC em vermelho e pontos aleatórios do programa em preto) - Cenário 2 - chuva máxima de 48 horas.



5.2.1.3 Avaliação dos resultados – Cenário 3 (chuva máxima de 24 horas)

O cenário representa a maior precipitação ocorrida em 24 horas seguidas, em toda série de chuva registrada no mês de novembro de 2015 (menor valor registrado) e 2017 (menor valor registrado). O mapa do índice de estabilidade gerado pelo SINMAP está apresentado na Figura 41. A Figura 42 mostra o gráfico gerado a partir do resultado do modelo de validação.

Os 58 pontos de risco mapeados (77%) encontram-se em condição bem distribuída entre as áreas de parcialmente úmida (Unsaturated) e saturada (Saturated), com índice de estabilidade (SI) inferior a 1, mantendo a área de contribuição entre 10 e 100 m².

Observa-se que existe um aumento de instabilidade no Cenário 3 em relação ao Cenário 2. Há um aumento de 3% das áreas pouco instáveis (alaranjada) e de 5% das moderadamente instáveis (vermelho). A variação de instabilidade foi causada pelo aumento do volume de chuva nos processos de deslizamento.

Figura 41. Índice de estabilidade e saturação (Cenário 3 - chuva máxima de 24 horas)

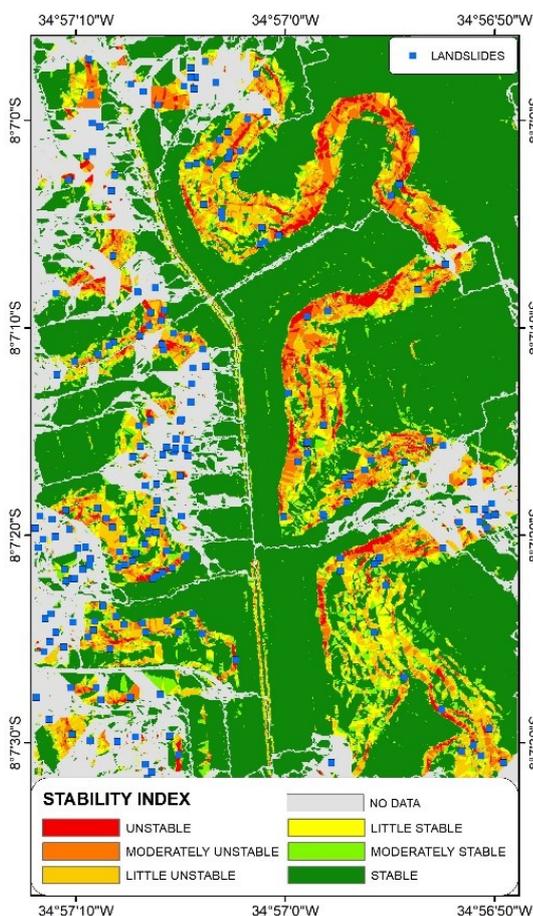
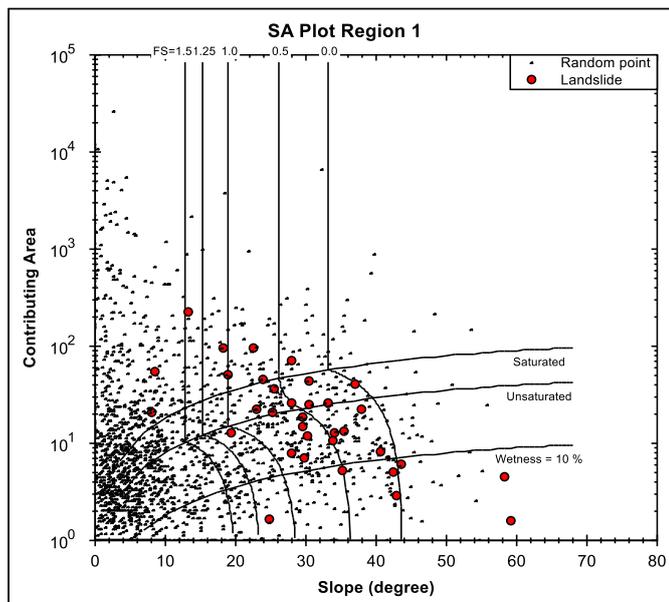


Figura 42. Resultado do modelo de validação SINMAP (cicatrizas mapeadas pela SEDEC em vermelho e pontos aleatórios do programa em preto) - Cenário 3 - chuva máxima de 24 horas.



5.2.1.4 Avaliação dos resultados – Cenário 4 (chuva máxima de 12 horas)

O cenário representa a maior precipitação ocorrida em 12 horas seguidas, em toda série de chuva registrada. Este caso ilustra a maior recarga, em relação aos cenários 2 e 3, mais concentrada no tempo, em relação à transmissividade constante. O mapa do índice de estabilidade gerado pelo SINMAP está apresentado na Figura 43. A Figura 44 mostra o gráfico gerado a partir do resultado do modelo de validação.

Na Figura 44, nota-se uma diminuição da área de pouca umidade (*Wetness*), quando comparada com a chuva de 24 horas. 40 dos 75 pontos utilizados pelo programa em área de SI calculado encontram-se em condição saturada (*Saturated*), com índice de estabilidade inferior a 0,50 (instável).

Figura 43. Índice de estabilidade e saturação (Cenário 4 - chuva máxima de 12 horas)

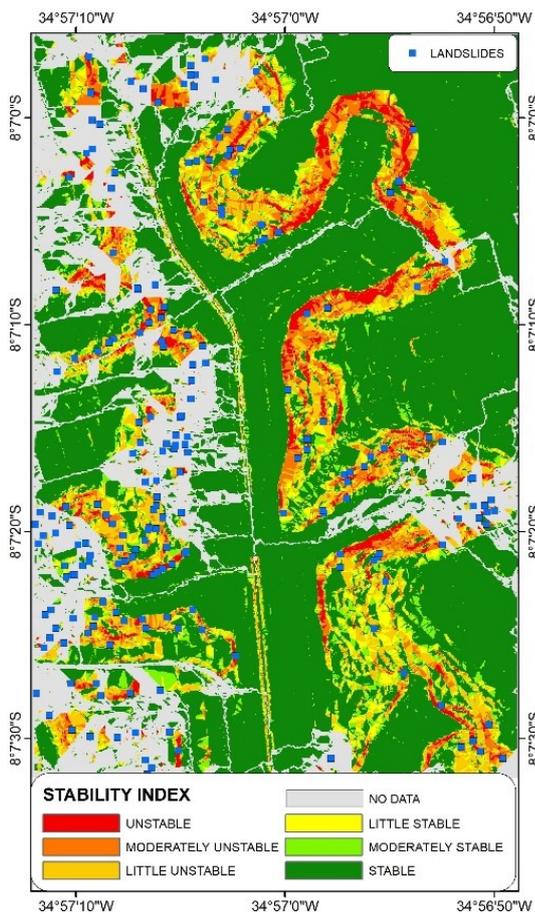
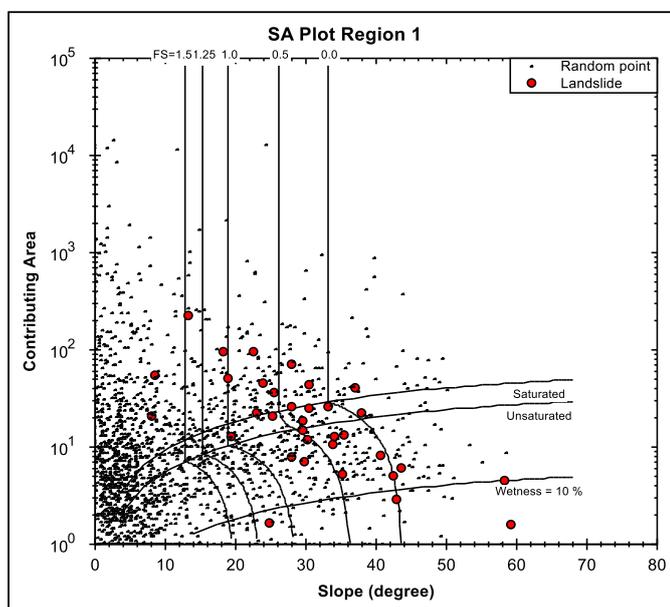


Figura 44. Resultado do modelo de validação SINMAP (cicatrizes mapeadas pela SEDEC em vermelho e pontos aleatórios do programa em preto) - Cenário 4 - chuva máxima de 12 horas.



5.2.1.5 Avaliação dos cenários

O SINMAP prevê, como esperado, que as áreas mais estáveis podem ser encontradas nas regiões mais planas, independentemente dos parâmetros de solo e hidráulicos utilizados. As áreas de maior instabilidade também combinam com o terreno mais íngreme.

O uso de um MDT mais preciso, para melhorar a análise pelo SINMAP das áreas instáveis, causou a falta de avaliação de 22,46% da área fornecida para o cálculo, bem como das cicatrizes deslizantes, nessas áreas “sem dados”. Esses resultados estão de acordo com Thiebes et al. (2016), que afirmam que a qualidade da resolução espacial influencia na precisão dos resultados. No entanto, para o modelo utilizado, aumentar a qualidade do MDT pode resultar em áreas com um SI não calculado (“no data”).

A análise dos dados do SINMAP obtidos mostrou um aumento nas áreas suscetíveis entre os cenários, mas a área “no data” permaneceu a mesma. Isso está de acordo com Witt (2005) e Sulaiman et al. (2017), nos seguintes aspectos: Witt (2005) mostrou que o SI não foi calculado pelo SINMAP, em algumas regiões (“no data”); Sulaiman et al. (2017) testaram diferentes resoluções de MDT e concluíram que o MDT mais grosseiro revela menos área que é instável e, mesmo com MDT de 1 metro, pode não ser possível superar os problemas.

De acordo com os resultados, para os quatro cenários, os pontos de deslizamento fornecidos para a calibração/validação do modelo SINMAP estão distribuídos, nas áreas de menor estabilidade, no valor do SI. Estão localizados, no mapa, em uma região com declives mais acentuados, com área de contribuição de até 100 m². Parte considerável dos deslizamentos ocorreram em intervalos de declividade entre 20° e 44°.

A resposta apresentada pelo programa aos cenários mostra que não é necessária uma precipitação volumosa para a deflagração dos escorregamentos nas encostas e, também, que o fator topográfico é um importante desencadeador, além da influência de outros fatores associados, na ocorrência de deslizamentos em Lagoa Encantada. A previsão apresentada pelo modelo coincide com o trabalho de Amorim (2012), que apontou a declividade como um dos condicionantes mais importantes, dentre os fatores (vegetação, espessura da formação superficial, elevação, declividade, concavidade, e inclinação média da bacia de contribuição) empregados em suas análises, utilizando redes neurais, análise discriminante e regressão logística.

Para a situação de baixa pluviosidade (Cenário 1), a maioria dos pontos de risco mapeados estavam em condições de baixa umidade e com índice de estabilidade (SI) inferior a 1,25.

Porém, na situação de maior umidade (Cenário 4), os pontos de risco mapeados localizaram-se, em sua maioria, na zona de maior saturação, com índice de estabilidade (SI) inferior a 1,0.

As Tabelas 6 a 9 apresentam a estatística da área realizada pelo SINMAP para cada cenário, de acordo com a classe de risco. Nas mesmas, são apresentados os termos: “#Landslides” que corresponde ao número de deslizamentos inseridos em cada zona de estabilidade, com base nos pontos suscetíveis a deslizamentos fornecidos ao programa pelo usuário; “% of slides”, a distribuição percentual dos referidos pontos; e “*LS Density (#/km²)*”, que é a relação entre o número de pontos e a respectiva área para cada índice de estabilidade.

A análise das tabelas mostra que, para o Cenário 1 (pouca chuva), apenas 12% da área apresenta-se em situação de instabilidade, com 41 pontos de risco notificados no histórico da Defesa Civil (55% do total). Com o aumento da precipitação para os Cenários 2 e 3, chuva máxima registrada de 48 e 24 horas em novembro, há aumento da área de instabilidade. Ambos correspondem à presença de 58 pontos em áreas instáveis, ou seja, 77% dos 75 pontos mapeados.

O Cenário 4, com chuva máxima mais concentrada em 12 horas, mostra um pequeno aumento da área de instabilidade em relação ao Cenário 3. As áreas pouco e moderadamente instáveis praticamente permaneceram, ocorrendo aumento da área instável. Este cenário eleva o número de pontos em área de suscetibilidade para 65, ou seja, 87% do total registrado.

As Figuras 45 e 46 ilustram a evolução em percentual (%) entre os cenários avaliados, para as três classes mais críticas de estabilidade ($SI < 1,0$) somadas. No caso da Figura 45, a variação é sobre “pontos mapeados em áreas instáveis”. Já a Figura 46 ilustra variação das “áreas em situação de instabilidade”.

Figura 45. Evolução percentual dos pontos mapeados em áreas instáveis

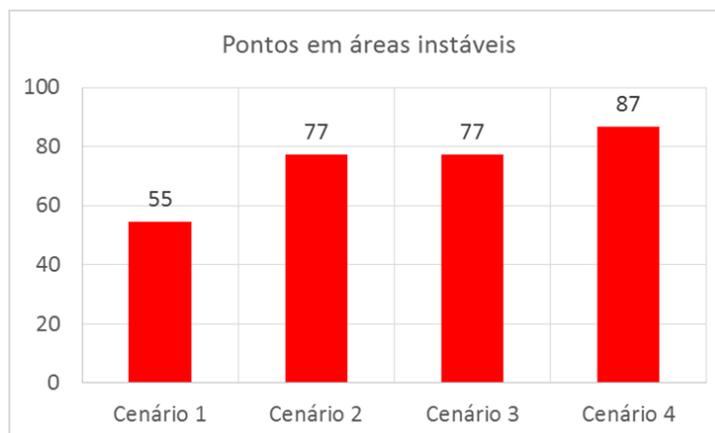
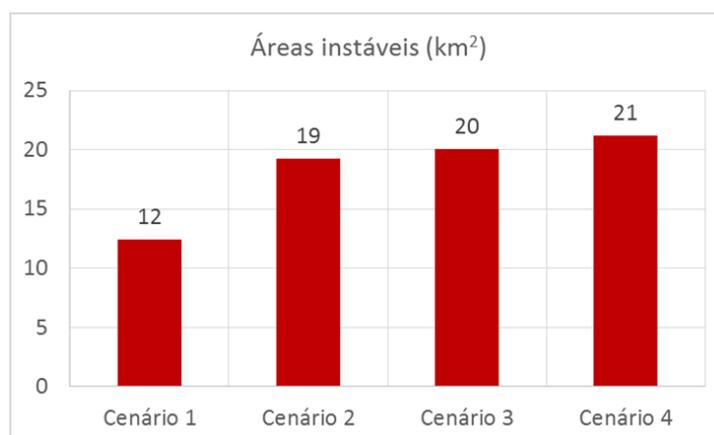


Figura 46. Evolução percentual das áreas instáveis por cenário



No estudo realizado, o SINMAP não foi particularmente sensível a mudanças no valor de recarga. Mesmo com mudanças significativas no limiar de precipitação, houve pouca alteração nas áreas de instabilidade previstas. Isso é inesperado, porque um dos fatores mais importantes no desencadeamento de fluxos de detritos, certamente, é a taxa de recarga.

