

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CÂMPUS PATO BRANCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

EDIANE CRISTINA DALEFFE SCALABRIN

**MAPEAMENTO DA SUSCEPTIBILIDADE DE MOVIMENTOS DE MASSA NO
PERÍMETRO URBANO DA CIDADE DE FRANCISCO BELTRÃO – PARANÁ**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

PATO BRANCO

2016

EDIANE CRISTINA DALEFFE SCALABRIN

**MAPEAMENTO DA SUSCEPTIBILIDADE DE MOVIMENTOS DE MASSA NO
PERÍMETRO URBANO DA CIDADE DE FRANCISCO BELTRÃO – PARANÁ**

Dissertação de mestrado, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Ney Lyzandro Tabalipa.

Coorientador: Prof. Dr. Julio Caetano Tomazoni.

PATO BRANCO

2016

S281m Scalabrin, Ediane Cristina Daleffe.
Mapeamento da susceptibilidade de movimentos de massa no perímetro urbano da cidade de Francisco Beltrão - Paraná / Ediane Cristina Daleffe Scalabrin . -- 2016.
176 f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Ney Lyzandro Tabalipa
Coorientador: Prof. Dr. Julio Caetano Tomazoni
Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Pato Branco, PR, 2016.
Bibliografia: f. 145 – 148.

1. Planejamento urbano. 2. Mecânica do solo - Estabilidade. 3. Sistema de Posicionamento Global. 4. Avaliação de riscos. I. Tabalipa, Ney Lyzandro, orient. II. Tomazoni, Julio Caetano, coorient. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

CDD 22. ed. 624

Ficha Catalográfica elaborada por
Suélem Belmudes Cardoso CRB9/1630
Biblioteca da UTFPR Campus Pato Branco



TERMO DE APROVAÇÃO Nº 04

Título da Dissertação

**“Mapeamento da susceptibilidade de movimentos de massa no
perímetro urbano da cidade de Francisco Beltrão-PR”**

Autor

Ediane Cristina Daleffe Scalabrin

Esta dissertação foi apresentada às 14 horas do dia 30 de novembro de 2016, como requisito parcial para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL– Linha de pesquisa em tecnologia ambiental no ambiente construído– no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. A autora foi arguida pela Banca Examinadora abaixo assinada, a qual, após deliberação, considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Ney Lyzandro Tabalipa
UTFPR/PB
Presidente

Profa. Dra. Michelle Milanez França
UTFPR/FB
Examinadora

Prof. Dr. Décio Lopes Cardoso
UNIOESTE/Cascavel
Examinador

Visto da Coordenação

Prof. Dra. Caroline Angulski da Luz
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil- PPGEC

O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do PPGEC

A Deus, o Deus do Rock, o qual permitiu que adicionássemos guitarras, baixos e baterias às músicas e criássemos o Rock n' Roll.

Aos engenheiros que permitiram termos veículos perfeitos sobre duas rodas, as motocicletas.

Ao Rock n' Roll que retarda a nossa loucura e nosso envelhecimento. E às viagens de moto que curam e revigoram nossa alma.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me permitir atingir este momento tão esperado.

Aos meus pais, por me incentivarem sempre a estudar, batalhar e lutar por meus sonhos e meus ideais.

Aos meus irmãos, por me incomodarem sempre e proporcionarem momentos inesquecíveis.

Ao meu amado Marlon, por me auxiliar, compreender, consolar e me dar a melhor direção, mesmo quando também estava perdido.

Aos orientadores, Professor Doutor Ney Lyzandro Tabalipa e ao Professor Doutor Julio Caetano Tomazoni, por sua dedicação e auxílio prestados na realização deste trabalho, e pela amizade conquistada ao longo dos anos que trabalhamos juntos.

Aos meus colegas, pelas conversas, aprendizado e desabafo, pois passamos juntos esses meses e compartilhamos diversos sentimentos.

Aos professores do curso de Pós Graduação em Engenharia Civil da UTFPR – PB e aos Professores do Curso de Engenharia Ambiental da UTFPR – FB e demais funcionários da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, por contribuírem em minha formação acadêmica.

A Empresa GBS Fundações, que tão prestativa cedeu seus dados de sondagem, contribuindo imensamente com a realização deste trabalho.

“Há dois tipos de pessoas que vão te dizer que você não pode fazer a diferença neste mundo: as que têm medo de tentar e as que têm medo de que você se dê bem.”

(Ray Goforth)

“Os homens sempre levaram isso muito a sério. A vida é mais terrível e mais misteriosa [...]. Estou vivo!”

(Dean Koontz. Proteus 4, in: Demon Seed 1977)

“Para encarar uma pós-graduação é preciso ter uma “garra de adamantium” (indestrutível), somada a capacidade de curar ferimentos e restaurar a saúde em alta velocidade. Tem que ter uma determinada liderança e saber ser liderado, ser rude quando necessário, mas também saber ouvir, e quando preciso for, usar o instinto animal que existe dentro de cada um de nós.” Wolverine¹

¹ Texto de autoria de Marlon Nunes da Silva, publicado no blog: pós-graduando.com (05-02-2014)

DALEFFE, Ediane Cristina S. MAPEAMENTO DA SUSCEPTIBILIDADE A MOVIMENTOS DE MASSA NO PERÍMETRO URBANO DA CIDADE DE FRANCISCO BELTRÃO – PARANÁ. 2016. 176f. Dissertação. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2016.

RESUMO

Este trabalho propôs avaliar a susceptibilidade a movimentos de massa no perímetro urbano da cidade de Francisco Beltrão – PR, utilizando como metodologia uma análise probabilística do fator de segurança. Partiu-se do princípio que existem áreas inaptas para edificação civil na área de estudo devido à instabilidade do terreno. Foi montado um banco de dados para processamento SIG, com base na altimetria, em imagens de satélite, dados de sondagem a percussão – SPT e análises físicas e geotécnicas do solo *in loco*. Geraram-se, então, quatro mapas de fator de segurança comparando as vertentes naturais e saturadas e a influência da vegetação sobre as mesmas. Foram identificadas áreas instáveis no perímetro estudado, sendo sua maior concentração para o caso de solo saturado sem influência da vegetação. Além disso verificou-se que o solo que apresentou maior ocorrência de áreas instáveis e o Chernossolo, e a declividade com maior concentração de pontos instáveis foi entre 20 – 30% de inclinação. Conclui-se que para essa área de estudo a vegetação nos taludes possui grande importância para a estabilidade. Este trabalho contribui ao município de Francisco Beltrão devido ao estudo da estabilidade de taludes realizado para todo o perímetro urbano, podendo nortear políticas públicas de ocupação do solo urbano, visto que o mesmo apresenta áreas inaptas à ocupação urbana e de preservação permanente, sendo assim objetiva uma maior segurança à população e ao meio ambiente.

Palavras-chave: Fator de Segurança. Movimento de Massa. SIG. SPT. Francisco Beltrão.

DALEFFE, Ediane Cristina S. MAPPING OF SUSCEPTIBILITY TO LANDSLIDES IN THE URBAN PERIMETER OF FRANCISCO BELTRÃO CITY – PARANÁ. 2016. 176f. Dissertação. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2016.

ABSTRACT

This work aimed to evaluate the landslide susceptibility in the urban area of the Francisco Beltrão city - PR, using methodology as a probabilistic analysis of the safety factor. It started from the principle that there are areas unsuited for civil construction in the study area due to the instability of the terrain. A database was assembled for SIG processing, based on altimetry, satellite images, standard penetration test - SPT and physical and geotechnical analysis of the soil in place. Then was generated four safety factor maps comparing the natural and saturated soil and the influence of vegetation thereon. Unstable areas were identified in the studied perimeter, and its higher concentration to the saturated soil case without influence of vegetation. Furthermore, it was found that the soil showed higher incidence of unstable areas was Chernosoil class, and slope with the highest concentration of unstable points was between 20 - 30% gradient. In conclusion, to this study area vegetation on the slopes has great importance for stability. This work contributes to the municipality of Francisco Beltrão, being the first slope stability study for the entire urban area and can guide public policies of urban land use, with suitable areas to urban occupation and permanent preservation, aimed at greater security to the population and the environment.

