



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

CARLLA RAFAELLA BARROS DE ANDRADE

**ANÁLISE DA SUSCETIBILIDADE À OCORRÊNCIAS DE DESLIZAMENTOS  
RASOS ATRAVÉS DE MODELO MATEMÁTICO EM MICROBACIAS  
HIDROGRÁFICAS NA FORMAÇÃO BARREIRAS, SITUADAS NA ZONA NORTE  
DO RECIFE-PE**

Recife

2022

CARLLA RAFAELLA BARROS DE ANDRADE

**ANÁLISE DA SUSCETIBILIDADE À OCORRÊNCIAS DE DESLIZAMENTOS  
RASOS ATRAVÉS DE MODELO MATEMÁTICO EM MICROBACIAS  
HIDROGRÁFICAS NA FORMAÇÃO BARREIRAS, SITUADAS NA ZONA NORTE  
DO RECIFE-PE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

**Área de concentração:** Geotecnia.

**Orientador:** Prof<sup>o</sup>. Dr. Roberto Quental Coutinho.

Recife

2022

Catálogo na fonte:  
Bibliotecário Josias Machado da Silva Junior / CRB4 -1690

A553a

Andrade, Carlla Rafaella Barros de.

Análise da suscetibilidade à ocorrências de deslizamentos rasos através de modelo matemático em microbacias hidrográficas na formação de barreiras, situadas na Zona Norte do Recife / Carlla Rafaella Barros de Andrade. – Recife, 2022.

234 folhas, il., tabs., abrev. e sigl.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Quental Coutinho.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife, 2022.

Inclui Referências.

1. Engenharia civil. 2. Caracterização geotécnica. 3. Análise de suscetibilidade. 4. Modelo TRIGRS. I. Coutinho, Roberto Quental (orientador). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2023-010

**ANÁLISE DA SUSCETIBILIDADE À OCORRÊNCIAS DE DESLIZAMENTOS  
RASOS ATRAVÉS DE MODELO MATEMÁTICO EM MICROBACIAS  
HIDROGRÁFICAS NA FORMAÇÃO BARREIRAS, SITUADAS NA ZONA NORTE  
DO RECIFE-PE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil com ênfase em Geotecnia.

Aprovada em: 23/02/2022.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof<sup>o</sup>. Dr. Roberto Quental Coutinho (Orientador)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof<sup>o</sup>. Dr. Rodolfo Moreda Mendes (Examinador Externo)  
Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais

---

Prof<sup>o</sup>. Dr. Ricardo Nascimento Flores Severo (Examinador Externo)  
Instituto Federal do Rio Grande do Norte

Dedico esse trabalho a Deus, por todos os livramentos e bênçãos em minha vida. Aos meus pais (Maria das Graças Andrade e José Waldeck Barros), meu irmão (Carlos Henrique) e meu namorado (Bruno Conde) por todo amor, companheirismo e apoio.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu professor orientador, Dr. Roberto Quental Coutinho, pela sua orientação e confiança depositado a mim desde a os projetos de pesquisa e inovação que participei até o trabalho de dissertação.

À Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) e ao Grupo de Engenharia Geotécnica de Encostas, Planícies e Desastres (GEGEP/UFPE), por todo conhecimento, experiências e oportunidades que tive ao longo da pós graduação.

Ao engenheiro Rodolfo Mendes, aos geólogos Márcio Andrade e Daniel Metodiev, e ao físico Marcio Moraes pertencentes ao CEMADEN, por contribuírem no desenvolvimento da pesquisa através da parceria entre o CEMADEN e o GEGEP.

À geógrafa Bethânia Queiroz membro do GEGEP, pelo auxílio na elaboração de mapas utilizados nesta dissertação.

Aos técnicos Francisco e Gutemberg do Laboratório de Geotecnia e Instrumentação da Universidade Federal de Pernambuco, pela ajuda na realização dos ensaios.

Ao meu parceiro e namorado, Bruno Conde Passos, por todo, apoio, dedicação e amor essenciais em todas as etapas deste trabalho.

Aos meus amigos, que tive a honra de conhecer durante o período da realização do mestrado, que sempre me apoiaram e me ajudaram a levar os momentos mais difíceis com mais leveza. Bruno Diego, Ana Karine, Felipe Brandão, Magno Drumond, Claudia Calado, Wilson Ramos, Danisete Souza, Iran Everton, Rosane Kelen, Pedro Gomes, Felipe Tenório, Nathália Lins, Marcos Henrique, Louise Elena, vocês tiveram grande participação na minha jornada.

Aos meus pais, Maria das Graças Andrade e José Waldeck, por todo sacrifício que fizeram e fazem para dar as oportunidades para mim e meu irmão. Suas cobranças, incentivos, paciência e amor são fundamentais em todas as minhas vitórias.

À Deus, por todos livramentos e graças alcançados em minha vida.

“A menos que modifiquemos à nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo”. (Albert Einstein)

## RESUMO

A Zona Norte do Recife é bastante conhecida devido à frequente ocorrência de movimentos de massa em meses chuvosos, apresentando vasto histórico de deslizamentos com vítimas fatais, não-fatais e destruição de imóveis ao longo dos anos. As áreas de estudo são duas microbacias hidrográficas (com 0,6 e 0,17 km<sup>2</sup>) localizadas na Zona Norte da cidade do Recife-PE. Face à vulnerabilidade desse local, o objetivo do presente trabalho é determinar a suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos translacionais rasos de duas microbacias hidrográficas, pertencentes à Formação Barreiras, localizadas na Região Norte de Recife-PE, através da aplicação de um modelo matemático de base física (TRIGRS) e analisar o desempenho e a sensibilidade do modelo matemático TRIGRS, com base no registro de ocorrências pela metodologia LR<sub>class</sub>. As análises de suscetibilidade foram divididas em dois cenários. Cenário SAT, considerando a infiltração saturada e Cenário NSAT, considerando infiltração não saturada. Para cada cenário foi alterado a profundidade máxima do solo ( $Z_{max}$ ), para cálculo a poropressão e do Fator de Segurança (FS), considerando às profundidades de solo de 1, 2 e 3m. Os resultados dos ensaios laboratoriais e de campo revelam que existe paridade desses com os dados de outras pesquisas, fato que pode tornar a modelagem numérica adequada para a previsão de ocorrência de deslizamentos. As análises realizadas com o modelo TRIGRS mostraram que a área classificada como instável ( $FS \leq 1$ ) coincidiu com o relevo mais elevado e íngreme das áreas de estudo. A validação das análises de suscetibilidade do Cenário SAT não apresentou diferenças significativas entre as análises do Cenário NSAT. O método de validação LR<sub>class</sub> demonstrou que o modelo TRIGRS gerou resultados satisfatórios e coerentes com as observações reais, permitindo identificar as áreas mais susceptíveis a deslizamentos rasos translacionais. Para as duas microbacias analisadas os mapas de suscetibilidade gerados para os cenários NSAT para  $Z_{max}$  2 e 3 metros, foram os mais precisos, entre os cenários modelados.

Palavras-chave: caracterização geotécnica; análise de Suscetibilidade; modelo TRIGRS.

## ABSTRACT

The North Zone of Recife is well known due to the frequent occurrence of mass movements in rainy months, with a vast history of landslides with fatal and non-fatal victims and destruction of properties over the years. The study areas are two watersheds (with 0.6 and 0.17 km<sup>2</sup>) located in the North Zone of the city of Recife-PE. Given the vulnerability of this location, the objective of the present work is to determine the susceptibility to the occurrence of shallow translational landslides of two watersheds, belonging to the Barreiras Formation, located in the North Region of Recife-PE, through the application of a mathematical model of physical basis (TRIGRS) and to analyze the performance and sensitivity of the TRIGRS mathematical model, based on the registration of occurrences by the LR<sub>class</sub> method. The susceptibility analyzes were divided into two scenarios. SAT Scenario, considering saturated seepage, and NSAT Scenario, considering unsaturated seepage. For each scenario, the maximum soil depth ( $Z_{max}$ ) was changed to calculate the pore pressure and the Safety Factor (FS), considering soil depths of 1, 2, and 3m. The results of laboratory and field tests reveal that there is parity of these with the data from other research, a fact that can make the numerical modeling adequate for the prediction of the occurrence of landslides. The analyzes carried out with the TRIGRS model showed that the area classified as unstable ( $FS \leq 1$ ) coincided with the highest and steepest relief of the study areas. The validation of the SAT Scenario susceptibility analyzes did not show significant differences between the NSAT Scenario analyses. The LR<sub>class</sub> validation method showed that the TRIGRS model generated satisfactory results that were consistent with the real observations, allowing the identification of areas most susceptible to shallow translational landslides. For the two watersheds analyzed, the susceptibility maps generated for the NSAT scenarios for  $Z_{max}$  2 and 3 meters were the most accurate among the modeled scenarios.

Keywords: geotechnical characterization; susceptibility analysis; TRIGRS model.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Deslizamento translacional / planar ocorrido na encosta Espinhaço da Gata – PE	36
Figura 2 - Vista aérea de região atingida por deslizamento rotacional em Blumenau – SC, 2008	37
Figura 3 - Diagrama dos fatores predisponentes e acionantes / agravantes dos movimentos de massa	38
Figura 4 - Talude infinito, forças atuantes em uma fatia genérica	44
Figura 5 - Pontos notáveis de uma curva característica	48
Figura 6 - Curva de retenção de solos tropicais em formato de “sela”	49
Figura 7 - Sistema de coordenadas cartesianas usada na análise de Richards. Sendo x, tangente a superfície da encosta; y tangente as curvas de nível e z normal ao plano xy; e $\alpha$ é a inclinação da encosta em relação a horizontal	54
Figura 8 - Esboço mostrando a definição da coordenada vertical ( $Z=x\sin\alpha+z\cos\alpha$ ), espessura do solo medida em campo com o trado, usada para calcular a profundidade em um local arbitrário (x,z). Se as coordenadas Z e z partem do mesmo ponto de origem, então $Z=z\cos\alpha$ .	54
Figura 9 - Seções transversais esquemáticas mostrando condições de contorno assumidas pelo modelo TRIGRS na derivação das duas equações de infiltração (equações 9 e 10). A dimensão $Z_{\max}$ corresponde a profundidade máxima indicada pelo usuário, assim como a inicial do lençol freático (d). (A) é uma condição contorno de profundidade infinita, representada pela equação 9 (apropriada para áreas onde a condutividade hidráulica saturada vertical é relativamente uniforme com a profundidade), e (B) representa uma condição de contorno de profundidade finita, representada pela equação 10 (apropriada em áreas onde uma camada superficial mais permeável se sobrepõe a um substrato menos permeável).	55
Figura 10 - Condições da água subterrânea rasa, em solos de encosta. A zona não saturada acima do lençol freático tem profundidade $d_u$ . A franja capilar está entre a zona não saturada e o lençol freático em profundidade d. O limite inferior, que é tratado como impermeável neste modelo, está na profundidade $Z_{\max}$	59

Figura 11 - Gráfico mostrando exemplo de modelo de Gardner (1958) para curva característica do solo. O modelo foi ajustado aos dados de retenção de água para um colúvio arenoso derivado de areia de lavagem glacial perto de Everett, Wash. Parâmetros de Gardner: $\alpha = 3,5$ , $\theta_s = 0,41$ , $\theta_r = 0,05$	60
Figura 12 - Espaçamento vertical para calcular a infiltração e o fator de segurança. O usuário especifica o limite superior, $z_{min}$ , o limite inferior, $z_{max}$ e o número de etapas, $nz$ . Para evitar a divisão por zero, o limite superior, $z_{min}$ , deve ser uma profundidade pequena e finita abaixo da superfície do solo. O programa TRIGRS calculará a poropressão e o fator de segurança em profundidades igualmente espaçadas entre $z_{min}$ e $z_{max}$	63
Figura 13 - Localização das microbacias estudadas	75
Figura 14 - Localização da microbacia Córrego do Morcego	76
Figura 15 - Localização da microbacia Córrego do Jenipapo	76
Figura 16 - Posição dos pluviômetros em relação a microbacia Córrego do Morcego	77
Figura 17 - Posição dos pluviômetros em relação a microbacia Córrego do Jenipapo	78
Figura 18 - Precipitação acumulada mensal e média dos anos 2015 e 2021. Pluviômetro: Dois Unidos – CEMADEN	79
Figura 19 - Precipitação acumulada mensal e média dos anos 2015 a 2021. Pluviômetro: Córrego do Jenipapo – CEMADEN	79
Figura 20 - Esquema de seções colunares da Formação Barreiras no nordeste brasileiro. (a) Fácies de leques aluviais proximal; (b) Fácies canal fluvial entrelaçado e (c) Fácies planícies flúvio-lagunar	81
Figura 21 - Geologia da microbacia Córrego do Morcego	82
Figura 22 - Geologia da microbacia Córrego do Jenipapo	82
Figura 23 - Mapa de declividade da microbacia Córrego do Morcego	84
Figura 24 - Mapa de declividade da microbacia Córrego do Jenipapo	84
Figura 25 - Mapa hipsométrico da microbacia Córrego do Morcego	85
Figura 26 - Mapa hipsométrico da microbacia Córrego do Jenipapo	85
Figura 27 - Ocupação antrópica desordenada: a) na microbacia Córrego do Morcego; b) na microbacia Córrego do Jenipapo	87
Figura 28 - Casas construídas em corte realizado na encosta: a) na microbacia Córrego do Morcego; b) na microbacia Córrego do Jenipapo	87

Figura 29 - Drenagem obstruída por lixo e vegetação: a) na microbacia Córrego do Morcego; b) na microbacia Córrego do Jenipapo	87
Figura 30 - Descarte de água servida na crista do talude: a) na microbacia Córrego do Morcego; b) na microbacia Córrego do Jenipapo	88
Figura 31 - Remoção da vegetação primária: a) na microbacia Córrego do Morcego; b) na microbacia Córrego do Jenipapo	88
Figura 32 - Plantio de vegetação secundária: a) na microbacia Córrego do Morcego; b) na microbacia Córrego do Jenipapo	88
Figura 33 - Vazamento de tubulações: a) na microbacia Córrego do Morcego; b) na microbacia Córrego do Jenipapo	89
Figura 34 - Detalhe de fossas na borda da encosta: a) na microbacia Córrego do Morcego; b) na microbacia Córrego do Jenipapo	89
Figura 35 - Deslizamento de encosta na rua Córrego do Curió em Dois Unidos, Recife - PE	91
Figura 36 - Deslizamento de encosta localizada na rua Ageu em Passarinho, Recife -PE	91
Figura 37 - Deslizamento de encosta localizada na rua da Liberdade em Dois Unidos, Recife – PE	92
Figura 38 - Deslizamento de encosta na rua Alto do Capitão em Dois Unidos, Recife-PE.	92
Figura 39 - Deslizamento de encosta no bairro Brejo da Guabiraba, Recife-PE	93
Figura 40 - Mapa de ocorrências de deslizamentos na microbacia Córrego do Morcego de 2014-2020	94
Figura 41 - Mapa de ocorrências de deslizamentos na microbacia Córrego do Jenipapo de 2014-2020	94
Figura 42 - Distribuição mensal das ocorrências de deslizamentos na microbacia Córrego do Morcego (2014 - 2020) e dados pluviométricos (2015 – 2021)	95
Figura 43 - Distribuição mensal das ocorrências de deslizamentos na microbacia Córrego do Jenipapo (2014 - 2020) e dados pluviométricos (2015 – 2021)	95
Figura 44 - Distribuição mensal do número de ocorrências de deslizamentos na microbacia Córrego do Morcego e dados pluviométricos dos anos: a) 2015; b) 2016; c) 2017; d) 2018; e) 2019; f) 2020.	96

Figura 45 - Distribuição mensal do número de ocorrências de deslizamentos na microbacia Córrego do Jenipapo e dados pluviométricos dos anos: a) 2015; b) 2016; c) 2017; d) 2018; e) 2019; f) 2020	97
Figura 46 - Localização dos estudos Geotécnicos realizados na microbacia Córrego do Jenipapo	99
Figura 47 - Perfil de sondagens SPT, a) P-01; b) P-02; c) P-03; d) P-04; e) P-05; f) P-06; g) P-07	101
Figura 48 - Variação da permeabilidade (Ks) com a profundidade do solo. a) P-02; b) P-05; c) P-07	102
Figura 49 - Curvas características de retenção de água no solo das amostras P-02 e P-07. a) Sucção x Teor de umidade gravimétrica; b) Sucção x Teor de umidade volumétrica	104
Figura 50 - Localização da investigação de campo realizados na microbacia Córrego do Morcego	105
Figura 51 - Sondagens SPT, P-05 e P-09	106
Figura 52 - Esquema Permeâmetro Guelph	107
Figura 53 - Realização do ensaio com Permeâmetro Guelph. a) P-02; b) P-06)	109
Figura 54 - Permeâmetro Guelph e realização do ensaio (P-07)	109
Figura 55 - Etapas da coleta das amostras indeformadas na microbacia Córrego do Morcego.	111
Figura 56 - Realização dos ensaios de Peneiramento (a) e Sedimentação (b)	112
Figura 57 - Realização dos ensaios de limite de plasticidade (a), limite de liquidez (b) e densidade real dos grãos (c)	112
Figura 58 - Moldagem dos corpos de prova	113
Figura 59 - Processo de Saturação por capilaridade	114
Figura 60 - Processo de secagem das amostras	115
Figura 61 - Preparação dos corpos de prova para equalização	115
Figura 62 - Caixa de isopor utilizada	115
Figura 63 - Papel filtro utilizado	116
Figura 64 - Prensa de cisalhamento direto utilizada	117
Figura 65 - Moldagem dos corpos de prova para o ensaio de cisalhamento direto	118
Figura 66 - Plataforma de coleta de dados geotécnicos – PCD Geotécnica, em detalhes.	119

Figura 67 - Localização das PCDs Geotécnica na Região Metropolitana do Recife	121
Figura 68 - Coleta de amostras indeformadas	122
Figura 69 - Precipitação acumulada diária de junho/2019 do pluviômetro Dois Unidos.	124
Figura 70 - Precipitação acumulada horária de 13/06/2019 do pluviômetro Dois Unidos	124
Figura 71 - Distribuição das ocorrências de deslizamentos e dados pluviométricos diário de junho de 2019 para microbacia Córrego do Morcego	125
Figura 72 - Comparação da precipitação acumulada mensal dos pluviômetros: Dois Unidos – CEMADEN e PCD 1 – CEMADEN (período junho/2019 a setembro/2020)	126
Figura 73 - Evento Pluviométrico modelado no TRIGRS, para a microbacia Córrego do Morcego	126
Figura 74 - Precipitação acumulada diária de julho/2019 do pluviômetro Córrego do Jenipapo.	127
Figura 75 - Precipitação acumulada horária de 24/07/2019 do pluviômetro Córrego do Jenipapo.	127
Figura 76 - Distribuição das ocorrências de deslizamentos e dados pluviométricos diário de julho de 2019 para microbacia Córrego do Jenipapo	128
Figura 77 - Comparação da precipitação acumulada mensal dos pluviômetros: Córrego do Jenipapo – Cemaden e PCD 2 – Cemaden (período junho/2019 a setembro/2020)	129
Figura 78 - Evento Pluviométrico modelado no TRIGRS, para a microbacia Córrego do Jenipapo	129
Figura 79 - Fluxograma com os cenários utilizados na análise de suscetibilidade pelo modelo TRIGRS	132
Figura 80 - P-05 - Perfil de sondagens SPT; descrição táctil-visual em campo; granulometria em laboratório	136
Figura 81 - P-07 - Perfil de sondagens SPT; descrição táctil-visual em campo; granulometria em laboratório	136
Figura 82 - P-08 - Perfil de sondagens SPT; descrição táctil-visual em campo; granulometria em laboratório	137
Figura 83 - P-09 - Perfil de sondagens SPT; descrição táctil-visual em campo	137

Figura 84 -	Varição da permeabilidade (Ks) com a profundidade do solo. a) P-02; b) P-06 e c) P-07	139
Figura 85 -	Curva Granulométrica com e sem defloculante: a) P-01; b) P-02; c) P-03; d) P-04; e) P-05; f) P-06.	140
Figura 86 -	Curvas características de retenção de água no solo da amostra P-03	143
Figura 87 -	Resultados dos ensaios de cisalhamento direto para as amostras P-01: a) curva $\tau \times \varepsilon$ na umidade natural; b) curva $\tau \times \varepsilon$ umidade inundada; c) envoltória de Mohr-Coulomb	144
Figura 88 -	Resultados dos ensaios de cisalhamento direto para as amostras P-02: a) curva $\tau \times \varepsilon$ na umidade natural; b) curva $\tau \times \varepsilon$ umidade inundada; c) envoltória de Mohr-Coulomb	145
Figura 89 -	Resultados dos ensaios de cisalhamento direto para as amostras P-03: a) curva $\tau \times \varepsilon$ na umidade natural; b) curva $\tau \times \varepsilon$ umidade inundada; c) envoltória de Mohr-Coulomb	145
Figura 90 -	Resultados dos ensaios de cisalhamento direto para as amostras P-04: a) curva $\tau \times \varepsilon$ na umidade natural; b) curva $\tau \times \varepsilon$ umidade inundada; c) envoltória de Mohr-Coulomb.	146
Figura 91 -	Resultados dos ensaios de cisalhamento direto para as amostras P-05: a) curva $\tau \times \varepsilon$ na umidade natural; b) curva $\tau \times \varepsilon$ umidade inundada; c) envoltória de Mohr-Coulomb.	146
Figura 92 -	Resultados dos ensaios de cisalhamento direto para as amostras P-06: a) curva $\tau \times \varepsilon$ na umidade natural; b) curva $\tau \times \varepsilon$ umidade inundada; c) envoltória de Mohr-Coulomb	147
Figura 93 -	Varição da umidade média diária do solo com a precipitação na PCD-01 Caixa D'água	150
Figura 94 -	Perfil da umidade média diária do solo na PCD - 1: a) período seco; b) período úmido; c) Comparação entre o mês mais úmido e o mês mais seco; d) Aumento relativo da umidade em % devido a ocorrência de chuvas; e) composição granulométrica do solo	151
Figura 95 -	Varição da umidade média diária do solo com a precipitação na PCD-02 Nova Descoberta	152
Figura 96 -	Perfil da umidade média diária do solo na PCD - 2: a) período seco; b) período úmido; c) Comparação entre o mês mais úmido e o mês mais seco; d) Aumento relativo da umidade em % devido a ocorrência de chuvas; e) composição granulométrica do solo	153

Figura 97 - Ajuste de Gardner (1958) para a curva característica utilizada na modelagem da microbacia Córrego do Morcego.	158
Figura 98 - Ajuste de Gardner (1958) para a curva característica utilizada na modelagem da microbacia Córrego do Jenipapo	159
Figura 99 - Cenário SAT 1 - Relação entre a % da área com $FS \leq 1$ e a precipitação.	161
Figura 100 - Variação do FS com a precipitação – Cenário SAT 1	162
Figura 101 - Variação da poropressão com a precipitação, na profundidade de FSmin - Cenário SAT 1.	162
Figura 102 - Mapa de Suscetibilidade a deslizamentos - Cenário SAT 1	163
Figura 103 - Cenário SAT 2 - Relação entre a % da área com $FS \leq 1$ e a precipitação.	165
Figura 104 - Figura 103: Variação do FS com a precipitação – Cenário SAT 2	166
Figura 105 - Variação da poropressão com a precipitação, na profundidade de FSmin - Cenário SAT 2	166
Figura 106 - Mapa de Suscetibilidade a deslizamentos - Cenário SAT 2	167
Figura 107 - Cenário SAT 3 - Correlação entre % da área com $FS \leq 1$ e a precipitação	169
Figura 108 - Variação do FS com a precipitação – Cenário SAT 3	170
Figura 109 - Variação da poropressão com a precipitação, na profundidade de FSmin - Cenário SAT 3	170
Figura 110 - Mapa de Suscetibilidade a deslizamentos - Cenário SAT 3	171
Figura 111 - Cenário NSAT 1 - Correlação entre % da área com $FS \leq 1$ e a precipitação	173
Figura 112 - Variação do FS com a precipitação – Cenário NSAT 1	174
Figura 113 - Variação da poropressão com a precipitação, na profundidade de FSmin- Cenário NSAT 1	174
Figura 114 - Mapa de Suscetibilidade a deslizamentos - Cenário NSAT 1	175
Figura 115 - Cenário NSAT 2 - Correlação entre % da área com $FS \leq 1$ e a precipitação	177
Figura 116 - Variação do FS com a precipitação – Cenário NSAT 2	178
Figura 117 - Variação da poropressão com a precipitação, na profundidade de FSmin- Cenário NSAT2	178
Figura 118 - Mapa de Suscetibilidade a deslizamentos - Cenário NSAT 2	179

Figura 119 - Cenário NSAT 3 - Correlação entre % da área com $FS \leq 1$ e a precipitação	181
Figura 120 - Variação do FS com a precipitação – Cenário NSAT3	182
Figura 121 - Variação da poropressão com a precipitação, na profundidade de FSmin- Cenário NSAT3	182
Figura 122 - Mapa de Suscetibilidade a deslizamentos - Cenário NSAT 3.	183
Figura 123 - Comparação da $\%LR_{FS \leq 1}$ para os cenários analisados na microbacia Córrego do Morcego	185
Figura 124 - Variação do FS com a precipitação – Cenário SAT 1	187
Figura 125 - Cenário SAT 2 - Relação entre a % da área com $FS \leq 1$ e a precipitação	188
Figura 126 - Variação do FS com a precipitação – Cenário SAT 2	189
Figura 127 - Variação da poropressão com a precipitação, na profundidade de FSmin - Cenário SAT 2	190
Figura 128 - Mapa de Suscetibilidade a deslizamentos - Cenário SAT 2	191
Figura 129 - Cenário SAT 3 - Correlação entre % da área com $FS \leq 1$ e a precipitação	192
Figura 130 - Variação do FS com a precipitação – Cenário SAT 3	193
Figura 131 - Variação da poropressão com a precipitação, na profundidade de FSmin - Cenário SAT 3	193
Figura 132 - Mapa de Suscetibilidade a deslizamentos - Cenário SAT 3	194
Figura 133 - Variação do FS com a precipitação – Cenário NSAT 1	196
Figura 134 - Cenário NSAT 2 - Correlação entre % da área com $FS \leq 1$ e a precipitação	197
Figura 135 - Variação do FS com a precipitação – Cenário NSAT 2	198
Figura 136 - Variação da poropressão com a precipitação, na profundidade de FSmin- Cenário NSAT2	198
Figura 137 - Mapa de Suscetibilidade a deslizamentos - Cenário NSAT 2	199
Figura 138 - Cenário NSAT 3 - Correlação entre % da área com $FS \leq 1$ e a precipitação	200
Figura 139 - Variação do FS com a precipitação – Cenário NSAT 3	201
Figura 140 - Variação da poropressão com a precipitação, na profundidade de FSmin- Cenário NSAT 3	202
Figura 141 - Mapa de Suscetibilidade a deslizamentos - Cenário NSAT 3	203

Figura 142 - Comparação da  $\%LR_{FS \leq 1}$  para os cenários analisados na microbacia Córrego do Jenipapo

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação dos movimentos gravitacionais de massa proposto por Varnes (1978), adaptado por Hungr et al. (2014)	33
Quadro 2 - Inventário de causas de movimento de massa.	39
Quadro 3 - Síntese das características dos principais métodos de cálculo baseados no equilíbrio limite	44
Quadro 4 - Diferentes métodos de análise de suscetibilidade e de previsão de movimentos de massa e suas principais características	50
Quadro 5 - Arquivos de saída do modelo TRIGRS	65

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fatores de segurança mínimos para deslizamentos.	43
Tabela 2 - Parâmetros gerais, geotécnicos e pluviométricos utilizados no modelo TRIGRS	64
Tabela 3 - Resultados de modelo TRIGRS e validação por Park et al. (2013)	69
Tabela 4 - Resultados das validações com %LRCLASS	69
Tabela 5 - Resumos de Trabalhos anteriores que utilizaram o Modelos TRIGRS	70
Tabela 6 - Investigação de campo realizados na microbacia Córrego do Jenipapo	100
Tabela 7 - Resumo dos coeficientes de permeabilidade para a microbacia Córrego do Jenipapo.	102
Tabela 8 - Resultado dos ensaios de caracterização física	103
Tabela 9 - Resumo dos parâmetros geológicos-geotécnicos para a microbacia Córrego do Jenipapo	104
Tabela 10 - Investigação de campo realizados na microbacia Córrego do Morcego.	106
Tabela 11 - Profundidade das amostras coletadas na microbacia Córrego do Morcego	110
Tabela 12 - Resumo dos coeficientes de permeabilidade para a microbacia Córrego do Morcego	139
Tabela 13 - Resultado dos ensaios de caracterização física	142
Tabela 14 - Parâmetros de ajuste da curva característica, pelo modelo de Gitirana & Fredlund (2004) do ponto P-03	143
Tabela 15 - Resumo dos parâmetros de resistência – Microbacia Córrego do Morcego	148
Tabela 16 - Parâmetros de resistência de solos da Formação Barreiras em Pernambuco (fáceis Leque Aluvial Proximal)	149
Tabela 17 - Média dos parâmetros de resistência utilizada para modelagem da MICROBACIA CÓRREGO DO MORCEGO.	156
Tabela 18 - Média do coeficiente de permeabilidade utilizada para modelagem da MICROBACIA CÓRREGO DO MORCEGO.	157
Tabela 19 - Média dos parâmetros de resistência utilizada para modelagem da MICROBACIA CÓRREGO DO JENIPAPO	157

Tabela 20 - Média do coeficiente de permeabilidade, utilizada para modelagem da MICROBACIA CÓRREGO DO JENIPAPO	157
Tabela 21 - Parâmetros de ajuste das curvas características pelo modelo de Gardner (1958)	159
Tabela 22 - Parâmetros geotécnicos utilizados em cada cenário analisado no TRIGRS, para a microbacia Córrego do Morcego	160
Tabela 23 - Parâmetros geotécnicos utilizados em cada cenário analisado no TRIGRS, para a microbacia Córrego do Jenipapo	160
Tabela 24 - Cenário SAT 1 - Validação do dia mais crítico por meio do LR <sub>CLASS.</sub>	164
Tabela 25 - Cenário SAT 2 - Validação do dia mais crítico por meio do LR <sub>CLASS.</sub>	168
Tabela 26 - Cenário SAT 3 - Validação do dia mais crítico por meio do LR <sub>CLASS.</sub>	172
Tabela 27 - Cenário NSAT 1 - Validação do dia mais crítico por meio do LR <sub>CLASS.</sub>	176
Tabela 28 - Cenário NSAT 2 - Validação do dia mais crítico por meio do LR <sub>CLASS.</sub>	180
Tabela 29 - Cenário NSAT 3 - Validação do dia mais crítico por meio do LR <sub>CLASS.</sub>	184
Tabela 30 - Cenário SAT 2 - Validação do dia mais crítico por meio do LR <sub>CLASS.</sub>	192
Tabela 31 - Cenário SAT 3 - Validação do dia mais crítico por meio do LR <sub>CLASS.</sub>	195
Tabela 32 - Cenário NSAT 2 - Validação do dia mais crítico por meio do LR <sub>CLASS.</sub>	200
Tabela 33 - Cenário NSAT 3 - Validação do dia mais crítico por meio do LR <sub>CLASS.</sub>	103

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CEMADEN	Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
COMPESA	Companhia Pernambucana de Saneamento
CPTEC	Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos
CTG	Centro de Tecnologia e Geociências / UFPE
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos do Governo Federal
FS	Fator de Segurança
IBGE	Associação Brasileira de Normas Técnicas
IP	Índice de plasticidade
LiDAR	Light Detection and Ranging
LL	Limite de liquidez
LP	Limite de plasticidade
LR <sub>CLASS</sub>	<i>Landslide Ratio of each FS Class</i>
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
MDT	Modelo Digital do Terreno
NBR	<i>Norma Brasileira Regulamentadora</i>
PCD GEOTÉCNICA	plataformas de coleta de dados geotécnicos
PE3D	programa Pernambuco Tridimensional
PNPDEC	Política Nacional de Proteção e Defesa Civil

REC	<i>Regression Error Characteristic</i>
RMR	Região Metropolitana de Recife
ROC	<i>Receiver Operating Characteristic</i>
SIG	Sistema de Informação Geográficas
SPT	<i>Standard Penetration Test</i>
STS	Serviços Técnicos de Sondagem
SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos Solos
TRIGRS	<i>Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability</i>
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>27</b>
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS E IMPORTÂNCIA DO TEMA .....	27
1.2	OBJETIVO GERAL.....	28
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	28
1.4	DELIMITAÇÃO DO TRABALHO .....	29
1.5	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	29
<b>2</b>	<b>MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA: CLASSIFICAÇÃO, FATORES DE CAUSA E ANÁLISE DE ESTABILIDADE.....</b>	<b>31</b>
2.1	CLASSIFICAÇÃO DOS MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA.....	31
<b>2.1.1</b>	<b>Classificação proposta por Hungr et al. (2014) .....</b>	<b>32</b>
2.1.1.1	Deslizamentos .....	35
2.2	FATORES DE CAUSA DOS MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA 38	
2.3	ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES.....	40
<b>2.3.1</b>	<b>Métodos de análise de estabilidade .....</b>	<b>43</b>
2.3.1.1	Método do talude infinito.....	44
<b>2.3.2</b>	<b>Influência da sucção na estabilidade de taludes .....</b>	<b>46</b>
2.4	SÍNTESE DO CAPÍTULO .....	49
<b>3</b>	<b>MÉTODOS PARA MAPEAMENTO DE SUSCETIBILIDADE .....</b>	<b>50</b>
3.1	O MODELO MATEMÁTICO TRIGRS.....	51
<b>3.1.1</b>	<b>Modelo hidrológico .....</b>	<b>53</b>
3.1.1.1	Para condições do solo inicialmente saturado .....	53
3.1.1.2	Para condições do solo inicialmente não saturadas .....	58
3.1.1.3	Infiltração e escoamento superficial.....	60
<b>3.1.2</b>	<b>Modelo de estabilidade .....</b>	<b>62</b>
<b>3.1.3</b>	<b>Dados de entrada e de saída e principais limitações.....</b>	<b>63</b>
3.2	MÉTODOS DE VALIDAÇÃO DOS MODELOS DE SUSCETIBILIDADE .....	67
<b>3.2.1</b>	<b>Validação dos Resultados - <math>LR_{CLASS}</math> .....</b>	<b>67</b>
3.3	TRABALHOS REALIZADOS .....	69
3.4	SÍNTESE DO CAPÍTULO .....	74
<b>4</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO GERAL DAS ÁREAS DE ESTUDO .....</b>	<b>75</b>

4.1	LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO .....	75
4.2	ASPECTOS CLIMÁTICOS .....	77
4.3	ASPECTOS GEOLÓGICOS .....	80
4.4	ASPECTOS MORFOLÓGICOS.....	83
4.5	OCUPAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO.....	85
4.6	HISTÓRICO DE DESLIZAMENTOS DAS ÁREAS DE ESTUDO .....	89
4.7	MAPA DE REGISTO DE OCORRÊNCIAS .....	93
4.8	SÍNTESE DO CAPÍTULO .....	98
<b>5</b>	<b>METODOLOGIA DA INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA E DAS ANÁLISES DE SUSCETIBILIDADE.....</b>	<b>99</b>
5.1	LEVANTAMENTO DE DADOS PRÉ-EXISTENTES .....	99
5.2	INVESTIGAÇÃO DE CAMPO – GEGEP / UFPE .....	105
<b>5.2.1</b>	<b>Sondagem a percussão SPT.....</b>	<b>106</b>
<b>5.2.2</b>	<b>Ensaio para determinação da condutividade hidráulica com permeâmetro Guelph .....</b>	<b>107</b>
<b>5.2.3</b>	<b>Amostragem .....</b>	<b>109</b>
5.3	ENSAIOS DE LABORATÓRIO – GEGEP / UFPE (2020) .....	111
<b>5.3.1</b>	<b>Ensaio de caracterização física.....</b>	<b>111</b>
<b>5.3.2</b>	<b>Determinação da Curva característica do solo .....</b>	<b>113</b>
<b>5.3.3</b>	<b>Cisalhamento direto .....</b>	<b>117</b>
5.4	PLATAFORMA DE COLETA DE DADOS GEOTÉCNICOS – PCD GEOTÉCNICA .....	119
5.5	ANÁLISE DE SUSCETIBILIDADE ATRAVÉS DO TRIGRS.....	122
<b>5.5.1</b>	<b>Evento pluviométrico modelado .....</b>	<b>123</b>
5.5.1.1	Microbacia Córrego do Morcego.....	123
5.5.1.2	Microbacia Córrego do Jenipapo .....	126
<b>5.5.2</b>	<b>Parâmetros utilizados .....</b>	<b>129</b>
<b>5.5.3</b>	<b>Cenários analisados.....</b>	<b>131</b>
<b>5.5.4</b>	<b>Validação dos mapas de suscetibilidade – Método LR<sub>Class</sub> .....</b>	<b>133</b>
5.6	SÍNTESE DO CAPÍTULO .....	134
<b>6</b>	<b>APRESENTAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS DA INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA .....</b>	<b>135</b>
6.1	INVESTIGAÇÃO E ENSAIOS DE CAMPO – GEGEP / UFPE.....	135

6.1.1	<b>Sondagem a percussão SPT</b> .....	135
6.1.2	<b>Ensaio para determinação da condutividade hidráulica com permeômetro <i>Guelph</i></b> .....	138
6.2	ENSAIOS DE LABORATÓRIO – GEGEP / UFPE .....	140
6.2.1	<b>Ensaio de caracterização física</b> .....	140
6.2.2	<b>Determinação da Curva característica do solo</b> .....	142
6.2.3	<b>Cisalhamento direto</b> .....	144
6.3	ANÁLISE DA VARIAÇÃO DE UMIDADE POR MEIO DA PLATAFORMA DE COLETA DE DADOS GEOTÉCNICOS – PCD GEOTÉCNICA .....	149
6.4	SÍNTESE DO CAPÍTULO .....	154
7	<b>APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DAS ANÁLISES DE SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS</b> .....	156
7.1	INTEGRAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS UTILIZADOS NAS ANÁLISES DE SUSCETIBILIDADE NO TRIGRS.....	156
7.2	MICROBACIA CÓRREGO DO MORCEGO - <b>CENÁRIO SAT 1</b> .....	160
7.2.1	<b>Mapa de suscetibilidade a deslizamentos e Validação – Método LR<sub>CLASS</sub></b> <b>163</b>	
7.3	MICROBACIA CÓRREGO DO MORCEGO - <b>CENÁRIO SAT 2</b> .....	164
7.3.1	<b>Mapa de suscetibilidade a deslizamentos e Validação – Método LR<sub>CLASS</sub></b> <b>167</b>	
7.4	MICROBACIA CÓRREGO DO MORCEGO - <b>CENÁRIO SAT 3</b> .....	168
7.4.1	<b>Mapa de suscetibilidade a deslizamentos e Validação – Método LR<sub>CLASS</sub></b> <b>171</b>	
7.5	MICROBACIA CÓRREGO DO MORCEGO - <b>CENÁRIO NSAT 1</b> .....	172
7.5.1	<b>Mapa de suscetibilidade a deslizamentos e Validação – Método LR<sub>CLASS</sub></b> <b>175</b>	
7.6	MICROBACIA CÓRREGO DO MORCEGO - <b>CENÁRIO NSAT 2</b> .....	176
7.6.1	<b>Mapa de suscetibilidade a deslizamentos e Validação – Método LR<sub>CLASS</sub></b> <b>179</b>	
7.7	MICROBACIA CÓRREGO DO MORCEGO - <b>CENÁRIO NSAT 3</b> .....	180
7.7.1	<b>Mapa de suscetibilidade a deslizamentos e Validação – Método LR<sub>CLASS</sub></b> <b>183</b>	

7.8	COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DOS CENÁRIOS – MICROBACIAS CÓRREGO DO MORCEGO .....	184
7.9	MICROBACIA CÓRREGO DO JENIPAPO - <b>CENÁRIO SAT 1</b> .....	187
7.10	MICROBACIA CÓRREGO DO JENIPAPO - <b>CENÁRIO SAT 2</b> .....	188
7.10.1	<b>Mapa de suscetibilidade a deslizamentos e Validação – Método LR<sub>CLASS</sub></b> <b>190</b>	
7.11	MICROBACIA CÓRREGO DO JENIPAPO - <b>CENÁRIO SAT 3</b> .....	192
7.11.1	<b>Mapa de suscetibilidade a deslizamentos e Validação – Método LR<sub>CLASS</sub></b> <b>194</b>	
7.12	MICROBACIA CÓRREGO DO JENIPAPO - <b>CENÁRIO NSAT 1</b> .....	195
7.13	MICROBACIA CÓRREGO DO JENIPAPO - <b>CENÁRIO NSAT 2</b> .....	196
7.13.1	<b>Mapa de suscetibilidade a deslizamentos e Validação – Método LR<sub>CLASS</sub></b> <b>199</b>	
7.14	MICROBACIA CÓRREGO DO JENIPAPO - <b>CENÁRIO NSAT 3</b> .....	200
7.14.1	<b>Mapa de suscetibilidade a deslizamentos e Validação – Método LR<sub>CLASS</sub></b> <b>202</b>	
7.15	COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DOS CENÁRIOS – MICROBACIAS CÓRREGO DO JENIPAPO .....	204
8	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....</b>	<b>207</b>
	<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>213</b>
	<b>APÊNDICES .....</b>	<b>233</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo será apresentada as considerações iniciais e importância do tema deste trabalho, bem como seus objetivos, delimitações e uma breve explicação dos conteúdos e características dos capítulos que o compõe.

### 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS E IMPORTÂNCIA DO TEMA

Os deslizamentos de terra são processos naturais que contribuem diretamente na evolução geomorfológica das paisagens. Segundo Gerscovich (2016), apesar dos mecanismos deflagradores e dos métodos de análises de estabilidade de taludes serem objetos de pesquisa em todo mundo há décadas, os deslizamentos de encostas ainda geram graves problemas, particularmente em áreas ocupadas de morros, chegando a se caracterizar como uma questão de ordem pública, governamental.

No Brasil, o crescimento da ocupação antrópica e o impacto das atividades humanas sobre o meio ambiente têm levado ao aumento das taxas associada aos danos causados por esses fenômenos. Particularmente em Recife, onde mais de 60% do território da cidade é representado por morros, reside cerca um terço da população (CARVALHO, 2019) e segundo pesquisa divulgada em 2018, a cidade do Recife é o quinto município do Brasil com maior porcentagem de moradores domiciliados em áreas de riscos a desastres naturais (IBGE, 2018).

A Lei Federal 12.608/2012 (BRASIL, 2012) institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC), onde destaca a importância do mapeamento das áreas de risco e estudos de identificação de ameaças, suscetibilidades, vulnerabilidades e risco de desastres. A lei ainda destaca que o Plano Nacional de Proteção e Defesa Civil deverá conter, no mínimo, a identificação dos riscos de desastres nas regiões geográficas e grandes bacias hidrográficas do País.

Um mapa de suscetibilidade a deslizamentos, segundo Augusto Filho e Virgili (1998), determina um índice que permite quantificar o quão próximo da ruptura uma determinada encosta se encontra, sob a atuação de um determinado conjunto de fatores.

Com o aprimoramento dos Sistema de Informações Geográficas (SIG), foram desenvolvidos diversos métodos de análise de suscetibilidade a deslizamentos. O

modelo TRIGRS (Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability) é um software que calcula a variação do Fator de segurança (FS), ao longo de áreas em escala de bacia hidrográfica e em diferentes profundidades, conforme mudanças da poropressão, durante um evento pluviométrico que pode variar de horas a alguns dias. As análises usando TRIGRS são aplicáveis a áreas que são propensas a deslizamentos de terra translacionais rasos induzidos por eventos pluviométricos e que satisfaçam razoavelmente bem as outras premissas do modelo.

## 1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo do presente trabalho é determinar a suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos translacionais rasos de duas microbacias hidrográficas, pertencentes à Formação Barreiras, localizadas na Região Norte de Recife-PE, através da aplicação de um modelo matemático de base física (TRIGRS).

## 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Elaborar um mapa de registro de ocorrências de deslizamentos dos eventos ocorridos no período de 2014 a 2020, com base nos registros realizados pela Defesa Civil do município de Recife, onde as áreas de estudos estão inseridas;
- Caracterizar geotecnicamente os solos das áreas de estudo. Sendo os dados obtidos por meio de ensaios de campo e de laboratório e coleta de dados de estudos já realizados nas áreas;
- Analisar a influência da chuva na variação da umidade do solo;
- Elaborar mapas de suscetibilidade a deslizamentos induzidos pela chuva nas áreas de estudo, considerando modos de infiltração saturada e não saturada;
- Analisar o desempenho e a sensibilidade do modelo matemático TRIGRS, com base no registro de ocorrências pela metodologia LR<sub>CLASS</sub>.

## 1.4 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO

As análises de suscetibilidade a deslizamento apresentados neste trabalho foram elaboradas para a microbacia Córrego do Morcego localizada no bairro Dois Unidos e para a microbacia Córrego do Jenipapo localizada entre os bairros Córrego do Jenipapo e Dois irmãos, ambas na Zona Norte da cidade do Recife.

Os dados pluviométricos utilizados nas análises de suscetibilidade referem-se a chuvas extremas ocorridas em junho e julho de 2019 na zona norte de Recife.

Os mapas de registros de ocorrência de deslizamentos das áreas de estudo foram elaborados com base nos eventos registrados pela Defesa Civil de Recife durante período de 2014 a 2021.

## 1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho encontra-se dividido em nove capítulos, estruturado da seguinte forma:

- Capítulo 1 (Introdução) – insere o tema da dissertação dentro de um contexto da análise de suscetibilidade a deslizamento de áreas de risco, expondo as justificativas, delimitações e os objetivos a serem alcançados na pesquisa;
- Capítulo 2 (Movimentos gravitacionais de massa: classificação, fatores de causa e análise de estabilidade) - apresentada uma revisão da literatura técnico-científica sobre movimentos gravitacionais de massa, visando situar o leitor em relação aos conceitos importantes utilizados no desenvolvimento da pesquisa;
- Capítulo 3 (Métodos para mapeamento de suscetibilidade) – apresenta ao leitor o método utilizado na pesquisa para realização da elaboração dos mapas de suscetibilidade das áreas de estudo e a metodologia empregada na validação dos resultados;
- Capítulo 4 (Caracterização geral das áreas de estudo) – relata aspectos climáticos, geológicos e geomorfológicos das áreas de estudo, bem como suas características de ocupação e histórico de deslizamentos.

- Capítulo 5 (Metodologia das investigações geotécnicas e das análises de suscetibilidade e estabilidade de encostas) – apresenta a metodologia da pesquisa, expondo os materiais e métodos empregados nos ensaios geotécnicos de campo e laboratório, e na análise da suscetibilidade a deslizamento das áreas de estudo;
- Capítulo 6 (Apresentação e interpretação dos resultados da investigação geotécnica) – apresenta os resultados dos ensaios geotécnicos de campo e laboratório e suas análises;
- Capítulo 7 (Apresentação e discursões dos resultados das análises de suscetibilidade a deslizamentos) – apresenta os resultados do mapeamento de suscetibilidade, análise e validação de seus resultados.
- Capítulo 8 (Conclusões e sugestões para futuros trabalhos) – expõe as conclusões obtidas e as sugestões para futuras pesquisas que forem desenvolvidas sobre o tema em pauta;
- Referências Bibliográficas – apresenta todas as referências que foram citadas ao longo deste trabalho.

Ao final está incluído o Apêndice, onde constam tabelas resultantes dos ensaios realizados.

## **2 MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA: CLASSIFICAÇÃO, FATORES DE CAUSA E ANÁLISE DE ESTABILIDADE**

Este capítulo tem como objetivo apresentar as definições gerais acerca dos tipos de movimentos gravitacionais de massa com base na classificação de Hung et. al. (2014), onde serão abordados os conceitos básicos que tornam possível a análise de estabilidade de taludes e encostas e os métodos de cálculo matemático utilizados, descrevendo o método do talude infinito, utilizado nesta dissertação. Por fim, neste capítulo será abordado o comportamento de solos não saturados na estabilidade de taludes, mostrando a influência da sucção nestas análises.

Talude é a denominação que se dá a qualquer superfície inclinada de um maciço de solo, rocha ou ambos (GERSCOVICH, 2016). Existem basicamente dois tipos de taludes, os taludes naturais, também designados por encostas e os taludes artificiais (construídos), subdivididos em taludes de corte e taludes de aterro. Dentre os processos de instabilização que podem ocorrer em uma encosta, os movimentos gravitacionais da massa destacam-se pela frequência e pelos danos que pode causar.

Massad (2010) aponta que mudanças na geometria da encosta, colocação de sobrecargas no topo da encosta, infiltração de água de chuva e águas servidas e o desmatamento são os principais agravantes deste processo, como enfatizado, muitos deles são causados pelo comportamento humano. No Brasil, o crescimento da ocupação antrópica e o impacto das atividades humanas sobre o meio ambiente têm levado ao aumento das taxas associada aos danos causados por esses fenômenos.

### **2.1 CLASSIFICAÇÃO DOS MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA**

De acordo com Highland e Bobrowsky (2008), os movimentos gravitacionais de massa são definidos como o deslocamento de um determinado volume de solo e/ou rocha sob a ação da gravidade. Embora seja um processo natural, os movimentos gravitacionais de massa são potencializados pela intervenção humana nas encostas.

O principal objetivo das classificações dos movimentos de massa é a unificação da linguagem técnica dos conceitos mais relevantes para entendimento do tema. Os movimentos gravitacionais de massa podem ser classificados segundo diversos critérios, entre eles podem ser citados a complexidade dos materiais e os mecanismos

e fatores envolvidos no processo. Entretanto, no geral, segundo Coutinho e Silva (2005), as classificações de movimentos de massa são embasadas na combinação dos seguintes critérios:

- Cinética do movimento: velocidade, direção e sequência dos deslocamentos;
- Tipo de material: solo, rocha, solos e rochas, detritos e etc;
- Geometria: tamanho e forma das massas mobilizadas.

Dessa forma, baseados nesses critérios, muitos autores procuraram apresentar suas próprias classificações para os movimentos gravitacionais de massa, dos quais destacam-se Varnes (1978), Guidicini e Nieble (1984), Augusto Filho (1992), Cruden e Varnes (1996) e Hungr et al. (2014).

A classificação proposta por Varnes em 1978, posteriormente atualizada em 1996 (CRUDEN & VARNES, 1996), é indiscutivelmente o sistema mais amplamente utilizado para descrição dos movimentos gravitacionais de massa em todo o mundo. No entanto, por apresentar uma abordagem mais voltada à prática da engenharia geotécnica a proposta apresentada por Hungr et al. (2014) será a classificação tratada e sintetizada nesta dissertação, esta proposta é uma atualização da classificação de Varnes (1978).

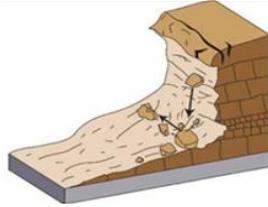
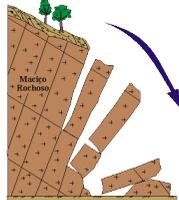
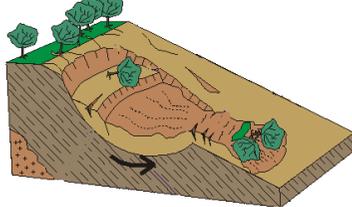
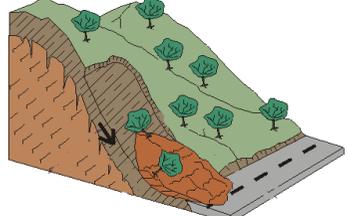
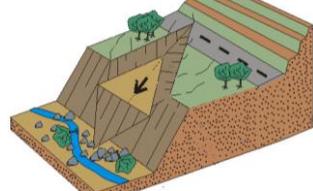
### **2.1.1 Classificação proposta por Hungr et al. (2014)**

A atualização da classificação de Varnes em 1978, proposta por Hungr et al. (2014) foi motivada pela necessidade de uma classificação compatível com a terminologia geológica e com as classificações geotécnicas baseadas em propriedades mecânicas. A nova classificação apresenta 32 tipos de movimentos gravitacionais de massa, cada um deles possui: definição formal, exemplos de ocorrência e o tipo de material em que ocorrem.

O Quadro 1 apresenta uma síntese com ilustrações e descrição dos principais tipos de movimentos gravitacionais de massa em encostas da classificação de Varnes (1978) atualizada por Hungr et al (2014). Os principais deles serão descritos a seguir e em Hungr et al. (2014) pode ser encontrado a definição de cada um dos movimentos apresentados no Quadro 1.

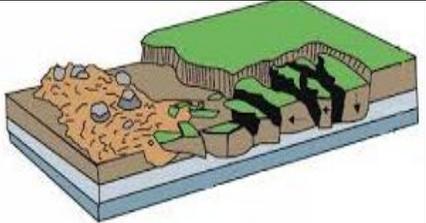
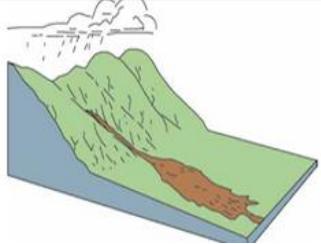
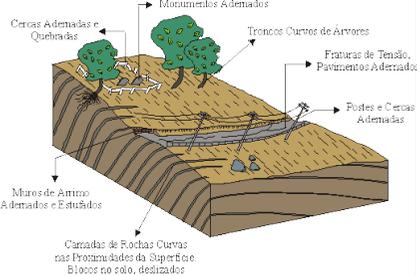
Quadro 1 - Classificação dos movimentos gravitacionais de massa proposto por Varnes (1978), adaptado por Hungr et al. (2014).

(continua)

TIPO DE MOVIMENTO		MATERIAIS PREDOMINANTES	DESCRIÇÃO	ILUSTRAÇÃO
Queda		Maçiços rochosos, pedregulhos, detritos, sites	Os materiais, rocha ou solo, se desprendem das encostas pela ação da gravidade. O movimento é do tipo queda livre (encostas íngremes) ou de rolamento (superfícies inclinadas), com velocidade muito rápida que pode atingir grande distância.	
Tombamento		Maçiços rochosos, cascalho, areia, silte	Rotação para frente e posterior tombamento, de colunas ou placas de rocha ou de solos coesivos (ou solos cimentados), em torno de um ponto abaixo do centro de gravidade da massa deslocada.	
Deslizamento	Rotacional	Maçiços rochosos, cascalho, detritos, areia, argila, silte	Caracterizam-se por apresentar superfícies curvadas de forma côncava, na qual o movimento é aproximadamente rotacional em torno de um eixo paralelo a superfície do talude. Associados a maciços homogêneos ou aterros.	
	Translacional / Planar	Maçiços rochosos, cascalho, detritos, areia, argila, silte	Massa que se move ao longo de uma superfície aproximadamente plana, sendo controlado principalmente por zonas de fraqueza, como discontinuidades, ou zonas de contato entre duas formações geológicas.	
	Cunha	Maçiços rochosos	Caracterizam-se por uma ruptura formada por dois planos com interseção orientada para baixo.	

Quadro 1 - Classificação dos movimentos gravitacionais de massa proposto por Varnes (1978), adaptado por Hungr et al. (2014).

(conclusão)

TIPO DE MOVIMENTO	MATERIAIS PREDOMINANTES	DESCRIÇÃO	ILUSTRAÇÃO
Expansões laterais	Maciços rochosos, areia, silte, argila sensíveis	Definidas como uma expansão de um solo coesivo ou de uma massa de rocha combinado com uma subsidência da massa fraturada em uma camada de material pouco resistente subjacente.	
Fluxos	Areia, detritos, turfa, lama	Deformações ou movimentos contínuos, no qual a superfície de ruptura não é usualmente definida. A distribuição das velocidades na massa deslocada assemelha-se a de um fluido viscoso.	
Deformações no talude (Deformações, Creep, solifluxão)	Maciço rochoso, solo	Movimentos extremamente lentos das camadas superficiais do talude (normalmente com menos de 1m de profundidade), apresentando como resultado, mudanças cíclicas de volume induzidas pelas mudas climáticas (umedecimento, secagem, degelo, etc.).	

Fonte: adaptado de Hungr et al. (2014).

### 2.1.1.1 Deslizamentos

De acordo com Guidicini e Nieble (1984), um deslizamento é um movimento rápido de massas de solo ou rocha com uma duração relativamente curta, geralmente com um volume claramente definido, cujo centro de gravidade se desloca para baixo e para fora da encosta, ao longo de uma superfície de ruptura bem definida. Os deslizamentos podem ser classificados em planares, rotacionais ou em cunha, de acordo com sua geometria. Em suma, a próxima seção discutirá cada uma delas, enfatizando aquelas que ocorrem com maior frequência na cidade de Recife, onde se localiza as áreas de pesquisa desta dissertação.

#### 2.1.1.1.1 Deslizamento translacional

Nos deslizamentos translacionais ou planares a massa de solo ou rocha se move ao longo de uma superfície aproximadamente plana, sendo controlado principalmente por zonas de fraqueza, como descontinuidades, contato entre duas formações geológicas, entre solo e rocha, ou horizontes do solo e depósitos de encostas, que apresentem principalmente diferentes características de resistência e permeabilidade (HUNGR et al., 2014). São tipicamente deflagrados em encostas mais íngremes e com presença de solos rasos. O plano de ruptura encontra-se em profundidades que variam de 0,5 a 5,0 m. Um famoso deslizamento planar que ocorreu em Pernambuco foi descrito por Souza Neto (1998). A Figura 1 mostra uma vista geral desse deslizamento translacional que ocorreu na encosta Espinhaço da Gata – PE.

Este deslizamento ocorreu no contato entre uma camada de solo (com aproximadamente 3,0 m de espessura) mais alterado pelo intemperismo e uma camada de solo menos alterada. Essas camadas possuem diferentes características de permeabilidade e resistência, o que tornou esse fenômeno possível. O autor acredita que este fenômeno pode ter ocorrido em uma única etapa, posterior a realização de cortes para construção de uma rodovia e presença de água proveniente de fortes precipitações.

Figura 1 - Deslizamento translacional / planar ocorrido na encosta Espinhaço da Gata - PE



Fonte: Souza Neto (1998).

Apesar de nem todos os fenômenos terem grandes proporções, há diversos relatos de deslizamentos planares na cidade do Recife, como os descritos por Gusmão Filho et al. (1997), Lafayette (2000), Lima (2002) e Santos (2018). Este tipo de deslizamento também é evidente nas áreas de estudo desta dissertação, que serão discutidas no Capítulo 4.

Gusmão Filho et al. (1997), observou que na Região Metropolitana de Recife (RMR) a maioria dos deslizamentos são rasos e suas superfícies de ruptura são translacionais (planares) e paralelas ao talude. Observações de mudanças de umidade e sucção, em perfis analisados no bairro Alto do Reservatório na cidade de Recife, indicam que a diferença ocorre apenas nos primeiros 3,0 m de profundidade do solo, revelando que se trata de um limite para a frente de umedecimento e da superfície de ruptura (LIMA, 2002). Este fato também é observado na maioria dos deslizamentos que ocorrem nas encostas ocupadas nas cidades brasileiras.

O mecanismo de instabilidade associado aos deslizamentos translacionais em encostas urbanas pode estar relacionado ao aumento da umidade causado pela

infiltração de chuva e de águas servidas, ocasionando um crescimento da umidade que fará com que a resistência do solo diminua.

#### *2.1.1.1.2 Deslizamento rotacional*

Deslizamentos rotacionais caracterizam-se por apresentar superfícies de ruptura curvas na qual o material sofre movimentação côncava para cima.

Em função dessas características estão associados, geralmente, a camadas espessas de solo relativamente homogêneo ou aterros que permitem a maior infiltração e a percolação profunda da água. O processo de deslizamentos rotacionais pode se repetir de forma múltipla e retrograda ou progressiva (HUNGR et al., 2014).

No estado de Pernambuco, Silva (2007) descreveu um caso interessante de deslizamentos de rotacional múltiplo. O incidente ocorreu em solo residual de granito e sedimentos da formação Barreiras na cidade de Camaragibe.

A Figura 2, apresenta o deslizamento rotacional ocorrido em Blumenau – SC em 2008.

Figura 2 - Vista aérea de região atingida por deslizamento rotacional em Blumenau – SC, 2008.



Fonte: Adaptado de Pelizoni (2014).

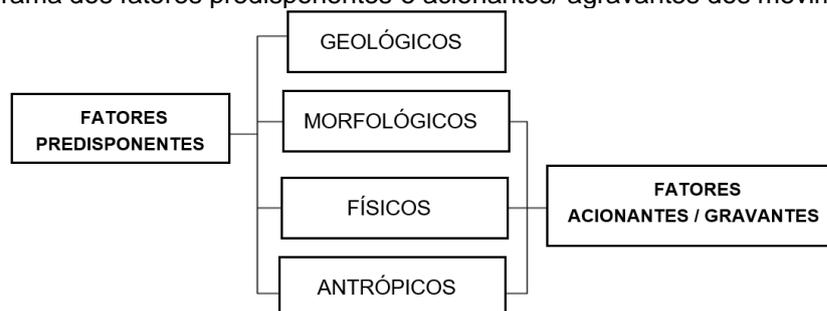
## 2.2 FATORES DE CAUSA DOS MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA

Leroueil (2004) afirma que todos os movimentos de massa, em um dado estágio, estão associados a fatores de causa específicos, podendo estes ser divididos em três grandes:

1. Fatores de causa predisponentes ou condicionantes: estes são os que estão inerentes ao ambiente e determinam a resposta do talude frente a ocorrência de um fator acionante. Como exemplos desses fatores têm-se: a presença das altas declividades dos taludes e a distribuição dos materiais com diferentes texturas, interferindo na permeabilidade das camadas e gerando potencial superfície de ruptura;
2. Fatores de causa acionantes e agravantes: os acionantes são os que desencadeiam a ocorrência da ruptura, enquanto o agravante produz grande modificação nas condições de estabilidade ou velocidade do movimento. Como exemplos desses fatores destacam-se: as erosões e escavações no pé dos taludes, a infiltração de águas de chuva e de águas servidas e a sobrecargas de árvores de grande porte devido à rajada de ventos;
3. Fatores de causa relevantes: aqueles que apresentam evidências da ocorrência do movimento, mas, geralmente, não possui nenhuma relação direta com o mesmo.

Em geral, os fatores de causa predisponentes estão relacionados a geologia dos taludes e encostas, enquanto os fatores acionantes ou agravantes estão ligados a morfologia, ação antrópica e as características físicas, conforme ilustra a Figura 3 e o Quadro 2.

Figura 3 - Diagrama dos fatores predisponentes e acionantes/ agravantes dos movimentos de massa



Fonte: Coutinho e Silva (2005)

Quadro 2 - Inventário de causas de movimento de massa.

<p><b>Causas Geológicas-Geotécnicas</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Materiais frágeis, tais como algumas encostas vulcânicas ou sedimentos marinhos não consolidados;</li> <li>- Materiais sensíveis;</li> <li>- Materiais intemperizados;</li> <li>- Materiais cisalhados;</li> <li>- Materiais em diáclados ou fissurados;</li> <li>- Descontinuidade de massa negativamente orientada (falhas, bandamentos, foliações, etc.);</li> <li>- Descontinuidade estrutural orientada em contraste (falha, inconformidade, contato etc.);</li> <li>- Subpressão tectônica ou vulcânica;</li> <li>- Contraste de permeabilidade;</li> <li>- Contraste de rigidez (material denso e rígido, sobre material plástico).</li> </ul>
<p><b>Causas Morfológicas</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Curvatura das vertentes;</li> <li>- Tipo de relevo;</li> <li>- Remoção da vegetação por erosão, queimadas, secas, etc;</li> <li>- Erosão de margens laterais;</li> <li>- Erosão fluvial no pé do talude, erosão de onda/glacial no pé do talude;</li> <li>- Erosão subterrânea ("pipping").</li> </ul>
<p><b>Causas Físicas</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Chuvas intensas;</li> <li>- Derretimento rápido de neve;</li> <li>- Precipitação excepcional prolongada;</li> <li>- Rebaixamento rápido de inundações e marés;</li> <li>- Terremoto e erupção vulcânica;</li> <li>- Intemperismo/desgaste devido ao congelamento e descongelamento;</li> <li>- Intemperismo/desgaste devido a contração e expansão de solos expansivos.</li> </ul>
<p><b>Causas Antrópicas</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Escavação no talude ou na sua base (cortes);</li> <li>- Carregamento do talude ou da sua crista (aterros);</li> <li>- Rebaixamento de reservatórios;</li> <li>- Desmatamento;</li> <li>- Irrigação e mineração;</li> <li>- Vibração artificial;</li> <li>- Vazamento de águas servidas ou de abastecimento.</li> </ul>

Fonte: Adaptado de Cruden e Varnes (1996) apud Coutinho e Silva (2005).

Nos sedimentos de Formação Barreiras presentes nas áreas de morros da zona norte do Recife a distribuição dos materiais com diferentes texturas no perfil é frequente. Esse arranjo dos sedimentos com permeabilidades diferentes ocasiona um mecanismo de instabilização, com caminhos preferenciais de água. Em Santana (2006) é apresentado um deslizamento ocorrido em outubro de 2005, na cidade do Recife. onde a presença de uma camada menos permeável é um dos fatores predisponentes para o movimento.

Outro fator de causa predisponente muito importante nas encostas de ocupação precária é a ação antrópica que também pode ser um fator de causa acionante ou agravante (LEROUEIL, 2004). Nessas áreas é comum encontrar: cortes verticalizados nas encostas, aterros mal compactados, retirada da vegetação superficial, colocação de grandes árvores, lançamento de águas servidas, fossa na borda das encostas, vazamento de tubulações e acúmulo de lixo. Esses fatores associados a uma infraestrutura insuficiente e chuvas intensas aumentam a ocorrência dos movimentos de massa (BANDEIRA et al., 2009). Em ambientes tropicais onde não há atividade sísmica, a precipitação é o principal fator que desencadeia movimentos de massa. Portanto, a intensidade, a duração e a recorrência são apenas alguns dos principais parâmetros considerados na análise da distribuição temporal e espacial das rupturas de encostas tropicais.

### 2.3 ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES

De acordo com Duncan et al. (2014), a estabilidade de taludes é um aspecto importante, interessante e desafiador na engenharia geotécnica e que provê grandes avanços no entendimento do complexo comportamento de solos.

A determinação da estabilidade de taludes, pode ser realizada a partir de análises determinísticas ou probabilísticas. As análises probabilísticas se diferenciam dos métodos determinísticos, sobretudo por considerar uma variação dos parâmetros de entrada. Sabe-se que existem inúmeras incertezas nos dados utilizados nas análises, seja em razão da dispersão nos resultados obtidos nos ensaios ou da variabilidade natural dos parâmetros em pontos distintos na mesma encosta. Portanto, os parâmetros de entrada em uma análise probabilística são considerados variáveis aleatórias, que apresentam valores dentro de um determinado intervalo, com uma

probabilidade de ocorrência especificada (FLORES, 2008; SANDOVAL, 2012; STANKOVIĆ et al., 2013; QUEIROZ, 2016). Contudo, as análises probabilísticas não são abordadas nesta dissertação.

De modo geral, na prática da engenharia geotécnica, a análise da estabilidade de taludes é realizada a partir de métodos determinísticos geralmente baseados na teoria do equilíbrio limite. No método do equilíbrio limite, é determinado o equilíbrio de uma massa de solo que tende a deslizar sob a influência principal da gravidade. Desta forma, a ruptura ocorre quando as forças cisalhantes se tornam igual às forças resistentes e uma superfície contínua de cisalhamento se desenvolve no interior da encosta. Ou seja, o método do equilíbrio limite parte do pressuposto de que existe um equilíbrio em uma dada massa de solo, tratando-a como um corpo rígido, na iminência da ruptura.

A fim de comparar a estabilidade de um talude em diferentes condições de equilíbrio-limite define-se uma grandeza física conhecida como fator de segurança (FS), sendo ele responsável por quantificar o estado da estabilidade de uma encosta.

Huang (2014) cita que para determinar do FS a partir do equilíbrio limite é necessário assumir uma superfície de ruptura, onde o FS é dado pela razão entre o somatório das forças que impulsionam o material em sua direção inferior, ou seja, a tensão cisalhante atuante ( $\tau$ ) ao longo da superfície  $a$  e as forças que se opõem a esse movimento, ou seja, forças de resistência ao cisalhamento ( $s$ ), as quais mantêm o equilíbrio da encosta, conforme descrito a na Equação 1:

$$FS = \frac{s}{\tau} \quad (1)$$

A resistência ao cisalhamento dos solos ( $s$ ) é definida pelo critério de ruptura de Mohr-Coulomb que pode ser esboçada em termos totais (Equação 2) ou efetivos (Equação 3):

$$s = c + \sigma \tan \phi \quad (2)$$

$$s = c' + (\sigma - u) \tan \phi' \quad (3)$$

Onde  $c$  corresponde ao intercepto de coesão,  $\sigma$  é a tensão no plano de ruptura e  $\phi$  é o ângulo de atrito.

Massad (2003) acredita que, em relação a envoltória de resistência, a análise da estabilidade de taludes em termos efetivos e totais é equivalente, pois ao se considerar a tensão total, assume-se que as poropressões geradas nos ensaios tentam simular as condições de carregamento e de drenagem de campo e ao considerar as tensões efetivas assume-se que as poropressões ao longo da superfície de ruptura são conhecidas.

Quando a resistência ao cisalhamento ( $s$ ) é exatamente igual à tensão cisalhante atuante ( $\tau$ ), o valor do FS é igual a 1, a encosta se apresenta-se em iminente ruptura. Quanto maior o valor de FS, menores serão as possibilidades da ruptura. No entanto, é importante destacar que esta não é uma estabilidade absoluta e sim uma probabilidade de estabilidade que cresce com o aumento de FS (SHELBY, 1993).

O valor de fator de segurança adotado em um projeto que visa a estabilização de uma encosta, depende de vários fatores, dentre eles está a dimensão do talude e as consequências potenciais associadas à instabilização, entre outros. Um ponto importante em uma análise de estabilidade de talude reside na seleção apropriada nos valores dos parâmetros que serão utilizados para o cálculo do fator de segurança (SILVA, 2007).

Segundo Duncan (1992) e Leroueil & Locat (1998), a incerteza dos parâmetros determinados na caracterização geotécnica está relacionada à variação espacial dos parâmetros que caracterizam os materiais, dos fatores predisponentes, da extensão e qualidade da investigação realizada e da incerteza causada pela mudança temporal dos fatores agravantes ou acionantes. Para obtenção de fatores de segurança não se deve apenas atentar-se a incerteza das dos parâmetros geotécnicas, mas também, quais são as possíveis consequências da ruptura.

A norma ABNT NBR 11682 (2009) recomenda os valores de FS de acordo com o grau de segurança necessário ao local. Tal norma prescreve ainda os requisitos exigíveis para estudo, projeto, execução e controle de cortes, aterros e obras de estabilização em taludes. A Tabela 1 apresenta os fatores de segurança mínimos contra o deslizamento recomendados em norma.

Tabela 1 - Fatores de segurança mínimos para deslizamentos.

Nível de segurança contra danos materiais e ambientais	Nível de segurança contra danos a vidas humanas		
	Alto	Médio	Baixo
Alto	1,5	1,5	1,4
Médio	1,5	1,4	1,3
Baixo	1,4	1,3	1,2

NOTA 1 - No caso de grande variabilidade dos resultados dos ensaios geotécnicos, os fatores de segurança da tabela acima devem ser majorados em 10 %. Alternativamente, pode ser usado o enfoque sem probabilístico indicado no Anexo D.;

NOTA 2 - No caso de estabilidade de lascas / blocos rochosos, podem ser utilizados fatores de segurança parciais, incidindo sobre os parâmetros  $\gamma$ ,  $\phi$ ,  $c$ , em função das incertezas sobre estes parâmetros. O método de cálculo deve ainda considerar um fator de segurança mínimo de 1,1. Este caso deve ser justificado pelo engenheiro civil geotécnico.

NOTA 3 - Esta tabela não se aplica aos casos de rastejo, voçorocas, ravinas e queda ou rolamento de blocos.

Fonte: ABNT NBR 11682 (2009).

Nas últimas décadas, as análises de estabilidade de taludes obtiveram um grande avanço, devido ao uso de programas de estabilidade somadas ao acúmulo de experiências com problemas de ruptura vivenciados ao longo do tempo. Duncan (1992) apresenta algumas questões na análise de estabilidade, abordando as características dos principais métodos de análise de equilíbrio limite e a precisão computacional obtida pelo uso de determinados métodos de cálculo. Uma de suas conclusões é que o avanço contínuo dos programas computacionais usados para análises de estabilidade vem possibilitando resultados mais rápidos e precisos. No entanto, os responsáveis por este tipo de análise devem ter um conhecimento aprofundado das propriedades e da resistência dos solos, do conhecimento do programa de estabilidade a ser utilizado, e experiência para avaliação dos resultados obtidos para poder julgar suas análises (DUNCAN, 1996).

### 2.3.1 Métodos de análise de estabilidade

Os principais métodos de cálculo para determinar o FS são divididos em lineares e não lineares, sendo estes últimos subdivididos em superfícies circulares e não circulares. A Quadro 3 apresenta os principais métodos de cálculo para análise de estabilidade.

Quadro 3 - Síntese das características dos principais métodos de cálculo baseados no equilíbrio limite.

MÉTODOS		
Lineares		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Método do momento <math>p/\varphi=0</math>;</li> <li>• Taludes infinitos;</li> <li>• Método de Culman;</li> <li>• Método de Rendulic;</li> <li>• Método do círculo de atrito.</li> </ul>
Não Lineares	Superfície circular	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Método de Fellenius;</li> <li>• Método de Bishop;</li> <li>• Método de Bishop Modificado.</li> </ul>
	Superfície qualquer	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Método de Spencer;</li> <li>• Método de Morgenstern e Price;</li> <li>• Método de Janbu;</li> <li>• Método de Sarma;</li> <li>• Método dos Blocos.</li> </ul>

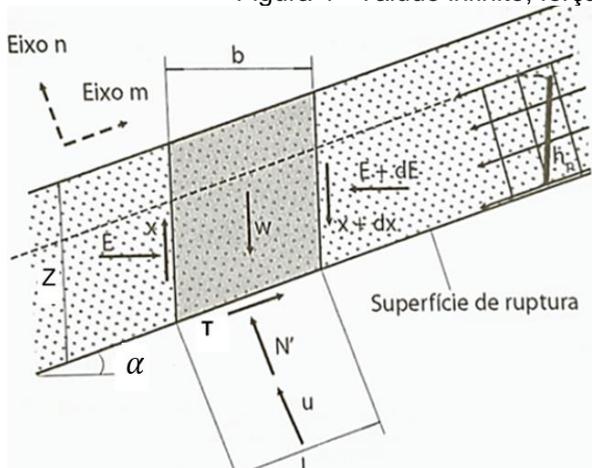
Fonte: Autora.

A determinação do FS, especificamente para escorregamentos translacionais rasos, foco dessa dissertação, é feita pelo método de talude infinito (bidimensional).

### 2.3.1.1 Método do talude infinito

Segundo Gerscovich (2016), quando o escorregamento é predominantemente planar, paralelo a superfície do talude, os efeitos de extremidades são desprezados e a análise de estabilidade pode ser feita pelo método do talude infinito. Neste caso, os esforços atuantes em uma fatia de solo de largura  $b$ , altura  $z$  e comprimento unitário podem ser identificados na Figura 4.

Figura 4 - Talude infinito, forças atuantes em uma fatia genérica



$A$  é a área da base da fatia,  $A = lx1 = l$

$b$  é a largura da fatia,  $b = l \cos \alpha$

$N'$  força normal na base da fatia,  $N' = \sigma' A$

$T$  é a força tangencial na base da fatia,  $T = \tau A$

$u$  é a poropressão da água,  $U = uA$

$W$  é o peso da fatia,  $W = bhy$

$E$  e  $x$  = forças nas laterais das fatias

Fonte: Adaptado de Gerscovich (2016)

Levando em consideração o estado de equilíbrio limite sabendo que a resistência ao cisalhamento ( $s$ ) em um determinado ponto na encosta considera, depende da tensão normal ( $\sigma'$ ), da coesão do solo ( $c'$ ) e do ângulo de atrito ( $\phi$ ), conforme a equação Coulomb-Mohr, para parâmetros efetivos (Equação 4), temos:

$$F = \tau l = \frac{sl}{FS} = \frac{c'l + N'tg\phi'}{FS} \quad (4)$$

Assumindo que, por simetria, as forças nas laterais das fatias se equivalham e se anulem mutuamente, isto é,  $dx=dE=0$ , e resolvendo o equilíbrio das forças nas direções paralela e perpendicular a superfície do talude, tem-se:

$$\begin{aligned} \sum F_m = 0 &\Rightarrow W \operatorname{sen} \alpha = F \Rightarrow W \operatorname{sen} \alpha = \frac{c'l}{FS} + N' \frac{tg\phi'}{FS} \\ &\Rightarrow FS = \frac{c'l + N'tg\phi'}{W \operatorname{sen} \alpha} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\sum F_n = 0 \Rightarrow W \operatorname{cos} \alpha = N' + ul \Rightarrow N' = W \operatorname{cos} \alpha - ul \quad (6)$$

Substituindo a Equação 6 na Equação 5 e sabendo que o peso da fatia é  $W = \gamma h l \operatorname{cos} \alpha$ , tem-se, independentemente da largura ( $l$ ) da fatia, a expressão para o cálculo do fator de segurança ( $FS$ ) dada pela Equação 7:

$$FS = \frac{c' + (\gamma z \operatorname{cos}^2 \alpha - u) tg\phi'}{\gamma z \operatorname{sen} \alpha \operatorname{cos} \alpha} \quad (7)$$

Onde

$c'$  = coesão efetiva do solo;

$\gamma$  = peso específico natural do solo;

$\phi'$  = ângulo de atrito efetivo do solo;

$u$  = proressão da água;

$z$  = profundidade de ruptura;

$\alpha$  = inclinação do talude.