Tabela 6. Estatística SINMAP – Cenário 1 (chuva de todo mês novembro)

Cenário 1	Estável	Moderadamente Estável	Pouco Estável	Pouco Instável	Moderadamente Instável	Instável	Total
Índice de estabilidade	SI > 1,5	1,5 > SI > 1,25	1,25 > SI > 1,0	1,0 > SI > 0,5	0,5 > SI > 0,0	0,0 > SI	
Área (km ²)	0.468	0.031	0.039	0.043	0.022	0.011	0.614
#Landslides	14.00	6.00	14.00	19.00	16.00	6.00	75.00
% of slides	18.67	8.00	18.67	25.33	21.33	8.00	100.00
LS Density (#/km ²)	29.91	193.09	356.78	442.61	732.87	553.05	122.14

Tabela 7. Estatística SINMAP – Cenário 2 (chuva máxima de 48 horas)

Cenário 2	Estável	Moderadamente Estável	Pouco Estável	Pouco Instável	Moderadamente Instável	Instável	Total
Índice de estabilidade	SI > 1,5	1,5 > SI > 1,25	1,25 > SI > 1,0	1,0 > SI > 0,5	0,5 > SI > 0,0	0,0 > SI	
Área (km ²)	0.429	0.029	0.04	0.063	0.037	0.018	0.614
#Landslides	9.00	0.00	8.00	27.00	21.00	10.00	75.00
% of slides	12.00	0.00	10.67	36.00	28.00	13.33	100.00
LS Density (#/km ²)	21.00	0.00	202.22	431.52	573.35	570.48	122.14

Tabela 8. Estatística SINMAP – Cenário 3 (chuva máxima de 24 horas)

Cenário 3	Estável	Moderadamente Estável	Pouco Estável	Pouco Instável	Moderadamente Instável	Instável	Total
Índice de estabilidade	SI > 1,5	1,5 > SI > 1,25	1,25 > SI > 1,0	1,0 > SI > 0,5	0,5 > SI > 0,0	0,0 > SI	
Área (km ²)	0.423	0.03	0.039	0.065	0.039	0.019	0.614
#Landslides	9.00	0.00	8.00	23.00	25.00	10.00	75.00
% of slides	12.00	0.00	10.67	30.67	33.33	13.33	100.00
LS Density (#/km ²)	21.29	0.00	206.91	355.42	633.20	529.44	122.14

Tabela 9. Estatística SINMAP – Cenário 4 (chuva máxima de 12 horas)

Cenário 4	Estável	Moderadamente Estável	Pouco Estável	Pouco Instável	Moderadamente Instável	Instável	Total
Índice de estabilidade	SI > 1,5	1,5 > SI > 1,25	1,25 > SI > 1,0	1,0 > SI > 0,5	0,5 > SI > 0,0	0,0 > SI	
Área (km ²)	0.416	0.03	0.038	0.063	0.042	0.025	0.614
#Landslides	9.00	0.00	1.00	25.00	25.00	15.00	75.00
% of slides	12.00	0.00	1.33	33.33	33.33	20.00	100.00
LS Density (#/km ²)	21.64	0.00	26.42	393.73	599.43	596.71	122.14

5.3 RESULTADOS DO BALANÇO HÍDRICO NO SOLO UTILIZANDO O HYDRUS - 1D

O modelo Hydrus-1D foi utilizado para reproduzir o balanço hídrico no solo, na mesma situação simulada para o uso do SINMAP (Cenário 2), possibilitando uma avaliação conjunta dos resultados. Em uma segunda análise, o modelo foi utilizado para simular o balanço hídrico em situações de escorregamento, ocorridas nos anos de 2014 e 2015 na área de Lagoa Encantada.

Para entrada no programa, avaliou-se, em todas as situações, o volume infiltrado a partir de 1 de janeiro de cada ano, até 30 de setembro do mesmo ano, seguindo a mesma premissa apresentada por Gusmão Filho (1997) no item 3.3.2. Ou seja, a avaliação tem início no período seco, passando pelo trimestre mais úmido, até à recessão das chuvas. O período corresponde a 250 dias consecutivos de observação.

O longo período utilizado para a simulação também serve para “aquecimento” do programa durante o período sem chuvas. Assim, torna-se possível uma melhor análise dos resultados durante o período chuvoso onde normalmente ocorrem os deslizamentos.

No bairro do Ibura e adjacências, até no máximo 7km, não há PCD com registros horários de precipitação com série anterior a maio/2015. Para se poder observar a acumulação gradativa da água no solo, anterior ao evento de deslizamento, era necessária uma série de dados de precipitação significativa. Dessa forma, a análise da infiltração foi realizada de forma diária (acumulado de 24 horas). Para tal, foram utilizados os dados da estação pluviométrica CPRM/Recife, pertencente à Rede Hidrometeorológica Nacional, localizada a 11km de Lagoa Encantada.

Entretanto, considerando a distância entre as estações pluviométricas aqui apresentadas, foi realizada uma análise de regressão linear, entre os totais mensais das estações Recife e Alto da Bela Vista. A verificação estatística foi utilizada para conferir se há compatibilidade, entre os valores observados, nas duas estações. Segundo ANA (2012), uma boa relação entre as estações pluviométricas ocorre quando o coeficiente de correlação é igual ou superior a 0,8; a distância entre as mesmas seja de, no máximo, 200km; e altitudes semelhantes entre as estações.

A regressão linear simples realizada entre os totais mensais das estações pluviométricas Recife (CPRM) e Alto da Bela Vista (APAC), para o período de 2015 a 2019, mostrou um coeficiente de correlação (R^2) de 90%. Considerando a variância entre os dados de precipitação satisfatória, optou-se assim por utilizar os dados de precipitação pluviométrica Recife para a

análise dos deslizamentos.

Considerando a utilização de um posto pluviométrico localizado a 10 km uma hipótese aproximada, pela ausência de registros de precipitação em postos mais próximos da área de estudo, a premissa do uso da estação pluviométrica Recife é reforçada através do mapa de isoietas anuais médias de 1977 a 2006 (CPRM, 2021) para a cidade do Recife.

Foi realizada a simulação, utilizando-se o módulo padrão do programa Hydrus-1D para calcular a infiltração de água em um perfil de duas camadas do solo. A estimativa de recarga de água subterrânea não foi considerada cálculos porque, durante a prospecção, não foi encontrada a presença de aquífero. Foi assumido, para o modelo, que o lençol freático estava localizado bem abaixo do fundo do domínio do solo e, portanto, não afetaria os processos de escoamento no perfil de solo adotado. Como não foram realizados testes específicos para determinar os parâmetros necessários ao modelo, optou-se por utilizar os parâmetros hidráulicos dos solos fornecidos pelo programa, que são médias aproximadas para as diferentes classes de textura.

O solo foi reclassificado conforme exigido pelo modelo, e foi necessário adaptar e usar o sistema de classificação de textura de solo do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA). Considerando que o solo encontrado, durante a prospecção, foi classificado pela USCS como do tipo SC (areia argilosa), utilizou-se a opção de Areia Argilosa do catálogo de solos, como a melhor alternativa para representar a área estudada.

O modelo hidráulico analítico escolhido, para avaliar a infiltração na área piloto, foi o de van Genuchten (1980). O fluxo de água que penetra na superfície do solo aumenta, conforme aumenta a pressão da camada de água superficial. De acordo com o manual do programa, esse fluxo para o solo estabiliza quando a profundidade da camada de água superficial atinge 3cm (Šimůnek et al., 2013).

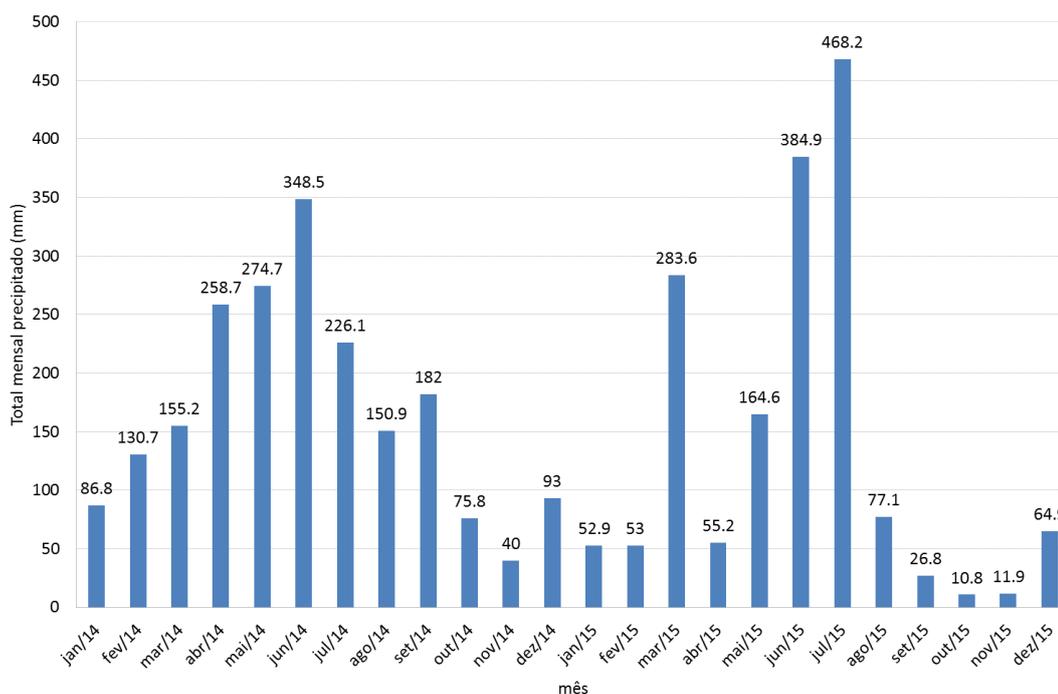
5.3.1 Simulação Hydrus-1D para situações reais de deslizamento nos anos de 2014 e 2015

No local estudado, o trimestre mais chuvoso costuma ocorrer entre os meses de maio e julho, período em que se concentra, em média, 50% da precipitação anual. Em 2014, quando foi registrado o precipitado total de 2.022mm, os deslizamentos ocorreram nos dias 26 de junho e 12 de julho. Durante os meses de inverno mencionados, o total precipitado correspondeu a 42% da precipitação anual.

No ano de 2015, que apresenta total anual precipitado de 1.654mm, foram utilizados, na simulação, os escorregamentos reais ocorridos nos dias 19 de fevereiro, 6 de março, 29 de junho e 3 de julho. Os deslizamentos ocorridos em junho e julho aconteceram em um período de precipitação intensa na região, além do acúmulo ocorrido no ano, até o dia dos eventos. Entretanto, os deslizamentos do início do ano preliminarmente não são justificáveis, levando-se apenas a precipitação em consideração. Dessa forma, acredita-se que influências externas, tais como a eventual ruptura de sistema de abastecimento de água e/ou de possíveis ligações clandestinas possam ter contribuído para a ocorrência do deslizamento. A Figura 47 ilustra a precipitação mensal registrada para os anos de 2014 e 2015.

De acordo com a Figura 47, no ano de 2014, nos meses que antecederam junho, a chuva acumulada foi 11% acima do esperado. Em junho de 2015, apesar de apresentar um número elevado de deslizamentos (9 eventos), igual ao ocorrido no mesmo mês em 2014, o acumulado foi 25% abaixo do esperado. Os registros de deslizamentos mostram que nem sempre a chuva é o único agente deflagrador do movimento, havendo escorregamentos em mês de pluviosidade abaixo da esperada, sem acúmulo significativo de água nos dias que antecederam os movimentos de massa.

Figura 47. Precipitação mensal para os anos de 2014 e 2015



O banco de dados de deslizamentos mostra que os meses com o maior número de chamados foram os de março de 2015 e os de junho, dos anos de 2014 e 2015. O total precipitado, no mês de março de 2015, registrou volume 40% maior do que a média esperada para o mês, não havendo registro de precipitação acumulada com valor acima do esperado que pudesse auxiliar no deslizamento. Acredita-se que a chuva diária tenha contribuído para os escorregamentos, como exemplo, os deslizamentos ocorridos no dia 06/03/2015, com precipitação registrada de 24h de 31,4mm (chuva forte), e acumulado de 72h de 39,5mm. É importante lembrar que em localidades onde ocorreram deslizamentos sem um índice de chuva que os justifiquem, muitos destes podem estar associados ao descarte inadequado de águas servidas.

Em Lagoa Encantada, os deslizamentos ocorridos no inverno são mais comuns, por se tratar de um período de intensa precipitação. Os tipos de solo presentes em Lagoa Encantada também foram estudados por Schilirò et al. (2019), em outra região. Este estudo concluiu que os tipos de solo SC e CL foram os mais influenciados pelos eventos de chuva avaliados, e que são muito suscetíveis a deslizamentos. Também mostrou que as condições de umidade são um importante fator desencadeante.

A Figura 48 e a Figura 49 ilustram o balanço hídrico no solo para os anos de 2014 e 2015, com ênfase para as datas dos deslizamentos ocorridos. O volume infiltrado apresentado é resultado do somatório das infiltrações no solo1 (*Sandy Clay Loam*), com profundidade de 0 a 12cm, e solo2 (*Loamy Sandy*), com profundidade de 13 a 200cm.

Figura 48. Balanço hídrico no solo para o ano de 2014

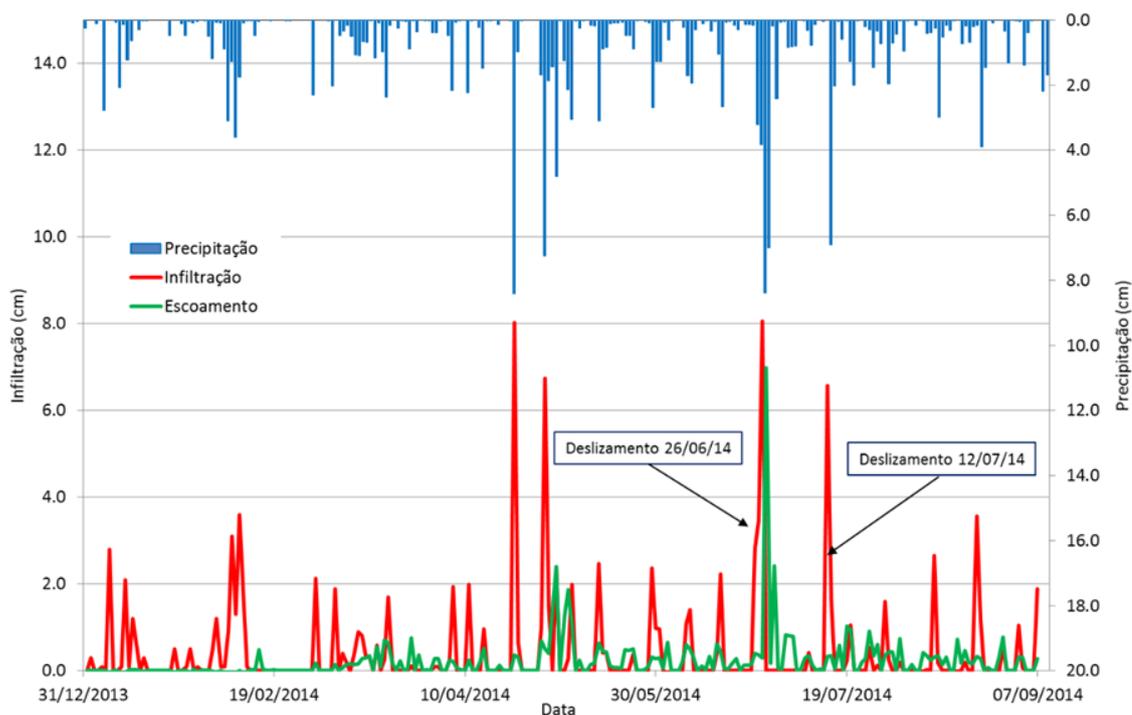
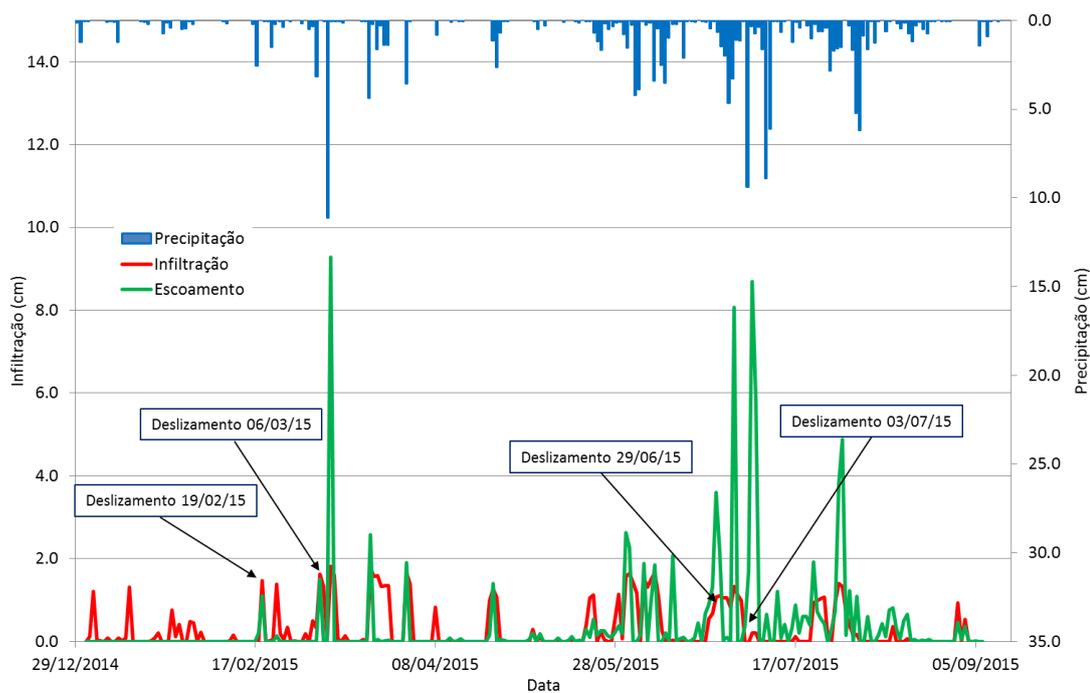