Keywords: Safety Factor. Landslide. SIG. SPT. Francisco Beltrão.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Horizontes do solo.	26
Figura 2 - Geometria das encostas.	33
Figura 3 - Influência da urbanização na estabilidade de taludes.....	35
Figura 4 – Evidências de Creep ou rastejo.....	38
Figura 5 - Queda de blocos.	39
Figura 6 - Corrida de massa ou avalanche.....	41
Figura 7 - Escorregamento rotacional	43
Figura 8 - Escorregamento translacional plano de solo.	45
Figura 9 - Escorregamento translacional plano de rocha.	45
Figura 10 - Escorregamento em Cunha.	46
Figura 11 - Influência da Vegetação na estabilidade de taludes	52
Figura 12 - Localização Município de Francisco Beltrão na mesorregião e no Estado do Paraná.....	58
Figura 13 - Representação do Perímetro Urbano da cidade de Francisco Beltrão - PR.	59
Figura 14 – Precipitação Média Anual para o estado do Paraná.	60
Figura 15 - Classificação Climática do Paraná.....	63
Figura 16 - Temperatura média anual do Paraná.....	63
Figura 17 - Evapotranspiração Anual para o estado do Paraná.....	64
Figura 18 – Locação dos pontos de registro de movimentos de massa na cidade de Francisco Beltrão – PR.	68
Figura 19 – Situação encontrada após a corrida de massa na cidade de Francisco Beltrão.....	69
Figura 20 – Situação encontrada após o deslizamento ocorrido em 30 de novembro de 2015, no Bairro São Cristóvão.	70
Figura 21 – Situações encontradas durante e após o evento que ocorreu no dia 06 de dezembro de 2015, no Bairro São Cristóvão.....	71
Figura 22 – Deslizamento ocorrido no dia 18 de dezembro de 2015, no Bairro Nossa Senhora Aparecida.....	72
Figura 23 – Deslizamento ocorrido no dia 20 de maio de 2016, na Linha Santa Bárbara.	72

Figura 24 – Deslizamento ocorrido no dia 30 de maio de 2016, no bairro Jardim Seminário.....	73
Figura 25–Vestígio de queda de blocos encontrada no bairro Cristo Rei na cidade de Francisco Beltrão.....	73
Figura 26 – Vestígio de rastejo no bairro São Francisco, na cidade de Francisco Beltrão.	74
Figura 27 – Vestígio de rastejo encontrado no bairro Sadia.	75
Figura 28 - Vestígios de rastejo encontrado no bairro Água Branca.	75
Figura 29 - Ábaco para classificação textural do solo – Triângulo Textural.....	80
Figura 30- Carta de Plasticidade do Solo.	82
Figura 31- Mapa de pontos de coleta de solo.....	84
Figura 32 - Coleta de amostra de solo: a) limpeza superficial; b) trado holandês; c) traçado do perfil do solo.....	86
Figura 33 - Análises de densidade e umidade do solo	90
Figura 34 - Análise de limite de liquidez - LL.....	91
Figura 35 - Ensaio de limite de plasticidade - LP.....	92
Figura 36 - Ensaio de infiltração de água no solo.....	95
Figura 37 - Histograma de variação da altimetria com área em densidade de pixels.	100
Figura 38 - Carta Altimétrica para área de estudo.....	101
Figura 39 - Gráfico das classes de declividade com área em percentagem.....	102
Figura 40 - Carta de Declividade para área de estudo.	103
Figura 41 - Hilshade para área de estudo.....	105
Figura 42 - Gráfico da direção das encostas com área em percentagem.	106
Figura 43 - Carta de Direção das Encostas para área estudada.....	107
Figura 44 – Gráfico da distribuição da curvatura das encostas em percentagem. .	108
Figura 45 - Carta de curvatura das Encostas para área de estudo.	109
Figura 46 - Gráfico com as Classes de uso e ocupação do solo com área em percentagem.....	110
Figura 47 - Uso e ocupação do solo para área de estudo.....	111
Figura 48 - Carta de Classes de Solo da EMBRAPA (2008), para área de estudo.	113
Figura 49 - Classes de solo para área de estudo.	114
Figura 50 - Localização dos pontos de análise de solo.	116
Figura 51 - Triângulo textural e locação dos pontos analisados.....	124

Figura 52 - Fator de Segurança para o solo Natural sem influência da Vegetação.	135
Figura 53 - Fator de Segurança para o solo saturado sem influência da vegetação.	136
Figura 54 - Fator de Segurança para o solo Natural Com influência da Vegetação.	137
Figura 55 - Fator de Segurança para o Solo Saturado com Influência da Vegetação.	138
Figura 56 - Pontos de diminuição do fator de segurança, sem influência da vegetação, para solo saturado.....	139
Figura 57 - Pontos de diminuição do fator de segurança para solo saturado com influência da vegetação.....	140
Figura 58 - Áreas de diminuição do fator de segurança, para solo saturado.	141
Figura 59 - Comparativo entre os quatro fatores de segurança para a área.	142

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classes do relevo de acordo com a classificação da EMBRAPA	31
Tabela 2 - Classificação dos movimentos de massa conforme sua velocidade.....	36
Tabela 3 - Valores atribuídos para a força de arrasto do vento atuando na copa das árvores no sentido contra a encosta.	51
Tabela 4 - Dados mensais de pluviosidade acumulada para a cidade de Francisco Beltrão - PR durante o período de 1979 à 2015.....	61
Tabela 5 - Dados climatológicos para Francisco Beltrão de 1974 a 2015.....	62
Tabela 6 - Classes do solo conforme a declividade do terreno.....	79
Tabela 7 – Terminologia adotada no sistema unificado.	80
Tabela 8 - Ensaio realizados e Metodologia empregada.....	83
Tabela 9– Localização dos pontos de coleta do solo, profundidade da coleta e horizonte encontrado.....	85
Tabela 10–Peneiras utilizadas para a granulometria	87
Tabela 11 - Velocidade de Sedimentação pela Lei de Stokes.	88
Tabela 12 – Classificação do solo conforme o índice de consistência – “Liquidity”. .	93
Tabela 13 - Velocidade de infiltração.	94
Tabela 14 – Classificação das encostas quanto a estabilidade do terreno	97
Tabela 15 - Classes de declividade para área de estudo.....	102
Tabela 16 - Direção das encostas na área de estudo.....	106
Tabela 17 - Geometria das encostas.	108
Tabela 18 - Análise granulométrica de sedimentação.....	124
Tabela 19 - Dados do teste de infiltração por infiltrômetro de anéis.....	125
Tabela 20 - Resultados das análises geotécnicas do solo.....	127
Tabela 21 - Classificação unificada do solo para os pontos amostrados.	128
Tabela 22- Dados de Sondagem a percussão - SPT.....	129
Tabela 23 – Dados de SPT agrupados por características de solo e declividade...	130
Tabela 24 - Classes de declividade com fator de segurança < 1,5 para solo saturado com influência da vegetação.....	132

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM: American Society for Testing and Materials

EMBRAPA: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

Fs: Fator de Segurança

NBR: Norma Brasileira

SPT: Standard Penetration Test

USCS: Sistema de Classificação Unificada dos Solos
(*Unified Soil Classification System*)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	OBJETIVOS	20
1.1.1	Objetivo Geral	20
1.1.2	Objetivos Específicos	20
1.2	HIPÓTESES	21
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	21
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1	O SOLO	24
2.1.1	Classificação Pedológica	25
2.1.2	Classificação Unificada dos Solos	29
2.2	O RELEVO	30
2.3	ENCOSTAS	32
2.4	OS MOVIMENTOS DE MASSA	34
2.4.1	Creep ou rastejo	37
2.4.2	Quedas ou deslizamentos de blocos	38
2.4.3	Corridas ou avalanches	40
2.4.4	Escorregamentos	40
2.4.5	Fatores condicionantes dos escorregamentos	46
2.5	PROJETOS DE ESTABILIDADE	54
3	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	57
3.1	LOCALIZAÇÃO	57
3.2	PRECIPITAÇÃO	60
3.3	TEMPERATURA	62
3.4	EVAPOTRANSPIRAÇÃO	64
3.5	GEOLOGIA	64
3.6	PEDOLOGIA	66
3.7	GEOMORFOLOGIA	67
3.8	HISTÓRICO DE MOVIMENTOS DE MASSA NA ÁREA DE ESTUDO	67
4	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	77
4.1	BASE CARTOGRÁFICA	77
4.2	SOLOS	78

4.3	ANÁLISES FÍSICAS E MECÂNICAS DO SOLO	83
4.3.1	Análise granulométrica.....	85
4.3.2	Densidade e Teor de Umidade	89
4.3.3	Limite de Liquidez	90
4.3.4	Limite de Plasticidade.....	91
4.3.5	Índice de Consistência – “Liquidity”	93
4.3.6	Permeabilidade.....	93
4.4	DADOS DE SONDAGEM A PERCUSSÃO SPT (<i>STANDART PENETRATION TEST</i>)	95
4.5	CÁLCULO DO FATOR DE SEGURANÇA	97
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	99
5.1	BASE CARTOGRÁFICA	99
5.2	ANÁLISES FÍSICAS E MECÂNICAS DO SOLO	115
5.3	MAPEAMENTO DE SUSCEPTIBILIDADE.....	131
6	CONCLUSÕES	143
7	REFERÊNCIAS.....	145
8	APÊNDICES.....	149

1 INTRODUÇÃO

Muitos dos problemas ambientais vivenciados pela humanidade vêm da falta de informação e senso crítico da população. Dentre os fatores que contribuem para isso destacam-se o consumismo, a alienação e o desperdício de materiais. Como consequência, há o desafio do desenvolvimento sustentável tornar-se base para novas políticas ambientais.