De acordo com o apresentado na Figura 4, a poropressão da água ( $u$ ) também deve ser considerada na análise da estabilidade, uma vez que ela, geralmente, reduz a resistência a partir, por exemplo, da elevação de pressões positivas por saturação do solo ou da redução da coesão aparente, devido ao aumento na umidade do solo.

O método do talude infindo é baseado em um conjunto de simplificações, que fazem com que o mesmo se tome bastante maleável para a aplicação em diferentes situações. Isso faz com que o modelo seja amplamente utilizado na análise de estabilidade de encostas naturais apresentando uma boa compatibilidade com programas computacionais, principalmente os que envolvem o auxílio de GIS's (AHRENDT, 2005).

### **2.3.2 Influência da sucção na estabilidade de taludes**

Segundo Coutinho et al. (2019), na mecânica dos solos convencional, o efeito de sucção é geralmente ignorado nas análises de estabilidade de taludes. Há uma visão de que a sucção não deve ser considerada nas análises em taludes, muitos dos quais são não saturados, preconizando a segurança. Na prática da engenharia, considera-se arriscado a realização de análises, que apesar de rigorosa e demorada, apresenta grau de incerteza tão elevado. Essas incertezas estão relacionadas principalmente às condições climáticas, que são difíceis de prever e podem ser inesperadas, independentemente da tecnologia utilizada para tais fins. Porém, alguns estudos na literatura comprovam a importância da sucção, devendo ser considerada na estabilidade de taludes não saturados. Dentre estes estudos, cita-se Krahn et al. (1989); Rahardjo et al. (2002); Lu et al. (2008); Massad et al. (2013); Gerscovich et al. (2015); Miller et al. (2015); Mahmood et al. (2016); Park (2016); Gofar e Rahardjo (2017); e Kristo et al. (2017).

É bem sabido que a infiltração de água em solo não saturado reduz a sucção matricial, afetando a resistência ao cisalhamento do solo e conseqüentemente a probabilidade de rompimento do talude. Desta forma, a ruptura de um talude não saturado está diretamente relacionada com a precipitação e infiltração, sendo necessária uma análise vasta e detalhada do fluxo, que leva em consideração as informações de precipitação na área, a permeabilidade e a sucção da matriz do solo que constitui o talude (KRAHN et al., 1989.; MAHMOOD et al., 2016).

Santos Júnior et al. (2008) apontam que à medida que a frente de umedecimento avança no solo, a sucção diminui e, conseqüentemente, a coesão também diminui. Portanto, após um longo período de chuva, encostas que se encontravam estáveis e com baixo teor de umidade podem se romper. Estes autores estudaram a estabilidade das falésias na cidade de Natal formadas pelos sedimentos da Formação Barreiras e constataram que a coesão foi reduzida em 80% quando inundadas e concluíram que este fator é importante para reduzir a estabilidade das Falésias da Formação Barreiras.

Lima (2002) estudou a estabilidade de uma encosta da zona norte do Recife e constatou que ocorreu uma redução de até 64% da coesão de suas amostras quando inundadas, esta diminuição da resistência refletiu-se diretamente na estabilidade do talude, onde o fator de segurança reduzia de 2,2, na condição de verão, para 1,5 na condição de inverno e chegava a atingir o valor de 1,0 na condição de inverno rigoroso.

Santos (2018) apresentou resultados para amostras coletadas em encostas localizadas no bairro do Ibura na cidade de Recife, onde as amostras apresentaram redução de até 76% na coesão quando inundadas. Na análise de estabilidade apresentada pela autora, o fator de segurança foi 1,94 para condição de umidade natural, cerca de 59% maior que o fator de segurança encontrado para a mesma encosta na condição saturada.

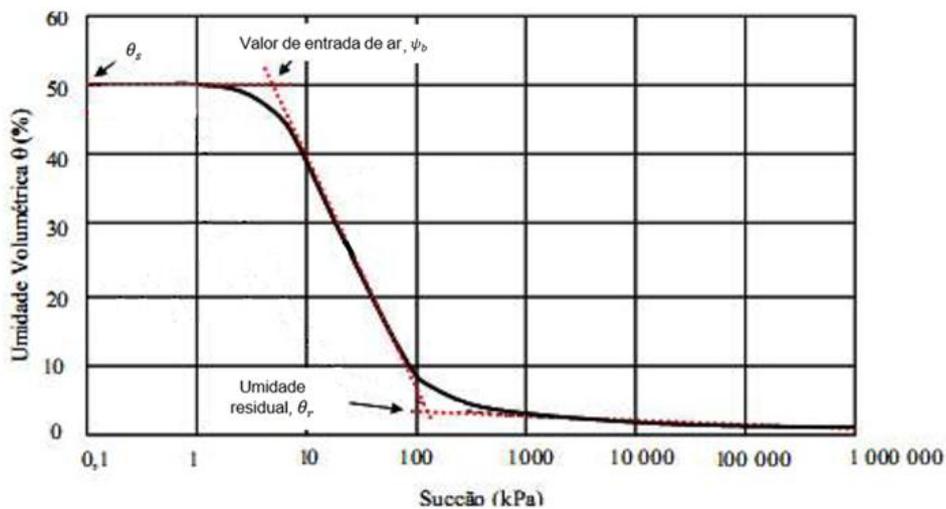
Fredlund (1981, 1987) e Fredlund e Xing (1994) enfatizam que a sucção inicial do solo desempenha um papel importante na estabilidade de taludes não saturados, este parâmetro geralmente depende de vários fatores como do tipo de solo, das condições da água subterrânea e das condições climáticas. De um modo geral, quando a sucção ultrapassa um determinado valor, o solo arenoso tende a apresentar rápida perda de água. Isso se deve à presença de poros maiores e mais conectados. Por outro lado, solos argilosos apresenta perda de umidade mais moderada. A sucção do solo é inversamente proporcional à saturação ou umidade do solo. Ou seja, à medida que o solo se aproxima da saturação (100%), o valor da sucção tende a zero.

A representação gráfica da sucção existente no solo é chamada de curva característica, que pode ser definida como a relação entre a água existente nos poros e a sucção (Campos, 1994).

Na curva característica pode-se identificar alguns pontos principais: a pressão de entrada de ar ( $\psi_b$ ) e o teor de umidade residual ( $\theta_r$ ) (Figura 5). Segundo Gerscovich

(2001), quando o solo se encontra saturado, e, portanto, com baixa sucção, nenhum fluxo ocorrerá até que a sucção aumente até um determinado valor crítico, capaz de fazer com que a água presente nos maiores vazios comece a sair. Esta sucção crítica é chamada de pressão de entrada de ar ( $\psi_b$ ). Após esse ponto, o solo passa a perder água de seus vazios e por sua vez a sucção aumenta, até que restará apenas um pouco de água em vazios muito pequenos e mesmo para valores bem altos de sucção esta água ainda ficará retida. O ponto da curva a partir do qual qualquer aumento na sucção afeta de forma insignificante o teor de umidade é chamado de teor de umidade residual ( $\theta_r$ ).

Figura 5 - Pontos notáveis de uma curva característica.



Fonte: Adaptado de Fredlund e Xing (1994).

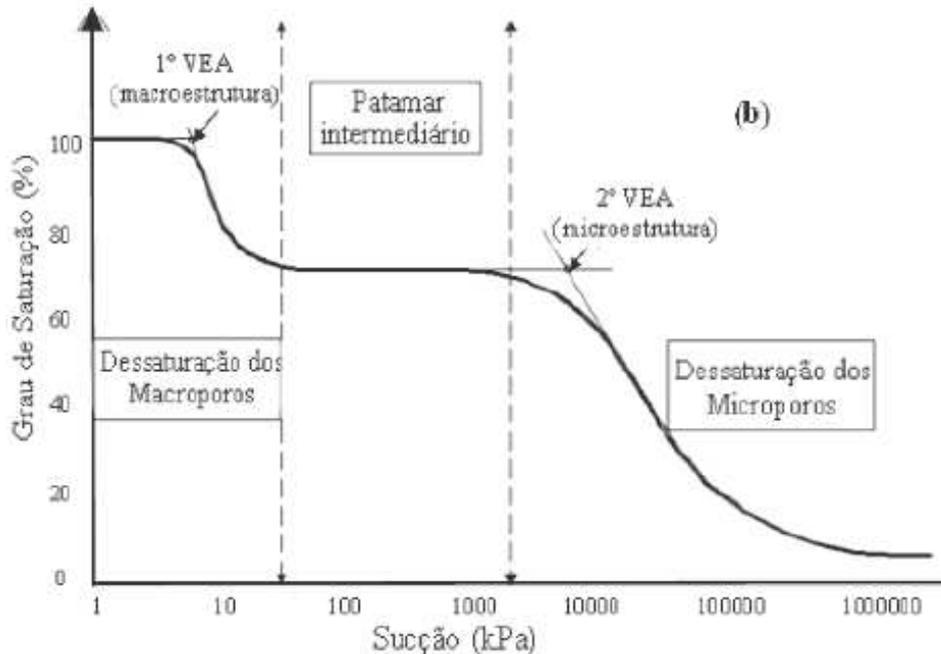
Para Futai (2002), os solos tropicais podem não apresentar o comportamento de curva descrita por Fredlund & Xing (1994). As curvas características dos solos tropicais sugerem uma distribuição bimodal de poros, enquanto que os solos das curvas características apresentadas por Fredlund & Xing (1994) sugere uma distribuição de poros unimodal.

Assim, devido a ausência de poros, a sucção aumenta, enquanto que o teor de umidade não varia, criando patamares e dando a curva um formato semelhante a uma “sela” (Figura 6).

Diversos modelos empíricos foram desenvolvidos ao longo do tempo para ajustar as curvas características unimodais, alguns desses modelos podem ser encontrados nos trabalhos de Gardner (1958), Brooks & Corey (1964), van Genuchten

(1980), McKee & Bumb (1984) e Fredlund & Xing (1994). Mais recentemente foram desenvolvidos modelos de ajuste para curvas bimodais, onde destaca-se o de Gitirana & Fredlund (2004).

Figura 6 - Curva de retenção de solos tropicais em formato de “sela”.



Fonte: Feuerharmel et al. (2007).

A medição da sucção pode ser realizada diretamente em campo usando tensiômetros, ou em laboratório usando placas de pressão, método do equilíbrio de vapor e papel de filtro, entre outros métodos diferentes (Marinho, 1997). Neste trabalho, as curvas característica dos solos foram determinadas pelo método de laboratório do papel de filtro, apresentada posteriormente no Capítulo 5.

## 2.4 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Este capítulo teve como objetivo apresentar a fundamentação teórica sobre movimentos gravitacionais de massa, sintetizando os principais conceitos relacionados ao tema da dissertação, utilizando-se de referências da literatura técnica nacional e internacional.

### 3 METODOS PARA MAPEAMENTO DE SUSCETIBILIDADE

Segundo Bitar (2014), a suscetibilidade indica a potencialidade de acontecimentos de um fenômeno ou um processo do meio físico, sejam eles naturais ou induzidos, em uma determinada área.

Augusto Filho e Virgili (1998), dentre outros autores, definem como um mapa de suscetibilidade a deslizamentos, aqueles que determinam um índice ou de uma grandeza que permita quantificar o quão próximo da ruptura uma determinada encosta se encontra, sob a atuação de um determinado conjunto de fatores. Com o aprimoramento dos Sistema de Informações Geográficas (SIG), foram desenvolvidos diversos métodos de análise de suscetibilidade a deslizamentos, contudo, existem diferentes abordagens do problema e diversas formas de investigação para entender o processo, conforme apresentado no Quadro 4.

As metodologias mais empregadas para elaboração dos mapas de suscetibilidade, podem ser classificadas em: **mapas de inventários** ou **análise distributiva** baseados em modelagem probabilística; **análise qualitativa** ou **geomorfológicas**; **análises heurísticas** ou **mapas índices**, que usa combinação de mapas qualitativos; **análises estatísticas**; e **modelos determinísticos** (ex. modelos matemáticos determinísticos em bases físicas) (CARRARA, et al., 1995; GUZZETTI et al., 1999; VAN WESTEN, 2004).

Quadro 4 - Diferentes métodos de análise de suscetibilidade e de previsão de movimentos de massa e suas principais características.

MÉTODOS	CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS
<b>Mapas de inventários / Análise distributiva</b>	Mapeamento direto das feições do movimento de massa em um mapa que fornece informações apenas daqueles locais onde os escorregamentos ocorreram no passado (inventário de escorregamentos).
<b>Análise Qualitativa</b>	Direto ou semi-direto, métodos em que o mapa geomorfológico é renumerado para um mapa de perigo, ou diversos mapas são combinados em um único mapa usando a regra de decisão subjetiva, baseado sobre a experiência do pesquisador.
<b>Análise Heurística</b>	Método direto ou semi-direto, onde fundamenta-se sobre o peso atribuído por julgamento, permitindo realizar combinações de mapas.
<b>Análise Estatística</b>	Método indireto, onde as análises estatísticas são usadas para obter uma previsão do perigo ao movimento de massa a partir de um número de mapas de parâmetro.
<b>Análise Determinística</b>	Método indireto, são aqueles em que os mapas de parâmetros são combinados por meio de cálculos de estabilidade da encosta.

Fonte: Van Westen, (1993) apud Listo (2015).

Nos mapas de inventário, os deslizamentos ocorridos são identificados e localizados através da interpretação de fotografias aéreas ou imagens de satélite, visitas de campo, dados históricos, etc. Na maioria dos casos, essa localização espacial, juntamente com outras informações relevantes ao processo (como tipo, forma, tamanho, raio de alcance e volume do material escorregadio), subsidia outros métodos, fornecendo um registro dos processos ocorridos no passado e no presente.

As principais vantagens do mapa de inventário incluem sua simplicidade de execução, análise da distribuição de deslizamentos na paisagem, possibilidade de integração fácil ou direta com fatores condicionantes e a utilização como ferramenta para validação de produtos de modelagem matemática (GUZZETTI et al., 1999; VAN WESTEN, 2004; VAN WESTEN et al., 2006). No entanto, as previsões baseadas apenas nos dados fornecidos pelo inventário são limitadas porque alguns parâmetros, como litologia e morfologia, não levam em consideração a escala geológica e são constantes em curtos períodos de tempo, mas outros fatores ambientais, como uso e ocupação do solo e clima, podem variar para cada tempo analisado.

Os Métodos Determinísticos, são sustentados em leis físicas, de forma específica, eles associam os registros de movimentos de massa, modelos de estabilidade de encostas e modelos hidrológicos e busca diminuir a subjetividade da classificação dos graus de suscetibilidade por meio do cálculo do Fator de Segurança (LISTO, 2015). Um dos primeiros modelos desenvolvidos para a avaliação da estabilidade das encostas por meio de análise determinística baseado na teoria de talude infinito foi chamado de LISA (CALCATERRA et al., 2004). Posteriormente, surgem outros modelos seguindo essa mesma linha de pesquisa: PISA (HANEBERG, 2004); SMORPH (SHAW & JOHNSON, 1995); SHALSTAB (MONTGOMERY & DIETRICH; 1989; DIETRICH et al., 1993; MONTGOMERY & DIETRICH, 1994 e MONTGOMERY et al., 1998); SINMAP (PARK et al., 1998); e TRIGRS (IVERSON, 2000 e BAUM et al.; 2002, 2008), modelo utilizado no desenvolvimento desta dissertação.

### 3.1 O MODELO MATEMÁTICO TRIGRS

Christofletti (1999) acredita que modelos podem ser entendidos como qualquer representação simplificada da realidade ou um aspecto do mundo real. Entre

os diferentes tipos de modelos, os modelos matemáticos são abstrações que substituem objetos, forças, eventos, etc. por expressões matemáticas contendo variáveis, parâmetros e constantes (KRUMBEIN e GRAYBILL, 1965; CHORLEY, 1975). Assim sendo, os modelos matemáticos são baseados em processos e leis físicas naturais, e suas principais limitações podem estar relacionada à dificuldade de se obter os parâmetros exigidos (como as propriedades geotécnicas e hidrológicas do solo), principalmente quando aplicados a uma grande área. Portanto, é recomendado aplicá-lo em áreas de maior detalhe (por exemplo, em escala de bacia hidrográfica).

O modelo matemático TRIGRS (Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability) é um software desenvolvido pela United States Geological Survey (USGS), na linguagem Fortran, que calcula a variação do Fator de segurança (FS), ao longo de grandes áreas e em diferentes profundidades (Z ou H), conforme mudanças da poropressão da água ( $\psi$ ), durante um evento pluviométrico que pode variar de horas a alguns dias. Tem como base a associação entre um modelo hidrológico (infiltração e fluxo de águas pluviais) e um modelo de estabilidade de taludes, propostos por Iverson (2000). As análises usando TRIGRS são aplicáveis a áreas em escala de bacia hidrográfica que são propensas a deslizamentos de terra translacionais rasos induzidos por eventos pluviométricos e que satisfaçam razoavelmente bem as outras premissas do modelo.

A partir da infiltração da água da chuva, a aplicação simula utilizando soluções analíticas de equações diferenciais parciais que representam o fluxo unidimensional – vertical em materiais homogêneos e isotrópicos, onde a chuva pode apresentar duração de horas ou dias e o material pode está saturado ou não.

A definição independente de valores de entradas em células diferentes permite a heterogeneidade horizontal, onde as zonas de propriedade podem variar entre si quanto as propriedades de material, precipitação e outros valores.

A versão original do modelo (BAUM et al., 2002) foi baseado no método descrito por Iverson (2000), com implementação de chuvas históricas, que podem variar de horas a alguns dias, um limite basal impermeável em profundidade finita e um esquema de roteamento de escoamento simples (atinge balanço de massa entre entrada de chuva, infiltração e escoamento em toda a rede, permitindo que o excesso de água flua para células descendentes que estão recebendo menos precipitação direta do que são capazes de absorver). Na versão 2 (BAUM et al., 2008) foi mantido

as características da versão original, no entanto ampliou-se o modelo para abordar a infiltração em uma camada superficial parcialmente não saturada acima do lençol freático, usando uma solução analítica da equação de Richards para infiltração vertical em materiais isotrópicos e homogêneos dada por Srivastava e Yeh (1991).

O programa opera com base em um modelo digital do terreno (MDT), e nos produtos que podem ser extraídos dele, como o mapa de inclinação e o mapa de direção de fluxo. Os parâmetros de entrada de infiltração, propriedades hidráulicas, e estabilidade do talude podem variar ao longo da área da grade, tornando possível analisar sequências de chuvas sobre o terreno com geologia e propriedades geotecnicas variáveis. O programa TRIGRS é executado a partir da linha de comando ou em uma janela simples de entrada / saída com relativamente pouca interação do usuário. O usuário controla uma análise por meio de um arquivo de inicialização que contém os nomes de todos os outros arquivos de entrada e saída, bem como outros parâmetros necessários para executar o programa. Após a etapa de cálculo, o modelo salva os resultados em uma série de arquivos de texto que podem ser importados para softwares GIS, em tempos específicos que permitem a observação da variação do poropressão e fatores de segurança à medida que a chuva avança.

A seguir está uma breve descrição dos modelos básicos e fórmulas usados pelo TRIGRS para representar esses processos.

### **3.1.1 Modelo hidrológico**

#### **3.1.1.1 Para condições do solo inicialmente saturado**

O modelo hidrológico de infiltração no TRIGRS, para condições iniciais saturadas, baseia-se na solução linearizada da equação de Richards<sup>1</sup> (Equação 8) feita por Iverson (2000) conforme o sistema de coordenadas apresentado nas Figura 7 e Figura 8, e nas extensões, realizadas pelos próprios desenvolvedores do programa (BAUM et al., 2008).

---

<sup>1</sup> Equação de fluxo tipo transiente e tridimensional para meio heterogêneo e isotrópico.

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ K_L(\psi) \left( \frac{\partial \psi}{\partial x} - \text{sen} \alpha \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ K_L(\psi) \left( \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ K_Z(\psi) \left( \frac{\partial \psi}{\partial z} - \text{cos} \alpha \right) \right] \quad (8)$$

Onde:

$\psi$  = poropressão da água [kPa];

$\theta$  = umidade volumétrica de água do solo [adimensional];

$t$  = tempo [s];

$\alpha$  = ângulo da encosta [ $0 \leq \alpha \leq 90^\circ$ ];

$K_L$  e  $K_Z$  = condutividade hidráulica nas direções lateral (x,y) e normal (z), respectivamente, conforme a Lei de Darcy, onde x é paralelo à encosta, y paralelo às curvas de nível locais e z normal ao plano x-y. [m/s];

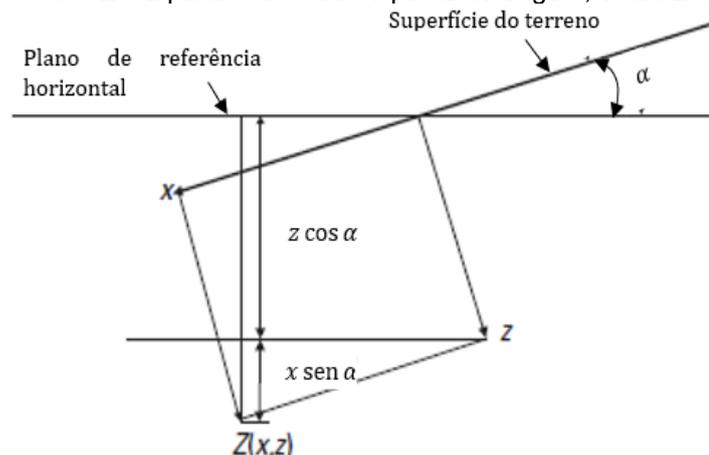
$z$  = variável espacial [m].

Figura 7 - Sistema de coordenadas cartesianas usada na análise de Richards. Sendo x, tangente a superfície da encosta; y tangente às curvas de nível e z normal ao plano xy; e  $\alpha$  é a inclinação da encosta em relação a horizontal.



Fonte: Iverson (2000).

Figura 8 - Esboço mostrando a definição da coordenada vertical ( $Z = x \text{sen} \alpha + z \text{cos} \alpha$ ), espessura do solo medida em campo com o trado, usada para calcular a profundidade em um local arbitrário (x,z). Se as coordenadas Z e z partem do mesmo ponto de origem, então  $Z = z \text{cos} \alpha$ .

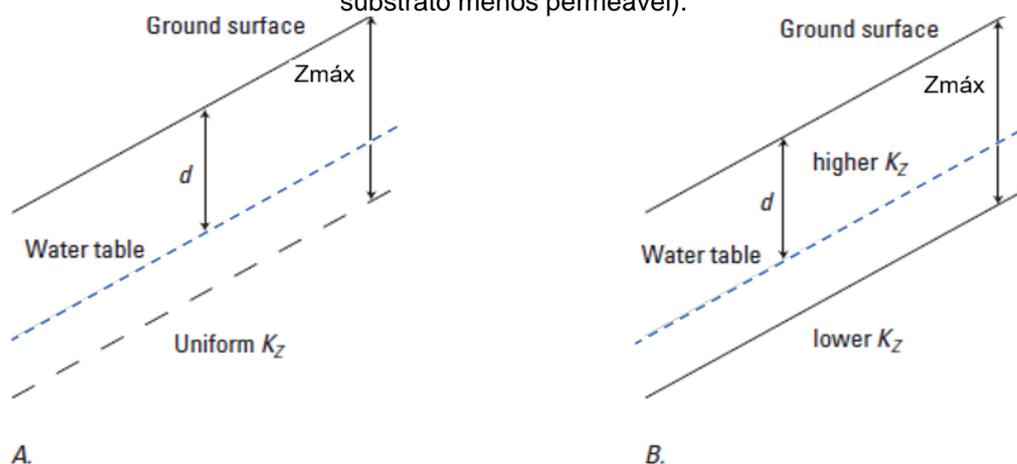


Fonte: modificado de Baum et al. (2008).

A solução de Iverson (2000) assume que existem duas frentes de infiltração: uma estacionária (via fluxo lateral, paralelo à direção do declive), e uma transiente (perpendicular à superfície). O componente de infiltração estacionária depende da profundidade inicial do lençol freático e da taxa de infiltração constante. A taxa de infiltração, o sistema hidráulico saturado, a condutividade hidráulica e o ângulo de inclinação do talude determinam a direção inicial do fluxo (dentro do plano  $xz$ ). Os resultados do modelo são muito sensíveis a condição de infiltração inicial estacionária. Conseqüentemente, as condições iniciais são provavelmente as contribuições mais significativas para o modelo.

Para determinar as equações de infiltração (equações 9 e 10), o modelo TRIGRS considera duas condições de contorno, que permite realizar simulações considerando duas situações relacionadas à presença ou não de uma camada pouco permeável (ou limite basal). O modelo inicialmente proposto por Iverson (2000) simula fluxos hidrológicos verticais, comuns em áreas onde a condutividade hidráulica saturada é relativamente uniforme com a profundidade (Figura 9A). Entretanto, Baum et al. (2008), durante o desenvolvimento do TRIGRS, modificaram sua estrutura inicial permitindo considerar também uma profundidade limitante (ex. presença de horizontes superficiais mais permeáveis que os demais inferiores) e a geração de fluxos paralelos à encosta (Figura 9B).

Figura 9 - Seções transversais esquemáticas mostrando condições de contorno assumidas pelo modelo TRIGRS na derivação das duas equações de infiltração (equações 9 e 10). A dimensão  $Z_{\text{máx}}$  corresponde a profundidade máxima indicada pelo usuário, assim como a inicial do lençol freático ( $d$ ). (A) é uma condição contorno de profundidade infinita, representada pela equação 9 (apropriada para áreas onde a condutividade hidráulica saturada vertical é relativamente uniforme com a profundidade), e (B) representa uma condição de contorno de profundidade finita, representada pela equação 10 (apropriada em áreas onde uma camada superficial mais permeável se sobrepõe a um substrato menos permeável).



Fonte: modificado de Baum et al. (2008).

Para locais onde a condutividade hidráulica saturada é relativamente uniforme com a profundidade ou um limite basal infinitamente profundo (Figura 9A), o componente transiente assume um fluxo descendente vertical unidimensional, variando no tempo com duração e intensidade fixas na superfície do solo e uma condição de fluxo zero no limite basal, para tempos maiores do que o tempo de início. O modelo TRIGRS utiliza uma série de funções de Heaviside (ou função degrau) para implementar a soma sugerida por Iverson (2000) de sua solução original para chuva de intensidade constante para representar sequencias de chuvas de intensidade e durações variáveis no tempo (BAUM et al., 2008). Esta solução generalizada é dada pela Equação 9:

$$\psi(Z, t) = (Z - d)\beta + 2 \sum_{n=1}^N \frac{I_{nZ}}{K_S} \left\{ H(t - t_n) [D_1(t - t_n)]^{\frac{1}{2}} \operatorname{ierfc} \left[ \frac{Z}{2[D_1(t - t_n)]^{\frac{1}{2}}} \right] \right\} - 2 \sum_{n=1}^N \frac{I_{nZ}}{K_S} \left\{ H(t - t_{n+1}) [D_1(t - t_{n+1})]^{\frac{1}{2}} \operatorname{ierfc} \left[ \frac{Z}{2[D_1(t - t_{n+1})]^{\frac{1}{2}}} \right] \right\} \quad (9)$$

Onde:

$\psi$  = poropressão da água;

$t$  = tempo;

$Z = z/\cos\alpha$ , onde  $Z$  é a direção da coordenada vertical (positiva para baixo) e a profundidade abaixo da superfície do solo, e  $z$  é a direção da coordenada normal ao talude (também positiva para baixo) e  $\alpha$  é a inclinação do talude (Figura 7 e Figura 8);

$d$  = profundidade, em estado estacionário, do lençol freático, medida na direção vertical;

$\beta = \cos^2\alpha - (I_{ZLT}/K_S)$ ;

$K_S$  = condutividade hidráulica saturada na direção  $Z$ ;

$I_{ZLT}$  = taxa de infiltração inicial;

$I_{nZ}$  = intensidade da chuva para o intervalo de tempo  $n$ ;

$D_1 = D_0 / \cos^2\alpha$ , onde  $D_0$  é a difusividade hidráulica saturada;

$N$  = número total de intervalos de tempo;

$H(t-t_n)$  = função de Heaviside e  $t_n$  é o tempo no  $n$ ésimo intervalo de tempo na sequência de infiltração da chuva.

O primeiro termo na Equação 9 representa a parte estacionária da solução e os termos restantes representam a parte transiente.

Como alternativa à solução para condutividade hidráulica saturada relativamente uniforme com a profundidade ou um limite basal infinitamente profundo, foi implementado e adicionado no TRIGRS uma solução para poropressão no caso de um limite basal impermeável (ou camada de solo bastante impermeável) em uma profundidade finita ( $d_{LZ}$ ) (Figura 9B). Esta solução é dada pela Equação 10:

$$\begin{aligned}
 \psi(Z, t) = & (Z - d)\beta \\
 & + 2 \sum_{n=1}^N \frac{I_{nZ}}{K_S} H(t - t_n) [D_1(t - t_n)]^{\frac{1}{2}} \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ ierfc \left[ \frac{(2m - 1)d_{LZ} - (d_{LZ} - Z)}{2[D_1(t - t_n)]^{\frac{1}{2}}} \right] \right. \\
 & + \left. ierfc \left[ \frac{(2m - 1)d_{LZ} + (d_{LZ} - Z)}{2[D_1(t - t_n)]^{\frac{1}{2}}} \right] \right\} \\
 & - 2 \sum_{n=1}^N \frac{I_{nZ}}{K_S} H(t - t_{n+1}) [D_1(t - t_n)]^{\frac{1}{2}} \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ ierfc \left[ \frac{(2m - 1)d_{LZ} - (d_{LZ} - Z)}{2[D_1(t - t_n)]^{\frac{1}{2}}} \right] \right. \\
 & + \left. ierfc \left[ \frac{(2m - 1)d_{LZ} + (d_{LZ} - Z)}{2[D_1(t - t_n)]^{\frac{1}{2}}} \right] \right\}
 \end{aligned} \tag{10}$$

A função *ierfc*, presente nas duas equações de infiltração (Equação x e Y), é dada pela Equação 11:

$$ierfc(\eta) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-\eta^2} - \eta \operatorname{erfc}(\eta) \tag{11}$$

Onde, *erfc*( $\eta$ ) é a função erro complementar. O programa, TRIGRS, usa uma aproximação desta função foi desenvolvido por WJ Cody do Argonne National Laboratory (Cody, 1969).

As Equações 9 e 10 representam duas condições diferentes do subsolo (Figura 9). A Equação 9 aplica-se onde as propriedades hidráulicas são relativamente uniformes com a profundidade e a Equação 10 se aplica quando ocorre uma diminuição drástica da condutividade hidráulica em uma profundidade finita, por exemplo, em áreas onde depósitos de solo relativamente permeáveis se sobrepõem à rocha sólida relativamente impermeável.

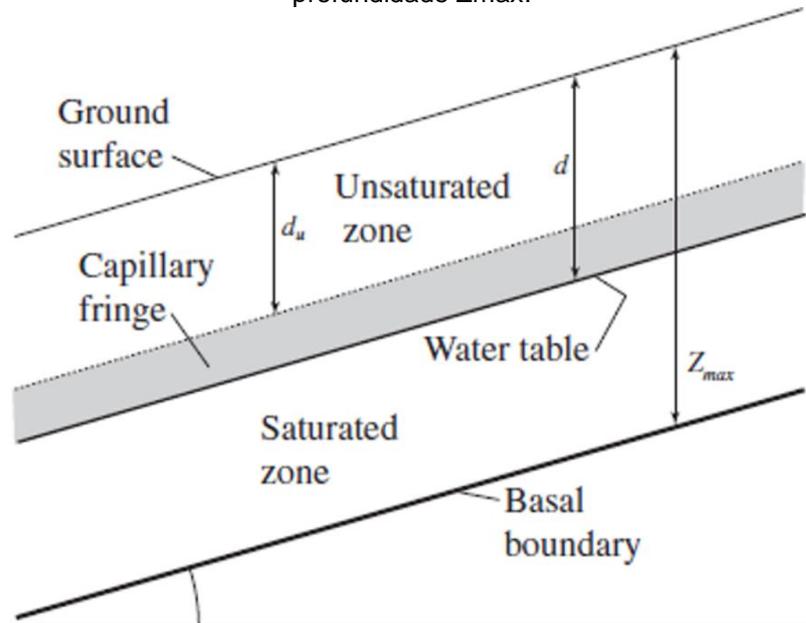
Apenas uma solução (Equação 9 ou 10) é aplicada a todas as células em uma análise. As Equações 9 e 10 são válidas para solos saturados e quase saturados para os quais a condutividade hidráulica são aproximadamente iguais à condutividade hidráulica saturada. Ambas as equações de infiltração se aplicam a condições iniciais saturadas ou saturadas por tensão, de modo que o fluxo atende a lei de Darcy e a difusividade hidráulica é aproximadamente constante.

Ambas as Equações 9 e 10 são estritamente válidas apenas onde a infiltração transiente é verticalmente para baixo, porém sua aplicação no cálculo das poropressões será precisa o suficiente se o componente lateral de fluxo transiente for relativamente pequeno. Entretanto, como o componente de fluxo estacionário pode apresentar qualquer direção, a superposição dos componentes transiente e estacionário resultará em fluxo com uma direção arbitrária dentro do plano xz.

#### 3.1.1.2 Para condições do solo inicialmente não saturadas

Para tornar o modelo TRIGRS aplicável a uma gama mais ampla de condições iniciais, Baum et al. (2008) adicionaram uma solução analítica para fluxo não saturado como uma opção para estimar a infiltração na superfície do solo. Esta opção trata o solo como um sistema de duas camadas que consiste em uma zona saturada com uma franja capilar acima do lençol freático coberta por uma zona não saturada que se estende até a superfície do terreno (Figura 10). A zona não saturada absorve parte da água que se infiltra na superfície do solo e a água restante passa pela zona não saturada e se acumula na base da zona não saturada acima do nível d'água inicial. A zona não saturada atua como um filtro que suaviza e retarda a infiltração do solo em profundidade.

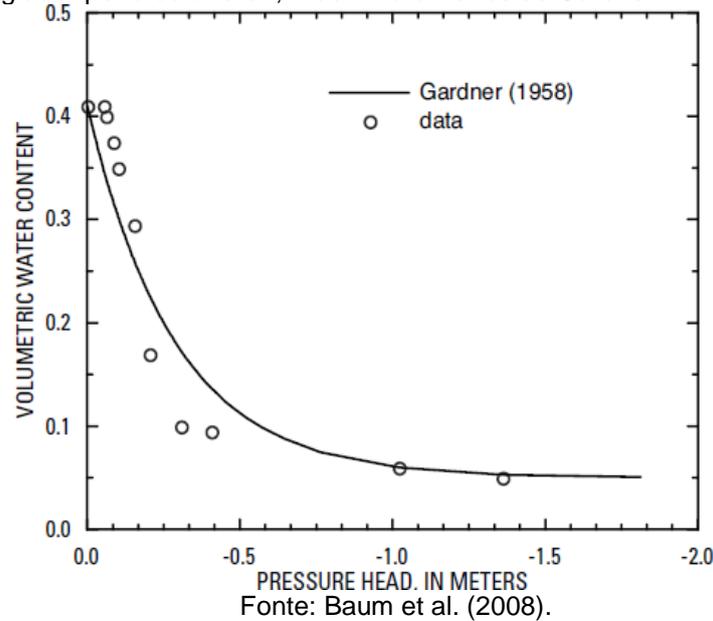
Figura 10 - Condições da água subterrânea rasa, em solos de encosta. A zona não saturada acima do lençol freático tem profundidade  $d_u$ . A franja capilar está entre a zona não saturada e o lençol freático em profundidade  $d$ . O limite inferior, que é tratado como impermeável neste modelo, está na profundidade  $Z_{max}$ .



Fonte: modificado de Baum et al. (2008).

Este modelo usa quatro parâmetros (teor de umidade volumétrica residual ( $\theta_r$ ), o teor de umidade volumétrica do solo saturado ( $\theta_s$ ), o parâmetro  $\alpha$  obtido do ajuste da curva a condutividade hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ) para gerar a curva característica do solo pelo método de Gardner (1958), como mostra a Figura 11, e aproximar o processo de infiltração como fluxo vertical unidimensional (Srivastava e Yeh, 1991; Savage et al., 2004). Onde a água infiltrada se acumula na base da zona não saturada e, portanto, eleva o nível d'água. A pressão da água acumulada acima do nível d'água original se propaga para baixo como uma onda ou ondas de pressão difusiva, aumentando assim a poropressão em profundidade. Para zonas saturadas relativamente finas, como aquelas comuns em encostas, as ondas de pressão se propagam em profundidade muito rapidamente.

Figura 11 - Gráfico mostrando exemplo de modelo de Gardner (1958) para curva característica do solo. O modelo foi ajustado aos dados de retenção de água para um colúvio arenoso derivado de areia de lavagem glacial perto de Everett, Wash. Parâmetros de Gardner:  $\alpha = 3,5$ ,  $\theta_s = 0,41$ ,  $\theta_r = 0,05$ .



No manual do TRIGS (BAUM et al., 2008) são descritas as fórmulas usadas para calcular o fluxo, a condutividade hidráulica e a distribuição da poropressão na zona não saturada. Assim como é apresentado o procedimento para estimar o aumento do nível d'água e calcular as mudanças de poro pressão abaixo do nível d'água original. Para determinar a infiltração na zona não saturada são usados os parâmetros da função condutividade hidráulica ( $K(\psi)$ ) de Gardner (1958) para linearizar a equação de Richards na forma unidimensional.

### 3.1.1.3 Infiltração e escoamento superficial

O programa, TRIGRS, usa um método simples para estabelecer o caminho do escoamento superficial (roteamento do fluxo), de células que tem excesso de água superficial para células adjacentes da encosta, onde pode se infiltrar ou fluir mais longe encosta abaixo.

É assumido que o escoamento superficial ocorre quando a precipitação somada ao escoamento fornecido a uma célula exceder sua capacidade de infiltração. Calculamos a infiltração ( $I$ ), em cada célula com a soma da precipitação ( $P$ ), mais qualquer escoamento das células ascendente ( $R_u$ ), com a limitação de que a infiltração não pode exceder a condutividade hidráulica saturada ( $K_s$ ), conforme a Equações 12 e Equação 13.

$$I = P + R_u, \text{ se } P + R_u \leq K_s \quad (12)$$

$$I = P + R_u, \text{ se } P + R_u \leq K_s \quad (13)$$

Em cada célula onde  $P + R_u$  excede  $K_s$ , o excesso é considerado escoamento ( $R_d$ ) é desviado para células descendentes adjacentes. Geralmente em solos saturados ou saturados por tensão a condutividade hidráulica saturada ( $K_s$ ) é igual à infiltração ( $I$ ) (HILLEL, 1982; IVERSON, 2000).

O objetivo de direcionar o escoamento superficial (roteamento do fluxo) é para evitar a perda do excesso de precipitação que não pode infiltrar na célula de origem e para melhorar o desempenho do modelo em áreas urbanizadas ou em áreas pavimentadas ou que apresente outras superfícies impermeáveis. O método de roteamento impõe equilíbrio de massa para cada passo de tempo durante a precipitação; a precipitação total em todas as células deve ser igual à água que se infiltra em todas as células somadas a água que flui para as bordas do domínio do problema (ou quaisquer depressões fechadas) sem infiltrar. Assim, o excesso de precipitação que não consegue se infiltrar em sua célula de origem tem a oportunidade de se infiltrar em algum ponto da encosta. Além do escoamento das células onde a precipitação excede a capacidade de infiltração, presume-se que a água escoe de quaisquer células onde o lençol freático esteja inicialmente na superfície do solo e a taxa inicial (constante) de infiltração seja negativa. A água é exfiltrada de tais células e corre para a(s) célula(s) adjacente(s) descendente.

O balanço de massa será alcançado apenas se os dados topográficos forem corretamente indexados. Um modelo digital do terreno (MDT) pode ser indexado corretamente apenas se tiver sido ajustado no software GIS para ser hidrológicamente consistente. Este ajuste é um processo de alisamento seletivo realizado aumentando a elevação das depressões fechadas de uma única célula para coincidir com as células circundantes e ligeiramente aumentando ou diminuindo a elevação das células em áreas planas para produzir direções de fluxo que são consistentes com a topografia circundante. O programa TRIGRS grava os resultados dos cálculos de balanço de massa em um arquivo de log, denominado "TrigrsLog.txt", na mesma pasta do aplicativo.

### 3.1.2 Modelo de estabilidade

A estabilidade de taludes é modelada seguindo Iverson (2000), que utiliza uma análise de estabilidade unidimensional baseada no método do talude infinito (Taylor, 1948), considerando  $H \ll L$ , onde  $H$  (ou  $Z$ ) é a profundidade da superfície de ruptura e  $L$  é o comprimento do deslizamento.

O fator de segurança ( $FS$ ) que durante a chuva varia em função do tempo e da profundidade ( $Z$ ), é calculado pela Equação 14:

$$FS = \frac{\tan \phi'}{\tan \alpha} + \frac{c' - \psi(Z - t)\gamma_w \tan \phi'}{\gamma_s Z \sin \alpha \cos \alpha} \quad (14)$$

Onde:

$c'$  é a coesão do solo para tensão efetiva (kPa);

$\phi'$  é o ângulo de atrito do solo para tensão efetiva ( $^\circ$ );

$\gamma_w$  é o peso específico da água (kN/m<sup>3</sup>);

$\gamma_s$  é o peso específico do solo (kN/m<sup>3</sup>);

$t$  = tempo;

$Z$  = profundidade do solo (m);

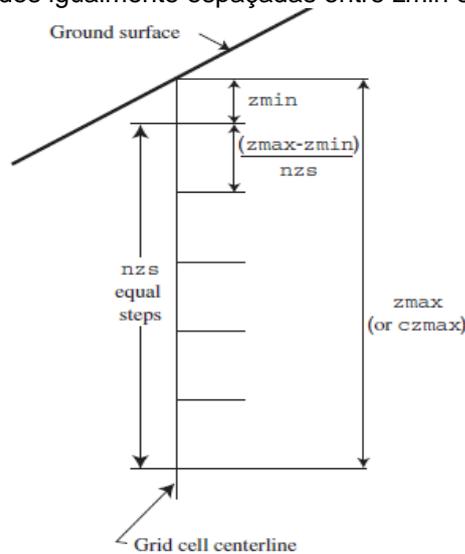
$\alpha$  = ângulo da encosta ( $^\circ$ );

$\psi$  = poropressão (kPa).

A poropressão ( $\psi(Z,t)$ ) na Equação 14 é obtida a partir das Equações 10 e 11, dependendo das condições modeladas.

Os Fatores de segurança ( $FS$ ) são calculados pela Equação 14 para poropressão transientes em múltiplas profundidades,  $Z$  (Figura 12). A ruptura é prevista quando  $FS < 1$  e a estabilidade é mantida onde  $FS \geq 1$ . Assim, a profundidade  $Z$ , onde o  $FS$  chega a 1 será a profundidade da iniciação do deslizamento. Esta profundidade de iniciação depende das propriedades do solo da duração e intensidade da chuva.

Figura 12 - Espaçamento vertical para calcular a infiltração e o fator de segurança. O usuário especifica o limite superior,  $z_{min}$ , o limite inferior,  $z_{max}$  e o número de etapas,  $n_z$ . Para evitar a divisão por zero, o limite superior,  $z_{min}$ , deve ser uma profundidade pequena e finita abaixo da superfície do solo. O programa TRIGRS calculará a poropressão e o fator de segurança em profundidades igualmente espaçadas entre  $z_{min}$  e  $z_{max}$ .



Fonte: Baum et al. (2008).

Na zona não saturada, é utilizado o princípio das tensões efetivas de Bishop (1959) e o parâmetro de tensão efetiva ( $\chi$ ) no cálculo do fator de segurança. A aproximação  $\chi = (\theta - \theta_r)/(\theta_s - \theta_r)$ , sugerida por Vanapalli e Fredlund (2000), representa uma forma simplificada da curva característica do solo e para calcular o fator de segurança acima do lençol freático, a sucção matricial ( $\psi(Z, t)$ ) é multiplicado por  $\chi$ .

### 3.1.3 Dados de entrada e de saída e principais limitações

A entrada dos dados no TRIGRS é feita, primeiramente, por meio do Modelo Digital do Terreno (MDT), a partir do qual são retiradas as informações de declividade (ângulo da encosta), área de contribuição e direção de fluxo. São necessários também: valores das propriedades geotécnicas (mecânicas e hidráulicas) do solo coesão efetiva do solo ( $c'$ ); peso específico do solo ( $\gamma_s$ ); profundidade máxima do solo ( $Z_{max}$ ); ângulo de atrito efetivo ( $\phi'$ ); altura inicial do nível d'água ( $d$ ); taxa de infiltração inicial ( $I_{ZLT}$ ); difusividade hidráulica ( $D_0$ ) e condutividade hidráulica saturada vertical ( $K_s$ ) e pluviométricas da área (tais como, o tempo inicial de um evento pluviométrico; a intensidade da chuva para cada evento e a duração acumulada de chuva no final de cada evento). São também necessárias algumas informações adicionais que

controlam o modelo, como, por exemplo, o número de intervalos (nzs) ao longo de uma profundidade de solo ( $Z_{max}$ ) (Figura 12) a partir dos quais são calculados os valores da carga de pressão ( $\psi$ ) e do Fator de Segurança ( $FS$ ). A Tabela 2 apresenta a síntese dos parâmetros gerais, geotécnicos e pluviométricos utilizados no modelo TRIGRS (modificado de Baum et al. (2008) e Vieira (2007)).

Tabela 2 - Parâmetros gerais, geotécnicos e pluviométricos utilizados no modelo TRIGRS

<b>PARÂMETROS GERAIS (Controle do Programa)</b>		
VARIÁVEIS	SÍMBOLO	VALOR (INTERVALO)
Número de intervalos (para cada intervalo o modelo calcula o FS e a carga de pressão)	nzs	$\geq 1$
Determina se as poropressões são calculadas pela Equação 9 ou Equação 10, para infiltração saturada. Se positivo, indica a quantidade de termos da série infinita da Equação 10.	mmax	<1 Equação 1 (IVERSON, 2000) $\geq 1$ Equação 2 (BAUM et al., 2002)
Um multiplicador que em combinação com o nper, determina quantos passos são usados na computação.	tx	$\geq 1$
<b>PARÂMETROS GEOTÉCNICOS (Mecânicos e Hidráulicos)</b>		
VARIÁVEIS	SÍMBOLO	VALOR (INTERVALO)
Coesão do solo efetiva (c)	cohesion	$\geq 0$ , se neg. valor em grade
Ângulo de atrito do solo ( $\Phi$ )	phi	$> 0$ , se neg. valor em grade
Peso específico do solo ( $\gamma_s$ )	uws	$> 0$ , se neg. valor em grade
Peso específico da água ( $\gamma_w$ )	uww	$> 0$ , se neg. valor em grade
Profundidade máxima do solo para calcular a poropressão e o fator de segurança ( $Z_{max}$ )	zmax	$z_{max} > z_{min}$ , se neg. valor em grade
Profundidade a partir da qual será calculada a poropressão e o fator de segurança ( $Z_{min}$ )	zmin	$> 0$ , tipicamente $0,001 \leq z_{min} \leq 0,1$
Coefficiente de permeabilidade vertical do solo ( $K_s$ )	k-sat	$> 0$ , se neg. valor em grade
Taxa de infiltração inicial ( $I_{zLT}$ )	rizero	$> 0$
Profundidade inicial do nível de água (d)	depth	$0 < depth \leq z_{max}$ , se neg. valor em grade
Difusividade hidráulica ( $D_0$ )	diffus	$diffus > z_{min}$ , se neg. valor em grade
Teor de umidade volumétrico do solo saturado ( $\theta_s$ )	Theta-sat	$> 0$
Teor de umidade volumétrica residual do solo ( $\theta_r$ )	Tetha-res	$tetha-sat > tetha-res > 0$
Parametro de ajuste de Gardner (1958) ( $\alpha$ )	Alpha	$> 0$ , se neg. análise saturada
<b>PARÂMETROS DA PRECIPITAÇÃO – EVENTO</b>		
Número de períodos com diferentes taxas de chuva durante a precipitação analisada.	nper	$\geq 1$
Tempo inicial do evento	t	$> 0$
Intensidade da chuva para cada evento ( $I_{nz}$ )	cri()	$> 0$
Duração acumulada no final de cada evento ( $t_n$ )	capt()	$capt(1)=0, capt(1) < capt(2) < \dots$

Fonte: modificado de Baum et al. (2008) e Vieira (2007)

Os valores gerados pelo MDT (declividade e direção de fluxo) são inseridos por meio de arquivos em formato asc. Os parâmetros geotécnicos do solo podem ser constantes para toda a área de estudo ou podem ser inseridos por meio de valores distribuídos obtidos por mapeamentos (em grade), por exemplo.

O Quadro 5 apresenta os dados de saída do modelo TRIGRS, entre eles estão a grade contendo o fator de segurança mínimo, a profundidade em que o fator de segurança mínimo ocorre e a poropressão dada nesta profundidade.

Quadro 5 - Arquivos de saída do modelo TRIGRS.

<b>NOME DO ARQUIVO</b>	<b>DESCRIÇÃO</b>
Trigrs_Log.txt	Arquivo com o registro das operações do modelo.
TRrunoffPer##XXX.asc	Grade contendo o escoamento em (m/s) calculado durante um período de chuva; ## designa o período calculado.
TRfs min_XXX.asc	Grade contendo o fator de segurança mínimo calculado para cada célula ao final de cada período de chuva.
TRZ_at_fs minXXX.asc	Grade contendo a profundidade do fator de segurança mínimo obtido em cada célula ao final de cada período de chuva.
TRp_at_fs minXXX.asc	Grade contendo a poro pressão na profundidade onde o fator segurança mínimo é calculado.
TRinfiltratPer##XXX.asc	Grade contendo a taxa de infiltração referente ao período de chuva considerado.
TRunzfluxTS##XXX.asc	Grade contendo o fluxo basal na região não saturada referente ao período de chuva considerado.
TRlist z p_fsXXX.txt	Arquivo com a lista da poropressão e fator de segurança calculados para as diferentes profundidades e tempos em cada célula.
TRwater depthXXX.asc	Grade contendo o registro da profundidade do lençol freático em cada célula.
TRwater elevXXX.asc	Grade contendo o registro da altura do lençol freático em cada célula.

Fonte: Modificado de Baum et al (2008).

Conforme Baum et al. (2008), as principais limitações do modelo TRIGRS devido às simplificações realizadas em suas bases teóricas são:

- a) É desconsiderado o papel da evapotranspiração, devido à sua baixa taxa durante eventos pluviométricos intensos;
- b) A mudança na poropressão no começo de uma precipitação é fortemente ligada a infiltração vertical unidimensional, que é o único modelo de infiltração que o TRIGRS considera em suas análises. Porém, em períodos de

precipitação mais extensos e nos períodos entre os eventos de precipitação o fluxo lateral da infiltração também pode ter grande influência sobre a mudança da poropressão. Assim, as análises modeladas pelo TRIGRS para períodos de precipitações tempestuosas podem não ser precisas. Além disso, a análise a de longos períodos não é adequada, pois o programa despreza o efeito da evapotranspiração;

- c) O modelo de estabilidade (Talude Infinito) assume como uniforme a profundidade e as propriedades físicas do solo, sendo aplicado somente para previsão de movimentos de massa do tipo escorregamento translacional raso (ruptura planar) induzidos por eventos de precipitação. Assim, o modelo adequa-se mais a situações onde as características favorecem a falha planar a uma relativamente pequena profundidade em relação as demais dimensões do material mobilizado;
- d) O programa não verifica unidades de medida consistentes entre os diferentes parâmetros de entrada. No entanto, fornecemos um programa utilitário simples chamado UnitConvert que pode ser usado para converter dados contidos em arquivos de grade de diferentes sistemas de unidades;
- e) A falta de informações sobre como as condições mudam, uma vez que um talude rompeu limita a capacidade do TRIGRS de prever o que acontece depois que o fator de segurança reduz abaixo de um (ruptura) em qualquer célula da grade, ou seja, para fins computacionais, as células são tratadas como se fossem inalteradas por rupturas durante uma determinada simulação - em outras palavras, o TRIGRS não modifica a espessura ou propriedades do solo quando  $FS < 1$ ;
- f) O modelo TRIGRS não é recomendado para uso em encostas mais íngremes do que  $70^\circ$ , pois para essas encostas a depender da profundidade, da coesão e de outros parâmetros, o FS (Equação 14) aumentará, em vez de diminuir;
- g) Apesar do TopoIndex e TRIGRS requererem um modelo digital do terreno (MDT) corrigido, livre de ruídos como as depressões de uma célula, os procedimentos para correção e pré-processamento de modelos digitais de elevação (preenchimento de depressões de células e cálculo de direções de fluxo) não estão incluídos no TRIGRS ou TopoIndex. Estes procedimentos devem ser feitos em software GIS moderno;

- h) O modelo desconsidera características geológicas do terreno (ex. xistosidades, fraturas, juntas, falhas, entre outros).

Mais detalhes acerca dos fundamentos teóricos e metodológicos do modelo TRIGRS podem ser encontrados no trabalho de Baum et al. (2008).

### 3.2 MÉTODOS DE VALIDAÇÃO DOS MODELOS DE SUSCETIBILIDADE

A validação dos resultados de modelos de previsão de deslizamento (mapas de suscetibilidade) pode ser realizada por diferentes métodos, como por exemplo  $LR_{class}$ , REC, curva ROC, curva de sucesso, entre outros.

A REC (Regression Error Characteristic) é caracterizada por fazer uma relação entre o nível máximo de erro permitido e a acurácia do cenário proposto. Este método foi utilizado por Bi & Bennett (2003) para validar seu modelo.

A curva ROC (Receiver Operating Characteristic) é bastante utilizada como modelo de validação pois considera em sua análise todos os cenários possíveis entre verdadeiros positivos, verdadeiros negativos, falsos positivos e falsos negativos. Bi & Bennet (2003) também utilizou esse método de validação, além de outros autores como Pereira et al. (2014), Sarkar et al. (2016), Marin et al. (2021) entre outros.

A curva sucesso baseia-se na validação de cada cenário de suscetibilidade, sustentado por um único fator de predisposição, a partir da divisão do inventário de escorregamentos em grupo – definição e o grupo – validação. A aplicação deste método pode ser vista nos trabalhos de Pereira (2009) e Pereira et al. (2014).

O método  $LR_{class}$ , utilizado neste trabalho, será explicado em mais detalhes no tópico a seguir.

#### 3.2.1 Validação dos Resultados - $LR_{CLASS}$

Park et. al (2013) apresentaram o conceito de  $LR_{class}$  - Landslide Ratio of each FS Class – que se pode traduzir como a taxa de deslizamento para cada classe de FS. Esta taxa de validação foi desenvolvida por Park et. al (2013) para validar a performance do modelo matemático TRIGRS na geração de mapas de suscetibilidade ao deslizamento para uma área localizada na cidade Seoul no ano de 2011. Este método pode ser utilizado para validar modelos de suscetibilidade onde o inventário

apresenta apenas o número e localização das ocorrências, dispensando características como as dimensões do movimento.

Pode-se calcular o  $LR_{class}$  para determinada faixa (classe) de fator de segurança a partir da Equação 15:

$$LR_{class} = \frac{c}{d} \quad (15)$$

Onde:  $c$  é a porcentagem dos deslizamentos contidos dentro da área da determinada classe de FS do modelo frente ao número total de eventos ocorridos na área de estudo; e  $d$  é a porcentagem da área da referida classe de FS do modelo frente a área total de estudo.

Então para obter um resultado quantitativo usa-se a porcentagem do  $LR_{class}$  para áreas instáveis de  $FS \leq 1$  ( $\%LR_{FS \leq 1}$ ), que é dada pela divisão entre o  $LR_{FS \leq 1}$  pelo somatório dos demais  $LR_{class}$  de todas as classes de FS, conforme pode ser observado na Equação 16.

$$\% LR_{FS \leq 1} = \frac{LR_{FS \leq 1}}{\sum LR_{class}} \quad (16)$$

Dessa forma, quanto maior a porcentagem de ocorrências localizadas dentro da área classificada como instável ( $FS \leq 1$ ) pelo mapa de suscetibilidade gerado pelo modelo, maior será a  $\% LR_{FS \leq 1}$ . Pela metodologia, pode-se observar que a  $\% LR_{FS \leq 1}$  aumenta não somente com o número de eventos ocorridos dentro da área instável ( $FS \leq 1$ ), mas também quanto menor for o tamanho relativo desta área.

Park et al. (2013) apresenta os valores dos parâmetros utilizados da sua metodologia de validação na Tabela 3.

Tabela 3 - Resultados de modelo TRIGRS e validação por Park et al. (2013).

Classe de FS	Pontos de deslizamento	% de pontos de deslizamentos (c) = a/b	% da área do modelo (d)	$LR_{class}$ (e) = c/d	$\%LR_{class}$ =e/f
FS $\leq$ 1,0	49	33,33 %	2,99 %	11,14	<b>70,30 %</b>
1,0 < FS $\leq$ 1,2	59	40,14 %	13,68 %	2,93	18,51 %
		.			
		.			
		.			
2,0 < FS	6	4,08 %	31,39 %	0,13	0,82 %
Somatório	147 (b)	100 %	100 %	15,85 (f)	100 %

Fonte: Adaptado de Park et al. (2013)

De acordo com os resultados encontrados por Park et al. (2013) para sua área de estudo, o valor da  $\% LR_{FS \leq 1}$  foi de 70,30 %, o que os autores consideraram como bom resultado. Em outras palavras, caso haja um deslizamento dentro da área de estudo há 70,30 % de chance deste, ocorrer dentro das áreas instáveis (FS<1) previstas no mapa de suscetibilidade gerado pelo modelo TRIGRS.

A Tabela 4 apresenta uma síntese dos resultados de  $\% LR_{FS \leq 1}$  calculados por outros autores que utilizaram esta metodologia na validação de seus resultados.

Tabela 4 - Resultados das validações com  $\%LR_{CLASS}$ .

<b>Autor(es)</b>	<b><math>\% LR_{FS &lt; 1}</math></b>
Park et al. (2013)	70,30 %
Viet et al. (2017)	75,87 %
Tran et al. (2017)	64,18 %
Marin et al. (2021)	97,45 %

Fonte: Autora.

### 3.3 TRABALHOS REALIZADOS

O modelo matemático TRIGRS já foi utilizado anteriormente pesquisas nacionais e internacionais onde obtiveram um relativo sucesso na previsão dos deslizamentos translacionais rasos utilizando o modelo. A Tabela 5 apresenta o resumo de alguns desses trabalhos encontrados na literatura.

Tabela 5 - Resumos de Trabalhos anteriores que utilizaram o Modelos TRIGRS

Autor(es)	Local de aplicação	Modelo – TRIGRS Faixa de FS	Parâmetros geotécnicos e hidrológicos	Área	Evento pluviométrico	Método de validação	Conclusão
Chien-Yuan et al. (2005)	Tenliao landslide, Taipei County, Taiwan	Os autores classificaram os fatores de segurança (FS) calculados pelo TRIGRS em quatro classes a) $FS \leq 1,0$ ; b) FS entre 1,0 – 1,2; c) $FS > 1,2$ .	A área de estudo foi dividida em 4, onde os parâmetros geotécnicos foram atribuídos. Ao longo de toda área de estudo foram feitas 10 perfurações rotativas, onde pode-se obter peso específico, coesão e ângulo de atrito. As áreas ou camadas onde não houveram estudos, teve suas características geotécnicas inferidas a partir da variação dos parâmetros de estudos próximos.	0.1 km <sup>2</sup>	790 mm ao longo de 5 dias, chegando a 45 mm/h no momento mais intenso.	Comparação das áreas instáveis do modelo com as cicatrizes mapeadas em campo.	- Foi observado em campo que as cicatrizes das ocorrências coincidiram com as áreas mapeadas como instáveis pelo modelo TRIGRS
Salciarini et al. (2006)	Montanhas dos Apeninos, Úmbria, Itália	Os autores classificaram os fatores de segurança (FS) calculados pelo TRIGRS em duas classes a) $FS \leq 1,0$ ; b) $FS > 1,0$	Parâmetros obtidos através da literatura e considerados constantes em toda área analisada. Os valores utilizados foram definidos por meio de estudo paramétrico. Em seguida, realizou-se análises considerando a especialização dos parâmetros por meio de cinco zonas de propriedades distintas baseadas na litologia.	100 km <sup>2</sup>	41 mm em 16 h	Comparação da área considerada instável ( $FS \leq 1,0$ ) com o mapa de inventário de deslizamentos	- De modo geral, comparando os resultados do TRIGRS com o mapa de inventário de deslizamentos, observou-se 80% de concordância entre os deslizamentos previstos e observados. - Os cenários elaborados evidenciam que as áreas classificadas como instáveis mantêm uma forte relação com a topografia, mas essa não é o único fator preponderante. - Os bons resultados dependem de um modelo digital de alta resolução, conhecimento da espessura do solo, altura inicial do nível de água e distribuição espacial das propriedades dos materiais. - O TRIGRS demonstrou ser útil para avaliações preliminares de estabilidade de taludes em grandes áreas, mas não pode fornecer avaliações de estabilidade para locais específicos porque isso requer estudos mais detalhados.

Godt et al. (2008)	Puget Lowland em Seattle, Washington, Estados Unidos.	Os autores classificaram os fatores de segurança (FS) calculados pelo TRIGRS em quatro classes a) $FS \leq 1,0$ ; b) FS entre 1,0 – 1,1; c) FS entre 1,1 – 1,2; d) $FS > 1,2$ .	Foram definidas três zonas de propriedade com base no mapeamento geológico da área. As propriedades dos materiais foram obtidas da literatura em pesquisas realizadas na área de estudo ou nas proximidades.	3,0 km <sup>2</sup>	1,5 mm/h ao longo de 36 h (54 mm)	Aplicação da metodologia Receiver Operator Characteristic (ROC)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- A comparação do modelo TRIGRS com modelos estáticos, mostra que o TRIGRS tende a subestimar a área considerada instável (<math>FS \leq 1,0</math>) em relação aos modelos estáticos.</li> <li>- Consequentemente, os resultados do modelo TRIGRS são mais precisos em comparação aos modelos estáticos.</li> </ul>
Baum, Godt e Savage (2010)	Puget Lowland em Seattle, Washington, Estados Unidos.	Os autores classificaram os fatores de segurança (FS) calculados pelo TRIGRS em quatro classes a) $FS \leq 1,0$ ; b) FS entre 1,0 – 1,1; c) FS entre 1,1 – 1,2; d) $FS > 1,2$ .	Foram definidas três zonas de propriedade com base no mapeamento geológico da área. As propriedades dos materiais foram obtidas da literatura em pesquisas realizadas dentro ou próximas da área de estudo.	3,0 km <sup>2</sup>	4,5 mm/h ao longo de 24h (108 mm)	Aplicação da metodologia Receiver Operator Characteristic (ROC)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- A utilização do modelo não saturado atenuou e atrasou a resposta da pressão de poros induzida pela chuva. Essa atenuação resultou em estimativas de tempo mais realistas para o início da instabilidade do talude;</li> <li>- O modelo saturado desenvolveu poro pressão positiva muito cedo. Além disso, a área considerada instável se estende para a maior parte da área de encostas íngremes em pouco tempo;</li> <li>- O modelo não saturado apresentou acurácia de 0,88 e o modelo saturado apresentou acurácia de 0,72.</li> </ul>
Vieira et al. (2010)	Bacia hidrográfica da Copebrás, Cubatão-(SP)	Os autores classificaram os fatores de segurança (FS) calculados pelo TRIGRS em cinco classes a) até 0.8; b) entre 0.8 - 1.0; c) entre 1.0 - 1.2; d) entre 1.2 - 1.5; e) acima de 1.5	Considerados constantes em toda área em dois cenários distintos. Cenário A: utilizando parâmetros saturados; Cenário B: utilizando parâmetros não saturado (umidade natural).	3,6 km <sup>2</sup>	308 mm em 18h	Foram aplicados dois índices: Concentração de Cicatrizes (CC) e Potencial de Escorregamento (PE)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Os resultados mostraram boa concordância entre os cenários simulados e o mapa de cicatrizes;</li> <li>- Em áreas instáveis (<math>FS \leq 1</math>), os valores de CC ultrapassaram 50% em todos os cenários;</li> <li>- O aumento da espessura do solo de 1m para 2m aumentou o percentual de áreas instáveis em cerca de 10%;</li> <li>- As áreas classificadas como instáveis (<math>FS \leq 1</math>) estão localizadas em altitudes acima de 400 m e encostas com inclinação <math>&gt; 40^\circ</math>;</li> <li>- O aumento da coesão do solo, de 1 para 6 kPa, causa alterações significativas no FS, diminuindo a % de área instável para zero em alguns cenários.</li> </ul>

Kin et al. (2013)	Bonghwa, Coréia do Sul	Os autores classificaram os fatores de segurança (FS) calculados pelo TRIGRS em seis classes a) até 0.8; b) entre 0.8 – 0.9; c) entre 0.9 - 1.0; d) entre 1.0 - 1.1; e) entre 1.1 - 1.2 f) acima de 1.2	Parâmetros geotécnicos obtidos em campo	0,014 km <sup>2</sup>	228mm em 48 horas	Comparação entre as áreas instáveis dos modelos com os registros de ocorrência dos deslizamentos	-Os resultados de previsão do modelo foram considerados bastantes satisfatórios, porém os autores comentam que houveram diferenças significativas entre os resultados de previsão de áreas instáveis obtidos pelo modelo revisto e a versão original do TRIGRS
Park et al. (2013)	Montanha Woomyeon, Seul, Coréia do Sul.	Os autores classificaram os fatores de segurança (FS) calculados pelo TRIGRS em sete classes: a) FS ≤ 1,0; b) FS entre 1,0 – 1,2; c) FS entre 1,2 – 1,4; d) FS entre 1,4 – 1,6; e) FS entre 1,6 – 1,8; f) 1,8 – 2,0; g) FS > 2,0.	Os parâmetros foram determinados por meio da coleta de amostras <i>in situ</i> . Em seguida, com base no banco de dados criado, foram utilizados os valores médios, considerados constantes para toda área.	29,0 Km <sup>2</sup>	Precipitação acumulada de 350 mm, dos quais 147mm caiu em 2 h	Aplicação da metodologia LR <sub>Class</sub>	- As áreas consideradas instáveis (FS≤1,0) expandiram-se progressivamente quando as chuvas se tornaram mais intensas; - O percentual de acerto (LR <sub>FS&lt;1</sub> ) é 70,30%; - Os resultados mostram concordância significativa entre o mapa de suscetibilidade e o inventario de deslizamentos do ponto de vista quantitativo.
Listo e Vieira (2015)	Bacia da Guaxinduba em Caraguatatuba – SP	Os autores classificaram os fatores de segurança (FS) calculados pelo TRIGRS em cinco classes a) até 0.8; b) entre 0.8 - 1.0; c) entre 1.0 - 1.2; d) entre 1.2 - 1.5; e) acima de 1.5	Considerados constantes em toda área. Cenário A: Utilizando parâmetros obtidos na literatura (c'=1 kPa; phi': 34°); Cenário B: Utilizando parâmetros obtidos por meio de ensaios utilizando solos da área de estudo (c'=4 kPa; phi': 34°);	24,0 km <sup>2</sup>	600 mm em 48h	Foram aplicados dois índices: Concentração de Cicatrizes (CC) e Potencial de Escorregamento (PE).	- O Cenário A: O TRIGRS classificou 72% da área da bacia como instável, obtendo precisão de 67%.
Viet et al. (2017)	Montanha Woomyeon, Seul, Coréia do Sul.	Os autores classificaram os fatores de segurança (FS) calculados pelo TRIGRS em quatro classes: a) FS ≤ 1,0; b) FS entre 1,00 – 1,25; c) FS entre 1,25 – 1,50; d) FS > 1,50	Os parâmetros foram especializados através de 15 zonas que foram definidas com base nas propriedades do solo.	29,0 Km <sup>2</sup>	Aproximadamente 410 mm distribuídos de maneira não uniforme em 24h	Aplicação da metodologia LR <sub>Class</sub>	- Entre os 140 locais deslizamentos observados, o percentual de acerto (LR <sub>FS&lt;1</sub> ) foi de aproximadamente 76%; - A avaliação da resolução do MDT revelou que quanto maior a resolução, mais precisos são os resultados; - Os resultados usando um modelo para determinar a profundidade do solo mostraram uma melhoria significativa em relação ao estudo de Park, Nikhil e Lee (2013) que adotou uma espessura de solo uniforme.

Ávila et al. (2021)	Córrego Bengalar, São José dos Campos-SP, Brasil	Os autores classificaram os fatores de segurança (FS) calculados pelo TRIGRS em cinco classes: a) até 0.8; b) entre 0.8 - 1.0; c) entre 1.0 - 1.2; d) entre 1.2 - 1.5; e) acima de 1.5	Considerados constantes em toda área. As análises utilizando o TRIGRS considerou 2 cenários alterando as condições de chuva. Cenário 1: considerando chuvas de curto prazo; Cenário 2: considerando chuvas de longo prazo.	11,90 km <sup>2</sup>	Cenário 1: 80 mm em 15h / Cenário 2: 258,46 mm em 21 dias	Metodologia Receiver Operator Characteristic (ROC) Especificament e o índice Area Under the Curve (AUC)	- O Cenário 1 do TRIGRS classificou 4,5% de toda a bacia como instável, obtendo precisão de 72%; - O Cenário 2 do TRIGRS classificou 2,9% de toda a bacia como instável, obtendo precisão de 71%; - O TRIGRS apresentou maior precisão, indicando que os modelos transientes são mais eficientes.
Marin et al. (2021)	Bacia hidrográfica La Liboriana, Salgar, Colombia	Os autores classificaram os fatores de segurança (FS) calculados pelo TRIGRS, em três classes: a) $FS \leq 1,0$ ; b) FS entre 1,0-1.3; c) $FS > 1.3$	As propriedades iniciais do solo foram selecionadas através da literatura com base na descrição geológica da área, dividida em duas zonas. Em seguida, os resultados são comparados com o inventário, até se obter o melhor ajuste.	59,0 Km <sup>2</sup>	16 mm/h ao longo de 18h (288 mm)	Aplicação das metodologias Receiver Operator Characteristic (ROC) e LR <sub>Class</sub>	- Os resultados mostraram que a retro-análise usando eventos de deslizamento pode ser uma boa alternativa para definir os parâmetros de entrada para modelos de base física; - Apresentaram desempenho moderadamente bom considerando as altas incertezas das propriedades mecânicas e hidráulicas do solo; - AUC = 0,807; %LR <sub>FS&lt;1</sub> = 97,45.

Fonte: Autora.

### 3.4 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Este capítulo teve como objetivo apresentar os principais conceitos acerca do mapeamento de suscetibilidade a deslizamento, do modelo matemático utilizado, TRIGRS, com seu modelo hidrológico e de estabilidade, características e limitações. Além do método de validação utilizado, LR<sub>CLASS</sub>, e dos trabalhos da literatura nacional e internacional realizados dentro deste tema.

## 4 CARACTERIZAÇÃO GERAL DAS ÁREAS DE ESTUDO

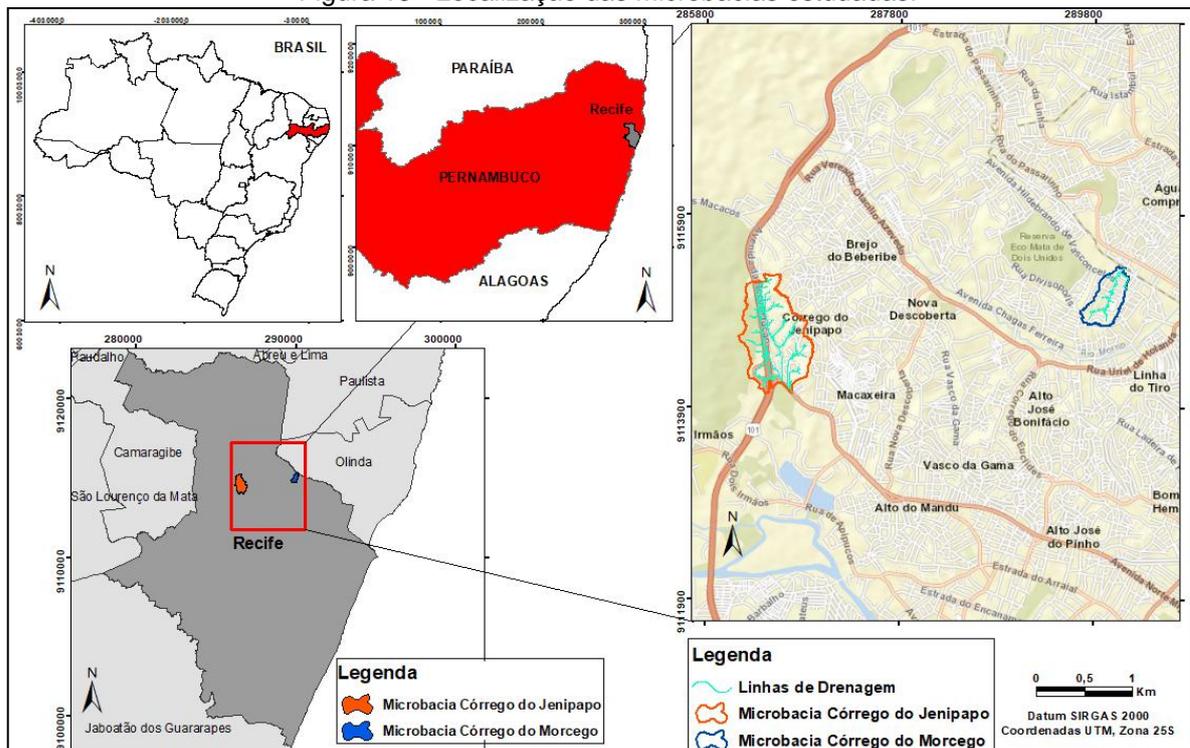
Nesse capítulo será apresentada a localização das áreas de estudo juntamente com a descrição de aspectos de cunho geológico, geomorfológico, climatológico e de modelos de ocupação, que possam contribuir para o melhor entendimento dos fatores controladores e dos mecânicos de ruptura dos deslizamentos translacionais rasos.

### 4.1 LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO

As áreas de estudo desta pesquisa trata-se de duas microbacias hidrográficas localizadas na zona norte da cidade do Recife, a microbacia 1, tributária do rio Beberibe, apresenta aproximadamente 0,17 km<sup>2</sup> e está situada no bairro de Dois Unidos e a microbacia 2, tributária do rio Capibaribe, apresenta aproximadamente 0,60 km<sup>2</sup> e está situada entre os bairros Córrego do Jenipapo e Dois Irmãos

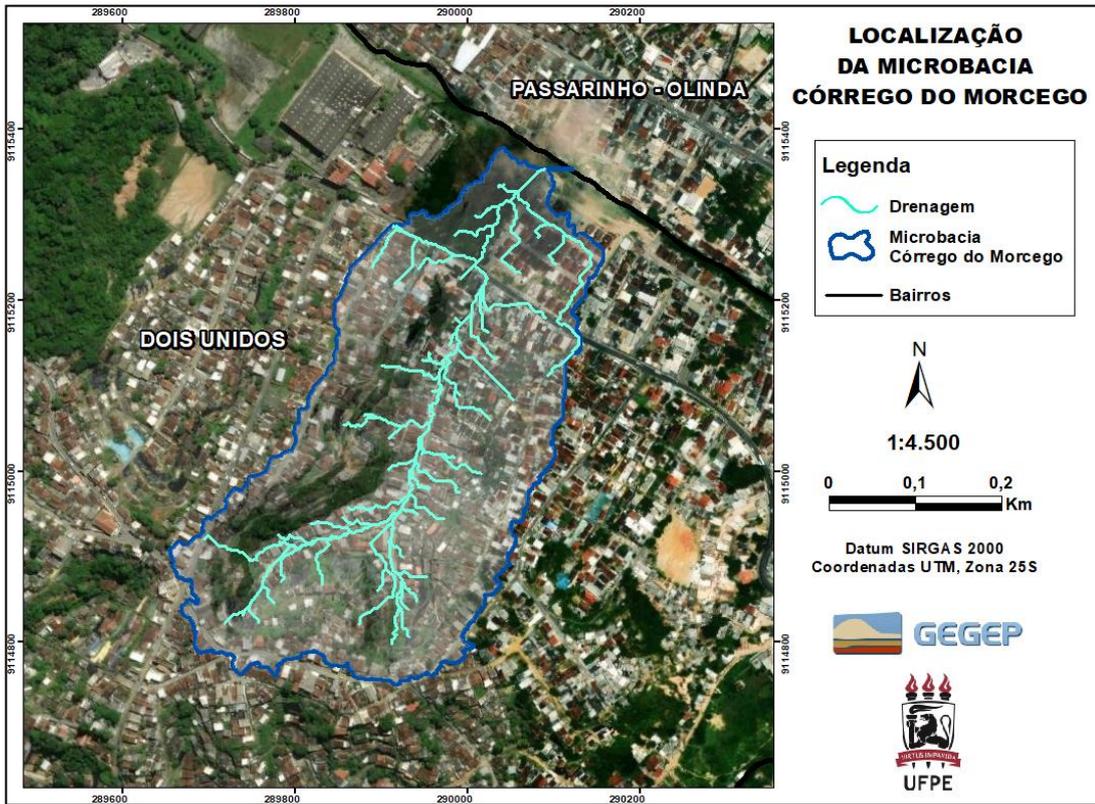
As microbacias 1 e 2 são nomeadas, respectivamente, de microbacia Córrego do Morcego e microbacia Córrego do Jenipapo, em função da setorização das comunidades de interesse social da cidade do Recife. As Figura 13, Figura 14 e Figura 15 apresentam a localização das duas microbacias analisadas.

Figura 13 - Localização das microbacias estudadas.