Figura 49. Balanço hídrico no solo para o ano de 2015



O programa apresenta defasagem de 24hs entre a chuva e a infiltração. De acordo com os resultados do Hydrus-1D, considerando o início das chuvas em 01/01/14, o solo1 necessitou de 1 dia de precipitação, para sair do estado estacionário e iniciar o *in-flow*; e da chuva de dois

dias, para iniciar a drenagem da água para o solo2. O solo1 foi saturado no dia 03/01/14 e, o solo2, no dia 13/02/14. O escoamento iniciou-se no dia 15/02/14, quando os solos 1 e 2 encontravam-se totalmente saturados.

Considerando o início das chuvas em 01/01/15, o solo1 necessitou de 1 dia de precipitação, para sair do estado estacionário e iniciar o *in-flow*. Foi necessária a chuva de 3 dias para dar início a drenagem da água para o solo2. O solo1 foi saturado no dia 04/01/15 e, o solo2, no dia 12/04/15. O escoamento iniciou-se no dia 18/02/15, com o solo1 totalmente saturado.

Com base nos dados apresentados nas Figuras 48 e 49, os resultados da infiltração acumulada para os anos de 2014 e 2015 são apresentados nas Figuras 50 e 51.

As condições existentes no solo no dia dos deslizamentos, 19/02/2015 e 06/03/2015, apresentadas na Tabela 10, mostram que o valor acumulado da precipitação e do volume infiltrado são inferiores aos registrados para os outros eventos. Tal resultado reforça a premissa da presença de um agente externo, nos deslizamentos ocorridos, fora do período chuvoso em 2015.

Figura 50. Infiltração acumulada no solo em 2014.

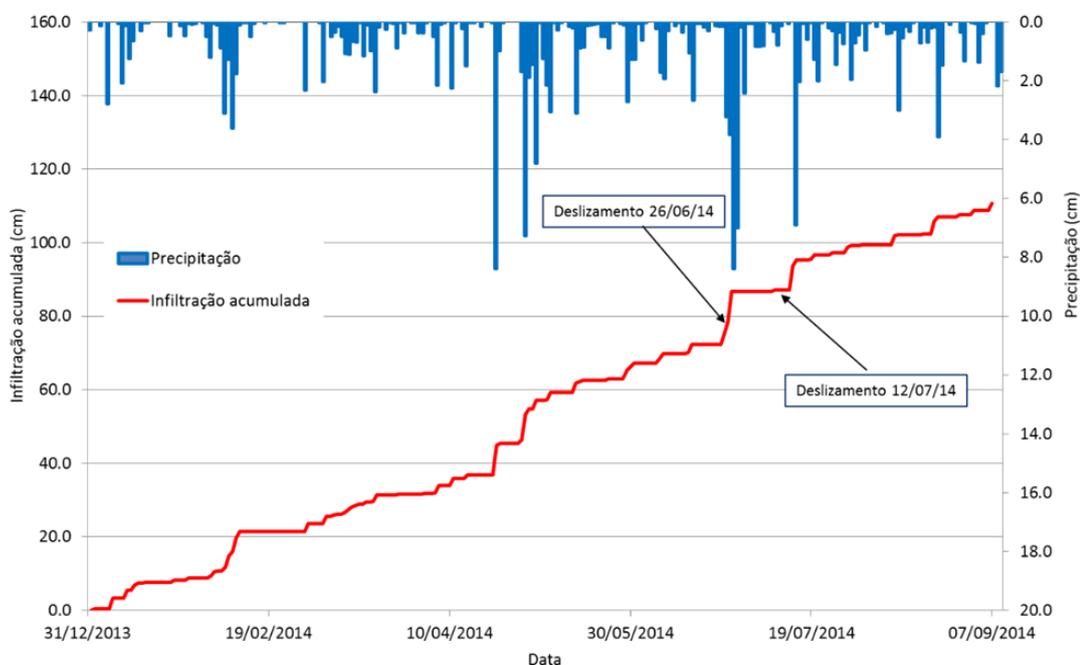


Figura 51. Infiltração acumulada no solo em 2015.

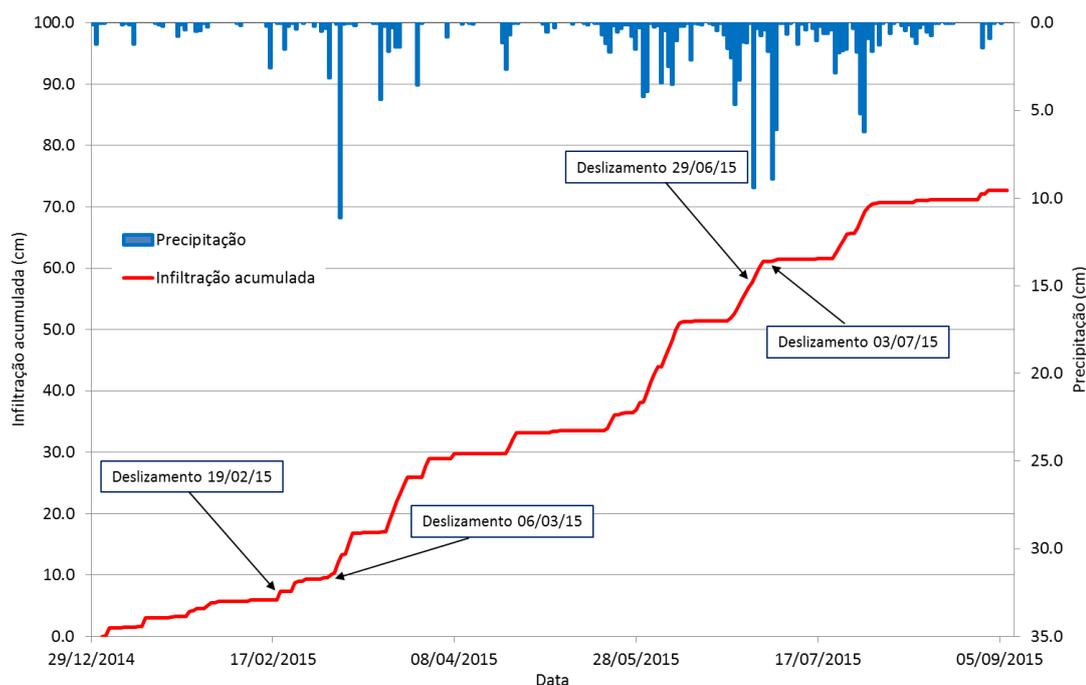


Tabela 10. Balanço hídrico no solo no dia do deslizamento em 2014 e 2015

Data do deslizamento	Precipitação no dia do deslizamento (mm)	Acumulado de 01 de janeiro até o dia do deslizamento			% Infiltrado em relação à precipitação
		Precipitação (mm)	Infiltração (mm)	Escoamento (mm)	
26/06/2014	83,7	1.159,0	786,0	289,0	68
12/07/2014	0,0	1.292,0	871,0	421,0	67
19/02/2015	0,0	84,0	73,0	13,0	87
06/03/2015	31,4	147,0	104,0	14,0	71
29/06/2015	94,0	991,0	577,0	435,0	58
03/07/2015	16,4	1.022,0	611,0	519,0	60

As Figuras 48 e 49, quando comparadas, mostram que choveu mais em 2014 e de forma mais distribuída, em relação a 2015, ano em que a chuva esteve mais concentrada no trimestre mais chuvoso. Como esperado, a infiltração em 2014 apresentou-se maior que em 2015, apesar de, no ano de 2015, serem registrados mais deslizamentos. Entretanto, como relatado anteriormente, a grande diferença entre as precipitações acumuladas até o dia dos deslizamentos ocorridos nos dias 19/02/2015 e 06/03/2015, sugere causas distintas em relação aos outros

eventos do mesmo ano.

Dessa forma, ao avaliar os demais eventos (desconsiderando os dois citados anteriormente), há um número compatível de deslizamentos para os anos de 2014 e 2015, para o período chuvoso.

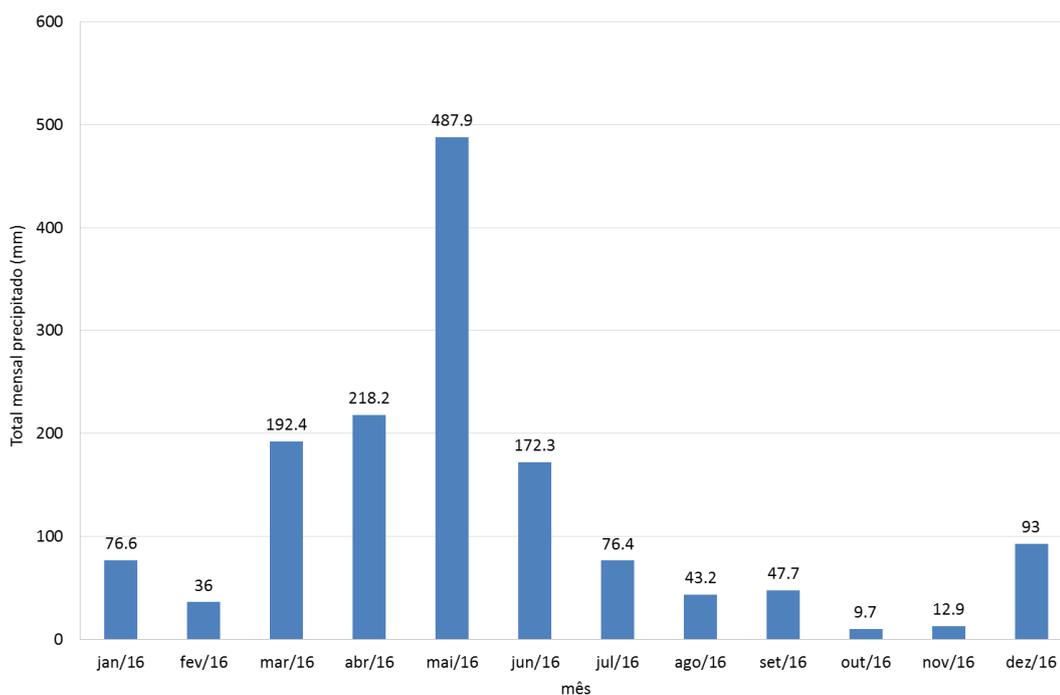
De acordo com a Tabela 10, a infiltração média no solo, até o dia dos deslizamentos registrados, seria próxima a 70% do valor da precipitação acumulada até aquele dia. Esses dados pressupõem que o solo foi submetido às mesmas condições estabelecidas para a simulação do Hydrus-1D, mas desconsiderando a influência da declividade, que é uma limitação do modelo para a versão aberta. Nos casos observados, os deslizamentos ocorreram após a precipitação acumulada, até o dia do deslizamento, apresentar valor maior que 1.000,0mm de chuva. As áreas expostas disponíveis para infiltração, e passíveis de urbanização, podem ser visualizadas na Figura 34.

5.3.2 Simulação do Hydrus – 1D para o Cenário 2 da análise SINMAP

Realizado o cálculo do balanço hídrico para uma situação real, buscou-se simular o balanço hídrico no solo, para um dos cenários de maior susceptibilidade a deslizamento apresentados com o uso do SINMAP. Para a análise, foi escolhido o Cenário 2, que corresponde à chuva máxima de 48 horas, baseada na série de chuva fornecida pela APAC (estação PCD Alto da Bela Vista) para o período de maio/2015 a outubro/2017, ou seja, a chuva ocorrida entre os dias 3 e 4/06/2016.

Para manter a coerência em relação a análise do item 4.2.1, optou-se por avaliar o balanço hídrico, utilizando-se a estação pluviométrica CPRM/Recife. Dessa forma, o Hydrus-1D foi executado para o período de 1 de janeiro a 30 de setembro de 2016. A Figura 52 ilustra a precipitação mensal registrada para o ano de 2016, que apresenta um total anual precipitado de 1.394mm. Observa-se, no ano, um trimestre chuvoso antecipado, acumulando 64% de toda a precipitação anual, entre os meses de março e maio. Nos meses citados, o total precipitado correspondeu a 53% do total anual, ou seja, houve alta concentração de precipitação no período.

Figura 52. Precipitação mensal para o ano de 2016.



É importante observar que, ao contrário do Hydrus-1D, o programa SINMAP não considera a chuva acumulada, no período anterior ao escorregamento, mas sim uma chuva por evento. Outra diferença, que deve ser considerada é o tipo de solo envolvido na análise. Conforme mencionado anteriormente, os tipos de solos utilizados para os dois programas são diferentes, mas apresentam semelhanças em suas características gerais.

A precipitação e o volume infiltrado, simulados pelo Hydrus-1D para o Cenário 2 SINMAP, são mostrados na Figura 53. A infiltração acumulada no solo é apresentada na Figura 54, para o ano de 2016, com base nos resultados da infiltração simulada.

Figura 53. Balanço hídrico no solo para o ano de 2016.