A crescente atenção com a qualidade de vida envolve a preocupação ambiental, pois a sociedade, por meio da evolução científica e tecnológica, tem aprendido que as condições ambientais são importantes para a saúde e para o seu bem-estar, tanto em curto quanto em longo prazo.

Com uma taxa de crescimento urbano elevada, na cidade de Francisco Beltrão houve a necessidade do uso de áreas mais abrangentes do entorno urbano para ocupação e edificação, expandindo-se seu perímetro urbano. Esse processo de ocupação ocorre em regiões onde a declividade e a classe de solo podem não ser os mais adequados para tal uso. Assim, o processo de expansão fez com que seja necessário o levantamento de hipóteses antes não consideradas, como a ocorrência de novos tipos de desastres naturais.

Na área urbana da cidade de Francisco Beltrão os problemas ambientais mais relevantes estão concentrados na degradação do solo, na erradicação da cobertura vegetal natural e na ocupação de áreas não propícias. Tais problemas são provocados, principalmente, pelo crescimento urbano desordenado e necessidades de ocupação de novas áreas, através da implantação de loteamentos urbanos mal planejados ou sem estudo geotécnico adequado. Percebe-se, também, que alguns projetos de novos loteamentos não estão considerando adequadamente a declividade do terreno, bem como o tipo de solo encontrado, pois foram implantados de maneira rápida, para proporcionar o crescimento da cidade.

No município de Francisco Beltrão, conforme a Defesa Civil no seu plano de Contingência de Proteção e Defesa Civil – PLANCON, os riscos ambientais considerados são: deslizamentos, alagamentos, inundações, granizo, vendavais e tempestades. Desses riscos, os movimentos de massa são os mais recentes, tendo o primeiro evento de grande porte registrado entre os dias 26 e 27 de novembro de 2015, com uma corrida de massa no perímetro urbano.

Nessa perspectiva, este estudo visa contribuir com um mapeamento das áreas susceptíveis à movimentação de massa no perímetro urbano de Francisco Beltrão, bem como proporcionar um método para a avaliação e implantação de novas edificações nos pontos de risco, além de analisar o risco em locais onde as edificações já estão implantadas.

Objetiva-se, ainda, com este estudo, contribuir para o enriquecimento do meio científico, pois se embasa em técnicas em ascensão, e pode servir como material de referência para futuros projetos relacionados ao tema pesquisado. Também poderá auxiliar a prefeitura municipal de Francisco Beltrão, servindo como modelo de estudo para viabilização da implantação adequada de parcelamentos de lotes, para o perímetro urbano atual, bem como sua expansão.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a situação da área urbana da cidade de Francisco Beltrão – PR em relação a riscos de movimentos de massa.

1.1.2 Objetivos Específicos

São objetivos específicos deste trabalho:

- ▶ Estruturar em ambiente ArcGIS, banco de dados geográfico, e base cartográfica, da cidade.
- ▶ Elaborar a carta de declividade, de classes do solo, de uso e ocupação do solo.
- ▶ Realizar e levantar dados de análises físicas e geotécnicas do solo para caracterização da área de estudo.
- ▶ Gerar o mapa de risco das encostas da cidade, em relação a possíveis movimentos de massa.

1.2 HIPÓTESES

Existem áreas inaptas para o uso de edificações e construções civis, em relação às características físicas do solo e à pluviosidade na área urbana da cidade de Francisco Beltrão, bem como no seu entorno e que apresentam risco de movimento de massa.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Nesta dissertação no Capítulo 2 apresentam-se alguns conceitos sobre movimentação de massa, tipos de movimentos de massa e as características de cada movimento, bem como métodos de análises empregadas para mapeamento de susceptibilidade a movimentação de massa.

No Capítulo 3 analisam-se as características da área de estudo. Tais características relacionam dados e descrições da área envolvendo: sua localização, a precipitação, temperaturas e médias históricas, evapotranspiração média, geologia, pedologia e geomorfologia.

No Capítulo 4 encontram-se as metodologias utilizadas para a realização deste trabalho e a localização da área de estudo. Este capítulo aborda a caracterização e estruturação do banco de dados e a descrição da metodologia adotada para as análises físicas.

No Capítulo 5 estudar-se-ão os resultados com o mapeamento das áreas susceptíveis a movimentação de massa e análises obtidas através da estruturação completa do banco de dados e dos experimentos físicos do solo.

E por fim, no Capítulo 6 apresentam-se as conclusões do trabalho e algumas propostas para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

As Ciências Ambientais permitem a caracterização de uma região através da identificação de características geológicas e físico-químicas naturais, inclusive as alterações geradas pela ação do homem, no que tange aos processos de degradação física bem como os processos erosivos e químicos, a poluição das águas com efluentes minerais e orgânicos e a ocupação de áreas críticas, como margens de rios e encostas (ROCHA, 2000).

A urbanização e os problemas ambientais urbanos são representações das mudanças sociais e ecológicas combinadas e atingem de forma permanente e variada todo o espaço, de acordo com a localização, distância, topografia, características geológicas, morfológicas, crescimento populacional e segregação espacial. Tais aspectos devem ser melhores observados devido aos grandes impactos que causam ao meio ambiente (GUERRA, 2012).

A natureza responde às intervenções antrópicas como uma necessidade de atingir um novo equilíbrio e se manifesta por meio dos fenômenos naturais de origem externa. Dentre os principais fenômenos naturais induzidos ou potencializados pelo homem destacam-se os escorregamentos, as inundações e enchentes, a erosão e os colapsos e subsidências de solo (AMARAL, 2015).

Os desastres naturais são considerados como a ocorrência de fenômenos naturais que modificam a superfície terrestre, atingem áreas ou regiões habitadas e causam danos materiais e humanos ao atingir a população. Quando o mesmo fenômeno ocorre em área sem moradia o evento é apenas denominado evento natural, entretanto, devido à intervenção e ocupação humana em áreas de perigo geológico, há a potencialização e a ocorrência de desastres (AMARAL, 2015).

Os desastres naturais ocorrem, na maioria dos casos, de forma inesperada, apresentam diferentes gravidades e estão ligados às condições atmosféricas, podendo ser previsíveis em alguns casos (AMARAL, 2015).

Segundo Augusto Filho (1995), os estudos de escorregamentos acumulam bibliografias nacionais e internacionais sendo um amplo campo de trabalho relacionado a diversas áreas do conhecimento como mecânica dos solos e rochas, geotecnia, engenharia civil, geologia e geomorfologia, entre outras. Dessa forma, as análises e controle de escorregamentos estão diretamente relacionados a demandas

socioeconômicas, advindas de acidentes e problemas diversos concernentes a instabilizações de encostas.

O solo e suas classificações, o relevo, as encostas, os tipos de deslizamentos e os fatores causadores são temas a serem abordados no decorrer deste capítulo.

2.1 O SOLO

A EMBRAPA (2006) define o solo como:

Uma coleção de corpos naturais, constituídos por partes sólidas, líquidas e gasosas, tridimensionais, dinâmicos, formados por materiais minerais e orgânicos, que ocupam a maior parte do manto superficial das extensões continentais do nosso planeta, contém matéria viva e podem ser vegetados na natureza onde ocorrem e podem, eventualmente, terem sido modificados por interferências antrópicas.

Segundo Lepsh (2010), como formação natural, o solo se desenvolve na porção superficial da crosta terrestre, sendo resultado, essencialmente, da interação dos processos físicos, químicos e biológicos sobre as rochas superficiais da crosta terrestre. Salienta que o solo não oferece resistência à escavação mecânica e perde totalmente sua resistência quando em contato com a água.