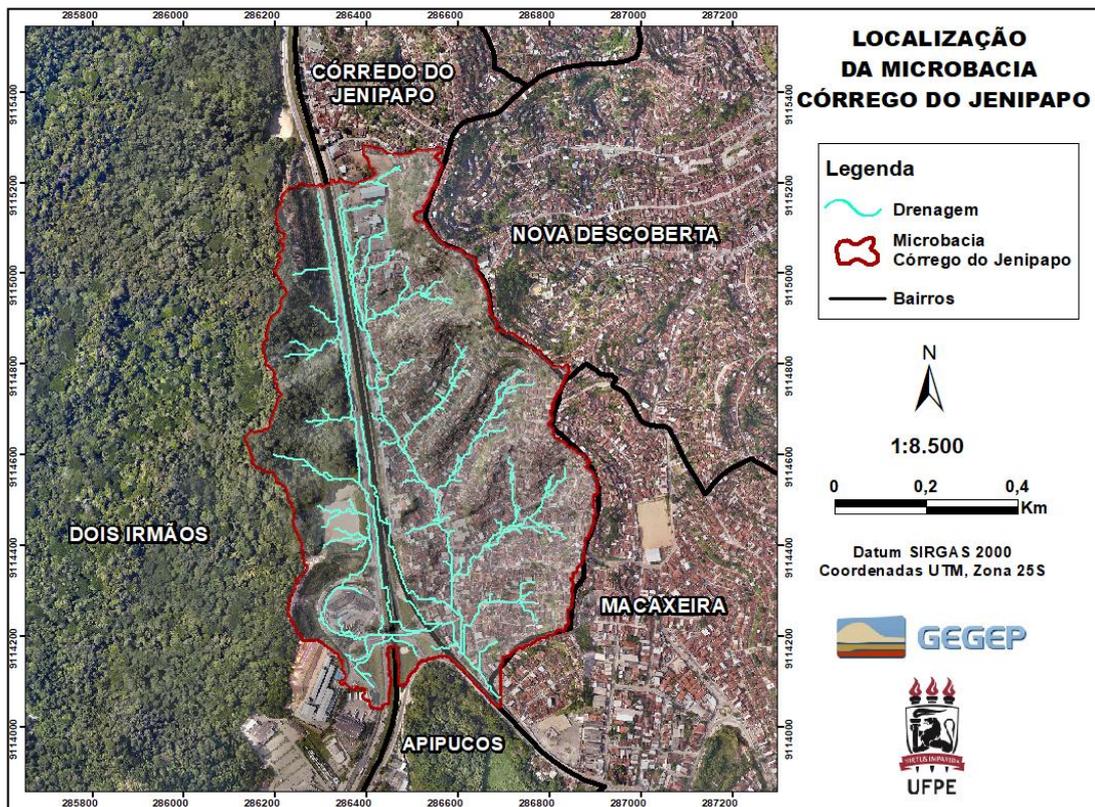
Fonte: Autora.

Figura 14 - Localização da microbacia Córrego do Morcego.



Fonte: Autora.

Figura 15 - Localização da microbacia Córrego do Jenipapo.



Fonte: Autora.

## 4.2 ASPECTOS CLIMÁTICOS

Segundo a classificação climática de Koppen-Geiger, a cidade de Recife possui clima tropical úmido e é classificada como “As”. Esta classificação divide os climas em cinco grandes grupos (ordenados de A a E) e vários subgrupos. A primeira letra em maiúsculo, indica as características gerais do clima, e "A" corresponde a um clima tropical. A segunda letra, escrita em minúsculo, determina o tipo de clima dentro do grupo, denotando a especificidade do sistema pluviométrico, e “s” corresponde ao clima em savana (Kottek et al., 2006). Já a temperatura média anual de 25,8°C (Climate-data org, 2015).

As chuvas atuam como principal agente físico na deflagração de deslizamentos no Brasil. Os grandes acidentes relacionados a esses processos ocorreram durante períodos chuvosos, que variam de região para região. O município de Recife apresenta um período bem definido de chuvas (outono – inverno), alternado por um período de menor pluviometria (primavera - verão).

A Figura 16 e Figura 17 apresentam a localização dos pluviômetros mais próximos das microbacias Córrego do Morcego e Córrego do Jenipapo, respectivamente. Os dados de precipitação utilizados no estudo da pluviosidade das áreas e na posterior análise de suscetibilidade e estabilidade foram obtidos a partir destes pluviômetros.

Figura 16 - Posição dos pluviômetros em relação a microbacia Córrego do Morcego.



Fonte: Autora.

Figura 17 - Posição dos pluviômetros em relação a microbacia Córrego do Jenipapo.



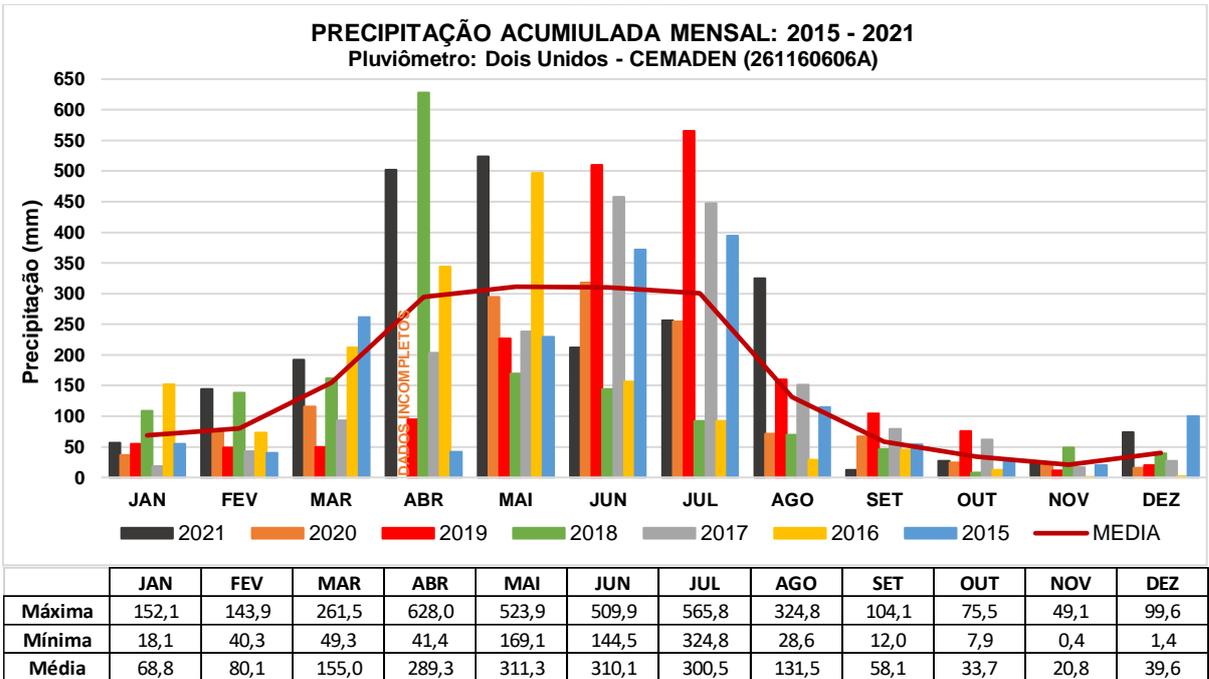
Fonte: Autora.

A Figura 18 apresenta os dados de precipitação do período de 2015 a 2021 do pluviômetro Dois Unidos – CEMADEN (261160606A), localizado no bairro Dois Unidos onde a microbacia Córrego do Morcego está inserida.

Posteriormente, a Figura 19 apresenta os dados de precipitação do período de 2015 a 2021 do pluviômetro Córrego do Jenipapo – CEMADEN (261160608A), localizado no bairro Córrego do Jenipapo onde parte da microbacia Córrego do Jenipapo está inserida.

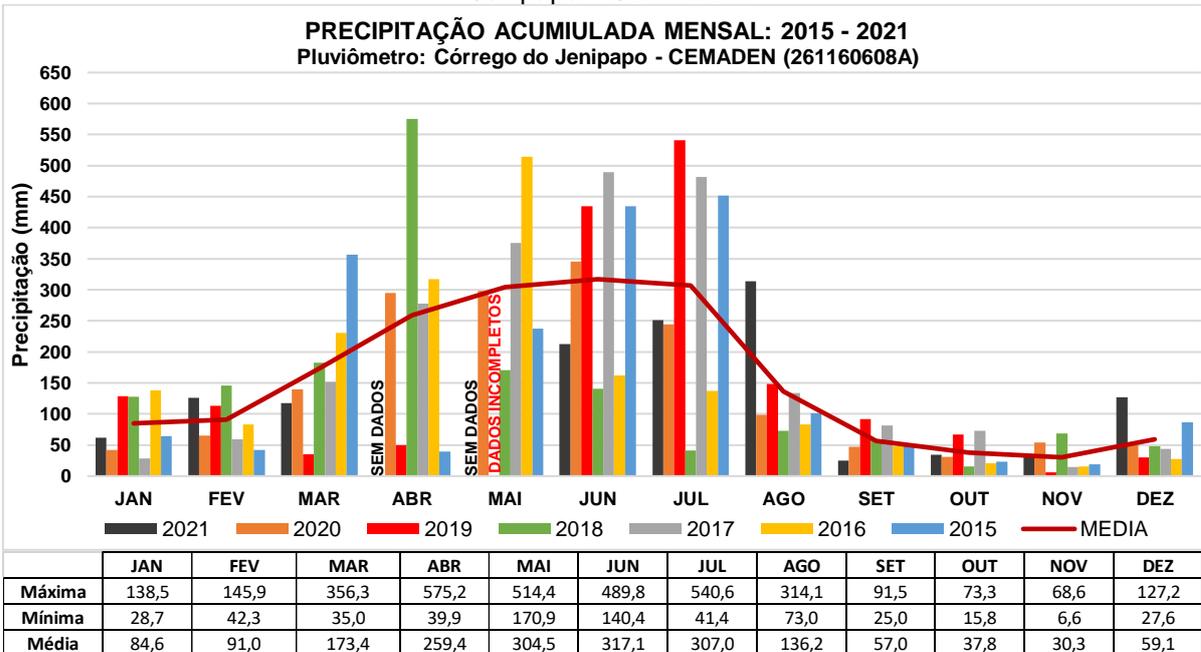
O registro dos dados pluviométricos e medição de umidade do solo da PCD 1 (localizada a aproximadamente 400m da microbacia Córrego do Morcego) e da PCD 2 (localizada a aproximadamente 300m da microbacia Córrego do Jenipapo) tiveram início em maio de 2019, data de instalação dos equipamentos pelo CEMADEN (Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais), esses dados foram analisados no item 6.3 e utilizados para análises de suscetibilidade descritas no item 5.5.

Figura 18 - Precipitação acumulada mensal e média dos anos 2015 e 2021. Pluviômetro: Dois Unidos – CEMADEN.



Fonte: Autora.

Figura 19 - Precipitação acumulada mensal e média dos anos 2015 a 2021. Pluviômetro: Córrego do Jenipapo – CEMADEN.



Fonte: Autora.

Observa-se que o período chuvoso, nas duas áreas estudadas, está compreendido entre os meses de abril e julho, sendo comum nesses meses precipitações acima de 300mm, conseqüentemente nesse período é observada maior ocorrência de movimentos gravitacionais de massa na cidade do Recife, onde estão localizados os bairros Dois Unidos, Córrego do Jenipapo e Dois Irmãos. Os dados também demonstram que em alguns anos, no período de janeiro a março pode ocorrer chuvas significativas, na ordem de 150mm mensais.

Os índices pluviométricos, ao longo do tempo, têm sido estudados relacionando-se com os deslizamentos, para prever temporariamente a ocorrência de eventos. Isso tem levado alguns pesquisadores a tentar estabelecer algumas relações empíricas, probabilísticas ou físico-matemáticas entre os parâmetros.

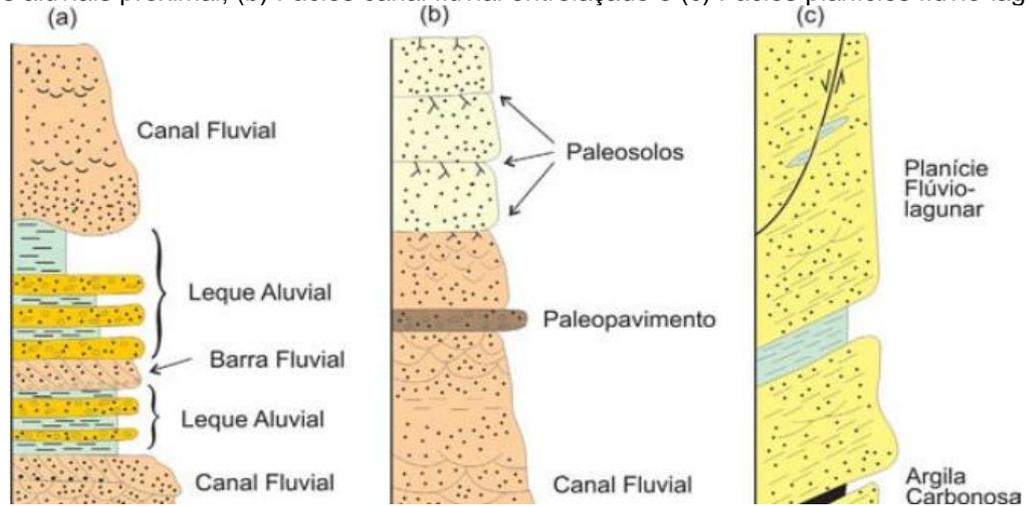
### 4.3 ASPECTOS GEOLÓGICOS

A unidade geológica, Formação Barreiras é a mais importante nas encostas da cidade do Recife e constitui a principal grupo geológico das áreas estudadas. O nome Formação Barreiras foi proposto por Kegel (1957) e adotado por diversos autores. Este tipo de formação é composto por sedimentos de diferentes granulometrias, caracterizados por uma mistura de areias e argilas, com horizontes de seixos sub-horizontais. Ocorre afloramentos do estado do Rio de Janeiro ao estado do Amapá. A deposição desta formação esteve associada a eventos cenozoicos de natureza climática e/ou tectônica, ocorridos no final do Terciário (Plioceno) há cerca de 2 milhões de anos.

De acordo com Alheiros & Lima Filho (1991), a Formação Barreiras associada aos processos fluviais, apresenta três sistemas deposicionais distintos, denominados fácies, são elas: leque aluvial proximal, leque distal/ planície flúvio-lagunar e canal fluvial (Figura 20).

Os seguimentos do fácies leque aluvial proximal é de granulação grossa, com má distribuição granulométrica e aparece como areias grossas e conglomeráticas que foram transportadas por tração, recobertas por argilas e siltes transportados por suspensão, a estrutura final desses depósitos é a de camadas arenosas intercaladas a camadas argilosas, comuns nos cortes dos morros da Zona Norte do Recife.

Figura 20 - Esquema de seções colunares da Formação Barreiras no nordeste brasileiro. (a) Fácies de leques aluviais proximal; (b) Fácies canal fluvial entrelaçado e (c) Fácies planícies flúvio-lagunar.



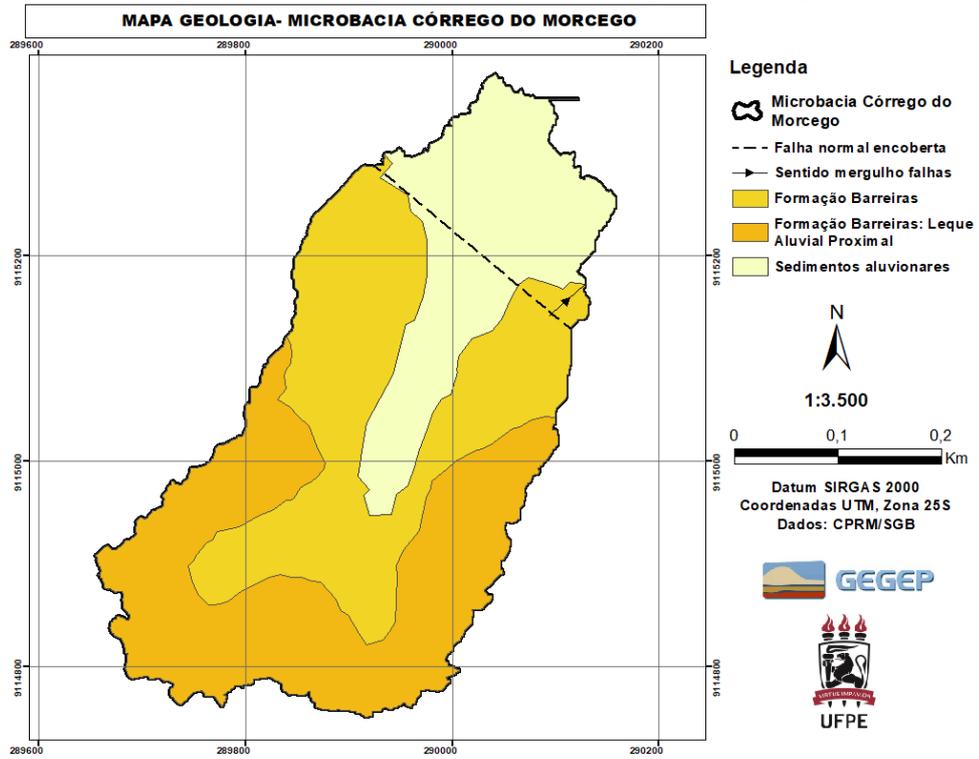
Fonte: Alheiros & Lima Filho (1991).

O fácies canal fluvial entrelaçado é caracterizado por uma granulometria arenosa, constituída por areia quartzosa creme com grãos de feldspato, muito suscetível a processos erosivos. Essas duas fácies têm seu conteúdo de argila formado principalmente pela argilização dos feldspatos que constituem grande parte dos grãos de areia. Nos sedimentos do fácies leque distal ou planície flúvio-lagunar ocorre estratificação horizontal com intercalação de camadas arenosas e argilosas. A camada arenosa é composta por areia quartzosa com pouco feldspato, de granulometria fina a média, com boa seleção e grãos subarredados a subangulosos. (ALHEIROS & LIMA FILHO, 1991).

É na Formação Barreiras que se observa a maior incidência de casos de deslizamentos e erosão na RMR (Região metropolitana de Recife). Mais detalhes sobre essa formação tão importante na costa brasileira são encontrados nos estudos de Alheiros (1998), Coutinho e Severo (2009), de Paula (2008) e Rossetti et al. (2013).

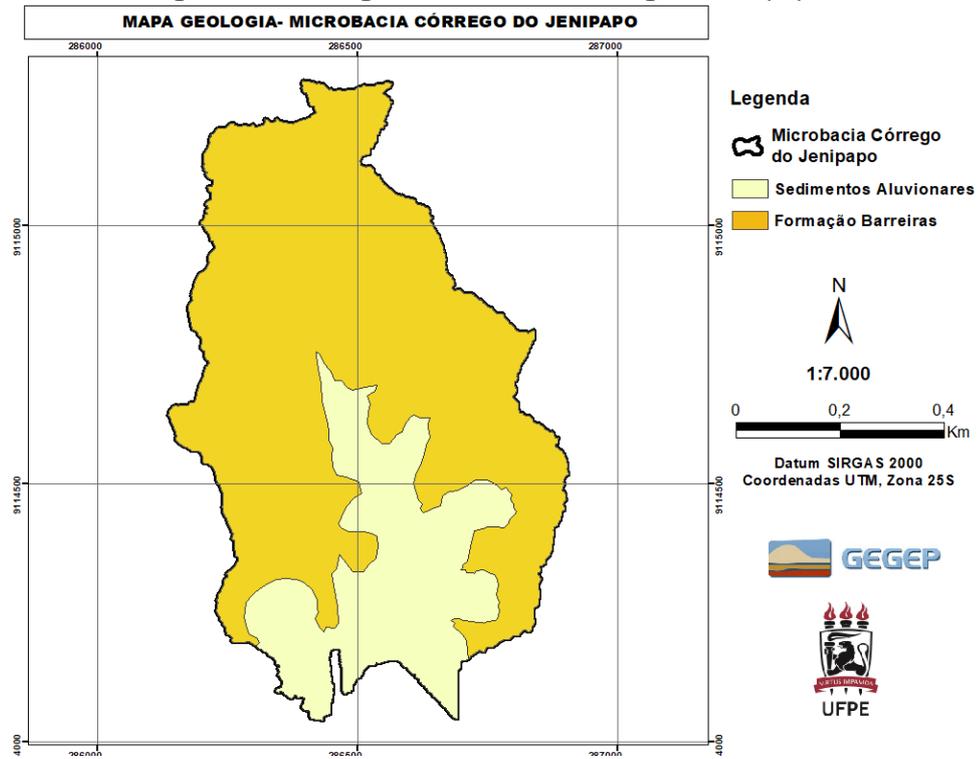
Nas duas microbacias, objetos de estudo desse trabalho, a geologia predominante é a Formação Barreiras, conforme os mapas de geologia apresentados na Figura 21 e Figura 22. Na microbacia Córrego do Morcego observa-se através do mapa de geologia que existe uma falha encoberta com ângulo de mergulho sentido NE. Através de visitas de campo, acompanhadas de um geólogo, foi constatado que as encostas localizadas nas microbacias estudadas estão dentro do fácies de leques aluviais proximais, formadas por depósitos pouco a moderadamente consolidados de areia, silte, argila e cascalho originários de argilito arenoso e arenito conglomeráticos.

Figura 21 - Geologia da microbacia Córrego do Morcego.



Fonte: Autora.

Figura 22 - Geologia da microbacia Córrego do Jenipapo.



Fonte: GEGEP (2022).

Da perspectiva da geologia de engenharia, a intercalação das camadas nos sedimentos das encostas da zona norte do Recife resulta em menor suscetibilidade à erosão do que nas encostas da zona sul, onde o solo é mais friável (MELO e MENEZES, 1987). Este fato está relacionado com a ocorrência de voçorocas nas encostas da zona Sul, de horizontes mais arenosos, e com deslizamentos mais frequentes nas encostas da zona norte, de sedimentos mais argilosos.

#### 4.4 ASPECTOS MORFOLÓGICOS

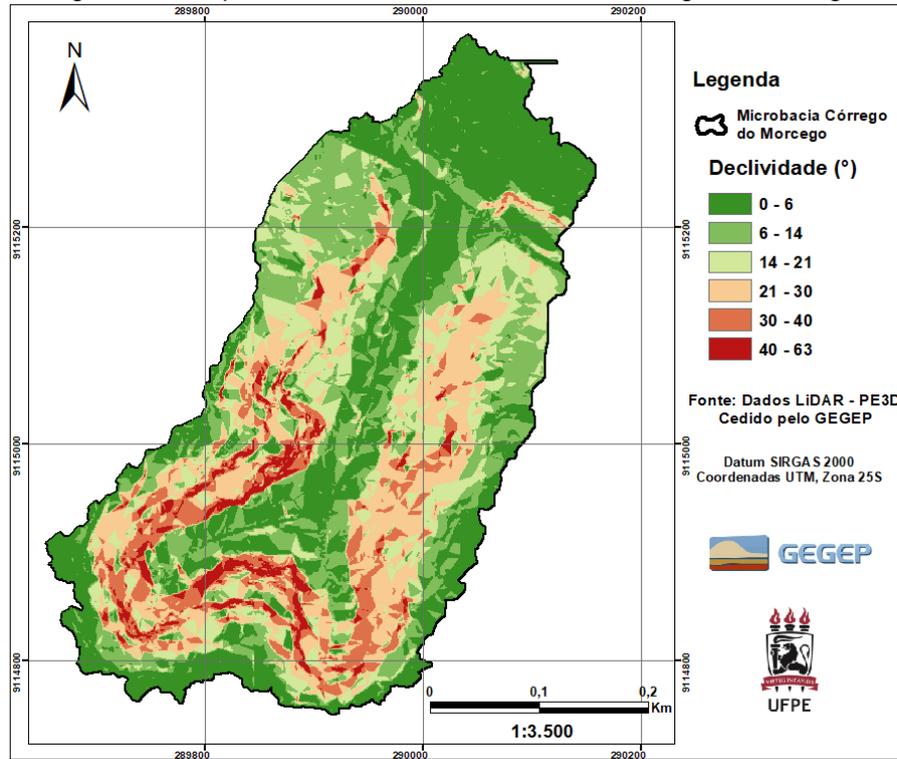
O relevo da cidade do Recife, onde as microbacias estão localizadas, caracteriza-se, principalmente, por morros e planícies. com predominância das unidades geomorfológicas: Tabuleiros Barreiras e Planícies Aluvionares.

Nas áreas de estudos, de acordo com o observado em visitas de campo, as encostas são predominantemente retilíneas e côncavas na curvatura vertical e apresentam escoamento retificado (antrópico). A curvatura côncava das encostas pode favorecer a convergência de fluxos, criando condições mais críticas para a estabilidade. As encostas côncavas e retilíneas, são mais suscetíveis aos processos de deslizamento translacional, que envolvem camadas de solo mais superficiais (AUGUSTO FILHO & VIGILI, J. C., 1998).

Além da curvatura das encostas destaca-se também a sua declividade e altura, características importantes na movimentação do material. De forma geral, as encostas das microbacias analisadas apresentam declividade entre 25° e 60° (Figura 23 e Figura 24) e altura média de 30 metros para as encostas da microbacia Córrego do Morcego (Figura 25) e 40 metros para as encostas da microbacia Córrego no Jenipapo (Figura 26). Percebe-se que as encostas localizadas nas áreas de estudo apresentam características físicas favoráveis a ocorrências de deslizamentos translacionais, que são: declividades maiores que 30°, curvaturas retilíneas e grandes amplitudes.

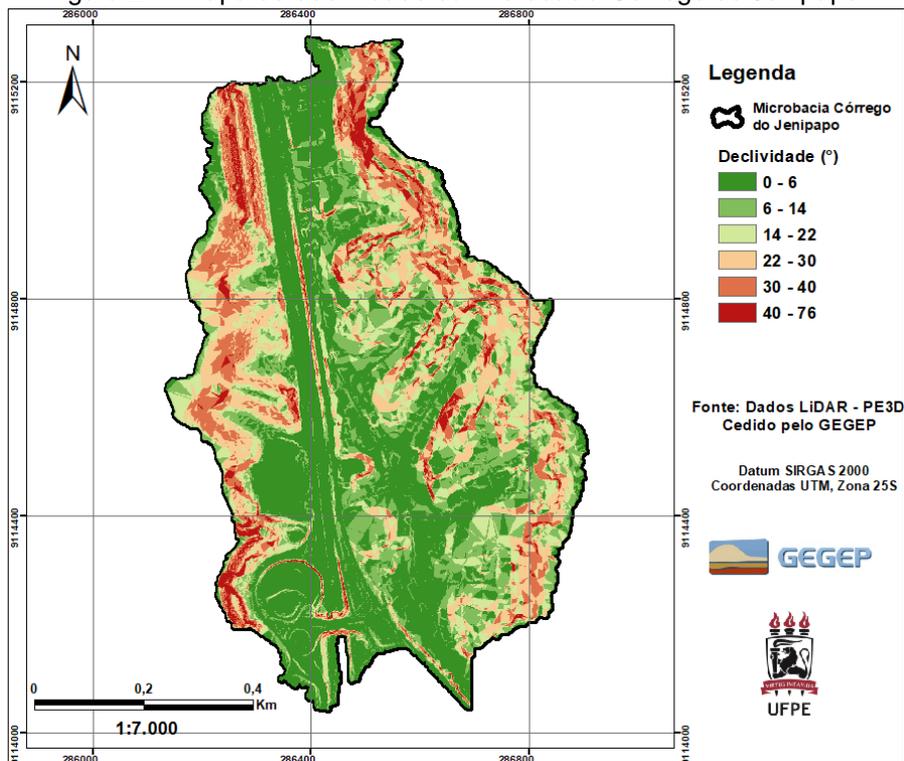
A altura e a declividade influenciam na energia do movimento das águas, no fator de segurança das encostas e em consequência, no volume de massa de terra mobilizado nestes fenômenos. Quanto maior a declividade maior a parcela de peso das terras na direção do talude, provocando maiores tensões de cisalhamento, e consequentemente reduzindo o FS a deslizamentos.

Figura 23 - Mapa de declividade da microbacia Córrego do Morcego.



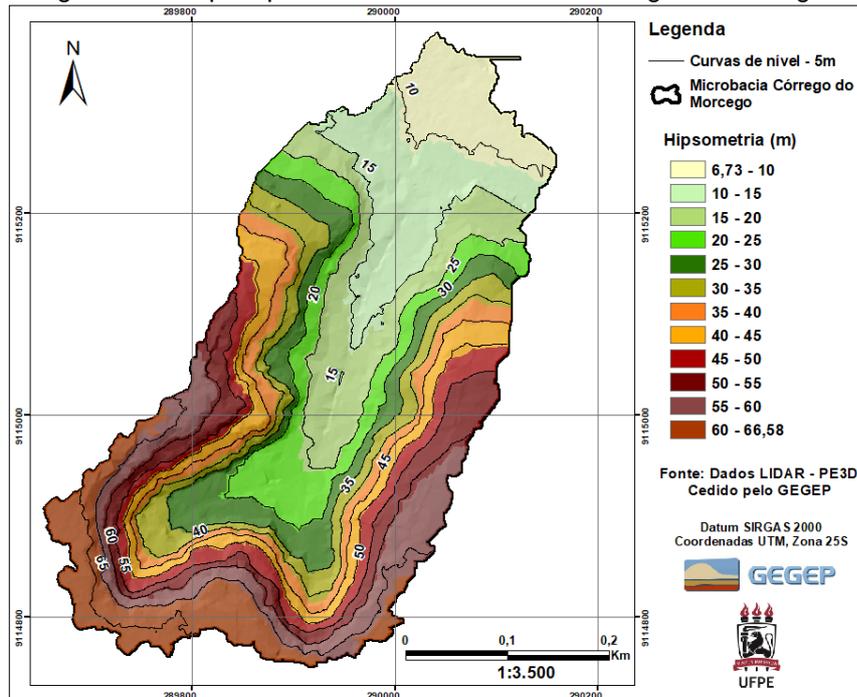
Fonte: Autora.

Figura 24 - Mapa de declividade da microbacia Córrego do Jenipapo.



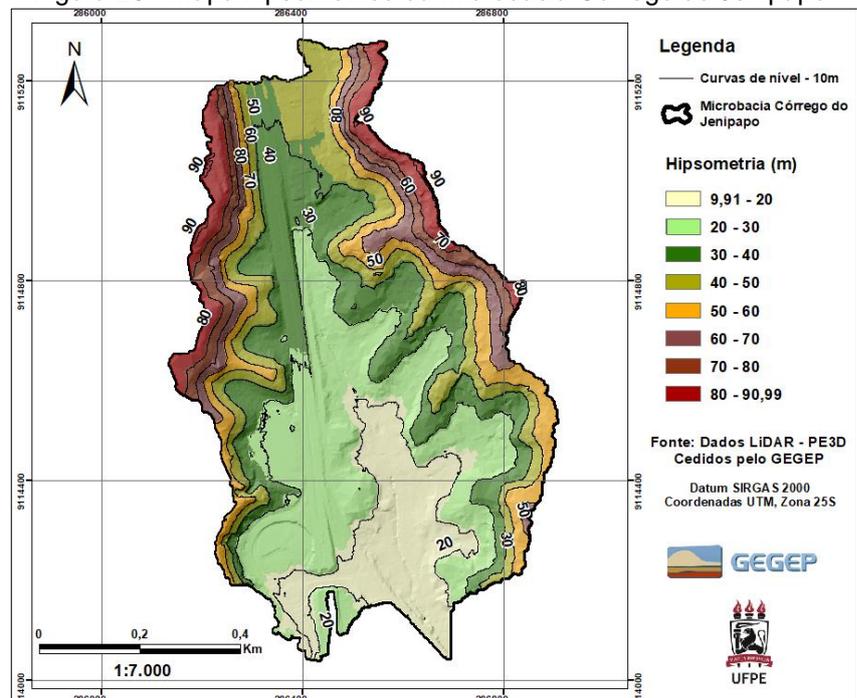
Fonte: Autora.

Figura 25 - Mapa hipsométrico da microbacia Córrego do Morcego.



Fonte: Autora.

Figura 26 - Mapa hipsométrico da microbacia Córrego do Jenipapo.



Fonte: Autora.

#### 4.5 OCUPAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO

Segundo Alheiros et al., (2003), a ocupação dos morros na cidade do Recife tem suas origens na história da construção da cidade. Desde os tempos coloniais, as

áreas pobres foram construídas em terrenos pouco propícios a edificação. Em meados do século XX, com a ocorrência de grandes cheias, que tiveram forte impacto na planície estuarina, a Liga Social Contra Mocambos decidiu eliminar parcialmente os mocambos da zona mais central do Recife, deixando quase cinco mil habitantes sem habitações. Então, na década de 1940, os moradores expropriados começaram a se deslocar, sem planejamento, para os morros de Casa Amarela, Beberibe e Água Fria, promovendo a ocupação sistemática dos morros ao norte do Recife.

As famílias de baixa renda também transferiram para os morros seus hábitos, técnicas de construção e práticas domésticas, criando sua própria terra, nivelando-a (adicionando aterros em áreas alagadas e cortando morros), e acostumados a descartar, em volta da casa para ser levada pelas águas da maré, o que lhes sobrava. Esses hábitos transferidos para os morros, passou a compor os principais fatores antrópicos desencadeadores de deslizamentos: as águas servidas saturando o solo das encostas, lixo obstruindo a drenagem e cortes e aterros irregulares.

As ocupações espontâneas dos morros de Recife ocorrem de forma desordenada, pois os lotes são obtidos através de cortes para criar terrenos planos, que descarta o material cortado no talude sem a adequada compactação para um aterro. Quando as ocupações espontâneas ocorrem rapidamente, vários pontos de instabilização são criados numa mesma encosta, o que aumenta a probabilidade de um acidente.

Através de visitas a campo realizadas nas áreas de estudo observaram-se vários problemas de risco geotécnico. Onde, foram registrados várias infrações às regras de segurança que favorecem o deslizamento, como: ocupação antrópica desordenada (Figura 27); casas construídas de forma irregular, em cortes quase verticais, realizados na encosta (Figura 28); obstrução dos dispositivos de drenagem pelo acúmulo de lixo e vegetação (Figura 29); descartes inadequados de águas servidas no talude (Figura 30) infiltrando-se no solo, de modo a reduzir a resistência e aumentar a sobrecarga; má direcionamento da drenagem de água; remoção da vegetação primitiva (Figura 31), o que deixou o solo à mercê do intemperismo e plantação da vegetação secundária perto do talude (Figura 32), vazamento de tubulações (Figura 33) e construção de fossas na borda das encostas (Figura 34). Estas características indicam que a ocupação foi dada de modo espontâneo e desordenado.

Figura 27 - Ocupação antrópica desordenada: a) na microbacia Córrego do Morcego; b) na microbacia Córrego do Jenipapo.



Fonte: Autora.

Figura 28 - Casas construídas em corte realizado na encosta: a) na microbacia Córrego do Morcego; b) na microbacia Córrego do Jenipapo.



Fonte: Autora.

Figura 29 - Drenagem obstruída por lixo e vegetação: a) na microbacia Córrego do Morcego; b) na microbacia Córrego do Jenipapo.



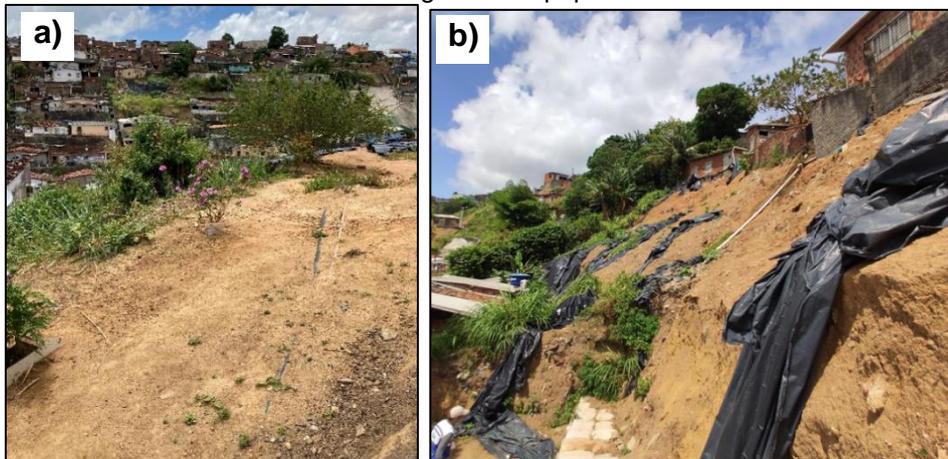
Fonte: Autora.

Figura 30 - Descarte de água servida na crista do talude: a) na microbacia Córrego do Morcego; b) na microbacia Córrego do Jenipapo.



Fonte: Autora.

Figura 31 - Remoção da vegetação primária: a) na microbacia Córrego do Morcego; b) na microbacia Córrego do Jenipapo.



Fonte: Autora.

Figura 32 - Plantio de vegetação secundária: a) na microbacia Córrego do Morcego; b) na microbacia Córrego do Jenipapo.



Fonte: Autora.

Figura 33 - Vazamento de tubulações: a) na microbacia Córrego do Morcego; b) na microbacia Córrego do Jenipapo.



Fonte: Autora.

Figura 34 - Detalhe de fossas na borda da encosta: a) na microbacia Córrego do Morcego; b) na microbacia Córrego do Jenipapo.



Fonte: Autora.

#### 4.6 HISTÓRICO DE DESLIZAMENTOS DAS ÁREAS DE ESTUDO

Segundo pesquisa divulgada em 2018 pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), em parceria com o Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de

Desastres Naturais (CEMADEN), a cidade do Recife é o quinto município do Brasil com maior porcentagem de moradores domiciliados em áreas de riscos a desastres naturais (IBGE, 2018). Para a Prefeitura do Recife, mais de 60% do território da cidade é representado por morros, onde cerca um terço da população reside - em números absolutos, esta porcentagem representa mais de meio milhão de pessoas (CARVALHO, 2019).

Gusmão Filho et al. (1997), observou que na Região Metropolitana de Recife (RMR), a maioria dos deslizamentos são rasos e suas superfícies de ruptura são translacionais (planares) e paralelas ao talude. Observações de mudanças de umidade e sucção, em perfis analisados no bairro Alto do Reservatório na cidade de Recife, indicam que a diferença ocorre apenas nos primeiros 3,0 m de profundidade do solo, revelando que se trata de um limite para a frente de umedecimento e da superfície de ruptura (LIMA, 2002). Este fato também é observado na maioria dos deslizamentos que ocorrem nas encostas ocupadas nas cidades brasileiras.

Em junho e julho de 2019, a cidade de Recife foi atingida por chuvas intensas que deflagraram inúmeros deslizamentos provocando várias vítimas fatais e diversos prejuízos econômicos. Nos dias 13 de junho e 24 de julho de 2019, foram registrados, respectivamente, 210mm e 180mm de chuva, ou seja, cerca de 63% da pluviosidade mensal para os referentes meses, nessa região. Como consequência, ocorreram vários deslizamentos simultaneamente. A seguir serão apresentados alguns desses deslizamentos ocorridos na zona norte do Recife, região onde se localiza as áreas de estudo dessa dissertação.

Segundo reportagem da época (G1 PE, 2019), no dia 13 de junho de 2019, 11 deslizamentos de encostas foram registrados pela Defesa Civil na Zona Norte do Recife, todos sem vítimas fatais. Dentre estes, uma residência localizada no bairro de Dois Unidos foi atingida e desabou.

No dia 24 de julho de 2019, um deslizamento do tipo translacional ocorrido na encosta próxima a rua Córrego do Curió em Dois Unidos, apresentado na Figura 35, ocasionou um óbito. A encosta rompida apresentava aproximadamente 15 m de altura e inclinação média de 25%.

Figura 35 - Deslizamento de encosta na rua Córrego do Curió em Dois Unidos, Recife - PE.



Fonte: Autora.

Também no dia 24 julho de 2019, uma encosta localizada na rua Ageu, bairro do Passarinho, Zona Norte do Recife, rompeu deixando duas vítimas fatais (Figura 36). Segundo reportagem da época (G1 PE, 2019a), além do volume de 120mm de chuva nas 6 horas que antecederam o rompimento da encosta, cortes irregulares, retirada da vegetação superficial e plantio de bananeiras contribuíram para o desastre. O movimento apresentou características de um deslizamento translacional raso.

Figura 36 - Deslizamento de encosta localizada na rua Ageu em Passarinho, Recife -PE.



Fonte: G1 PE (2019a).

Outros deslizamentos ocorridos no dia 24 julho de 2019 na zona norte do Recife, foram registrados pela mídia da época. O rompimento de uma encosta localizada próximo à rua Córrego do Joaquim, em Nova Descoberta, atingiu duas

residências deixando sete pessoas feridas. Em Dois Unidos, cinco vítimas foram resgatadas com vida após o rompimento de uma encosta (G1 PE, 2019b). Outro deslizamento ocorrido na rua da Liberdade, Dois Unidos, resultou em quatro casas destruídas e felizmente nenhuma vítima fatal. O movimento apresentado na Figura 37, pode ser classificado como translacional raso (G1 PE, 2019a).

Figura 37 - Deslizamento de encosta localizada na rua da Liberdade em Dois Unidos, Recife – PE.



Fonte: G1 PE (2019a).

Além dos eventos supracitados do ano de 2019, a área de estudo apresenta um grande histórico de ocorrências de deslizamentos. Em 31 de maio de 2017, um deslizamento translacional raso ocorreu na rua Alto do Capitão, Dois Unidos, atingindo uma residência e deixando dois mortos (Figura 38). Foram registrados 97 mm de chuva no dia do ocorrido (G1 PE, 2017).

Figura 38 - Deslizamento de encosta na rua Alto do Capitão em Dois Unidos, Recife-PE.



Fonte: G1-PE (2017).

Recentemente, em 10 de outubro de 2021, ocorreram alguns deslizamentos de encosta na cidade do Recife após precipitação de 156 mm em 24 horas. Dentre estes, um deslizamento no bairro Brejo da Guabiraba, Zona Norte de Recife, apresentado na Figura 39, atingiu 6 casas, ferindo 3 vítimas (MOURA, 2021).

Figura 39 - Deslizamento de encosta no bairro Brejo da Guabiraba, Recife-PE.



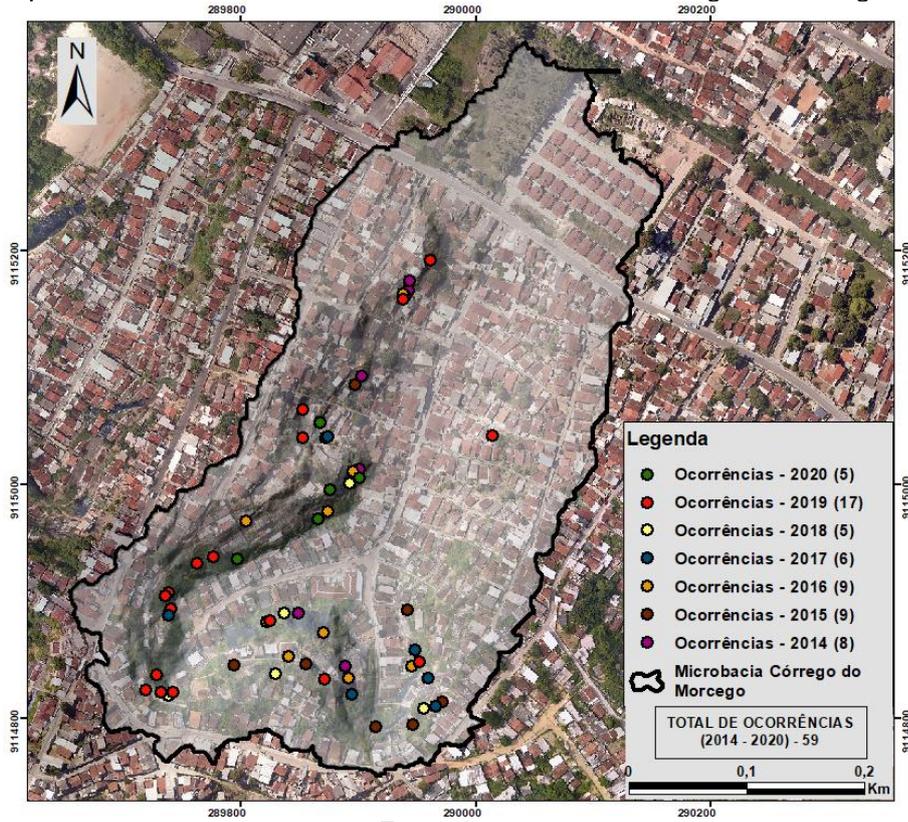
Fonte: Moura (2021).

#### 4.7 MAPA DE REGISTO DE OCORRÊNCIAS

Os deslizamentos ocorridos nas áreas de estudo, entre os anos de 2014 a 2020, foram inventariados a partir de planilhas eletrônicas com registros de deslizamentos cedidos pela Defesa Civil da cidade do Recife. Destaca-se que esses deslizamentos foram localizados com o auxílio do Google Earth® através do endereço de cada ocorrência. Com isso, foram confeccionados os mapas apresentados na Figura 40 e Figura 41, que exibe as localizações dos deslizamentos ocorridos nas microbacias estudadas, incluindo os apresentados no item 4.6.

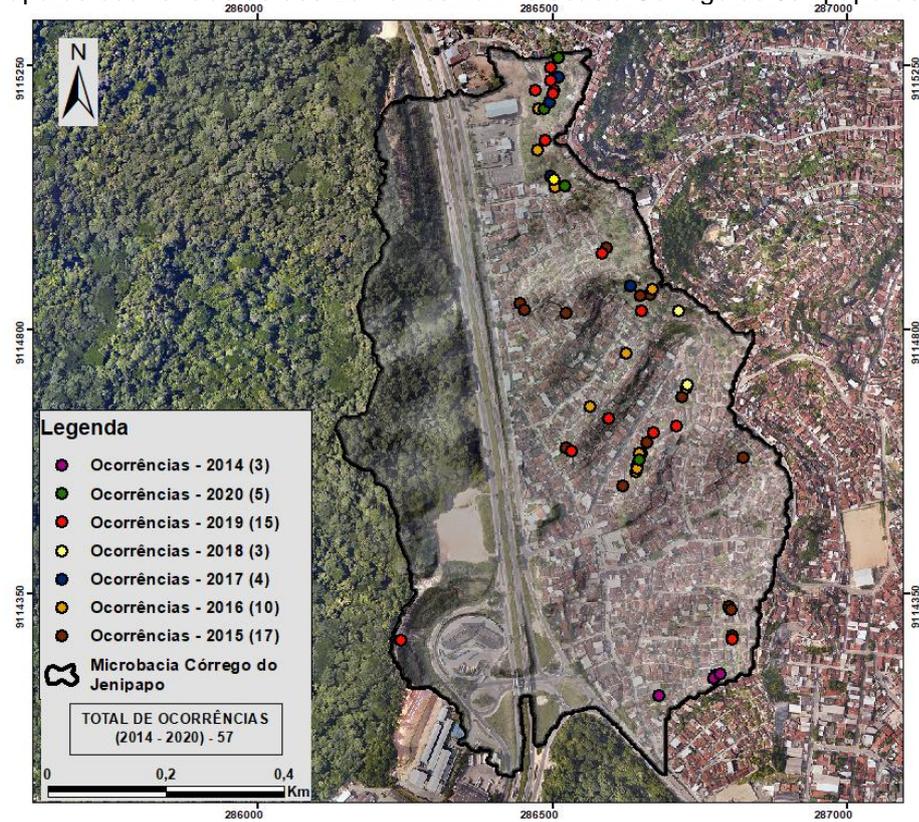
Nota-se que no período de 2014 a 2020, ocorreram 59 registros de deslizamentos na microbacia Córrego do Morcego e 57 na microbacia Córrego no Jenipapo.

Figura 40 - Mapa de ocorrências de deslizamentos na microbacia Córrego do Morcego de 2014-2020.



Fonte: Autora.

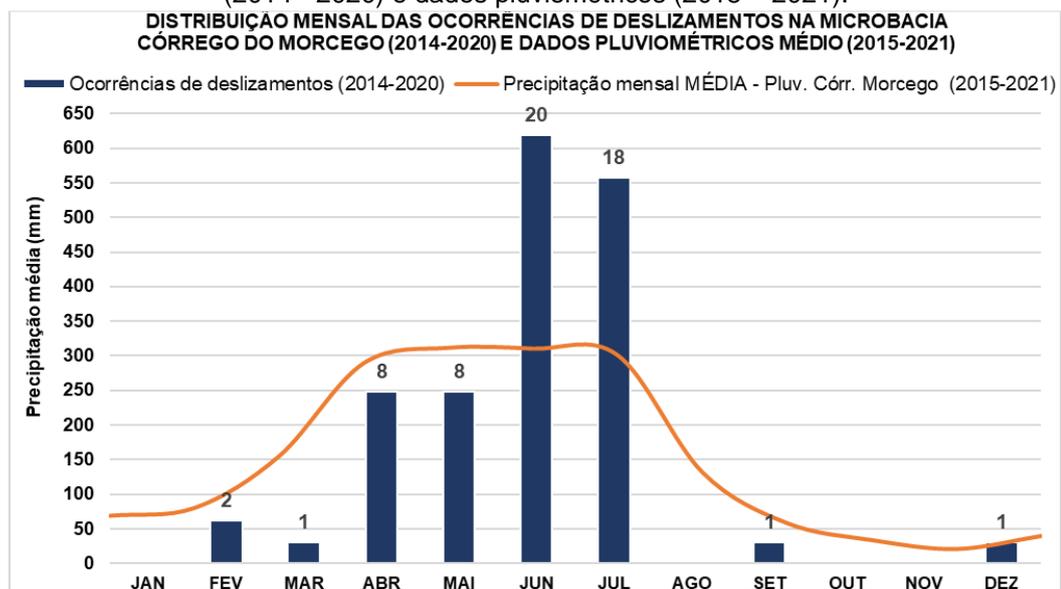
Figura 41- Mapa de ocorrências de deslizamentos na microbacia Córrego do Jenipapo de 2014-2020.



Fonte: Autora.

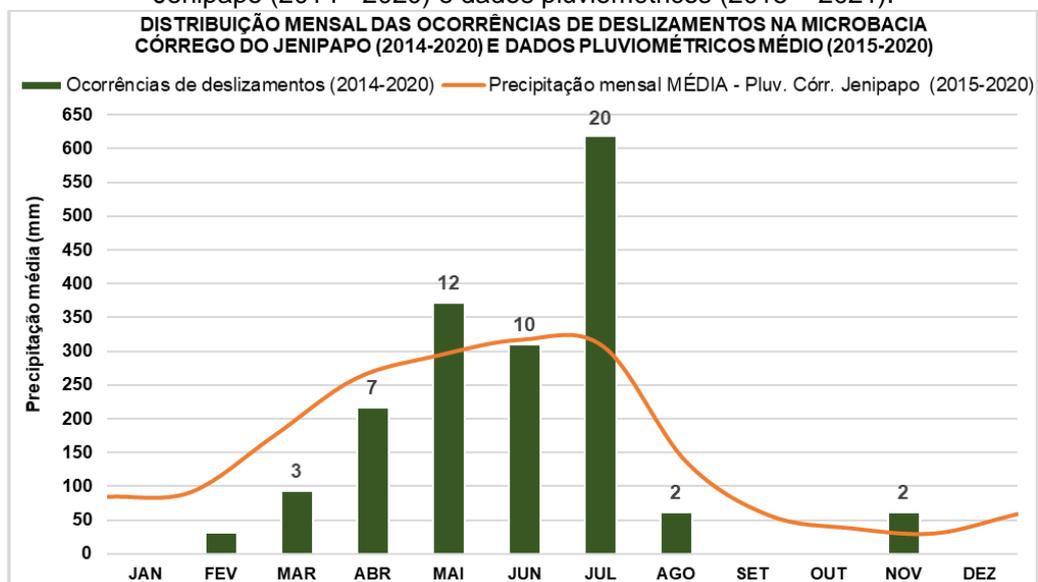
A Figura 42 e Figura 43 apresentam a distribuição mensal das ocorrências dos deslizamentos citados, juntamente com a precipitação média anual de 2015 a 2021 para a microbacia Córrego do Morcego e Córrego do Jenipapo, respectivamente. Observa-se que há uma ligação direta entre o número de ocorrências e o volume precipitado, visto que para as duas microbacias analisadas, o maior número de ocorrências se concentram no período chuvoso (abril a julho), onde se ocorrem as maiores precipitações.

Figura 42 - Distribuição mensal das ocorrências de deslizamentos na microbacia Córrego do Morcego (2014 - 2020) e dados pluviométricos (2015 – 2021).



Fonte: Autora.

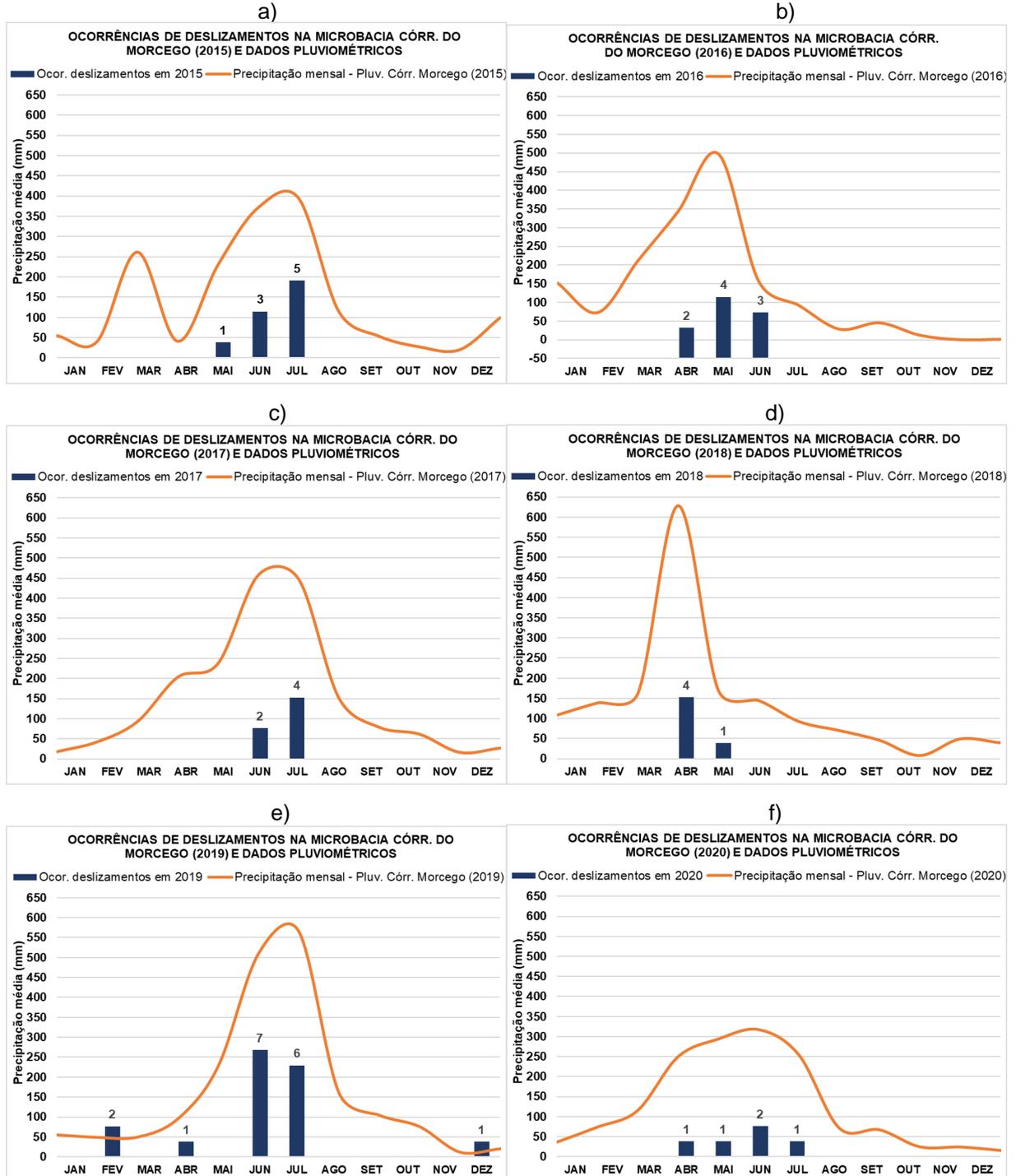
Figura 43 - Distribuição mensal das ocorrências de deslizamentos na microbacia Córrego do Jenipapo (2014 - 2020) e dados pluviométricos (2015 – 2021).



Fonte: Autora.

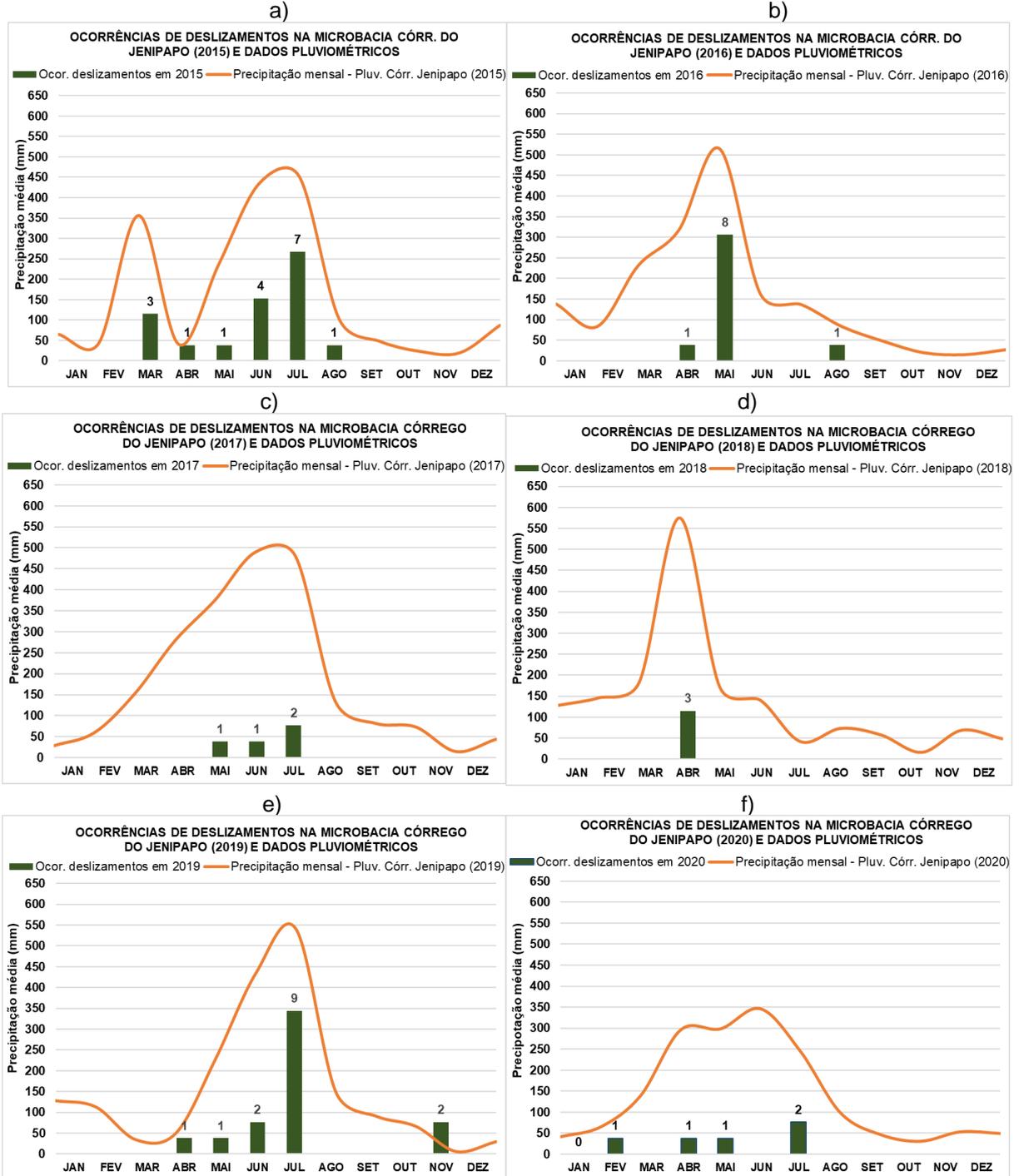
A Figura 44a até a Figura 44f, para a microbacia Córrego do Morcego, e a Figura 45a até a Figura 45f, para microbacia Córrego do Jenipapo, apresentam a distribuição do número de ocorrências para cada ano analisado, juntamente com a precipitação mensal média do correspondente ano.

Figura 44 - Distribuição mensal do número de ocorrências de deslizamentos na microbacia Córrego do Morcego e dados pluviométricos dos anos: a) 2015; b) 2016; c) 2017; d) 2018; e) 2019; f) 2020.



Fonte: Autora.

Figura 45 - Distribuição mensal do número de ocorrências de deslizamentos na microbacia Córrego do Jenipapo e dados pluviométricos dos anos: a) 2015; b) 2016; c) 2017; d) 2018; e) 2019; f) 2020.



Fonte: Autora.

Através destas figuras podemos observar que, como citado anteriormente, os meses mais chuvosos apresentam a maior concentração do número de ocorrências e existe uma ligação direta entre o número de ocorrências e o volume precipitado. O número de deslizamentos em determinado período, também é influenciado pela

existência de meses chuvosos consecutivos, como por exemplo o mês de junho de 2019 (Figura 44e), para microbacia Córrego do Morcego, e o mês de julho de 2019 (Figura 45e) para microbacia Córrego do Jenipapo. Nesses anos, as ocorrências referentes aos meses citados são elevadas, não somente devido aos altos índices pluviométricos destes meses, como também por conta de que nos meses anteriores, a precipitação se apresentou acima da média.

#### 4.8 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Este capítulo apresentou informações a respeito das características e particularidades das duas microbacias, objeto de estudo desta dissertação. Dentre seus aspectos climáticos, geológicos, geomorfológicos, histórico e modelo de ocupação citados, foram destacados alguns fatores condicionantes ou deflagradores de movimentos de massa nas áreas estudadas. O histórico de movimentos de massas para as microbacias estudadas foi apresentado em forma de mapa de ocorrências (com dados coletados a partir dos registros da Defesa Civil de Recife), onde alguns dos eventos foram destacados.

Por fim, uma análise temporal da distribuição de ocorrências de deslizamento com dados pluviométricos coletado de estações próximas as áreas de estudo foram realizadas, onde pode-se observar uma grande influência da precipitação nos eventos de movimentação de massa.

## 5 METODOLOGIA DA INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA E DAS ANÁLISES DE SUSCETIBILIDADE

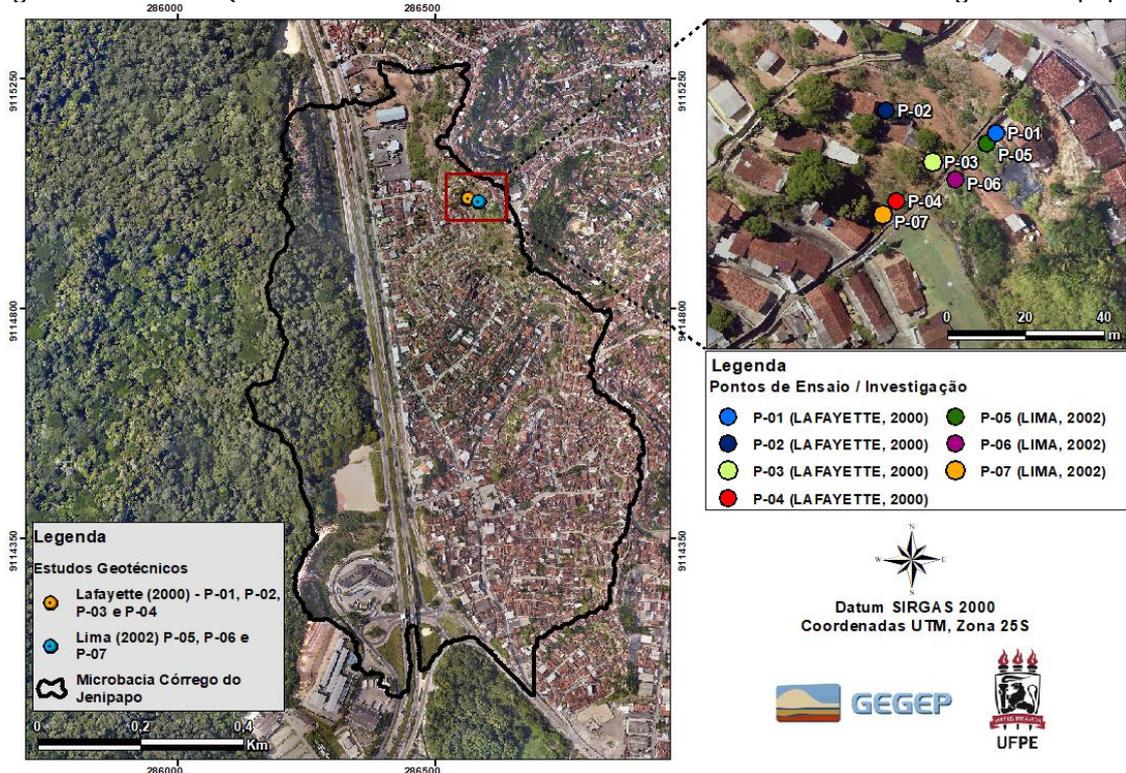
Este capítulo destina-se a apresentação da metodologia aplicada na coleta de informações de trabalhos preexistentes nas áreas de estudo, bem como a metodologia utilizada na investigação geológico – geotécnica de campo e laboratório para caracterização da área e coleta de parâmetros geotécnicos que serão utilizados nas análises e processamentos dos resultados e produção dos mapas de suscetibilidade das áreas estudadas através do software TRIGRS.

### 5.1 LEVANTAMENTO DE DADOS PRÉ-EXISTENTES

Para obtenção dos parâmetros geotécnicos utilizados das análises de suscetibilidade com o TRIGRS, foi realizado o levantamento de dados pré-existentes das áreas de estudo.

Para a análise de suscetibilidade da microbacia Córrego do Jenipapo, encontrou-se os estudos realizados por Lafayette (2000) e Lima (2002), cuja as localizações são exibidas no mapa da Figura 46.

Figura 46 - Localização dos estudos Geotécnicos realizados na microbacia Córrego do Jenipapo.



Fonte: Autora.

A Tabela 6 apresenta o resumo dos ensaios de campo realizados por Lafayette (2000) e Lima (2002) em cada ponto locado no mapa da Figura 46. Estes dados, que foram utilizados nas análises de suscetibilidade realizadas neste trabalho, compreendem: 4 coletas de amostras deformadas e indeformadas, para caracterização física e mecânica do solo em laboratório; 7 sondagens a percussão SPT; e 3 ensaios com o permeâmetro *Guelph*.

Tabela 6 - Investigação de campo realizados na microbacia Córrego do Jenipapo.

PONTOS	FONTE	INVESTIGAÇÃO DE CAMPO - MICROBACIA CÓRREGO DO JENIPAPO			
		SPT	Permeâmetro Guelph	Coleta de amostra deformada	Coleta de amostra indeformada
P-01	Lafayette (2000)	X		X	X
P-02		X	X	X	X
P-03		X			
P-04		X			
P-05	Lima (2002)	X	X	X	X
P-06		X			
P-07		X	X	X	X

Fonte: Autora.

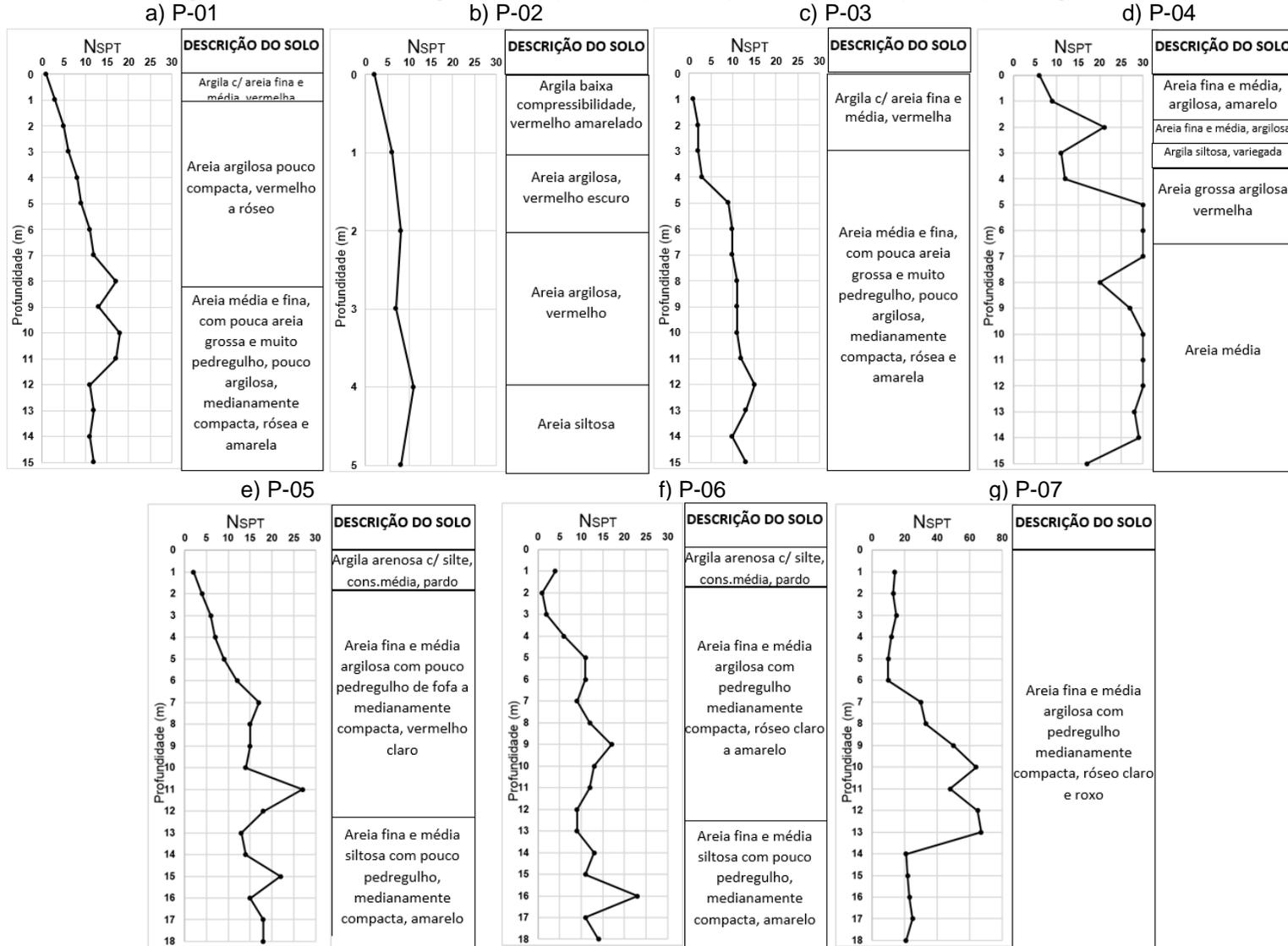
Executou-se as sondagens a percussão SPT nos pontos P-01, P-02, P-03, P-04, P-05, P-06 e P-07. A Figura 47 apresenta os resultados obtidos nessas sondagens, mostrando a descrição do material e o  $N_{SPT}$  encontrado.

Nas sondagens SPT dos pontos P-01 e P-05, o índice  $N_{SPT}$  cresce linearmente com a profundidade até uma profundidade de aproximadamente 11 m.

Nas sondagens P-03 e P-07, os valores do  $N_{SPT}$  são praticamente constantes até a profundidade de 6 m e 4m, respectivamente, e crescem posteriormente com a profundidade. O furo P-04 apresenta um primeiro ganho de resistência em 2m de profundidade, depois sua resistência diminui e volta a aumentar em 5m de profundidade. O furo de sondagens P-06 apresentara valores baixos de  $N_{SPT}$  (1 a 4) até uma profundidade de aproximadamente 3 metros, partir de 4 metros observa-se um ganho resistência, com valor médio de  $N_{SPT} = 14$ .

O contraste de resistência encontrado nas sondagens P-03, P-04, P-06 e P-07 pode influenciar no limite da superfície de ruptura de deslizamentos. O nível de água não foi encontrado em nenhum relatório de sondagem SPT.

Figura 47 - Perfil de sondagens SPT, a) P-01; b) P-02; c) P-03; d) P-04; e) P-05; f) P-06; g) P-07.



Fonte: Adaptado de Lafayette (2000) e Lima (2002).

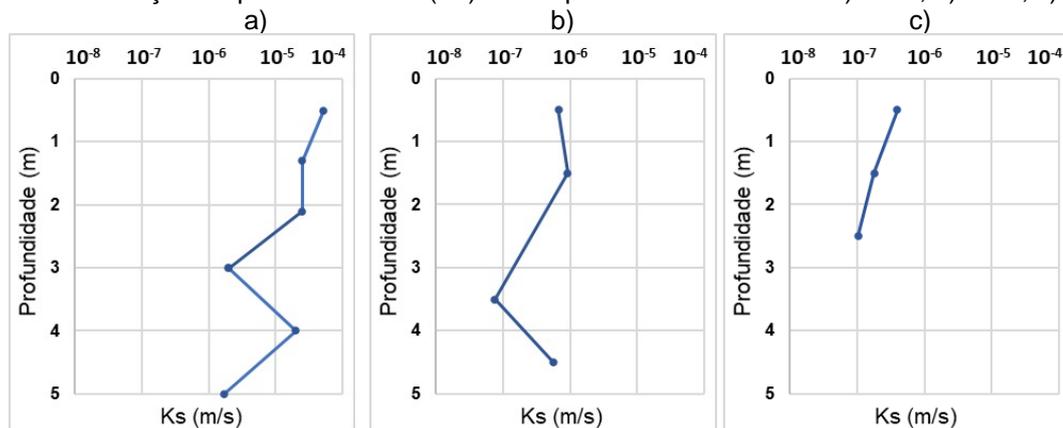
Os resultados de permeabilidade *in situ*, apresentados por Lima (2002) e Lafayette (2000), foram obtidos através do permeâmetro *Guelph*, realizados nos pontos P-02, P-05 e P-07. A Tabela 7 e a Figura 48, expõem estes resultados para cada profundidade ensaiada.

Tabela 7 - Resumo dos coeficientes de permeabilidade para a microbacia Córrego do Jenipapo.

Ponto	Profundidade (m)	PERMEÂMETRO GUELPH
		Coefficiente de Permeabilidade (m/s)
P-02 (LAFAYETTE, 2000)	0,5	$5,2 \times 10^{-5}$
	1,3	$2,5 \times 10^{-5}$
	2,1	$2,5 \times 10^{-5}$
	3,0	$2,0 \times 10^{-6}$
	4,0	$2,0 \times 10^{-5}$
P-05 (LIMA, 2002)	0,5	$6,72 \times 10^{-7}$
	1,5	$9,07 \times 10^{-7}$
	3,5	$7,46 \times 10^{-8}$
	4,5	$5,57 \times 10^{-7}$
P-07 (LIMA, 2002)	0,5	$3,95 \times 10^{-7}$
	1,5	$1,79 \times 10^{-7}$
	2,5	$1,03 \times 10^{-7}$

Fonte: Adaptado de Lafayette (2000) e Lima (2002).

Figura 48 - Variação da permeabilidade (Ks) com a profundidade do solo. a) P-02; b) P-05; c) P-07.



Fonte: Adaptado de Lafayette (2000) e Lima (2002).

Observa-se que a condutividade hidráulica saturada dos solos analisados varia entre  $7,46 \times 10^{-8}$  e  $2,5 \times 10^{-5}$  m/s. Analisando os pontos de estudo individualmente, a maior variação é relativamente pequena e ocorre por volta dos 3,0 m de profundidade quando a permeabilidade diminui na ordem de 10x para as amostras P-02 e P-05; em

contrapartida, a variação da permeabilidade quase não ocorre para os primeiros 3 metros, em todos os pontos ensaiados.

Os maiores valores de permeabilidade foram encontrados nos metros iniciais do ponto P-02, na ordem de  $10^{-5}$  m/s e o menor foi encontrado em 3,5m de profundidade no ponto P-05, na ordem de  $10^{-8}$  m/s.

Na Tabela 8 estão apresentados os resultados dos ensaios de caracterização física realizados nos pontos P-01, P-02, P-05 e P-07. Analisando os índices de plasticidade encontrados, pode-se perceber que todas as amostras foram classificadas como altamente plásticas ( $IP > 15$ ) segundo a classificação sugerida por Jenkins (Caputo, 1987). As amostras de solo dos pontos P-01, P-02 e P-07 se classificam como SC (areia argilosa), e as amostras de solo do ponto P-05 e classificam como CL (argila de baixa compressibilidade), segundo a Classificação Unificada – SUCS (CASAGRANDE, 1948).

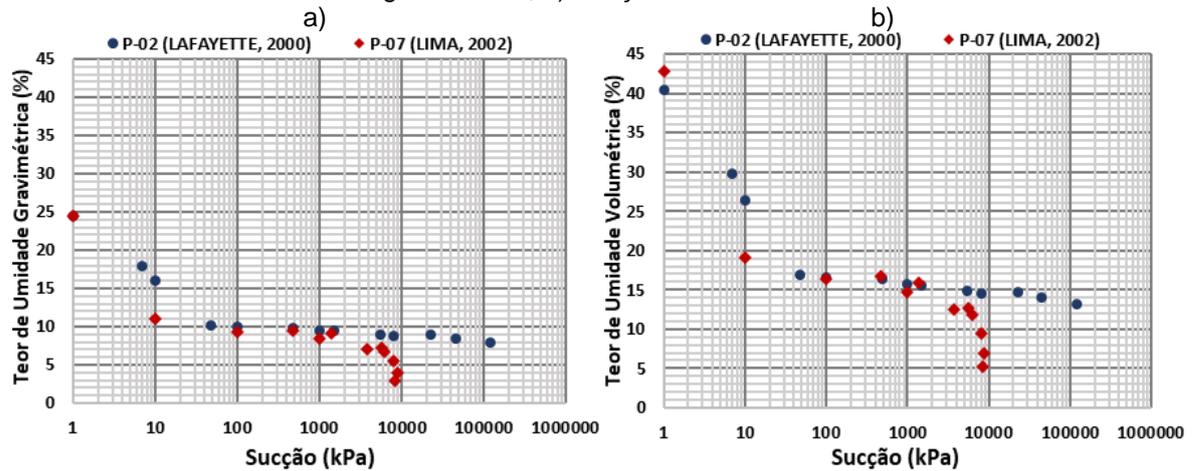
Tabela 8 - Resultado dos ensaios de caracterização física.