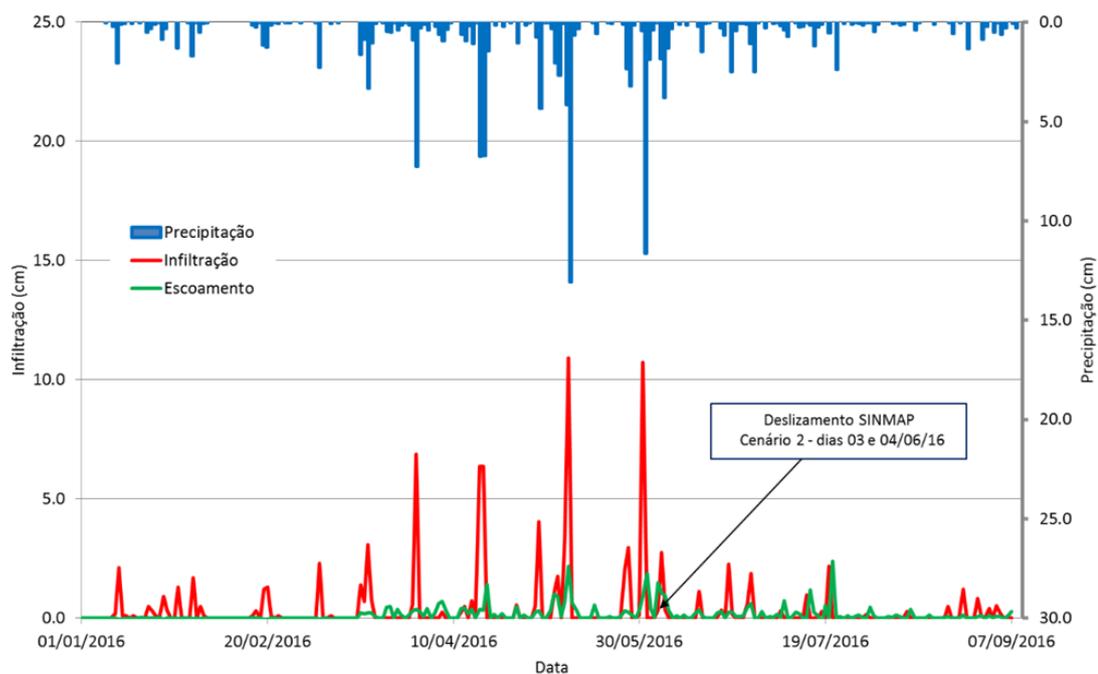
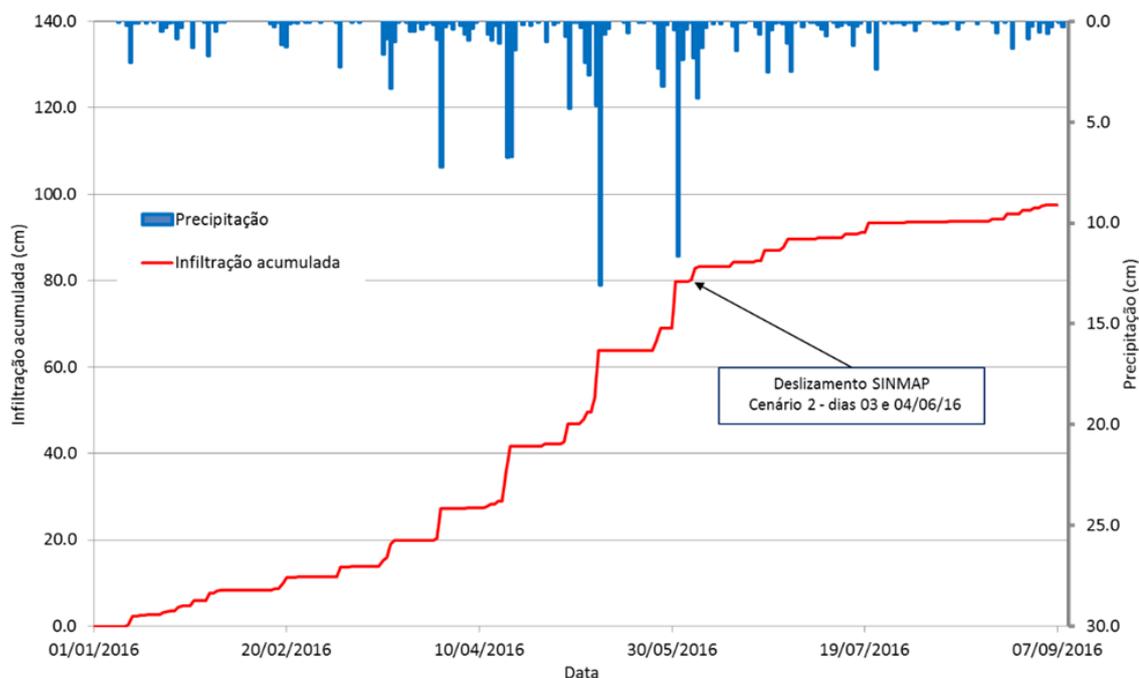


Figura 54. Infiltração acumulada no solo em 2016.



De acordo com as Figuras 53 e 54, um possível escorregamento ocorrido durante a situação crítica de instabilidade, no Cenário 2, ocorreria após um período de grande infiltração acumulada. O acúmulo de água no solo, nos dias anteriores ao Cenário 2, apesar da pouca chuva

registrada no dia do evento, seriam os agentes desencadeadores de um eventual escorregamento. O balanço hídrico mostrou que a precipitação acumulada de 1º de janeiro ao dia do deslizamento (4 de junho de 2016) foi de 1.072,0mm e a infiltração foi de 801,0mm. O volume infiltrado simulado corresponde a 75% do total precipitado no ano.

Considerando a simulação para o Cenário 2, e comparando-a com os valores apresentados em situações reais de escorregamentos (Tabela 10), para 2014 e 2015, observa-se que os valores de infiltração, para o referido cenário, são semelhantes aos dos casos reais de escorregamentos. Ou seja, a situação de susceptibilidade a deslizamento apresentada ao SINMAP, somada ao cálculo da infiltração do Hydrus-1D resultaria em uma representação, aproximada, de um deslizamento real na região da Lagoa Encantada, em Ibura.

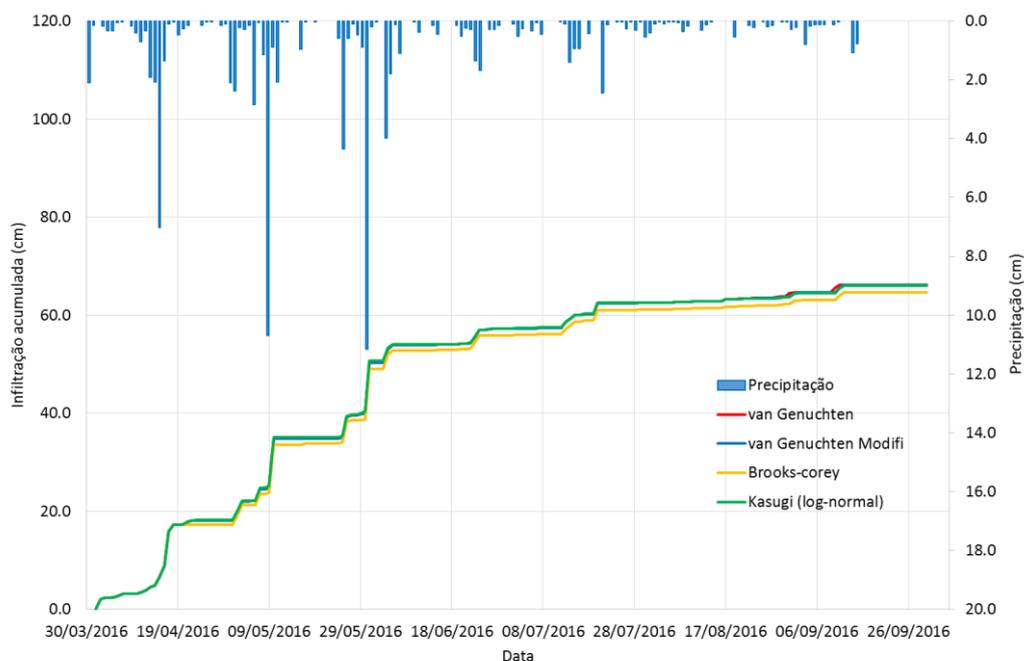
Excetuando-se os dias 19/02 e 6/03/2015 que podem ter sido causados por vazamento de água, em todas as situações avaliadas de deslizamentos reais ou indicados pelo SINMAP, associam-se os deslizamentos a uma precipitação acumulada de aproximadamente 1.000mm.

5.3.3 Comparação entre os modelos hidráulicos analíticos oferecidos pelo modelo Hydrus-1D

O Hydrus-1D disponibiliza a opção de quatro modelos hidráulicos para descrever a retenção de água e as funções de condutividade hidráulica: 1. Modelo de van Genuchten (1980); 2. Modelo de van Genuchten Modificado (Mualem, 1976); 3. Modelo de Brooks & Corey (1966); e 4. Modelo de Kosugi - log-normal (1996). Para o tipo de solo encontrado na comunidade estudada, utilizou-se o Modelo de van Genuchten, como apresentado na metodologia e utilizado nas simulações Hydrus-1D. Entretanto, para testar a sensibilidade do programa ao modelo hidráulico, foram avaliados os resultados dos demais modelos.

Foram consideradas as mesmas entradas de dados para que os resultados pudessem ser avaliados, apenas pela mudança do modelo hidráulico escolhido na análise. A Figura 55 apresenta o volume infiltrado acumulado no perfil do solo, nas mesmas condições impostas ao modelo Hydrus-1D, na simulação do Cenário 2 do SINMAP, para o período de 01/04/2016 a 30/09/2016.

Figura 55. Infiltração acumulada no solo em 2016, simulada para os diversos modelos.



De acordo com as informações apresentadas na Figura 55, em comparação ao Modelo de van Genuchten, não há diferença significativa entre os resultados do balanço hídrico do sistema final. O volume infiltrado acumulado para os modelos, no período simulado, foi de: Modelo de van Genuchten (662,0mm); Modelo de van Genuchten Modificado (662,0mm); Modelo de Brooks & Corey (646,0mm), o único que registra visualmente uma pequena diferença no gráfico; Modelo de Kosugi - log-normal (661,0mm).

Além das simulações realizadas, utilizando os modelos hidráulicos disponibilizados pelo programa Hydrus-1D, o volume acumulado por infiltração no solo foi quantificado, matematicamente, na área piloto, pela aplicação do Método de Horton de 1940 (Tomaz, 2010). A simulação apresentada no Apêndice B foi realizada para o período de 28 e 29/06/2017, que correspondem à chuva mínima para o Cenário 2 SINMAP (chuva máxima de 48 horas) e a chuva máxima para o Cenário 3 (chuva máxima de 24 horas) explicitados na Tabela 10.

6 CONCLUSÃO

Este estudo teve como objetivo contribuir com as técnicas de avaliação da suscetibilidade a escorregamentos, fornecendo um método de análise combinada, que utiliza exclusivamente softwares livres e dados abertos, que pode ser útil para futuras análises de risco e para a criação de sistemas de alerta na comunidade estudada ou em outras de condições similares. O método proposto utiliza duas análises: uma, para suscetibilidade a escorregamentos e outra, para balanço hídrico no solo. Para avaliar a suscetibilidade a escorregamentos na área, foi utilizado o modelo computacional SINMAP. A simulação do balanço hídrico do solo, em situação de escorregamento, foi realizada por meio do programa Hydrus-1D.

A comunidade de Lagoa Encantada, no Ibura, possui muitas características que a tornam uma área extremamente suscetível a deslizamentos (tipo de solo, alta declividade do terreno, ocupações irregulares, ausência de vegetação natural, entre outros). Tais características se encontram registradas no extenso cadastro da Defesa Civil e pelas avaliações realizadas em campo ao longo desta pesquisa.

Como esperado, o mapa de suscetibilidade do SINMAP mostrou um aumento nas áreas suscetíveis a deslizamentos, devido ao aumento da precipitação. As simulações mostraram que, em algumas situações, a declividade do terreno, mesmo na presença de pouca chuva, tornam a localidade suscetível ao deslizamento. Indicaram, ainda, que não é necessário um grande volume de chuva para deixar toda a área em alerta nas condições de simulação.

A limitação ligada à presença de “no data” faz com que uma parte do terreno não seja calculada. No caso deste trabalho, cerca de 22,46% da área fornecida para o modelo foi afetada, com desconsideração de diversos pontos deslizados, fornecidos para análise e cálculo do modelo. Para o estudo aqui apresentado apenas 34% dos 221 pontos fornecidos foram envolvidos no processo de cálculo do SI. Entretanto, a diminuição da qualidade do MDT como solução para diminuição ou eliminação das regiões “no data”, e melhor aproveitamento dos pontos deslizados no cálculo do SINMAP, trariam como consequência o aumento da imprecisão das áreas com SI calculado. Portanto, mais estudos são necessários para melhor compreender as causas deste problema e avaliar a adequação do SINMAP para situações de terrenos muito íngremes, em áreas muito pequenas, quando usado um MDT de excelente qualidade.

O modelo Hydrus-1D mostrou que os deslizamentos ocorreram em situações de precipitação acumulada maior que 1.000,0mm de chuva, a partir de 01 de janeiro do ano

analisado, e infiltração de aproximadamente 70% dessa precipitação.

Ao avaliar a infiltração na camada superficial em eventos reais, observou-se que os escorregamentos ocorreram quando a infiltração acumulada, calculada pelo programa Hydrus-1D, atingiu o valor médio de 829,0mm, com variação de mais ou menos 43,0mm. Esta informação ainda não pode ser considerada conclusiva, pois foi obtida com poucos dados. No entanto, a avaliação deste dado está fora do escopo do presente estudo.

O resultado pode ser promissor por advir de uma estratégia prática para melhor compreender as causas dos deslizamentos por infiltração, solo e relevo. Assim, mais pesquisas são necessárias para avaliar se as infiltrações observadas ou previstas, neste nível, podem funcionar como dados relevantes na previsão de escorregamentos na região. Se este critério for confirmado como adequado, em pesquisas futuras, é razoável pensar que a mesma técnica tem potencial para ser generalizada e utilizada para determinar níveis críticos de infiltração em outras regiões, pressupondo-se as adaptações dos parâmetros adequados, dependendo das características do solo. Mais estudos são necessários para verificar essa hipótese.

Como o tipo de solo encontrado na zona sul do Recife, que é o caso da área piloto de Lagoa Encantada, não é o mesmo apresentado na área Norte da cidade, observa-se que as informações apresentadas para o Ibura não se estendem para outras áreas da RMR, sendo necessários estudos específicos para áreas com composição diferente do solo.

Conclui-se que a metodologia aplicada nesta pesquisa pode ser replicada para outras localidades susceptíveis a deslizamento, visto que as circunstâncias de morros fragilizados são comuns ao longo da costa brasileira. Para tal é fundamental que a Defesa Civil, atuante em cada área afetada pelos deslizamentos, mantenha sua base de dados organizada, com cadastro adequado das notificações e chamados, para permitir a continuidade de importantes estudos como este.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho pretende ser um passo na criação de modelos mais precisos, para avaliação da suscetibilidade ao escorregamento, pois permite considerar, de forma combinada, importantes fatores desencadeantes.

A utilização dos dados dos radares meteorológicos na previsão de chuvas e utilização das informações junto aos modelos trazem a perspectiva da antecedência da previsão do deslizamento. Tais ferramentas podem auxiliar na análise de risco e emissão de alertas,

possibilitando, no futuro, a criação de critérios e estratégias para ocupação do espaço urbano de forma mais segura.

Para posteriores trabalhos de pesquisa, sugere-se estudar o desenvolvimento de cenários extremos com diferentes tempos de retorno e simular suas consequências.

Trabalhos futuros podem tentar avaliar a influência das águas residuárias, na suscetibilidade a escorregamentos, bem como avaliar formas de lidar com a presença de áreas não calculadas ("*no data*") no mapa de suscetibilidade. Recomenda-se avaliar se o método de cálculo utilizado pela simulação SINMAP para geração da rede de drenagem é adequado para uso do MDT de alta resolução.

Considerando a limitação do cálculo do Hydrus-1D apenas para terrenos planos, sugere-se o uso de uma versão do Hydrus que considere declividade do terreno, para entender o impacto da ausência desta informação na simulação do balanço hídrico no solo. Nesse contexto, a utilização de modelo do escoamento tridimensional da reservação e escoamento da água no solo deve representar um avanço na medida que as hipóteses simplificadoras do modelo Hydrus-1D não precisem ser aplicadas.