Kertzman & Diniz (1995) sugerem que os solos são produtos da interação entre as rochas, o relevo e o clima, apresentando portanto as principais características desses elementos. Assim sendo, conhece-se o solo e pode-se deduzir sobre o material de origem, a forma do relevo e declividade, o sistema natural de drenagem, o comportamento hídrico e a susceptibilidade aos processos do meio físico.

Guerra (2009) diz que os solos são classificados através de suas características morfológicas, observando seus perfis no campo, quantificando as características em laboratório, através de pedons coletados e como parte integrante das paisagens.

2.1.1 Classificação Pedológica

Na pedologia os solos são divididos em grandes grupos, identificados por características próprias e por certos atributos como cor, granulometria, textura, estrutura e porosidade, entre outros (KERTZMAN & DINIZ, 1995).

A EMBRAPA (2006) subdivide os solos em seis níveis categóricos no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS): 1º nível categórico (ordens), 2º nível categórico (subordens), 3º nível categórico (grandes grupos), 4º nível categórico (subgrupos), 5º nível categórico (famílias) e 6º nível categórico (séries), sendo que estas classificações têm embasamento nos horizontes encontrados em um determinado local.

Segundo o IBGE (2007) os horizontes são a subdivisões do solo em seções conforme sua constituição mineral ou orgânica, sua proximidade com a superfície e suas características resultantes da ação pedogênica. A Figura 1 apresenta a divisão dos horizontes encontrados em solos mais maduros.

As letras de cada horizonte apresentado na Figura 1 representam:

- ▶ Horizonte O: horizonte superficial e pode chegar a conter mais de 20% de matéria orgânica nos seus diferentes estágios de decomposição.
- ▶ Horizonte A: apresenta grande quantidade de material decomposto misturado com minerais.
- ▶ Horizonte E: horizonte de coloração mais clara, onde são depositadas as partículas mais finas lixiviadas dos horizontes superiores.
- ▶ Horizonte B: esse horizonte é pouco afetado pela ação do homem, é pobre em matéria orgânica e rico em material mineral.
- ▶ Horizonte C: é denominado de saproli, possui grande quantidade de material decomposto de origem da rocha matriz com frações mais grosseiras do solo.
- ▶ Horizonte R: é a camada de material mineral consolidado e constitui a rocha matriz propriamente dita.

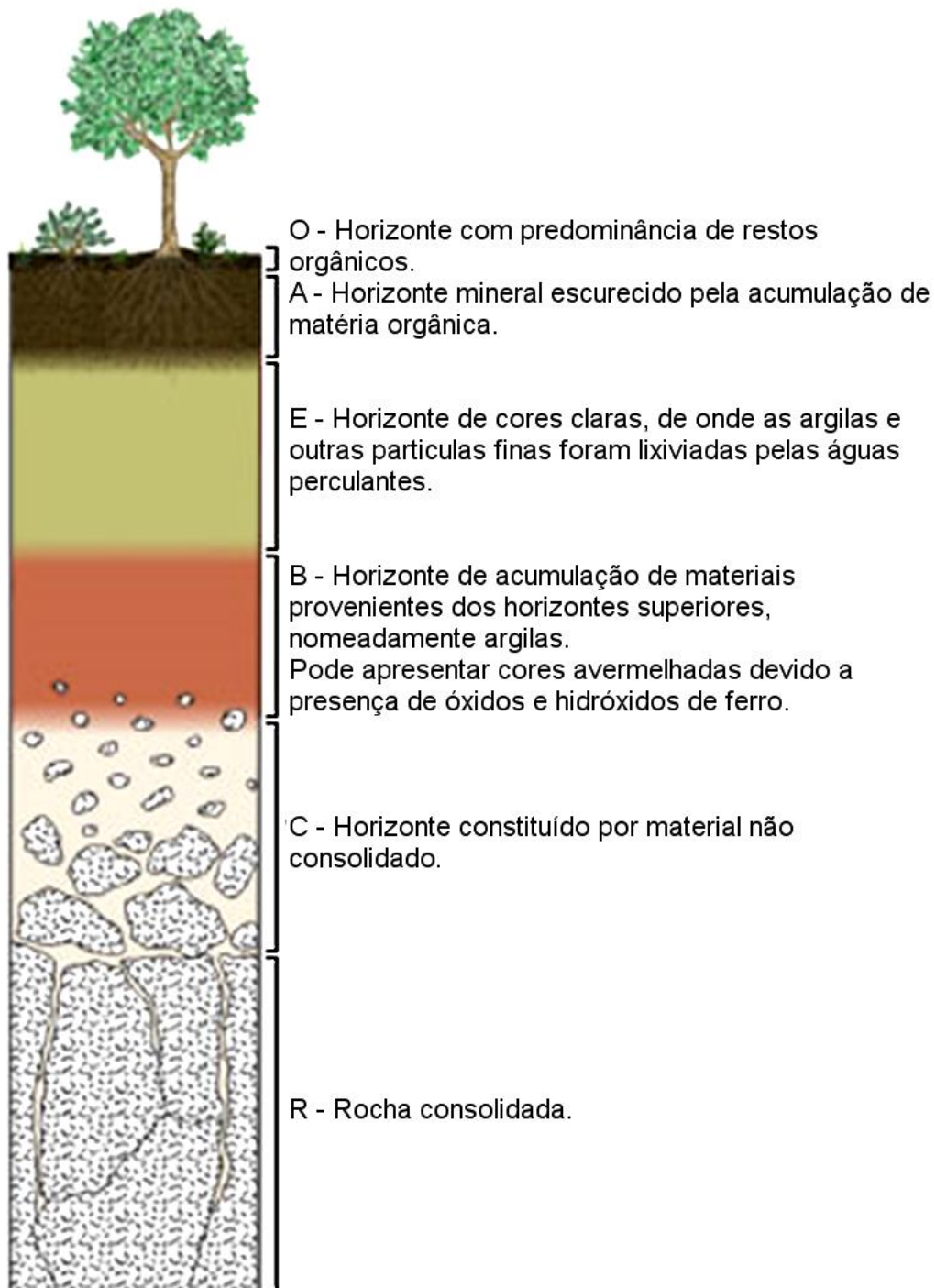


Figura 1 - Horizontes do solo.

Fonte: Adaptado de Press e Siever (1998).

Os solos em superfícies de relevos mais suaves em geral se apresentam mais profundos e com nítida diferenciação entre os principais horizontes. Nas encostas mais íngremes se apresentam mais rasos com menor diferenciação entre os principais horizontes, o que ocorre também devido ao elevado escoamento superficial da água que favorece a remoção do material intemperizado (GUERRA, 2009).

Assim sendo, apresentam-se as ordens, de maior relevância, segundo o Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos, e solos com maior ocorrência em regiões tropicais, apresentados pela EMBRAPA (2006), Lepsh (2010), Kertzman & Diniz (1995) e Guerra (2009).

Argissolo/Podzólicos: solo com argila de atividade baixa, com baixa permeabilidade. Esses solos se apresentam com perfil profundo, heterogêneos e com distinta divisão entre os horizontes. Por ser um solo de características homogêneas possui comportamento geotécnico diferenciado dos latossolos. São encontrados em áreas de média e alta declividade entre 6 e 20%. São solos mais frágeis que os latossolos possuindo de médio a alto potencial de desenvolvimento de processos erosivos.

Cambissolo: solo considerado jovem, pouco desenvolvido, com horizontes A e B pouco espessos com ausência ou quase ausência da estrutura rochosa, que recobrem um espesso solo de transição denominado horizonte C (ou saprolito). Geralmente ocorrem em áreas com declividade forte ondulada e montanhosa acima de 20%. Podem apresentar algumas formações em superfícies planas de sedimentos aluviais.

Chernossolo: solo rico em matéria orgânica, bases e alta fertilidade. É um dos solos mais ricos do Brasil. São pouco coloridos e imperfeitamente drenados.

Espodossolo: solo muito arenoso com acúmulo de matéria orgânica e/ou ferro no horizonte B.

Gleissolo: solo com grande gleização, resultado da intensa redução de compostos de ferro em presença de matéria orgânica. Ocorre em sedimentos recentes próximos a cursos d'água e compreendem os domínios das planícies fluviais.

Hidromórficos: são os solos de várzeas e fundos de vales que sofrem com alagamentos periódicos e permanecem saturados permanentemente ou sazonalmente. Possuem lençol freático a baixas profundidades.

Latossolo: solo bastante profundo e muito intemperizado, são homogêneos, porosos e com aspecto maciço. São solos com grande capacidade de infiltração superficial pois possuem um volume de poros em torno de 50%. São solos encontrados em declividades de até 15%, são solos naturalmente estáveis e pouco susceptíveis a problemas geotécnicos. São solos que sob condições de uso intensas desenvolvem graves problemas de degradação.