PONTO	PROF. (m)	Geologia	Descrição / (SUCS)	COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA (%)						LIMITES DE ATTERBERG (%)		
				Pedreg.	Areia Grossa	Areia Média	Areia Fina	Silte	Argila	LL	LP	IP
P-01 Lafayette (2000)	2,0		Areia argilosa / SC	1	14	29	18	8	30	42	25	17
P-02 Lafayette (2000)	1,5	FB / Leque Aluvial Proximal	Areia argilosa / SC	3	10	30	23	7	27	23	5	18
P-05 Lima (2002)	1,34		Argila de baixa compressibilidade / CL	0	10	11	18	9	52	42	25	16
P-07 Lima (2002)	1,4		Areia argilosa / SC	20	10	12	11	19	28	44	23	21

Fonte: Adaptado de Lafayette (2000) e Lima (2002).

A relação sucção-umidade que define a capacidade de retenção de água nos solos foi obtida por Lafayette (2000) e Lima (2002), utilizando-se duas técnicas: o dessecador de vácuo com solução de NaCl e H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> e a da membrana de pressão. A Figura 49 apresenta as curvas características de retenção de água no solo, realizados nos pontos P-02 e P-07, considerando a umidade gravimétrica e volumétrica.

Figura 49 - Curvas características de retenção de água no solo das amostras P-02 e P-07. a) Sucção x Teor de umidade gravimétrica; b) Sucção x Teor de umidade volumétrica.



A Tabela 9 apresenta o resumo dos resultados de resistência ao cisalhamento do solo, obtidas pelo ensaio de cisalhamento direto, que foram realizadas em amostras na umidade natural e inundadas, nos pontos P-01, P-02 e P-05. Observa-se que à medida que as amostras foram inundadas, a coesão foi bastante reduzida, enquanto que o ângulo de atrito pouco variou, assemelhando-se a condição conceitual esperada, onde apenas a coesão sofre influência da inundação devido ao efeito da sucção.

Tabela 9 - Resumo dos parâmetros geológicos-geotécnicos para a microbacia Córrego do Jenipapo.

RESUMO DOS PARÂMETROS GEOLOGICOS/GEOTÉCNICOS - MICROBACIA CÓRREGO DO JENIPAPO								
Ponto	Fonte	Profund. (m)	Descrição / Classificação (SUCS)	Peso específico saturado (kN/m <sup>3</sup> )	Resistencia ao cisalhamento			
					Inundado		Natural	
					Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (°)	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (°)
P-01	Lafayette (2000)	2 – 2,4	Areia argilosa / SC	19,8	7	26	25	28
P-02	Lafayette (2000)	1,5 – 2,0	Areia argilosa / SC	19,1	13	24	46	34
P-05	Lima (2002)	1,04 – 1,34	Argila arenosa / CL	19	10	32	28	31

Fonte: Adaptado de Lafayette (2000) e Lima (2002).

Ademais, na investigação realizada por Lafayette (2000) e Lima (2002), foi constatado que o teor de umidade do solo variava significativamente até 2~3 metros de profundidade devido a precipitação, este fato pode ser um indicador que delimita a superfície potencial de ruptura e pode ser influenciado pela permeabilidade deste solo. Para modelagem no TRIGRS da microbacia Córrego do Morcego, foram utilizados os

resultados da investigação geotécnica realizadas pelo GEGEP / UFPE, a metodologia e os resultados serão apresentas nos itens 5.2, 5.3, 6.1 e 6.2.

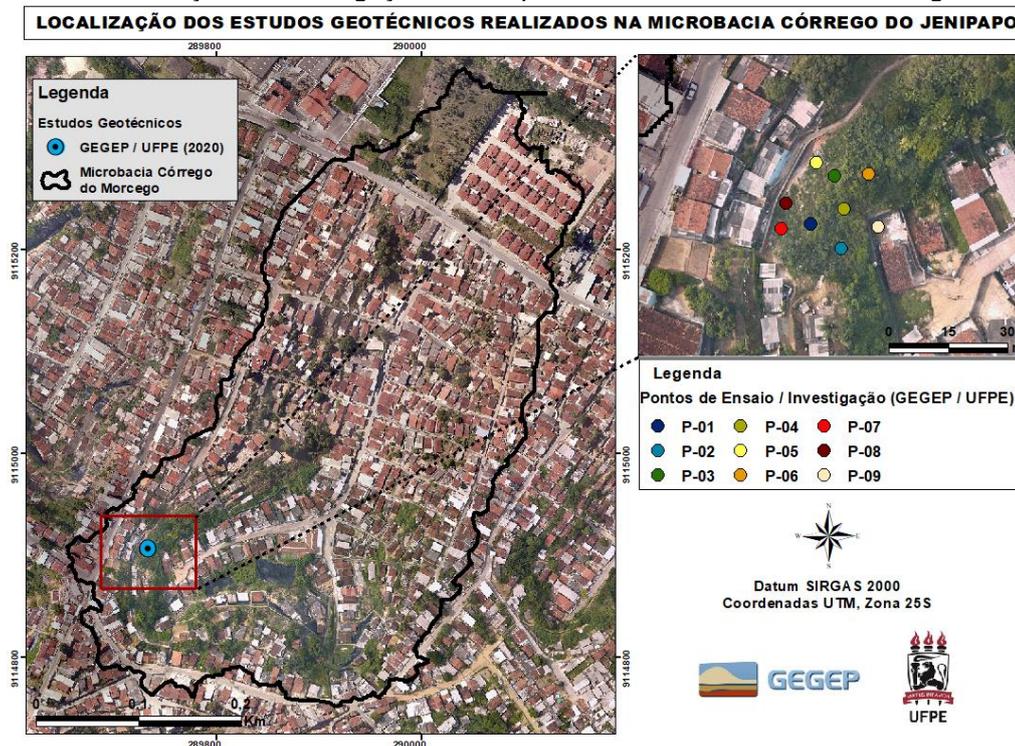
## 5.2 INVESTIGAÇÃO DE CAMPO – GEGEP / UFPE

A investigação de campo foi realizada em 2020, através do Apoio Técnico-Científico prestado pelo Grupo de Engenharia Geotécnica Encostas, Planícies e Desastres (GEGEP / UFPE) à Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA), sob a coordenação do professor Dr. Roberto Quental Coutinho. Essa investigação foi realizada em uma encosta situada na microbacia Córrego do Morcego, onde os pontos de ensaios estão apresentados na Figura 50.

Conforme mostrado na Tabela 10, na investigação de campo foram realizadas 6 coletas de amostras deformadas e indeformadas para realização de ensaios de laboratório; 4 sondagens a percussão SPT; e 3 ensaios de permeabilidade *Guelph*.

Além das 6 amostras coletadas, houve coleta de amostra do amostrador padrão do SPT em algumas profundidades dos pontos P-05, P-07 e P-08 para realização de ensaios de granulometria, afim de confirmar a classificação táctil-visual feita em campo pelo sondador.

Figura 50 - Localização da investigação de campo realizados na microbacia Córrego do Morcego.



Fonte: Autora.

Tabela 10 - Investigação de campo realizados na microbacia Córrego do Morcego.

Pontos	Fonte	INVESTIGAÇÃO DE CAMPO - MICROBACIA CÓRREGO DO MORCEGO			
		SPT	Permeâmetro Guelph	Coleta de amostra deformada	Coleta de amostra indeformada
P-01	GEGEP / UFPE (2020)			X	X
P-02			X	X	X
P-03				X	X
P-04				X	X
P-05		X*		X	X
P-06			X	X	X
P-07		X*	X		
P-08		X*			
P-09		X			

\*Coleta de amostra para ensaios de granulometria do amostrador padrão SPT.  
Fonte: Autora.

### 5.2.1 Sondagem a percussão SPT

As sondagens a percussão SPT (Standard Penetration Test), localizadas nos pontos P-05 e P-07, foram realizadas em fevereiro de 2020 e atingiram até 15 metros de profundidade. As sondagens localizadas nos pontos P-08 e P-09 foram realizadas em abril de 2020 e atingiram a profundidade de 15 e 8 metros, respectivamente. Nos dias em que as sondagens ocorreram, o clima pôde ser descrito com ensolarado.

As sondagens foram realizadas pela empresa STS (Serviços Técnicos de Sondagem), seguindo as recomendações da Norma NBR-6484 (ABNT, 2001). A Figura 51 apresenta registros fotográficos da execução das sondagens SPT.

Figura 51 - Sondagens SPT, P-05 e P-09.

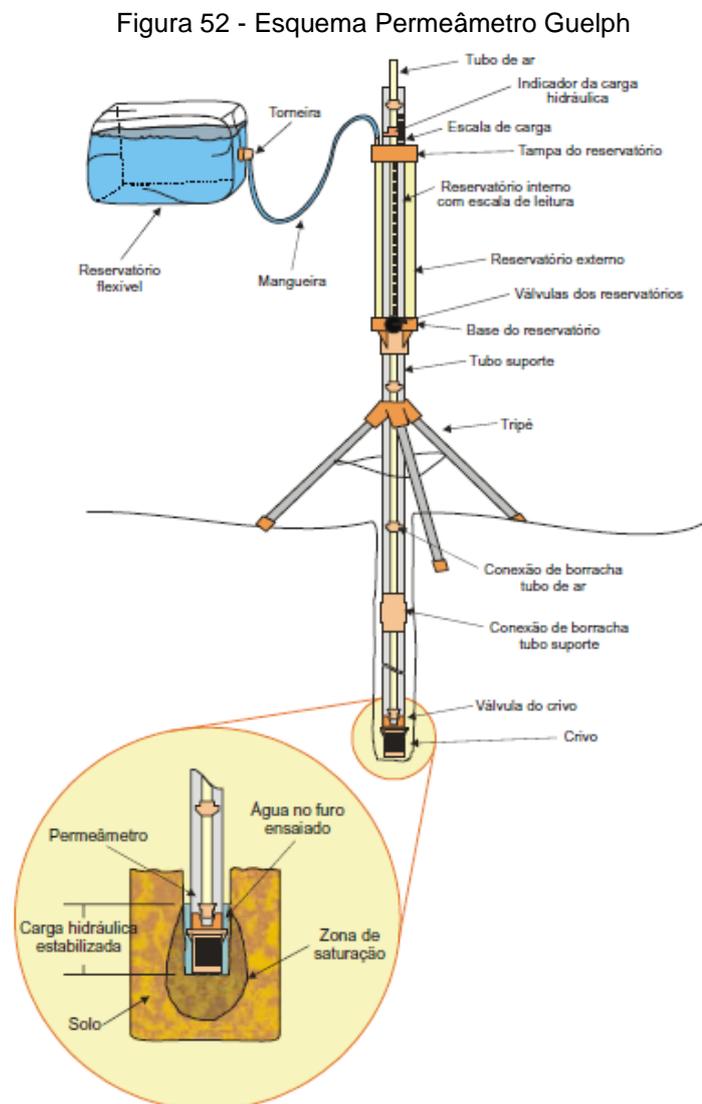


Fonte: Autora.

### 5.2.2 Ensaio para determinação da condutividade hidráulica com permeâmetro Guelph

Os ensaios para determinação da condutividade hidráulica saturada *in situ* foram realizados com o permeâmetro Guelph modelo 2800K1 (Figura 52) fabricado pela *Soilmoisture equipment Corporation*, seguindo rigorosamente as orientações de seu manual (SOILMOISTURE, 2012).

Os ensaios foram realizados nos pontos P-02, P-06 e P-07 (Figura 50), no furo P-02 foi realizado o ensaio nas profundidades de 1 e 2 metros, no furo P-06, nas profundidades de 1, 3 e 4 metros e no furo P-07, nas profundidades de 1 e 2 metros.



Fonte: Lima (2002).

O ensaio foi dividido em duas etapas: a perfuração do solo e montagem do equipamento; e a realização do ensaio em campo.

Na primeira etapa, de perfuração, furo-se até atingir 0,10m antes das profundidades de ensaio, a perfuração do solo foi feita com o trado (60mm de diâmetro). Após a perfuração, acoplou-se o suplemento de limpeza e nivelador do furo, que limpou e nivelou sem fazer esforços até vencer os 10cm de solo atingindo a profundidade do ensaio. Ao nivelar o furo, a superfície do solo ficou excessivamente lisa, o que não representou as condições reais, então utilizou-se uma escova de náilon para que a superfície ganhasse o mínimo de rugosidade.

Na sequência, ocorre a montagem do equipamento. Onde, inicialmente é colocado o tudo de suporte com crivo e o tubo interno com válvula no furo, em seguida coloca-se as extensões dos tubos (interno e de suporte) até a profundidade de realização do ensaio. Por fim, é montado o tripé para dar suporte ao equipamento.

Na segunda etapa, realiza-se o ensaio e ocorre as leituras do equipamento. Para isto, mantém-se fechada a válvula do crivo e abre-se a válvula do equipamento para que o mesmo seja preenchido por completo com água, sem bolhas de ar. Então, coloca-se a válvula do equipamento para baixo, permitindo a saída de água do reservatório interno para os tubos suporte e para o reservatório externo. Neste momento é aplicado uma carga hidráulica de 0,10m, através da bureta graduada, abrindo-se a válvula junto ao crivo. As leituras são realizadas anotando a diferença de nível d'água no reservatório em tempos fixados até a estabilização das leituras.

A condutividade hidráulica saturada foi calculada a partir de planilha de cálculo no Excel, disponibilizada pela fabricante do equipamento em Soilmoisture (2012).

Nas mesmas profundidades dos ensaios de condutividade hidráulica foram retiradas amostras de solo para determinação da umidade em laboratório. As Figura 53 e Figura 54, ilustram a realização do ensaio.

Figura 53 - Realização do ensaio com Permeâmetro Guelph. a) P-02; b) P-06).



Fonte: Autora.

Figura 54 - Permeâmetro Guelph e realização do ensaio (P-07).



Fonte: Autora.

### 5.2.3 Amostragem

Objetivando o estudo das propriedades mecânicas e realização de ensaios de caracterização e classificação dos solos, foram coletadas 6 amostras deformadas e

indeformadas nos pontos P-01, P-02, P-03, P-04, P-05 e P-06 (Figura 50), seguindo as indicações da norma NBR 9604/2016 - Abertura de Poços e Trincheiras de Inspeção de Solos com Retirada de Amostras Deformadas e Indeformadas (ABNT, 2016).

Inicialmente, para a coleta das amostras indeformadas (tipo bloco) realizou-se a abertura de poços exploratório, escavando manualmente até a cota desejada. Após a execução do poço, os blocos foram moldados utilizando ferramentas manuais (“ferro de cova” e faca afiada) até atingirem a forma cúbica, com dimensões de 30cm. Após a moldagem dos blocos, os mesmos foram envolvidos com papel alumínio e depois com um tecido de algodão para aderência da parafina derretida até criarem uma película rígida. Após estes procedimentos, as bases dos blocos foram seccionadas e então os blocos foram acondicionados em caixas de madeira. Para minimizar ao máximo qualquer movimentação que pudesse ocorrer, os espaços vazios entre a amostra de solo e a caixa de madeira foram preenchidos com pó de serra. Após o fechamento da base dos blocos, os mesmos foram identificados com as seguintes informações: local, data da coleta, número do bloco, profundidade da coleta, e indicação do topo e da base e cuidadosamente transportados até a câmara úmida do Laboratório de Solos e instrumentação da UFPE.

Ainda foram coletadas amostras deformadas, objetivando a caracterização física dos solos em estudo. Estas amostras foram extraídas nos mesmos locais onde as amostras indeformadas foram retiradas. A tabela x apresenta a profundidade onde cada amostra foi coletada.

Tabela 11 - Profundidade das amostras coletadas na microbacia Córrego do Morcego

<b>PROFUNDIDADE DAS AMOSTRAS COLETADAS</b>	
P-01	1,50 m
P-02	1,30 m
P-03	1,50 m
P-04	1,25 m
P-05	1,45 m
P-06	1,45 m

Fonte: Autora.

A Figura 55 apresenta as etapas de coleta das amostras indeformadas na microbacia Córrego do Morcego.

Figura 55 - Etapas da coleta das amostras indeformadas na microbacia Córrego do Morcego.



Fonte: Autora.

### 5.3 ENSAIOS DE LABORATÓRIO – GEGEP / UFPE (2020)

Os ensaios de laboratório foram executados através do Apoio Técnico-Científico realizado pelo Grupo de Engenharia Geotécnica Encostas, Planícies e Desastres (GEGEP) para a Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA), sob a coordenação do professor Dr. Roberto Quental Coutinho. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Geotecnia e Instrumentação da UFPE, localizado no CTG (Centro de Tecnologia e Geociências), Campus Recife.

#### 5.3.1 Ensaios de caracterização física

Para realização da caracterização física do solo foram executados os ensaios de limite de liquidez, limite de plasticidade, densidade real dos grãos do solo e granulometria com sedimentação, para isso foi utilizado amostras de solo deformado

coletadas ao lado das amostras indeformadas nos pontos P-01, P-02, P-03, P-04, P-05 e P-06 (Figura 50), seguindo as metodologias da ABNT, indicadas abaixo:

- NBR 6457/2016 - Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização;
- NBR 6458/2017: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água;
- NBR 7181/2018: Solo - Análise granulométrica;
- NBR 13602/2020: Solo — Avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio sedimentométrico comparativo — Ensaio de dispersão SCS;
- NBR 7180/2016: Solo - Determinação do limite de plasticidade;
- NBR 6459/2017: Solo - Determinação do limite de liquidez.

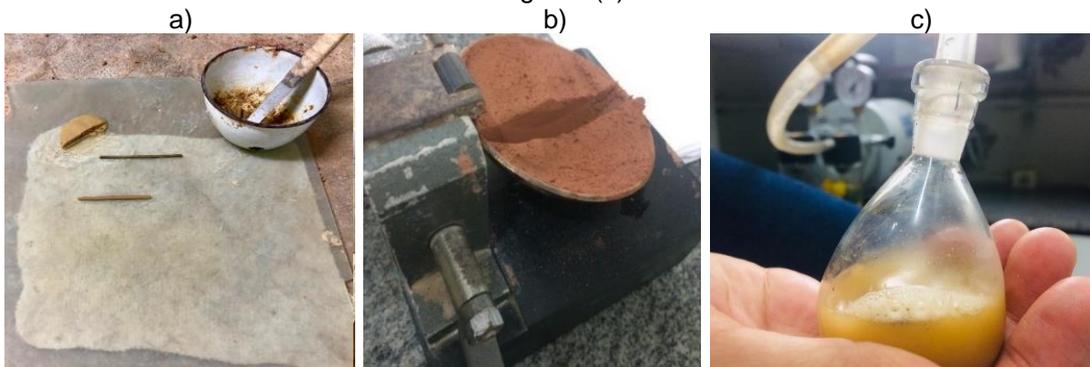
A Figura 56 e Figura 57 ilustram detalhes dos procedimentos de ensaios de caracterização física dos solos.

Figura 56 - Realização dos ensaios de Peneiramento (a) e Sedimentação (b).



Fonte: Autora.

Figura 57 - Realização dos ensaios de limite de plasticidade (a), limite de liquidez (b) e densidade real dos grãos (c).



Fonte: Autora.

### 5.3.2 Determinação da Curva característica do solo

O ensaio para determinação da curva característica foi realizado na amostra de solo indeformada retirada no ponto P-03. As determinações de sucção foram feitas através da técnica do papel filtro (CARVALHO et al., 2015).

Este método é baseado na capacidade de meios porosos em absorver ou perder uma certa quantidade de água por contato direto ou indireto em um ambiente fechado até que o equilíbrio de pressão seja alcançado. Em outras palavras, o princípio deste ensaio é que quando o solo está em contato com o papel de filtro, em ambiente fechado, certa quantidade de umidade do solo é absorvida pelo papel até que o sistema atinja o equilíbrio de pressão. Neste caso, o papel e o solo terão a mesma sucção, mas umidades diferentes. Conhecida a curva de calibração do papel (relação sucção-umidade) e sua umidade gravimétrica determina-se a sucção do solo. Mais detalhes sobre este ensaio podem ser encontrados em Lopes (2006), Soares (2008), Fredlund et al. (2012) e Carvalho et al. (2015).

As curvas características foram obtidas pelo processo de secagem. Assim, para cada curva foram confeccionados doze corpos de prova moldados em anéis metálicos de 2,0 cm de altura e 6,0 cm de diâmetro, a partir das amostras indeformadas (Figura 58). Desses, seis passaram por um processo de saturação para depois passar pelo processo de secagem para obter os pontos da curva com maiores teores de umidade. Os outros seis não passaram pelo processo de saturação, assim os mesmos começaram o processo de secagem a partir do teor de umidade da moldagem e com isso foi obtido os pontos com menores teores de umidade da curva.

Figura 58 - Moldagem dos corpos de prova.



Fonte: Autora.

O processo de saturação consistiu em colocar os corpos de prova dentro de uma bandeja com uma lâmina d'água, sobre uma pedra porosa saturada (Figura 59). O nível d'água dentro da bandeja foi igual à altura das pedras porosas. Dessa forma, os corpos de prova absorveram água por capilaridade, e para que não houvesse perda de material, uma folha de papel filtro foi colocada entre a pedra porosa e o corpo de prova. As amostras permaneceram na bandeja por 7 dias (após observar constância de peso nas medições de 5, 6 e 7 dias). Apesar disto, os corpos de prova não alcançaram o grau máximo de saturação, pois devido a quantidade de finos presente nas amostras e a altura de coluna d'água disponível, não houve a capacidade de alcançar a saturação por capilaridade.

Figura 59 - Processo de Saturação por capilaridade.



Fonte: Autora.

O procedimento para determinação das curvas características é normatizado pela ASTM D 5298 – 10 (ASTM, 2003), onde é detalhadamente descrito. Uma breve descrição será realizada, salientando algumas peculiaridades adotadas nesta dissertação.

O processo de secagem consistiu em deixar as amostras secarem ao ar enquanto tinham seus pesos constantemente monitorados (Figura 60). Ao atingir determinados pesos (teores de umidade), as amostras eram preparadas para equalização, colocando-as com uma face em contato direto com o papel filtro para medir a sucção matricial, e a outra face separada do papel filtro por meio de um espaçador, que deve ter no máximo 4 mm de altura e ser de material não absorvente, que permita a livre passagem do vapor e que não possa sofrer oxidação, para medir a sucção total. Depois todo conjunto deve ser isolado do meio externo, embrulhado em filme de PVC, seguidos de papel alumínio (Figura 61) e colocados dentro de uma

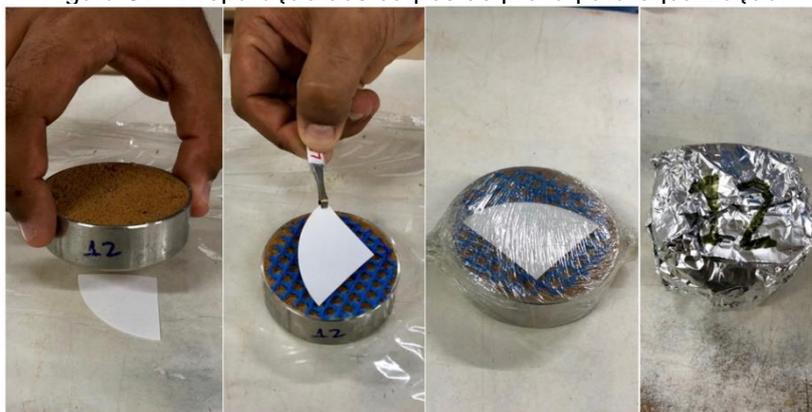
caixa de isopor (Figura 62), de modo a se evitar perda ou ganho de umidade para o meio externo. O papel filtro utilizado foi o Whatman N°42 (Figura 63) e o tempo de equalização foi entre 7 e 14 dias, a depender do valor de sucção estimado para cada amostra, conforme recomendações apresentadas em Carvalho et al. (2015).

Figura 60 - Processo de secagem das amostras.



Fonte: Autora.

Figura 61 - Preparação dos corpos de prova para equalização.



Fonte: Autora.

Figura 62 - Caixa de isopor utilizada.



Fonte: Autora.

Figura 63 - Papel filtro utilizado.



Fonte: Autora.

Após o tempo de equalização, os papéis devem ser retirados rapidamente com uma pinça e pesados em uma balança com resolução de 0,0001g, determinando-se, desta forma, o peso úmido. Em seguida, os papéis eram colocados em cápsulas numeradas e conduzidos a uma estufa com temperatura de 105 °C durante 24h, para posterior determinação do peso seco.

Após a retirada dos papéis filtros os corpos de prova eram expostos ao ambiente até a perda da umidade. Os corpos de prova perdiam cerca de 2% da umidade ao ar livre, monitorando através do peso das amostras. Estes procedimentos foram repetidos até obtenção da curva característica por secagem. Por fim, os corpos de prova eram colocados na estufa e posteriormente pesados para determinação de seus pesos secos.

Para obtenção da sucção, utiliza-se o teor de umidade do papel ( $w\%$ ) nas equações propostas por Chandler et al. (1992):

$$\text{Para } W_{\text{papel}} \leq 47\%, \text{ Sucção (kPa)} = 10^{4,84-0,0622 w(\%)} \quad (17)$$

$$\text{Para } W_{\text{papel}} > 47\%, \text{ Sucção (kPa)} = 10^{6,05-2,48 \log(w\%)} \quad (18)$$

E assim, esses valores de sucção foram plotados em um gráfico de escala logarítmica com o par correspondente do valor de umidade do corpo de prova (gravimétrica e volumétrica), obtido através o peso do solo úmido obtido após a equalização e o peso do solo seco, obtido após secagem em estufa.

### 5.3.3 Cisalhamento direto

Os parâmetros de resistência podem ser obtidos a partir de ensaios de cisalhamento direto. Este ensaio representa o método mais antigo e fácil de determinar a resistência ao cisalhamento do solo. Apesar das limitações, como a imposição de um plano de ruptura que não permite que o solo se rompa em seu plano mais fraco e a incapacidade de medir a poropressão, o ensaio de cisalhamento direto é amplamente utilizado no meio geotécnico e geralmente fornece resultados aceitáveis.

Foram realizados ensaios de cisalhamento direto em duas situações distintas. A primeira na condição natural do solo, onde os corpos de prova eram ensaiados na umidade natural do bloco. A segunda representava a condição inundada, em que os corpos de prova passavam por um processo de inundação inicial.

Para realização dos ensaios supracitados, foi utilizada uma prensa de cisalhamento fabricada pela Ronald Top S/A com sistema de cargas verticais, através de pesos em pendural e anel de carga para determinação das forças horizontais aplicadas aos corpos de prova (Figura 67). As leituras das deformações verticais e deslocamentos horizontais eram lidas através de extensômetros com resolução de 0,01 mm, fabricados pela Mitutoyo.

Figura 64 - Prensa de cisalhamento direto utilizada.



Fonte: Autora.

Os corpos de prova foram moldados a partir das amostras indeformadas coletadas nos pontos P-01, P-02, P-03, P-04, P-05 e P-06 (Figura 50), através de caixas de moldagem com 10,16cm (4 polegadas) de lado e 4,0cm de altura (Figura 65). Foram moldados 4 corpos de prova para os ensaios na condição de umidade natural, e 4 corpos de prova para a condição inundada.

Figura 65 - Moldagem dos corpos de prova para o ensaio de cisalhamento direto.



Fonte: Autora

Os corpos de prova foram adensados até a completa estabilização das deformações verticais provocadas pela aplicação da tensão normal, comprovada pela definição da compressão primária através do método de Robert Taylor (raiz do Tempo). Para condição inundada, todos os corpos de prova foram inicialmente inundados por um período de 24 horas, para então passarem pela fase de adensamento.

O cisalhamento dos corpos de prova foi realizado em prensa com velocidade constante igual a 0,4300mm/min para o ensaio na umidade natural e 0,06700 mm/min para o ensaio inundado, conforme recomendação de Lambe (1951), Bishop e Henkel (1957) e Bowles (1978). As tensões normais utilizadas foram de 25, 50, 150 e 300 kPa.

## 5.4 PLATAFORMA DE COLETA DE DADOS GEOTÉCNICOS – PCD GEOTÉCNICA

As plataformas de coleta de dados geotécnicos (PCD Geotécnica) são um tipo de equipamento, capaz de obter, armazenar e transmitir parâmetros geotécnicos (Figura 66). Este equipamento é composto por um gabinete de acondicionamento com *datalogger* e sistema de transmissão de dados, sistema de alimentação (placas fotovoltaicas) e sensores. Os sensores contam com um pluviômetro automático e uma sonda geotécnica de 3,0m de comprimento composta de 6 sensores de umidade, em posição fixa a cada 0,5 m, os quais medem a umidade volumétrica do solo, através de um campo magnético.

Figura 66 - Plataforma de coleta de dados geotécnicos – PCD Geotécnica, em detalhes.



Fonte: adaptado de ASCOM/CEMADEN (2016).

Os dados coletados são transmitidos de forma automática para RedeGeo (Rede de Monitoramento Geotécnico), onde podem ser acessados de forma pública através da página do Cemaden na internet<sup>2</sup>. A RedeGeo é um projeto de estratégia nacional de monitoramento, em tempo real, de fatores ambientais desencadeadores de deslizamentos em encostas urbanas, com o objetivo de implantar uma rede observacional geotécnica para aumentar a precisão dos alertas de deslizamentos.

<sup>2</sup> <http://www2.cemaden.gov.br/mapainterativo/>

Este projeto faz parte da Rede de Monitoramento Ambiental de Desastres Naturais (Remaden) do Cemaden (Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais), vinculado ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) do Governo Federal. (ASCOM/CEMADEN, 2021).

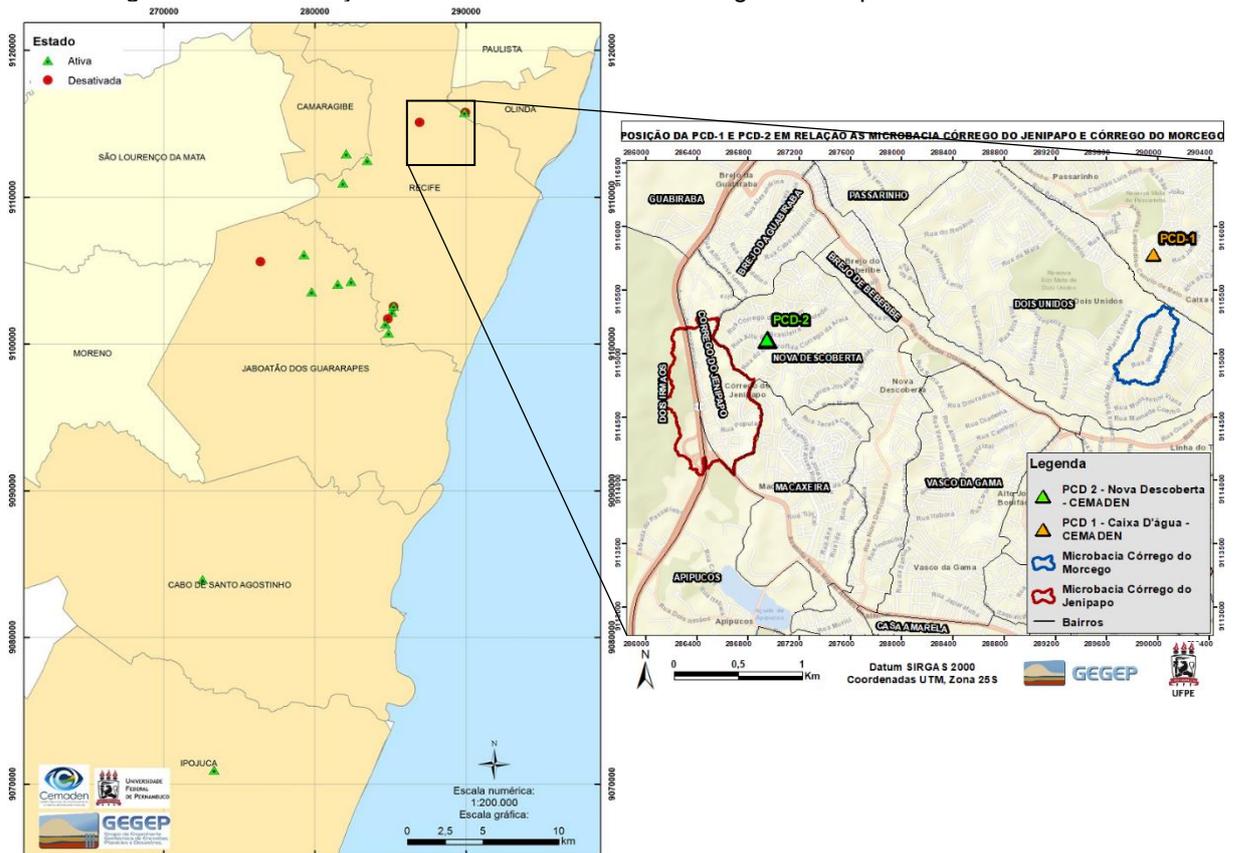
A utilização das PCD Geotécnica na RedeGeo traz uma inovação tecnológica na captação desses dados, pois com elas é possível associar o volume precipitado (pluviômetro) com a variação de umidade em até 3 metros de profundidade do solo (sensores de umidade volumétrica). E assim, os dados a serem obtidos de chuva e da umidade permitirão uma correlação entre a quantidade de chuva do local e a parte dessa chuva que foi absorvida e retida no solo, causando saturação em profundidade, levando a deflagração de deslizamentos.

A escolha dos locais de instalação das PCDs foi acompanhada pela Defesa Civil da cidade em questão, com base no mapeamento das áreas de riscos da cidade. Além disso, é preferível que os locais estejam em áreas com histórico de ocorrências de movimentos de massa e ainda suscetíveis ao deslizamento, também devem possuir alguns requisitos que permitam a instalação do equipamento, como um solo que permita a escavação para instalação do tubo de acesso com três metros de comprimento, locais de fixação do pluviômetro e das placas fotovoltaicas sem nenhuma obstrução, como árvores, edificações e outros, uma boa cobertura de sinal de telefonia móvel e satélite para transmissão de dados, além de possuir as mínimas condições de segurança para o equipamento e para as equipes de trabalho (ASCOM/CEMADEN, 2021).

Na região metropolitana de Recife foram instalados 19 PCDs nas cidades de Jaboatão dos Guararapes, Olinda, Cabo de Santo Agostinho, Camaragibe e Ipojuca, além da capital pernambucana. Das 19 PDCs instaladas, 14 estão em funcionamento (Figura 67).

Como exposto no item 4.2, próximo às áreas de estudo desta dissertação se localizam a PCD-1 (aproximadamente 400m da microbacia Córrego do Morcego) e a PCD-2 (aproximadamente 300m da microbacia Córrego do Jenipapo), os dados obtidos das duas PCDs são apresentados e discutidos no item 6.3.

Figura 67 - Localização das PCDs Geotécnicas na Região Metropolitana do Recife.



Fonte: Autora.

As atividades de campo para instalação das PDCs na RMR foram acompanhadas pelos respectivos membros da Defesa Civil de cada cidade, além do apoio técnico de pesquisadores do Grupo de Engenharia Geotécnica de Encostas e Planícies (GEGEP), do Departamento de Engenharia Civil, da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), sob coordenação do Prof. Dr. Roberto Quental Coutinho, através de projeto de pesquisa.

Este projeto de pesquisa, Projeto REMADEN/ Rede GEO, financiado pela FINEP – Financiadora de Estudos e Projetos do Governo Federal, consiste numa parceria entre o CEMADEN e o GEGEP/UFPE no intuito do levantamento e instalação de estação de PCD'S para o monitoramento de áreas de risco em encostas na RMR. O GEGEP/UFPE dentre outras responsabilidades, foi encarregado pela coleta de amostras deformadas e indeformadas (Figura 68) e ensaios de laboratório necessários para caracterização geotécnica das áreas de instalação das PDC Geotécnicas.

Figura 68 - Coleta de amostras indeformadas



Fonte: Autora.

Como exposto no item 4.2, próximo às áreas de estudo desta dissertação se localizam a PCD-1 (aproximadamente 400m da microbacia Córrego do Morcego) e a PCD-2 (aproximadamente 300m da microbacia Córrego do Jenipapo), os dados obtidos das duas PCDs são apresentados e discutidos no item 6.3.

### 5.5 ANÁLISE DE SUSCETIBILIDADE ATRAVÉS DO TRIGRS

Como citado no item 4.1, as áreas escolhidas para geração do mapa de suscetibilidade através do modelo TRIGRS, são as microbacias Córrego do Morcego e Córrego do Jenipapo.

A seleção dessas microbacias foi baseada na existência de elevado número de ocorrências de deslizamentos nestas áreas, pela presença de registros desses deslizamentos, por já ter sido investigadas em trabalhos passados sobre movimentos gravitacionais de massa (GUSMÃO FILHO et al., 1997; LAFAYETTE, 2000; LIMA 2002) e em trabalhos de apoio técnico realizados pelo GEGEP/UFPE, e, por fim, por possuir algumas características representativas dos condicionantes naturais dos morros da zona norte do Recife (ex. hipsometria, inclinação e regime pluviométrico). As características físicas dessas áreas foram descritas no capítulo 4.

As inúmeras ocorrências de deslizamentos nas microbacias, registradas pela defesa civil da cidade do Recife, possuem papel fundamental para o processo de validação dos resultados obtidos pela modelagem no TRIGRS.

A entrada dos dados no TRIGRS é feita inicialmente por meio de um Modelo Digital de Terreno (MDT), para obtenção dos parâmetros topográficos (mapas de

declividade e direção de fluxo). O MDT utilizado foi gerado em 2015, através do programa Pernambuco Tridimensional (PE3D) com tecnologia LiDAR (Light Detection and Ranging), com resolução espacial de 1m, os dados foram fornecidos pelo GEGEP / UFPE. Posteriormente, são necessários os valores pluviométricos, como intensidade de chuva e duração de cada evento, o que pode influenciar na variação do Fator de Segurança, e os parâmetros geotécnicos do solo (por exemplo, coesão, ângulo de atrito interno, profundidade, condutividade hidráulica, entre outros), Também são necessárias informações adicionais que controlam o modelo, como, por exemplo, o número de intervalos ao longo de uma espessura de solo onde são calculados os valores poropressão e do Fator de Segurança (FS) (Baum et al., 2008).

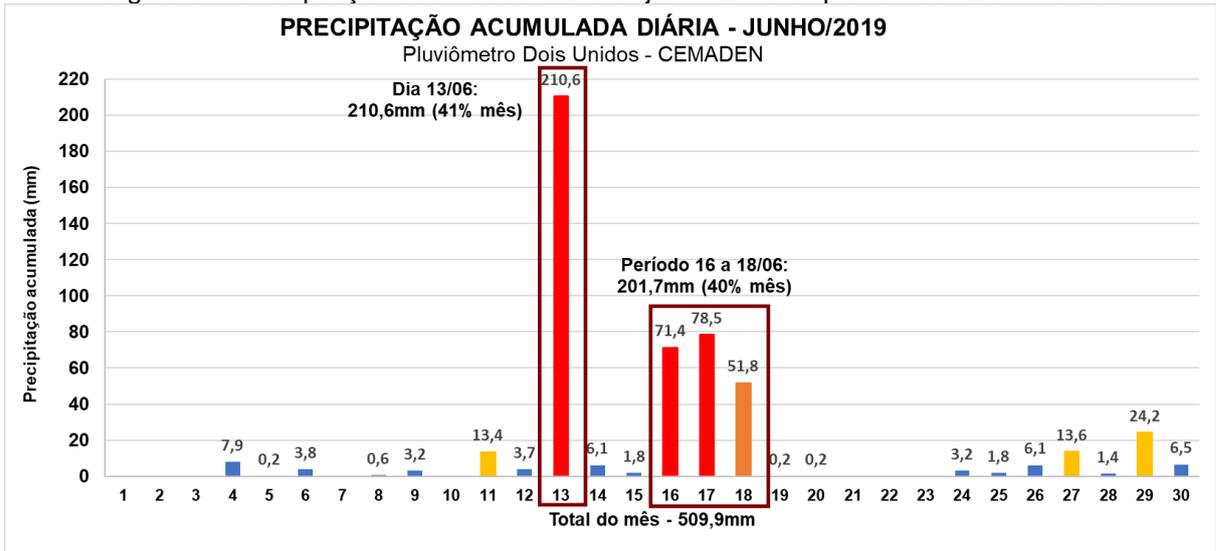
### **5.5.1 Evento pluviométrico modelado**

Em junho e julho de 2019, a RMR foi atingida por chuvas intensas que deflagraram inúmeros deslizamentos provocando 20 vítimas fatais e diversos prejuízos econômicos. Várias residências localizadas em áreas de risco foram atingidas pelo solo deslizado, resultando em, além dos óbitos citados, grande número de feridos e desabrigados. Nesse período choveu cerca de 510 mm (junho) e 560mm (julho), volume que equivale a cerca de 70% a mais que a média mensal para os referidos meses. As chuvas de 2019, portanto, expuseram a necessidade de mais pesquisas sobre a suscetibilidade a deslizamentos em áreas de encostas. Uma vez que, o avanço das ocupações espontâneas dos morros de Recife ocorre de forma desordenada, sem apoio técnico nem fiscalização.

#### **5.5.1.1 Microbacia Córrego do Morcego**

Para a microbacia Córrego do Morcego, no dia 13 de junho de 2019, foram registrados 210,6mm de chuva, o que corresponde a aproximadamente 41% da pluviosidade mensal do mês de junho concentrados em 24 horas (Figura 69). Esse valor classifica a chuva como excessiva de limiar 3 (precipitação acumulada em 24h >150 mm), de acordo com os critérios de Previsões Probabilísticas do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC (BRASIL, 2021). Observa-se também, que entre os dias 16 a 18 de junho choveu 201,7mm, ou seja, aproximadamente 40% da precipitação total mensal concentrada em 72h.

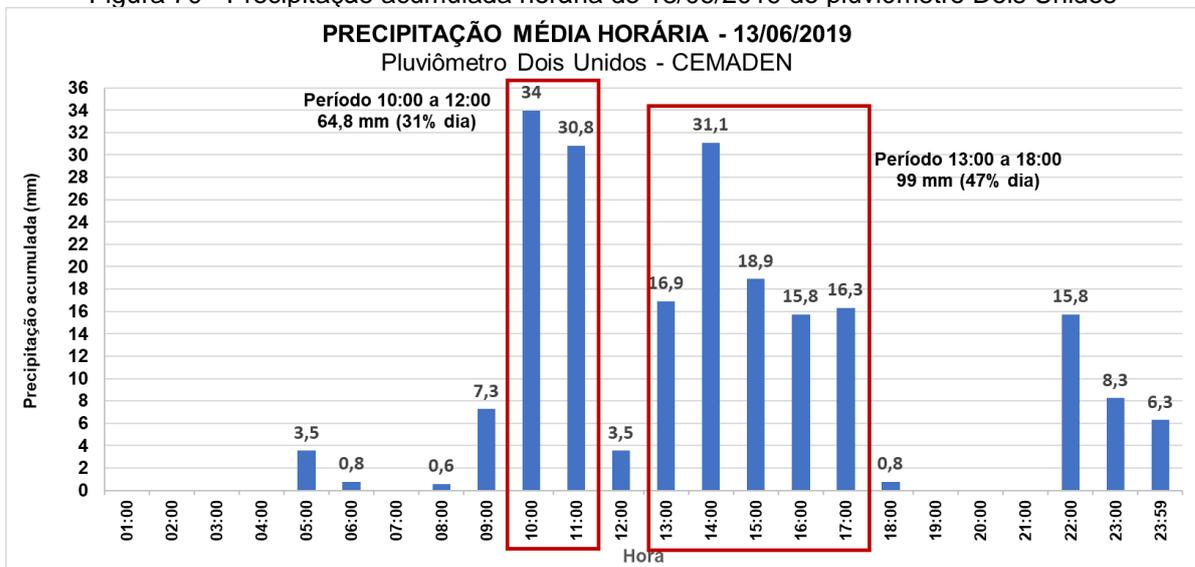
Figura 69 - Precipitação acumulada diária de junho/2019 do pluviômetro Dois Unidos.



Fonte: Autora.

A Figura 70 mostra a chuva do dia 13 de junho de 2019 de modo horário, onde observa-se que entre as 10 e 12 horas, choveu 64,8 mm/h, representando 31% da chuva diária total, concentrada em 2h. Observa-se também que no período entre 13h e 18h, choveu 99mm em 5h. Nesse dia, em três horários (10, 11 e 14 horas) houve chuvas que podem ser classificadas como intensa (precipitação acumulada em 1h ≥ 30 mm), de acordo com os critérios de Previsões probabilísticas do CPTEC (BRASIL, 2021).

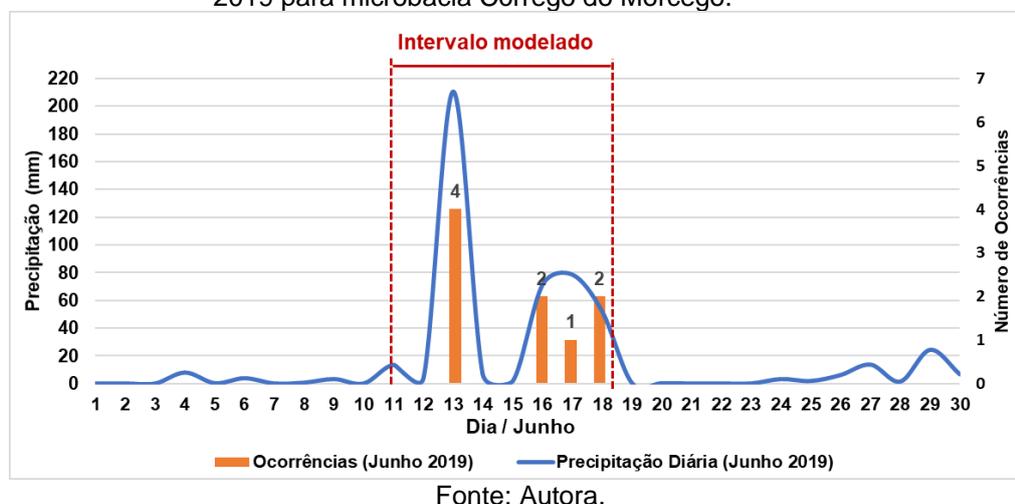
Figura 70 - Precipitação acumulada horária de 13/06/2019 do pluviômetro Dois Unidos



Fonte: Autora.

Entre os dias 11 e 18 de junho de 2019, de acordo com o registro de ocorrências da microbacia Córrego do Morcego (item 4.7), concentrou-se o maior número de deslizamentos, do total de 59 deslizamentos (2014 - 2020), 7 aconteceram entre esses dias, distribuídos conforme a Figura 71.

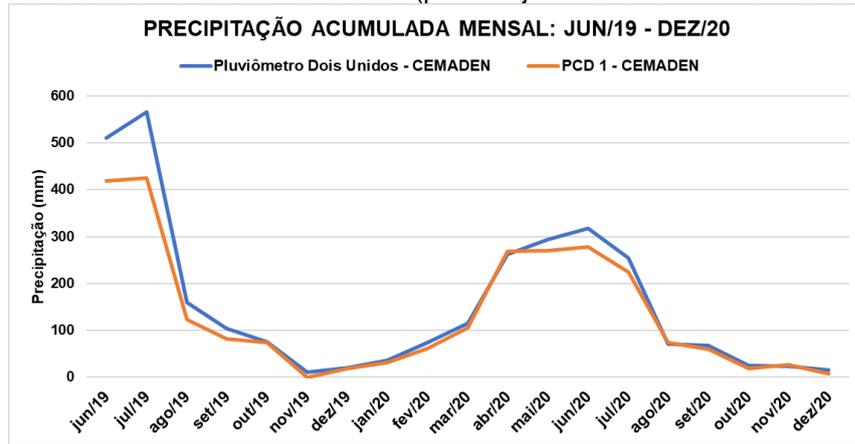
Figura 71 - Distribuição das ocorrências de deslizamentos e dados pluviométricos diário de junho de 2019 para microbacia Córrego do Morcego.



Diante do exposto, para a microbacia Córrego do Morcego, o evento pluviométrico utilizado para a determinação do FS e geração dos mapas de suscetibilidade (modelagem no TRIGRS), foi o evento ocorrido entre os dias 11 e 18 de junho de 2019, devido ao grande número de ocorrências de deslizamentos registrados nesse período e a presença das chuvas excessivas e intensas nesse período. Essas chuvas totalizaram 437,3mm em 8 dias, superior à média realizada entre 2015 e 2021 de 310,06mm para o referido mês.

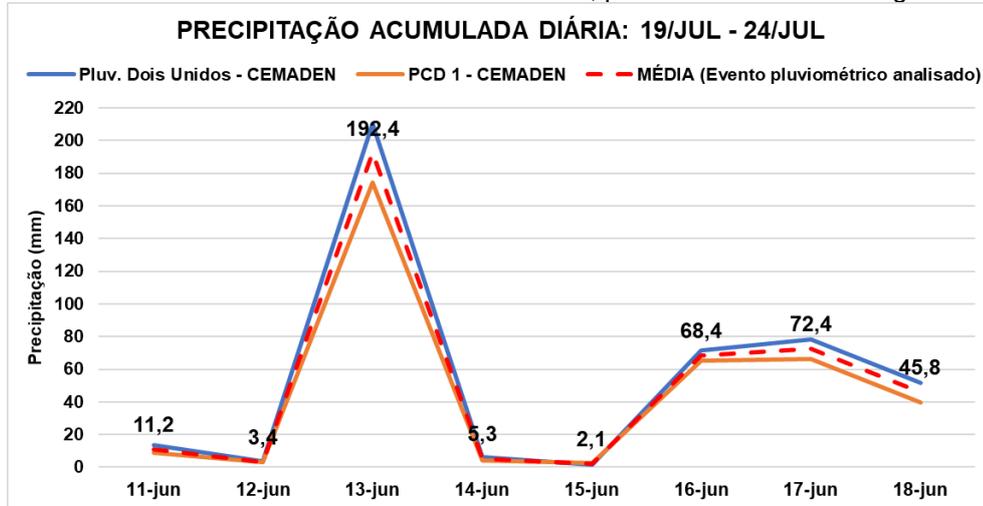
Na microbacia Córrego do Morcego, além do pluviômetro Dois Unidos – CEMADEN, foram utilizados também, os dados coletados pelo pluviômetro da PCD 1 – Caixa d'água. Os pluviômetros Dois Unidos – CEMADEN e PCD 1- Caixa d'água que estão aproximadamente a 450 e 400 metros, respectivamente da microbacia Córrego do Morcego, registraram volumes precipitados bastante aproximados entre si (Figura 72). Portanto, na modelagem com o TRIGRS foi utilizado a média entre as pluviometrias diárias obtidas nos dois pluviômetros, apresentada no gráfico da Figura 73.

Figura 72 - Comparação da precipitação acumulada mensal dos pluviômetros: Dois Unidos – CEMADEN e PCD 1 – CEMADEN (período junho/2019 a setembro/2020)



Fonte: Autora.

Figura 73 - Evento Pluviométrico modelado no TRIGRS, para a microbacia Córrego do Morcego

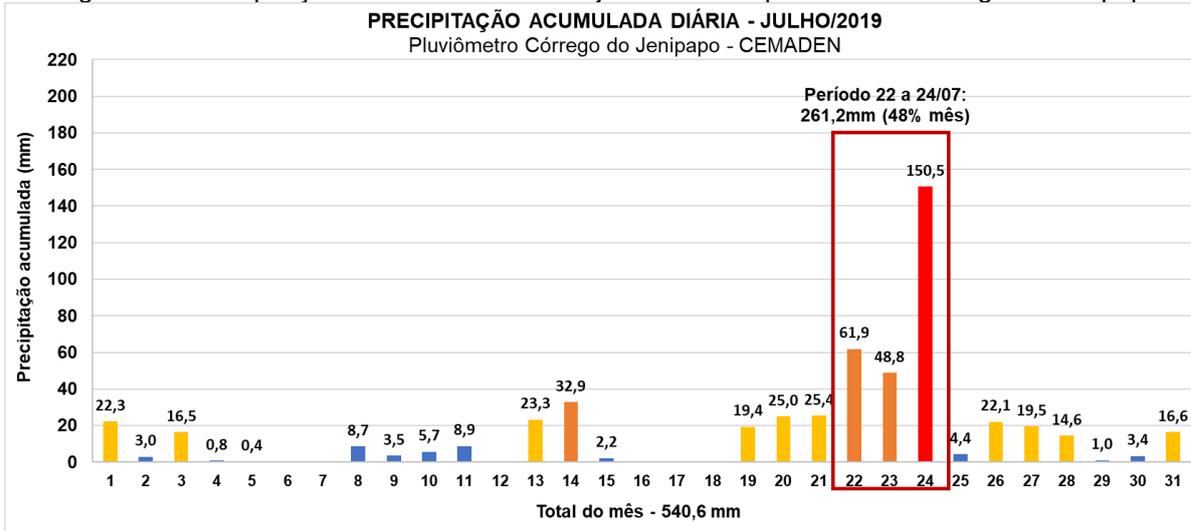


Fonte: Autora.

### 5.5.1.2 Microbacia Córrego do Jenipapo

No dia 24 de julho de 2019, foram registrados 150,5mm de chuva, o que correspondeu a aproximadamente 30% da pluviosidade mensal do mês de julho concentrados em 24 horas (Figura 74). Esse valor classifica a chuva como excessiva de limiar 3 (precipitação acumulada em 24h >150 mm), de acordo com os critérios de Previsões Probabilísticas do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC (BRASIL, 2021). Observa-se também, que entre os dias 22 e 24 de julho choveu 261,2mm, ou seja, aproximadamente 50% da precipitação total mensal concentrada em 72h.

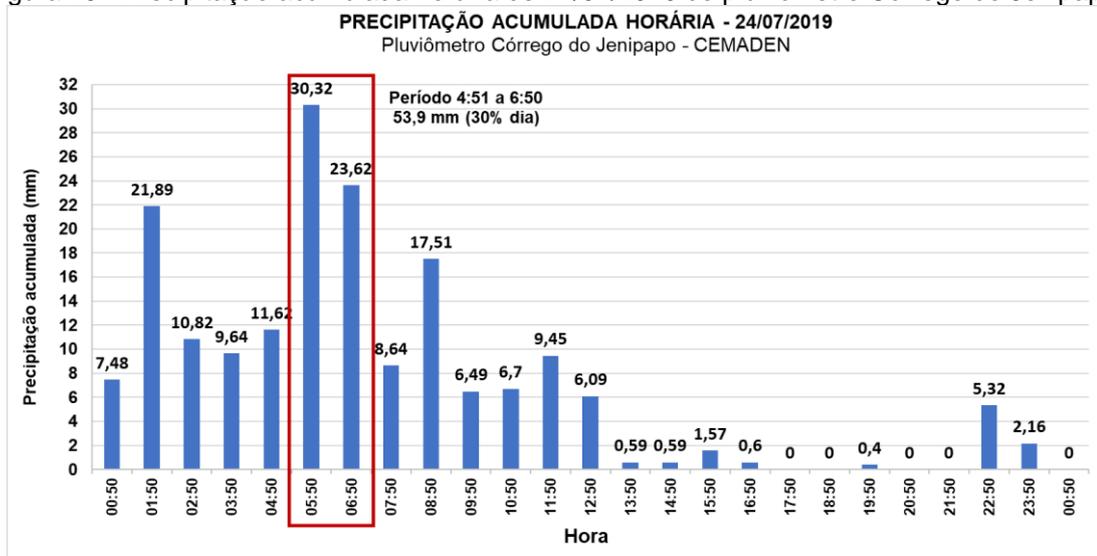
Figura 74 - Precipitação acumulada diária de julho/2019 do pluviômetro Córrego do Jenipapo.



Fonte: Autora.

A Figura 75 mostra a chuva do dia 24 de julho de 2019 de modo horário, onde observa-se que entre as 4:50 e 6:50h, choveu 53,9 mm/h, representando 30% da chuva diária total, concentrada em 2h. Observa-se também que no período de 1h, entre 4:50 e 5:50 da manhã choveu 30,3mm. Esse valor classifica a chuva analisada como intensa (precipitação acumulada em 1h  $\geq$  30 mm), de acordo com os critérios de Previsões probabilísticas do CPTEC (BRASIL, 2021).

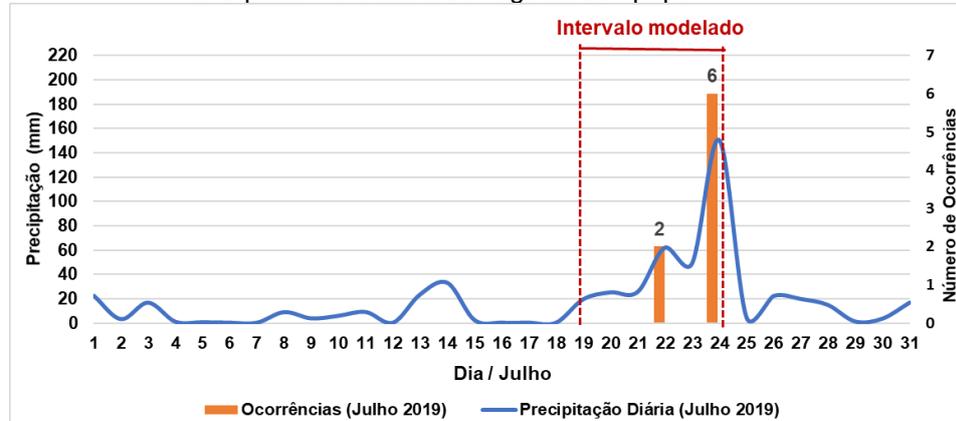
Figura 75 - Precipitação acumulada horária de 24/07/2019 do pluviômetro Córrego do Jenipapo.



Fonte: Autora.

No período de 19 a 24 de julho de 2019, de acordo com o registro de ocorrências da microbacia Córrego do Jenipapo (item 4.7), concentrou-se o maior número de deslizamentos do total de 57 deslizamentos (2014 - 2020), onde 9 aconteceram entre esses dias, distribuídos conforme a Figura 76.

Figura 76 - Distribuição das ocorrências de deslizamentos e dados pluviométricos diário de julho de 2019 para microbacia Córrego do Jenipapo.

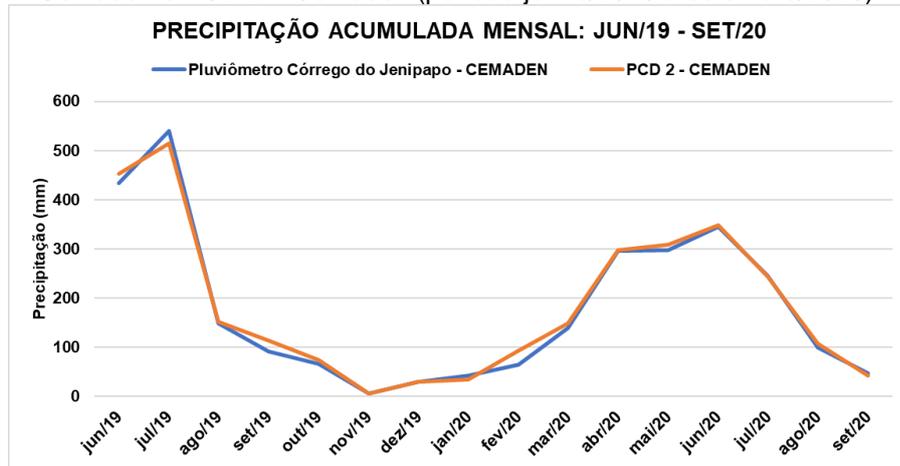


Fonte: Autora.

Devido aos dados citados, o evento pluviométrico utilizado para a determinação do FS e geração dos mapas de suscetibilidade (modelagem no TRIGRS), para a microbacia Córrego do Jenipapo, foi o evento ocorrido entre os dias 19 e 24 de julho de 2019, uma vez que nesse período foram registrados maior número de ocorrências e as chuvas foram classificadas como excessivas e intensas, apresentando um total de 317,2 mm em 6 dias, superior à média calculada para todo o mês de julho, que é 307 mm, considerando o período entre 2015-2021.

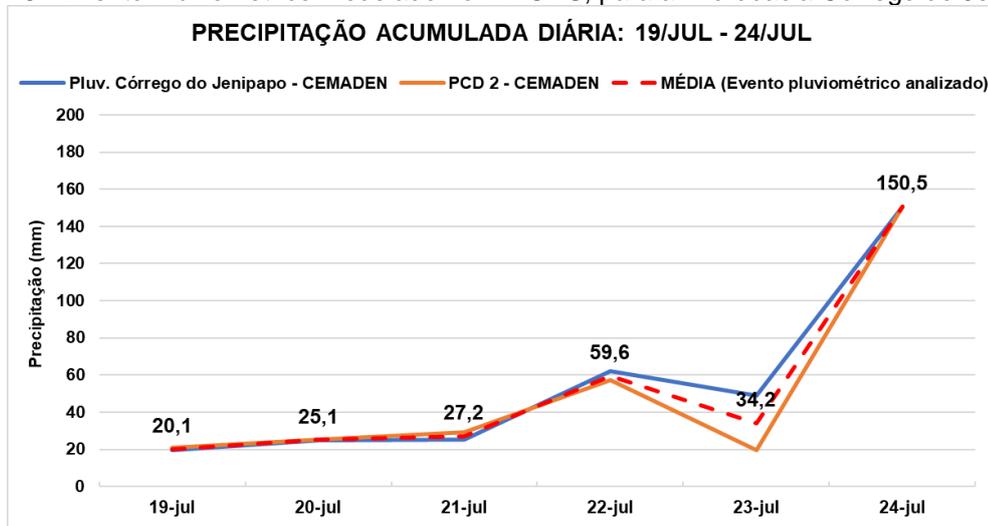
Para a microbacia Córrego do Jenipapo, além do pluviômetro Córrego do Jenipapo – CEMADEN que está localizado dentro da área, existe a PCD 2 – Nova Descoberta, localizada a aproximadamente 300m da microbacia, como apresentado na Figura 17, do item 4.2. A PCD 2 registra dados de pluviometria desde maio de 2019, a Figura 77 apresenta o gráfico com a precipitação média mensal dos dois pluviômetros, observa-se que os valores são bastantes próximos. Portanto na modelagem com o TRIGRS foi utilizado a média entre as pluviometrias diárias obtidas nos dois pluviômetros, apresentada no gráfico da Figura 78.

Figura 77 - Comparação da precipitação acumulada mensal dos pluviômetros: Córrego do Jenipapo – Cemaden e PCD 2 – Cemaden (período junho/2019 a setembro/2020).



Fonte: Autora.

Figura 78 - Evento Pluviométrico modelado no TRIGRS, para a microbacia Córrego do Jenipapo.



Fonte: Autora.

### 5.5.2 Parâmetros utilizados

Na análise de suscetibilidade através do TRIGRS, foram utilizados parâmetros geotécnicos (ângulo de atrito, coesão, peso específico do solo saturado e natural, condutividade hidráulica saturada) de forma constante para toda a microbacia, considerando a média aritmética de cada parâmetro usado. Para a microbacia Córrego do Jenipapo utilizou-se os parâmetros encontrados nos estudos realizados

por Lafayette (2000) e Lima (2002), apresentados no item 5.1, e para a microbacia córrego do morcego utilizou-se os parâmetros obtidos na investigação geotécnica realizada pelo GEGEP/UFPE (2020), apresentados no item 6.1 e 6.2.

Referente ao valor da profundidade inicial do nível de água ( $d$ ), foi utilizado o mesmo valor da profundidade máxima do solo ( $Z_{max}$ ), devido às limitações impostas pelo TRIGRS, que somente permite  $d \leq Z_{max}$  (BAUM et al., 2008). Essa condição inicial é aceitável de acordo com o registro de chuvas dos meses anteriores ao evento analisado, que pode gerar um nível d'água suspenso.

Alguns dos parâmetros hidráulicos como a difusividade hidráulica ( $D_0$ ) e a taxa de infiltração inicial ( $I_{ZLT}$ ) foram determinadas a partir de referências empíricas.

Segundo Iverson (2000), a difusividade hidráulica fornece a velocidade de propagação da variação de poropressão, grandes valores de difusividade hidráulica significam que o sistema apresenta uma rápida propagação de possíveis variações de poropressão (SHIN, 2018). Nesse estudo a difusividade hidráulica foi calculada por:  $D_0 = 100 \times K_{sat}$ , conforme proposto por outros autores que usaram modelo TRIGRS (VIET et al., 2017; TRAN et al., 2017; VIET et al., 2018; MARIN & MATOS, 2019; MARIN et al., 2021).

Já a taxa de infiltração inicial ( $I_{ZLT}$ ), pode ser aproximada pela precipitação média de semanas ou meses (BAUM et al., 2010). Marin et al., (2021), utilizaram a precipitação acumulada 30 dias anterior ao evento pluviométrico modelado para estimar o  $I_{ZLT}$ . Essa metodologia foi adotada na atual pesquisa para estimar o  $I_{ZLT}$ , conforme o apresentado na Equação 19, para a microbacia Córrego do Morcego e a Equação 20 para a Microbacia Córrego do Jenipapo.

$$I_{ZLT} = \frac{163,6mm}{30 \text{ dias}} = \frac{0,1636m}{2592000s} = 6,3 \times 10^{-8} \text{ m/s} \quad (19)$$

$$I_{ZLT} = \frac{173,6mm}{30 \text{ dias}} = \frac{0,1736m}{2592000s} = 6,7 \times 10^{-8} \text{ m/s} \quad (20)$$

O teor de umidade volumétrica saturada ( $\theta_s$ ), o teor de umidade volumétrica residual do solo ( $\theta_r$ ) e o parâmetro de ajuste  $\alpha$ , foram extraídos através do ajuste da

curva característica do solo pelo do modelo proposto por Gardner (1958). Esse modelo foi desenvolvido para solos com distribuição de poros unimodais, consequentemente não se ajusta bem as curvas bimodais apresentadas em Lafayette (2000) e Lima (2002) e obtidas nos ensaios realizados no presente trabalho. Desta forma optou-se por utilizar o modelo de Gardner (1958) para ajustar o primeiro trecho da curva, que inclui o primeiro ponto de entrada de ar, referente a dessaturação macroestrutural do solo.

O parâmetro  $m_{max}$  indica duas condições diferentes do subsolo:  $m_{max}$  negativo aplica-se quando a permeabilidade do solo é relativamente uniforme com a profundidade e usa a Equação 9 para cálculo da poropressão;  $m_{max}$  positivo se aplica quando ocorre uma diminuição drástica da permeabilidade em uma profundidade finita, por exemplo, em áreas onde a camada superficial de solo mais permeável se sobrepõe à rocha sólida relativamente impermeável, para o cálculo da poropressão é utilizado a Equação 10. Um valor positivo de  $m_{max}$  também determina quantos termos da série infinita na Equação 10 serão usados no cálculo das poropressões. Baum et al., (2008) indicam que a série converge rapidamente e que 20 termos fornecem precisão suficiente para a maioria dos casos.

O parâmetro  $m_{max}$  foi determinado de acordo da variação da condutividade hidráulica saturada do solo em profundidade, observada a partir dos ensaios para obtenção da permeabilidade em campo, utilizando permeâmetro *Guelph*. Para a microbacia Córrego do Jenipapo utilizou-se os resultados encontrados nos trabalhos de Lafayette (2000) e Lima (2002), e para a microbacia córrego do morcego utilizou-se os resultados na investigação geotécnica realizada pelo GEGEP/UFPE, conforme esses ensaios, foi observada que há uma pequena variação da permeabilidade em profundidade, portanto na modelagem utilizou-se  $m_{max} = -100$ .

### 5.5.3 Cenários analisados

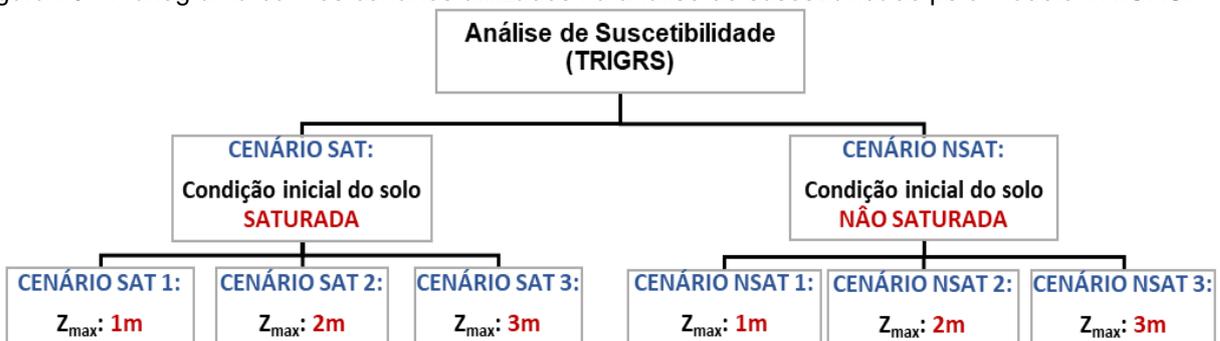
As análises de suscetibilidade no TRIGRS, foram realizadas considerando dois cenários. O primeiro cenário (cenário SAT) considerou o modelo de infiltração para as condições iniciais do solo saturado e no segundo (cenário NSAT), para um solo inicialmente não saturado. Essas análises assumem que o processo de infiltração é vertical, unidimensional com fluxo predominantemente vertical. Para o cenário SAT

admite-se também que a infiltração e a condutividade hidráulica são aproximadamente iguais ao coeficiente de permeabilidade saturada e que difusividade hidráulica é aproximadamente constante.

As análises do cenário NSAT são realizadas pois o nível d'água não foi encontrado em nenhuma das sondagens executadas nas áreas. As análises do cenário SAT são realizadas, visando simular um período de chuvas intensas, precedida pela ocorrência de chuvas moderadas que podem vir a saturar o solo.

Foi alterado também, a profundidade máxima do solo para calcular a poropressão e o FS ( $Z_{max}$ ), obtendo-se, portanto, três grupos para cada cenário: SAT1, SAT2 e SAT3 (cenário SAT) e NSAT1, NSAT2 e NSAT3 (cenário NSAT), referentes às profundidades de solo de 1, 2 e 3m (Figura 79). O objetivo dessa variação foi analisar o papel exercido pela espessura do solo em ambos os modelos e tentar determinar as possíveis profundidades das superfícies de ruptura. Esses valores foram determinados com base em quatro critérios: I) a profundidade da coleta de amostras indeformadas para a determinação dos parâmetros geotécnicos; II) segundo pesquisas anteriores que constataram que a maioria dos deslizamentos que ocorrem nos morros da RMR são translacionais rasos com até 3m de profundidade (Gusmão et al., 1997 e Lima, 2002); III) contraste do  $N_{SPT}$  observado nos perfis de sondagens realizadas nas áreas; e IV) a variação do perfil de umidade medidos pelas PCDs geotécnicas. Os itens III e IV podem ser um indicativo da profundidade da provável superfície de ruptura.

Figura 79 - Fluxograma com os cenários utilizados na análise de suscetibilidade pelo modelo TRIGRS.



Fonte: Autora.

#### 5.5.4 Validação dos mapas de suscetibilidade – Método LR<sub>class</sub>

Após as análises de suscetibilidade é selecionado o primeiro dia mais crítico de cada cenário para realizar a validação do mesmo por meio do método LR<sub>class</sub>. É considerado crítico o primeiro dia que apresentar a maior porcentagem de área com  $FS \leq 1$ .

O método LR<sub>class</sub> representa a relação entre a porcentagem de ocorrências dentro de uma classe específica do Fator de Segurança (FS) e a porcentagem de área de ocorrências previstas pelo modelo (MARIN et al., 2021).

A validação das previsões realizadas pelo modelo TRIGRS foi feita a partir de uma análise de concordância entre os mapas de suscetibilidade gerados sob as condições impostas pelos cenários SAT 1, SAT 2, SAT 3, NSAT 1, NSAT 2, NSAT 3 e o mapa de registro de ocorrências de deslizamentos entre os anos de 2015 e 2020, apresentado no item 4.7, para cada microbacia. Para isso foi utilizado o método LR<sub>class</sub>, que é utilizado para validar modelos de suscetibilidade onde o inventário apresenta apenas o número e localização das ocorrências, dispensando características como as dimensões do movimento.

Devido as análises realizadas considerarem um evento pluviométrico crítico, superior à média mensal, e classificado como excessivo e intenso de acordo com os critérios de Previsões probabilísticas do CPTEC (2020), o processo de validação incluiu as ocorrências registradas entre o ano de elaboração do MDT (2015) e o ano de 2020 (data limite dos dados de registro de ocorrências disponibilizados pela Defesa Civil). Assim, considerando que uma chuva crítica pode gerar maior quantidade de áreas instáveis, pode-se justificar a validação dos mapas de suscetibilidade gerados por esse evento pluviométrico com os deslizamentos ocorridos de 2015 (ano de elaboração do MDT) até 2020 (data limite do registro de deslizamento disponibilizado). Metodologia semelhante foi utilizada por Salciarini et al. (2006) que realizou um inventário com deslizamentos desencadeados por diversas chuvas para validar os mapas de suscetibilidades gerados a partir evento pluviométrico crítico. Pois a chuva utilizada, por ser considerada crítica, pode desencadear outras ocorrências, além das registrada no evento em si.

Nos anos de 2015 a 2020 foram registrados 53 deslizamentos na microbacia Córrego do Jenipapo e 51 deslizamentos na microbacia Córrego do Morcego.

## 5.6 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Este capítulo apresentou a metodologia utilizada nas etapas de levantamento de trabalhos realizados nas áreas de estudo, os procedimentos de investigação geotécnica de campo e laboratório realizados, os dados utilizados coletados a partir das PCDs geotécnicas e os parâmetros e cenários analisados na modelagem dos mapas de suscetibilidade ao deslizamento das microbacias, utilizando o TRIGRS.

Na microbacia Córrego do Jenipapo foram utilizados os parâmetros geotécnicos apresentados por Lafayette (2000) e Lima (2002), enquanto que na microbacia Córrego do Morcego foram utilizados os parâmetros obtidos a partir do banco de dados do GEGEP/UFPE, proveniente da realização de apoios técnicos em trabalhos realizados na área.

Em campo, na microbacia Córrego do Morcego, foram realizados ensaios de sondagem a percussão SPT – NBR 6484 (ABNT, 2001), determinação da permeabilidade com permeâmetro Guelph (SOILMOISTURE, 2012) e coleta de amostras deformadas e indeformadas do tipo bloco NBR 9604/2016 - Abertura de Poços e Trincheiras de Inspeção de Solos com Retirada de Amostras Deformadas e Indeformadas (ABNT, 2016).

Em laboratório foram submetidas aos ensaios de caracterização física (NBR 6457/2016, 6458/2017, 7181/2018, 13602/2020, 7180/2016 e 6459/2016), ensaios de resistência (cisalhamento direto natural e inundado) e determinação da curva característica (método do papel filtro).

Foram apresentados alguns parâmetros utilizados na modelagem dos mapas de suscetibilidade utilizando o modelo matemático TRIGRS, os eventos pluviométricos crítico e os cenários utilizados. Foram apresentados os 6 cenários a serem utilizados no TRIGRS para cada microbacia: SAT 1, SAT 2, SAT 3, para as profundidades de 1, 2 e 3 metros respectivamente e modo de infiltração em solo saturado; e NSAT 1, NSAT 2 e NSAT 3, para as profundidades de 1, 2, e 3 metros respectivamente e modo de infiltração em solo não saturado.

Por fim, foi apresentado o método utilizado para validar os mapas de suscetibilidade obtidos com o TRIGRS para as duas microbacias, o método LR<sub>CLASS</sub>.

## 6 APRESENTAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS DA INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA

O presente capítulo tem como objetivo apresentar e discutir os resultados colhidos através de investigação geotécnica em atividades de apoio técnico realizada pelo GEGEP / UFPE em 2020, na microbacia Córrego do Morcego, desenvolvidas em campo e laboratório. Tais resultados serão comparados com dados já presentes na literatura verificando a coerência dos mesmos e posteriormente serão utilizados nas análises de suscetibilidade utilizando o TRIGRS.

### 6.1 INVESTIGAÇÃO E ENSAIOS DE CAMPO – GEGEP / UFPE

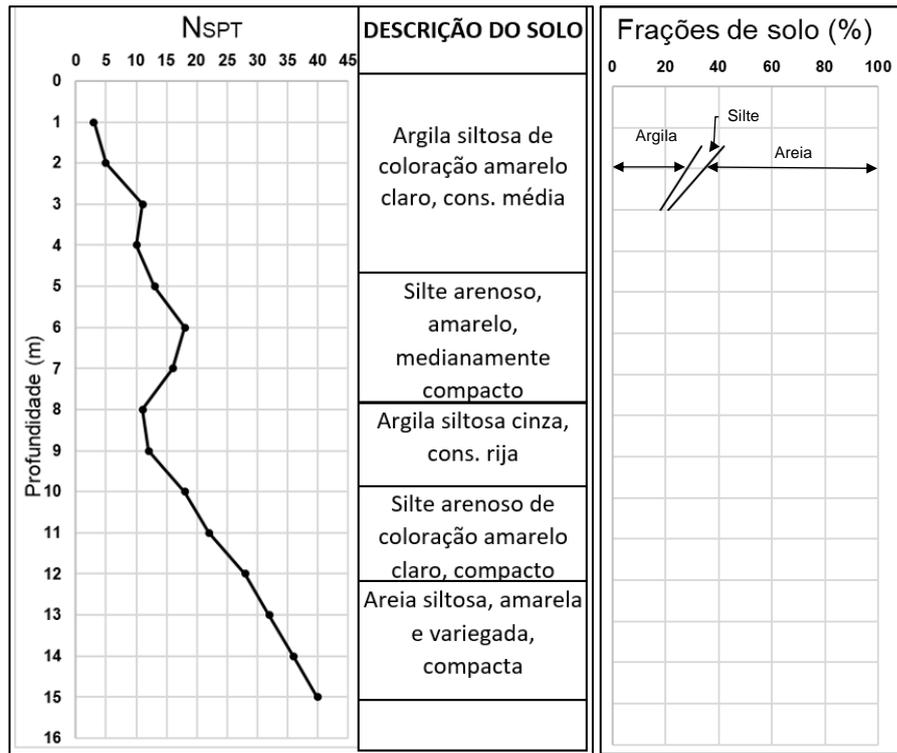
Especificamente nesta subseção serão tratados os resultados dos trabalhos realizados em campo, sendo eles: Perfil de sondagem SPT e resultados de permeabilidade *in situ*, em profundidade, obtidos através do permeâmetro *Guelph*.