Dessa forma, propõe-se que no futuro sejam organizados sistemas de alerta de baixo custo para atender as necessidades das diferentes áreas sujeitas a movimentos de massa no país. Destaca-se a necessidade de atualização da base de dados espaciais, tendo em vista as mudanças de uso e ocupação do solo com o tempo.

REFERÊNCIAS

- AKAN, A. O. **Urban stormwater hydrology** - a guide to engineering calculations. Lancaster, Pennsylvania: Technomic Publishing Co., 1993.
- ALEOTTI, P. & CHOWDHURY, R. Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. **Bull Eng Geol Env.** 58: 21–44 p. 1999. <https://doi.org/10.1007/s100640050066>
- ALHEIROS, M. M. **Riscos de escorregamentos na Região Metropolitana do Recife.** 1998. Tese (Doutorado em Geologia Sedimentar) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 1998. 149p.
- ALHEIROS, M. M.; LIMA FILHO, M. F.; MONTEIRO, F. A. J.; OLIVEIRA FILHO, J. S. Sistemas deposicionais na Formação Barreiras no Nordeste Oriental. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 35., 1988, Belém. **Anais [...].**Belém: CBG, 1988. v. 2, p. 753-760.
- ALVES, F. H. B. **Sistema avançado de previsão de enchentes:** análises e melhorias aos modelos de previsão de chuva, hidrológico e hidrodinâmico. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.
- AMORIM, S. F. **Estudio comparativo de métodos para la evaluación de la susceptibilidad del terreno a la formación de deslizamientos superficiales: Aplicación al Pirineo Oriental.** 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona. 2012.
- ANA. Agência Nacional de Águas. Orientações para Consistência de Dados Pluviométricos. Superintendência de Gestão da Rede Hidrometeorológica . Brasília, DF. Versão Julho, 2012.
- APAC. Agência Pernambucana de Águas e Clima. (2017) Acesso ao site: http://www.apac.pe.gov.br/noticias.php?noticia_id=662, em setembro de 2017.
- APAC. Agência Pernambucana de Águas e Clima. (2020) Acesso aos dados de chuva através do site: <http://www.apac.pe.gov.br/meteorologia/chuvas-rmr.php> em janeiro de 2020.
- AUGUSTO FILHO, O. Caracterização Geológico-Geotécnica Voltada à Estabilização de Encostas: uma Proposta Metodológica. *In*: CONFERENCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS. Rio de Janeiro, 1992.
- BANDEIRA, A. P. N. **Mapa de risco de erosão e escorregamento das encostas com ocupações desordenadas no Município de Camaragibe - PE.** 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003.
- BANDEIRA, A. P. **Parâmetros técnicos para gerenciamento de áreas de riscos de escorregamentos de encostas na região metropolitana do Recife.** 2010. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010.
- BANDEIRA, A. P. N. & COUTINHO, R. Q. Critical Rainfall Parameters: Proposed Landslide Warning System for the Metropolitan Region of Recife, PE, Brazil. **Soils and Rocks**, 38 (1): 27-48 p. 2015.
- BRASIL. Ministério das Cidades / Instituto de Pesquisas Tecnológicas. Mapeamento de Riscos em Encostas e Margem de Rios. Brasília, DF. Versão 2007.

- BAUM, R. L. & GODT, J. W. Early warning of rainfall-induced shallow landslides and debris flows in the USA. **Landslides**. 7: 259–272 p. 2010. <https://doi.org/10.1007/s10346-009-0177-0>
- BEZERRA F.H. R. & SUGUIO K. A Formação Barreiras: Recentes Avanços e Antigas questões. Apresentação de volume temático da Geologia USP. Serie Científica. São Paulo, SP. Versão, 2006.
- BIGARELLA, J. J. & ANDRADE, G.O. Considerações sobre a estratigrafia dos sedimentos cenozóicos em Pernambuco (Grupo Barreiras). UR – ICT. Arquivos, 2. Recife, PE. Versão, 1964.
- BIGARELLA, J.J. The Barreiras Group in Northeastern Brazil. **Acad. Bras. Ciências**. 47: 365-393 p. 1975.
- BOSCO, C. & SANDER, G. Estimating the effects of water-induced shallow landslides on soil erosion. **IEEE Earthzine**. 7 (2): 1-14 p. 2014. <http://www.earthzine.org/?p=910137>
- BROOKS, R. H. & COREY, A. T. Properties of Porous Media Affecting Fluid Flow. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**. 92 (2): 61-90 p. 1966. <https://doi.org/10.1061/JRCEA4.0000425>
- CAVALCANTI, R. L. C.; SILVA, C. H. S.; JESUS, E. S.; CUNHA FILHO, M. & STOŠIĆ, T. Study of Probable Maximum Precipitation and Return Time in Recife (PE). *In*: III CONGRESSO INTERNACIONAL DAS CIÊNCIAS AGRÁRIAS – COINTER, 2018, João Pessoa. 1-9 p. <https://doi.org/10.31692/2526-7701.IIICOINTERPDVAGRO.2018.00125>
- CAVALLI, M.; TAROLLI, P.; MARCHI, L.; FONTANA, G. D. The effectiveness of airborne LiDAR data in the recognition of channel-bed morphology. **Catena**. 73 (3): 249–260 p. 2008. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2007.11.001>
- CAMARGO, H. J. Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais – CEMADEN. *In*: V SIMPÓSIO NACIONAL SOBRE USO DE ÁGUA NA AGRICULTURA, 2013, Passo Fundo/RS.
- CASAGRANDE, A. Classification and identification of soils. **Transactions, ASCE**. 113: 901-930 p. 1948. <https://doi.org/10.1061/TACEAT.0006109>
- CEMADEN. Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais. (2014) Acesso ao site: <http://www.cemaden.gov.br/municipios-monitorados-2/> em novembro de 2014.
- CEMADEN. Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais. (2017) Acesso ao site: <http://www.cemaden.gov.br/radares-meteorologicos-2/> em setembro de 2017.
- CIRILO, J. A.; ALVES, F. H. B.; SILVA, L. A. C.; CAMPOS, J. H. A. L. Suporte de Informações Georreferenciadas para Planejamento de Recursos Hídricos – Programa Pernambuco Tridimensional. *In*: XII SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 2014, Natal, RN.
- CLAGHORN, J.; ORSINI, F. M.; RESTREPO, C. A. E.; & WERTHMANN, C. Rehabitar la Montaña: strategies and processes for sustainable communities in the mountainous periphery of Medellín. urbe. **Brazilian Journal of Urban Management**. 8(1): 42-60 p. 2016. <https://doi.org/10.1590/2175-3369.008.001.SE03>

CONDERM. Conselho de Desenvolvimento da Região Metropolitana do Recife. Governo do Estado de Pernambuco. Programa Viva o Morro – Resumo Executivo. Recife, PE. Versão, 2004.

CONDEPE/FIDEM. Agência Estadual de Planejamento e Pesquisas de Pernambuco. Os Morros da Região Metropolitana do Recife. Acesso ao site: <http://www2.condepefidem.pe.gov.br> em agosto de 2019.

CPRM. Serviço Geológico do Brasil. Sistema de Informações Geoambientais da Região Metropolitana do Recife. Programa de Gestão Territorial. Recife, PE. Versão, 2003.

CPRM. Serviço Geológico do Brasil. Mapeamento e Sistematização das Informações de Riscos Geológicos a Serem Desenvolvidos pela CPRM no Âmbito do Programa de Redução de Riscos de Desastres Naturais do Governo Federal. *In: IX FÓRUM NACIONAL DE DEFESA CIVIL*, 2012, Angra dos Reis, RJ.

CPRM. Serviço Geológico do Brasil. A Atuação do Serviço Geológico do Brasil –CPRM na Gestão de Riscos e Resposta a Desastres Naturais. *In: VI CONGRESSO DE GESTÃO PÚBLICA – CONSAD*, 2013, Brasília, DF.

CPRM. Serviço Geológico do Brasil. (2017) Acesso ao site: <http://www.cprm.gov.br/publique/Redes-Institucionais/Rede-de-Bibliotecas---Rede-Ametista/Canal-Escola/Cartilha-%22Comunidade-Mais-Segura%3A-Mudando-Habitos-e-Reduzindo-Riscos-de-Movimentos-de-Massa-e-Inundacoes%22-%282%AA-edicao%29-966.html>, em setembro de 2017.

CPRM. Serviço Geológico do Brasil. (2021) Acesso ao site: <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/15030> em fevereiro de 2021.

DANTAS, C.E.O.; CIRILO, J. A.; RIBEIRO NETO, A.; & SILVA, E. R. Caracterização da Formação de Cheias na Bacia do Rio Una em Pernambuco - Análise Estatística Regional. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. 20 (2): 394 – 403 p. 2014. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v20n2.p394-403>

DE PLOEY, J. & POESEN, J. Aggregate stability, runoff generation and interrill erosion. **Geomorphology and soils**. 1: 99-120 p. 1985. <https://doi.org/10.4324/9780429320781-5>

DHAKAL, A. S. & SIDLE, R. C. Distributed simulations of landslides for different rainfall conditions. **Hydrological Processes**. 18: 757–776 p. 2004. <https://doi.org/10.1002/hyp.1365>

DIETRICH, W. E. & MONTGOMERY, D. R. (1998). SHALSTAB - A digital terrain model for mapping shallow landslide potential. Acesso ao site: <http://calm.geo.berkeley.edu/geomorph/shalstab/index.htm> em maio de 2019.

DIKSHIT, A.; SATYAM, N.; & PRADHAN, B. Estimation of Rainfall-Induced Landslides Using the TRIGRS Model. **Earth Systems and Environment** 3: 575–584 p. 2019. <https://doi.org/10.1007/s41748-019-00125-w>

DRAGICEVIC, A. S.; LAIA, T.; & BALRAMB S. GIS-based Multicriteria Evaluation with Multiscale Analysis to Characterize Urban Landslide Susceptibility in Data-scarce Environments. **Habitat International**. 45 (2): 114-125 p. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2014.06.031>

- EBEL, B.A.; GODT, J.W.; LU, N.; COE, J. A.; SMITH, J. B. & BAUM, R. L. Field and laboratory hydraulic characterization of landslide-prone soils in the Oregon Coast Range and implications for hydrologic simulation. **Vadose Zone Journal**. 17:180078 p. 2018. <https://doi.org/10.2136/vzj2018.04.0078>
- FEDERICI, B.; BOVOLENTA, R.; & PASSALACQUA, R. From rainfall to slope instability: an automatic GIS procedure for susceptibility analyses over wide areas. **Geomatics, Natural Hazards and Risk**. 6: 454-472 p. 2015. <https://doi.org/10.1080/19475705.2013.877087>
- FELTRIN, R. M.; PAIVA, J. B. D. & PAIVA, E. M. C. D. Dinâmica da água no solo simulada pelo modelo HYDRUS-1D e medida a campo para as condições climáticas do Sul do Brasil. *In*: 11.º SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE LÍNGUA PORTUGUESA, 2013, At Maputo, Moçambique.
- FERNANDES, L. R. P. T. **A Influência da Infiltração das Chuvas na Estabilidade de um Talude Natural. Caso de estudo: Camaragibe, Pernambuco, Brasil**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Porto, 2014.
- FETTER, C.W. Applied Hydrogeology. 4th Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, 2, 8. Versão, 2001.
- GLENN, N. F.; STREUTKER, D. R.; CHADWICK, D. J.; THACKRAY, G. D.; & DORSCH, S. J. Analysis of LIDAR-derived topographic information for characterizing and differentiating landslide morphology and activity. **Geomorphology**. 73: 131-148 p. 2006. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.07.006>
- GOMES, J. H. O. S.; BARRETO, G. A. S. L.; NÓBREGA, N. C. F. Geomantas Impermeabilizantes na Cidade do Recife: Implementação, Aplicações e Desafios. *In*: IX CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE CIÊNCIA POLÍTICA, 2017, Montevideu.
- GROHMANN, C. H. Introdução à Análise Digital de Terreno com Grass – GIS. Instituto de Geociências – USP. São Paulo, SP. Versão, 2008.
- GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A. T.; CARVALHO JÚNIOR, O. A. C.; MARTINS, E. S.; OLIVEIRA, S. N.; & FERNANDES, N. F. Análise temporal das áreas susceptíveis a escorregamentos rasos no Parque Nacional da Serra dos Órgãos (RJ) a partir de dados pluviométricos. **Revista Brasileira de Geociências**. 39 (1): 190-198 p. 2009. www.sbgeo.org.br
- GUOA, W.; CHENA, Z.; WANGA, W.; GAOC, W.; GUOA, M.; KANGA, H.; LID, P.; WANGA, W. & ZHAOA M. Telling a different story: The promote role of vegetation in the initiation of shallow landslides during rainfall on the Chinese Loess Plateau. **Journal Pre-proof. Geomorphology**. 350: 1-30 p. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.106879>
- GUSMÃO FILHO, J. A. Chuva e Deslizamento nas Encostas Ocupadas. *In*: WORKSHOP “A METEOROLOGIA E OS RECURSOS HÍDRICOS APLICADOS À DEFESA CIVIL”, Recife, 1997.
- GUSMÃO FILHO, J. A. Ação Integrada Contra Riscos Geológicos em Morros Urbanos. *In*: I SIMPÓSIO LATINO-AMERICANO SOBRE RISCO GEOLÓGICO URBANO, 1990, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: ABGE, 1990, p. 421-435.
- HAND. Acesso ao site: <http://modelohand.blogspot.com.br/> em novembro de 2014.

HAMMOND, C., D. HALL, S. MILLER & SWETIK, P. Level I Stability Analysis (LISA). Documentation for Version 2.0. General Technical Report, USDA. Forest Service Intermountain Research Station. Versão, 1992.

INPE. Centro de Ciência do Sistema Terrestre do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Vulnerabilidades das Megacidades Brasileiras às Mudanças Climáticas: Região Metropolitana de São Paulo. Versão, 2010.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. Special Report: Global Warming of 1.5°C. Cap.3 -Impacts of 1.5°C global warming on natural and human systems. 2018. Acesso ao site: <https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/chapter-3/> em fevereiro de 2021.

JENSEN, D. T.; HARGREAVES, G. H.; TEMESGEN, B.; & ALLEN, R. G. Computation of ETo under Nonideal Conditions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**. 123(5). 1997. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1997\)123:5\(394\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1997)123:5(394)).

KEGEL W. Contribuição ao estudo da bacia costeira do Rio Grande do Norte. Bol. Div. Geol. Mineral. DNPM. Rio de Janeiro, RJ. Versão, 1957.

KOSUGI, K. Lognormal Distribution Model for Unsaturated Soil Hydraulic Properties. **Water Resources Research**. 32(9): 2697-2704 p. 1996. <https://doi.org/10.1029/96WR01776>

LIDAR. Perfilamento a laser. Acesso ao site: <http://www.lidar.com.br/> em novembro de 2014.

LIMA, A. F. **Comportamento Geomecânico e Análise de Estabilidade de uma Encosta da Formação Barreiras na Área Urbana da Cidade do Recife**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2002.

LIMA, D. L. DE S.; CORDEIRO, A. M. N.; & BASTOS, F. de H. Agentes condicionantes e desencadeadores de movimentos gravitacionais de massa na vertente úmida do maciço de Uruburetama, Ceará, Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**. 8(4): 1142-1157 p. 2015. <https://doi.org/10.5935/1984-2295.20150059>

MANNICH, M. & GUETTER, A. K. Solução Analítica da Equação de Richards. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. 16 (1): 47-54 p. 2011. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v16n1.p47-54>

MABESOONE J.M.; CAMPOS SILVA A.; & BUERLEN, K. Estratigrafia e origem do Grupo Barreiras em Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte. **Revista Brasileira de Geologia**. 2:173-188 p. 1972.