Luvissolo: solo com grande capacidade de retenção de nutrientes e apresenta alta fertilidade.

Neossolo: solos rasos, muito pouco evoluídos, apresentam uma camada fina que recobre a rocha pouco ou moderadamente alterada. São encontrados em áreas de montanhas, serras e escarpas, sendo áreas críticas geotecnicamente susceptíveis a escorregamentos e quedas de blocos. Tais solos estão associados a superfícies de topografia forte ondulada e montanhosa.

Nitossolo: solo mineral, com textura argilosa a muito argilosa, bastante poroso, com teores de ferro elevados.

Organossolo: solo com elevado conteúdo de material orgânico, pouco evoluído e de coloração preta ou escura, solo ácido. Apresenta horizonte turfoso, com teor de carbono orgânico maior que 50%.

Planossolos: são solos imperfeitamente ou mal drenados, possui diferença abrupta entre os horizontes A e B. Esses solos estão relacionados a superfícies de relevo praticamente plano a suave ondulado, formando vales abertos com vertentes bastante suaves de centenas de metros.

Plintossolo: solo ácido, geralmente imperfeitamente ou mal drenado. Apresenta segregação de ferro em subsuperfície constituindo manchas de cores variadas, as plintita. Tais solos estão relacionados a superfícies com topografia plana e suavemente onduladas, apresentam movimentação lenta da água através da superfície do solo.

Vertissolo: solo essencialmente argiloso com alta capacidade de contração e expansão devido às argilas.

2.1.1.1 A Textura do Solo

Segundo Santos (2005), a textura do solo permite fazer referências sobre a origem do material constituinte do solo e seu grau de intemperismo, pois se refere às porções das frações granulométricas dos constituintes minerais do solo de forma individualizada. Raramente se encontra um solo que se constitui apenas de uma única fração granulométrica, com isso surgiram as classes de textura do solo as quais relacionam as diferentes composições das frações granulométricas em classes.

As frações granulométricas são definidas através do tamanho das partículas, sua função no solo e sua natureza. As frações mais utilizadas são a areia, o silte e a argila.

A argila é a classe que possui as partículas com diâmetros inferiores a 0,002 mm, ou seja, as menores partículas. É constituída por minerais da argila (filossilicatos), hidróxidos de alumínio, óxidos e oxihidróxidos de ferro. A fração, juntamente com a matéria orgânica humificada, torna-se a fase efetivamente ativa do solo, tanto química quanto fisicamente (MANFREDINI, 2009).

O silte é a classe que possui as partículas com diâmetro entre 0,002 mm e 0,05 mm. É constituída principalmente por minerais primários, e possui relação com o intemperismo químico, quanto maior o teor de silte no solo menor é o grau de intemperismo químico. Dependendo da natureza da rocha mãe essa fração pode representar uma reserva de nutrientes do solo. Do ponto de vista físico os solos que apresentam elevado teor de silte são mais adensados e pouco porosos, o que contribui para a má circulação de água (MANFREDINI, 2009).

A areia é a classe que possui as partículas com diâmetro entre 0,05 mm e 2,00 mm. É constituída principalmente por quartzo, sendo essa fração quimicamente inerte tem função estrutural no solo, e pode ser comparada a um esqueleto (MANFREDINI, 2009).

2.1.2 Classificação Unificada dos Solos

A Classificação Unificada dos Solos (USCS), é uma das classificações geotécnicas mais utilizadas; foi desenvolvida por Casagrande (1948) e normatizada pela ASTM (1984, 1985 E 1988). O uso dessa classificação é baseado na granulometria e características plásticas dos solos (KERTZMAN & DINIZ, 1995).

Vargas (1985) segregou os solos tropicais em duas classes com comportamento geotécnico distinto, sendo elas: a porção superficial com estágio avançado de laterização, constituindo-se no solo laterítico; e a porção mais profunda apresentando estruturas reliquias da rocha e se constitui no solo saprolítico.

Os solos lateríticos são solos normalmente argilosos, de coloração escura, são relativamente homogêneos, porosos, com estrutura maciça e microagregada bem desenvolvida. Tais solos não apresentam minerais ou estruturas da rocha mãe (VARGAS, 1985).

Os solos saprolíticos têm ocorrência abaixo do nível superficial nas regiões de perfil evoluído e acima do nível da rocha alterada, ocorrendo em superfícies nas regiões de perfil pouco evoluído. Esses solos podem ser subdivididos em dois níveis: no superior o solo residual jovem ou saprolito fino e o saprolito propriamente dito ou saprolito grosseiro (VARGAS, 1985).

Segundo Vargas (1985), a diferenciação entre solos lateríticos e saprolíticos está baseada essencialmente na granulometria e nos limites de Atterberg (limite de liquidez e limite de plasticidade). Porém a estrutura microagregada é típica de solos tropicais, onde as argilas e óxidos se reorganizam e comportam-se na prática como areias finas mascarando as curvas granulométricas. Dessa forma, não se deve considerar apenas a granulometria do solo mas também sua estrutura e características visando não tornar limitadas as classificações propostas.

2.2 O RELEVO

Florenzano (2008) descreve que a superfície terrestre não possui característica plana e uniforme, apresentando-se com depressões de diversas formas, as quais constituem o seu relevo. Na superfície o relevo varia em diversas escalas, como a planetária definida pelos continentes e oceanos, a continental representada por montanhas, planaltos, depressões e planícies e a local que apresenta escarpas, morros, colinas e terraços.

Sendo assim, o relevo não possui importância apenas para a ciência que o estuda e a sua formação, a geomorfologia. Possui importância, também, para as demais ciências da terra que estudam as rochas, o solo, a vegetação e a água. Além disso, contribui com os estudos de definição de fragilidade e vulnerabilidade do meio ambiente e no tocante a estabelecer legislações que visam à ocupação e a proteção desse ambiente (FLORENZANO, 2008).

Santos (2005) delibera que a declividade e o relevo do local são fatores de formação do solo. As informações sobre o relevo são importantes para fins de manejo e conservação, assim como para a construção de grandes obras de engenharia como traçados rodoviários, aeroportos e hidroelétricas.

A EMBRAPA (2006) classifica o relevo em seis classes, de forma bem simplificada, e é utilizada por diversos especialistas.

- ▶ Relevo plano englobando superfícies de topografia horizontal com desníveis muito pequenos e declividade variável de até 3%;
- ▶ Relevo suave ondulado: sendo uma superfície pouco movimentada, constituída por um conjunto de colinas com elevações médias de até 50 m e que apresentam declividades suaves entre 3 a 8%;
- ▶ Relevo ondulado: apresenta uma superfície pouco movimentada em um conjunto de colinas com declives moderados, predominantemente variáveis entre 8 e 20%.
- ▶ Relevo fortemente ondulado: apresenta-se em uma superfície topográfica movimentada, formada por outeiros e/ou morros (apresentando elevações de 50 a 100 m e de 100 a 200 m respectivamente) e raramente apresenta colinas, possui declives fortes entre 20 e 45%.
- ▶ Relevo montanhoso: possui superfície topográfica vigorosa com predominância de formas acidentadas: morros, montanhas e maciços montanhosos, com declives fortes e muito fortes variáveis entre 45 e 75%.
- ▶ Relevo escarpado: apresenta-se em áreas com formas abruptas predominantes, compreendendo superfícies íngremes e escarpamentos, com declives acentuados acima dos 75%.

A Tabela 1 apresenta de modo mais simplificado as classes do relevo, a declividade em porcentagem e corresponde a quais associações englobam.

Tabela 1 - Classes do relevo de acordo com a classificação da EMBRAPA

Classe	Declividade em Porcentagem	Engloba
Plano	0% - 3%	Planícies, terraços e chapadas
Suave ondulado	3% - 8%	Colinas
Ondulado	8% - 20%	Morros e morrotes
Forte ondulado	20% - 45%	Morros e serras
Montanhoso	45% - 75%	Montanhas e serras
Escarpado	> 75%	Serras e escarpas

Fonte: Adaptado de EMBRAPA (2006).

Bollian (2010) traz que o relevo influencia na maneira como uma área é antropicamente ocupada, tal fato nota-se em áreas urbanas com diferentes relevos e, em função disso, há os traçados diferenciados das ruas e quarteirões que acompanham a declividade.

O ser humano é tido como um dos maiores transformadores do relevo, modificando-o para edificações de casa e edifícios que exigem aplainamento dos terrenos irregulares, assim como cortes em encostas e montanhas para implantações de rodovias e ferrovias, além de escavações em morros para aberturas de túneis e criação de acessos.