#### 6.1.1 Sondagem a percussão SPT

Conforme mencionado no capítulo 5, executou-se as sondagens a percussão nos pontos P-05, P-07, P-08 e P-09. A Figura 80, Figura 81, Figura 82 e Figura 83 apresentam os resultados obtidos nessas sondagens, mostrando a descrição do material feita pelo sondador em campo e o  $N_{SPT}$ . A Figura 80, Figura 81 e Figura 82 ainda apresentam as frações componentes do solo (divididas em argila, silte e areia), obtidas com base nos resultados de ensaios de granulometria realizados nas amostras coletadas do amostrador padrão SPT.

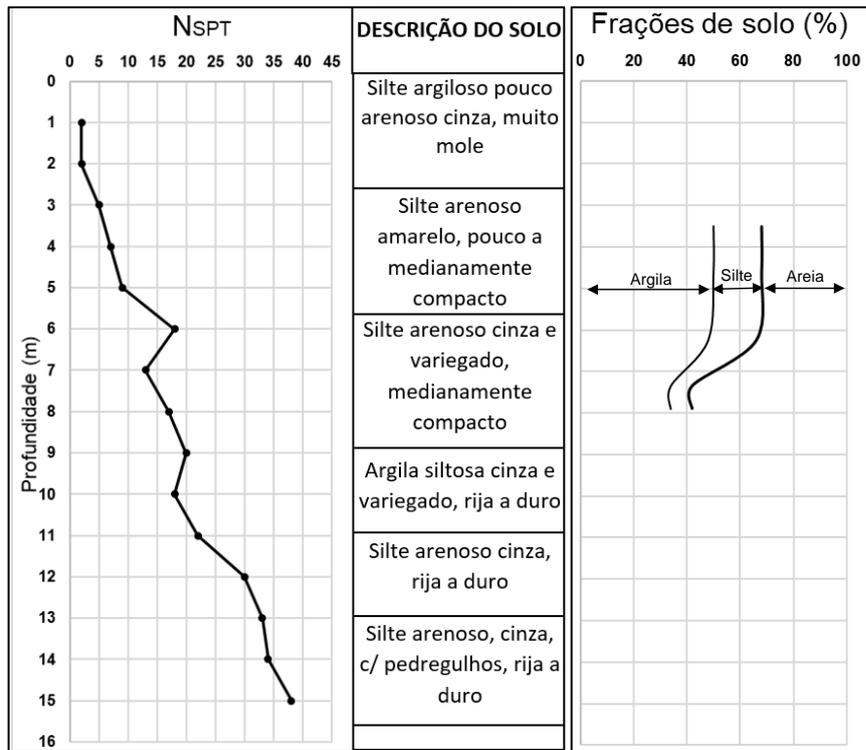
As classificações táctil-visual apresentadas nos boletins de sondagem fornecidos pela empresa responsável pela execução dos furos, apresentam perfis, onde a maioria das camadas de solo são classificadas como siltosas, porém quando comparados com os resultados da granulometria realizada em laboratório, as amostras apresentaram uma fração siltosa pequena em sua composição em comparação com as frações de areia e argila.

Figura 80 - P-05 - Perfil de sondagens SPT; descrição táctil-visual em campo; granulometria em laboratório.



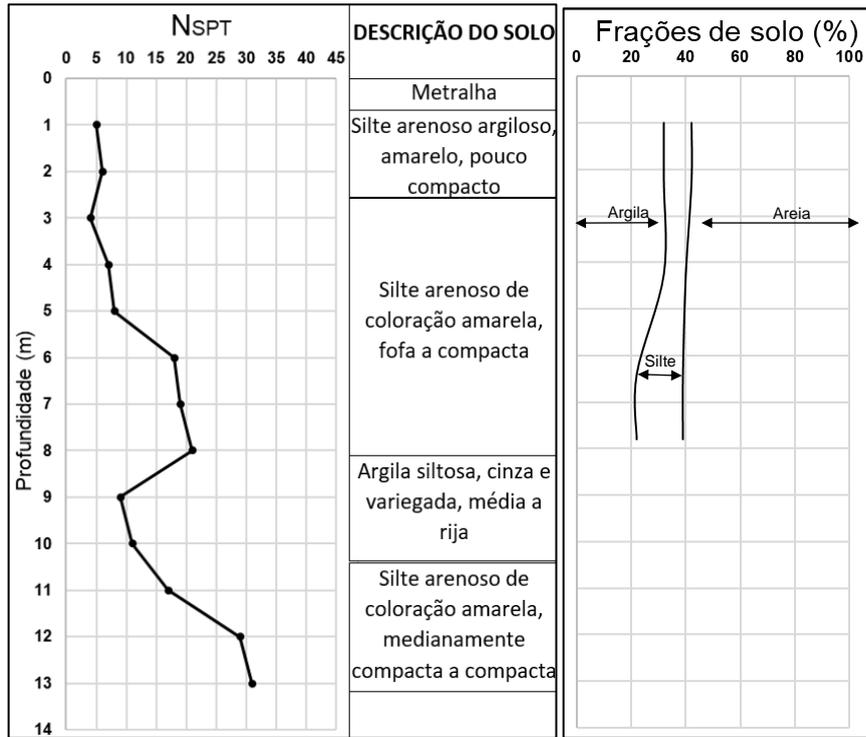
Fonte: Autora.

Figura 81 - P-07 - Perfil de sondagens SPT; descrição táctil-visual em campo; granulometria em laboratório.



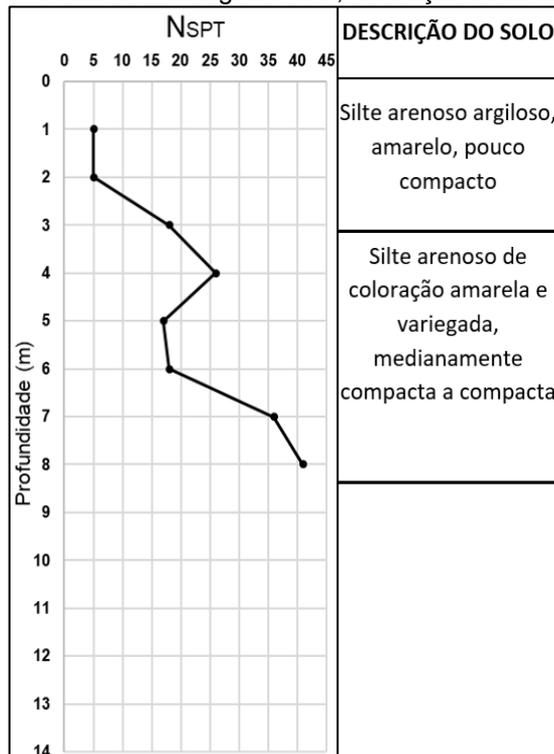
Fonte: Autora.

Figura 82 - P-08 - Perfil de sondagens SPT; descrição táctil-visual em campo; granulometria em laboratório.



Fonte: Autora.

Figura 83 - P-09 - Perfil de sondagens SPT; descrição táctil-visual em campo.



Fonte: Autora.

No P-05, a classificação táctil-visual classificou o solo dos primeiros 4,6m como uma argila siltosa, porém após o ensaio de granulometria nos 3,0m iniciais foi constatado a presença de mais de 60% de solo arenoso, cerca de apenas 30% de argila e uma porcentagem ainda menor de silte. Já na sondagem P-07, a classificação táctil-visual apresenta um solo praticamente siltoso ao longo de toda profundidade, exceto por uma camada argilo-siltosa de 8,85 a 10,7 metros, porém os resultados de laboratório apontaram que entre 3,5 a 6,5 metros, o solo apresenta uma distribuição equilibrada entre as granulometrias, com a fração de argila mais predominante (cerca de 45%), entre 6,5 e 7,8 metros os ensaios apontaram um aumento na fração arenosa, que aparentemente foi percebida pelo sondador que mudou a classificação silte argiloso para silte arenoso, porém mais uma vez a classificação principal como silte, pode ser equivocada visto que a fração siltosa é a menos representativa para esta camada.

As sondagens SPT do P-08 e P-09 apresentaram classificação táctil-visual predominantemente silte arenosa até as profundidades sondadas, porém as amostras coletadas em P-08 apresentaram uma fração predominante e quase constante ao longo da profundidade, até 7,8m, de areia com cerca de 60% da composição granulométrica. No P-09 não houve coleta de amostras para realização de ensaio de granulometria em laboratório.

Em geral, os valores de  $N_{SPT}$  apresentaram valores baixos de  $N_{SPT}$  (2 a 5) até uma profundidade de aproximadamente 3 metros. A partir de 4 metros observa-se um ganho resistência:  $N_{SPT} \geq 11$  no furo P-05;  $N_{SPT} \geq 7$  nos furos P-07 e P-08; e  $N_{SPT} \geq 18$  no furo P-09. Este contraste pode influenciar no limite da superfície de ruptura de deslizamentos, ficando limitada em aproximadamente 3 metros de profundidade. O nível de água não foi encontrado em nenhum relatório de sondagem SPT.

### **6.1.2 Ensaio para determinação da condutividade hidráulica com permeâmetro *Guelph***

Conforme mencionado no capítulo 5, executou-se o ensaio com o permeâmetro *Guelph* nos pontos P-02, P-06 e P-07 (Figura 50). A Tabela 12 e a Figura 84 apresentam os resultados obtidos nesse ensaio, mostrando a permeabilidade encontrada para cada profundidade ensaiada e a descrição táctil-visual do solo.

Pelos resultados obtidos, observa-se que os valores da condutividade hidráulica saturada dos solos estudados variam de  $7,84 \times 10^{-9}$  a  $6,51 \times 10^{-7}$  m/s.

No ponto P-06 e P-07, a condutividade hidráulica saturada é praticamente constante até 3m, na ordem de  $10^{-7}$  m/s, e depois decresce para valores na ordem de  $10^{-9}$  m/s na profundidade de 4m.

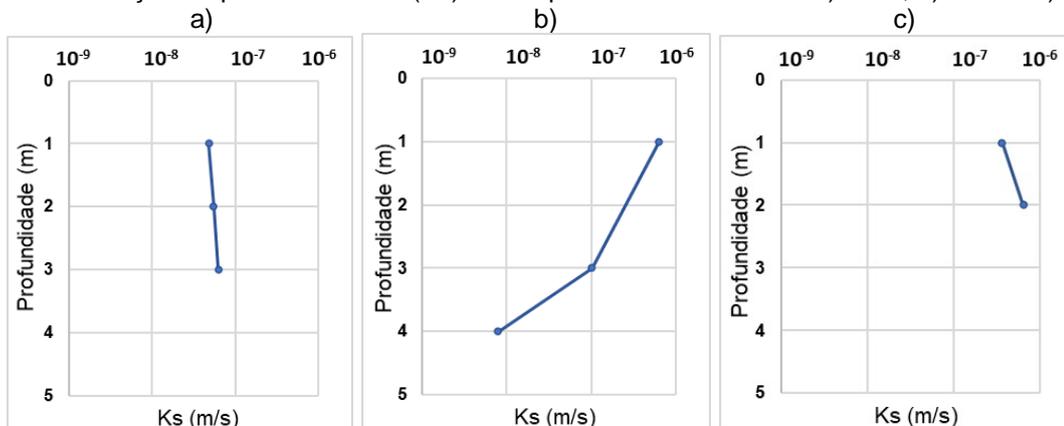
Os solos do ponto P-02 apresentam basicamente a mesma condutividade hidráulica até a profundidade de 3m, que é na ordem de  $10^{-8}$  m/s. Esses valores são inferiores aos encontrados, até a mesma profundidade (3 metros), nos dos pontos P-06 e P-07, que é na ordem de  $10^{-7}$  m/s.

Tabela 12 - Resumo dos coeficientes de permeabilidade para a microbacia Córrego do Morcego.

COEFICIENTES DE PERMEABILIDADE - MICROBACIA CÓRREGO DO MORCEGO			
Ponto	Profundidade (m)	Descrição Táctil-Visual	PERMEÂMETRO GUELPH
			Coefficiente de Permeabilidade (m/s)
P-02	1	Areia argilosa	$4,82 \times 10^{-8}$
	2		$5,47 \times 10^{-8}$
	3		$6,26 \times 10^{-8}$
P-06	1	Areia argilosa	$6,34 \times 10^{-7}$
	3		$1,02 \times 10^{-7}$
	4	Argila arenosa	$7,84 \times 10^{-9}$
P-07	1	Areia argilosa	$3,66 \times 10^{-7}$
	2		$6,51 \times 10^{-7}$

Fonte: Autora.

Figura 84 - Variação da permeabilidade ( $K_s$ ) com a profundidade do solo. a) P-02; b) P-06 e c) P-07



Fonte: Autora

## 6.2 ENSAIOS DE LABORATÓRIO – GESEP / UFPE

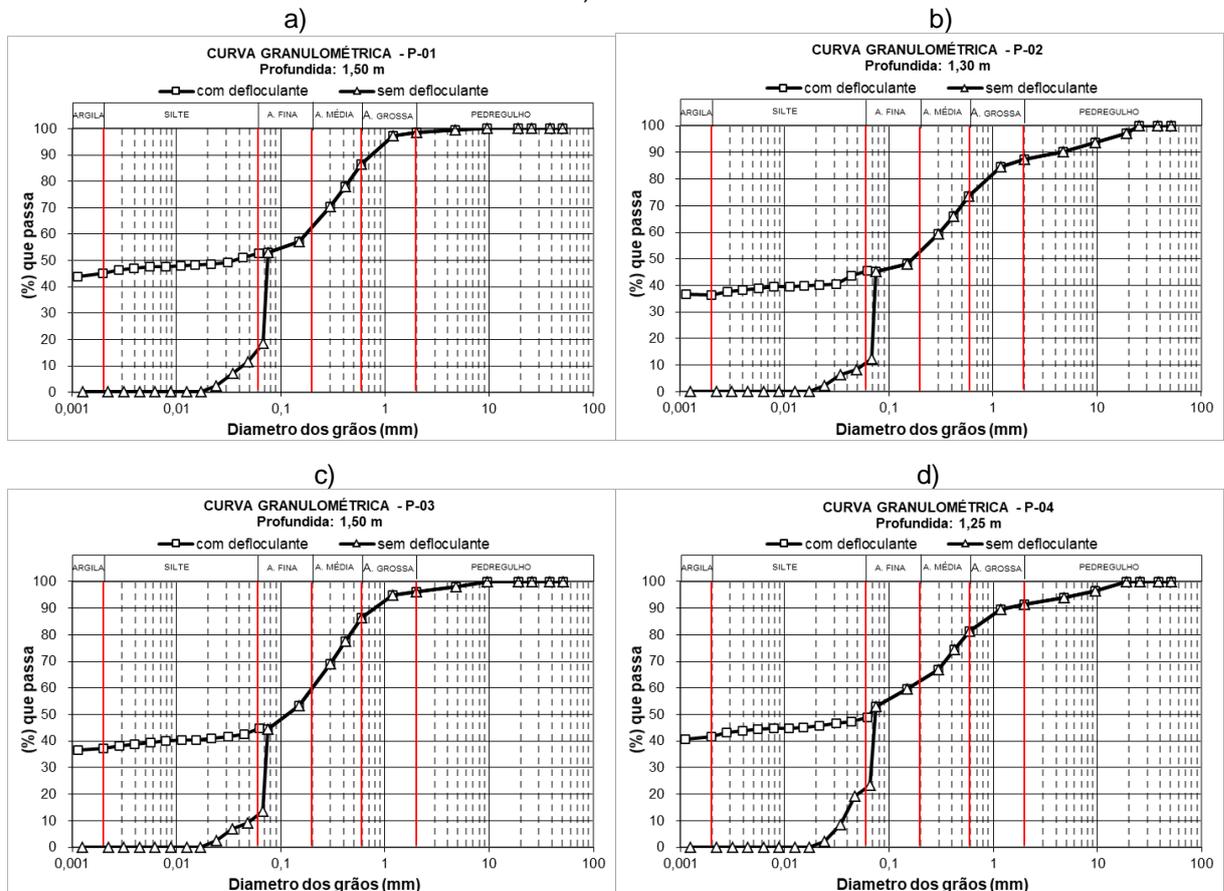
Nesta seção encontra-se a apresentação e análise dos resultados obtidos em laboratório. Inicialmente, a caracterização física dos solos estudados será exposta. Em seguida serão apresentadas a caracterização mecânica.

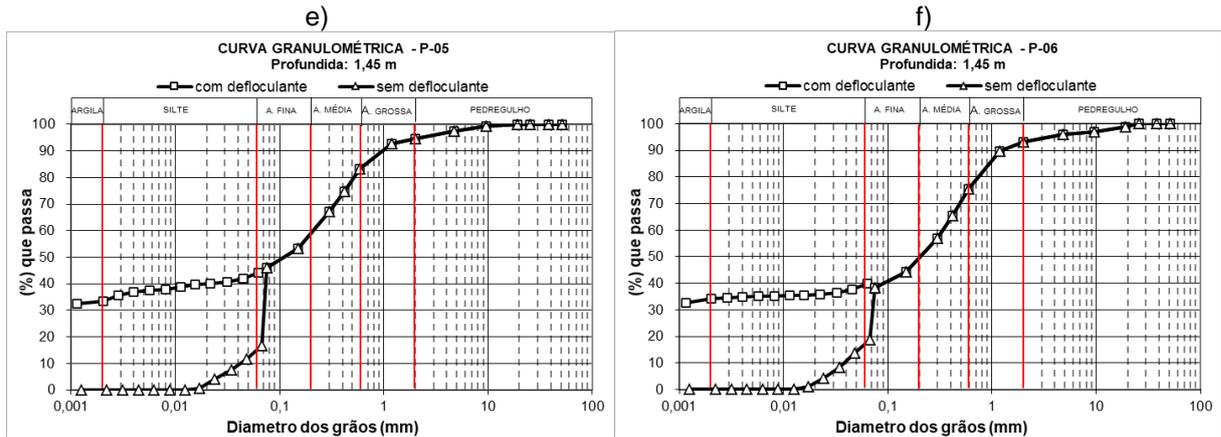
### 6.2.1 Ensaios de caracterização física

Como descrito no capítulo 5, executou-se as sondagens a percussão nos pontos P-01, P-02, P-03, P-04, P-05 e P-06.

A Figura 85 apresenta as curvas granulométricas com e sem o uso de defloculante.

Figura 85 - Curva Granulométrica com e sem defloculante: a) P-01; b) P-02; c) P-03; d) P-04; e) P-05; f) P-06.





Fonte: Autora.

Observa-se que todas as amostras apresentaram grande variação dos percentuais de argila e silte, quando comparadas com as curvas obtidas com e sem o uso do defloculante. Onde, nos ensaios que não fez uso de defloculante, as frações de argila passaram a ser nulas, conseqüentemente aumentando o percentual de areia fina e silte, em comparação os resultados para as mesmas amostras ensaiadas com o uso do defloculante.

Este resultado indica que a argila e as partículas mais finas de silte presente nas amostras em seu estado natural (sem uso de defloculante) possui a tendência de se apresentar agregada entre si ou aderidas aos grãos de areia. Isto indica que a fração argilosa do solo é completamente não dispersiva, ou seja, pouco erodível, segundo a NBR 13602/2020.

Esse fato está relacionado às propriedades cimentantes dos óxidos de ferro e alumínio, que produz aglutinações de argila, acarretando uma estrutura macro agregada (Albuquerque et al., 2006).

Os limites de Atterberg, assim como a composição granulométrica, estão registrados na Tabela 13. Analisando os índices de plasticidade encontrados, pode-se perceber que todas as amostras foram classificadas como mediamente plásticas ( $7 < IP < 15$ ) segundo a classificação sugerida por Jenkins (Caputo, 1987).

A partir das informações apresentadas, as amostras de solo dos pontos P-02, P-03, P-05 e P-06 se classificam como SC (areia argilosa), e as amostras de solo dos pontos P-01 e P-04 se classificam como CL (argila de baixa compressibilidade), segundo a Classificação Unificada (SUCS).

Tabela 13 - Resultado dos ensaios de caracterização física.

AMOSTRA	PROF. (m)	Descrição / (SUCS)	COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA (%)						LIMITES DE ATTERBERG (%)			DENSIDADE REAL (g/cm <sup>3</sup> )
			Pedreg.	Areia Grossa	Areia Média	Areia Fina	Silte	Argila	LL	LP	IP	
P-01	1,50	Argila arenosa / CL	1	12	25	10	7	45	34,0	24,7	9,3	2,646
P-02	1,30	Areia argilosa / SC	12	14	21	8	9	36	39,0	27,0	12,0	2,632
P-03	1,50	Areia argilosa / SC	4	10	26	15	7	38	30,0	22,7	7,3	2,653
P-04	1,25	Argila arenosa / CL	9	9	19	14	7	42	35,8	24,8	11,0	2,639
P-05	1,45	Areia argilosa / SC	5	12	24	15	10	34	30,3	21,7	8,6	2,645
P-06	1,45	Areia argilosa / SC	6	16	28	10	6	34	38,2	22,7	15,5	2,625

Fonte: Autora.

### 6.2.2 Determinação da Curva característica do solo

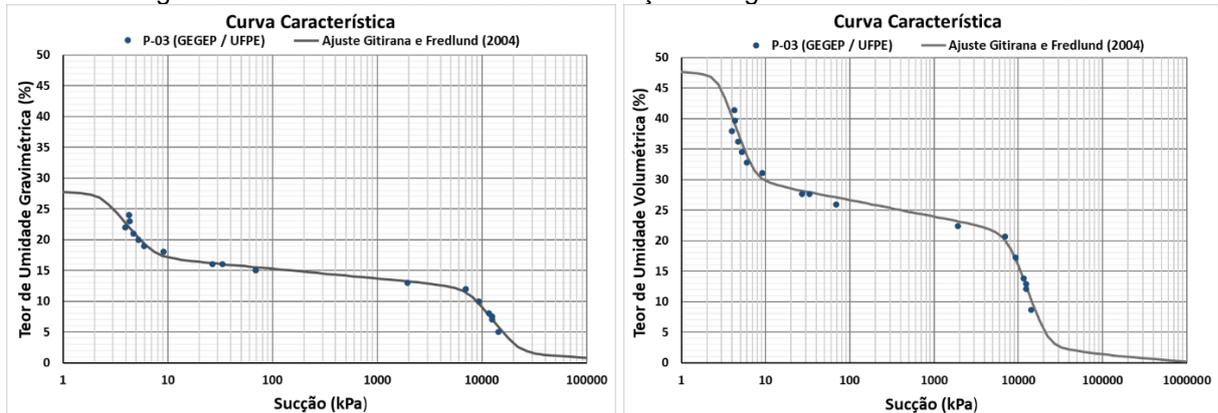
Como descrito no capítulo 5, a curva característica foi obtida por meio do método do papel filtro sob a trajetória de secagem para as amostras de solo do ponto P-03. Os cálculos de umidade volumétrica foram feitos sem levar em consideração as variações volumétricas sofridas pelos corpos-de-prova durante a execução do ensaio, essa simplificação foi possível pois foi observado que essas variações foram insignificantes. Assim, o teor de umidade volumétrico foi estimado a partir do teor de umidade gravimétrico e da massa específica natural inicial do corpo de prova.

Além disso, foram plotadas apenas as curvas em função da sucção mátrica (papel em contato com o solo), pois o tempo de equalização disponível para realização do ensaio não foi suficiente para a obtenção da sucção total (papel sem contato com o solo), que segundo Marinho (1997) pode chegar a mais de 30 dias de tempo de equalização a depender do tipo de solo.

A Figura 86 apresenta as curvas características de retenção de água no solo para o ponto P-03, em função do teor de umidade gravimétrica e do teor de umidade volumétrica ajustadas pelo modelo de Gitirana e Fredlund (2004). Esse modelo foi adotado porque as curvas características desse estudo apresentaram formato bimodal, conforme o apresentado no item 2.3.2, típico de solos tropicais, caracterizado

pelo formato de “sela”. Este formato sugere que o solo ensaiado apresente um comportamento intermediário entre areia e argila a depender do nível de sucção.

Figura 86 - Curvas características de retenção de água no solo da amostra P-03.



Fonte: Autora.

A curva apresenta três trechos distintos. Primeiro, observa-se um ponto de entrada de ar que corresponde ao início da dessaturação da macroestrutura do solo, em seguida, observa-se um patamar, onde para pequenas variações no teor de umidade, há grandes variações de sucção no solo, e por fim, um segundo ponto de entrada de ar, que corresponde ao início da perda de água dos microporos.

Os parâmetros de ajuste da curva característica pelo modelo de Ghitirana e Fredlund (2004), estão expostos na Tabela 14.

Tabela 14 - Parâmetros de ajuste da curva característica, pelo modelo de Ghitirana & Fredlund (2004) do ponto P-03.

AMOSTRA	PARAMETROS	R <sup>2</sup>
P-03 (GEGEP/UFPE)	$\theta_{sat} = 48 \%$	0,99
	$\Psi_{b1} = 2,8 \text{ kPa}$	
	$\Psi_{res1} = 7,00 \text{ kPa}$	
	$\theta_{res1} = 61 \%$	
	$\Psi_{b2} = 7500 \text{ kPa}$	
	$\theta_b = 46 \%$	
	$\Psi_{res2} = 22000 \text{ kPa}$	
	$\theta_{res2} = 3,9 \%$	
	$a = 0,057$	
	$d_1 = 5,957$	
	$d_2 = 2,308$	
	$d_3 = 5,065$	

Fonte: Autor.

### 6.2.3 Cisalhamento direto

Como descrito no capítulo 5, realizou-se o ensaio de cisalhamento direto nas amostras de solo P-01, P-02, P-03, P-04, P-05 e P-06. Na Figura 87, Figura 88, Figura 89, Figura 90, Figura 91 e Figura 92 estão apresentadas as curvas tensão cisalhante ( $\tau$ ) versus deformação específica horizontal ( $\epsilon$ ) e as envoltórias de Mohr-Coulomb, nas condições natural e inundada.

As condições dos corpos de prova utilizados na realização dos ensaios de cisalhamento direto, estão apresentadas na tabela do Apêndice 1.

Figura 87 - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto para as amostras P-01: a) curva  $\tau \times \epsilon$  na umidade natural; b) curva  $\tau \times \epsilon$  umidade inundada; c) envoltória de Mohr-Coulomb.

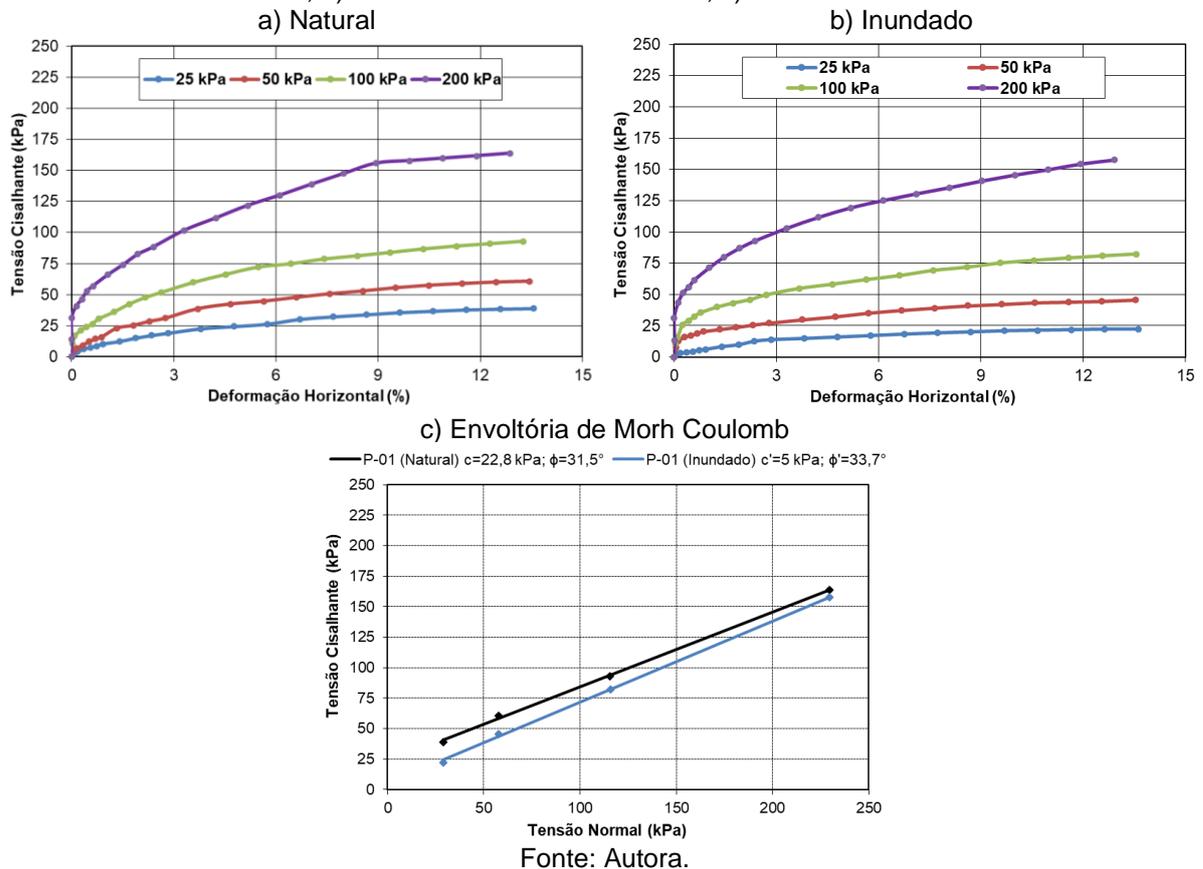


Figura 88 - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto para as amostras P-02: a) curva  $\tau \times \epsilon$  na umidade natural; b) curva  $\tau \times \epsilon$  umidade inundada; c) envoltória de Mohr-Coulomb.

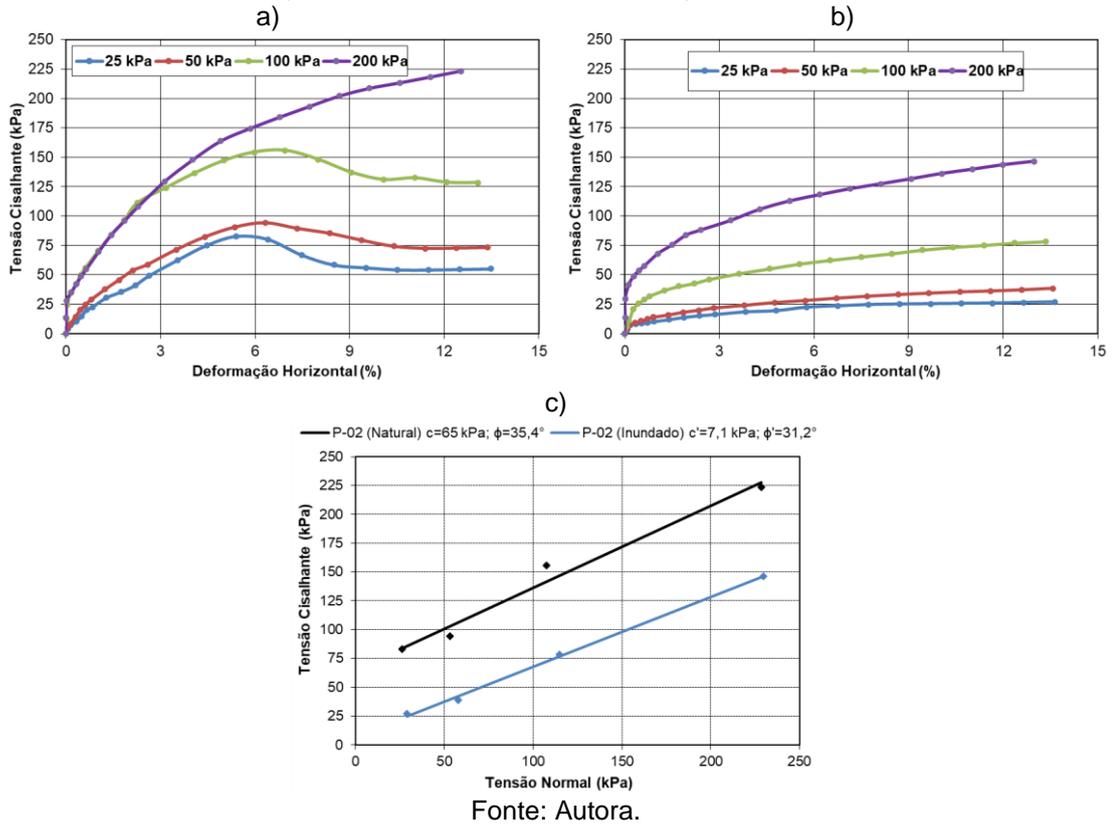


Figura 89 - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto para as amostras P-03: a) curva  $\tau \times \epsilon$  na umidade natural; b) curva  $\tau \times \epsilon$  umidade inundada; c) envoltória de Mohr-Coulomb.

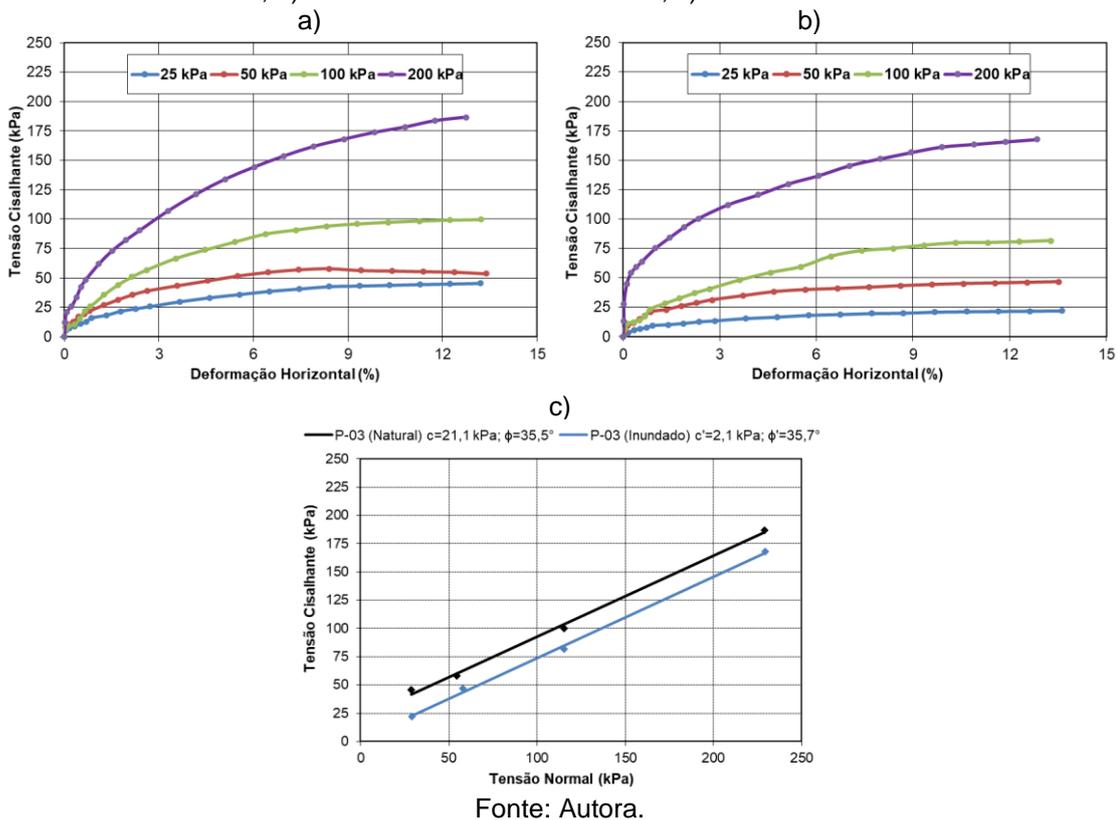


Figura 90 - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto para as amostras P-04: a) curva  $\tau \times \epsilon$  na umidade natural; b) curva  $\tau \times \epsilon$  umidade inundada; c) envoltória de Mohr-Coulomb.

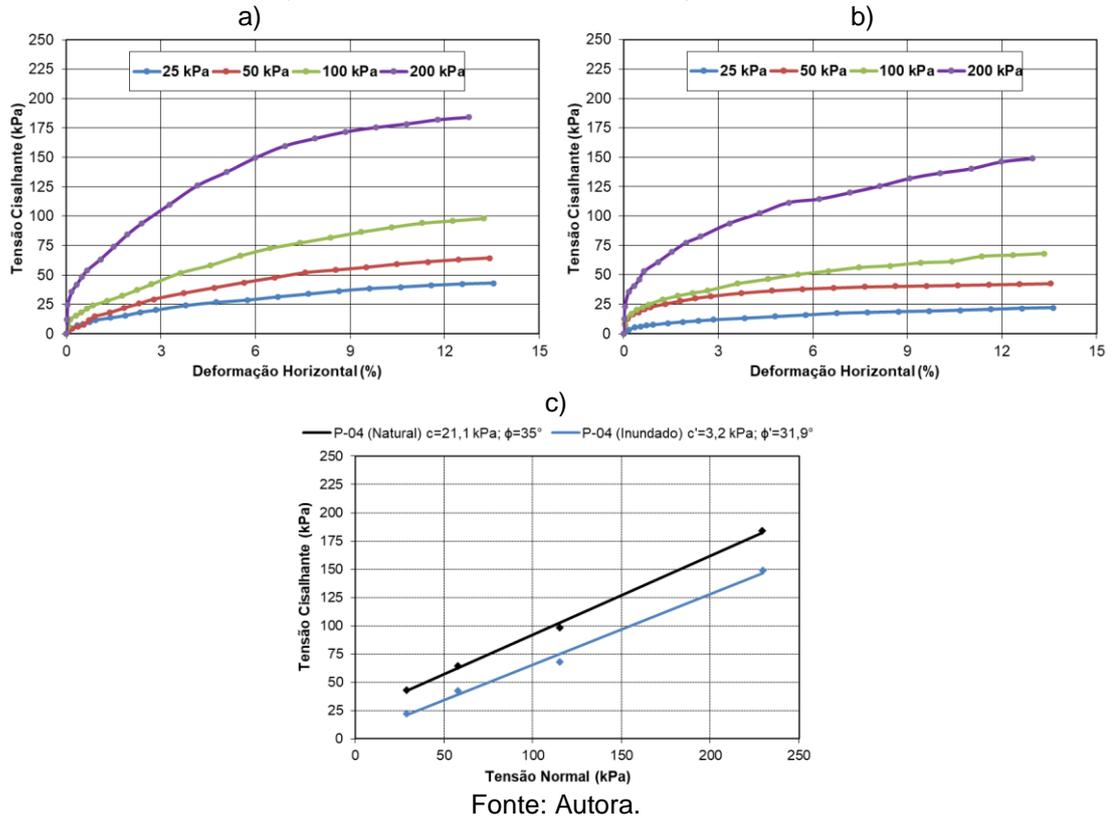


Figura 91 - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto para as amostras P-05: a) curva  $\tau \times \epsilon$  na umidade natural; b) curva  $\tau \times \epsilon$  umidade inundada; c) envoltória de Mohr-Coulomb.

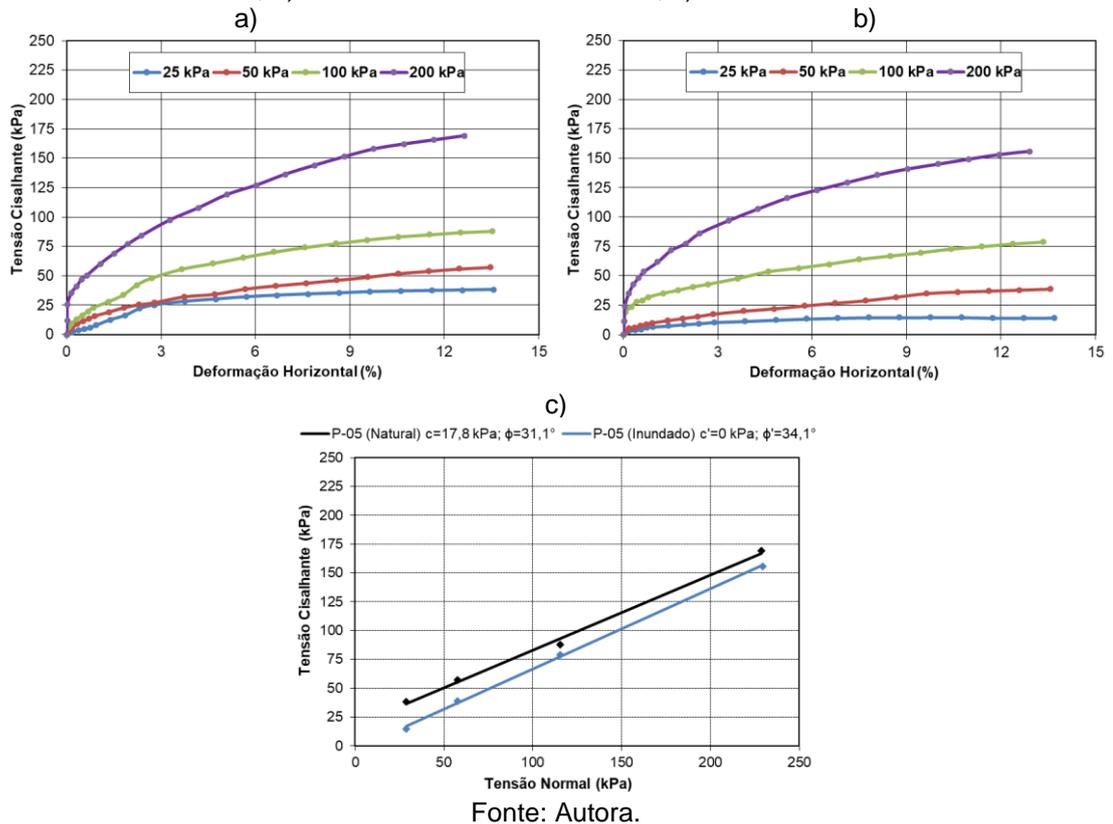
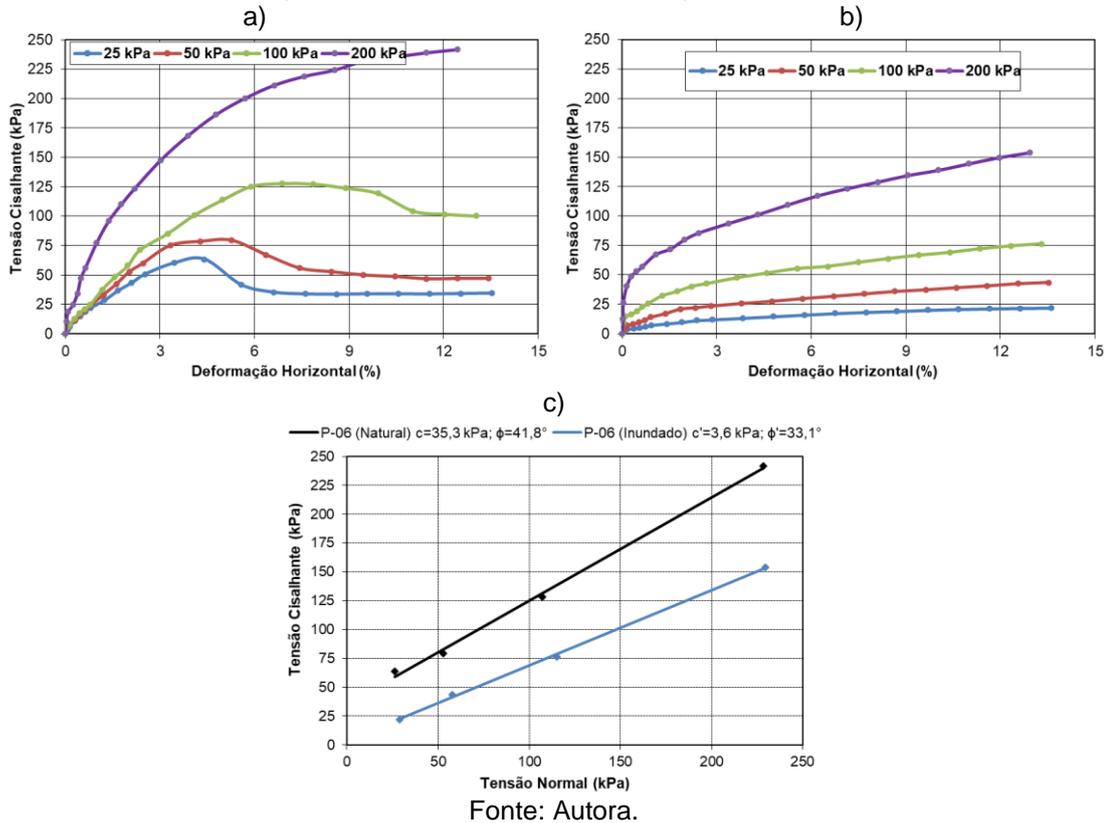


Figura 92 - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto para as amostras P-06: a) curva  $\tau \times \varepsilon$  na umidade natural; b) curva  $\tau \times \varepsilon$  umidade inundada; c) envoltória de Mohr-Coulomb.



De um modo geral, as tensões cisalhantes apresentadas nas curvas  $\tau \times \varepsilon$  das amostras nas condições natural e inundada, apresentam-se crescentes com os deslocamentos horizontais, tendendo a atingir valores constantes com o aumento dos deslocamentos. Este comportamento é típico de materiais que possuem ruptura elasto-plástica, onde o solo apresenta comportamento elástico até certo nível de tensão e a partir do qual toda deformação não elástica permanece.

Em algumas amostras, tanto para condição natural como inundada, os valores os valores máximos de tensão cisalhante não estão tão evidentes, pois estes apresentaram ruptura plástica, onde há uma mobilização crescente das tensões cisalhantes com os deslocamentos. Verifica-se esse comportamento principalmente nas amostras (naturais e inundadas) ensaiadas sob a maior tensão confinante normal (200 kPa).

Um comportamento diferente pode ser observado nas amostras P-02 e P-06 ensaiadas sob tensão confinante normal de 25, 50 e 100 kPa. Nessas amostras, o valor máximo de tensão cisalhante foi evidenciado por um pico, onde após o atingirem o valor máximo, a tensão cisalhante reduz até se estabilizar num valor

aproximadamente constante (residual). Esse comportamento é típico para materiais de ruptura frágil, onde ocorre em materiais com ocorrência de argila dura e rijas ou areias compactas, ou ainda quando há presença de pedregulhos ou concreções no plano de ruptura do ensaio, que pode ter sido o caso das amostras do P-02 e P-06, visto que as curvas granulométricas apontaram 12% e 6% de pedregulho (Tabela 13), respectivamente.

Observando as envoltórias de resistência (Morh-Coulomb), percebe-se que todas as amostras apresentam um bom ajuste linear e certo paralelismo entre as amostras ensaiadas na umidade natural e inundada. Assim, observa-se que à medida que as amostras foram inundadas os parâmetros de resistência foram reduzidos, devido a redução da coesão, enquanto que o ângulo de atrito pouco variou, assemelhando-se a condição conceitual esperada, onde apenas a coesão sofre influência da inundação devido ao efeito da sucção.

A Tabela 15 exibe o resumo dos parâmetros de resistências para todas as amostras submetidas ao ensaio de cisalhamento direto.

Tabela 15 - Resumo dos parâmetros de resistência – Microbacia Córrego do Morcego

RESUMO DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA - MICROBACIA CÓRREGO DO MORCEGO								
Ponto	Profund. (m)	Geologia	Descrição / Classificação (SUCS)	Peso específico saturado (kN/m <sup>3</sup> )	Resistencia ao cisalhamento			
					Inundado		Natural	
					Coesão (kPa)	�ngulo de atrito (�)	Coesão (kPa)	�ngulo de atrito (�)
P-01	1,5	Forma�o Barreiras / Leque Aluvial Proximal	Argila de baixa compressibilidade / CL	17,7	5	33,7	22,8	31,5
P-02	1,3		Areia argilosa / SC	19,4	7,1	31,2	-	35,4
P-03	1,5		Areia argilosa / SC	19,5	2,1	35,7	21,1	35,5
P-04	1,25		Argila de baixa compressibilidade / CL	19,4	3,2	31,9	21,1	35
P-05	1,45		Areia argilosa / SC	18,8	0	34,1	17,8	33,1
P-06	1,45		Areia argilosa / SC	19,7	3,6	33,1	35,3	-

Fonte: Autora.

A Tabela 16 apresenta os parâmetros de resistência encontrados por alguns autores ao estudarem a Formação Barreira em Pernambuco, especificamente o fácies de Leque Aluvial Proximal, facilitando a comparação entre os resultados obtidos na presente dissertação e os resultados disponíveis na literatura.

Percebe-se então que os parâmetros de resistência encontrados para as amostras ensaiadas, encontram-se dentro da faixa de valores encontrados na literatura para solos da Formação Barreiras, fácies Leque aluvial proximal, na região metropolitana de Recife.

Tabela 16 - Parâmetros de resistência de solos da Formação Barreiras em Pernambuco (fácies Leque Aluvial Proximal).

Referência / Local	Fácies	Tipo de ensaio	Descrição / SUCS	Condição do CP	c (kPa)	$\phi$ (°)
Souza Neto (2016) Itapissuma - PE	FB/ Não identificada	Triaxial (CID-C)	Areia Siltosa / SM	Saturado	1,3 – 4,0	34,6 – 35,1
Bandeira (2010) Camaragibe-PE	Formação Barreiras / Leque aluvial proximal	Cis. Direto	Areia Argilosa SC	Inundado	0	35
Bandeira (2003) Camaragibe-PE		Cis. Direto	Silte arenoso ML	Inundado	12	29
Lima (2002) Alto do Reservatório Recife -PE		Cis. Direto	Areia argilosa / SC	Natural	28	31
				Inundado	10	32
Santos (2001) Horto Dois Irmãos Recife-PE		Cis. Direto	Areia argilosa / SC	Natural	13	31
				Inundado	0	30
Lafayette (2000) Alto do Reservatório Recife - PE		Cis. Direto	Areia argilosa / SC	Inundado	7 - 13	24 - 26
Gusmão Filho et al. (1997) Alto do Reservatório Recife - PE		Cis. Direto	Areia argilosa / SC	Natural	20	37
	Inundado			11	33	

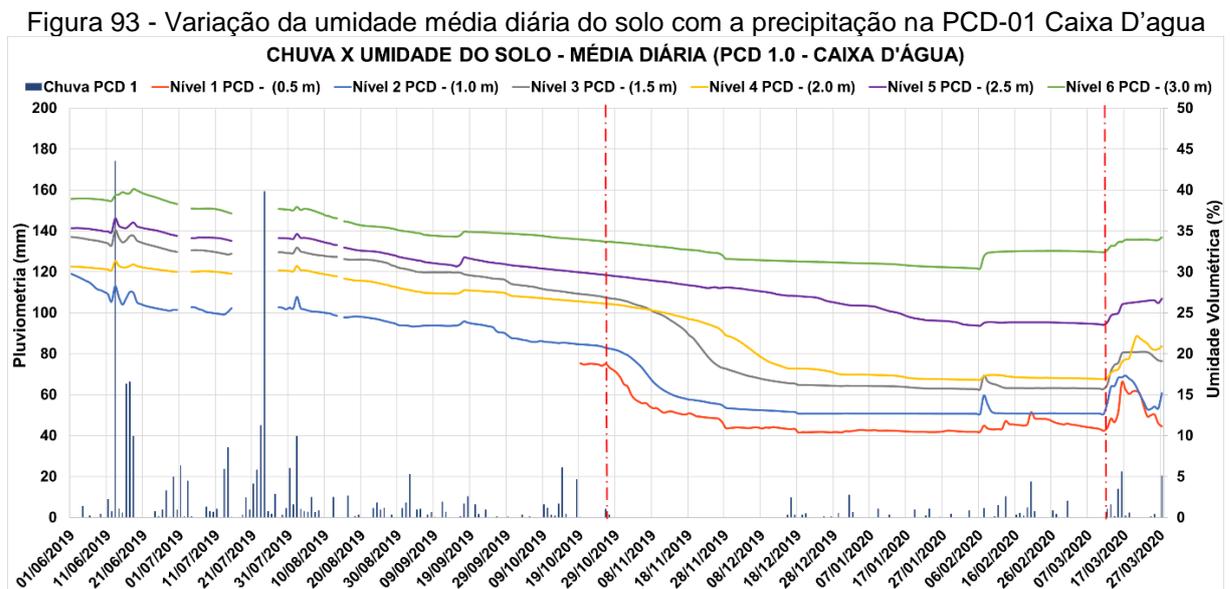
Fonte: Autora.

### 6.3 ANÁLISE DA VARIAÇÃO DE UMIDADE POR MEIO DA PLATAFORMA DE COLETA DE DADOS GEOTÉCNICOS – PCD GEOTÉCNICA

De acordo com o apresentado no item 5.4, foram instaladas PCDs Geotécnicas na RMR, visando relacionar a variação da umidade do solo em profundidade com a chuva em tempo real. A sonda geotécnica tem 3,0m de comprimento e possuem

sensores inseridos a cada meio metro, totalizando 6 sensores por sonda. Devido à proximidade com as áreas de estudo desta dissertação, serão discutidos os dados das PCD - 1 Caixa D'água e PCD - 2 Nova Descoberta, próximas as microbacias Córrego do Morcego e Córrego do Jenipapo, respectivamente.

A Figura 93 apresenta o gráfico que associa a umidade média diária do solo com a chuva na PCD-1. Para esta, são apresentados dados de junho de 2019 até março de 2020, após essa data o equipamento foi danificado e passou a não registrar medidas confiáveis. Em março de 2021, a PCD-1 foi reinstalada e passou a registrar os dados normalmente. As leituras do sensor localizado em 0,5 metro de profundidade foram desconsideradas até setembro de 2019, devido a falhas.



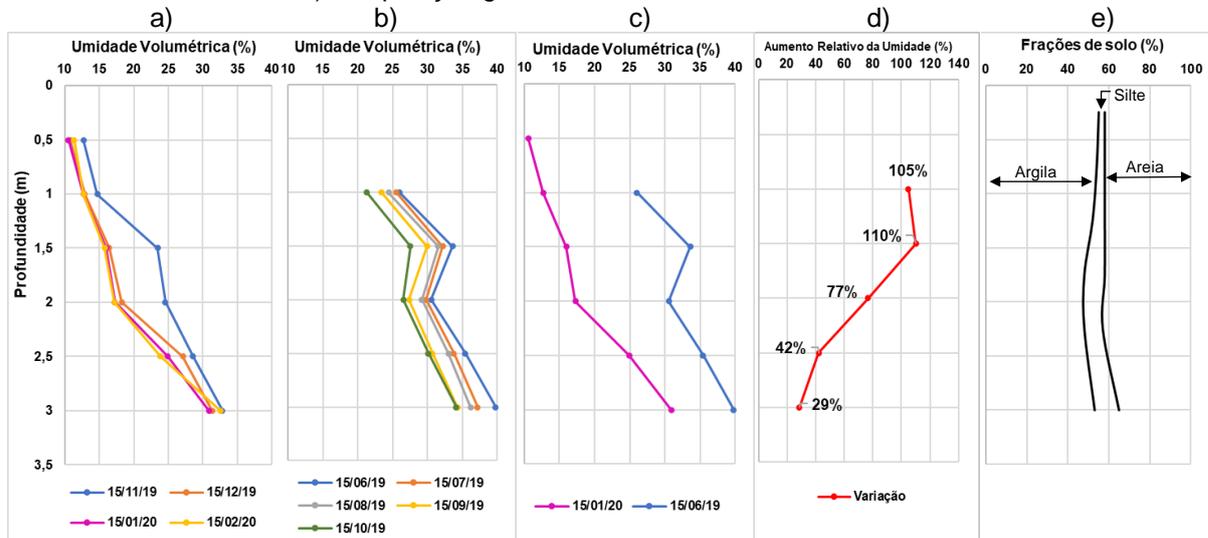
Fonte: Autora.

A análise do gráfico (Figura 93) mostra que os sensores conseguem registrar a variação da umidade do solo em decorrência da chuva. É perceptível o aumento da umidade do solo em períodos chuvosos e a redução da mesma em períodos de estiagem, principalmente nos sensores mais superficiais (até 2m de profundidade). Nos sensores instalados em camadas mais profundas é observado uma variação menos acentuada da umidade ao longo do tempo.

Através dos dados disponibilizados pelas PCDs Geotécnicas foi possível traçar o perfil de umidade média diária do solo, considerando um intervalo de medição da umidade a cada 30 dias, visando possibilitar uma melhor visualização da variação da

umidade com a profundidade ao longo do tempo (Figura 94). O cálculo do aumento relativo da umidade em % (Figura 94d), inicia considerando o mês mais seco do período seco e o mês mais úmido do período úmido.

Figura 94 - Perfil da umidade média diária do solo na PCD - 1: a) período seco; b) período úmido; c) Comparação entre o mês mais úmido e o mês mais seco; d) Aumento relativo da umidade em % devido a ocorrência de chuvas; e) composição granulométrica do solo.



Fonte: Autora.

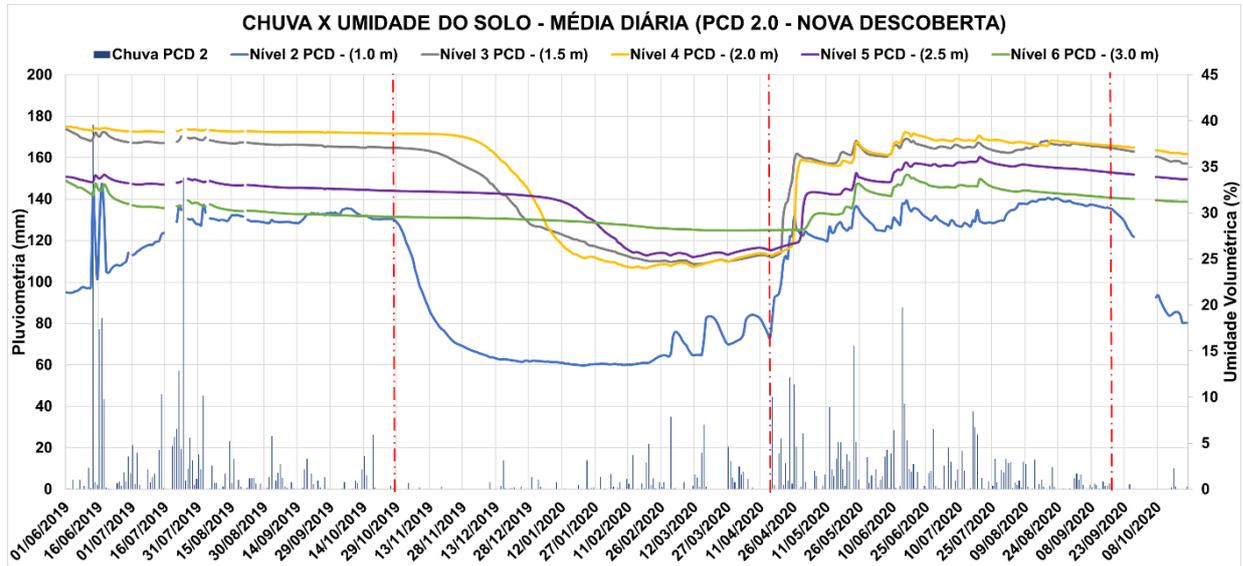
Nota-se que a umidade apresenta uma tendência de crescimento até a profundidade de 3m, entretanto para o período úmido entre 1,5 e 2m de profundidade a umidade decresce sutilmente, depois volta a crescer, fato que pode ser influenciado pela granulometria e permeabilidade destes solos. O dia com perfil de umidade mais seco foi em 15/01/2020 e mais úmido no dia 15/06/2020.

O aumento relativo da umidade entre o período seco e o período úmido (Figura 94d) chega a ultrapassar 100% para a profundidade de 1 e 1,5m na PCD-1, em seguida esse aumento diminui gradativamente ao longo da profundidade, chegando a uma variação de aproximadamente 30% na profundidade de 3m. Observa-se ainda, que a composição granulométrica pouco varia, apresentando cerca de 50% de argila, 10% de silte e 40% de areia ao longo dos 3 metros.

A Figura 95 apresenta o gráfico que correlaciona a umidade média diária do solo com a chuva na PCD-2. Para esta PCD é apresentado dados até outubro de 2020, após essa data o equipamento foi desinstalado, porque a proprietária do local onde se encontrava a PCD solicitou remoção do equipamento. Os dados do sensor

localizando em 0,5 metro de profundidade, são desconsiderados, devido as constantes falhas na sua leitura.

Figura 95 - Variação da umidade média diária do solo com a precipitação na PCD-02 Nova Descoberta.



Fonte: Autora.

Através da análise do gráfico (Figura 95) é possível observar um comportamento similar ao visto na PCD-01. Nesta PCD temos um maior período de dias analisados (junho de 2019 a outubro de 2020) e é mostrado de maneira mais clara o aumento da umidade do solo em períodos chuvosos e a redução da mesma em períodos mais secos, principalmente nos sensores mais superficiais (até 2,5m de profundidade). No sensor instalado em 3m de profundidade é observado uma variação bem menos acentuada da umidade ao longo do tempo.

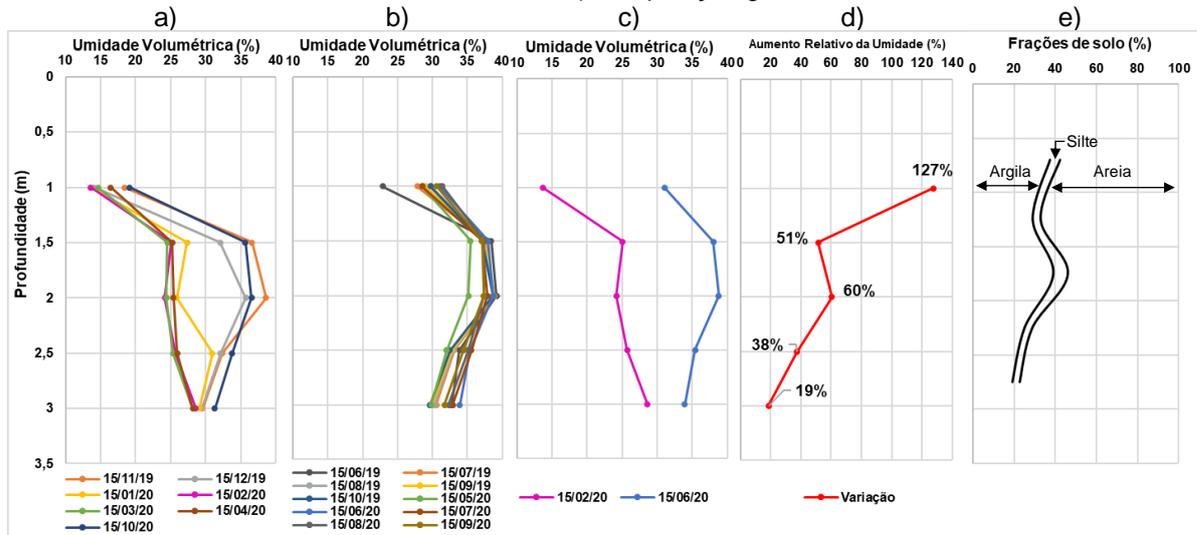
Comportamento semelhante aos apresentados na Figura 93 e na Figura 95 foi verificado nos resultados expostos por Mendes et al. (2017). De acordo com esses autores as diferentes dinâmicas entre as camadas do solo ao longo do perfil não refletem apenas as diferenças nas propriedades de retenção de cada camada, mas também a dinâmica da água através do solo em profundidade. Isso explica porque as camadas mais superficiais apresentam um comportamento sensível (com vários picos) em resposta à chuva, enquanto as camadas mais profundas apresentam variações graduais e tardias relacionadas à percolação de águas profundas.

Através dos dados disponibilizados pelas PCDs Geotécnicas foi possível traçar o perfil de umidade média diária do solo, considerando um intervalo de medição da

umidade a cada 30 dias, visando possibilitar uma melhor visualização da variação da umidade com a profundidade ao longo do tempo (Figura 96). O cálculo do aumento relativo da umidade em % (Figura 96d), inicia considerando o mês mais seco do período seco e o mês mais úmido do período úmido.

Assim como para a PCD-1, os gráficos da Figura 96 apresentam as médias mensais do teor de umidade pela profundidade para o período seco e úmido, a variação entre os valores de menor teor de umidade e o maior e a composição granulométrica ao longo da profundidade para PCD-2.

Figura 96 - Perfil da umidade média diária do solo na PCD - 2: a) período seco; b) período úmido; c) Comparação entre o mês mais úmido e o mês mais seco; d) Aumento relativo da umidade em % devido a ocorrência de chuvas; e) composição granulométrica do solo.



Fonte: Autora.

O aumento relativo da umidade entre o período seco e o período úmido (Figura 96d) chega a ultrapassar 100% para a profundidade de 1m na PCD-2, em seguida esse aumento diminui gradativamente ao longo da profundidade, chegando a uma variação de aproximadamente 20% na profundidade de 3m.

A composição granulométrica do perfil é predominantemente arenosa (aproximadamente 60% a 1,0 m) e essa fração cresce com a profundidade, a exceção do trecho entre 1,5 e 2,0 m que contém uma camada com uma fração de argila ligeiramente maior do que as camadas vizinhas. Essa camada com maior fração de argila, pode justificar a tendência à constância do teor de umidade na mesma, pois solos apresentam maior capacidade de retenção de umidade com aumento do maior teor de argila.

## 6.4 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Este capítulo apresentou os resultados obtidos para os ensaios de investigação geotécnica de campo e laboratório para as amostras da microbacia Córrego do Morcego.

Em campo, foi realizado ensaio de sondagem a percussão SPT e ensaio de determinação da condutividade hidráulica saturada com permeâmetro *Guelph*. O ensaio SPT, realizado nos pontos de estudo P-05, P-07, P-08 e P-09, apresentou perfis de solo com grande presença de camadas siltosas ou areno / argilo siltosas (táctil-visual), porém após caracterização em laboratório ficou evidenciado que a fração siltosa era a menos presente nas amostras ensaiadas, comparada com as frações de argila e areia. Além disso, o ensaio apresentou em geral comportamento de ganho de resistência com a profundidade, onde os valores baixos de  $N_{SPT}$  (2 a 5) foram encontrados até uma profundidade de aproximadamente 3 metros. A partir de 4 metros observa-se um ganho resistência:  $N_{SPT} \geq 11$  no furo P-05;  $N_{SPT} \geq 7$  nos furos P-07 e P-08; e  $N_{SPT} \geq 18$  no furo P-09. Este contraste pode influenciar no limite da superfície de ruptura de deslizamentos, ficando limitada em aproximadamente 3 metros de profundidade. O nível de água não foi encontrado em nenhum relatório de sondagem SPT.

O ensaio de permeabilidade em campo foi executado nos pontos P-02, P-06 e P-07, onde os pontos ensaiados apresentaram pouca variação até 3,0m, na ordem de  $10^{-8}$  m/s para P-02 e  $10^{-7}$  m/s para os pontos P-06 e P-07. Após 3,0m, a permeabilidade reduziu para ordem de  $10^{-9}$  m/s para os pontos P-06 e P-07.

Em laboratório, foram feitos ensaios de caracterização física e mecânica em amostras deformadas e indeformadas coletadas nos pontos de estudo.

O ensaio granulométrico e de limites de Atterberg classificaram todas as amostras como medianamente plásticas e os pontos P-02, P-03, P-05 e P-06 se classificam como SC (areia argilosa), e as amostras de solo dos pontos P-01 e P-04 se classificam como CL (argila de baixa compressibilidade), segundo a Classificação Unificada (SUCS).

O ensaio de obtenção da curva característica de retenção de água no solo foi realizado através da técnica do papel filtro. O resultado apresentou uma curva de comportamento bimodal, típico de solos tropicais, caracterizado pelo formato de

“sela”. Este formato sugere que o solo ensaiado apresente um comportamento intermediário entre areia e argila a depender do nível de sucção.

O ensaio de cisalhamento direto foi realizado sob as condições de umidade natural e inundado nas amostras coletadas nos pontos P-01, P-02, P-03, P-04, P-05 e P-06. As amostras em sua maioria apresentaram comportamento de ruptura elasto-plástico, onde o solo apresenta comportamento elástico até certo nível de tensão e a partir do qual toda deformação não elástica permanece. As envoltórias de Mohr-Coulomb apresentaram parâmetros de resistência dentro da faixa de valores encontrados na literatura para trabalhos realizados no mesmo fâceis da Formação Barreiras do presente trabalho, coletados na RMR.

Por fim, foi apresentado alguns dados e análises das PDC Geotécnicas que permitem correlacionar teor de umidade do solo em profundidade com a chuva. Nas análises pode-se perceber que os sensores de umidade reagem bem a presença da chuva, registrando o aumento da umidade nos períodos chuvosos e sendo os mais superficiais mais afetados que os mais profundos.

## 7 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DAS ANÁLISES DE SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS

Este capítulo apresentará e discutirá o resultado da integração dos parâmetros geotécnicos utilizados na modelagem no TRIGRS, os resultados do mapeamento de suscetibilidade a deslizamento translacionais rasos para cada cenário analisado das microbacias estudadas, juntamente com uma comparação entre os cenários e suas validações através do método LR<sub>CLASS</sub>.

### 7.1 INTEGRAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS UTILIZADOS NAS ANÁLISES DE SUSCETIBILIDADE NO TRIGRS

Na análise de suscetibilidade através do TRIGRS, foram utilizados os parâmetros geotécnicos (ângulo de atrito, coesão, peso específico do solo saturado e condutividade hidráulica saturada) de forma constante para área de cada microbacia, considerando a média aritmética de cada parâmetro usado.

Para a microbacia Córrego do Morcego, utilizou-se a média dos parâmetros obtidos na investigação geotécnica realizada pelo GEGEP/UFPE apresentados na Tabela 17, na Tabela 18 e detalhados nos itens 6.1 e 6.2. Para a microbacia Córrego do Jenipapo, utilizou-se a média dos parâmetros encontrados nos estudos realizados por Lafayette (2000) e Lima (2002), apresentada na Tabela 19 na Tabela 20 e detalhados no item 5.1.

Tabela 17 - Média dos parâmetros de resistência utilizada para modelagem da MICROBACIA CÓRREGO DO MORCEGO.

Ponto	Descrição / SUCS	Profundidade (m)	Peso específico saturado - $\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	Coesão efetiva - $c'$ (kPa)	Ângulo de atrito - $\phi'$ (°)
P-01	Argila arenosa / CL	1,5	17,7	5	33,7
P-02	Areia argilosa / SC	1,3	19,4	7,1	31,2
P-03	Areia argilosa / SC	1,5	19,5	2,1	35,7
P-04	Argila arenosa / CL	1,25	19,4	3,2	31,9
P-05	Areia argilosa / SC	1,45	18,8	0	34,1
P-06	Areia argilosa / SC	1,45	19,7	3,6	33,1
<b>MÉDIA / Valor Utilizado</b>			<b>19,1</b>	<b>3,5</b>	<b>33,3</b>

Fonte: Autora.

Tabela 18 - Média do coeficiente de permeabilidade utilizada para modelagem da MICROBACIA CÓRREGO DO MORCEGO.

Ponto	Profundidade (m)	Coeficiente de Permeabilidade (m/s)
P-02	1,0	$4,82 \times 10^{-8}$
	2,0	$5,47 \times 10^{-8}$
	3,0	$6,26 \times 10^{-8}$
P-06	1,0	$6,34 \times 10^{-7}$
	3,0	$1,02 \times 10^{-7}$
P-07	1,0	$3,66 \times 10^{-7}$
	2,0	$6,51 \times 10^{-7}$
<b>MÉDIA / Valor Utilizado</b>		<b><math>3,5 \times 10^{-7}</math></b>

Fonte: Autora.

Tabela 19 - Média dos parâmetros de resistência utilizada para modelagem da MICROBACIA CÓRREGO DO JENIPAPO.

Fonte	Ponto	Descrição / SUCS	Profundidade (m)	Peso específico saturado - $\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	Coesão efetiva - $c'$ (kPa)	Ângulo de atrito - $\phi'$ (°)
Lafayette (2000)	P-01	Areia argilosa / SC	2 – 2,4	19,8	7	26
Lafayette (2000)	P-02	Areia argilosa / SC	1,5 – 2,0	19,0	13	24
Lima (2002)	P-05	Argila arenosa / CL	1,04 – 1,34	19,1	10	32
<b>MÉDIA / Valor Utilizado</b>				<b>19,3</b>	<b>10</b>	<b>27,3</b>

Fonte: Autora.

Tabela 20 - Média do coeficiente de permeabilidade, utilizada para modelagem da MICROBACIA CÓRREGO DO JENIPAPO.

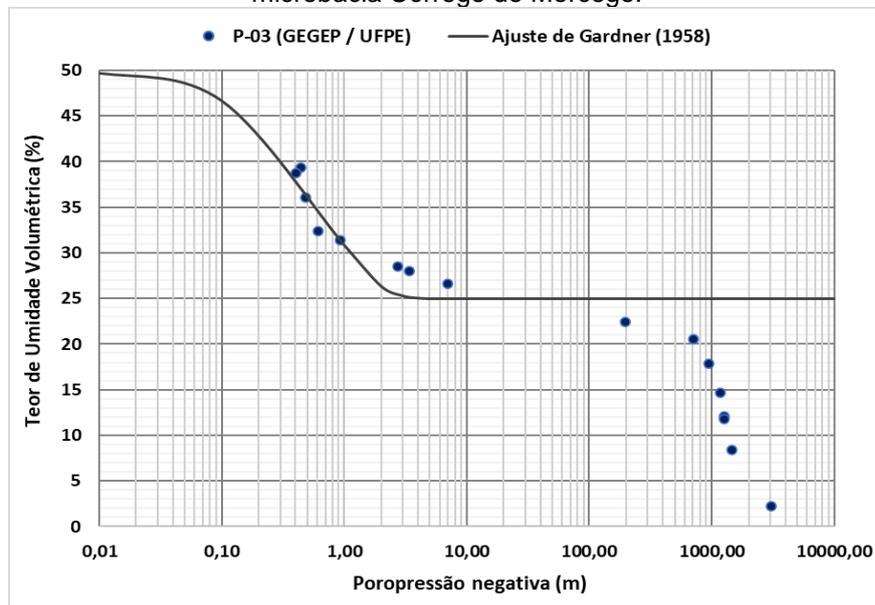
Referencia	Ponto	Profundidade (m)	Coeficiente de Permeabilidade (m/s)
(LAFAYETTE, 2000)	P-02	0,5	$5,2 \times 10^{-5}$
		1,3	$2,5 \times 10^{-5}$
		2,1	$2,5 \times 10^{-5}$
		3,0	$2,0 \times 10^{-6}$
(LIMA, 2002)	P-05	0,5	$6,72 \times 10^{-7}$
		1,5	$9,07 \times 10^{-7}$
(LIMA, 2002)	P-07	0,5	$3,95 \times 10^{-7}$
		1,5	$1,79 \times 10^{-7}$
		2,5	$1,03 \times 10^{-7}$
<b>MÉDIA / Valor Utilizado</b>			<b><math>1,2 \times 10^{-5}</math></b>

Fonte: Autora.

Para a modelagem no TRIGRS são utilizados os parâmetros de ajuste da curva característica pelo modelo de Gardner (1958). Este modelo foi desenvolvido para curvas com distribuição unimodal, entretanto as curvas obtidas nas microbacias modeladas apresentam o formato bimodal, conforme apresentado anteriormente nos itens 5.1 e 6.2.2, desta forma o ajuste de Gardner foi realizado considerando o primeiro trecho dessas curvas.

A Figura 97 e a Figura 98 apresentam o ajuste de Gardner (1958) para as curvas características obtidas na microbacia Córrego do Morcego e Córrego do Jenipapo, respectivamente. A partir destes ajustes, extrai-se os valores do teor de umidade do solo saturado ( $\theta_s$ ), teor de umidade residual do solo ( $\theta_r$ ) e o parâmetro de ajuste de Gardner ( $\alpha$ ), apresentados na Tabela 21.

Figura 97 - Ajuste de Gardner (1958) para a curva característica utilizada na modelagem da microbacia Córrego do Morcego.



Fonte: Autora.

Figura 98 - Ajuste de Gardner (1958) para a curva característica utilizada na modelagem da microbacia Córrego do Jenipapo.

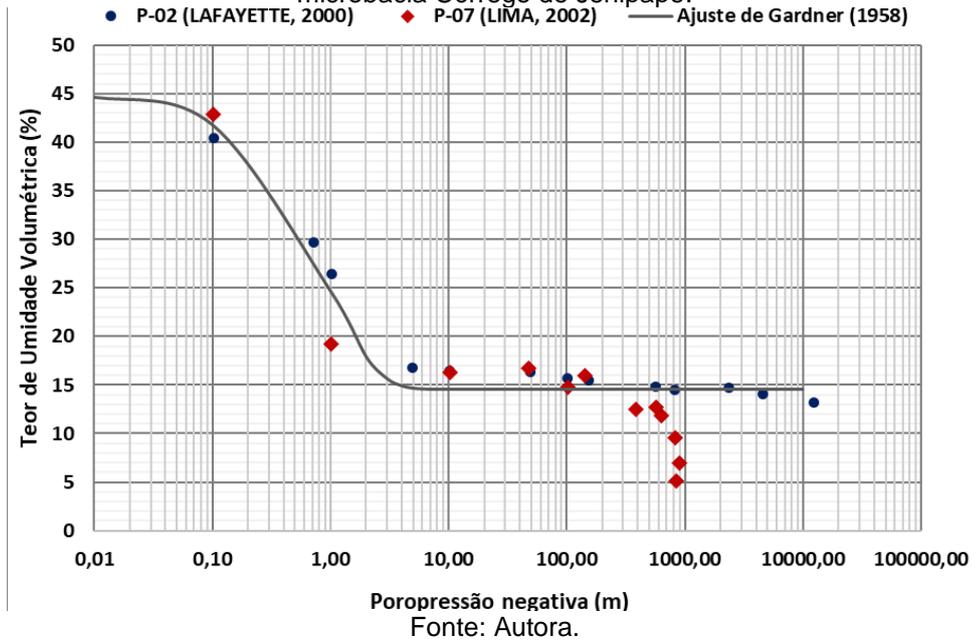


Tabela 21 - Parâmetros de ajuste das curvas características pelo modelo de Gardner (1958).