MABESOONE, J.M. Cenozóico nordestino: sistemas e seqüências deposicionais. *In*: SBG, SIMP. GEOL., NORDESTE, 11, Atas, 1984. p. 142-150.

MABESOONE, J. M. Revisão geológica da faixa sedimentar costeira de Pernambuco, Paraíba e parte do Rio Grande do Norte. *Estudos Geológicos, Série B*. Versão, 1991.

MABESOONE, J. M.; & ALHEIROS, M. M. Revisão geológica da faixa sedimentar costeira de Pernambuco, Paraíba e parte do Rio Grande do Norte – base estrutural. **Estudos Geológicos UFPE**. 10: 33-44 p. 1991.

MACHADO, C.C.C.; NÓBREGA, R.S.; OLIVEIRA, T.H.; & ALVES, K.M.A. Distúrbio Ondulatório de Leste como condicionante a eventos extremos de precipitação em Pernambuco. **Revista Brasileira de Climatologia**. 11(8): 146-188 p. 2012. <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v11i0.28699>

- MASAHARU, H.; HASEGAWA, H.; OHTSUBO, K. Three-dimensional City Modeling from Airborne Laser Scanning. *In: PROCEEDINGS OF THE 20TH INTERNATIONAL CARTOGRAPHIC CONFERENCE*, Vol. 2, 2001, Beijing, China, p.1337–1343.
- MCGUIRE L. A.; RENGERS, F. K.; KEAN, J. W.; Coel, J. A.; MIRUS, B. B.; BAUM, R. L. & GODT, J. W. Elucidating the role of vegetation in the initiation of rainfall-induced shallow landslides: Insights from an extreme rainfall event in the Colorado Front Range. **Geophysical Research Letters**. 43(17): 9084-9092 p. 2016. <https://doi.org/10.1002/2016GL070741>
- MEIRA, F. F. D. A. **Estudo do Processo Erosivo em Encostas Ocupadas**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.
- MELO, T. M. & LOUZADA, J. A. Avaliação de Diferentes Formulações do Modelo de Condutividade Hidráulica de Van Genuchten-Mualem. **Irriga**. 18(4): 730-742 p. 2013. <https://doi.org/10.15809/irriga.2013v18n4p730>
- MENON JÚNIOR, W. **Evolução Temporal das Áreas de Risco à Ocorrência de Escorregamentos na Bacia Hidrográfica do Córrego do Yung – Juiz de Fora/MG entre 1968 e 2010**. 2016. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2016.
- MICHEL, G. P.; KORIYAMA, M. & GOERL, R. F. Comparative analysis of SHALSTAB and SINMAP for landslide susceptibility mapping in the Cunha River basin, southern Brazil. **J Soils Sediments**. 14: 1266–1277 p. 2014. <https://doi.org/10.1007/s11368-014-0886-4>
- MIRANDA, L. Desenvolvimento Humano e Habitação no Recife. Desenvolvimento Humano no Recife. Atlas Municipal. Acesso ao site: <https://www.recife.pe.gov.br/pr/secplanejamento/pnud2006/doc/analiticos/Desenvolvimento%20Humano%20e%20Habita%C3%A7%C3%A3o%20no%20Recife.pdf> em janeiro de 2018.
- MIRANDA, J. H.; LIBARDI, P. L.; LIER, Q. J., & MORAES, S. O. Notas de aula: Física do Ambiente Agrícola. Capítulo 8 - Potenciais da Água no Solo. Departamento de Engenharia de Biosistemas. USP, Universidade de São Paulo. Acesso ao site: <http://www.leb.esalq.usp.br/leb/aulas/lce200/lce200.html> em janeiro de 2021.
- MONTEITH, J. L. Evaporation and surface temperature. **Quarterly J. Royal Meteor. Soc.** 107: 1-27 p. 1981. <https://doi.org/10.1002/qj.49710745102>
- MONTEITH, J. L. & UNSWORTH, M. H. Principles of Environmental Physics, Edward Arnold, London. Versão, 1990.
- MORAES, L.J. Estudos Geológicos do estado de Pernambuco. Boletim serviço Geologia e Mineração. Brasil, DNPM. Rio de Janeiro, RJ. Versão, 1928.
- MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resour. Res.** 12: 513–522 p. 1976. <https://doi.org/10.1029/WR012i003p00513>
- OLIVEIRA, P. E.; RAMOS, J. R. A. Geologia das quadrículas de Recife e Pontas de Pedra. DNPM. Divisão de Geol. Min. Boletim, n. 151. Versão, 1956.
- OLIVEIRA, A.I. & LEONARDOS, O.H. Geologia do Brasil. Rio de Janeiro: Serviço de Informação Agrícola. Versão, 1940
- PACK, R. T.; TARBOTON, D. G.; GOODWIN, C. N.; & PRASAD, A. A Stability Index Approach to Terrain Stability Hazard Mapping - SINMAP 2. Utah State University. Acesso ao site: <http://www.engineering.usu.edu/dtarb/sinmap.html> em agosto de 2005.

- PALENZUELA, J. A.; MARSELLA, M.; NARDINOCCHI, C.; PÉREZ, J. L.; FERNÁNDEZ, T.; CHACÓN J.; & IRIGARAY, C. Landslide detection and inventory by integrating LIDAR data in a GIS environment. **Landslides**. 12: 1035–1050 p. 2014. <https://doi.org/10.1007/s10346-014-0534-5>
- PE. Governo do Estado de Pernambuco. Validação dos Produtos Aerofotogramétricos e Perfilamento a Laser –Relatório Parcial do Bloco 3 - Análise de Consistência Lógica e Completude. Versão, 2018.
- PC-progress. Engineering Software Developer. HYDRUS-1D. (2019). Acesso ao site: <https://www.pc-progress.com/en/Default.aspx?hydrus-1d> em maio de 2019.
- PFALTZGRAFF, P. A. S. **Mapa de Susceptibilidade a Deslizamentos na Região Metropolitana do Recife**. 2007. Tese (Doutorado em Geociencias) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.
- PIRES, E. G. & BORMA, L. S. Utilização do modelo HAND para o mapeamento de bacias hidrografias em ambiente de Cerrado. *In: XVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR*, 2013, Foz do Iguaçu, PR. INPE. 8p.
- PORTO, R. L. Escoamento Superficial Direto. *In Drenagem Urbana*. Porto Alegre: Ed. Universidade / UFRGS / ABRH. Versão, 1995.
- RENNÓ, C. D.; & SOARES, J. V. Conceitos básicos de modelagem hidrológica. Cap. 2. (2017) Acesso ao site: http://www.dpi.inpe.br/cursos/tutoriais/modelagem/cap2_modelos_hidrologicos.pdf em dezembro de 2017.
- RASSAM, D., ŠIMŮNEK, J., MALLANTS, D., & VAN GENUCHTEN M. Th. The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably Saturated Media: Tutorial, Version 1.0. CSIRO Land and Water, Australia. Versão, 2018.
- RIBEIRO, A. A. S.; OLIVEIRA, G. A.; CIRILO, J. A.; BATISTA, L. F. D. R.; & MELO, V. B. Floodplain reconstitution based on data collected via smartphones: a methodological approach to hydrological risk mapping. **Brazilian Journal of Water Resources**. 25: 1-13 p. 2020. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.252020190179>
- RIBEIRO NETO, A.; CIRILO, J. A.; DANTAS, C.E.O.; & SILVA, E. R. Caracterização da Formação de Cheias na Bacia do Rio Una em Pernambuco Simulação Hidrológica-Hidrodinâmica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. 20: 394 – 403 p. 2015. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v20n2.p394-403>
- ROCHA, A. P. & SCHULER, C. A. B. Avaliação Espaço-temporal da Susceptibilidade a Movimentos de Massa Utilizando Ortofotocartas e Modelagem Espacial Multicritério na Dinâmica de Áreas de Risco nas Microrregiões do Jordão e Ibura, Recife-PE. **Revista Brasileira de Cartografia**. 68(9): 1747-1770 p. 2016.
- RODRIGUES, K. P. **Método de Avaliação de Risco de deslizamento Aplicado ao Morro da Carioca, Angra dos Reis – RJ**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

- SANTANA, R. G. **Análise de soluções de engenharia para estabilização de encostas ocupadas na Região Metropolitana do Recife – PE. Estudo de caso: Ruptura ocorrida em encosta com ocupação desordenada na UR2, Ibura**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2006.
- SANTANA, J. K. R.; XAVIER, J. P. S. & LISTO, F. L. R. Parâmetros Topográficos e a Distribuição Espacial dos Escorregamentos rasos no Bairro de Nova Descoberta, Região Metropolitana do Recife (PE). *In: XVII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA - I CONGRESSO NACIONAL DE GEOGRAFIA FÍSICA*, 2017, Campinas – SP.
- SANTANA, D. W. S.; SANTOS, M. C. L.; BARBOSA, J. M. A.; Nascimento Júnior, E. J. & Duarte, C. C. Análise da Relação entre a Intensidade da Chuva e Ocorrências de Alagamentos nos Meses de Abril e Maio de 2016 na Cidade do Recife, Pernambuco. **Revista Paisagens & Geografias**. 3(2): 33–44 p. 2018.
- SANTOS, A. R. dos. Enchentes e deslizamentos: causas e soluções-áreas de risco no Brasil. São Paulo: Pini. Versão, 2012.
- SATO, H. P. & SEKIGUCHI T. Landslide Susceptibility Mapping of the Kuchisakamoto Area, Central Japan using DTM from Airborne LIDAR. **Bulletin of the Geographical Survey Institute**. 52: 23–35 p. 2005.
- SAUSEN, T. M. & LACRUZ, M. S. P. Sensoriamento Remoto para desastres. São Paulo: Oficina de Textos, edição 1. Versão, 2015.
- SCHAAP, M. G., LEIJ, F. J., & VAN GENUCHTEN, M. Th. Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. **Journal of Hydrology**. 251 (3-4): 163-176 p. 2001. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00466-8](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00466-8)
- SCHILIRÒ, L.; DJUEYEP, G. P.; ESPOSITO, C. & MUGNOZZA, G. S. The Role of Initial Soil Conditions in Shallow Landslide Triggering: Insights from Physically Based Approaches. **Geofluids**. 2019: 1 -15 p. 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/2453786>
- SCHULZ, W. H. Landslide susceptibility revealed by LIDAR imagery and historical records, Seattle, Washington. **Engineering Geology**. 89: 67–87 p. 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.09.019>
- SILVA, L. A. A.; CAMPOS, D. J. S. L.; AQUINO, M. R. A. Vulnerabilidade Socioambiental nas Cidades: Os Riscos e perigos de Deslizamento de terra nas Áreas Pobres Lagoa Encantada e Monte Verde, Recife-PE. XVI Encontro Nacional de Geógrafos. Porto Alegre, 2010.
- SILVA, D. J. **Mapa de Risco de Deslizamento e Erosão em Encostas com Ocupações Desordenadas no Município de Abreu e Lima – PE**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.
- SILVEIRA, L. R. **Avaliação de vulnerabilidades por dois diferentes métodos e mapeamento de áreas suscetíveis a deslizamentos translacionais rasos**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.
- ŠIMŮNEK, J., M. ŠEJNA, H. SAITO, M. SAKAI, & VAN GENUCHTEN M. TH. The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media, Version 4.0, Hydrus Series 3, Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, Riverside, CA, USA. Vers, 2008.

ŠIMŮNEK, J.; ŠEJNA, M.; SAITO H.; SAKAI, M. & VAN GENUCHTEN, M. TH. The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media. Version 4.17. Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, Riverside, CA, USA. Versão, June 2013.

SCS. Soil Conservation Service. National Engineering Handbook, Section 4: Hydrology. Department of Agriculture, Washington DC. Versão, 1972.

SOUZA, H. L. S.; CANDEIAS, A. L. B.; SCHULLER, C. A. B. Análise das áreas de risco a partir de produtos fotogramétricos e dados da Defesa Civil no bairro da Macaxeira – Recife/PE. *In: XVII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR*, 2015, João Pessoa-PB. INPE. 2141-2148 p.

SOUZA, W. M.; AZEVEDO, P. V. & ARAÚJO, L. E. Classificação da Precipitação Diária e Impactos Decorrentes dos Desastres Associados às Chuvas na Cidade do Recife-PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**. 5 (2): 250-268 p. 2012.

<https://doi.org/10.26848/rbgf.v5i2.232788>

THIEBES, B.; BELL, R.; GLADE, T.; WANG J. & BAI, S. Application of SINMAP and Analysis of Model Sensitivity – Case Studies from Germany and China. **Rev. Rom. Journ. Geogr.** 60(1): 3–25 p. 2016.

TOMAZ, P. Curso de Manejo de águas pluviais. Reservatório de infiltração. (2010). Acesso ao site: http://www.pliniotomaz.com.br/downloads/capitulo16_bacia.pdf em setembro de 2010.

TOMAZ, P. (a) Cálculos hidrológicos e hidráulicos para obras municipais. Infiltração Método de Horton. (2010). Acesso ao site:

http://www.pliniotomaz.com.br/downloads/capitulo_86_infiltracao_hrton.pdf em outubro de 2010.

SULAIMAN, W. N. A.; ROSLI, M. H.; SAMAH, M. A. A. & KAMARUDIN, M. K. A. Landslide Susceptibility Mapping: Effect of Spatial Resolution towards the Prediction of Landslide Prone Area in a Tropical Catchment. **Chiang Mai J. Sci.** 44(2): 494-507 p. 2017.

UDESC. Universidade do Estado de Santa Catarina. (2017). Acesso ao site: http://www.cct.udesc.br/arquivos/id_submenu/1470/classificacao_sucs_2017.pdf em março de 2017.

UFBA. Universidade Federal da Bahia - Escola Politécnica. Departamento de Ciência e Tecnologia dos Materiais (Setor de Geotecnia). Mecânica dos Solos I. Conceitos introdutórios. (2017). Acesso ao site: www.ct.ufpb.br/~celso/solos/material/teoria1 em novembro de 2017.

UFJF. Universidade Federal de Juiz de Fora. Departamento de Transportes. Caracterização Física e Classificação dos Solos. Autor: Prof. Gil Carvalho Paulo de Almeida. Versão, fevereiro de 2004.

UFJF. Universidade Federal de Juiz de Fora. Faculdade de Engenharia. NuGeo/Núcleo de Geotecnia. Hidráulica dos Solos. Autor: Prof. M. Marangon. Versão, dezembro de 2017.

USGS. United States Geological Survey. The Landslide Handbook—A Guide to Understanding Landslides. Virginia. Versão, 2008.

USGS. United States Geological Survey. Baum, R.; Savage, W. Z.; Godt, J. TRIGRS—A Fortran Program for Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Analysis, Version 2.0. Reston, Virginia. Versão, 2008.

USP, Universidade de São Paulo. Apostila Água no Solo: Características e Comportamento. (2020). Acesso ao site:

https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/270126/mod_resource/content/1/Apostila%20Cap.%20202%20-%20%C3%81gua%20no%20Solo%20Caracter%C3%ADsticas%20e%20Comportamento.pdf em janeiro de 2020.

USU. Utah State University (2017). SINMAP. Acesso ao site:

<http://hydrology.usu.edu/sinmap/> em maio de 202.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Sci. Soc.** 44: 892–898 p. 1980.

VARGAS, M. Introdução à Mecânica dos Solos. McGraw-Hill do Brasil / Editora da Universidade de São Paulo. SP. Versão, 1977.

VARNES, D. J. Slope Movement Types and Processes. In: Landslides Analysis and Control. Washington: National Academy of Sciences. Versão, 1978.