2.3 ENCOSTAS

Augusto Filho e Virgili (1992, apud MOTA, 2003) definem as encostas como sendo superfícies inclinadas de maciços terrosos, rochosos ou mistos, originados de processos geológicos e geomorfológicos.

Stochalak (1974, apud AUGUSTO FILHO, 1995), define as encostas como toda superfície natural inclinada a qual une outras duas superfícies caracterizadas por diferentes energias potenciais gravitacionais.

Segundo Gerscovich (2012), os taludes naturais podem ser constituídos de solo residual e/ou solo coluvionar, além de rocha. Os solos residuais permanecem no local onde foram gerados, já os coluvionares são formados por meio do transporte de sedimentos.

Os taludes podem apresentar face plana ou curvilínea – côncava ou convexa, os quais geram fluxos preferenciais de água superficial.

Segundo Guerra (2001), a geometria de uma encosta está ligada à forma como a água escoar sobre essa superfície. As encostas côncavas são áreas de convergência de fluxos de água direcionando-as para o eixo de drenagem da bacia. Já as encostas de geometria convexa divergem os fluxos de água. A Figura 2 apresenta a geometria das encostas e o traçado de um talude com as respectivas geometrias.

Além disto, tem-se também áreas de acúmulo de solo em encostas côncavas e tendência a solos menos profundos em encostas convexas.

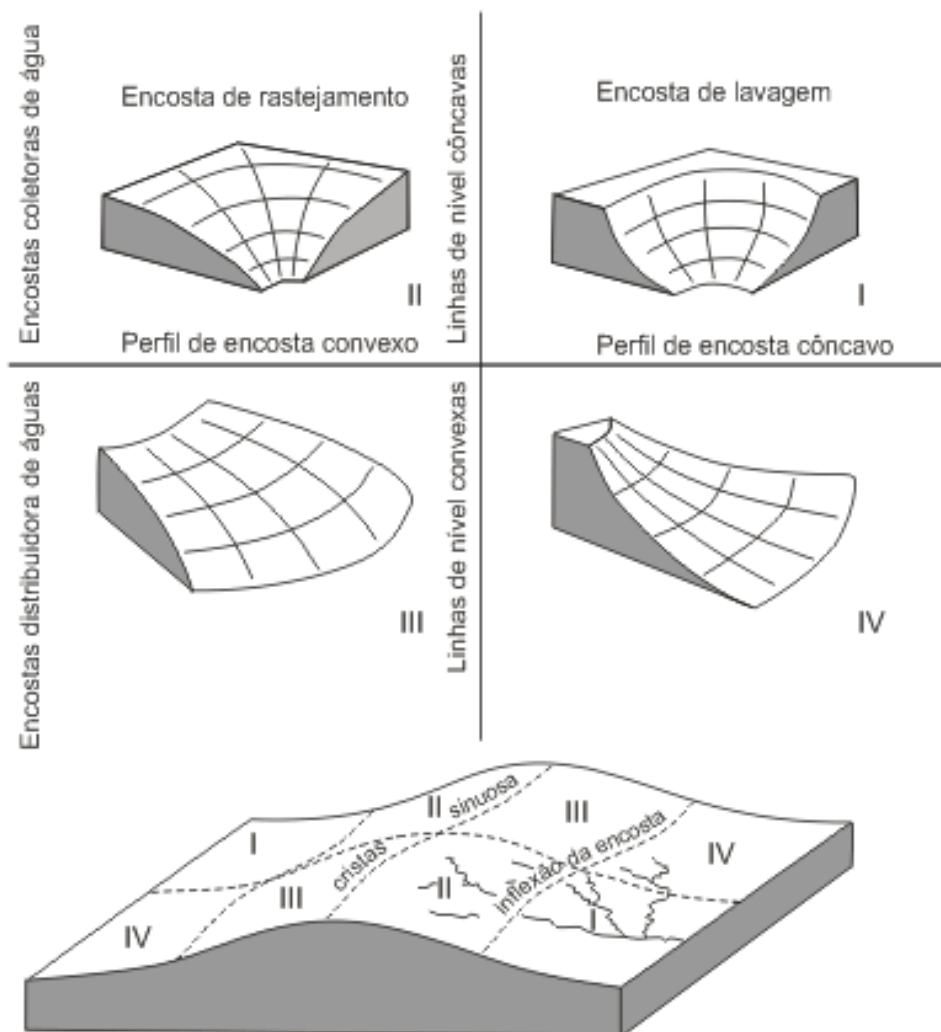


Figura 2 - Geometria das encostas.

Fonte: Troeh (1965).

Conforme Gerscovich (2012), a instabilidade das encostas é consequência da dinâmica da evolução das encostas, onde os processos químicos e físicos do intemperismo alteram as rochas. Consequentemente, o material resultante torna-se menos resistente e com a influência da topografia geram-se condições que favorecem a ruptura do terreno.

Dessa forma, taludes naturais estão sujeitos a problemas de instabilidade, pois a força gravitacional também contribui naturalmente para a deflagração do movimento. Sendo comum se observar encostas que se mantinham estáveis por vários anos virem a sofrer processos de movimentação, quando os fatores que alteram o estado de tensões da massa provocam tensões cisalhantes que se igualam à resistência ao cisalhamento do solo (GERSCOVICH, 2012).

2.4 OS MOVIMENTOS DE MASSA

Os movimentos de massa são processos que fazem parte dos movimentos gravitacionais de massa e estão diretamente relacionados à dinâmica das encostas (AUGUSTO FILHO, 1995).

Tominaga (2015) define movimento de massa como:

“O movimento do solo, rocha e/ou vegetação ao longo da vertente sob a ação direta da gravidade. A contribuição de outro meio, como água, se dá pela redução da resistência dos materiais da vertente e/ou pela indução do comportamento plástico e fluído dos solos.”

Augusto Filho (1995) e Guerra (2009), declaram que os escorregamentos se constituem de um dos processos mais importantes que estão associados à dinâmica superficial do território nacional, devido às ocorrências e a grande extensão de áreas com potencial de desencadear este processo. Esse quadro é resultante das características geológicas, geomorfológicas e climáticas brasileiras, além de processos socioeconômicos como urbanização intensa e empobrecimento geral da população, gerando instalações de situações de risco por meio da ocupação de áreas naturalmente susceptíveis a escorregamentos sem observação dos critérios técnicos mínimos recomendados.

O desmatamento, cortes no relevo e construções decorrentes da ação antrópica na urbanização, juntamente com os fenômenos naturais, podem gerar instabilidades nas encostas. Essas instabilidades favorecem a ocorrência de deslizamentos e problemas decorrentes destes, graves, tanto sociais como econômicos (TOMINAGA, 2015).

A Figura 3 exemplifica a influência da urbanização na instabilização dos taludes, onde o solo sem a proteção da vegetação e com o peso das construções, com a saturação por águas pluviais acaba por deslizar materiais em suas vertentes.

Os escorregamentos podem ser considerados naturais como Massad (2003) defende, pois a tendência da natureza é que as encostas atinjam um nível base. A ação do homem, implantando obras sem os devidos cuidados com a natureza, é outra causa dos escorregamentos de encostas, as quais podem se tornar instáveis em períodos de chuvas intensas e prolongadas.



Figura 3 - Influência da urbanização na estabilidade de taludes.
Fonte: Adaptado de Salsa (2005)

Os escorregamentos são movimentos de massa que envolvem materiais os quais recobrem toda a superfície da encosta. Segundo Tominaga (2015) os movimentos de massa são processos naturais que atuam na dinâmica do relevo, principalmente em regiões montanhosas, serranas e onde há predominância de climas úmidos. No Brasil possuem maior ocorrência as regiões Sul, Sudeste e Nordeste.

Os movimentos de massa são classificados conforme suas características, dentre os critérios utilizados se destacam o tipo do material, a velocidade e o mecanismo do movimento, o modo de deformação do movimento, a geometria da massa de solo movimentada e o conteúdo de água.

Existem diversas classificações para os movimentos de massa, sendo que as classes adotadas para classificações brasileiras são: Creep ou rastejo, Escorregamentos, Quedas ou deslizamentos de blocos e Corridas ou avalanches. Podem ainda ser classificados quanto a sua velocidade e sua profundidade.

Varnes (1978) classifica os movimentos conforme a sua velocidade, classificação essa apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 - Classificação dos movimentos de massa conforme sua velocidade.