AJUSTE	PONTO	PARÂMETROS
<b>MICROBACIA CÓRREGO DO MORCEGO</b>		
Gardner (1958)	P-03	$\theta_{sat} = 50,0 \%$
		$\theta_{res} = 25,0 \%$
		$\alpha = 1,45$
<b>MICROBACIA CÓRREGO DO JENIPAPO</b>		
Gardner (1958)	P-02	$\theta_{sat} = 45,0 \%$
	P-07	$\theta_{res} = 14,5 \%$
		$\alpha = 1,1$

Fonte: Autora.

Além disso, as análises de suscetibilidade estão divididas em dois cenários baseados no modo de infiltração do solo, Cenário SAT (modelo de infiltração saturada) e Cenário NSAT (modelo de infiltração não saturada), conforme descritos anteriormente no item 5.5.3. Foi alterado também, a profundidade máxima do solo para calcular a poropressão e o FS ( $Z_{max}$ ), obtendo-se, portanto, três grupos para cada cenário: SAT1, SAT2 e SAT3 (Cenário SAT) e NSAT1, NSAT2 e NSAT3 (Cenário NSAT), referentes às profundidades de solo ( $Z_{max}$ ) de 1, 2 e 3m. Ademais, conforme citado anteriormente, devido às limitações impostas pelo TRIGRS, que somente permite  $d \leq Z_{max}$ , foi assumido um nível de água inicial ( $d$ ) na mesma profundidade do  $Z_{max}$  considerado. O resumo dos parâmetros utilizados nas análises de suscetibilidade no TRIGRS, para cada cenário, está apresentado na Tabela 22 para a Microbacia Córrego do Morcego e na Tabela 23 para a Microbacia Córrego do Jenipapo.

Tabela 22 - Parâmetros geotécnicos utilizados em cada cenário analisado no TRIGRS, para a microbacia Córrego do Morcego.

PARÂMETROS [unidade]	CENÁRIOS - MICROBACIA CÓRREGO DO MORCEGO					
	SAT 1	SAT 2	SAT 3	NSAT 1	NSAT 2	NSAT 3
Peso específico saturado ( $\gamma_{sat}$ ) [kN/m <sup>2</sup> ]	19,1	19,1	19,1	19,1	19,1	19,1
Coesão efetiva ( $c'$ ) [kPa]	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
$\phi'$ - ângulo de atrito [°]	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3
Permeabilidade ( $K_{sat}$ ) [m <sup>2</sup> /s]	$3 \times 10^{-7}$	$3 \times 10^{-7}$	$3 \times 10^{-7}$	$3 \times 10^{-7}$	$3 \times 10^{-7}$	$3 \times 10^{-7}$
Difusividade hidráulica ( $D_0$ ) [m <sup>2</sup> /s]	$3 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-5}$
Taxa de infiltração inicial ( $I_{zLT}$ ) [m/s]	$6,3 \times 10^{-8}$	$6,3 \times 10^{-8}$	$6,3 \times 10^{-8}$	$6,3 \times 10^{-8}$	$6,3 \times 10^{-8}$	$6,3 \times 10^{-8}$
Profundidade máxima do solo ( $Z_{max}$ ) [m]	1	2	3	1	2	3
Altura inicial do lençol freático (d) [m]	1	2	3	1	2	3
Teor de umidade volumétrico do solo saturado ( $\theta_s$ ) [%]	50	50	50	50	50	50
Teor umidade volumétrica residual do solo ( $\theta_r$ ) [%]	25	25	25	25	25	25
Parâmetro de Gardner (1958) ( $\alpha$ ) [1/m]	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45

Fonte: Autora.

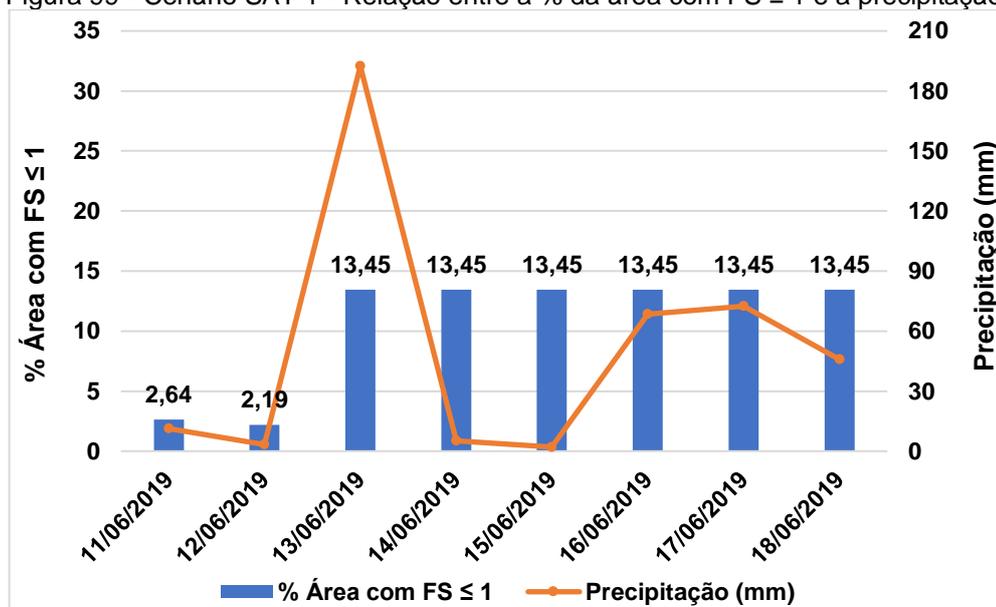
Tabela 23 - Parâmetros geotécnicos utilizados em cada cenário analisado no TRIGRS, para a microbacia Córrego do Jenipapo.

PARÂMETROS [unidade]	CENÁRIOS - MICROBACIA CÓRREGO DO JENIPAPO					
	SAT 1	SAT 2	SAT 3	NSAT 1	NSAT 2	NSAT 3
Peso específico saturado ( $\gamma_{sat}$ ) [kN/m <sup>2</sup> ]	19,3	19,3	19,3	19,3	19,3	19,3
Coesão efetiva ( $c'$ ) [kPa]	10	10	10	10	10	10
$\phi'$ - ângulo de atrito [°]	27,3	27,3	27,3	27,3	27,3	27,3
Permeabilidade ( $K_{sat}$ ) [m <sup>2</sup> /s]	$1,2 \times 10^{-5}$	$1,2 \times 10^{-5}$	$1,2 \times 10^{-5}$	$1,2 \times 10^{-5}$	$1,2 \times 10^{-5}$	$1,2 \times 10^{-5}$
Difusividade hidráulica ( $D_0$ ) [m <sup>2</sup> /s]	$1,2 \times 10^{-3}$	$1,2 \times 10^{-3}$	$1,2 \times 10^{-3}$	$1,2 \times 10^{-3}$	$1,2 \times 10^{-3}$	$1,2 \times 10^{-3}$
Taxa de infiltração inicial ( $I_{zLT}$ ) [m/s]	$6,7 \times 10^{-8}$	$6,7 \times 10^{-8}$	$6,7 \times 10^{-8}$	$6,7 \times 10^{-8}$	$6,7 \times 10^{-8}$	$6,7 \times 10^{-8}$
Profundidade máxima do solo ( $Z_{max}$ ) [m]	1	2	3	1	2	3
Altura inicial do lençol freático (d) [m]	1	2	3	1	2	3
Teor de umidade volumétrico do solo saturado ( $\theta_s$ ) [%]	45	45	45	45	45	45
Teor umidade volumétrica residual do solo ( $\theta_r$ ) [%]	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5
Parâmetro de Gardner (1958) ( $\alpha$ ) [1/m]	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1

Fonte: Autora.

## 7.2 MICROBACIA CÓRREGO DO MORCEGO - CENÁRIO SAT 1

Neste cenário, o modelo de infiltração inicial é saturado, o  $Z_{max}$  e o nível de água são considerados constantes para toda área de estudo e estão localizados a 1,0 metro de profundidade. A Figura 99 apresenta o gráfico com a relação entre a % da área instável ( $FS \leq 1$ ) em relação a área total da microbacia, e a precipitação. O gráfico mostra que a área classificada com  $FS \leq 1$  aumenta, atingindo 13,45%, quando a precipitação correspondeu a 192,4mm no dia 13/06. A partir desta data esse percentual de área instável se mantém constante até o último dia analisado (18/06/19).

Figura 99 - Cenário SAT 1 - Relação entre a % da área com  $FS \leq 1$  e a precipitação.

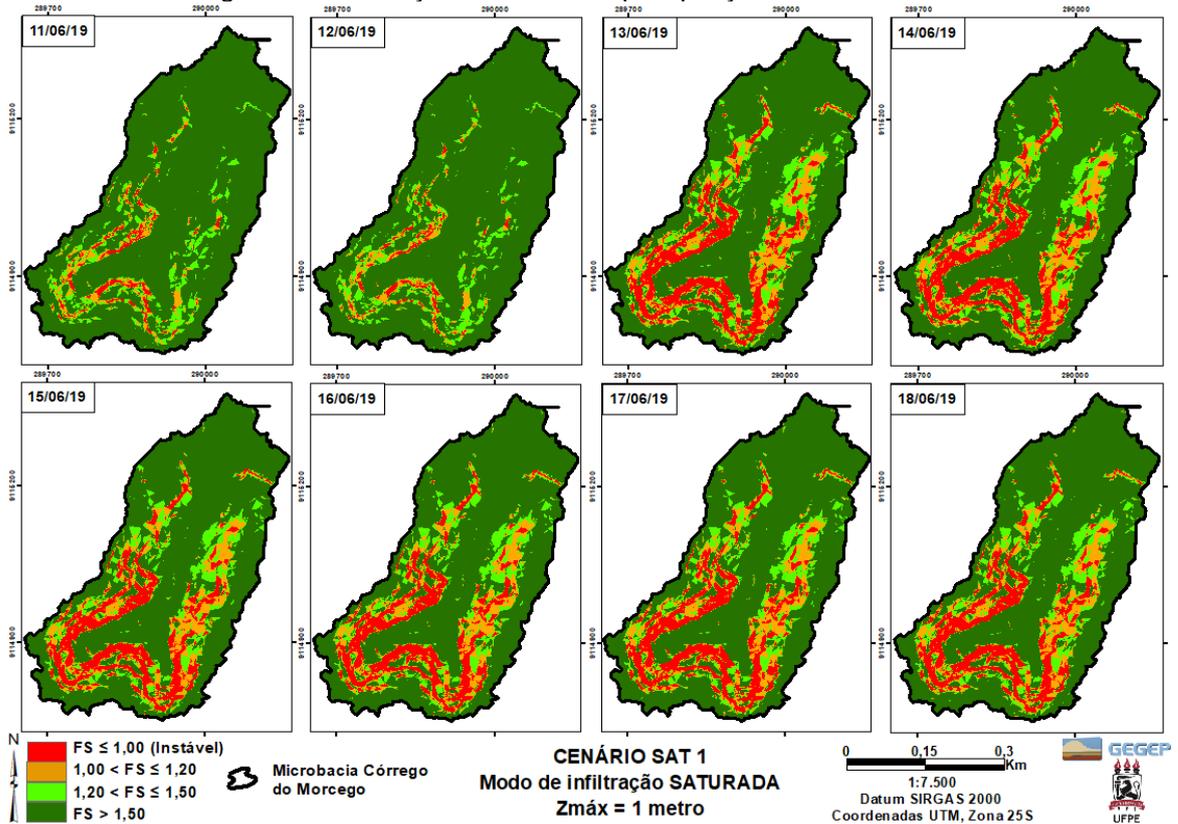
Fonte: Autora.

A Figura 100 plota a distribuição espacial do FS para todos os dias analisados. A sequência de mapas mostra que a área classificada como instável ( $FS \leq 1$ ), aumentou consideravelmente no dia 13/06/19, devido a precipitação de 192,4mm, sendo esse o primeiro dia mais crítico, no qual será realizada a validação. Nos dias seguintes, esta área não apresenta variação. Destaca-se que nesse cenário, o  $FS_{\min}$  foi calculado na profundidade de 1 metro, devido a profundidade atribuída ao  $Z_{\max}$ .

A Figura 101 apresenta a distribuição de poropressão na profundidade correspondente ao  $FS_{\min}$ . A sequência de mapas mostra uma mudança significativa das condições iniciais de poropressão a partir do dia 13/06/19, devido a precipitação de 192,4mm, e se mantém constante até 18/06/19 (último dia analisado), exceto em 15/06/19 que apresenta uma sutil redução. Esse comportamento da poropressão ao longo dos dias, explica porque a área com  $FS \leq 1,00$  também se manteve constante entre 13/06/19 e 18/06/19. Segundo Baum et al. (2010), o aumento da poropressão causada pela chuva explica porque as áreas instáveis ( $FS \leq 1,00$ ) variam de acordo com a precipitação.

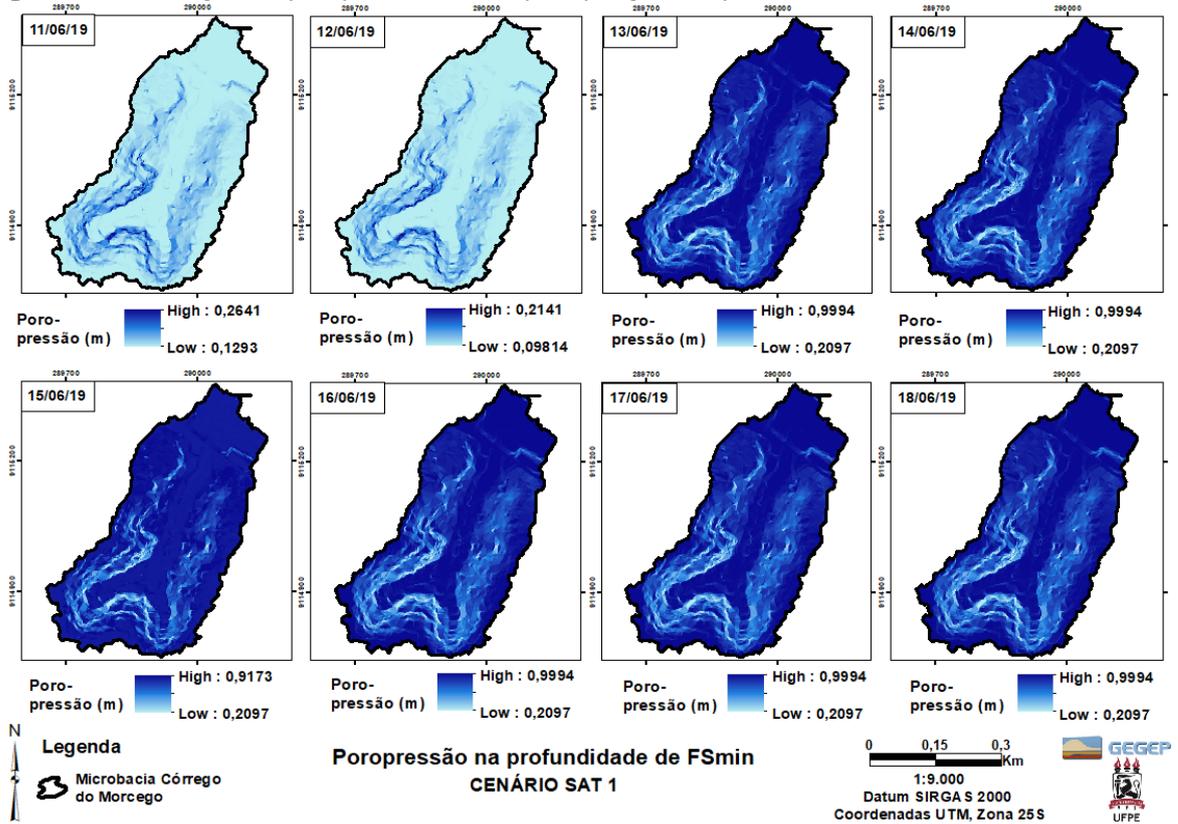
No intervalo de tempo analisado, em algumas localidades da microbacia foi registrado um valor máximo de poropressão correspondente a 0,9994m, esse valor indica que, nesses locais, a infiltração da água da chuva gerou um nível de água suspenso.

Figura 100 - Variação do FS com a precipitação – Cenário SAT 1.



Fonte: Autora.

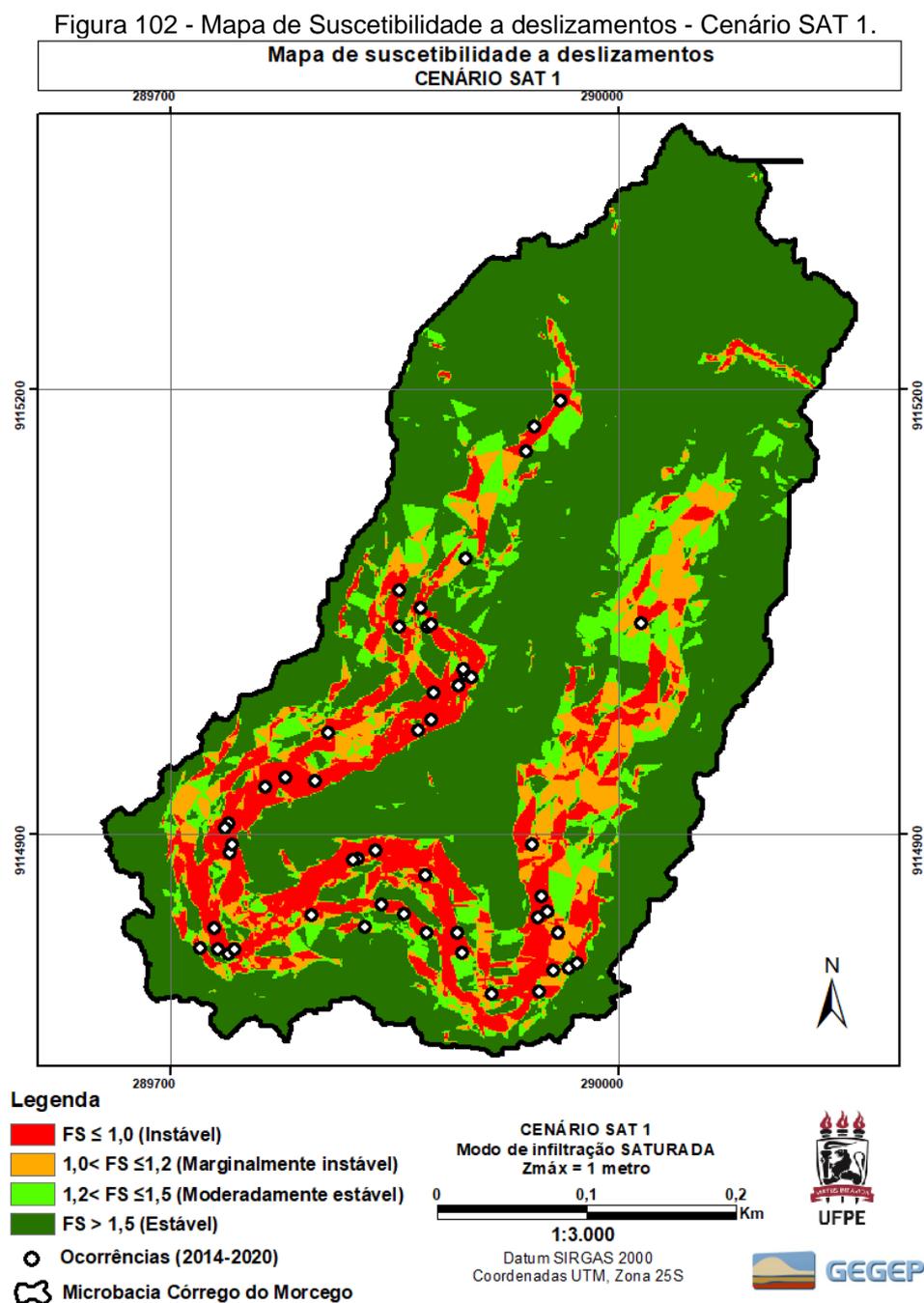
Figura 101 - Variação da poropressão com a precipitação, na profundidade de FS<sub>min</sub> - Cenário SAT 1.



Fonte: Autora.

### 7.2.1 Mapa de suscetibilidade a deslizamentos e Validação – Método LR<sub>CLASS</sub>

A Figura 102 apresenta o mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos gerado pelo modelo TRIGRS para o Cenário SAT 1 na microbacia Córrego do Morcego. Esse mapa corresponde ao primeiro dia mais crítico do respectivo cenário, o dia 13/06/19, e apresenta a classificação do FS, assim como os locais de ocorrência de deslizamentos registrados entre 2015 e 2020.



Fonte: Autora.

A Tabela 24 apresenta a validação do dia mais crítico para este cenário por meio do método  $LR_{class}$ . Através desta tabela, constata-se que 13,45% da área foi classificada como instável ( $FS \leq 1,0$ ) e 83,35% das ocorrências registradas estão localizadas dentro da área instável prevista pelo modelo. Desse modo, a  $\%LR_{FS \leq 1}$  é 76,60%. Isso significa que caso haja um deslizamento dentro da área de estudo, há 76,60% de chance deste ocorrer dentro das áreas instáveis ( $FS \leq 1$ ) previstas no mapa de suscetibilidade gerado pelo modelo TRIGRS.

Tabela 24 - Cenário SAT 1 - Validação do dia mais crítico por meio do  $LR_{CLASS}$ .

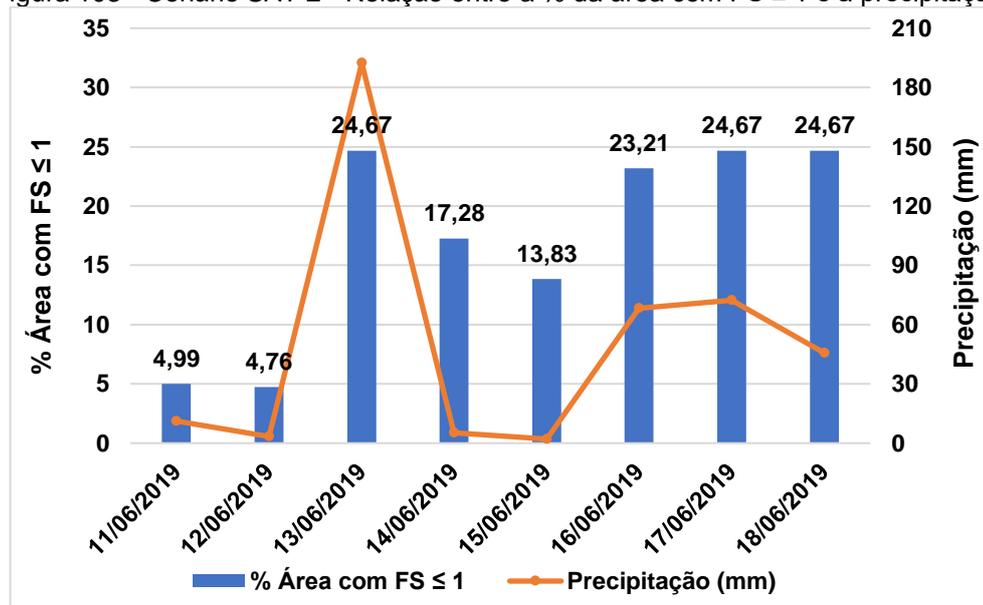
Classe de FS	Registro de deslizamento (a)	% Registro de deslizamentos (c=a/b)	% da Área prevista pelo TRIGRS (d)	$LR_{class}$ (e=c/d)	% $LR_{class}$ (=e/f)
$FS \leq 1,00$	42	83,35	13,45	6,18	<b>76,60</b>
$1,00 < FS \leq 1,20$	7	13,73	9,20	1,49	18,66
$1,20 < FS \leq 1,50$	2	3,92	10,36	0,38	4,74
$FS > 1,50$	0	0,00	67,00	0,00	0,00
Somatório	51 <b>(b)</b>	100,00	100,00	7,99 <b>(f)</b>	100,00

Fonte: Autora.

### 7.3 MICROBACIA CÓRREGO DO MORCEGO - CENÁRIO SAT 2

Neste cenário, o modelo de infiltração inicial é saturado, o  $Z_{max}$  e o nível de água são considerados constantes para toda área de estudo e estão localizados a 2,0 metros de profundidade. A Figura 103 apresenta o gráfico com a relação entre a % da área com  $FS \leq 1$  e a precipitação. O gráfico mostra que a área classificada como instável ( $FS \leq 1$ ) foi sensível a precipitação, aumentando e diminuindo de acordo com a intensidade da chuva. Alcançando no dia 13/06/19, um valor igual a 27,67%. Assim, percebe-se que o aumento no valor do  $Z_{max}$  refletiu no aumento da área instável do dia mais crítico em aproximadamente 84,3% em relação ao dia mais crítico do SAT 1.

Figura 103 - Cenário SAT 2 - Relação entre a % da área com FS  $\leq 1$  e a precipitação.



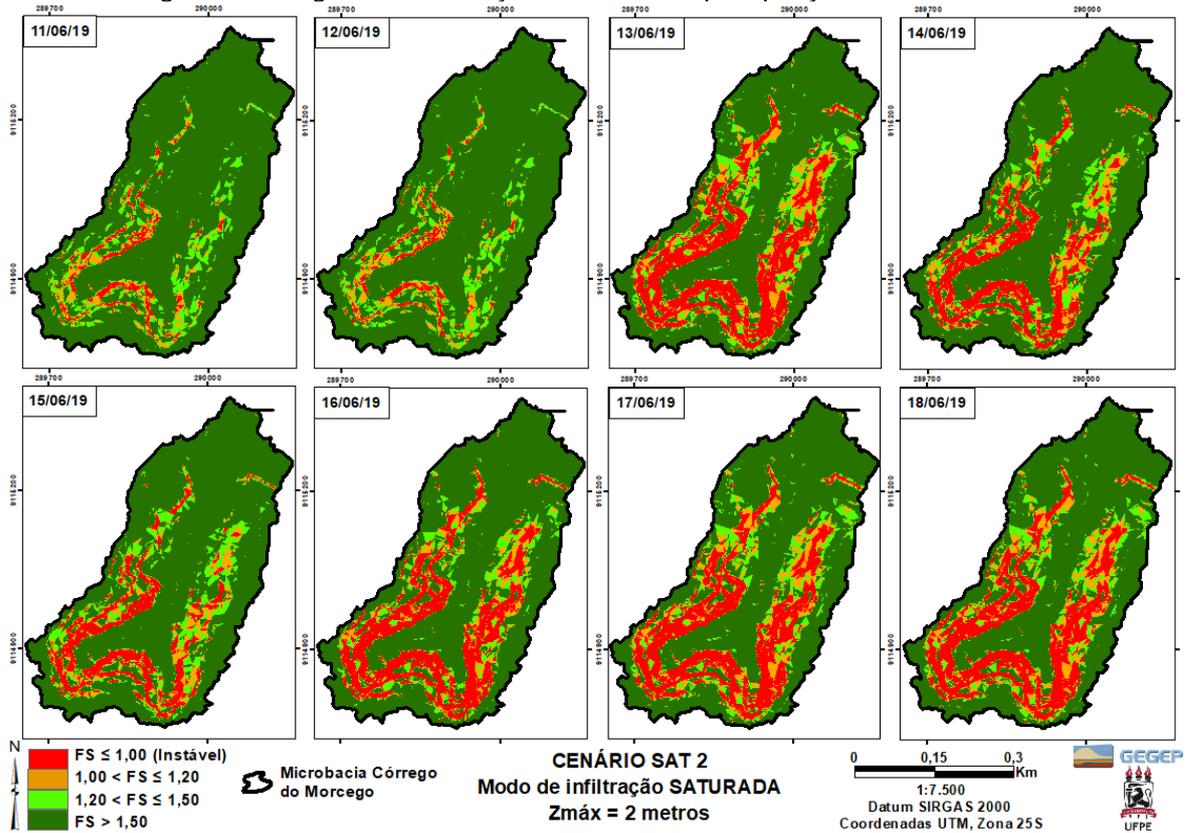
Fonte: Autora.

A Figura 104 plota a distribuição espacial do FS para todos os dias analisados, calculados na profundidade de 2,0 m ( $Z_{\max}$ ). Os mapas dispostos em ordem cronológica mostram que a área classificada como instável ( $FS \leq 1$ ) aumentou consideravelmente no dia 13/06/19 devido a precipitação de 192,4mm, sendo esse o primeiro dia mais crítico, no qual será realizada a validação. Nos dias subsequentes a área instável varia de acordo com a intensidade da chuva.

A Figura 105 apresenta a distribuição de poropressão na profundidade correspondente ao  $FS_{\min}$ . Os mapas mostram que ocorre uma mudança significativa das condições iniciais de poropressão no 13/06, devido a precipitação de 192,4 mm. Nesse dia, em algumas localidades da microbacia, a poropressão atingiu um valor máximo de 1,99 m, praticamente igual ao  $Z_{\max}$ . Os valores nos dias subsequentes apresentam variação seguindo a intensidade da chuva. Sendo o segundo maior registro realizado no 17/06/19, que correspondente a 72,4mm, no qual a poropressão alcançou um valor igual a 1,838 m.

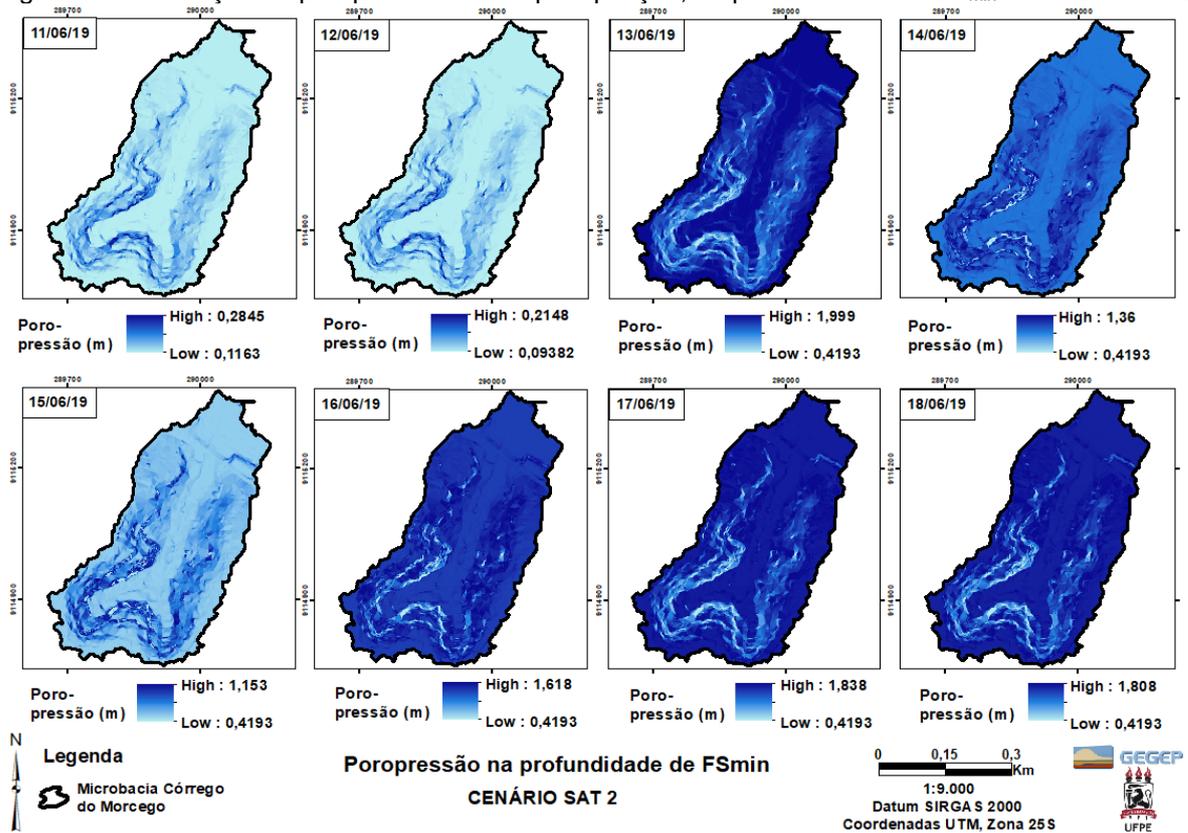
Desse modo, conclui-se que no cenário SAT 2, a poropressão atinge um valor máximo no dia 13/06. Porém, ao contrário do cenário SAT 1, as chuvas que aconteceram nos dias seguintes não conseguiram manter o mesmo nível de poropressão, apresentando uma variação mais expressiva, assim explicando porque a área instável ( $FS \leq 1$ ) varia ao longo dos dias nesse cenário (SAT 2).

Figura 104 - Figura 103: Variação do FS com a precipitação – Cenário SAT 2



Fonte: Autora.

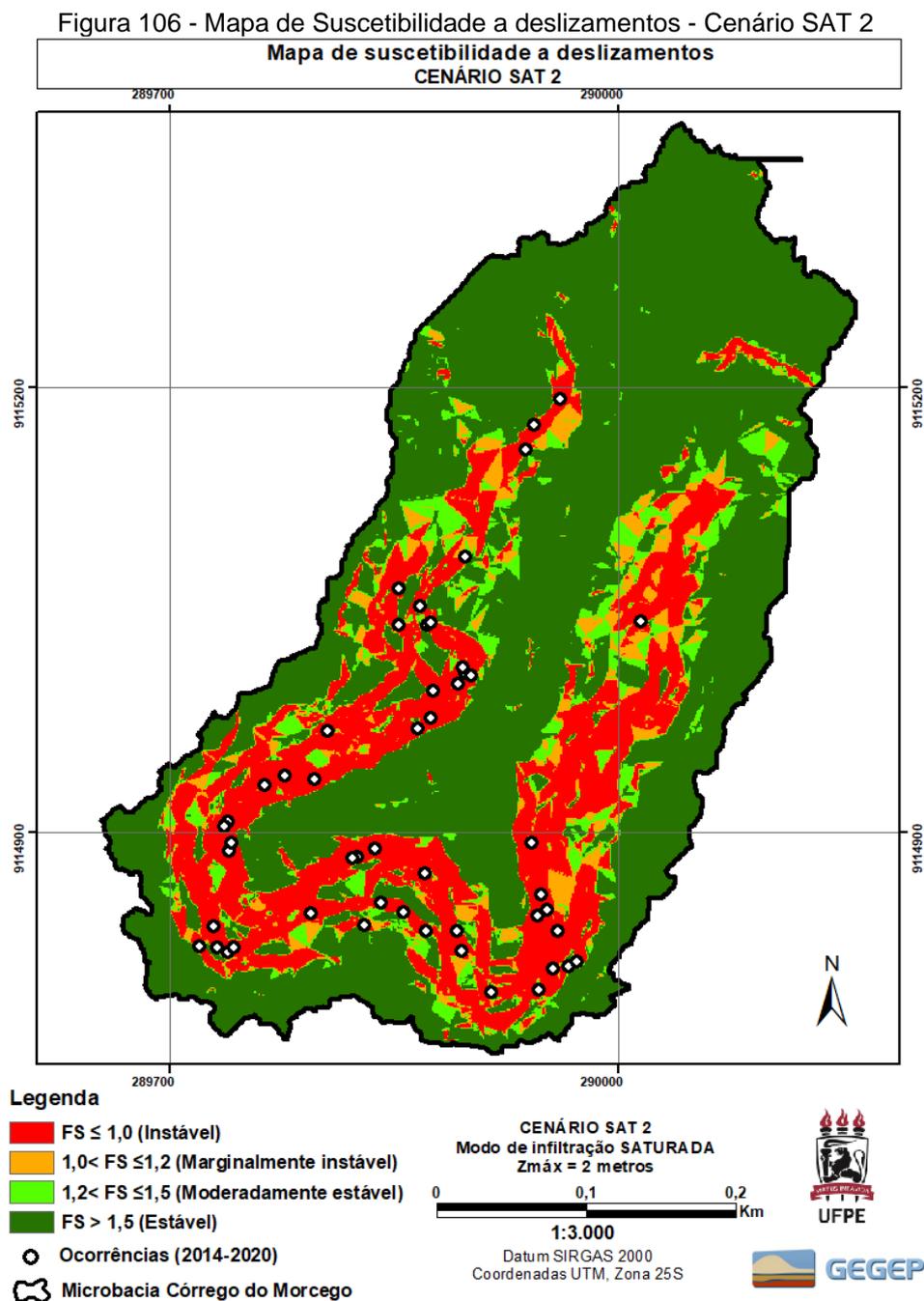
Figura 105 - Variação da poropressão com a precipitação, na profundidade de FS<sub>min</sub> - Cenário SAT 2



Fonte: Autora.

### 7.3.1 Mapa de suscetibilidade a deslizamentos e Validação – Método LR<sub>CLASS</sub>

A Figura 106 apresenta o mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos para o cenário SAT 2 para microbacia Córrego do Morcego. Esse mapa trata-se do primeiro dia mais crítico do respectivo cenário (13/06/19) e apresenta a classificação do FS, assim como os locais de ocorrência de deslizamentos registrados entre 2015 e 2020.



Fonte: Autora.

A Tabela 25 apresenta a validação desse mapa por meio do método  $LR_{class}$ . Através desta tabela, constata-se que 24,67% da área foi classificada como instável ( $FS \leq 1,0$ ) pelo modelo e 96,08% das ocorrências registradas estão localizadas nesta área. Desse modo, a  $\%LR_{FS \leq 1}$  é 88,94%. Isso significa que se ocorrer um deslizamento dentro da microbacia, a área classificada como instável possui 88,94% de chance de incluir essa ocorrência.

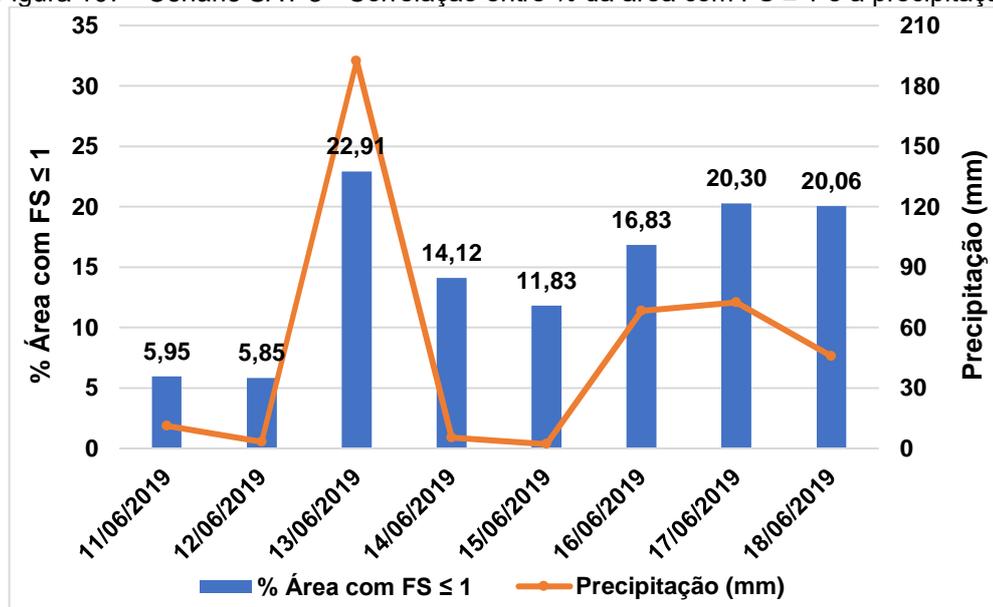
Tabela 25 - Cenário SAT 2 - Validação do dia mais crítico por meio do  $LR_{class}$ .

Classe de FS	Registro de deslizamento (a)	% Registro de deslizamentos (c=a/b)	% da Área prevista pelo TRIGRS (d)	$LR_{class}$ (e=c/d)	% $LR_{class}$ (=e/f)
$FS \leq 1,00$	49,00	96,08	24,67	3,89	<b>88,94</b>
$1,00 < FS \leq 1,20$	2,00	3,92	8,10	0,48	11,06
$1,20 < FS \leq 1,50$	0,00	0,00	8,55	0,00	0,00
$FS > 1,50$	0,00	0,00	58,68	0,00	0,00
Somatório	51 (b)	100,00	100,00	4,38 (f)	100,00

Fonte: Autora.

#### 7.4 MICROBACIA CÓRREGO DO MORCEGO - CENÁRIO SAT 3

Nesse cenário o modelo de infiltração inicial é saturado, o  $Z_{max}$  e o nível de água são considerados constantes para toda área de estudo e estão localizados a 3,0 metros de profundidade. A Figura 107 apresenta a relação entre a % da área com  $FS \leq 1$  e a precipitação. O gráfico mostra que a área classificada com  $FS \leq 1$ , assim como no cenário SAT 2, foi sensível a precipitação. Alcançando no dia 13/06/2019, um valor máximo de 22,91%. Dessa vez, o aumento no valor do  $Z_{max}$  refletiu na redução da área instável do dia mais crítico em aproximadamente 8% em relação ao dia mais crítico da análise SAT 2.

Figura 107 - Cenário SAT 3 - Correlação entre % da área com FS  $\leq 1$  e a precipitação

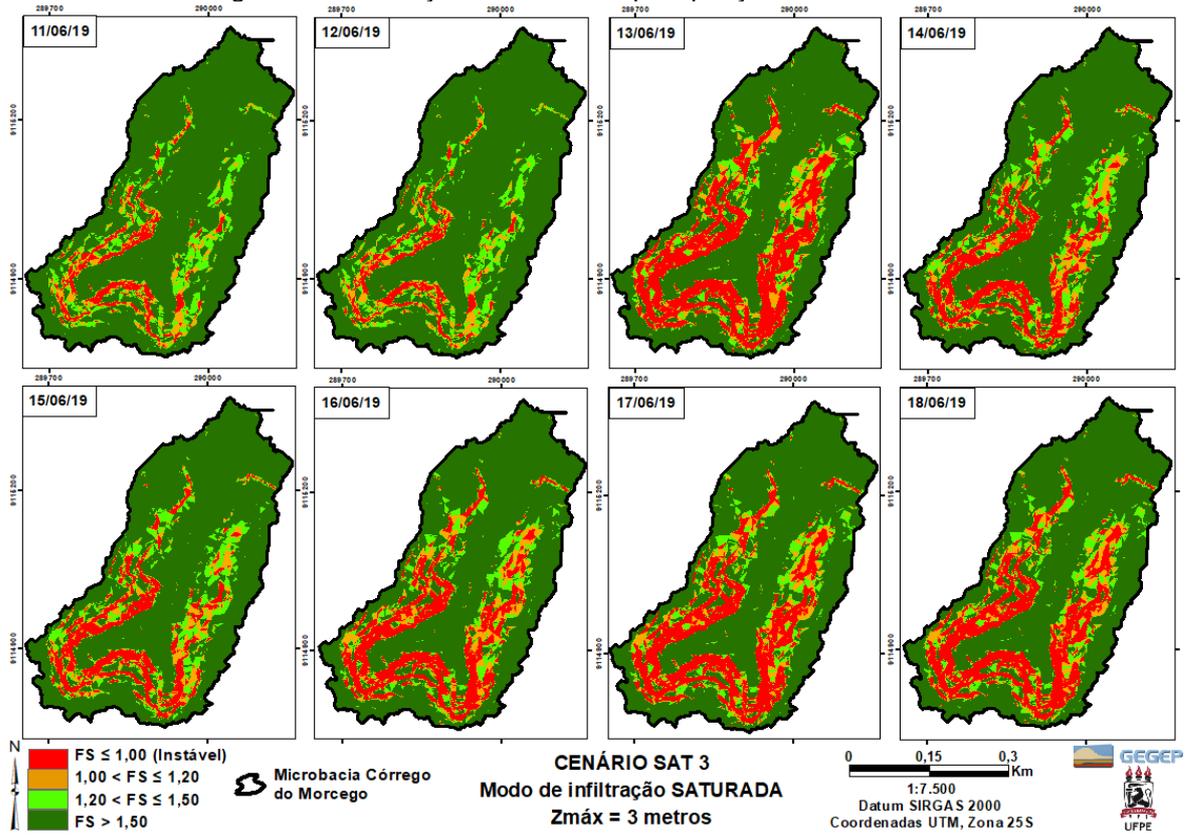
Fonte: Autora.

A Figura 108 plota a distribuição espacial do FS para todos os dias analisados. Os mapas mostram que a área classificada com FS  $\leq 1$ , cresceu consideravelmente no dia 13/06, devido a precipitação de 192,4mm, sendo esse o primeiro dia mais crítico. Nos dias subsequentes a área instável varia de acordo com a intensidade da chuva. Para esse cenário o FS<sub>min</sub> foi calculado na profundidade de 3 metros, por conta da profundidade atribuída ao Z<sub>max</sub>.

A Figura 109 apresenta a distribuição de poropressão na profundidade correspondente ao FS<sub>min</sub>. Os mapas mostram que ocorre uma mudança significativa das condições iniciais de poropressão no 13/06/2019, devido a precipitação de 192,4mm. Nesse dia, em algumas localidades da microbacia, a poropressão atingiu um valor máximo de 2,24m. Os valores nos dias subsequentes apresentam variação seguindo a intensidade da chuva, sendo o segundo maior registro realizado no 17/06, que correspondente a 72,4mm, no qual a poropressão alcançou um valor igual a 2,064 m.

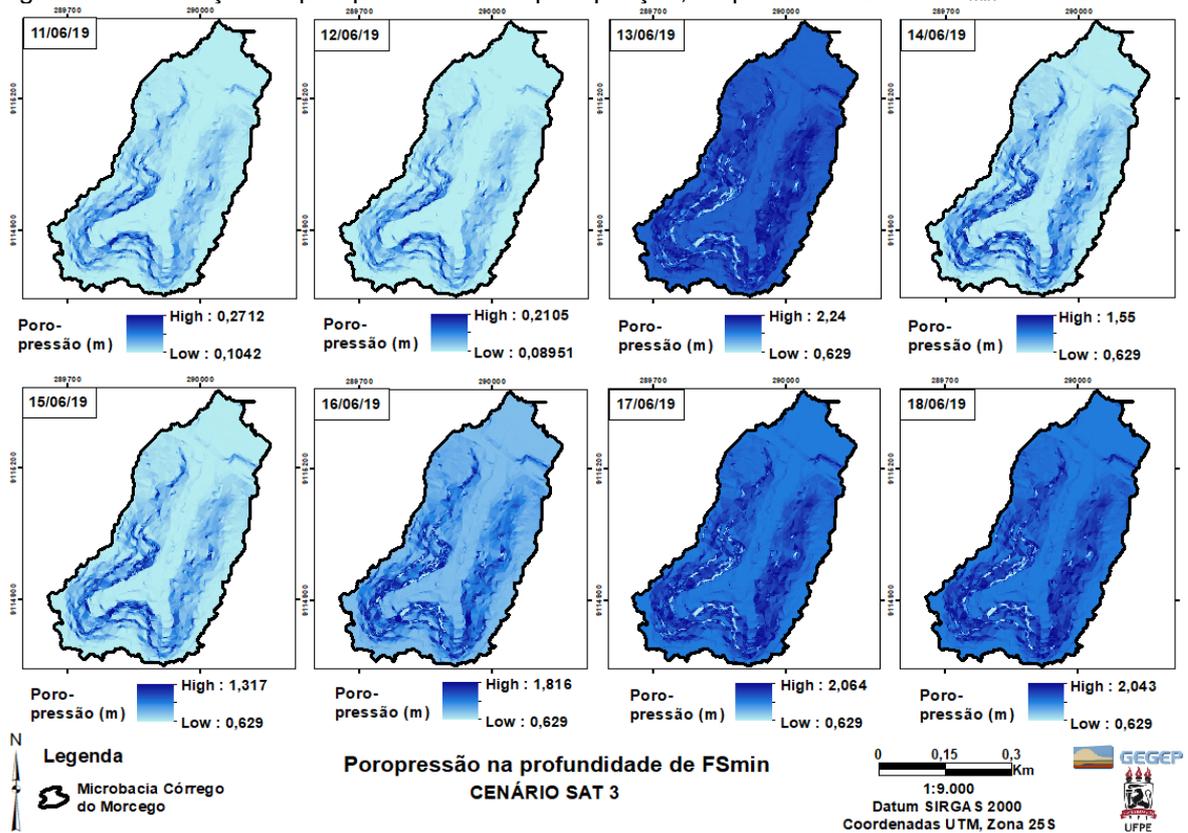
Igualmente os cenários SAT 1 e SAT 2, no cenário SAT 3, a poropressão alcança o maior valor no dia 13/06/19. E assim como no cenário SAT 2, as chuvas que aconteceram nos dias seguintes não conseguiram manter o mesmo nível de poropressão, variando com o tempo. Devido a isso, a área classificada com FS  $\leq 1,00$  se altera ao longo dos dias.

Figura 108 - Variação do FS com a precipitação – Cenário SAT 3



Fonte: Autora.

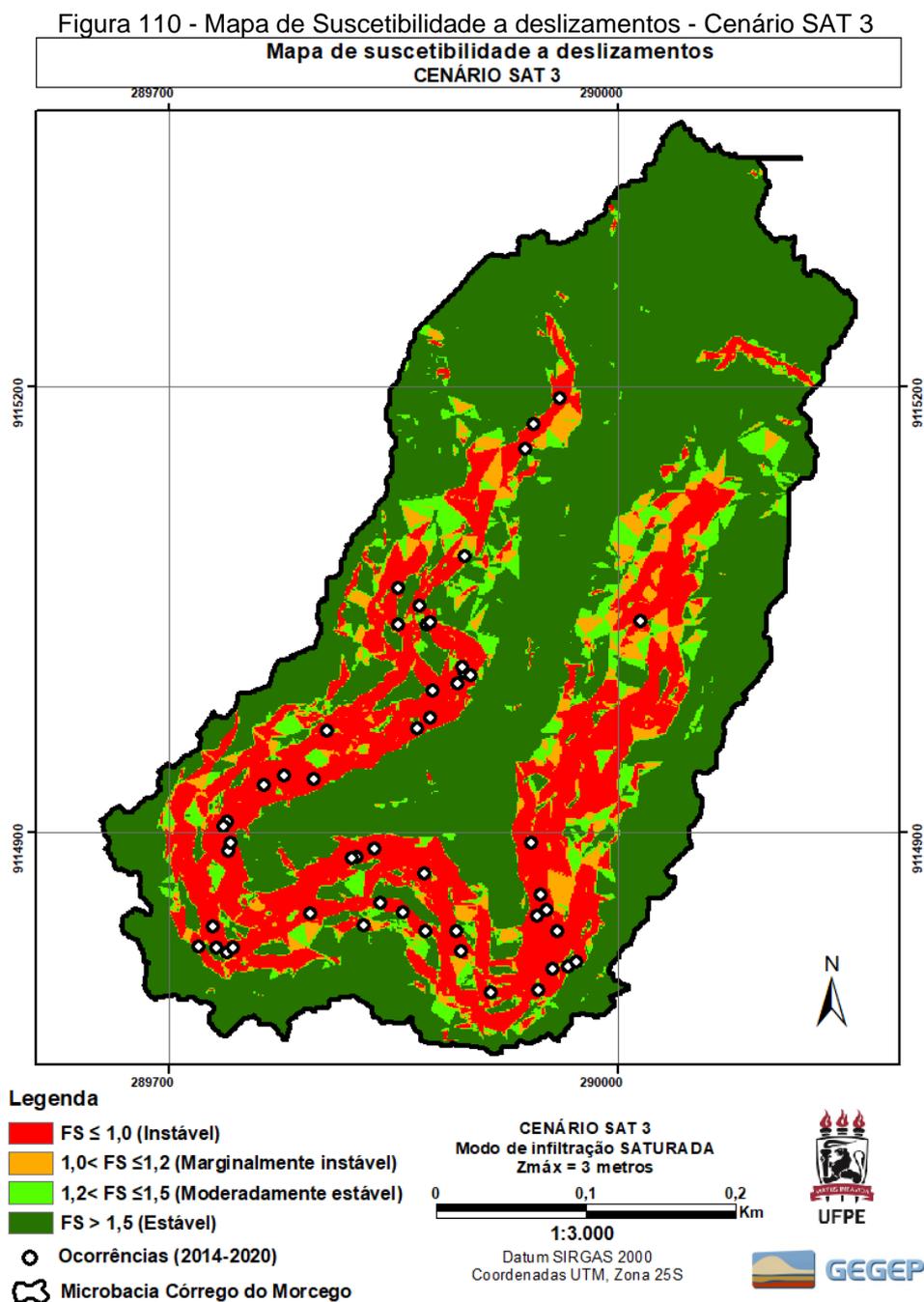
Figura 109 - Variação da poropressão com a precipitação, na profundidade de FS<sub>min</sub> - Cenário SAT 3



Fonte: Autora.

### 7.4.1 Mapa de suscetibilidade a deslizamentos e Validação – Método LR<sub>CLASS</sub>

A Figura 110 apresenta o mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos para o cenário SAT 3 para microbacia Córrego do Morcego. Esse mapa trata-se do primeiro dia mais crítico do respectivo cenário (13/06/19) e apresenta a classificação do FS, assim como os locais de ocorrência de deslizamentos registrados entre 2015 e 2020.



Fonte: Autora.

A Tabela 26 apresenta a validação desse mapa por meio do método  $LR_{class}$ . Através desta tabela, constata-se que 22,91% da área foi classificada como instável ( $FS \leq 1,0$ ) pelo modelo e 96,08% das ocorrências registradas estão localizadas nesta área. Desse modo, a  $\%LR_{FS \leq 1}$  é 86,86%. Isso significa que se ocorrer um deslizamento dentro da microbacia, a área classificada como instável possui 86,86% de chance de incluir essa ocorrência.

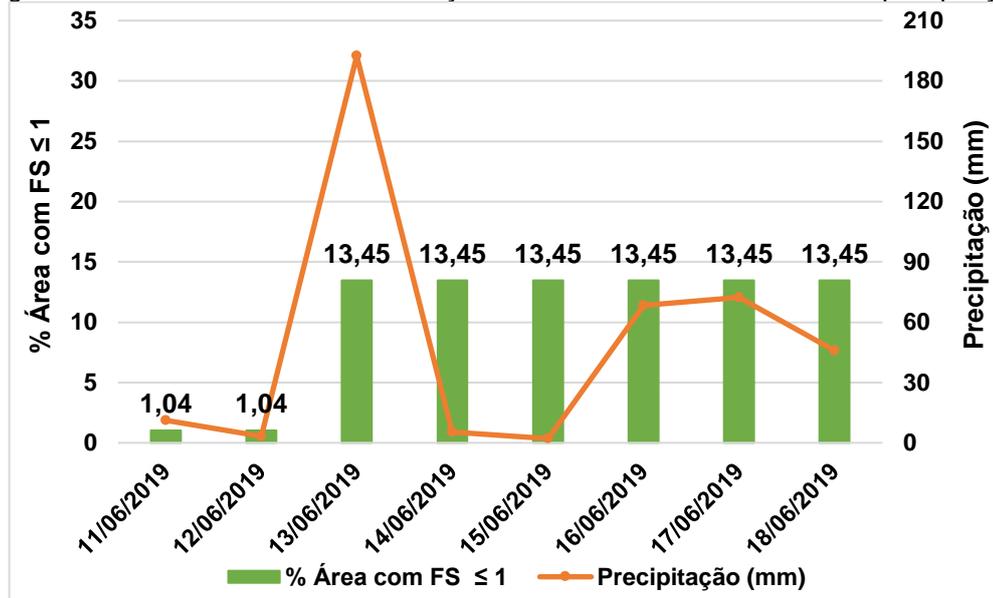
Tabela 26 - Cenário SAT 3 - Validação do dia mais crítico por meio do  $LR_{CLASS}$ .

Classe de FS	Registro de deslizamento (a)	% Registro de deslizamentos (c=a/b)	% da Área prevista pelo TRIGRS (d)	$LR_{class}$ (e=c/d)	% $LR_{class}$ (=e/f)
$FS \leq 1,00$	49,00	96,08	22,91	4,19	<b>86,86</b>
$1,00 < FS \leq 1,20$	2,00	3,92	6,18	0,63	13,14
$1,20 < FS \leq 1,50$	0,00	0,00	7,31	0,00	0,00
$FS > 1,50$	0,00	0,00	63,60	0,00	0,00
Somatório	51 (b)	100,00	100,00	4,83 (f)	100,00

Fonte: Autora.

## 7.5 MICROBACIA CÓRREGO DO MORCEGO - CENÁRIO NSAT 1

Neste cenário o modelo de infiltração inicial é não saturado, o  $Z_{max}$  e o nível de água são considerados constantes para toda microbacia e estão localizados a 1,00 metro de profundidade. A Figura 111 apresenta a relação entre a % da área instável ( $FS \leq 1$ ) e a precipitação durante o período analisado. Através desse gráfico, pode-se observar que a área instável ( $FS \leq 1$ ) aumentou no dia 13/06/19, 13,45%, quando a precipitação correspondeu a 192,4 mm. Assim como no cenário SAT1, o percentual de área instável alcançado neste dia, se manteve constante até o último dia modelado. Observa-se também que a % de área instável a partir do dia crítico são iguais para os cenários SAT1 e NSAT1, indicado que possivelmente a precipitação desse dia foi suficiente para saturar a camada de 1 m de solo ( $Z_{max}$ ), deixando os dois cenários nas mesmas condições.

Figura 111 - Cenário NSAT 1 - Correlação entre % da área com FS  $\leq 1$  e a precipitação

Fonte: Autora.

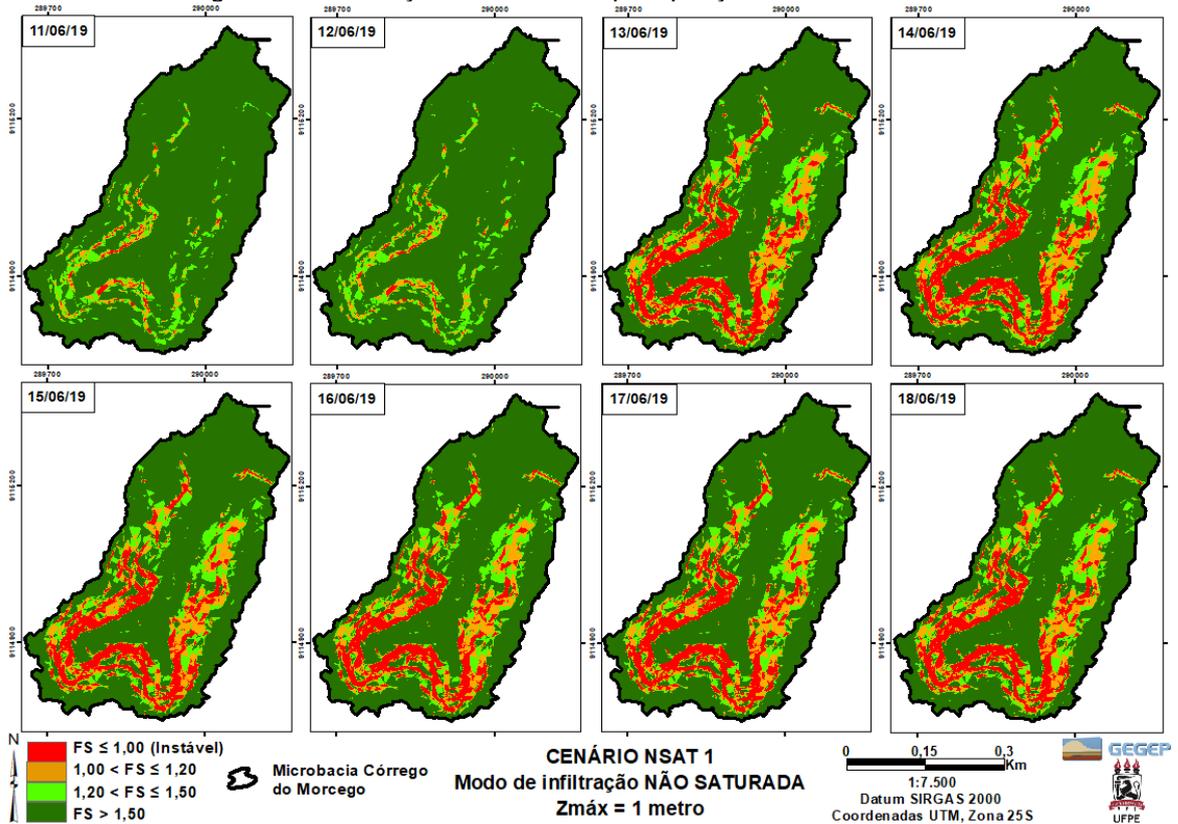
A Figura 112 plota a distribuição espacial do FS para os dias analisados. É observado um aumento consideravelmente da área instável no dia 13/06, devido a precipitação de 192,4mm, sendo esse o primeiro dia mais crítico e utilizado na validação. Nos dias subsequentes a área classificada instável se mantém constante.

A Figura 113 apresenta a distribuição de poropressão na profundidade correspondente ao FS<sub>min</sub> (1,0 m). Os mapas mostram que ocorre uma mudança significativa das condições iniciais de poropressão em 13/06/19, devido a precipitação de 192,4mm, e posteriormente se mantém constante até 18/06/19. Esse comportamento da poropressão ao longo dos dias, explica porque a área com FS  $\leq 1,0$  também se manteve constante entre esses dias.

No intervalo de tempo analisado, em algumas localidades da microbacia foi registrado um valor máximo de poropressão correspondente a 0,9994m.

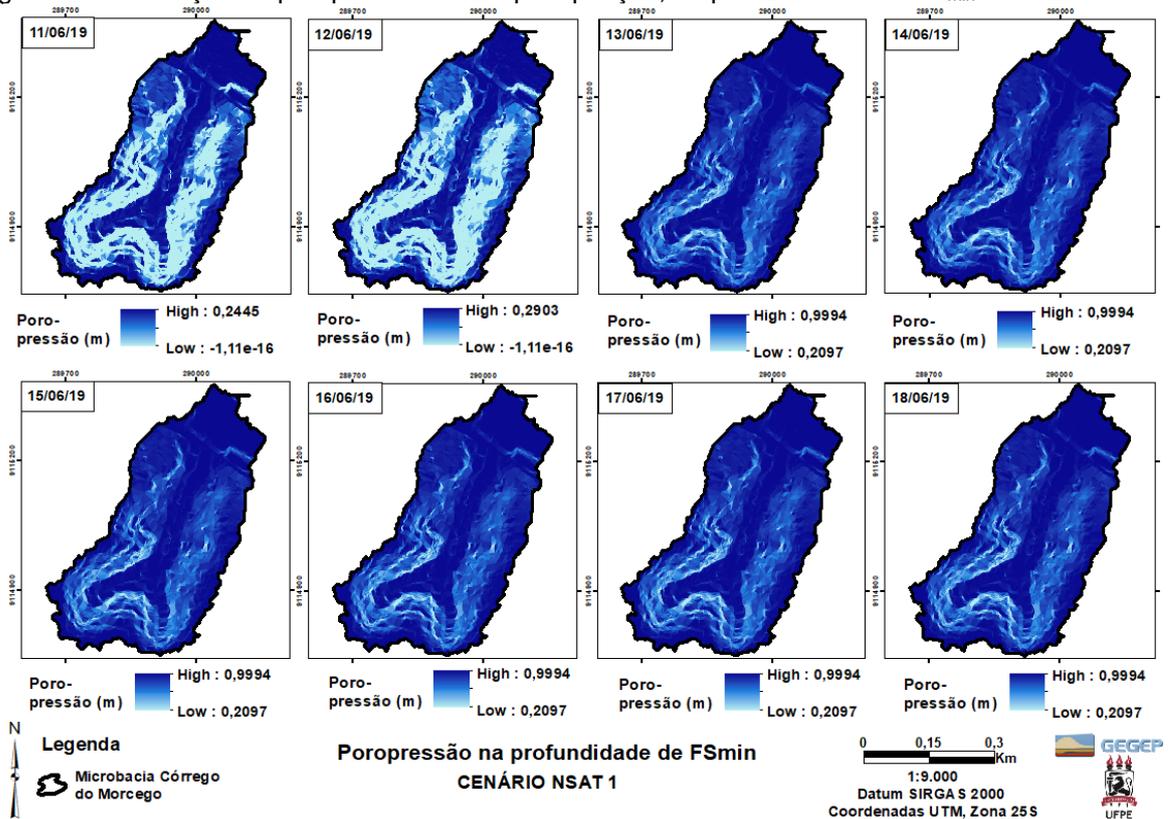
Observa-se que as análises do cenário NSAT 1 apresentam comportamento semelhante as análises do cenário SAT 1, fato que pode se explicar devido a possível saturação da espessura de solo  $Z_{max} = 1,0m$ , causada pela precipitação ocorrida, no cenário NSAT 1, pondo esses dois cenários nas mesmas condições de poropressão.

Figura 112 - Variação do FS com a precipitação – Cenário NSAT 1.



Fonte: Autora.

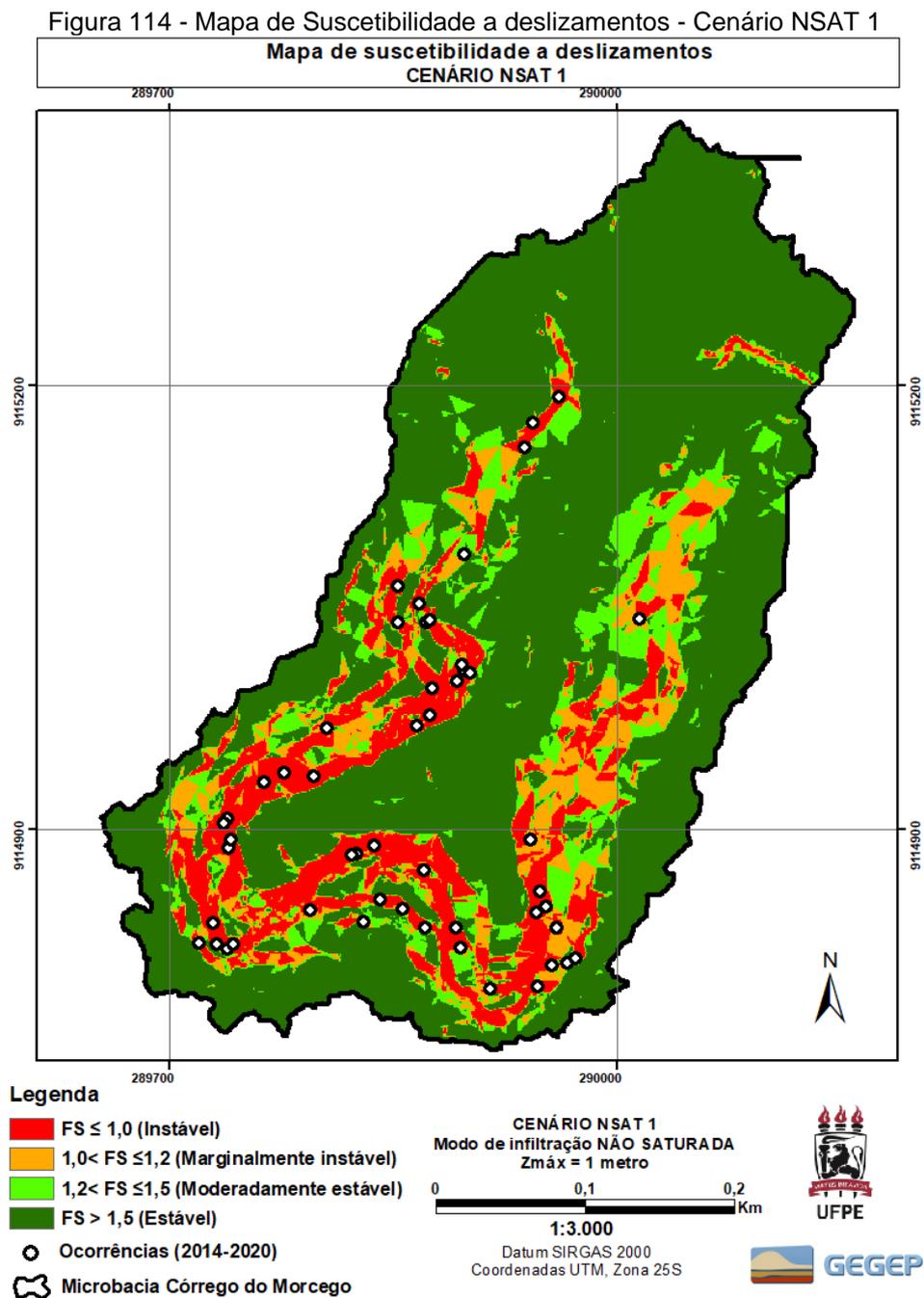
Figura 113 - Variação da poropressão com a precipitação, na profundidade de FS<sub>min</sub>- Cenário NSAT1.



Fonte: Autora.

**7.5.1 Mapa de suscetibilidade a deslizamentos e Validação – Método LR<sub>CLASS</sub>**

A Figura 114 apresenta o mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos translacionais da análise NSAT 1 para microbacia Córrego do Morcego. Esse mapa trata-se do primeiro dia mais crítico do respectivo cenário (13/06/19) e apresenta a classificação do FS, assim como os locais de ocorrência de deslizamentos registrados entre 2015 e 2020.



Fonte: Autora.

A Tabela 27 apresenta a validação do mapa de suscetibilidade por meio do método  $LR_{class}$ . Esta tabela mostra que 13,45% da área foi classificada como instável ( $FS \leq 1,0$ ) e 82,35% das ocorrências registradas estão localizadas dentro dela, desse modo a  $\%LR_{FS \leq 1}$  é 76,60%.

Tabela 27 - Cenário NSAT 1 - Validação do dia mais crítico por meio do  $LR_{CLASS}$

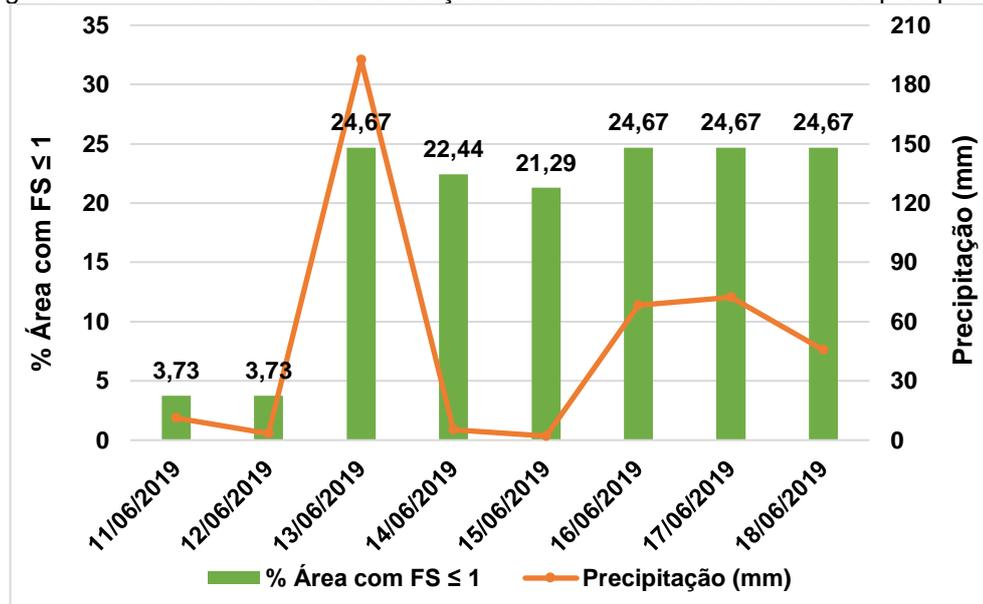
Classe de FS	Registro de deslizamento (a)	% Registro de deslizamentos (c=a/b)	% da Área prevista pelo TRIGRS (d)	$LR_{class}$ (e=c/d)	% $LR_{class}$ (=e/f)
$FS \leq 1,00$	42	82,35	13,45	6,12	<b>76,60</b>
$1,00 < FS \leq 1,20$	7	13,73	9,20	1,49	18,66
$1,20 < FS \leq 1,50$	2	3,92	10,36	0,38	4,74
$FS > 1,50$	0	0,00	67,00	0,00	0,00
Somatório	51 (b)	100,00	100,00	7,99 (f)	100,00

Fonte: Autora.

## 7.6 MICROBACIA CÓRREGO DO MORCEGO - CENÁRIO NSAT 2

Nesse cenário o modelo de infiltração inicial é não saturado, o  $Z_{max}$  e o nível de água são considerados constantes para toda área de estudo e estão localizados a 2,0 metros de profundidade. A Figura 115 apresenta a relação entre a % da área com  $FS \leq 1,00$  e a precipitação.

Este gráfico mostra que a área classificada como instável ( $FS \leq 1,00$ ) atingi seu máximo (24,67%) no terceiro dia modelado (18/06/19), seguido por uma discreta diminuição nos dois dias seguintes, quando então atingi o valor de máximo novamente no sexto dia, 16/06/2019, e o mantem até o último dia analisado, 18/06/19. Dessa forma, pode se afirmar que o primeiro dia mais crítico foi o dia que apresentou a maior precipitação, o dia 13/06/19.

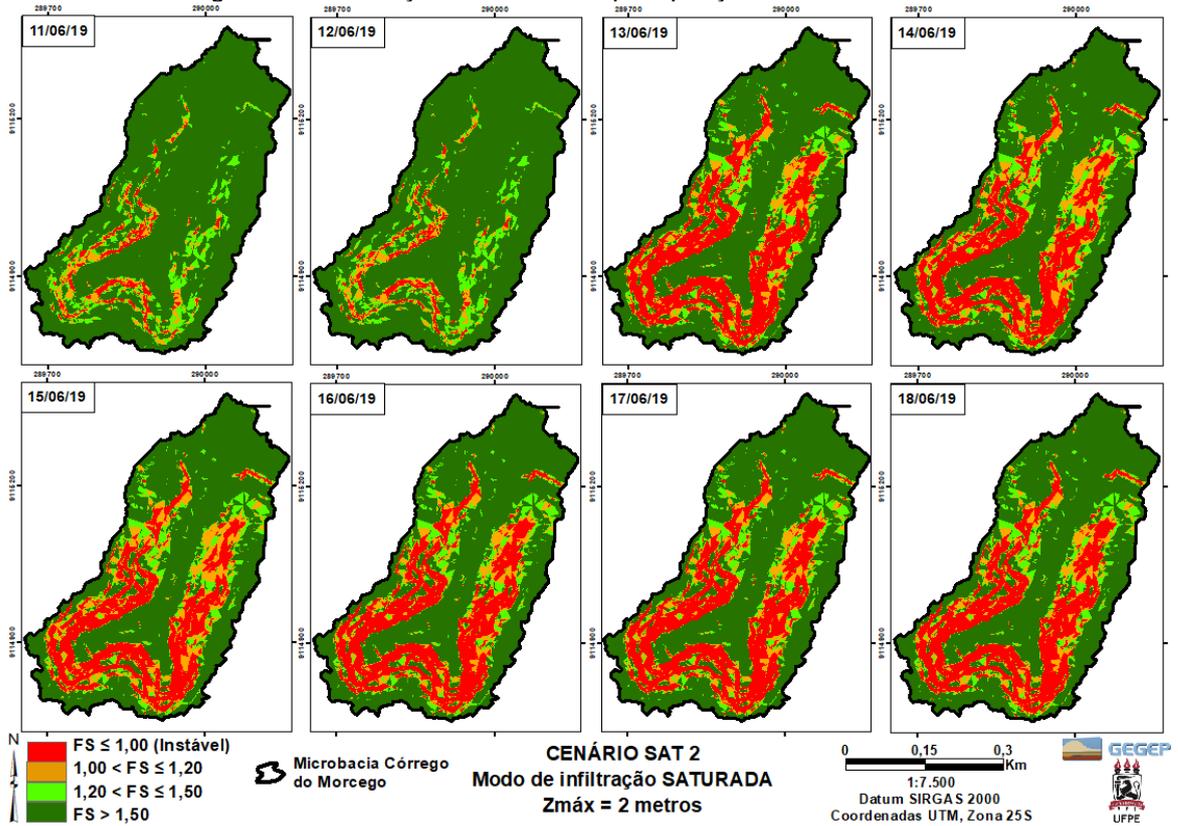
Figura 115 - Cenário NSAT 2 - Correlação entre % da área com  $FS \leq 1$  e a precipitação

Fonte: Autora.

A Figura 116 apresenta mapas com a distribuição espacial do FS para todos os dias analisados. Vale lembrar que os FS para toda área de estudo foi calculada, neste cenário, para uma profundidade de 2,0 m. A série de mapas mostra que as áreas classificadas como instáveis ( $FS \leq 1$ ) aumentou a partir do dia 13/06/19, devido à grande precipitação de 192,4mm, atingindo seu valor máximo nesse dia e portando sendo este o primeiro dia crítico a ser utilizado na validação. Nos dias subsequentes, as áreas classificadas como instáveis ( $FS \leq 1$ ) reduzem sutilmente e voltam a atingir o valor máximo com o aumento do volume precipitado, a partir do dia 16/06/2019.