WANDERLEY, L. S. A.; NÓBREGA, R. S.; MOREIRA, A. B.; AANJOS, R. S.; ALMEIDA, C. A. P. As Chuvas na Cidade do Recife: Uma Climatologia de Extremos. **Revista Brasileira de Climatologia**. 22: 149-164 p. 2018.

<http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v22i0.56034>

WANG, K.; LIN, M.; LIN J.; HUANG, S.; LIAO, R.; CHEN, C. Monitoring of the Evolution of a Deep-Seated Landslide in Lushan Area, Taiwan. **Engineering Geology for Society and Territory**. 2: 1317-1320 p. 2015. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09057-3_231

Witt, A. C. **Using a GIS (Geographic Information System) to Model Slope Instability and Debris Flow Hazards in the French Broad River Watershed, North Carolina**. 2005. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Faculty of North Carolina State University, Raleigh, 2005.

WP/WLI. Multilingual landslide glossary. International Geotechnical Societies' UNESCO Working Party on World Landslide Inventory. BiTech, Richmond. Versão, 1993.

ZHANG, X.; YU, G.; LI P. & LI ZHAN BIN. Landslide zoning analysis in Zhouqu under different rainfall warning levels. **Environmental Earth Sciences**. 76(17): 1-15 p. 2017.

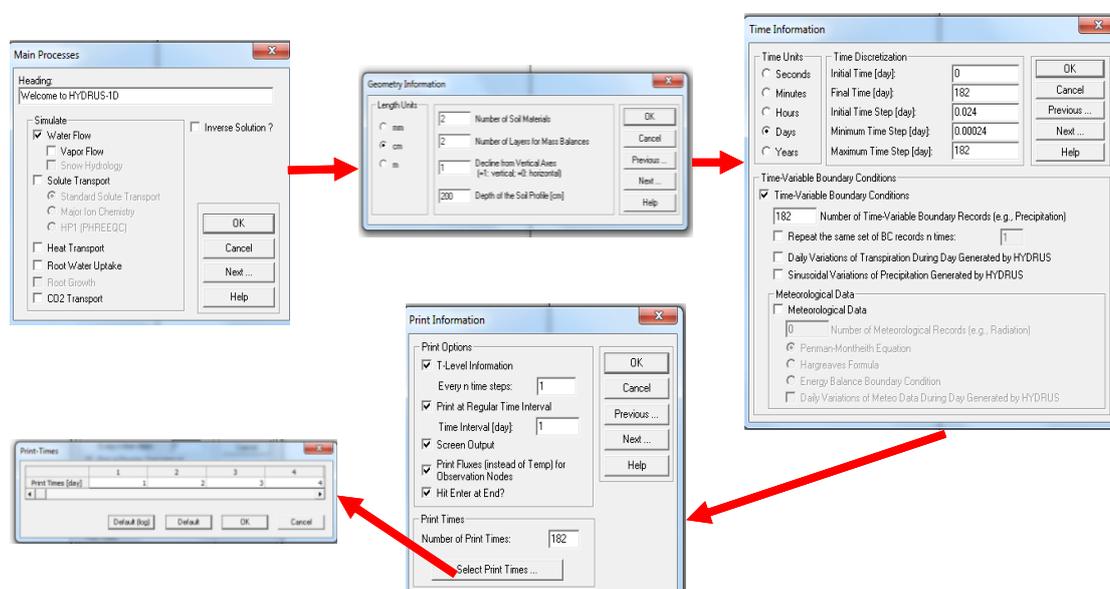
<https://doi.org/10.1007/s12665-017-6932-y>

APÊNDICE A - MÓDULO PADRÃO HYDRUS-1D

Para determinação do balanço hídrico no solo, na área de estudo, utilizou-se o módulo padrão do programa Hydrus-1D para cálculo da infiltração de água, em um perfil de duas camadas do solo.

Considera-se que a água começa a drenar do perfil do solo (inicialmente insaturado), somente quando a parte inferior do perfil atinge a saturação total. A infiltração é iniciada com uma pressão constante de 1 cm na superfície do solo, enquanto a drenagem livre é utilizada, na parte inferior do perfil. As Figuras A-1 e A-2 ilustram, na sequência, as telas de entrada do programa Hidrus 1D para infiltração de água, em um perfil de solo de duas camadas.

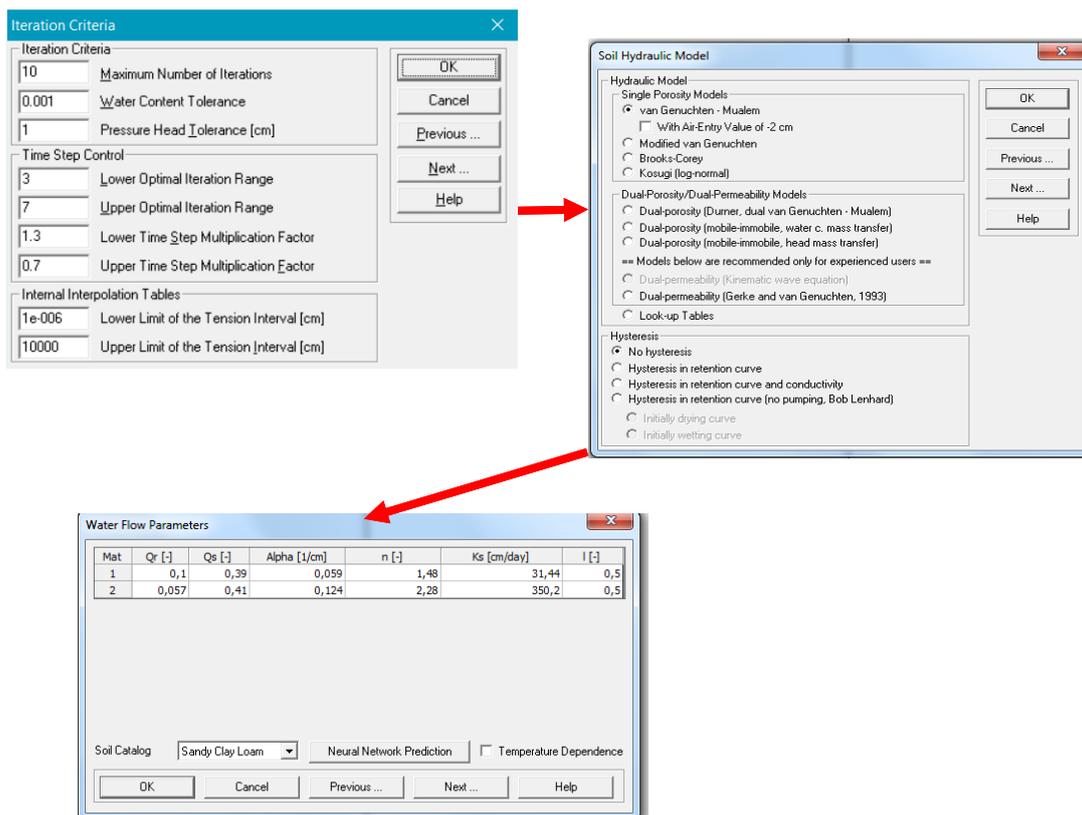
Figura A-1. Telas de entrada do programa Hidrus 1D - Parte 1



Na Figura A-1, na opção de tela *Time Information* no item *Number of time-variable boundary records*, são informadas as entradas do número de eventos de precipitação, evaporação e transpiração; em *Meteorological Data*, é possível escolher o método de evapotranspiração e balanço energético.

Na Figura A-2, a opção “Critérios de Iteração” apresenta a solução numérica para a Equação de Richards, equação que rege o fluxo de água na zona insaturada.

Figura A-2. Telas de entrada do programa Hidrus 1D – Parte 2



Na Figura A-3, na determinação das condições de contorno, utilizou-se a opção *Atmospheric BC with Surface Layer* que determina o fluxo por gravidade. Permite que uma camada de água superficial se acumule na superfície do solo, enquanto a água da chuva não pode se infiltrar, e o escoamento começar. Supõe-se, então, que o lençol freático esteja localizado muito abaixo do fundo do domínio do solo e, portanto, não afeta os processos de fluxo no perfil do solo adotado.

A condição do *Seepage face* permite que a água seja drenada do perfil do solo, quando a pressão, no fundo do perfil do solo, atinge um valor de 0, ou seja, quando a saturação completa é atingida. O escoamento superficial começa, apenas, quando a profundidade da camada de água superficial atinge 3cm.

Considerando-se o Hydrus-1D baseado em premissas agrícolas, os valores iniciais iguais à Capacidade do Campo, conteúdo de água ou a cabeça de pressão correspondente à condutividade hidráulica de cerca de 0,01cm/dia, são definidos em *Set Initial Conditions equal to Field Capacity*. No caso aqui apresentado, optou-se pela utilização do ajuste automático da tabela.

Figura A-3. Telas de entrada do programa Hidrus 1D – Parte 3

Water Flow Boundary Conditions

Upper Boundary Condition

Constant Pressure Head
 Constant Flux
 Atmospheric BC with Surface Layer
 Atmospheric BC with Surface Run Off
 Variable Pressure Head
 Variable Pressure Head/Flux
 Triggered Irrigation

Lower Boundary Condition

Constant Pressure Head
 Constant Flux
 Variable Pressure Head
 Variable Flux
 Free Drainage
 Deep Drainage
 Seepage Face; h =
 Horizontal Drains

Initial Condition

In Pressure Heads
 In Water Contents

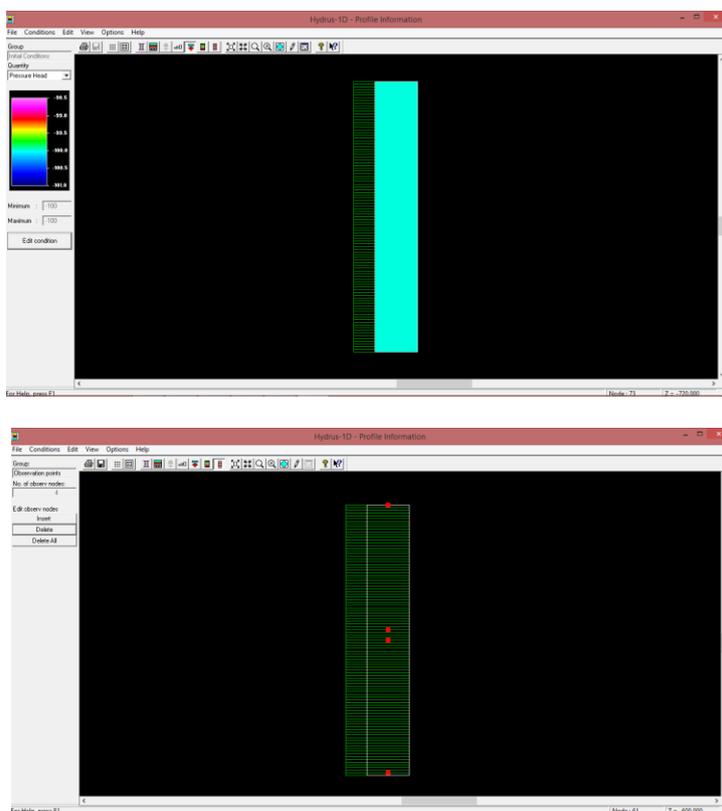
Max h at Soil Surface

Time Variable Boundary Conditions

	Time [day]	Precip. [cm/day]	Evap. [cm/day]	hCritA [cm]
1	1	2,1	0	50000
2	2	0,2	0	50000
3	3	0	0	50000
4	4	0,2	0	50000
5	5	0,3	0	50000
6	6	0,3	0	50000
7	7	0,1	0	50000
8	8	0	0	50000
9	9	0	0	50000
10	10	0,2	0	50000
11	11	0,4	0	50000
12	12	0,7	0	50000
13	13	0,3	0	50000
14	14	1,9	0	50000

Na Figura A-4, o editor gráfico discretiza o perfil do solo em 100 elementos finitos, envolvendo 101 nós.

Figura A-4. Telas de entrada do programa Hidrus 1D – Parte 4



APÊNDICE B - BALANÇO HÍDRICO NO SOLO

B.1 VOLUME ACUMULADO POR INFILTRAÇÃO (MÉTODO DE HORTON)

O Método de Horton, apresentado em 1940, quantifica matematicamente a infiltração no solo. A infiltração geralmente é maior, no início, e decai, ao longo do processo, até atingir um patamar constante. Dessa forma, o método realiza uma relação exponencial válida quando o potencial de vazão de infiltração é maior ou igual à precipitação (Tomaz, 2010).

A Equação B1 apresenta a fórmula de Horton:

$$f_p = f_f + (f_0 - f_f) \times e^{(-k.t)} \quad (B1)$$

Onde f_p é a taxa de infiltração no tempo “ t ” (mm/h); f_f é a taxa de infiltração mínima (mm/h); f_0 é a taxa de infiltração inicial (mm/h); k é uma constante obtida experimentalmente e depende do tipo de solo (/h) e “ t ” o tempo médio do intervalo (h). Para:

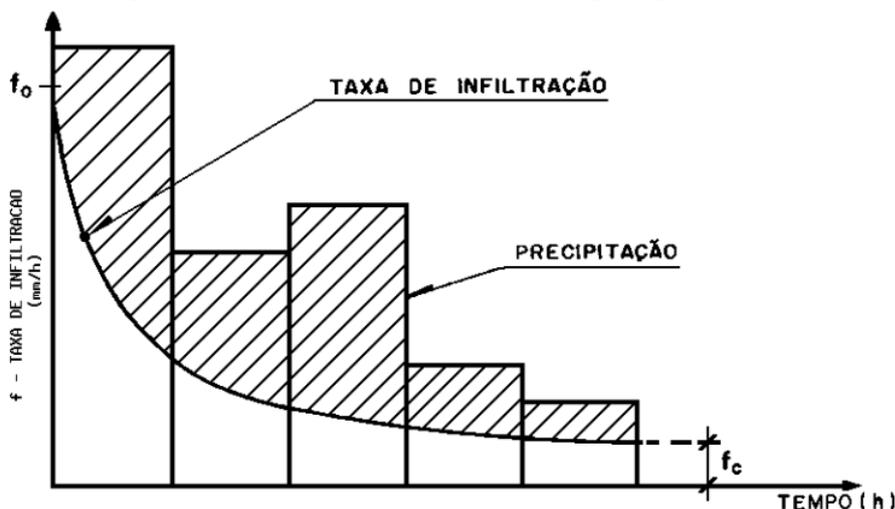
$$f = i \text{ se } f_p \geq i \quad (B2)$$

$$f = f_p \text{ se } f_p < i \quad (B3)$$

Sendo: “ f ” = a taxa de infiltração no tempo (mm/h) e “ i ” = intensidade de precipitação no tempo (mm/h)

A Equação B1 só é válida quando a recarga de água no solo é superior à taxa de infiltração. A Figura B1 ilustra a variação da infiltração com o tempo, segundo Horton.

Figura B2. Variação da infiltração com o tempo, segundo Horton



Os parâmetros f_f , f_0 , k são obtidos, em campo, ou por ajuste matemático. Segundo Porto (1995) *apud* Tomaz (2010), a estimativa de parâmetros da fórmula de Horton, de acordo com a Classificação hidrológica do solo, segundo o *Soil Conservation Service* (SCS) são apresentados no Quadro B1.

Akan (1993) recomenda que, quando não se tem dados, pode-se estimá-los usando os Quadros B2 e B3. O autor também cita que os valores de k variam de 0,67/h até 49/h. Segundo Tomaz (2010), para o piscinão do Pacaembu (Revista Engenharia n.º 500, 1994- Instituto de Engenharia de São Paulo, p.15) foram utilizados os parâmetros apresentados em Akan (1993).