Nomenclatura	Velocidade
Extremamente rápido	>3 m/s
Muito rápido	0,3 m/min a 3 m/s
Rápido	1,5 m/dia a 0,3 m/min
Moderado	1,5 m/mês a 1,6 m/dia
Lento	1,5 m/ano a 1,6 m/mês
Muito lento	0,06 m/ano a 1,6 m/ano
Extremamente lento	< 0,06 m/ano

Fonte: Varnes (1978).

Varnes (1978) ainda classifica, de forma geral, os movimentos conforme o material transportado, sendo tal classificação apresentada no Quadro 1.

Quadro 1 - Classificação dos movimentos de massa conforme material transportado.

Tipos de movimento			Tipo de material		
			Rocha	Solo (engenharia)	
				Grosseiro	Fino
Quedas			De Rocha	De detritos	De terra
Tombamentos			De Rocha	De detritos	De terra
Escorregamentos	Rotacional	Poucas unidades	Abatimento de rocha	Abatimento de detritos	Abatimento de terra
	Translacional	Muitas unidades	De blocos rochosos	De blocos de detritos	De blocos de terra
			De rocha	De detritos	De terra
Expansões laterais			De Rocha	De detritos	De terra
Corridas/escoamentos			De Rocha (rastejo profundo)	De detritos	De terra
Complexos: combinação de dois ou mais dos principais tipos de movimentos.					

Fonte: Varnes (1978).

Augusto Filho (1992, apud AUGUSTO FILHO, 1995) apresenta de forma resumida as características do movimento e os grandes grupos de processos de escorregamento conforme apresentado no Quadro 2.

Quadro 2 - Características dos grandes grupos de processos de escorregamentos.

PROCESSOS	CARACTERÍSTICAS DO MOVIMENTO – MATERIAL - GEOMETRIA
RASTEJO (CREEP)	Vários planos de descolamentos (internos). Velocidades muito baixas (cm/ano) a baixas e decrescentes com a profundidade. Movimentos constantes, sazonais ou intermitentes. Solo, depósitos, rocha alterada/fraturada. Geometria indefinida.
ESCORREGAMENTOS (SLIDES)	Poucos planos de deslocamento (externos). Velocidades médias (m/h) a altas (m/s). Pequenos e grandes volumes de material. Geometria e materiais variáveis: PLANARES: solos pouco espessos, solos e rochas com um plano de fraqueza; CIRCULARES: solos espessos homogêneos e rochas muito fraturadas; EM CUNHA: solos e rochas com dois planos de fraqueza.
QUEDAS (FALLS)	Sem planos de deslizamento. Movimento tipo queda livre ou em plano inclinado. Velocidades muito altas (vários m/s). Material rochoso. Pequenos a médios volumes. Geometria variável: lascas, placas, blocos, etc. ROLAMENTO DE MATAÇÃO. TOMBAMENTO.
CORRIDAS (FLOWS)	Muitas superfícies de deslocamento (internas e externas à massa em movimentação). Movimento semelhante ao de um líquido viscoso. Desenvolvimento ao longo das drenagens. Velocidades médias a altas. Mobilização de solo, rocha, detritos e água. Grandes volumes de material. Extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas.

Fonte: Augusto Filho (1995).

2.4.1 Creep ou rastejo

O rastejo é um movimento lento do solo ou das rochas, com velocidade de alguns centímetros ao ano. Podem ser movimentos constantes, sazonais ou intermitentes (AMARAL, 2015).

Geralmente essa movimentação envolve grandes volumes de solo sem que haja uma apresentação definida entre a massa de solo que está em movimento e a massa estacionária (TOMINAGA, 2015). Sua causa está ligada à ação da gravidade e às variações térmicas de umidade e temperatura, o que causam expansão e contração do solo e provocam o movimento vertente abaixo. Podem ser acelerados com as chuvas e ser desacelerados com as secas (TOMINAGA, 2015). Esse

deslocamento ocorre em um estado de tensões inferiores à resistência ao cisalhamento. Se houver variações do estado de tensões do solo a ponto de atingir a resistência a movimentação de massa passa a se tornar um escorregamento com superfície de ruptura bem definida (GERSCOVICH, 2012).

O supracitado movimento é identificado pela mudança na verticalidade de postes, árvores, cercas e muros e podem evoluir para um escorregamento (AMARAL, 2015).

A Figura 4 apresenta as evidências do rastejo, sendo eles troncos de árvores curvos, cercas inclinadas, muros de arrimo e contenções inclinadas e/ou estufadas, postes, cercas e monumentos inclinados, camadas de rocha apresentando curvatura e solo formando camadas (degraus).

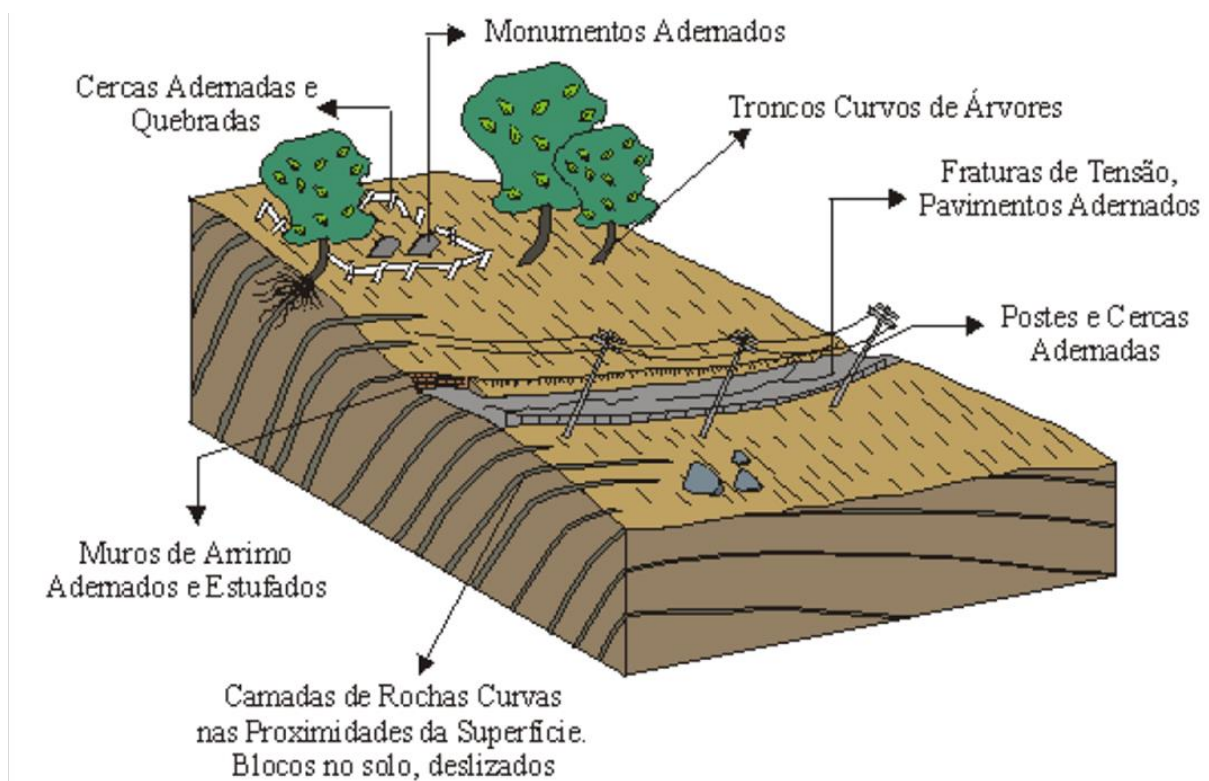


Figura 4 – Evidências de Creep ou rastejo.
Fonte: Henuat et al (2011).

2.4.2 Quedas ou deslizamentos de blocos

Envolvem a queda livre do material rochoso, sem superfície de movimentação em velocidade elevada de vários metros por segundo (AMARAL, 2015).

Ocorrem normalmente em escarpas rochosas, são blocos ou lascas da rocha que estão resistentes ao intemperismo, ou que sofreram ação erosiva da água, alívio de tensões tectônicas ou vibrações, que sofrem queda livre. Possuem velocidades muito altas, com volumes variados de pequenos e médios (TOMINAGA, 2015).

Gerscovich (2012) diz que as rochas que sofrem queda livre ao longo de um plano inclinado possuem origem na ação do intemperismo nas fraturas por ação da pressão hidrostática nas fraturas, perda de confinamento lateral por meio de obras subterrâneas e vibrações, entre outros.

A ocorrência de quedas de blocos é favorecida pela presença de descontinuidades na rocha como fraturas e bandamentos compositionais. Esse movimento contribui para a formação de depósitos de tálus (GUERRA, 2009).