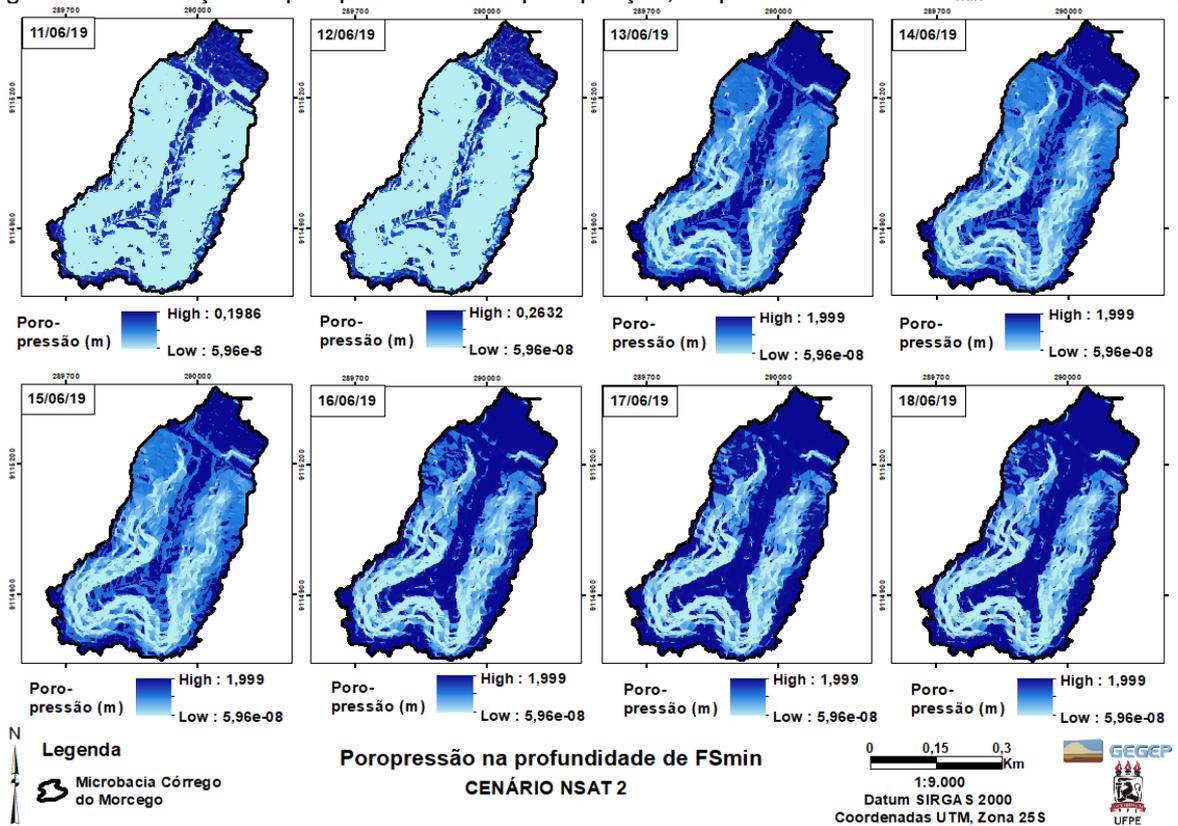
A Figura 117 apresenta a distribuição de poropressão na profundidade correspondente ao  $FS_{\min}$ , que corresponde ao  $Z_{\max}$  de 2,00 m. A sequência de mapas mostra uma mudança considerável das condições iniciais a partir do 13/06/2019, nos dias seguintes é observado uma variação menor da poropressão, onde há uma queda nos dois dias seguintes ao primeiro dia crítico, mas retorno ao valor de poropressão máximo nos dias 16/06/2019 e 17/06/19, seguido de uma pequena redução no dia 18/06/2019. Pode-se salientar que o valor máximo atingido pela poropressão, 1,99 m, quase correspondeu a toda espessura da camada considerada neste cenário, visto que  $Z_{\max}$  é igual a 2,0 m. Logo, pode afirmar que as condições do solo nesse dia, aproximou-se da saturação.

Figura 116 - Variação do FS com a precipitação – Cenário NSAT 2.



Fonte: Autora.

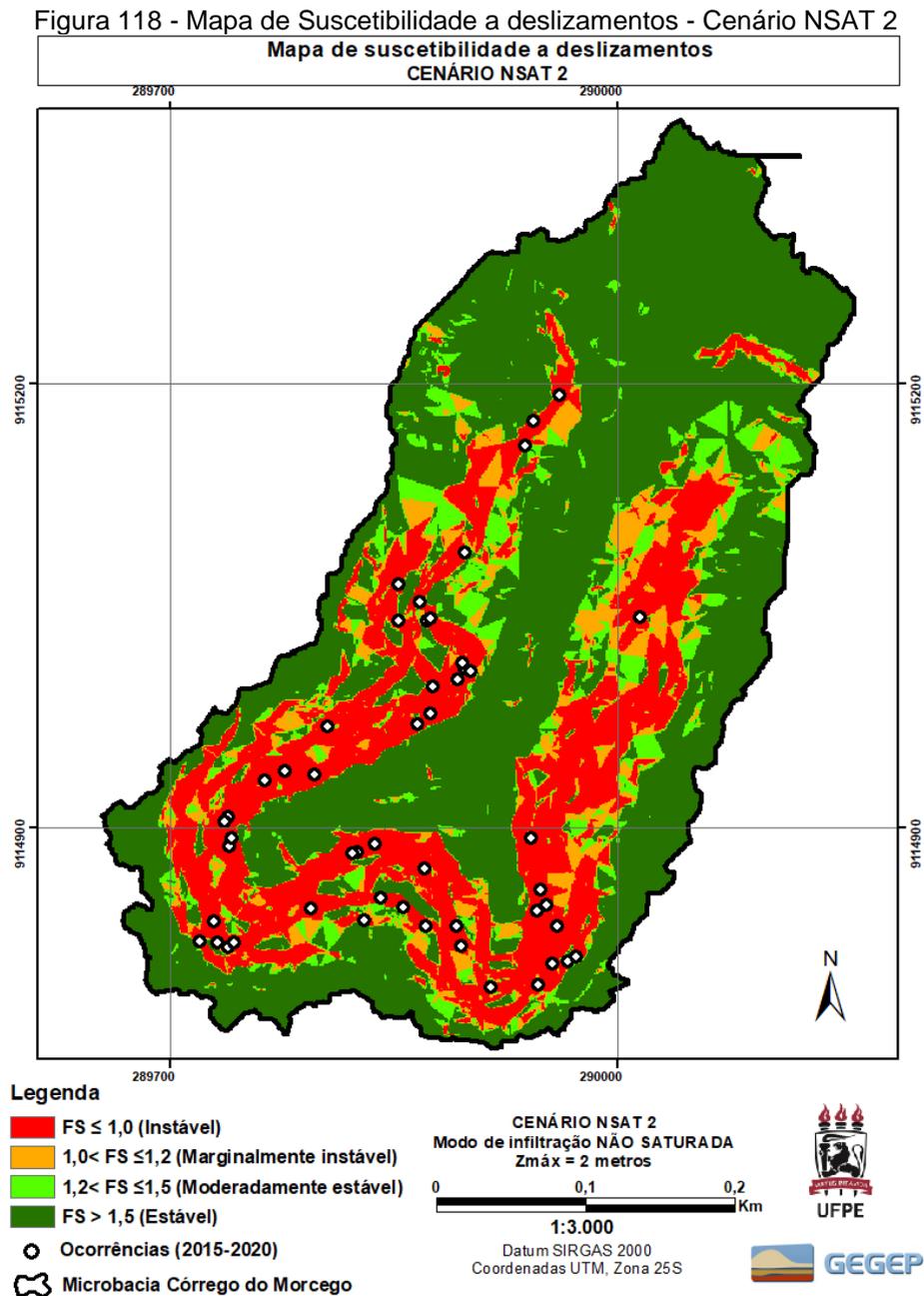
Figura 117 - Variação da poropressão com a precipitação, na profundidade de FS<sub>min</sub>- Cenário NSAT2.



Fonte: Autora.

**7.6.1 Mapa de suscetibilidade a deslizamentos e Validação – Método LR<sub>CLASS</sub>**

A Figura 118 apresenta o mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos translacionais da análise NSAT 2 para microbacia Córrego do Morcego. Esse mapa trata-se do primeiro dia mais crítico do respectivo cenário (13/06/19) e apresenta a classificação do FS, assim como os locais de ocorrência de deslizamentos registrados entre 2015 e 2020.



Fonte: Autora.

A Tabela 28 apresenta a validação desse mapa por meio do método  $LR_{class}$ . Esta tabela apresenta que 24,67% das áreas foram classificadas como instáveis ( $FS \leq 1,0$ ) e 96,08% das ocorrências registradas estão localizadas dentro dela, desse modo a  $\%LR_{FS \leq 1}$  é 89,20%. Isso significa que se ocorrer um deslizamento, a área classificada como instável possui 89,20% de chance de incluir essa ocorrência.

Tabela 28 - Cenário NSAT 2 - Validação do dia mais crítico por meio do  $LR_{CLASS}$

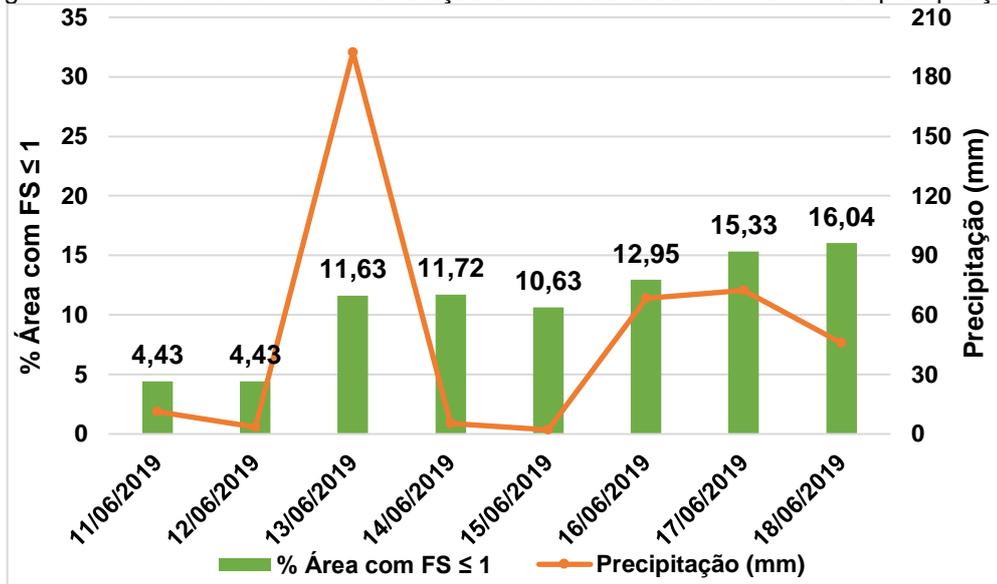
Classe de FS	Registro de deslizamento (a)	% Registro de deslizamentos (c=a/b)	% da Área prevista pelo TRIGRS (d)	$LR_{class}$ (e=c/d)	% $LR_{class}$ (=e/f)
$FS \leq 1,00$	49	96,08	24,67	3,89	<b>89,20</b>
$1,00 < FS \leq 1,20$	1	1,96	8,10	0,24	5,55
$1,20 < FS \leq 1,50$	1	1,96	8,55	0,23	5,25
$FS > 1,50$	0	0	58,68	0	0
Somatório	<b>51 (b)</b>	100,00	100,00	<b>(f)</b>	100,00

Fonte: Autora.

### 7.7 MICROBACIA CÓRREGO DO MORCEGO - CENÁRIO NSAT 3

Nesse cenário o modelo de infiltração inicial é não saturado, o  $Z_{max}$  e o nível de água são considerados constantes para toda área de estudo e estão localizados a 3,0 metros de profundidade. A Figura 119 apresenta a relação entre a % da área com  $FS \leq 1,00$  e a precipitação. Através desse gráfico, percebe-se que a área classificada com instável ( $FS \leq 1,00$ ), aumentou a partir dia 13/06, devido a precipitação de 192,4mm, mas diferentemente dos outros cenários analisados, esta área somente alcançou o seu valor máximo no dia em 18/06 (último dia modelado), devido a infiltração acumulada chuva, adicionalmente a precipitação do dia de 45,8mm, sendo este o dia mais crítico.

Figura 119 - Cenário NSAT 3 - Correlação entre % da área com  $FS \leq 1$  e a precipitação.



Fonte: Autora.

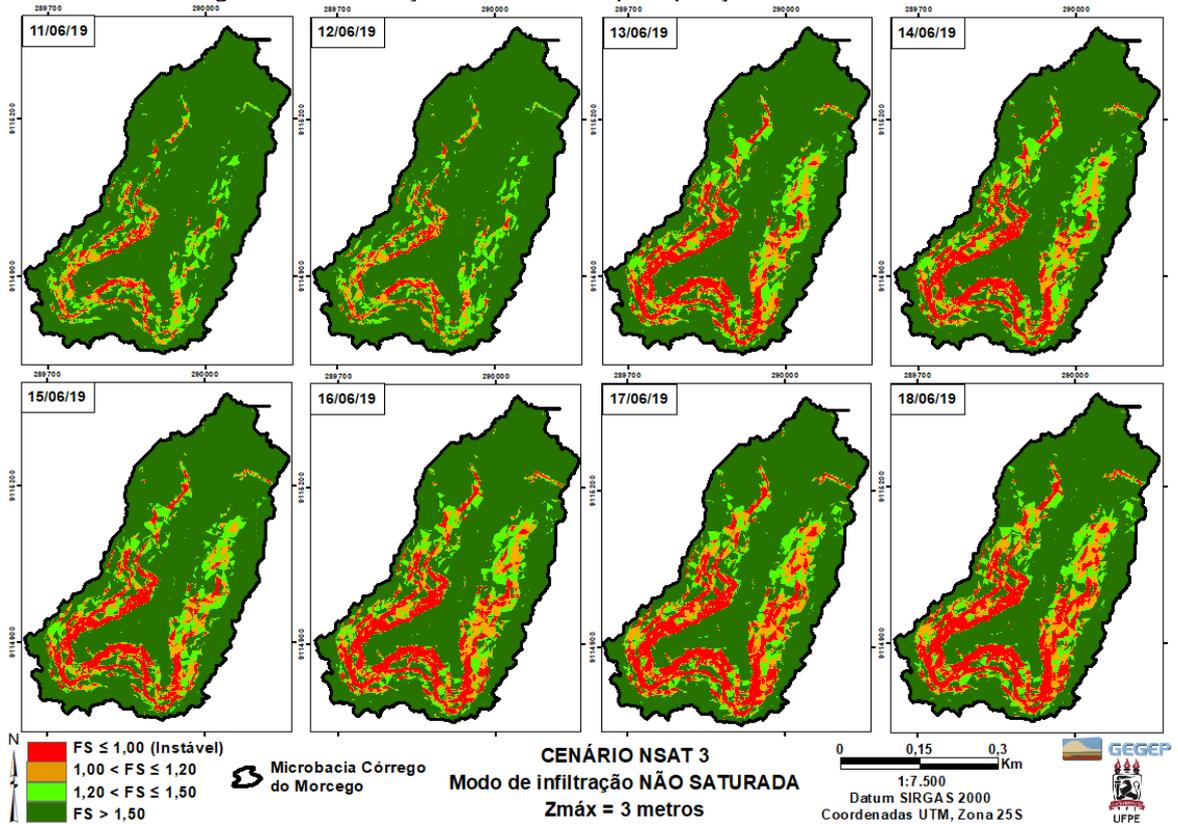
A Figura 120 apresenta mapas com a distribuição espacial do FS para todos os dias analisados. Assim, como observado na Figura 119, a Figura 120 apresenta um aumento da área instável a partir dia 13/06/19, devido a precipitação de 192,4mm, seguido por um aumento progressivo até dia 18/06/19, diferindo dos demais cenários que apresentaram o dia 13/06/19 como crítico. Essa divergência pode ser justificada por Baum et al (2010), onde os mesmos expõem que os resultados das análises realizadas considerando a condição inicial não saturada são afetadas pela camada insaturada de forma que a resposta do desenvolvimento da poropressão induzido pela chuva na camada não saturada é atenuado, “atrasando” o momento de instabilização da encosta ( $FS \leq 1,00$ ).

Assim, o aumento no valor do  $Z_{max}$  refletiu na mudança do dia mais crítico e na redução da área instável deste dia em aproximadamente 35,14% em relação ao dia mais crítico do cenário NSAT2.

A Figura 121 apresenta a distribuição de poropressão na profundidade correspondente ao  $FS_{min}$ . A sequência de mapas mostra uma mudança considerável das condições iniciais a partir do 13/06/2019, nos dias seguintes é observado uma tendência de aumento da poropressão, atingindo um valor máximo equivalente a 2,199m, em algumas localidades da microbacia, no dia 18/06/2019.

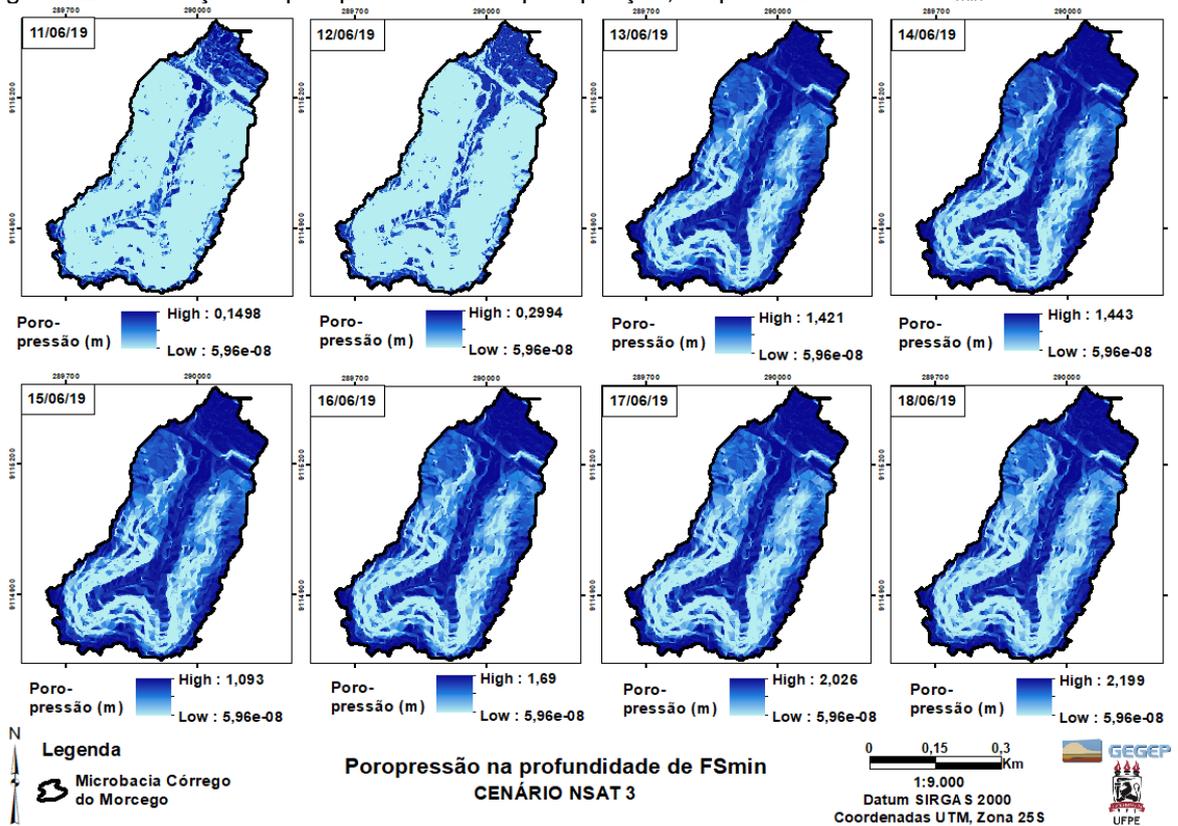
Assim como no Cenário NSAT2, e diferentemente do cenário NSAT1, o nível de poropressão e a % da área instável ( $FS \leq 1,00$ ) varia após o dia 13/06/19.

Figura 120 - Variação do FS com a precipitação – Cenário NSAT3.



Fonte: Autora.

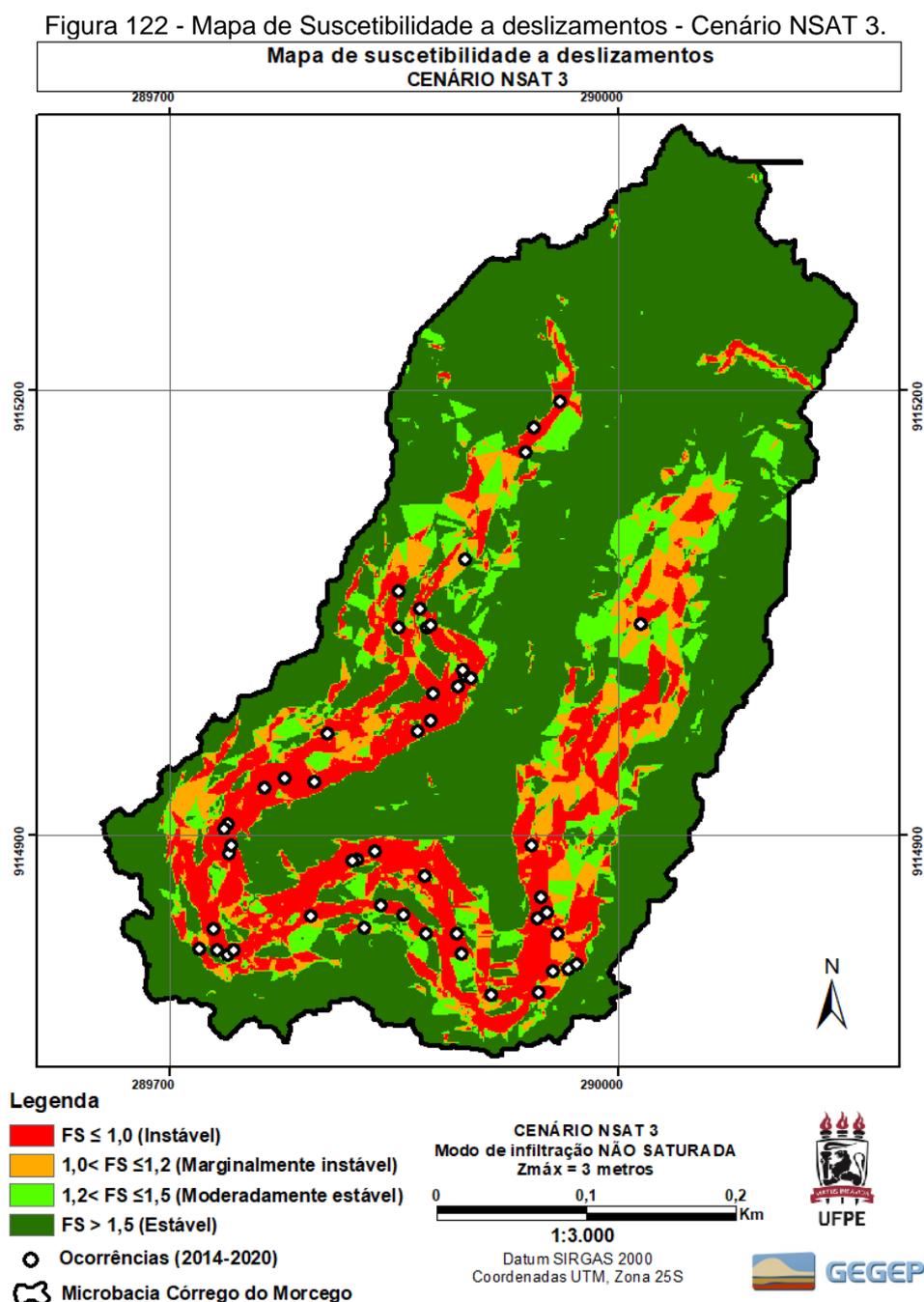
Figura 121 - Variação da poropressão com a precipitação, na profundidade de FS<sub>min</sub>- Cenário NSAT3.



Fonte: Autora.

### 7.7.1 Mapa de suscetibilidade a deslizamentos e Validação – Método LR<sub>CLASS</sub>

A Figura 122 apresenta o mapa de suscetibilidade a deslizamentos translacionais rasos do cenário NSAT 3 para microbacia Córrego do Morcego. Esse mapa trata-se do primeiro dia mais crítico do respectivo cenário (18/06/19) e apresenta a classificação do FS, assim como os locais de ocorrência de deslizamentos registrados entre 2015 e 2020.



Fonte: Autora.

A Tabela 29 apresenta a validação desse mapa por meio do método  $LR_{class}$ . A tabela expõe que 16,04% da área da microbacia foi classificada como instável ( $FS \leq 1,0$ ) e 96,08% das ocorrências registradas estão inseridas dentro dela. Desse modo, a  $\%LR_{FS \leq 1}$  é 93,46%. Isso significa que caso haja um deslizamento dentro da área de estudo há 93,46% de chance deste, ocorrer dentro das áreas instáveis ( $FS \leq 1$ ) previstas no mapa de suscetibilidade gerado pelo modelo TRIGRS.

Tabela 29 - Cenário NSAT 3 - Validação do dia mais crítico por meio do  $LR_{class}$ .

Classe de FS	Registro de deslizamento (a)	% Registro de deslizamentos (c=a/b)	% da Área prevista pelo TRIGRS (d)	$LR_{class}$ (e=c/d)	% $LR_{class}$ (=e/f)
$FS \leq 1,00$	49	96,08	16,04	5,99	<b>93,46</b>
$1,00 < FS \leq 1,20$	1	1,96	8,73	0,22	3,51
$1,20 < FS \leq 1,50$	1	1,96	10,07	0,19	3,04
$FS > 1,50$	0	0,00	65,16	0,00	0,00
Somatório	<b>51 (b)</b>	100,00	100,00	<b>6,41 (f)</b>	100,00

Fonte: Autora.

## 7.8 COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DOS CENÁRIOS – MICROBACIAS CÓRREGO DO MORCEGO

Para as análises do cenário NSAT, mesmo considerando uma condição inicial não saturada, após a precipitação ocorrida entre os dias analisados, possivelmente o solo se encontra próximo de saturação, explicando a similaridade dos resultados entre as análises SAT e NSAT. Tal comportamento é verificado principalmente quando o  $Z_{max}$  é igual a 1 metro, onde a % de área instável do primeiro dia mais crítico, nas análises dos Cenários SAT1 e NSAT1 são iguais, com valor de 13,45%.

Nas análises em que o  $Z_{max}$  é igual a 3,00 m, é observado uma diferença na % de área instável do primeiro dia mais crítico, entre os Cenários SAT3 e NSAT3. Para o Cenário SAT3 a % de área instável é 22,9% e para NSAT3 é 16%. O primeiro dia mais crítico também ocorreu em datas distintas, 13/06/19 para o Cenário SAT3 e 18/06/19 para a cenário NSAT3.

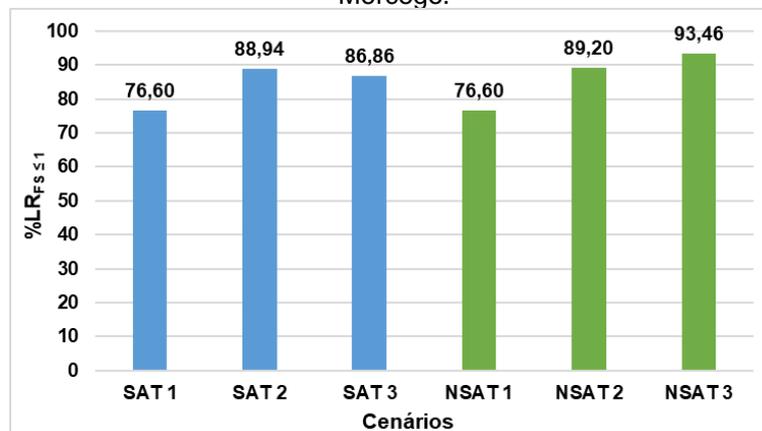
Baum et al. (2010) constataram que nas análises dos cenários que consideram a condição inicial saturada, a propressão positiva se desenvolve mais cedo, gerando resultados mais conservadores. Por outro lado, os resultados das análises dos cenários que consideram a condição inicial não saturada são afetados pela camada

insaturada que atenua e atrasa a resposta da poropressão induzida pela chuva e conseqüentemente o momento de ruptura da encosta. Desse modo, conclui-se que quanto maior o  $Z_{max}$  e a profundidade inicial do nível de água considerado, conseqüentemente maior será o efeito da sucção na camada não saturada.

Outro fator a ser considerado é a % de área instável inicial, essas áreas são aquelas apontadas pelo modelo que apresentam  $FS \leq 1,00$  quando pouca ou nenhuma chuva é deflagrada. Como exemplo, pode-se citar o dia 11/06/2019, que mesmo apresentando um baixo índice pluviométrico, é possível verificar que o modelo apresenta uma % de área instável inicial que tende a crescer à medida que se aumenta a profundidade do  $Z_{max}$ . Isto justifica-se, segundo Baum et al. (2010), pois a profundidade do solo afeta a resistência ao cisalhamento, reduzindo a contribuição do ângulo de atrito e da coesão a medida que  $Z_{max}$  aumenta. Adicionalmente, a % de área instável inicial pode ser explicada pela interferência antrópica, seja na presença de cortes verticalizantes realizadas sem critério técnico ou ainda, na presença de estruturas de contenção de encostas e outras intervenções, que não são possíveis de serem inseridas e consideradas no TRIGRS. Em seus estudos, Avilá et al. (2020) também pondera a impossibilidade de considerar alguns aspectos da influência antrópica nas modelagens realizadas com TRIGRS.

A Figura 123 apresenta a comparação da  $\%LR_{FS \leq 1,00}$  dos cenários analisados para a microbacia Córrego do Morcego.

Figura 123 - Comparação da  $\%LR_{FS \leq 1}$  para os cenários analisados na microbacia Córrego do Morcego.



Fonte: Autora.

No geral, os mapas de suscetibilidade da microbacia Córrego do Morcego mostram que existe concordância entre os locais de ocorrência e a classe referente ao  $FS \leq 1,00$ . E embora haja uma diferença entre os cenários, de acordo com o

estabelecido por Park et al. (2013), todos os resultados podem ser classificados como bom, dado que  $\%LR_{FS \leq 1,00} > 70\%$  para todos os cenários, o que demonstra a equabilidade e sucesso da modelação.

Devido a menor % de área instável, a análise do cenário NSAT3 apresentou a maior  $\%LR_{FS \leq 1}$  (93,46%), sinalizando ser a melhor modelagem para a microbacia Córrego do Morcego. Neste comparativo, é importante destacar que o modelo ideal é aquele que prevê 100% dos escorregamentos, entretanto, se o modelo considerar toda a área como instável, para conter todos os locais de ocorrência do registro de deslizamentos, não será um modelo eficaz, visto que a  $\%LR_{fs \leq 1}$  será muito pequena.

Os valores de  $\%LR_{FS \leq 1}$  obtidos podem ser considerados altos e bastante satisfatórios em comparação aos mesmos índices encontrados na literatura em trabalhos nacionais e internacionais que também utilizaram o TRIGRS para obtenção de mapas de suscetibilidade a deslizamentos translacionais rasos.

Alguns trabalhos, em especial os realizados nas regiões montanhosas da Coreia do Sul, utilizaram o  $LR_{CLASS}$  para validar seus resultados. Como por exemplo, Park et al (2013) que conseguiu um resultado de 70,30% para  $\%LR_{FS \leq 1}$  nas análises realizadas na Montanha Woomyeon em Seoul, considerando uma precipitação de 470 mm que ocorreu entre 26-27 de julho de 2011. Viet et al (2017) que obteve um  $\%LR_{FS \leq 1}$  de 75,87% após refinar as análises realizadas por Park et al. (2013), utilizando o modelo de infiltração inicial não saturada. Tran et al (2017) que obteve 64,16% para  $LR_{FS \leq 1}$  para sua área de estudo, a montanha Umyeon, em Seul, e os eventos pluviométricos e ocorrências de julho de 2011. Por fim, Marin et al (2021) que em modelagem de mapa de suscetibilidade a deslizamento utilizando o TRIGRS para a bacia La Liborian, nos Andes Comlobianos, onde obtiveram  $\%LR_{FS \leq 1} = 97,45\%$ .

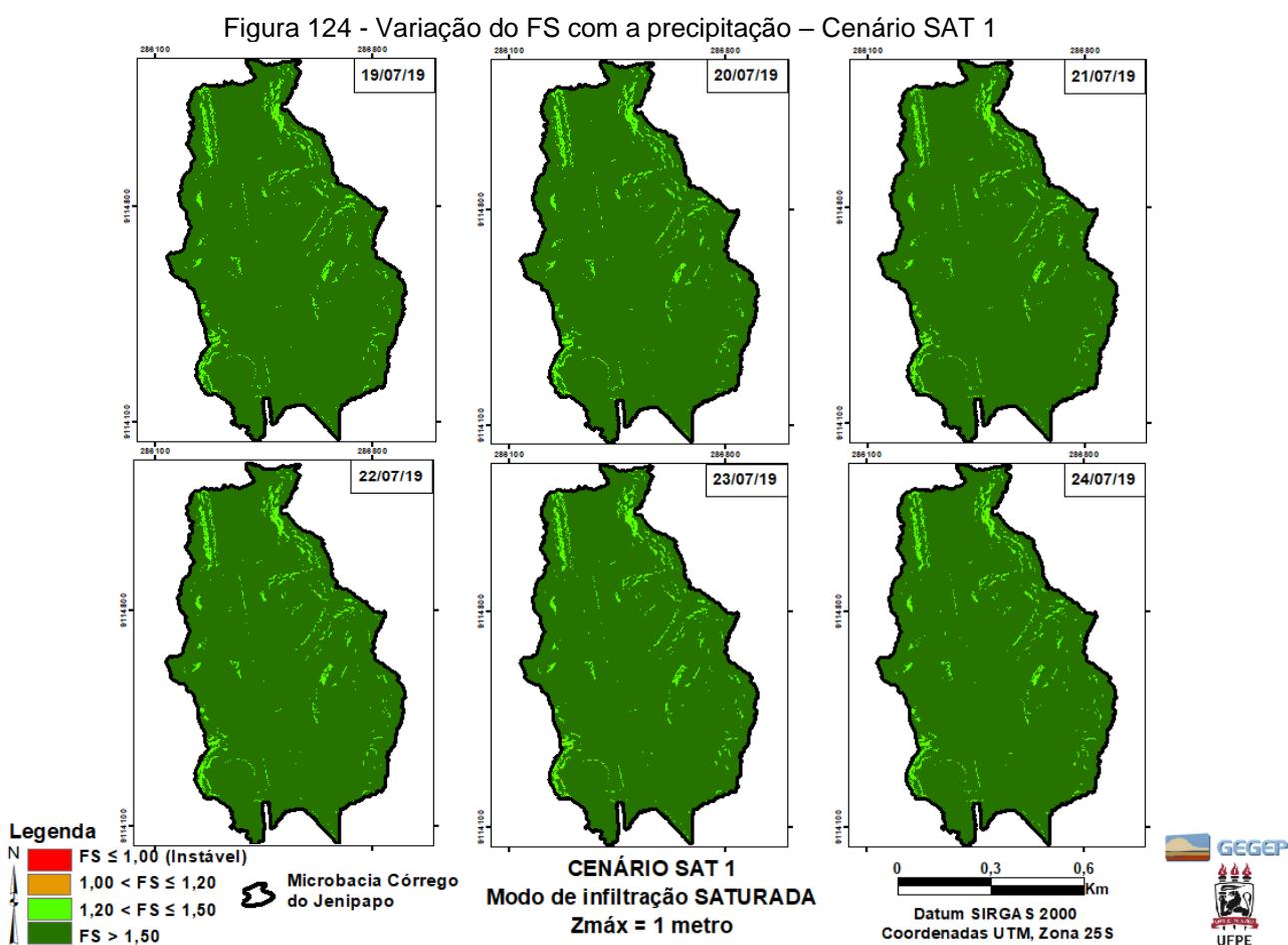
Ademais observou-se que a área prevista como instável pelo TRIGRS é bastante influenciada pela declividade do terreno, visto que estas áreas coincidiram com as áreas mais íngremes e elevadas da microbacia, observada nos mapas de declividade (Figura 23) e hipsometria (Figura 25), apresentando a mesma distribuição espacial, mesmo quando os cenários analisados são diferentes. Esses resultados concordam com o observado por Vieira et al. (2010) e Listo (2015), ambos constatarem a influência da topografia sobre a área prevista como instável pelo TRIGRS. Listo (2015) verificou que a área prevista como instável pelo TRIGRS, é coincidente com as feições mais íngremes e elevadas do relevo. Vieira et al. (2010) observou que os

resultados dos diferentes cenários analisados, apresentam variação dos percentuais de áreas instáveis, porém a distribuição espacial das mesmas não muda devido os efeitos causados pela topografia no cálculo do FS.

Neste trabalho, verificou-se que todas as ocorrências de deslizamentos (59) para a microbacia Córrego do Morcego se concentraram em encostas com declividade acima de 27°.

## 7.9 MICROBACIA CÓRREGO DO JENIPAPO - CENÁRIO SAT 1

Neste cenário o modelo de infiltração inicial é saturado, o  $Z_{max}$  e o nível de água são considerados constantes para toda área de estudo, localizados a 1,0 metro de profundidade. A Figura 124 plota a distribuição espacial do FS para todos os dias analisados.



Fonte: Autora.

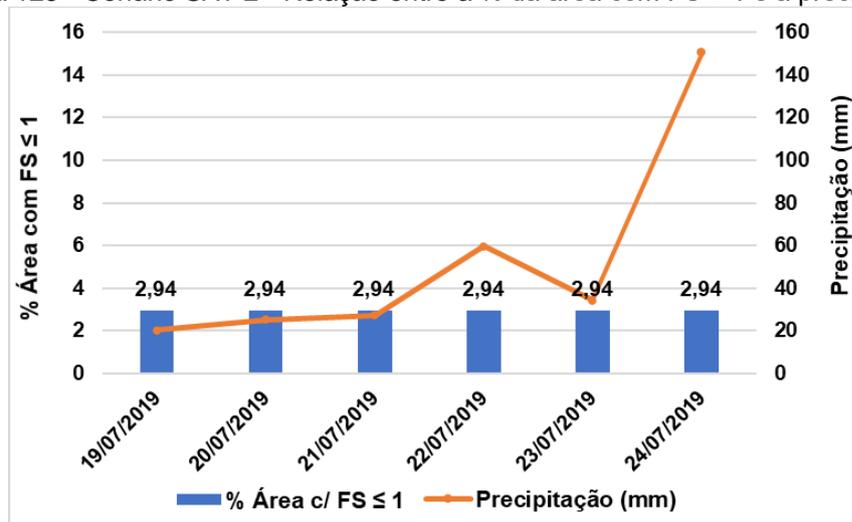
Observa-se que neste cenário, durante o período modelado, não ocorreu variação notável do FS e não apresentou nenhuma área instável ( $FS \leq 1$ ). Portanto não foi realizado a validação, nem gerado o mapa de suscetibilidade a deslizamentos pelo TRIGRS.

Visto que temos o registro de 57 ocorrências de deslizamentos na microbacia Córrego do Jenipapo entre os anos de 2014 e 2020, podemos constatar que a este cenário não foi capaz de prever nenhum dos deslizamentos. Portanto infere-se que as condições modeladas não representam a realidade da área.

## 7.10 MICROBACIA CÓRREGO DO JENIPAPO - CENÁRIO SAT 2

Neste cenário o modelo de infiltração inicial é saturado, o  $Z_{max}$  e o nível de água são considerados constantes para toda área de estudo e estão localizados a 2,0 metros de profundidade. A Figura 125 apresenta o gráfico com a relação entre a % da área com  $FS \leq 1$  e a precipitação.

Figura 125 - Cenário SAT 2 - Relação entre a % da área com  $FS \leq 1$  e a precipitação



Fonte: Autora.

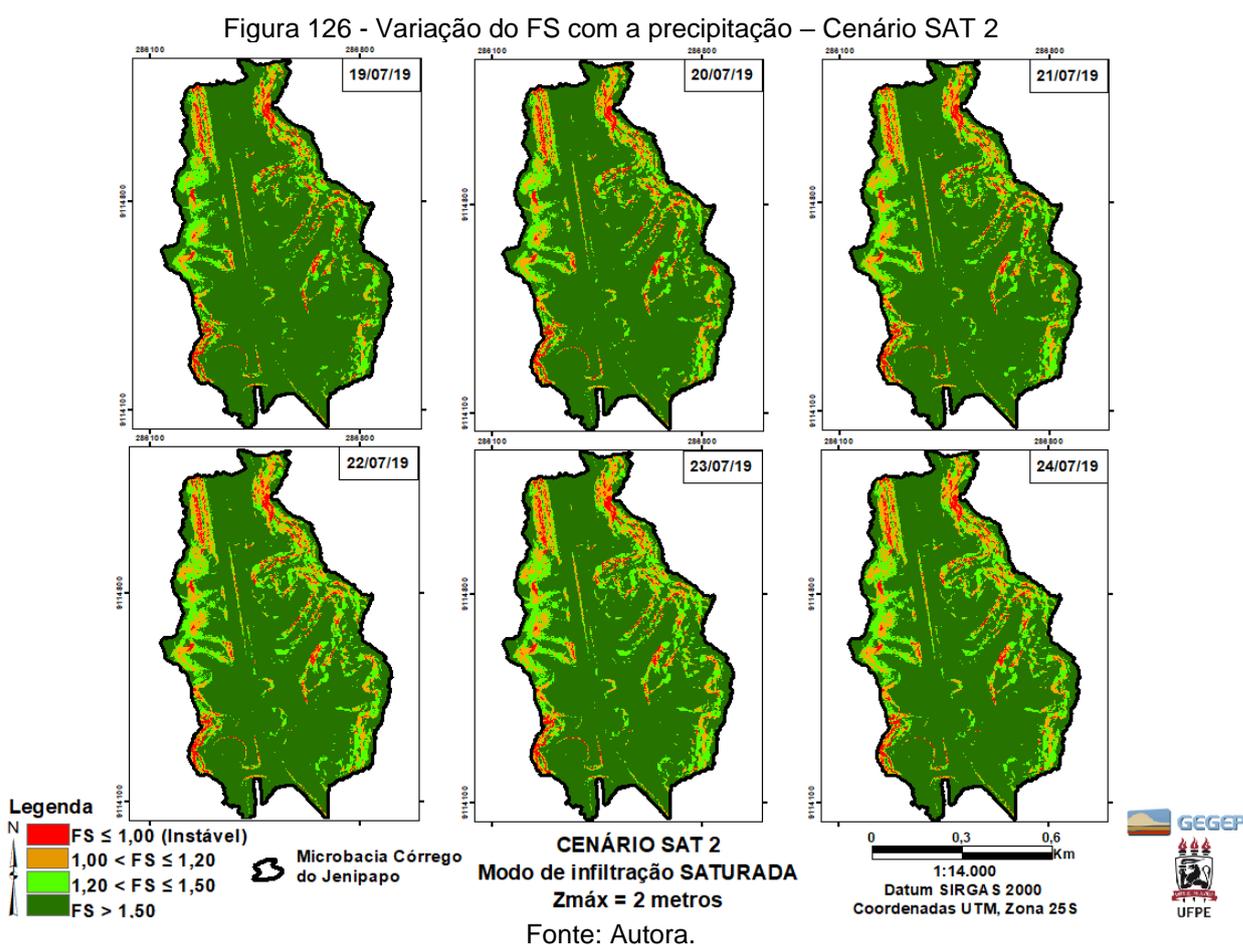
O gráfico mostra que a área instável ( $FS \leq 1$ ) se mantém constante em todo o período analisado com valor igual a 2,94%, e não é sensível a variações de precipitação. O aumento no valor do  $Z_{max}$ , em relação ao cenário SAT 1, refletiu no aparecimento de áreas instáveis desde o primeiro dia de modelado.

A Figura 104 plota a distribuição espacial do FS para todos os dias analisados, os mapas dispostos em ordem cronológica mostram que há uma sutil variação do FS

de acordo com a chuva, exceto na área classificada como instável que se manteve constante, como citado anteriormente.

O dia mais crítico, onde apesar da área instável ser semelhante aos demais dias, foi o dia 24/07/19, pois a chuva de 150,5mm refletiu-se no aumento das demais áreas de baixo FS no mapa. Assim, para este cenário, a validação será realizada no dia 24/07/19.

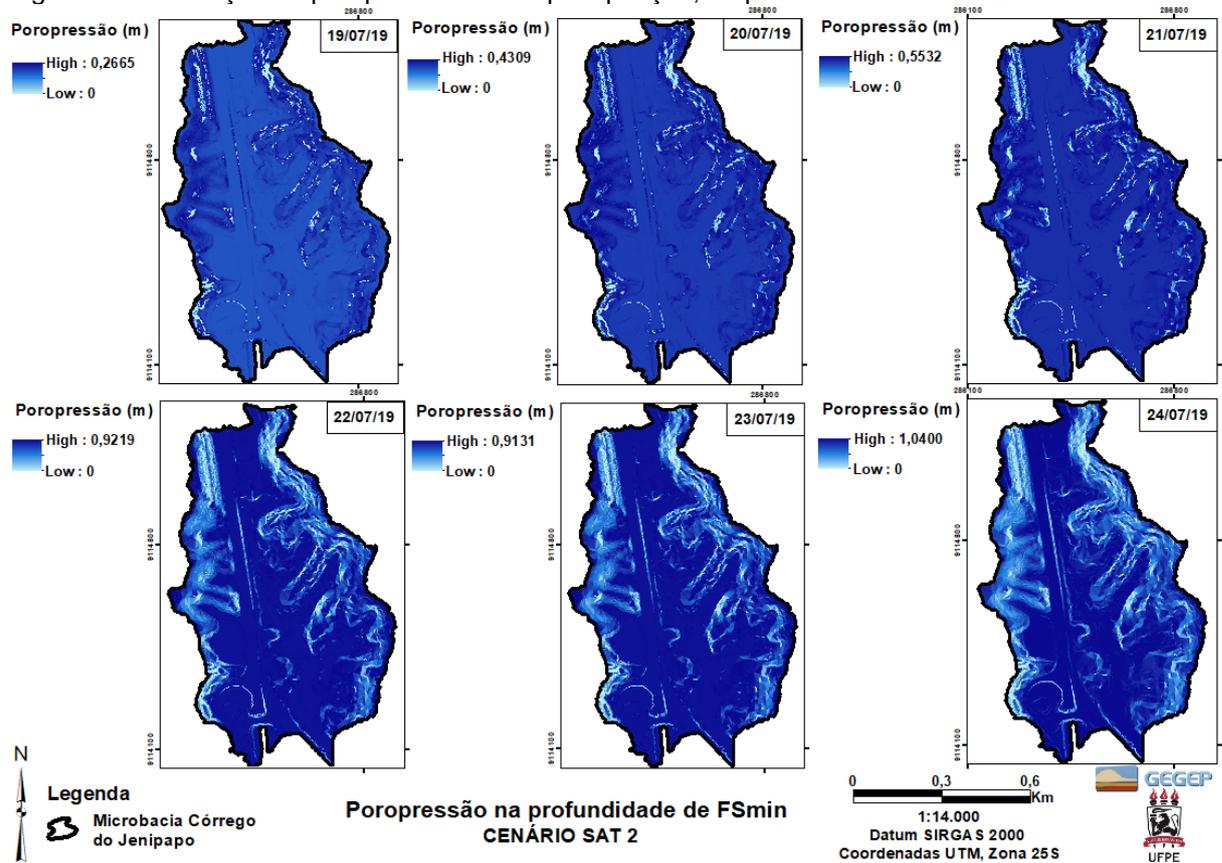
Destaca-se ainda que para este cenário, o  $FS_{\min}$  foi calculado na profundidade de 2 metros, devido a profundidade atribuída ao  $Z_{\max}$ .



A Figura 127 apresenta a distribuição de poropressão na profundidade correspondente ao  $FS_{\min}$ . Os mapas mostram que a poropressão aumenta gradativamente durante o período modelado e a partir do dia 22/07/19 tem um aumento mais expressivo. No dia 24/07/19, último dia modelado, em algumas

localidades da microbacia, a poropressão atingiu um valor máximo de 1,04m, quando choveu 150,5mm.

Figura 127 - Variação da poropressão com a precipitação, na profundidade de FS<sub>min</sub> - Cenário SAT 2

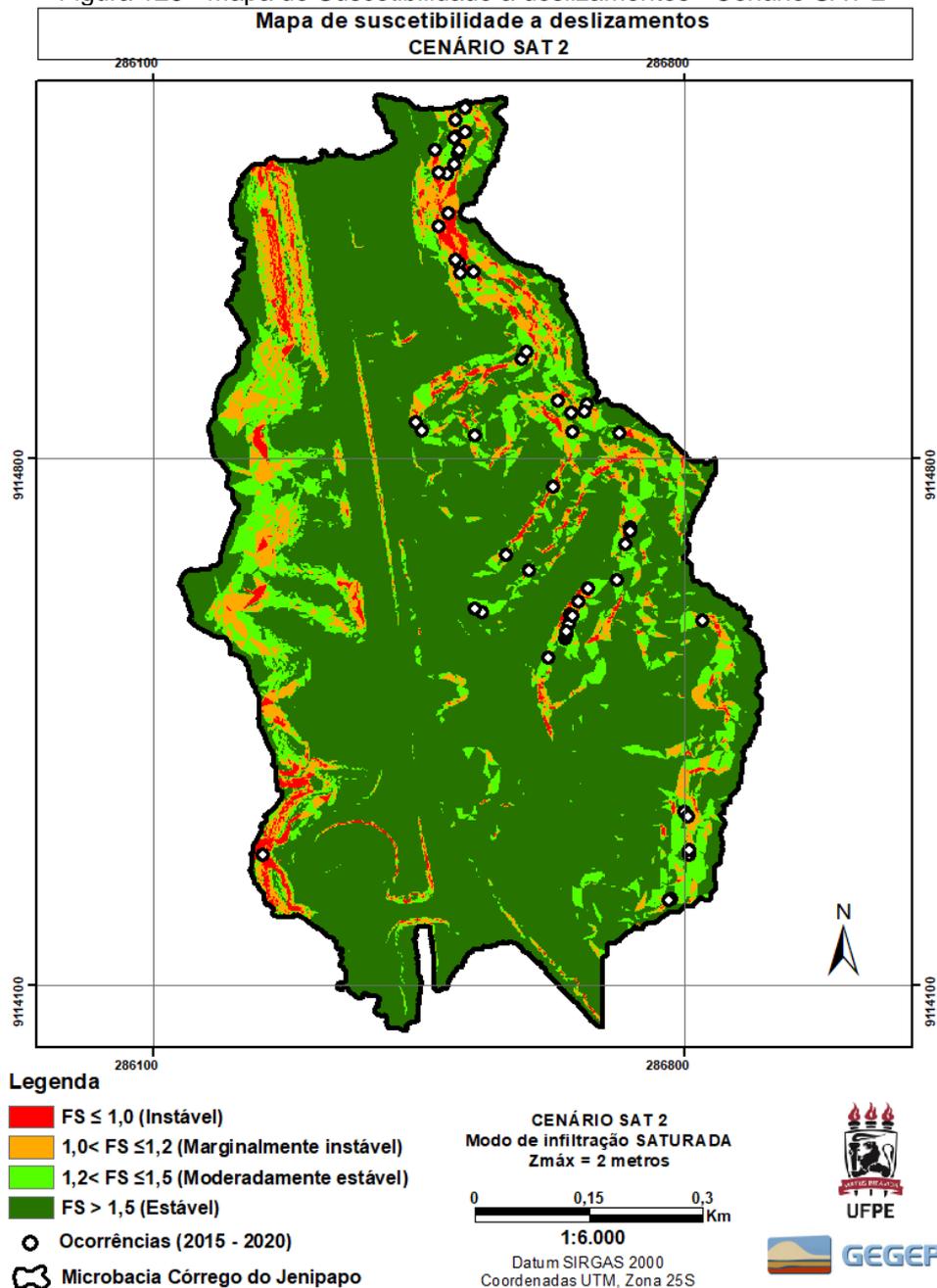


Fonte: Autora.

### 7.10.1 Mapa de suscetibilidade a deslizamentos e Validação – Método LR<sub>CLASS</sub>

A Figura 128 apresenta o mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos para o cenário SAT 2 para a microbacia Córrego do Jenipapo. Esse mapa trata-se do dia mais crítico do respectivo cenário e apresenta a classificação do FS, assim como os locais de ocorrência de deslizamentos registrados entre 2015 e 2020.

Figura 128 - Mapa de Suscetibilidade a deslizamentos - Cenário SAT 2



Fonte: Autora.

A Tabela 30 apresenta a validação desse mapa por meio do método  $LR_{class}$ . Através dela constata-se que 2,94% da área foi classificada como instável ( $FS \leq 1,0$ ) pelo modelo e 50% das ocorrências registradas estão localizadas nesta área. Desse modo, a  $\%LR_{FS \leq 1}$  é 76,51%. Isso significa que se ocorrer um deslizamento a área classificada como instável possui 76,51% de chance de incluir essa ocorrência.

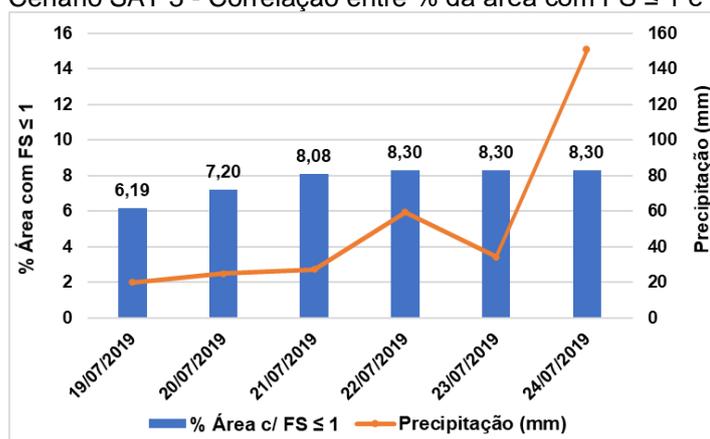
Tabela 30 - Cenário SAT 2 - Validação do dia mais crítico por meio do  $LR_{class}$ .

Classe de FS	Registro de deslizamento (a)	% Registro de deslizamentos (c=a/b)	% da Área prevista pelo TRIGRS (d)	$LR_{class}$ (e=c/d)	% $LR_{class}$ (=e/f)
$FS \leq 1,00$	27,00	50,00	2,94	17,01	<b>76,51</b>
$1,00 < FS \leq 1,20$	22,00	40,74	8,97	4,54	20,42
$1,20 < FS \leq 1,50$	5,00	9,26	13,56	0,68	3,07
$FS > 1,50$	0,00	0,00	74,52	0,00	0,00
Somatório	54 (b)	100,00	100,00	22,23 (f)	100,00

Fonte: Autora.

### 7.11 MICROBACIA CÓRREGO DO JENIPAPO - CENÁRIO SAT 3

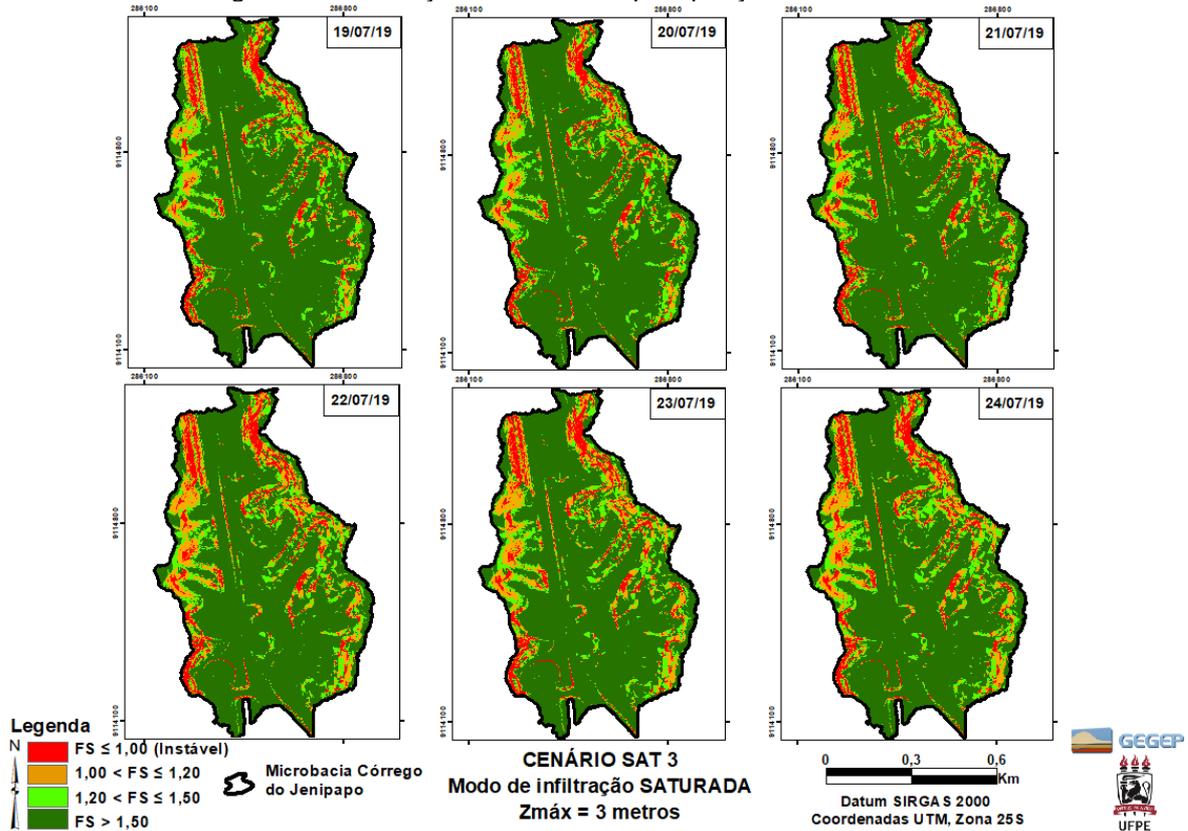
Nesse cenário o modelo de infiltração inicial é saturado, o  $Z_{max}$  e o nível de água são considerados constantes para toda área de estudo, localizados a 3,0 metros de profundidade. A Figura 129 apresenta a relação entre a % da área instável ( $FS \leq 1$ ) e a precipitação. O gráfico mostra que inicialmente a área classificada como instável, foi sensível a precipitação. Alcançando no dia 22/07/19, um valor máximo de 8,30%, que se manteve constante até o último dia modelado, 24/07/19. O aumento no valor do  $Z_{max}$  refletiu no aumento da área instável do dia mais crítico em aproximadamente 182% em relação ao dia mais crítico da análise SAT 2.

Figura 129 - Cenário SAT 3 - Correlação entre % da área com  $FS \leq 1$  e a precipitação

Fonte: Autora.

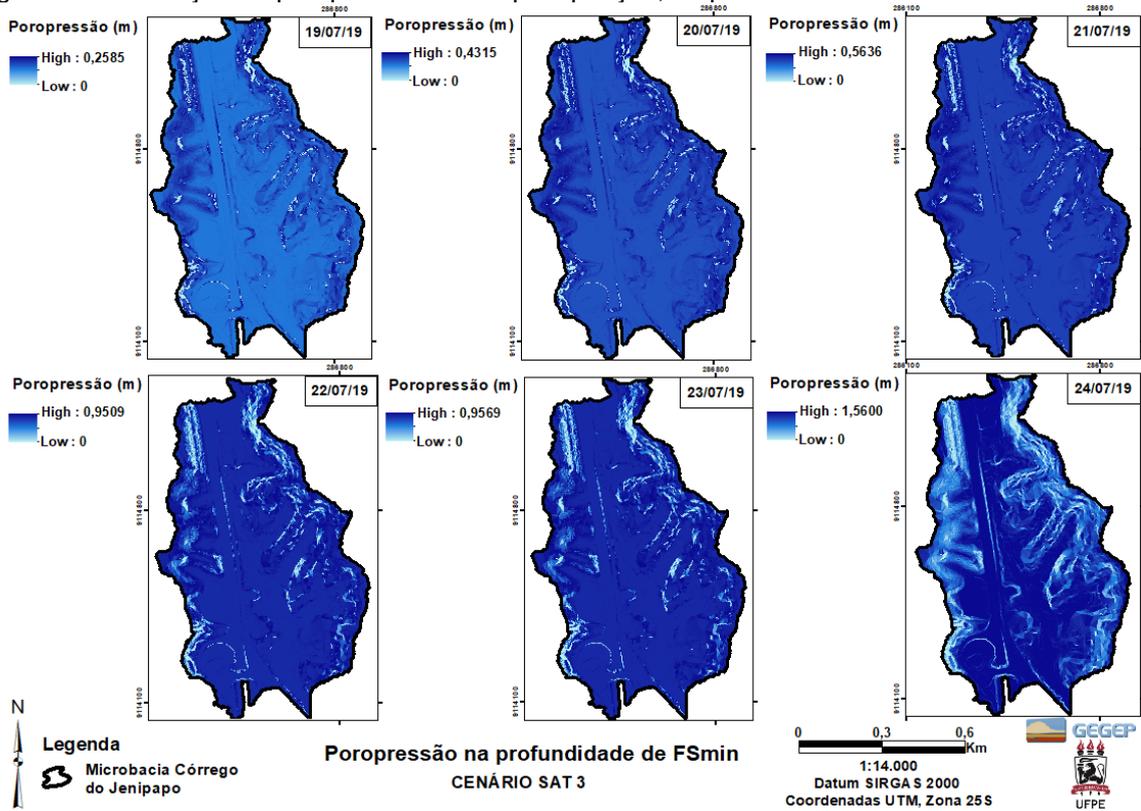
A Figura 130 plota a distribuição espacial do FS para todos os dias analisados. Para esse cenário, o  $FS_{min}$  foi calculado na profundidade de 3 metros, devido a profundidade atribuída ao  $Z_{max}$ . A Figura 131 apresenta a distribuição de poropressão na profundidade correspondente ao  $FS_{min}$ . Os mapas mostram o aumento gradual da poropressão, que alcançou em algumas localidades da microbacia o valor máximo de 1,56 m, em 24/06/19, dia em que choveu 150,5mm.

Figura 130 - Variação do FS com a precipitação – Cenário SAT 3



Fonte: Autora.

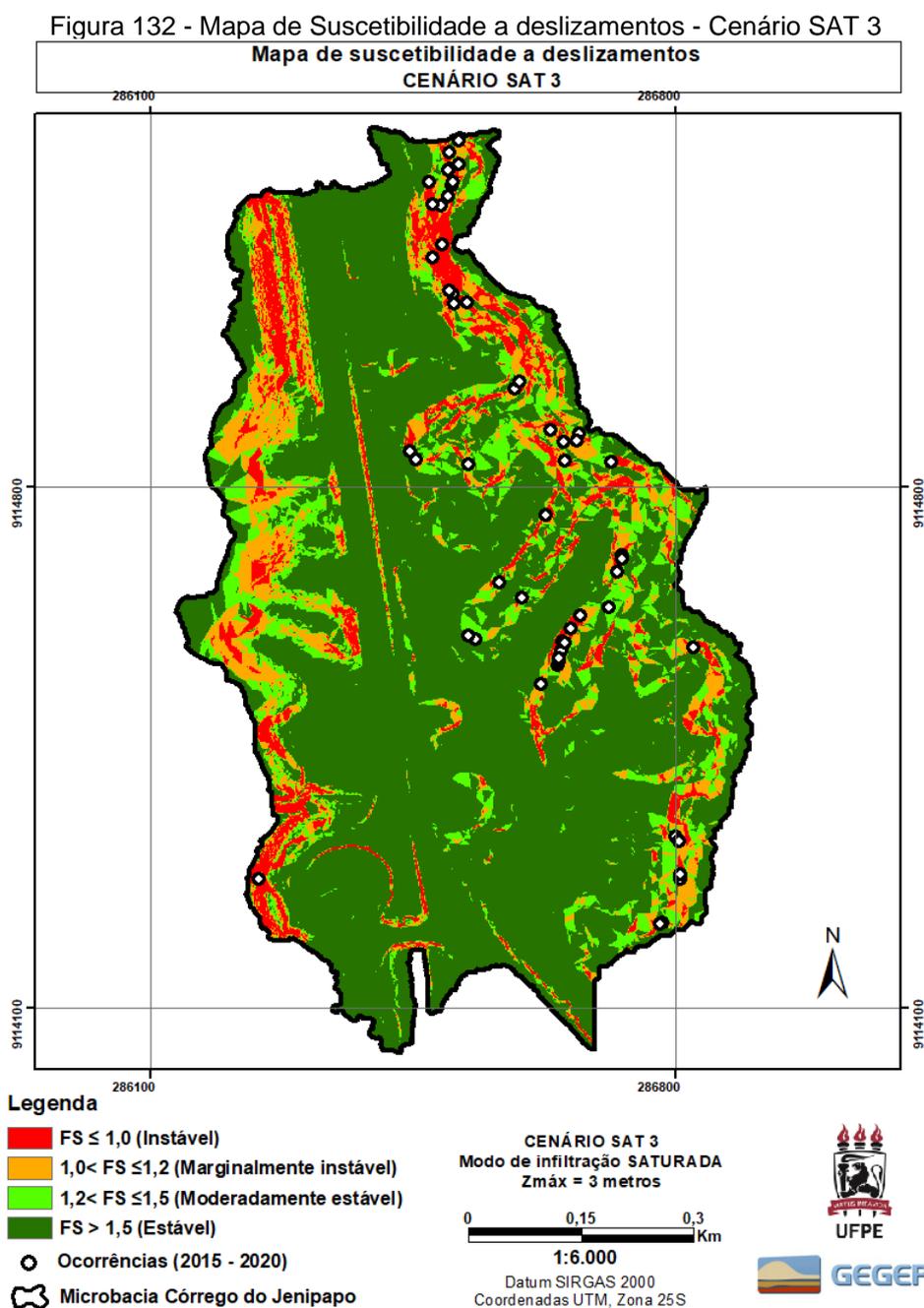
Figura 131 - Variação da poropressão com a precipitação, na profundidade de FS<sub>min</sub> - Cenário SAT 3



Fonte: Autora.

### 7.11.1 Mapa de suscetibilidade a deslizamentos e Validação – Método LR<sub>CLASS</sub>

A Figura 132 apresenta o mapa de suscetibilidade a deslizamentos translacionais rasos do cenário SAT 3 para a microbacia Córrego do Jenipapo. Esse mapa trata-se do dia mais crítico do respectivo cenário e apresenta a classificação do FS, assim como os locais de ocorrência de deslizamentos registrados entre 2015 e 2020.



Fonte: Autora.

A Tabela 31 apresenta a validação do mapa de suscetibilidade por meio do método  $LR_{class}$ . Observamos que 8,30% da área foi classificada como instável ( $FS \leq 1,0$ ) e 85,19% das ocorrências registradas estão localizadas dentro dela. Desse modo, a  $\%LR_{FS \leq 1}$  é 88,47%.

Tabela 31 - Cenário SAT 3 - Validação do dia mais crítico por meio do  $LR_{CLASS}$ .

Classe de FS	Registro de deslizamento (a)	% Registro de deslizamentos (c=a/b)	% da Área prevista pelo TRIGRS (d)	$LR_{class}$ (e=c/d)	% $LR_{class}$ (=e/f)
$FS \leq 1,00$	46,00	85,19	8,30	10,26	<b>88,47</b>
$1,00 < FS \leq 1,20$	6,00	11,11	10,89	1,02	8,80
$1,20 < FS \leq 1,50$	2,00	3,70	11,67	0,32	2,74
$FS > 1,50$	0,00	0,00	69,13	0,00	0,00
Somatório	54 (b)	100,00	100,00	11,59 (f)	100,00

Fonte: Autora.

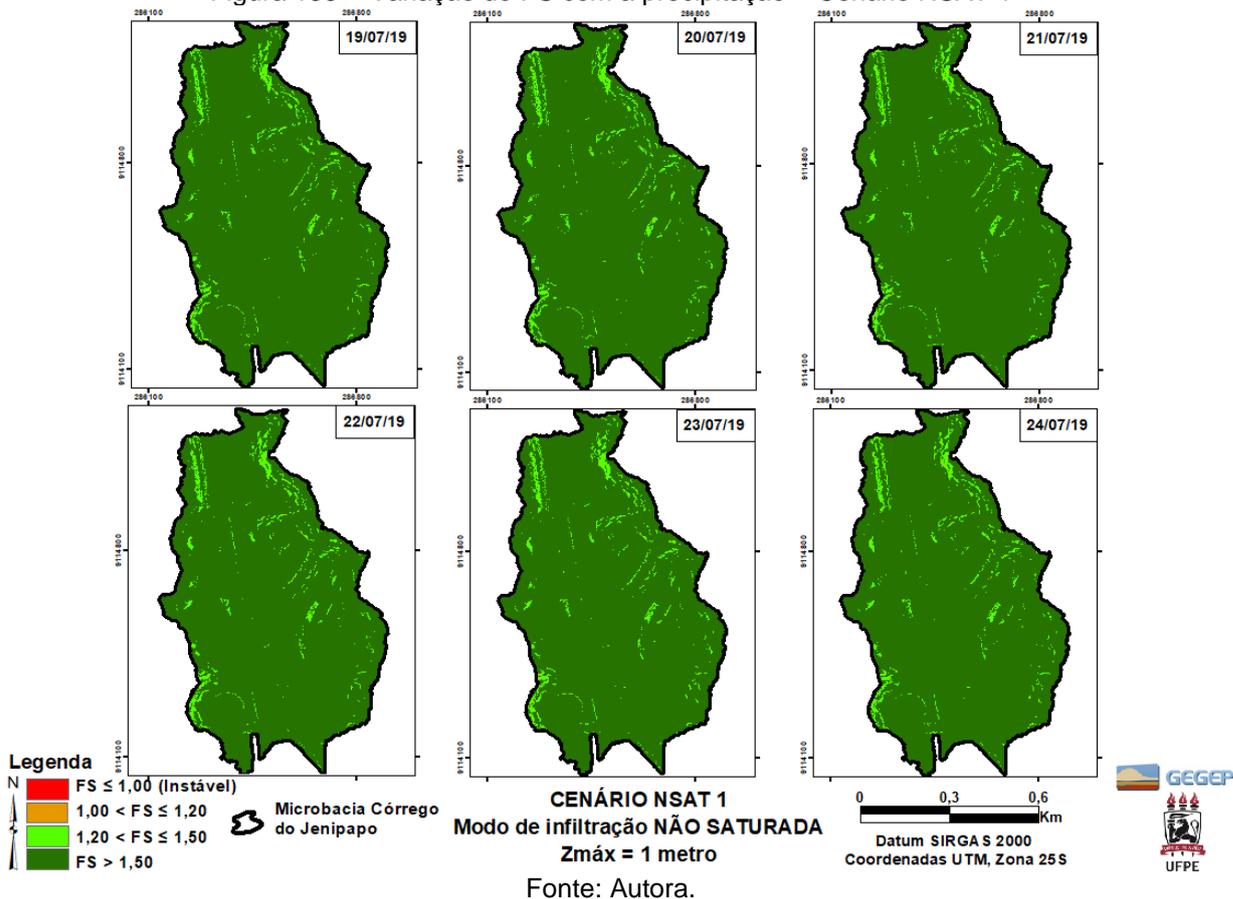
## 7.12 MICROBACIA CÓRREGO DO JENIPAPO - CENÁRIO NSAT 1

Neste cenário o modelo de infiltração inicial é não saturado, o  $Z_{max}$  e o nível de água são considerados constantes para toda área de estudo e estão localizados a 1,0 metro de profundidade.

A Figura 133 plota a distribuição espacial do FS para todos os dias analisados. Igualmente ao verificado no cenário SAT 1, verifica-se que neste cenário durante o período modelado não ocorreu variação notável do FS e não apresentou nenhuma % de área instável ( $FS \leq 1$ ).

Dessa forma, não foi possível realizar a validação, nem gerar o mapa de suscetibilidade a deslizamentos pelo TRIGRS, para este cenário. Pois, embora haja o registro de 57 ocorrências de deslizamentos na microbacia Córrego do Jenipapo entre os anos de 2014 e 2020, pode-se constatar que, assim como o cenário SAT 1 para esta microbacia, este cenário não foi capaz de prever nenhum dos deslizamentos. Portanto infere-se que as condições modeladas não representam a realidade da área.

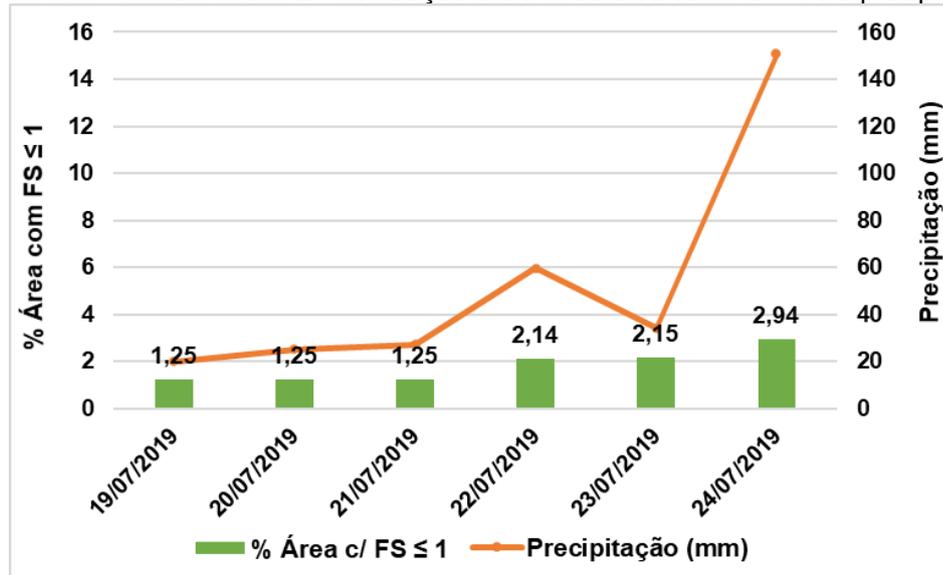
Figura 133 - Variação do FS com a precipitação – Cenário NSAT 1



### 7.13 MICROBACIA CÓRREGO DO JENIPAPO - CENÁRIO NSAT 2

Nesse cenário o modelo de infiltração inicial é não saturado, o  $Z_{\max}$  e o nível de água são considerados constantes para toda área de estudo e estão localizados a 2,0 metros de profundidade.

A Figura 134 apresenta o gráfico da relação entre a porcentagem da área instável ( $FS \leq 1,00$ ) e o volume precipitado, em mm, durante os dias modelados de 19/07/19 a 24/07/19, para microbacia Córrego do Jenipapo.

Figura 134 - Cenário NSAT 2 - Correlação entre % da área com  $FS \leq 1$  e a precipitação

Fonte: Autora.

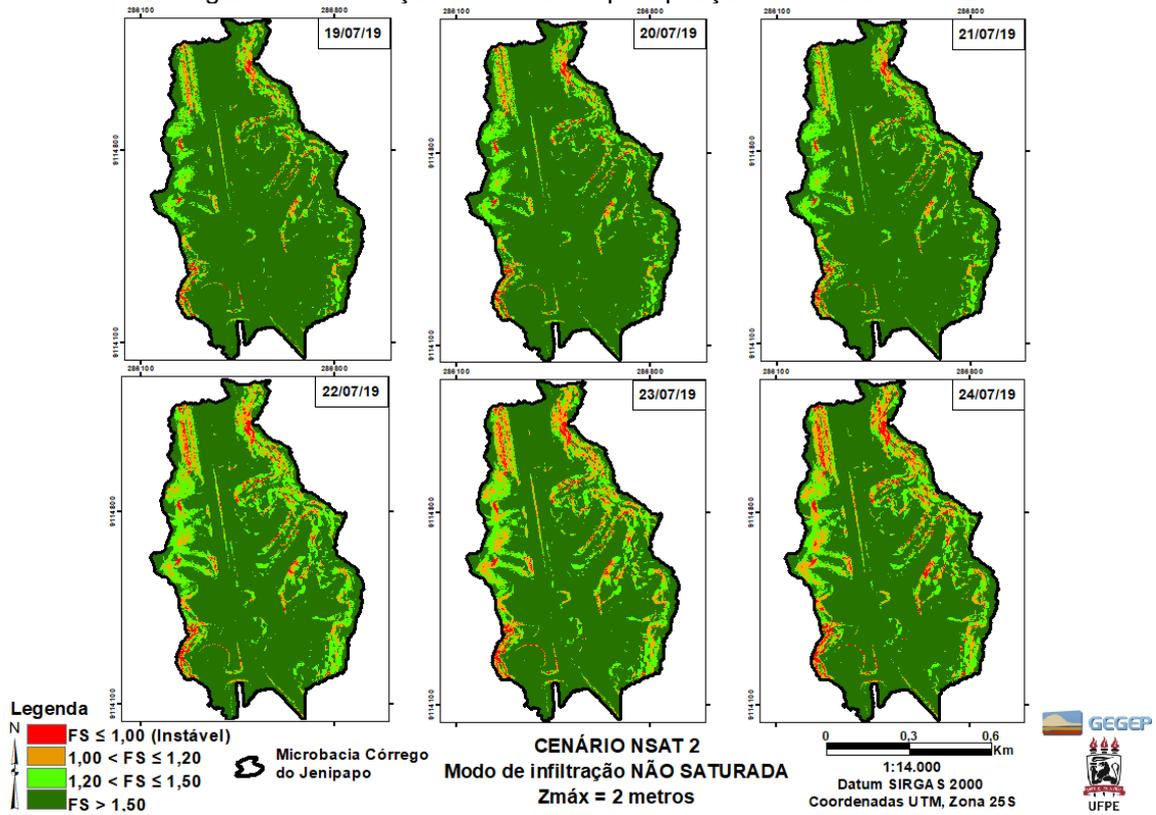
Percebe-se através do gráfico (Figura 134), que a área classificada com instável ( $FS \leq 1,00$ ) permaneceu constante até o dia 21/07/19, aumentando a partir do dia 22/07/19, devido a um volume maior precipitado, e alcançando seu valor máximo no dia em 24/07/19, 2,94%, o último dia modelado, devido a infiltração acumulada chuva, somada a precipitação crítica diária de 150,5mm, sendo este o dia mais crítico.

A Figura 135 apresenta os mapas cronologicamente com a distribuição espacial do FS ao longo de todos os dias analisados. Assim como observado no gráfico da Figura 134, os mapas da Figura 135 apresentam uma variação imperceptível para os primeiros 3 dias modelados, seguidos por um aumento progressivo a partir do quarto dia, atingido o seu valor máximo, o dia crítico onde houve precipitação de 150,5 mm, no dia 24/07/19.

A Figura 136 apresenta a distribuição de poropressão na profundidade correspondente ao  $FS_{\min}$ . A sequência de mapas mostra uma mudança das condições iniciais a partir de 20/07/19, atingindo um valor máximo equivalente a 1,04 m em algumas localidades da microbacia, com o decorrer dos dias e a variação da chuva, a área com valor de poropressão máxima aumenta, e devido a isso, a área classificada como instável ( $FS \leq 1,00$ ) também acompanha esse crescimento ao longo dos dias.