Quadro B1. Estimativa de parâmetros da fórmula de Horton, segundo Porto (1995)

Tipo de solo <i>Soil Conservation Service</i> (SCS)	Parâmetros da fórmula de Horto		
	f_0 (mm/h)	f_f (mm/h)	k (/h)
A – Solos arenosos com baixo teor de argila, inferior a 8%, não há rocha nem camadas argilosas nem densificadas até 1,5 metros de profundidade	250	25	2
B – Solos arenosos menos profundos que os do Grupo A, com teor de argila total inferior a 15%. Não pode haver pedras nem camadas argilosas até 1,5 metros.	200	13	2
C – Solos barrentos com teor total de argila de 20 a 30%, sem camadas argilosas impermeáveis ou contendo pedras até 1,2 metros. Nota-se que, a 60 cm de profundidade, a camada é mais densificada que no grupo B, mas ainda longe das condições de impermeabilidade.	130	7	2
D – Solos argilosos (30 a 40% de argila total) com camada densificada a 50 cm de profundidade. Ou solos arenosos, como o tipo B, com camada argilosa quase impermeável ou horizonte de seixos rolados.	80	3	2

Fonte: A autora, 2017.

Quadro B2. Estimativa da taxa de infiltração final de Horton, Akan (1993)

Tipo de solo f_r	f_r (mm/h)
Solo argiloso com areia, silte e húmus	0 a 1,27
Solo arenoso argiloso	1,27 a 3,81
Solo siltoso com areia, silte e húmus	3,81 a 7,62
Solo arenoso	7,62 a 11,43

Fonte: A autora, 2017.

Quadro B3 - Estimativa da taxa de infiltração inicial de Horton, Akan (1993)

Tipo de solos	f_0 (mm/h)
Solo seco com pouca ou nenhuma vegetação	127,0
Mistura de solo com areia, silte, argila e húmus com pouca ou nenhuma vegetação	76,2
Solo argiloso seco com pouca ou nenhuma vegetação	25,40
Solo arenoso seco com vegetação densa	254,00
Solo seco, sendo mistura de solo com areia, silte, argila e húmus com vegetação densa	152,40
Solo argiloso seco com vegetação densa	50,00
Solo arenoso úmido com pouca ou nenhuma vegetação	43,18
Mistura de solo úmido com areia, silte, argila e húmus com pouca ou nenhuma vegetação	25,40
Solo argiloso úmido com pouca ou nenhuma vegetação	7,62
Solo arenoso úmido com pouca ou nenhuma vegetação	83,82
Mistura de solo úmido com areia, silte, argila e húmus com vegetação densa	50,80
Solo úmido argiloso com vegetação densa	17,78

Fonte: A autora, 2017.

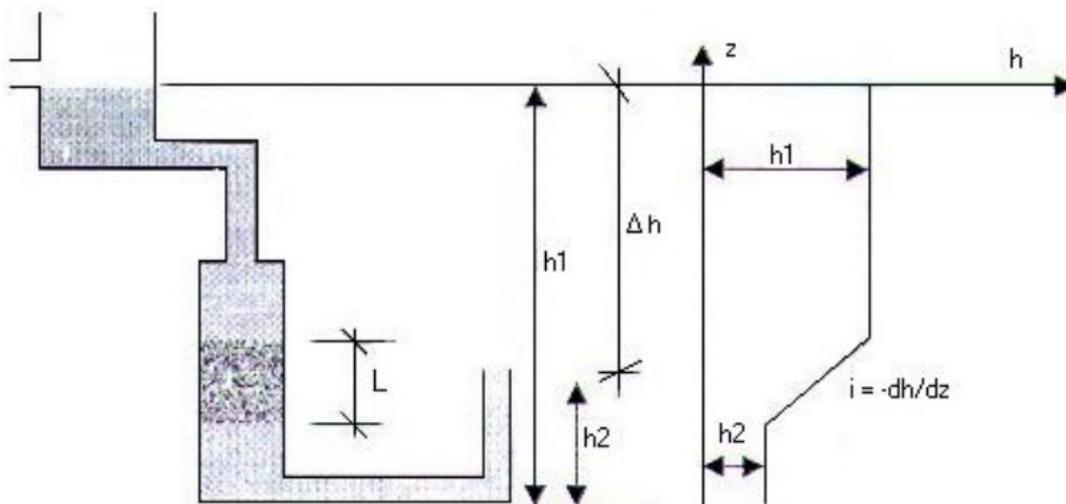
B.2 VELOCIDADE DE INFILTRAÇÃO (LEI DE DARCY)

Segundo UFJF (2017), permeabilidade é a propriedade que o solo apresenta de permitir o escoamento da água através dele, sendo o grau de permeabilidade expresso, numericamente, pelo “coeficiente de permeabilidade”. A determinação do coeficiente é feita tendo em vista a

lei experimental de Darcy (proposta em 1856).

Darcy realizou um experimento, com um arranjo similar ao mostrado na Figura B2, para estudar as propriedades do fluxo de água, através de uma camada de filtro de areia:

Figura B2. Esquema do experimento realizado por Darcy



Onde h_1 e h_2 são níveis de água mantidos constantes; “ q ” é taxa de fluxo que passa através da amostra (vazão de água); e “ i ” o gradiente hidráulico, como apresentado na Equação B4.

$$q = -k \times \left(\frac{\Delta h}{L} \right) \times A = k \times i \times A \quad (\text{B4})$$

A velocidade de Darcy ou vazão específica, velocidade com que a água percola o solo, é dada pela Equação B5.

$$v = -k \times \left(\frac{\Delta h}{L} \right) = k \times i \quad (\text{B5})$$

Entretanto, a velocidade real da água, nos vazios, depende da porosidade do solo (“ n ”), como apresentado na Equação B6.

$$v_{real} = \frac{v}{n} \quad (\text{B6})$$

Como a existência do gradiente hidráulico fará com que haja percolação, para o cálculo da velocidade de percolação (v_p) apresentada na Equação B7, considera-se a área efetiva de escoamento ou área de vazios (A_v).

$$v_p = k_p \times i \quad (B7)$$

Observa-se que a Lei de Darcy é válida, apenas, para um escoamento laminar, que ocorre quando as trajetórias das partículas d'água não se cortam; em caso contrário, denomina-se escoamento turbulento.

Em terrenos declivosos pode ocorrer um fluxo lateral sub-superficial. A capacidade de movimento horizontal depende da condutividade horizontal da água, do gradiente hidráulico e da espessura da região saturada, onde ocorre o escoamento (Tomaz, 2010).

B.3 VOLUME ACUMULADO POR INFILTRAÇÃO

Para o cálculo da taxa de infiltração, no tempo, pelo Método de Horton, são necessários dados de entrada para o sistema. Foram utilizados os dados da estação USF Alto Bela Vista-Ibura do CEMADEN, para entrada da precipitação.

Para os demais dados, optou-se pelos parâmetros (taxa de infiltração mínima “ f_f ” e taxa de infiltração inicial “ f_0 ”) apresentados, nos Quadros 14 e 15, por Akan (1993). Os referidos parâmetros levam em consideração a vegetação encontrada e umidade antecedente no solo. Informações que não são especificadas, no Quadro B1, utilizando-se a classificação SCS.

Entretanto, a faixa de variação para a constante “ k ” apresentada por Akan (1993) é muito extensa. Dessa forma, foi utilizado o valor apresentado no Quadro B1.

O mês de junho de 2017 foi escolhido para a análise, por apresentar umidade alta no solo e precipitação de grande volume registrado, em um curto espaço de tempo (análises dos cenários SINMAP no item 3.3).

O solo foi considerado úmido no mês de junho, pois as chuvas, em geral, iniciam-se no mês de maio. A evaporação não foi levada em consideração; supôs-se que a taxa é mínima durante o inverno. O Quadro B4 apresenta os parâmetros de entrada utilizados para o cálculo da infiltração do solo em Lagoa Encantada.

Quadro B4. Parâmetros do Método de Horton utilizados em Lagoa Encantada

Parâmetro		Tipo de solo	Fonte
f_f	2,54 mm/h	Solo areno argiloso	Akan (1993)
f_0	25,4 mm/h	Solo úmido com areia, silte, argila com pouca ou nenhuma vegetação	Akan (1993)
k	2 h^{-1}	Solo tipo B	Porto (1995)

Fonte: A autora, 2017.

A infiltração do solo foi calculada de forma simplificada, para cada hora, desconsiderando-se a diminuição da infiltração causada pela topografia íngreme da região. As aplicações do método de Horton, para cálculo da infiltração no solo em Lagoa Encantada, para os dias 28 e 29/06/2017 (chuva máxima de 48 horas e 24 horas) são apresentadas nas Tabelas B1 e B2 respectivamente.

Tabela B1. Aplicação do método de Horton em Lagoa Encantada – dia 28/06/2017

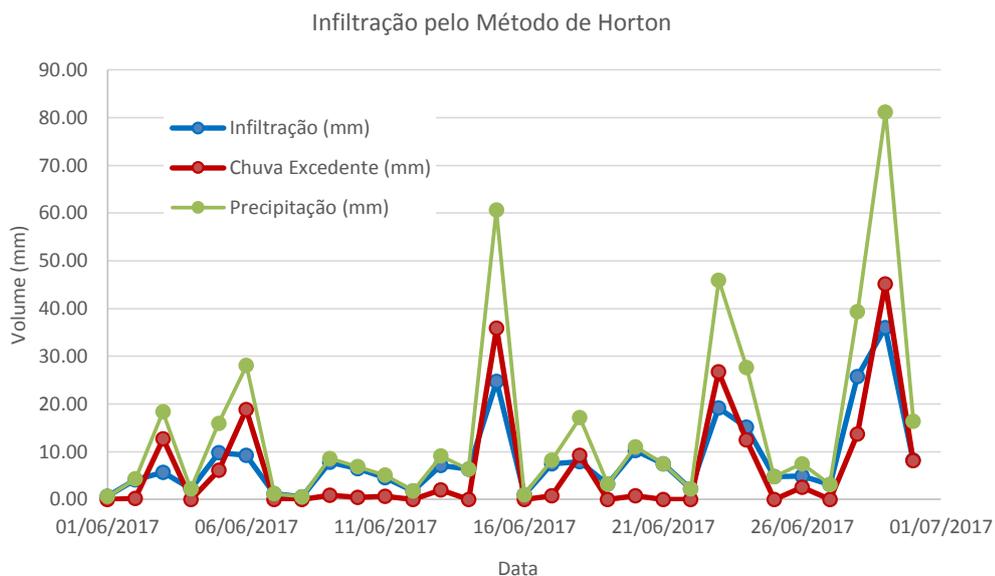
Do tempo	Para tempo	Tempo médio	Horton	Infiltração	Intensidade da chuva	Infiltração	Chuva Excedente
t1 (h)	t2 (h)	t (h)	fp (mm/h)	f (mm/h)	i (mm/h)	(mm)	(mm)
648	649	648.5	2.5	1.18	1.18	1.18	0.00
649	650	649.5	2.5	1.58	1.58	1.58	0.00
650	651	650.5	2.5	1.19	1.19	1.19	0.00
651	652	651.5	2.5	0.20	0.20	0.20	0.00
652	653	652.5	2.5	0.00	0.00	0.00	0.00
653	654	653.5	2.5	0.00	0.00	0.00	0.00
654	655	654.5	2.5	2.54	7.87	2.54	5.33
655	656	655.5	2.5	0.20	0.20	0.20	0.00
656	657	656.5	2.5	2.54	5.51	2.54	2.97
657	658	657.5	2.5	0.39	0.39	0.39	0.00
658	659	658.5	2.5	2.54	4.91	2.54	2.37
659	660	659.5	2.5	0.99	0.99	0.99	0.00
660	661	660.5	2.5	2.54	5.12	2.54	2.58
661	662	661.5	2.5	2.17	2.17	2.17	0.00
662	663	662.5	2.5	1.58	1.58	1.58	0.00
663	664	663.5	2.5	0.00	0.00	0.00	0.00
664	665	664.5	2.5	0.20	0.20	0.20	0.00
665	666	665.5	2.5	0.00	0.00	0.00	0.00
666	667	666.5	2.5	2.54	2.55	2.54	0.01
667	668	667.5	2.5	0.59	0.59	0.59	0.00
668	669	668.5	2.5	2.54	2.95	2.54	0.41
669	670	669.5	2.5	0.20	0.20	0.20	0.00
670	671	670.5	2.5	0.00	0.00	0.00	0.00
671	672	671.5	2.5	0.00	0.00	0.00	0.00
Total						25.71	13.67

Tabela B2. Aplicação do método de Horton em Lagoa Encantada – dia 29/06/2017

Do tempo	Para tempo	Tempo médio	Horton	Infiltração	Intensidade da chuva	Infiltração	Chuva Excedente
t1 (h)	t2 (h)	t (h)	f _p (mm/h)	f (mm/h)	i (mm/h)	(mm)	(mm)
672	673	672.5	2.5	2.54	5.31	2.54	2.77
673	674	673.5	2.5	2.54	5.12	2.54	2.58
674	675	674.5	2.5	0.00	0.00	0.00	0.00
675	676	675.5	2.5	2.54	3.94	2.54	1.40
676	677	676.5	2.5	0.79	0.79	0.79	0.00
677	678	677.5	2.5	2.54	6.09	2.54	3.55
678	679	678.5	2.5	0.20	0.20	0.20	0.00
679	680	679.5	2.5	0.40	0.40	0.40	0.00
680	681	680.5	2.5	2.54	4.92	2.54	2.38
681	682	681.5	2.5	2.54	3.35	2.54	0.81
682	683	682.5	2.5	2.54	7.08	2.54	4.54
683	684	683.5	2.5	2.54	20.78	2.54	18.24
684	685	684.5	2.5	2.54	2.76	2.54	0.22
685	686	685.5	2.5	0.20	0.20	0.20	0.00
686	687	686.5	2.5	0.00	0.00	0.00	0.00
687	688	687.5	2.5	1.97	1.97	1.97	0.00
688	689	688.5	2.5	2.54	11.21	2.54	8.67
689	690	689.5	2.5	0.20	0.20	0.20	0.00
690	691	690.5	2.5	0.40	0.40	0.40	0.00
691	692	691.5	2.5	0.78	0.78	0.78	0.00
692	693	692.5	2.5	0.99	0.99	0.99	0.00
693	694	693.5	2.5	2.54	2.55	2.54	0.01
694	695	694.5	2.5	2.17	2.17	2.17	0.00
695	696	695.5	2.5	0.00	0.00	0.00	0.00
Total						36.04	45.17

A Figura B3 apresenta o balanço simplificado, para o mês de junho de 2017, entre a precipitação ocorrida, o volume infiltrado e o escoado. No mês, a precipitação total foi de 445mm com infiltração de 248mm (56% do total).

Figura B3. Volume infiltrado e escoado em Lagoa Encantada em junho/2017



B.4. COMPARAÇÃO DO VOLUME INFILTRADO CALCULADO PELO MÉTODO DE HORTON VERSUS O HIDRUS-1D

O volume infiltrado calculado pelo método de Horton foi para solo único SC - areia argilosa (de 0cm a 200cm de profundidade) foi o mesmo utilizado pelo SINMAP, e o volume infiltrado em Hydrus – 1D foi a soma dos volumes infiltrados nos solos 1- Sandy clay loam (de 0cm a 12cm de profundidade) e 2 - Loamy sand (de 13cm a 200cm).

Observa-se uma defasagem de um dia, no volume infiltrado, em relação à precipitação no Hydrus-1D, caracterizando o tempo necessário para infiltração da precipitação ocorrida.

Quando comparados, observa-se que o volume infiltrado apresentado pelo Hydrus-1D, no mês de junho/2016, foi de 54% do total precipitado no mês, enquanto o volume infiltrado simulado pelo método de Horton, para o mês de junho/2017, foi de 56% do total precipitado no mês. Ou seja, os dois métodos apresentaram volume infiltrado próximos para o mês.