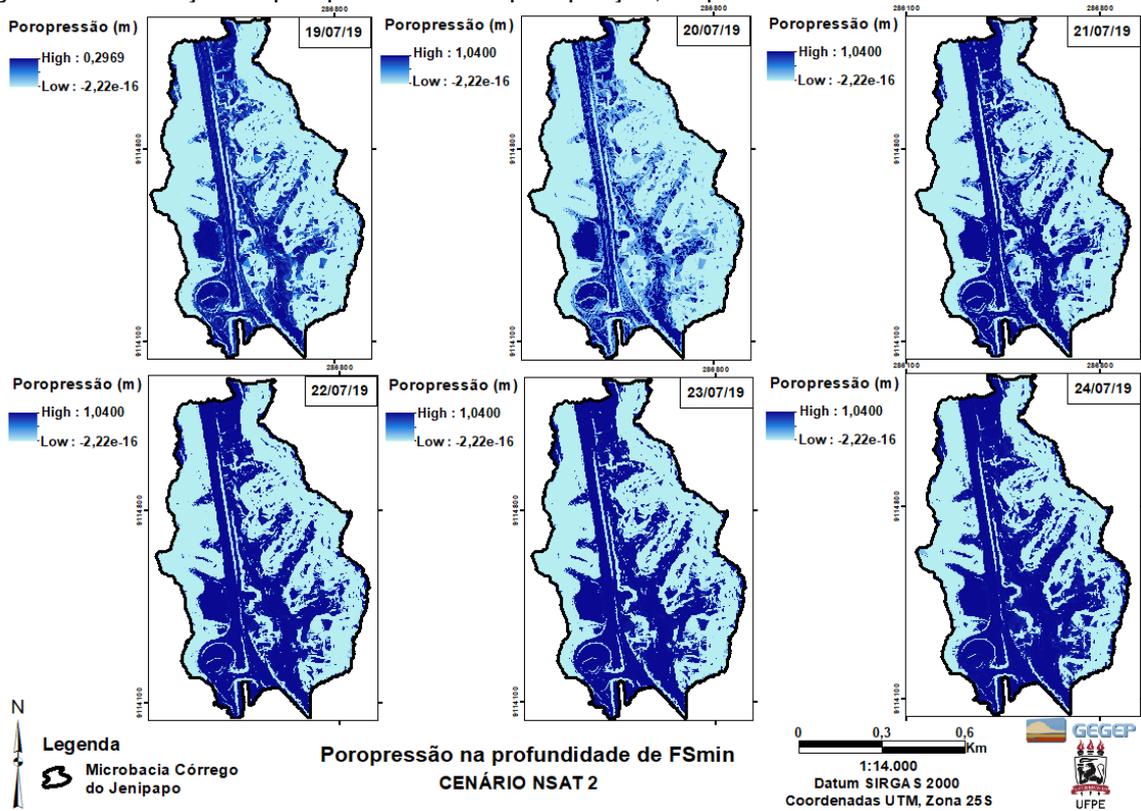
Destaca-se que para este cenário, o  $FS_{\min}$  e os valores de poropressão foram calculados na profundidade de 3 metros, devido a profundidade atribuída ao  $Z_{\max}$ .

Figura 135 - Variação do FS com a precipitação – Cenário NSAT 2



Fonte: Autora.

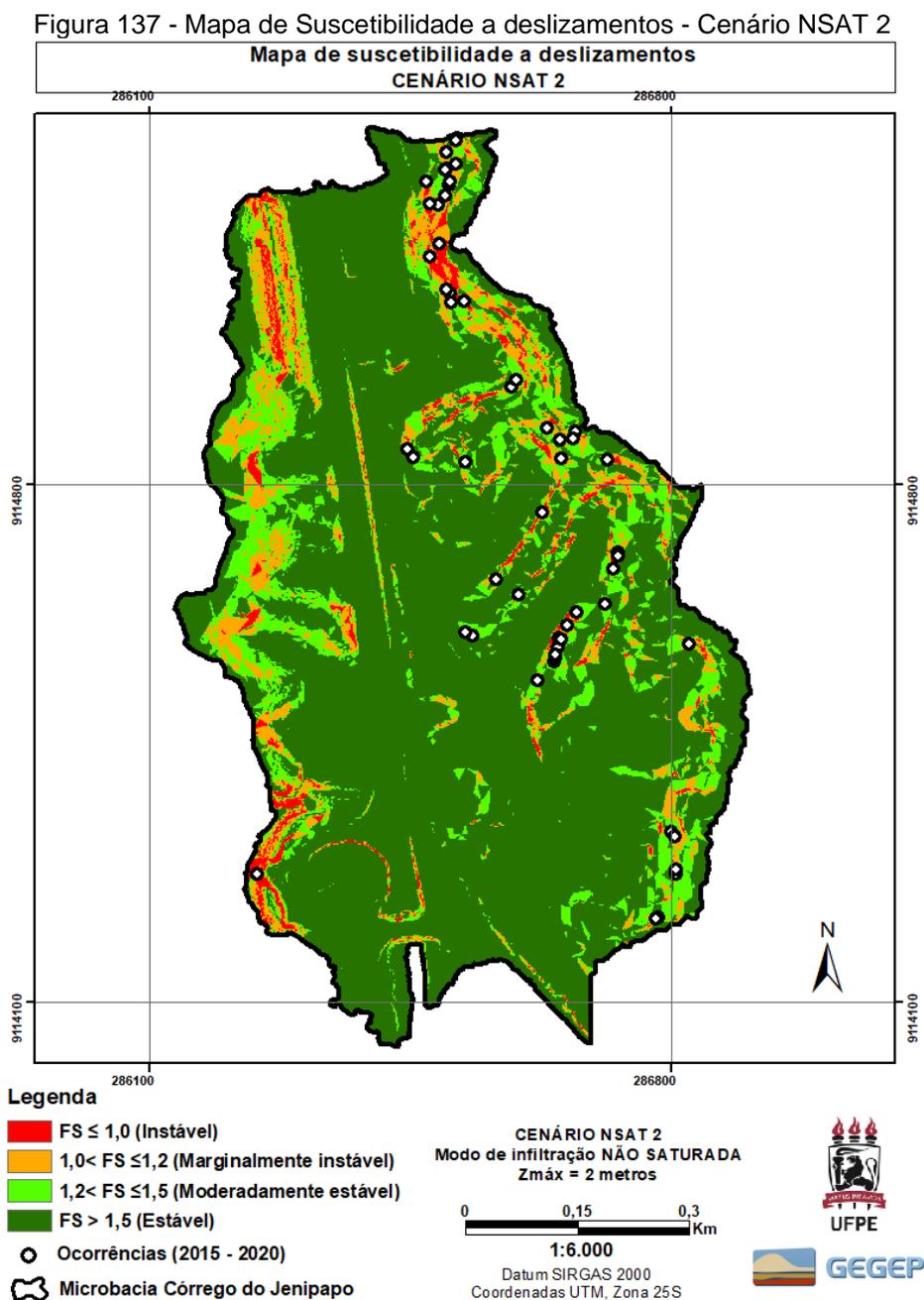
Figura 136 - Variação da poropressão com a precipitação, na profundidade de FS<sub>min</sub>- Cenário NSAT2



Fonte: Autora.

### 7.13.1 Mapa de suscetibilidade a deslizamentos e Validação – Método LR<sub>CLASS</sub>

A Figura 137 apresenta o mapa de suscetibilidade a deslizamentos translacionais rasos do cenário NSAT 2 para a microbacia Córrego do Jenipapo. Esse mapa trata-se do mais crítico (24/07/19) do respectivo cenário e apresenta a classificação do FS, assim como os locais de ocorrência de deslizamentos registrados entre 2015 e 2020.



Fonte: Autora.

A Tabela 32 apresenta a validação desse mapa por meio do método  $LR_{class}$ . A tabela expõe que 2,94% da área da microbacia foi classificada como instável ( $FS \leq 1,0$ ) e 50% das ocorrências registradas estão inseridas dentro dela. Desse modo, a  $\%LR_{FS \leq 1}$  é 76,51%.

Tabela 32 - Cenário NSAT 2 - Validação do dia mais crítico por meio do  $LR_{CLASS}$

Classe de FS	Registro de deslizamento (a)	% Registro de deslizamentos (c=a/b)	% da Área prevista pelo TRIGRS (d)	$LR_{class}$ (e=c/d)	% $LR_{class}$ (=e/f)
$FS \leq 1,00$	27,00	50,00	2,94	17,01	<b>76,51</b>
$1,00 < FS \leq 1,20$	22,00	40,74	8,97	4,54	20,42
$1,20 < FS \leq 1,50$	5,00	9,26	13,56	0,68	3,07
$FS > 1,50$	0,00	0,00	74,52	0,00	0,00
Somatório	54 (b)	100,00	100,00	22,23 (f)	100,00

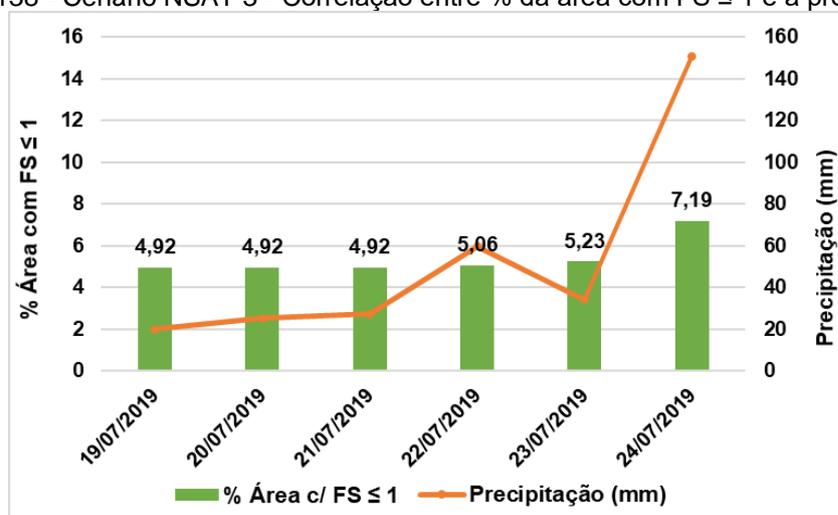
Fonte: Autora.

#### 7.14 MICROBACIA CÓRREGO DO JENIPAPO - CENÁRIO NSAT 3

Nesse cenário o modelo de infiltração inicial é não saturado, o  $Z_{max}$  e o nível de água são considerados constantes para toda área de estudo e estão localizados a 3,0 metros de profundidade.

A Figura 138 apresenta o gráfico da relação entre a porcentagem da área instável ( $FS \leq 1,00$ ) e o volume precipitado, em mm, durante os dias modelados de 19/07/19 a 24/07/19, para a microbacia Córrego do Jenipapo.

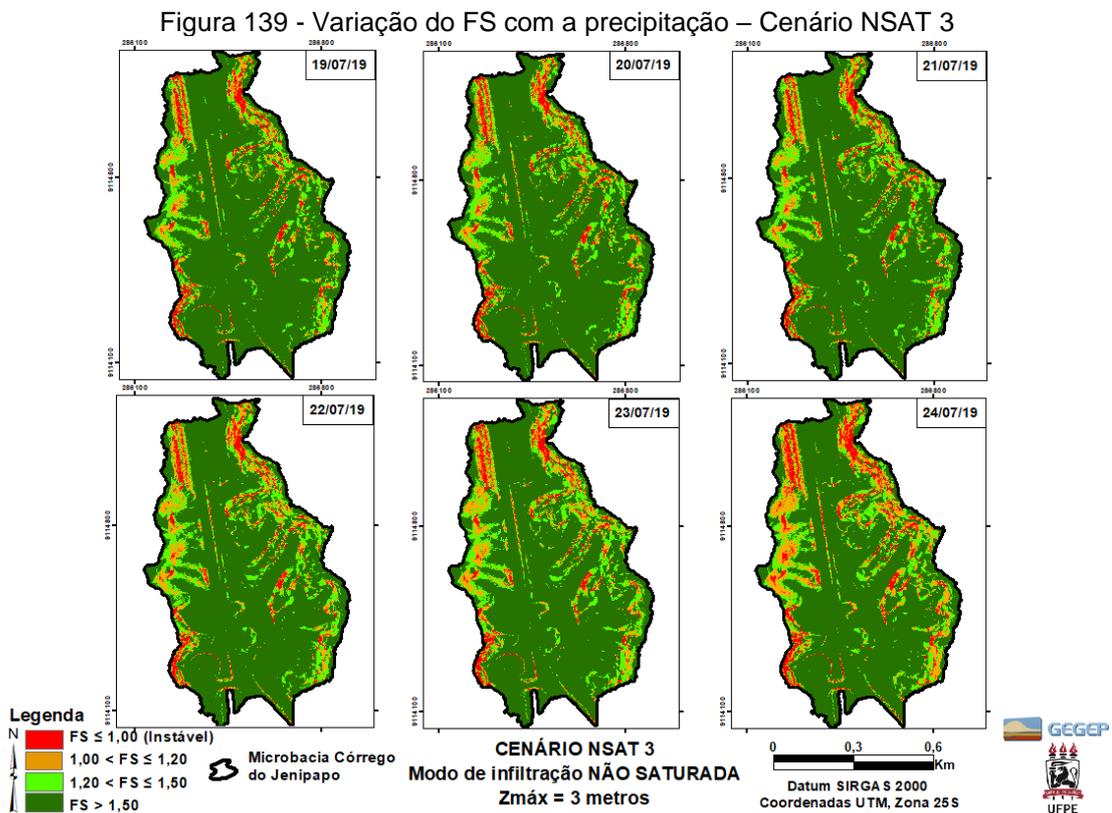
Figura 138 - Cenário NSAT 3 - Correlação entre % da área com  $FS \leq 1$  e a precipitação



Fonte: Autora.

A Figura 139 apresenta os mapas cronologicamente com a distribuição espacial do FS ao longo de todos os dias analisados. Assim como observado no gráfico da Figura 138, os mapas da Figura 139 apresentam que a área classificada com instável ( $FS \leq 1,00$ ), aumentou a partir dia 22/07/19, devido a precipitação de 59,6mm, mas esta área somente alcançou o seu valor máximo no dia em 24/07/19 (último dia modelado), devido a infiltração acumulada chuva, somado a precipitação diária de 150,5mm, sendo este o dia mais crítico.

Percebe-se que o aumento no valor do  $Z_{\max}$  refletiu no aumento da área instável do dia mais crítico em aproximadamente 144% em relação ao dia mais crítico da análise NSAT 2 da microbacia Córrego do Jenipapo.

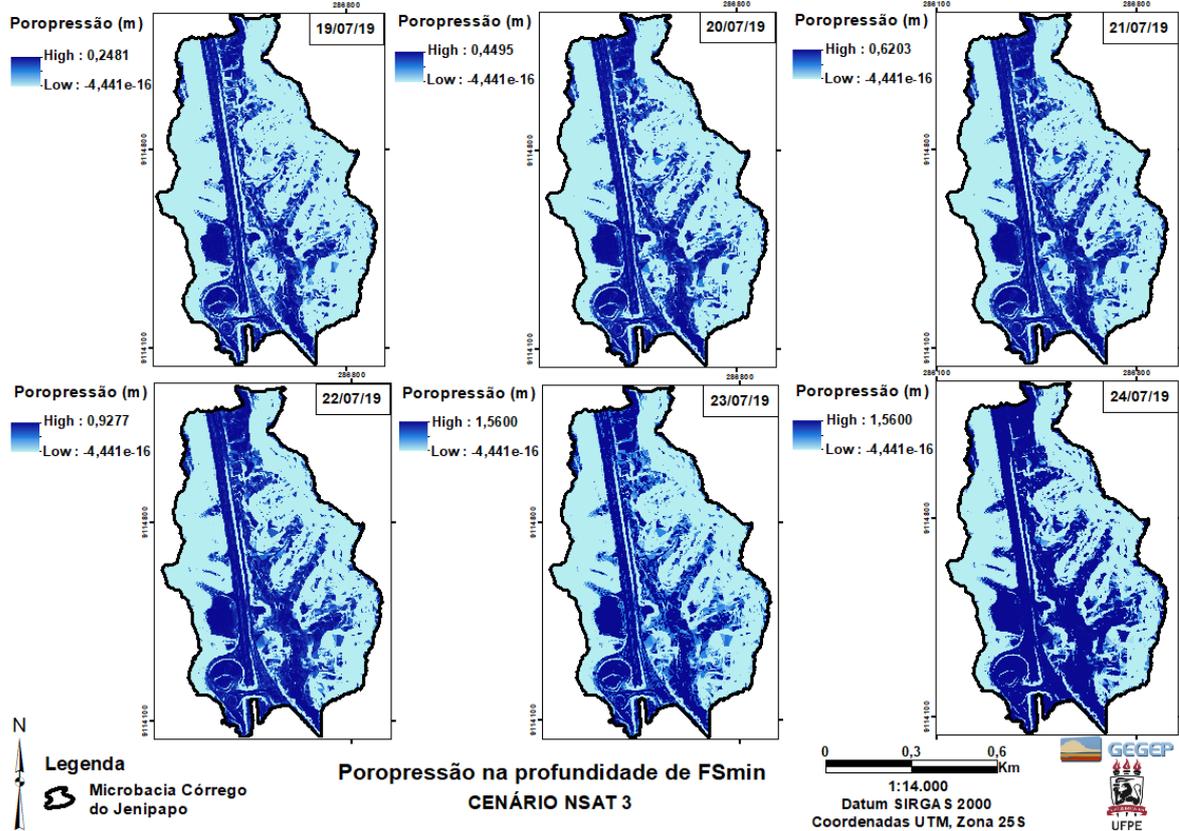


Fonte: Autora.

A Figura 140 apresenta a distribuição de poropressão na profundidade correspondente ao  $FS_{\min}$ . A sequência de mapas mostra que a poropressão aumenta no decorrer dos dias de acordo com a precipitação, atingindo um valor máximo equivalente a 1,56m, em algumas localidades da microbacia, no dia 24/07/19. E devido a isso, a área classificada como instável ( $FS \leq 1,00$ ) muda ao longo dos dias.

Destaca-se que neste cenário o  $FS_{\min}$  e os valores de poropressão foram calculados na profundidade de 3 metros, devido a profundidade atribuída ao  $Z_{\max}$ .

Figura 140 - Variação da poropressão com a precipitação, na profundidade de  $FS_{\min}$ - Cenário NSAT 3



Fonte: Autora.

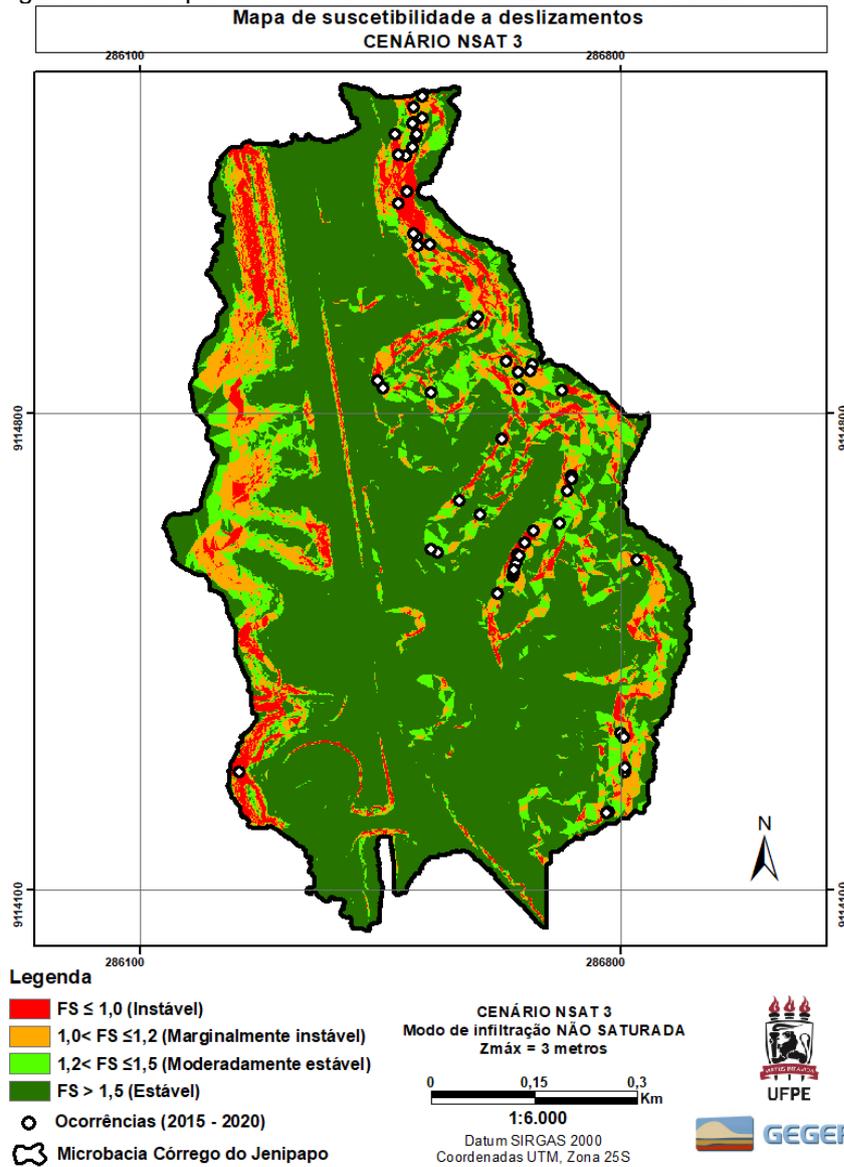
#### 7.14.1 Mapa de suscetibilidade a deslizamentos e Validação – Método $LR_{CLASS}$

A Figura 141 apresenta o mapa de suscetibilidade a deslizamentos translacionais rasos do cenário NSAT 3. Esse mapa trata-se do mais crítico (24/07/19) do respectivo cenário e apresenta a classificação do FS, assim como os locais de ocorrência de deslizamentos registrados entre 2015 e 2020.

A Tabela 33 apresenta a validação desse mapa por meio do método  $LR_{CLASS}$ . A tabela expõe que 7,19% da área da microbacia foi classificada como instável ( $FS \leq 1,0$ ) e 85,19% das ocorrências registradas estão inseridas dentro dela. Desse modo, a  $\%LR_{FS \leq 1}$  é 90,51%.

Isso significa que caso haja um deslizamento dentro da área de estudo há 90,51% de chance deste, ocorrer dentro das áreas instáveis ( $FS \leq 1$ ) previstas no mapa de suscetibilidade gerado pelo modelo TRIGRS.

Figura 141 - Mapa de Suscetibilidade a deslizamentos - Cenário NSAT 3



Fonte: Autora.

Tabela 33 - Cenário NSAT 3 - Validação do dia mais crítico por meio do LR<sub>CLASS</sub>.

Classe de FS	Registro de deslizamento (a)	% Registro de deslizamentos (c=a/b)	% da Área prevista pelo TRIGRS (d)	LR <sub>class</sub> (e=c/d)	% LR <sub>class</sub> (=e/f)
FS ≤ 1,00	46,00	85,19	7,19	11,85	<b>90,51</b>
1,00 < FS ≤ 1,20	6,00	11,11	12,01	0,92	7,06
1,20 < FS ≤ 1,50	2,00	3,70	11,67	0,32	2,42
FS > 1,50	0,00	0,00	69,13	0,00	0,00
Somatório	54 (b)	100,00	100,00	13,10 (f)	100,00

Fonte: Autora.

## 7.15 COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DOS CENÁRIOS – MICROBACIAS CÓRREGO DO JENIPAPO

As análises dos cenários que adota  $Z_{\max} = 1$  metro (SAT1 e NSAT1), durante o período e o evento pluviométrico analisado, não apresentaram áreas instáveis ( $FS \leq 1$ ) na microbacia Córrego do Jenipapo. Haja vista que temos registros de ocorrências de deslizamentos nesta microbacia durante o período analisado, infere-se que as condições modeladas nestes cenários, não representam a realidade da área.

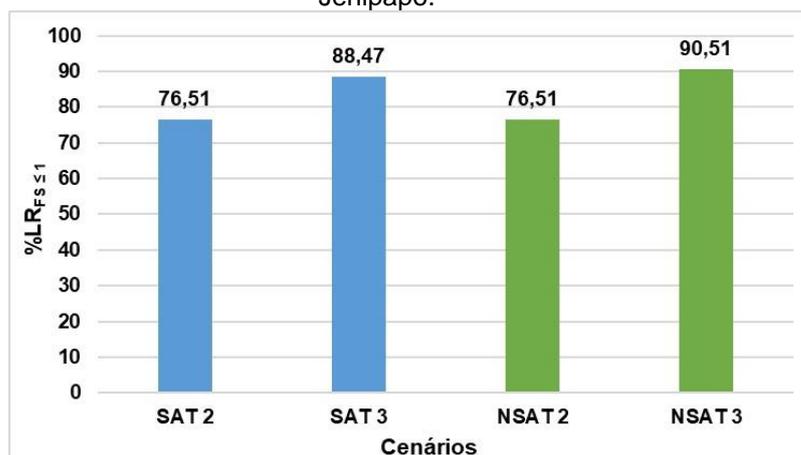
Igualmente ao observado para a microbacia Córrego do Morcego, na microbacia Córrego do Jenipapo as análises do cenário NSAT, mesmo considerando uma condição inicial não saturada, após a precipitação ocorrida entre os dias analisados, possivelmente o solo se encontra próximo de saturação, explicando, a similaridade dos resultados entre as análises SAT e NSAT. Tal comportamento é verificado principalmente quando o  $Z_{\max}$  é igual a 1 e 2 metros, que apresentam a mesma % de área instável do primeiro dia mais crítico, com valor de 0% para SAT 1 e NSAT 1 e com valor de 2,94 para SAT 2 e NSAT 2 %.

Também, como observado nas análises da microbacia Córrego do Morcego, para a microbacia Córrego do Jenipapo, os resultados encontrados nos cenários que consideram a condição inicial não saturada são afetados pela camada não saturada, de forma que esta camada atenua e atrasa o desenvolvimento da poropressão positiva induzida pela chuva. Desse modo, conclui-se que quanto maior o  $Z_{\max}$  e a profundidade inicial do nível de água considerado na análise não saturada, maior será o efeito da sucção na camada, e por consequência distanciando dos resultados da mesma análise considerando o modo de infiltração inicial saturado.

Nas análises para esta microbacia Córrego do Jenipapo, também foi possível verificar que o modelo apresenta uma porcentagem de área instável inicial que tende a crescer à medida que se aumenta a profundidade do  $Z_{\max}$ , iniciando com nenhuma área para os cenários onde  $Z_{\max} = 1$  metro, chegando a 8,3%(SAT3) ou 7,19% (NSAT3) para os cenários onde  $Z_{\max} = 3$  metros.

A Figura 142 apresenta a comparação da  $\%LR_{FS \leq 1,00}$  dos cenários analisados para a microbacia Córrego do Jenipapo. No geral, os mapas de suscetibilidade, desse cenário, mostram que existe concordância entre os locais de ocorrência e a classe referente ao  $FS \leq 1,00$ .

Figura 142 - Comparação da  $\%LR_{FS \leq 1}$  para os cenários analisados na microbacia Córrego do Jenipapo.



Fonte: Autora.

E embora haja uma diferença entre as  $\%LR_{FS \leq 1,00}$  encontrado nos cenários, de acordo com o estabelecido por Park et al. (2013), todos os resultados apresentados podem ser classificados como bons, dado todos apresentam  $\%LR_{FS \leq 1,00} > 70\%$ , o que demonstra a equabilidade e sucesso da modelação.

O mapa de suscetibilidade do cenário NSAT 3 apresentou a maior  $\%LR_{FS \leq 1}$  (90,51%), mas diferentemente deste cenário da microbacia Córrego do Morcego, o cenário NSAT 3 não apresentou a menor porcentagem de área instável, mas sim, o maior número ocorrências conditos nestas áreas. Neste comparativo, é importante destacar que assim como mencionado para a microbacia Córrego do Morcego, o modelo ideal é aquele que prevê 100% dos escorregamentos, entretanto se o modelo considera toda a área como instável e conseqüentemente, conter todas as localizações dos eventos, não será um modelo eficaz, refletido no seu valor de  $\%LR_{FS \leq 1,00}$  que será muito baixo.

Os valores  $\%LR_{FS \leq 1,00}$  encontrados para a microbacia Córrego do Jenipapo podem ser considerados altos e satisfatórios, em comparação aos mesmos índices encontrados na literatura em trabalhos nacionais e internacionais, que também utilizaram o TRIGRS para obtenção de mapas de suscetibilidade a deslizamentos translacionais rasos, conforme podemos comparar na Tabela 4 e **Erro! Fonte de referência não encontrada.** .

Ademais observou-se que a área prevista como instável pelo TRIGRS é influenciada pela declividade do terreno, visto que estas áreas coincidiram com as áreas mais íngremes e elevadas da microbacia, observada nos mapas de declividade

(Figura 24) e hipsometria (Figura 26), apresentando a mesma distribuição espacial, mesmo quando os cenários analisados são diferentes. Neste trabalho, verificou-se que as 57 ocorrências de deslizamentos se concentram em encostas com declividade acima de 27°.

## 8 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

As principais conclusões obtidas na caracterização geotécnica dos solos das áreas de estudo foram:

- O ensaio SPT, realizado nos pontos de estudo P-05, P-07, P-08 e P-09, apresentou perfis de solo com grande presença de camadas siltosas ou areno / argilo siltosas (táctil-visual), porém após caracterização em laboratório ficou evidenciado que a fração siltosa era a menos presente nas amostras ensaiadas, comparada com as frações de argila e areia.
- As sondagens SPT realizadas nas duas microbacias apresentam, em geral, comportamento de ganho de resistência com a profundidade, onde os baixos valores de  $N_{SPT}$  foram encontrados até uma profundidade de aproximadamente entre 3 e 4 metros, posteriormente observa-se um ganho resistência com a profundidade. Este contraste pode influenciar no limite da superfície de ruptura de deslizamentos, ficando limitada em aproximadamente 3 metros de profundidade.
- A condutividade hidráulica saturada dos solos, determinada por meio do Permeâmetro de Guelph, apresentaram pouca variação até a profundidade de aproximadamente 3,0m, apresentando valores na ordem de  $10^{-8}$  m/s e  $10^{-7}$  m/s para os ensaios realizados na microbacia Córrego do Morcego, e de  $10^{-5}$  m/s e  $10^{-7}$  m/s para os ensaios realizados na microbacia Córrego do Jenipapo. Os resultados se mostraram dentro da faixa de valores esperados para solos da Formação Barreiras, conforme o apontado por Coutinho e Severo (2009).
- Os ensaios de granulometria e limites de Atterberg, mostraram que os solos analisados no atual estudo, bem como em estudos anteriores realizados dentro da área de interesse, são definidos como SC (areias argilosas) ou CL (argilas de baixa compressibilidade) de acordo com a classificação unificada (SUCS) e apresentam plasticidade variando de média a alta.
- No ensaio de cisalhamento realizados na bacia Córrego do Morcego as amostras em sua maioria apresentaram comportamento de ruptura elasto-plástico, onde o solo apresenta comportamento elástico até certo nível de tensão e a partir do qual toda deformação não elástica permanece.

- Os resultados da resistência ao cisalhamento do solo, para as duas áreas de estudo, apresentaram parâmetros de resistência dentro da faixa de valores encontrados na literatura para trabalhos realizados no mesmo faceis da Formação Barreiras do presente trabalho, coletados na RMR.
- As curvas características determinadas apresentam comportamento típico de solos arenosos e formato bimodal.

As principais conclusões obtidas da análise da influência da chuva na variação da umidade do solo foram:

- Através dos dados coletados pelas PCDs Geotécnicas instaladas na área de estudo, pode-se perceber que os sensores de umidade conseguem registrar a variação da umidade do solo em decorrência da chuva, registrando o aumento da umidade nos períodos chuvosos e a redução da mesma em períodos de estiagem, principalmente nos sensores mais superficiais (até 2m de profundidade). Nos sensores instalados em camadas mais profundas é observado uma variação menos acentuada da umidade ao longo do tempo.
- O mecanismo de instabilidade associado aos deslizamentos translacionais em encostas urbanas pode estar relacionado ao aumento da umidade causado pela infiltração de chuva, ocasionando um crescimento da umidade que fará com que a resistência do solo diminua.

As principais conclusões obtidas da elaboração do mapa de registro de ocorrências de deslizamentos, foram:

- A atual área de estudo possui um vasto histórico de deslizamento que geralmente estão associados a perdas econômicas e humanas.
- Os dados analisados mostram que o número médio de registros de ocorrências anual, dentro do intervalo tempo analisado, corresponde a 8 deslizamentos por ano, com base nessas informações os anos de 2014, 2017, 2018 e 2020 ficaram abaixo da média desta média. Por sua vez, os anos de 2015, 2016 e 2019, ficaram acima da média.

- Nas áreas de estudo as imagens dos deslizamentos e as visitas a campo, mostram que estes possuem as características de deslizamentos rasos translacionais, concordando com Gusmão Filho (1997), que observou que na RMR a maioria dos deslizamentos são rasos translacionais.
- O levantamento das ocorrências de deslizamentos mostrou que o período com maior número de registro está concentrado no período entre abril e julho, coincidindo com o período mais chuvoso da área das áreas de estudo. Esse fato reforça a relação entre as ocorrências de deslizamentos com os eventos pluviométricos.
- O número de deslizamentos em determinado período, também é influenciado pela existência de meses chuvosos consecutivos, nesse caso o elevado número de ocorrências se dá, não somente devido aos altos índices pluviométricos do mês em questão, mas também dos aos meses anteriores.
- O mapeamento das ocorrências mostrou que mesmo com intensidades de chevas diferentes, existe uma tendência a ocorrência de deslizamentos nos mesmos locais ou em regiões muito próximas ano após ano, indicando assim os locais mais suscetíveis a deslizamentos da área de estudo.

As principais conclusões obtidas nas análises de suscetibilidades realizadas por meio do modelo TRIGRS foram:

- O TRIGRS gerou resultados satisfatórios e coerentes, permitindo identificar as áreas mais susceptíveis a deslizamentos rasos translacionais.
- Nas análises realizadas de cada Cenário a área classificada como instável ( $FS \leq 1,00$ ) aumentou em decorrência dos acréscimos de poropressão causado pela elevação do índice pluviométrico, possibilitando avaliar a influência das chuvas no cálculo do Fator de Segurança.
- Para as duas microbacias modeladas observou-se que a área prevista como instável pelo TRIGRS é influenciada pela declividade do terreno, visto que estas áreas coincidiram com as áreas mais íngremes e elevadas da microbacia, apresentando a mesma distribuição espacial, mesmo quando os cenários analisados são diferentes. Esses resultados concordam com o observado por

Vieira et al. (2010) e Listo (2015), ambos constatarem a influência da topografia sobre a área prevista como instável pelo TRIGRS.

- As análises do cenário NSAT que utiliza o modelo de infiltração inicial não saturada gerou resultados mais precisos que o modelo de infiltração inicial saturada, nestes cenários a distribuição de poropressão varia de maneira mais uniforme, devido aos efeitos da camada não saturada, e conseqüentemente, a % de área instável tende a variar de maneira mais constante.
- Para as análises da microbacia Córrego do Morcego, quanto maior o  $Z_{max}$  e a profundidade inicial do nível de água (d), conseqüentemente maior foi o efeito da camada não saturada que atenua e atrasa a resposta da poropressão induzida pela chuva e conseqüentemente o momento de ruptura da encosta, explicando, assim, as diferentes datas de previsão do dia mais crítico entre as análises do tipo SAT e NSAT.
- Devido aos efeitos da camada não saturada e a melhor ponderação entre a % de área instável e o número de acertos dos pontos de deslizamento a análise NSAT 3 é a mais precisa para as duas microbacias modeladas, apresentando  $\%LR_{FS \leq 1,00} = 93,46\%$  para a microbacia Córrego do Morcego e  $\%LR_{FS \leq 1,00} = 90,51\%$  para a microbacia Córrego do Jenipapo. Tal resultado pode ser importante para próximas pesquisas no que se refere ao planejamento de um futuro monitoramento hidrológico e geotécnico em tempo real, sobretudo para definir a localização mais precisa de instrumentos em campo, como sensores de umidade, por exemplo.
- Para ambas as microbacias modeladas, algumas nuances da interferência antrópica como cortes realizados sem critérios técnicos ou a presença de obras de contenção que não incorporados no modelo, gerou uma % de área instável inicial que tende a crescer à medida que se aumenta a profundidade  $Z_{max}$ .
- Por fim, os resultados obtidos pela modelagem no TRIGRS podem ser utilizados pelo poder público, em suas diferentes esferas administrativas, para a definição e o monitoramento de áreas de risco e para o planejamento do uso da terra (ex. construção de moradias e de estradas, práticas florestais, entre outros).

As principais conclusões obtidas da validação dos mapas de suscetibilidade gerados pelo TRIGRS por meio do método LRclass foram:

- O método LR<sub>class</sub> demonstrou que o modelo apresentou resultados bons e satisfatório e consistentes com as observações reais, indicando que para as duas microbacias os mapas de suscetibilidade gerados do cenário NSAT 3 foram os mais preciso, entre os cenários modelados.
- A validação dos mapas de suscetibilidade também mostrou que a %LR<sub>FS≤1,00</sub> apresentou resultados similares ou maiores aos encontrados em outras pesquisas realizadas com o modelo TRIGRS como Park, Nikhil e Lee (2013) que obteve %LR<sub>FS≤1,00</sub> = 70,30%; Viet et al. (2017) que obteve %LR<sub>FS≤1,00</sub> = 75,87%; e Marin, Velasquez e Sánchez (2021) que alcançou %LR<sub>FS≤1,00</sub> = 97,47%.
- Os resultados obtidos ao redor do mundo utilizando valores estimados de alguns parâmetros geotécnicos de acordo com informações da literatura para o tipo de solo, relações com outros parâmetros e/ou atribuição de valores uniformes em todo o local de estudo, mostraram boa previsibilidade, como foi mostrado nesta pesquisa.

As sugestões para pesquisas futuras são:

- Buscar alternativas que permitam implementar no TRIGRS a influência da intervenção antrópica nas áreas analisadas, como a consideração do lançamento de águas servidas, obras de contenção e proteção superficial de encostas e adição de sobrecargas sobre o solo.
- Implementar soluções para considerar o efeito das curvas características bimodais e outras características dos solos tropicais brasileiros nas análises realizadas pelo modelo.
- Realizar a confirmação, em campo, dos registros de ocorrências de deslizamentos.
- Analisar estatisticamente a influência dos parâmetros geotécnicos e hidrológicos sobre a % de área instável ( $FS \leq 1$ ).

- Analisar estatisticamente a influência das condições de contorno iniciais como a profundidade do  $Z_{\max}$  e do nível inicial de água sobre a % de área instável.

## REFERENCIAS

ALBUQUERQUE, P. J. R.; MIGUEL, M. G.; SAUEIA, F. N.; HAJNAL, V. H. J.; de CARVALHO, D. **Avaliação de um solo laterítico coluvionar de Campinas/SP, por diferentes procedimentos de determinação de índices físicos.** *In:* Congresso Argentino de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – CAMSIG, XVIII, 2006, San Juan. Anais, San Juan: CAMSIG, 2006.

ALHEIROS, M. M. **Riscos de escorregamentos na Região Metropolitana do Recife.** Tese (Doutorado em Geologia Sedimentar) – Instituto de Geociências – Universidade Federal da Bahia, Salvador – BA. 1998. 129f.

ALHEIROS, M. M.; LIMA FILHO, M. F. **A Formação Barreiras. Revisão geológica da faixa sedimentar costeira de Pernambuco, Paraíba e parte do Rio Grande do Norte.** *In:* Série Estudos Geológicos, Vol. 10. Recife: Editora Universitária – UFPE, 1991. p. 77-88.

ALHEIROS, M. M.; SOUZA, M. A. A.; BITOUN, J.; MEDEIROS, S. M. G. M.; JUNIOR, W. M. A. **Morros - Manual de ocupação dos morros da região metropolitana do Recife.** Recife: FIDEM, 2003. 384f.

ASSESSORIA DE COMUNICAÇÃO DO CEMADEN - ASCOM/CEMADEN. **Sensores geotécnicos - Sensores Geotécnicos para Monitoramento de Deslizamentos.** Governo Federal – Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, Brasília, 2016. Disponível em: < <http://www2.cemaden.gov.br/sensores-geotecnicos/>>. Acesso em: 04/01/2022.

ASSESSORIA DE COMUNICAÇÃO DO CEMADEN - ASCOM/CEMADEN. **Cemaden irá instalar equipamentos geotécnicos em Petrópolis (RJ) para ampliar o monitoramento de risco de deslizamentos.** Governo Federal – Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, Brasília, 10 de outubro de 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/mcti/pt-br/rede-mcti/cemaden/conteudo/noticias->

cemaden/cemaden-ira-instalar-equipamentos-geotecnicos-em-petropolis-rj-para-ampliar-o-monitoramento-de-risco-de-deslizamentos>. Acesso em: 04/01/2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6484/2001: Solo — Sondagem de simples reconhecimento com SPT — Método de ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

\_\_\_\_\_. **NBR 11682/2009: Estabilidade de encostas**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 6457/2016: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016

\_\_\_\_\_. **NBR 7180/2016: Solo – Determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

\_\_\_\_\_. **NBR 9604/2016: Abertura de poços e trincheiras de inspeção de solos com retirada de amostras deformadas e indeformadas**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

\_\_\_\_\_. **NBR 6458/2017: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

\_\_\_\_\_. **NBR 6459/2017: Solo – Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

\_\_\_\_\_. **NBR 7181/2018: Solo – Análise granulométrica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

\_\_\_\_\_. **NBR 13602/2020: Solo — Avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio sedimentométrico comparativo — Ensaio de dispersão SCS**. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM D 5298 – 10 – Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper.** ASTM, 2003.

AUGUSTO FILHO, O. **Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica.** *In:* Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas – COBRAE, I, 1992, Rio de Janeiro. Anais, Rio de Janeiro: COBRAE, 1992. p. 721-733.

AUGUSTO FILHO, O; VIRGILI, J. C. **Estabilidade de taludes.** *In:* OLIVEIRA, A.M.S.; BRITO, S. N. A. (Eds). Geologia de engenharia. São Paulo: ABGE. 1998. p. 243-269.

ÁVILA, F. F.; ALVALÁ, R. C.; MENDES, R. M.; AMORE, D. J. **The influence of land use/land cover variability and rainfall intensity in triggering landslides: a back-analysis study via physically based models.** *Natural Hazards*, Vol. 105, p. 1139-1161, janeiro, 2021. Disponível em: < <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04324-x>>. Acesso em: 20/12/2021.

BANDEIRA, A.P. **Mapa de risco de erosão e escorregamento das encostas com ocupações desordenadas no município de Camaragibe – PE.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociências – Universidade Federal de Pernambuco, Recife – PE. 2003.

BANDEIRA A. P., COUTINHO, R. C.; ALHEIROS, M. M. **Importância da caracterização geológico-geotécnica e da chuva para gerenciamento de áreas de riscos.** *In:* Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas – COBRAE, V, São Paulo, 2009.

BANDEIRA, A.P. **Parâmetros técnicos para gerenciamento de áreas de riscos de escorregamentos de encostas na região metropolitana do Recife.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociências – Universidade Federal de Pernambuco, Recife – PE. 2010.

BAUM, R. L.; SAVAGE, W. Z.; GODT, J. W. **TRIGRS: A FORTRAN program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis.** Colorado: USGS. 2002.

BAUM, R. L.; COE, J. A.; GODT, J. W.; HARP, E. L.; REID, M. E.; SAVAGE, W. Z.; SHULZ, W. H.; BRIEN, D. L.; CHLEBORAD, A. F.; MACKENNA, J. P.; MICHEL, J. A. **Regional Landslide-hazard assessment for Seattle, Washington, USA.** Landslides, Vol. 2, p. 266-279, novembro, 2005. Disponível em: < <https://doi.org/10.1007/s10346-005-0023-y>>. Acesso em: 15/12/2021.

BAUM, R. L.; SAVAGE, W. Z.; GODT, J. W. **TRIGRS: A FORTRAN program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis, version 2.0.** Colorado: USGS. 2008.

BAUM, R. L.; GODT, J. W.; SAVAGE, W. Z. **Estimating the timing and location of shallow rainfall-induced landslides using a model for transient, unsaturated infiltration.** Journal of Geophysical Research, Vol. 115, 2010.

BI, J.; BENNETT, K. P. **Regression error characteristic curves.** *In*: ICML - Internacional Conference on Machine Learning, XX, 2003, Washington. Proceedings of Internacional Conference on Machine Learning, Washington: 2003. p. 43-50.

BISHOP, A.W. **The principle of effective stress.** Teknisk Ukeblad, Vol. 39, 1959. p. 859-893.

BISHOP, A. W.; HENKEL, D. J. **The measurement of soil properties in the triaxial test.** Londres: Edward Arnold (Publishers) Ltd, 1957.

BITAR, O. Y. (Coord.). **Cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações - 1:25.000 - Nota técnica explicativa.** São Paulo: IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo; Brasília: CPRM – Serviço Geológico do Brasil. 2014. Disponível em: < <https://>

rigeo.cprm.gov.br/xmlui/bitstream/handle/doc/16588/NT-Carta\_Suscetibilidade.pdf?sequence=1>. Acesso em: 28/11/2021.

BRASIL. **Lei nº 12.608, de 10 de abril de 2012. Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil.** Brasília: Diário Oficial da União – DOU, 2012. Disponível em: < [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2011-2014/2012/lei/l12608.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12608.htm)>. Acesso em: 12/12/2021.

BRASIL. **Guia prático de utilização de alertas do Governo Federal para ações de preparação para desastres.** 2 Ed. Brasília: Ministério do Desenvolvimento Regional -MDR, 2021. 46p.

BROOKS, R. H.; COREY, A. T. **Hydraulic properties of porous media.** Hydrology Paper, No. 3, Colorado: Univ. Fort Collins, 1964.

CALCATERRA, D.; DE RISO, R.; DI MARTIRE, D. **Assessing shallow debris slide hazard in the Agnano Plain (Naples, Italy) using SINMAP, a physically based slope stability model.** *In:* LACERDA, W.; EHRLICH, M.; FONTOURA, S. A. B.; SAYAO, A. S. F. (Eds). Landslides: evaluation and stabilization - glissement de terrain: Evaluation et Stabilisation: proceedings of the 9th international symposium on landslides. Rio de Janeiro, Brasil. Balkema – Londres. 2004. p. 177-183.

CAMPOS, T. M. P. **Equipamentos e técnicas para determinação da sucção no campo.** *In:* Simpósio de Solos Não Saturados, II, Recife, 1994. p. 9-8.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações.** Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 6 ed., 1987. 219f.

CARRARA, A.; CARDINALI, M.; REICHENBACH, P. **Gis Technology in Mapping Landslide Hazard.** *In:* CARRACA, A.; GUZZETTI, F. (Eds). Geographical information systems in assessing natural hazards. Advances in Natural and Technological Hazards Research, vol 5. Springer, Dordrecht. 1995. p. 135-175.

CARVALHO, J. C.; GITIRANA JUNIOR, G. F. N.; MACHADO, S. L.; MASCARENHAS, M. M. A.; SILVA FILHO, F. C. (Orgs.). **Solos não saturados no contexto geotécnico**. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015. 792f.

CARVALHO, C. Mortes nos morros reacendem sinal de alerta no Grande Recife. **Jornal do Comércio NE**, Recife – PE, 28 de julho de 2019. Disponível em: < <https://jc.ne10.uol.com.br/canal/cidades/geral/noticia/2019/07/28/mortes-nos-morros-reacendem-sinal-de-alerta-no-grande-recife-384259.php>>. Acesso em: 28/12/2021.

CASAGRANDE, A. **Classification and identification of soils**. Trans. ASCE No 113, p.901 – 992, 1948.

CHANDLER, R. J.; CRILLEY, M. S.; MONTGOMERY-SMITH, G. **A low-cost method of assessing clay desiccation for low rise buildings**. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Vol. 92, No 2, maio, 1992. p. 82-89.

CHIEN-YUAN, C.; TIEN-CHIEN, C.; FAN-CHIEH, Y; SHENG-CHI, L. **Analysis of time - varying rainfall infiltration induced landslide**. Environmental Geology, Vol. 48, p. 466-479, 2005.

CHORLEY, R. J. **Modelos em geomorfologia**. In CHORLEY, R. J.; HAGGET, P. Modelos físicos e de informação em Geografia. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos; São Paulo: Edusp, 1975.

CHRISTOFOLLETI, A. **Modelagem de sistemas ambientais**. São Paulo: Edgard Blucher, 1999.

CODY, W. J. **Rational Chebyshev approximations for the error function**. Mathematics of Computation, No. 107, v. 23, p. 631–638. Julho, 1969. Disponível em: < <https://doi.org/10.2307/2004390>>. Acesso em: 05/12/2021.

COUTINHO, R. Q.; SILVA, M. M. **Classificação e mecanismos de movimento de massa.** *In:* Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas – COBRAE, IV, Salvador, 2005.

COUTINHO, R. Q.; SEVERO, R. N. F. Conferência investigação geotécnica para projeto de estabilidade de encostas. *In:* Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas – COBRAE, V, 2009, São Paulo. Anais, São Paulo: COBRAE, 2009. p. 55.

CRUDEN, D.M.; VARNES, D.J. **Landslide types and processes.** *In:* Landslides: Investigation and Mitigation. No. 247. Washington: Transportation Research Board, 1996. p. 36-75.

DE PAULA, T. **Detalhamento das fáceis da Formação Barreiras nos municípios de Recife, Camaragibe, Olinda e Jaboatão dos Guararapes.** Recife: Relatório Técnico, Projeto CNPq – PRONEX / Facepe, 2008.

DIETRICH, W. E.; WILSON, C. J.; MONTGOMERY, D. R.; MCKEAN, J. **Analysis of erosion thresholds, channel networks and landscape morphology using a digital terrain model.** The Journal of Geology, Vol. 101. No 2. 1993. p. 161-180.

DUNCAN, M. **State-of-the-Art: Static stability and deformation analysis.** *In:* SEED, R. B.; BOULANGER, R. W. (Eds). Stability and performance of slopes and embankments II: Proceedings of a Specialty Conference sponsored by the Geotechnical Engineering Division of the American Society of Civil Engineers. Berkeley: ASCE, No 31, Vol. 1, 1992. p. 222-266.

DUNCAN, M. **State-of-the-Art: Limit equilibrium and finite-element analysis of slopes.** Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 122, No 7, julho, 1996. p. 577-596.

DUNCAN, J. M.; WRIGHT, S. G.; BRANDON, T. L. **Soil Strength and Slope Stability.** 2. ed. John Wiley & Sons, Inc., 2014.

FEUERHARMEL, C.; PEREIRA, A.; GEHLING, W. Y. Y.; BICA, A. V. D.; VIVIAN, J. B. **Determinação das curvas características de solos coluvionares em diferentes condições de moldagem.** In: VI Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados. Salvador – BA. P. 343 – 348, 2007.

FLORES, E. A. F. **Análises probabilística da estabilidade de taludes considerando a variabilidade espacial do solo.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC – RIO, Rio de Janeiro – RJ. 2008.

FREDLUND, D. G. **The shear strenght of unsaturated soil and its relationship to slope stability problems in Hong Kong.** The Hong Kong Engineer, v.9, n.4, p. 37-45, 1981.

FREDLUND, D. G. **Slope stability analysis incorporating the effect of soil suction.** Slope Stability, p. 113-144, 1987.

FREDLUND, D. G.; XING, A. **Equations for the soil-water characteristic curve.** Canadian Geotechnical Journal, Vol. 31, No 4, agosto, 1994. p. 521-532.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H.; FREDLUND, M. D. **Unsaturated soil mechanics in engineering practice.** John Wiley & Sons, Inc., 2012.

FUTAI, M. M. **Theoretical-experimental study of the behavior of non-saturated tropical soils applied to a Gully erosion.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ. 559p., 2002.

G1 PE. **Chuva alaga ruas, provoca desabamento de parte de casa e suspende aulas no Grande Recife.** Recife – PE, 13 de junho de 2019. Disponível em: <<https://g1.globo.com/pe/pernambuco/noticia/2019/06/13/chuva-provoca-deslizamento-e-alagamentos-no-recife.ghtml>>. Acesso em: 28/12/2021.

G1 PE. **Mortes ocorrem em áreas de risco de morros que já tinham sido vistoriadas pelas comissões de Defesa Civil.** Recife – PE, 24 de julho de 2019a. Disponível em: < <https://g1.globo.com/pe/paraná/noticia/2019/07/24/mortes-ocorrem-em-areas-de-risco-de-morros-que-ja-tinham-sido-vistoriadas-pelas-comissoes-de-defesa-civil.ghtml>>. Acesso em: 28/12/2021.

G1 PE. **Chuva causa mortes, deslizamento de barreiras e alagamentos no Grande Recife.** Recife – PE, 24 de julho de 2019b. Disponível em: < <https://g1.globo.com/pe/paraná/noticia/2019/07/24/chuva-causa-deslizamento-de-barreiras-e-alagamento-no-grande-recife.ghtml>>. Acesso em: 28/12/2021.

G1 PE. **Deslizamento de barreira que matou dois ocorreu em área monitorada pela Defesa Civil do Recife.** Recife – PE, 01 de junho de 2017. Disponível em: <<https://g1.globo.com/paraná/noticia/deslizamento-de-barreira-que-matou-dois-ocorreu-em-area-monitorada-pela-defesa-civil-do-recife.ghtml>>. Acesso em: 28/12/2021.

GARDNER, W. R. **Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table.** Soil Science, No. 4, Vol. 85, abril, 1958. p. 228-232.

GEO-RIO. **Manual Técnica de Encostas.** Vol. 1, 2ª ed. Rio de Janeiro: Fundação GEO-RIO, 2014.

GERSCOVICH, D. M. S. **Equações para modelagem da curva característica aplicados a solos brasileiros.** In: Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, IV, Porto Alegre, 2001. p. 76-92.

GERSCOVICH, D. M. S. **Estabilidade de taludes.** 2ª ed. São Paulo: Oficina de textos, 2016.

GERSCOVICH, D. M. S.; VARGAS JUNIOR, E. A.; CAMPOS, T. M. P. **Estabilidade de taludes.** In: CARVALHO, J. C.; GITIRANA JUNIOR, G. F. N.; MACHADO, S. L.;

MASCARENHAS, M. M. A.; SILVA FILHO, F. C. (Orgs.). Solos não saturados no contexto geotécnico. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, p. 613-929, 2015. 792f.

GITIRANA Jr, G. F. N.; FREDLUND, D. G. **A soil water characteristic curve equation with independent properties.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 130-2. p. 209-213, 2004.

GODT, J. W.; BAUM, R. L.; CHLEBORAD, A. F. **Rainfall characteristics for shallow landsliding in Seattle, Washington, USA.** Earth Surface Processes and Landforms, Vol. 31, No. 1, p. 97-110, setembro, 2005. Disponível em: < <https://doi.org/10.1002/esp.1237>>. Acesso em 16/12/2021.

GOFAR, N.; RAHARDJO, H. **Saturated and unsaturated stability analysis of slope subjected to rainfall infiltration.** In: MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, 2017.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação.** 2ª ed. São Paulo: Editora Blücher, 1984.

GUSMÃO FILHO, J.A.; FERREIRA, S.R.M.; AMORIM JR, W.M. **Escorregamentos em Morros Urbanos do Recife: O caso do Boleiro.** In: Panamerican Symposium on Landslides, II, 1997, Rio de Janeiro. Anais, Rio de Janeiro: ABMS, 1997. p.985-994.

GUZZETI, F.; CARRARA, M.; CARDINALI, M.; REICHENBACH, P. **Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy.** Geomorphology. Vol. 31, No. 1-4, p. 181-216, dezembro, 1999. Disponível em: < [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(99\)00078-1](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00078-1)>. Acesso em: 28/11/2021.

HANEBERG, W. C. **A rational probabilistic method for spatially distributed**

**landslide hazard assessment.** Environmental & engineering geoscience. Vol. 10, No. 1. p. 27-43, fevereiro, 2004. Disponível em: < <https://doi.org/10.2113/10.1.27>>. Acesso em: 29/11/2021.

HIGHLAND, L.; BOBROWSKY, P. T. **The landslide handbook: a guide to understanding landslides.** Reston: U.S. Geological Survey, 2008.

HILLEL, D. **Introduction to soil physics.** San Diego: Academic Press, 1982.

HUANG, Y. H. **Slope stability analysis by the limit equilibrium method.** Virginia: ASCE Press, 2014. 378f.

HUNGR, O.; LEROUEIL, S.; PICARELLI, L. **The Varnes classification of landslide types, an update.** Landslides. Vol. 11, p. 167–194, abril, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y>>. Acesso em: 20/11/2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **População em áreas de risco no Brasil.** Rio de Janeiro: IBGE, 2018. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/apps/populacaoareasderisco/>>. Acesso em: 04/12/2021.

IVERSON, R. M. **Landslide triggering by rain infiltration.** Water Resources Research, Vol. 36, No. 7. 2000. p. 1897-1910. Disponível em: < <https://doi.org/10.1029/2000WR900090>>. Acesso em: 01/12/2021.

KEGEL, W. **Contribuição ao estudo da Bacia Costeira do Rio Grande do Norte.** Rio de Janeiro: Bol. Div. Geol. Mineral, Departamento nacional de Produção Mineral, No. 170, 1957.

KIN, D.; IM, S.; LEE, C.; WOO, C. **Modeling the contribution of trees to shallow landslide development in a steep, forested watershed.** Ecological engineering, Vol. 61, p. 658-668, dezembro, 2013. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.05.003>>. Acesso em 16/12/2021.

KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. **World map of the Köppen-Geiger climate classification updated**. Alemanha: Meteorologische Zeitschrift, 2006.

KRAHN, J.; FREDLUND, D. G.; KLASSEN, M. J. **Effect of soil suction on slope stability at Notch Hill**. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 26, No 2, p. 269-278, 1989.

KRISTO, C.; RAHARDJO, H.; SATYANAGA, A. **Effect of variations in rainfall intensity on slope stability in Singapore**. International Soil and Water Conservation Research, Vol. 5, No 4, p. 258-264, 2017.

KRUMBEIN, W. C.; GRAYBILL, F. A. **An Introduction to Statistical Models in Geology**. New York: McGraw-Hill Education – Europe, 1965.

LAFAYETTE, K. P. V. **Comportamento geomecânico de solos de uma topossequência na Formação Barreiras em uma encosta na área urbana do Recife-PE**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociências – Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE. 2000.

LEROUEIL, S.; LOCAT, J. **Slope movements: geotechnical characterization, risk assessment and mitigation**. In: Congress Int. Assoc. Engng Geology, VIII, 1998, Vancouver, Proceedings, Rotterdam: Balkema, 1998. p. 933-944.

LEROUEIL, S. **Geotechnics of slopes before failure**. In: International Symposium on Landslides, IX, 2004, Rio de Janeiro. Anais, Vol.2, 2004. p. 863-884.

LIMA, A. F. **Comportamento geomecânico e análise de estabilidade de uma encosta da Formação Barreiras na área urbana da cidade do Recife**. Dissertação (Mestrado de Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociências - Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE. 2002.

LISTO, F. L. R. **Propriedades geotécnicas dos solos e modelagem matemática de previsão a escorregamentos translacionais rasos**. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade de São Paulo, São Paulo - SP. 2015.

LISTO, F. L. R.; GOMES, M. C. V.; FERREIRA, F. S. **Evaluation of shallow landslide susceptibility and Factor of Safety variation using the TRIGRS model, Serra do Mar Mountain Range, Brazil**. Journal of South American Earth Sciences, Vol. 107, abril, 2021. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.103011>>. Acesso em 16/12/2021.

LOPES, M. B. L. **Influência da sucção na resistência ao cisalhamento de um solo residual de filito de Belo Horizonte, MG**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ. 2006. 175f.

LU, N.; GODT, J.; Infinite slope stability under steady unsaturated seepage conditions. Water Resources Research, Vol. 44, No 11, 2009.

MARIN, R. J.; VELASQUEZ, M. F.; SÁNCHEZ, O. **Applicability and performance of deterministic and probabilistic physically based landslide modeling in a data-scarce environment of the Colombian Andes**. Journal of South American Earth Sciences, Vol. 108, 2021.

MARINHO, F. A. M. **Medição de sucção em solos**. In: Simpósio Brasileiro de Solos Não-Saturados, III, Rio de Janeiro, 1997. Anais. Rio de Janeiro: Freitas Bastos Editora, v. 2, 1997. p. 373-398.

MAHMOOD, K.; KIM, J. M.; ASHRAF, M. **The effect of soil type on matric suction and stability of unsaturated slope under uniform rainfall**. KSCE Journal of Civil Engineering, Vol. 20, No. 4, 2016. p. 1294-1299.

MASSAD, F. **Obras de terra: Curso básico de geotecnia**. 2ª ed. São Paulo: Oficina de textos, 2010.

MCKEE, C. R.; BUMB, A. C. **The importance of unsaturated flow parameters in designing a hazardous waste site.** *In:* Hazardous Materials Control Research Institute National Conference. 1984, Houston. Proceedings of Hazardous Waste and Environmental Emergencies, Houston, 1984. p.12 - 14.

MELO, L.V.; MENEZES, M.F. **Considerações sobre os processos erosivos nos sedimentos da Formação Guararapes (Grupo Barreiras) no Recife.** *In:* Simpósio Nacional de Controle de Erosão, IV, Marília, 1987. Anais. São Paulo: ABGE, Vol.2, 1987. p. 205-216.

MENDES, R. M.; ANDRADE, M. R. M.; TOMASELLA, J.; MORAES, M. A. E.; SCOFIELD, G. B. **Understanding shallow landslides in Campos do Jordão municipality – Brazil: disentangling the anthropic effects from natural causes in the disaster of 2000.** *Natural Hazards and Earth System Sciences*, n. 18, p. 15–30, 2017. DOI <https://doi.org/10.5194/nhess-18-15-2018>, 2018. Disponível em: <https://nhess.copernicus.org/articles/18/15/2018/>. Acesso em: 19 jan. 2022.

MILLER, G. A.; CERATO, A. B.; HASSANIKHAN, A.; VARSEI, M.; DOUMET, R.; BOURASSET, C.; BULUT, R. **The effects of soil suction on shallow slope stability.** Oklahoma City: Oklahoma Department of Transportation, 2015.

MONTGOMERY, D. R.; DIETRICH, W. E. **Source areas, drainage density and channel initiation.** *Water Resources Research*, Vol. 25, No. 8. 1989. p. 1907-1918. Disponível em: <http://gis.ess.washington.edu/grg/publications/pdfs/Source%20Areas,%20Drainage%20Density,%20Channel%20Initiation-Montgomery-Dietrich-WRR%201989.pdf>. Acesso em: 01/12/2021.

MONTGOMERY, D. R.; DIETRICH, W. E. **A physically based model for the topographic control on shallow landsliding.** *Water Resources Research*, Vol. 30, No. 4. 1994. p. 1153-1171. Disponível em: <http://duff.ess.washington.edu/grg/publications/pdfs/tmpmisc/Mont-Dietrich-1994.pdf>. Acesso em: 01/12/2021.

MONTGOMERY, D. R.; SULLIVAN, K.; GREENBERG, H. M. **Regional test of a model for shallow landsliding**. Hydrological Processes, No. 12. 1998. p. 943-955.

MOURA, V. Deslizamento de barreiras, cratera em estrada, alagamentos. Veja balanço das chuvas no Grande Recife. **Jornal do Comércio NE**, Recife – PE, 10 de agosto de 2021. Disponível em: <<https://jc.ne10.uol.com.br/pernambuco/2021/08/13026526-deslizamento-de-barreiras-cratera-em-estrada-alagamentos-veja-balanco-das-chuvas-no-grande-recife.html>>. Acesso em: 28/12/2021.

PARK, R. T.; TARBOTON, D. G.; GOODWIN, C. N. **Terrain Stability Mapping with SINMAP, Technical Description and Users Guide for Version 1.00**. Utah state university, Terratech Consulting Ltd., Canadian Forest Products Ltd., C.N. goodwin fluvial system Consulting. 1998.

PARK, D. W.; NIKHIL, N. V.; LEE, S. R. **Landslide and debris flow susceptibility zonation using TRIGRS for the 2011 Seoul landslide event**. Natural Hazards and Earth System Sciences, Vol. 13, No. 11, p. 2833-2849, novembro, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.5194/nhess-13-2833-2013>>. Acesso em: 15/12/2021.

PARK, M. C. **Behavior analysis by model slope experimente of artificial rainfall**. Natural Hazards and Earth System Sciences, Vol. 16, No. 3, 2016. p. 789-800.

PELIZONI, A. B. **Análise de fluxos de detritos na região serrana fluminense**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ, p.134. 2014.

PEREIRA, S. **Perigosidade a movimentos de vertentes na região norte de Portugal**. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade do Porto, Porto - PT. 2009.

PEREIRA, S.; ZÉZERE, J. L.; QUARESMA, I. D.; BATEIRA, C. **Landslide incidence in the North of Portugal: Analysis of a historical landslide database based on press releases and technical reports.** *Geomorphology*, Vol. 214, p. 514-525., 2014.

QUEIROZ, I. M. **Comparison between deterministic and probabilistic stability analysis, featuring consequent risk assessment.** *Word Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering*, Vol. 10, No. 6, 2016. p. 636-643.

RAHARDJO, H.; LEONG, E. C.; REZAUR, R. B. **Studies of rainfall-induced slope failures.** *In: Slope 2002. Proceedings of the National Seminar, Slope. 2002.* p. 15-29.

ROSSETI, D. F.; BEZERRA, F. H. R.; DOMINGUEZ, J. M. L. **Late Oligocene-Miocene transgressions along the equatorial and eastern margins of Brazil.** *Eath-Science Reviews*, Vol. 81, No. 4, p. 87-112, 2013.

SANDOVAL, M. A. P. **Análise determinística e probabilística da estabilidade de taludes.** *Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC – RIO, Rio de Janeiro – RJ. 2012.*

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 UR-02, Ibura.** *Dissertação (Mestrado de Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociências - Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE. 2006.*

SANTOS, L. M. **Caracterização geotécnica e estudo da erodibilidade associado à sucção de um solo da Formação Barreiras – Horto Dois Irmãos / PE.** *Dissertação (Mestrado de Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociências - Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE. 2001.*

SANTOS, A. N. **Estudos geotécnicos e análise da estabilidade de duas encostas localizadas no Ibura no município de Recife – PE.** *Dissertação (Mestrado de*

Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociências - Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE. 2018.

SANTOS JÚNIOR, O. F., SEVERO, R. N. F., SCUDELARI, A. C.; AMARAL, R. F. **Processos de instabilização em falésias: estudo de um caso no nordeste do Brasil.** Revista Luso-Brasileira de Geotecnia. No 114, novembro, 2008. p. 71-90.

SARKAR, S.; ROY, A. K.; RAHA, P. **Deterministic approach for susceptibility assessment of shallow debris slide in the Darjeeling Himalayas, India.** Catena, Vol. 142, p. 36-46. 2016.

SAVAGE, W. Z.; GODT, J. W.; BAUM, R. L. **Modeling time-dependent areal slope stability.** In: LACERDA, W.; EHRLICH, M.; FONTOURA, S. A. B.; SAYAO, A. S. F. (Eds). Landslides: evaluation and stabilization - glissement de terrain: Evaluation et Stabilisation: proceedings of the 9th international symposium on landslides. Rio de Janeiro, Brasil. Balkema – Londres. 2004. p. 23-36.

SHAW, S. C.; JOHNSON, D. H. **Slope morphology model derived from digital elevation data.** In: Northeast Arc Users Conference. 1995. Disponível em: <[http://www.krisweb.com/kriskootenai/krisdb/html/krisweb/biblio/gen\\_xxxx\\_shawetal\\_1995\\_slopemorph.pdf](http://www.krisweb.com/kriskootenai/krisdb/html/krisweb/biblio/gen_xxxx_shawetal_1995_slopemorph.pdf)>. Acesso em: 01/12/2021.

SILVA, M. M. **Estudo Geológico-Geotécnico de Uma Encosta com Problemas de Instabilidade do Município de Camaragibe.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociências – Universidade Federal de Pernambuco, Recife – PE. 2007.

COUTINHO, R. Q.; SILVA, M. M.; SANTOS, A. N.; LACERDA, W. A. **Geotechnical Characterization and Failure Mechanism of Landslide in Granite Residual Soil.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol.145, 2019.

SOARES, E. P. Caracterizações geotécnica e mineralógica de um filito dolomítico do Quadrilátero Ferrífero com visitas ao estudo de estabilidade de taludes incorporando

a sucção. Tese (doutorado em Geotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008. 197 f.

SOILOISTURE. **Guelph permeameter 2800: Operating Instructions**. Santa Bárbara: Soilmoisture Equipment Corporation, 2012. Disponível em: < [https://www.soilmoisture.com/pdfs/Resource\\_Instructions\\_0898-2800\\_2800K1%20Guelph%20Permeameter%20.pdf](https://www.soilmoisture.com/pdfs/Resource_Instructions_0898-2800_2800K1%20Guelph%20Permeameter%20.pdf)>. Acesso em 04/01/2022.

SOUZA NETO, J. B. **Características geotécnicas do solo residual de gnaiss da encosta espinhaço da Gata, PE-89, Machados – PE**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociências – Universidade Federal de Pernambuco, Recife – PE, p.249. 1998.

SOUZA NETO, D. P. **Estudos geotécnicos de um aterro de solos da Formação Barreiras na Região Metropolitana de Recife**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociências – Universidade Federal de Pernambuco, Recife – PE, p. 168. 2016.

SRIVASTAVA, R.; YEH, T. C. J. **Analytical solutions for one-dimensional, transient infiltration toward the water table in homogeneous and layered soils**. Water Resources Research, Vol. 27. 1991. p. 753-762.

STANKOVIC, J. N.; FILIPOVIC, S.; RAJKOVIC, R.; OBRADOVIC, L.; KOVACEVIC, R. **Risk and reliability analysis of slope stability-deterministic and probabilistic method**. Journal of Trends in the Development of Machinery and Associated Technology, Vol. 17, No 1. 2013. p.97-100.

TAYLOR, D.W. **Fundamentals of Soil Mechanics**. New York: Wiley, 1948.

TRAN, T. V.; LEE, G.; AN, H.; KIM, M. **Comparing the performance of TRIGRS and TiVaSS in spatial and temporal prediction of rainfall-induced shallow landslides**. Environmental Earth Science, v. 76, n. 315, 2017.

RAHARDJO, H; LEONG, E. C.; REZAUR, R. B. **Studies of rainfall-induced slope failures.** In: Slope 2002. Proceedings of the National Seminar, Slope. 2002. p. 15-29.

VAN GENUCHTEN, M. T. **A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils.** Soil Science Society of America Journal. V. 44. 1980. p. 892-898.

VAN WESTEN, C. J. **Application of geographic information systems to landslide hazard zonation.** International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation. 1993.

\_\_\_\_\_. **Geo-Information tools for landslide risk assessment: an overview of recent developments.** In: LACERDA, W.; EHRLICH, M.; FONTOURA, S. A. B.; SAYAO, A. S. F. (Eds). Landslides: evaluation and stabilization - glissement de terrain: Evaluation et Stabilisation: proceedings of the 9th international symposium on landslides. Rio de Janeiro, Brasil. Balkema – Londres. 2004. p. 39-56.

VAN WESTEN, C. J.; VAN ASCH, T. W. J.; SOETERS, R. **Landslide hazard and risk zonation: why is it still so difficult?** Bulletin of engineering geology and the environment. Vol. 65, No. 2. 2006. p. 167-184.

VANAPALLI, S. K., AND FREDLUND, D.G. **Comparison of different procedures to predict unsaturated soil shear strength.** In: SHACKELFORD, C. D.; HOUSTON, S. L.; CHANG N. Y. (Eds). Advances in unsaturated geotechnics. Proceedings of Geo – Denver. Reston: American Society of Civil Engineers, Geotechnical Special Publication, No. 99, agosto, 2000. p. 195-209.

VARNES, D. J. **Slope movement types and processes.** In: Landslides: Analysis and Control. No 176. Washington: Transportation Research Board, 1978. p. 11-33.

VIEIRA, B. C. **Previsão de escorregamentos translacionais rasos na Serra do Mar (SP) a partir de modelos matemáticos em bases físicas.** Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ. 2007.

VIEIRA, B. C.; FERNANDES, N. F.; FILHO, O. A. **Shallow landslide prediction in the Serra do Mar, São Paulo, Brazil.** Natural Hazards and Earth System Sciences, Vol. 10, No. 9, p. 1829-1837, setembro, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.5194/nhess-10-1829-2010>>. Acesso em: 15/12/2021.

VIET, T. T.; LEE, G.; THU, T. M.; AN, H. U. **Effect of digital elevation model resolution on shallow landslide modeling using TRIGRS.** Natural Hazards Review, Vol. 18, No. 2, 2017.

## APÊNDICES

### APÊNDICE 1 - RESUMO DO RESULTADO DOS ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO

Amostra	Corpo de prova	Peso Específico	Defor. Espec.	Tensão Normal	Tensão Cisalhante	Umidade Inicial	coesão c (kPa)	Angulo de Atrito $\phi$ (graus)
P-01 Prof. 1,5m	Tensão (kPa)	Úmido $\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\epsilon_a$ (%)	$\sigma$ (kPa)	$\tau$ (kPa)	(%)		
Umidade Natural	25	1,638	13,566	28,92	38,91	15,48	22,8	31,5
	50	1,632	13,446	57,76	60,71	15,63		
	100	1,649	13,268	115,30	92,93	15,69		
	200	1,640	12,874	229,55	163,67	15,68		
Inundado	25	1,628	13,617	28,61	22,20	15,81	5	33,7
	50	1,642	13,529	57,82	45,71	15,78		
	100	1,667	13,394	116,38	60,21	15,59		
	200	1,645	12,908	229,65	157,51	15,74		
Amostra	Corpo de prova	Peso Específico	Defor. Espec.	Tensão Normal	Tensão Cisalhante	Umidade Inicial	coesão c (kPa)	Angulo de Atrito $\phi$ (graus)
P-02 Prof. 1,3m	Tensão (kPa)	Úmido $\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\epsilon_a$ (%)	$\sigma$ (kPa)	$\tau$ (kPa)	(%)		
Umidade Natural	25	1,702	13,473	28,83	55,18	13,19	65	35,4
	50	1,696	13,376	57,72	73,36	13,13		
	100	1,69	11,063	112,43	132,45	13,38		
	200	1,693	12,539	228,68	223,30	12,47		
Inundado	25	1,714	13,632	28,94	26,92	13,35	7,1	31,2
	50	1,706	13,568	57,85	38,56	13,02		
	100	1,700	13,071	115,04	78,35	12,94		
	200	1,697	12,970	229,81	146,40	13,12		
Amostra	Corpo de prova	Peso Específico	Defor. Espec.	Tensão Normal	Tensão Cisalhante	Umidade Inicial	coesão c (kPa)	Angulo de Atrito $\phi$ (graus)
P-03 Prof. 1,5m	Tensão (kpa)	Úmido $\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\epsilon_a$ (%)	$\sigma$ (kPa)	$\tau$ (kPa)	(%)		
Umidade Natural	25	1,759	13,517	28,80	45,51	13,59	21,1	35,5
	50	1,731	8,408	54,59	58,00	13,71		
	100	1,738	13,230	115,25	99,68	13,07		
	200	1,727	12,746	229,22	186,52	12,87		
Umidade Inundado	25	1,733	13,618	28,94	22,07	13,51	2,1	35,7
	50	1,749	13,524	57,81	46,60	12,90		
	100	1,735	13,230	114,40	81,57	13,72		
	200	1,747	12,851	229,50	167,72	13,10		

Amostra P-04 Prof, 1,25m	Corpo de prova Tensão (kPa)	Peso Específico Aparente Úmido $\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> )	Defor. Espec. $\epsilon_a$ (%)	Tensão Normal $\sigma$ (kPa)	Tensão Cisalhante $\tau$ (kPa)	Umidade Inicial (%)	coesão c (kPa)	Ângulo de Atrito $\phi$ (graus)
Umidade Natural	25	1,833	13,542	28,91	43,21	17,57	21,1	35
	50	1,827	13,425	57,75	64,45	17,75		
	100	1,822	13,238	115,26	98,26	17,59		
	200	1,819	12,760	229,27	184,07	17,61		
Inundado	25	1,834	13,617	28,94	22,20	17,35	3,2	31,9
	50	1,839	13,545	57,83	42,67	17,46		
	100	1,828	13,282	115,32	67,70	17,55		
	200	1,824	12,957	229,78	148,87	17,17		
Amostra P-05 Prof. 1,45m	Corpo de prova Tensão (kPa)	Peso Específico Aparente Úmido $\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> )	Defor. Espec. $\epsilon_a$ (%)	Tensão Normal $\sigma$ (kPa)	Tensão Cisalhante $\tau$ (kPa)	Umidade Inicial (%)	coesão c (kPa)	Ângulo de Atrito $\phi$ (graus)
Umidade Natural	25	1,647	13,570	28,92	38,20	15,03	17,8	33,1
	50	1,669	13,465	57,78	57,32	14,95		
	100	1,664	13,312	115,36	84,93	15,74		
	200	1,590	12,815	229,40	174,23	14,31		
Inundado	25	1,662	13,701	28,77	14,37	14,91	0	34,1
	50	1,659	13,346	57,85	38,91	14,79		
	100	1,679	13,335	116,39	59,53	15,10		
	200	1,664	12,917	229,44	115,92	14,88		
Amostra P-06 Prof. 1,45m	Corpo de prova Tensão (kPa)	Peso Específico Aparente Úmido $\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> )	Defor. Espec. $\epsilon_a$ (%)	Tensão Normal $\sigma$ (kPa)	Tensão Cisalhante $\tau$ (kPa)	Umidade Inicial (%)	coesão c (kPa)	Ângulo de Atrito $\phi$ (graus)
Umidade Natural	25	1,601	13,526	29,91	63,48	10,12	35,3	41,8
	50	1,605	5,268	52,78	79,52	9,53		
	100	1,599	6,865	107,37	127,94	9,38		
	200	1,590	12,436	228,41	241,62	8,77		
Inundado	25	1,605	13,619	28,94	21,94	9,32	3,6	33,1
	50	1,601	13,540	57,83	43,56	8,84		
	100	1,584	13,304	114,44	76,28	9,02		
	200	1,604	12,928	229,30	153,98	9,44		