A Figura 5 apresenta a ocorrência de queda de blocos, que são desprendidos da superfície rochosa e rolam em queda livre até alcançarem a superfície mais plana ou alguma barreira, natural ou não, ao longo do trajeto.

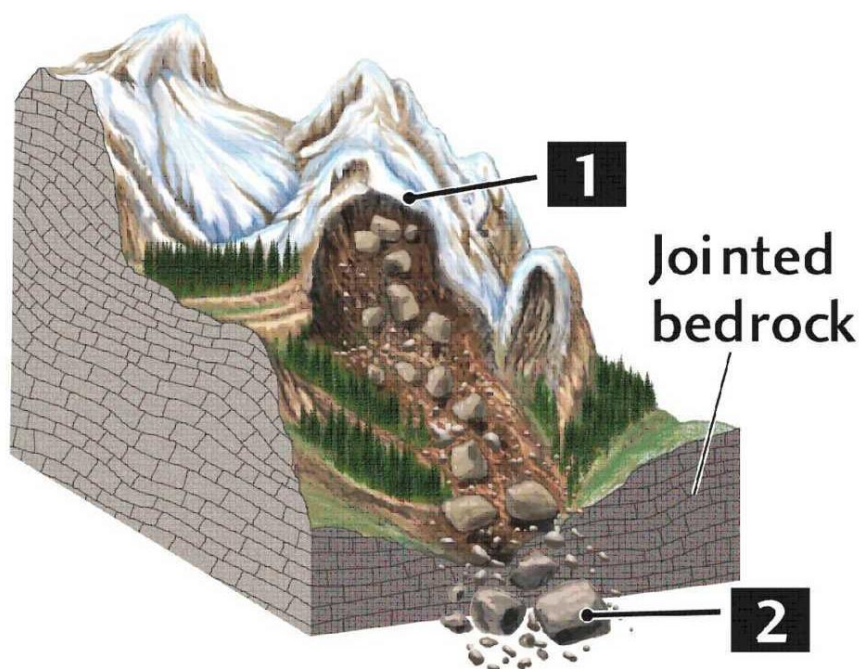


Figura 5 - Queda de blocos.
Fonte: Levett (2015)

2.4.3 Corridas ou avalanches

São erosões violentas, também chamadas de fluxo de detritos. Tendo um poder de destruição muito elevado, é classificada como desastre natural pois devasta tudo o que está em seu trajeto (AMARAL, 2015).

É um movimento de massa que ocorre em um período de tempo muito curto com grande velocidade ao longo de uma grande superfície e longas distâncias, mesmo em declividades baixas (TOMINAGA, 2015). Ocorre após longos períodos chuvosos, quando o solo perde completamente as características de resistência e atrito interno, a massa de solo passa então a comportar-se como um fluido (GERSCOVICH, 2012).

A diferenciação entre corridas e escorregamentos nem todas às vezes é de fácil distinção no campo, muitas vezes uma corrida é originada de um típico escorregamento, o que indica, em muitos casos, que as corridas são movimentos complexos (GUERRA, 2009).

Conforme Guerra (2009), as corridas simples estão associadas à concentração excessiva de fluxos de água superficial e deflagram um processo contínuo de material terroso. Dessa forma, a combinação de atuações antrópicas como construções de residências a margem de canais, desvios e bloqueios de canais naturais e a existência de uma grande quantidade de material inconsolidado na superfície contribuem para o poder de destruição das corridas.

A Figura 6 apresenta a ocorrência de uma corrida de massa, onde o material desprendido da encosta possui um grande alcance devido a sua fluidez e elevada energia.

2.4.4 Escorregamentos

Amaral (2015) traz que os escorregamentos são rápidos, de porções do terreno como o solo e rochas que se deslocam por ação da gravidade com movimento para baixo e para fora da encosta. Os escorregamentos são popularmente conhecidos como deslizamento, queda de barreira e desbarrancamento. Esses movimentos se apresentam com um plano de ruptura bem definido o que permite a distinção entre o material deslizado e o não movimentado. Possui feições longas podendo apresentar uma relação entre comprimento e largura de cerca de 10:1. O material movimentado

pode se constituir por solo, rocha ou uma mistura de solo e rocha ou até mesmo por lixo doméstico (GUERRA, 2009).

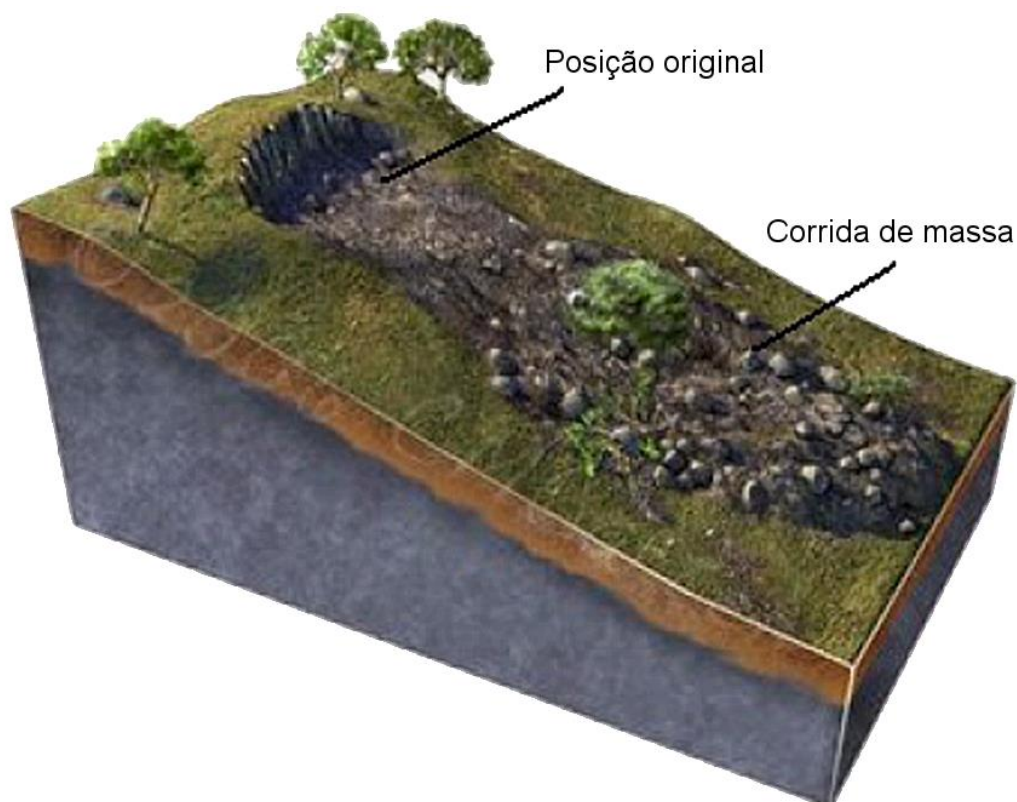


Figura 6 - Corrida de massa ou avalanche.
Fonte: Adaptado de Carter (2006)

Segundo Tominaga (2015) os escorregamentos se deflagram quando a relação entre a força da gravidade é superior ao atrito interno das partículas do solo, responsável pela estabilidade e a massa de solo se movimenta encosta abaixo. A infiltração de água no solo provoca a diminuição do atrito entre as partículas e quando o solo se torna saturado ocorre perda total do atrito entre as partículas mobilizando o solo encosta abaixo.

Os escorregamentos são subdivididos em três tipos, conforme sua geometria e a natureza dos seus materiais, sendo eles: escorregamentos rotacionais ou circulares, escorregamentos translacionais ou planares e escorregamentos em cunha.

2.4.4.1 Escorregamentos rotacionais ou circulares (*slumps*)

Segundo Tominaga (2015), os escorregamentos circulares se caracterizam pela apresentação de uma superfície curva ao longo da qual se dá o movimento rotacional do maciço de solo. Geralmente está associado à existência de solo espesso e homogêneo os quais ocorrem da alteração de rochas argilosas. O movimento é deflagrado, na maioria dos casos, por cortes na base deste material ou por erosão fluvial no sopé da vertente.

O escorregamento circular não possui uma direção preferencial, podendo ter velocidades médias de metros por hora ou velocidades altas de metros por segundo. Ocorre em solos espessos e com rochas muito fraturadas (AMARAL, 2015).

Podem se tornar processos de deslizamentos catastróficos, com deslizamento súbito do solo residual que está sobre a rocha em uma superfície de ruptura ou ao longo da própria superfície da rocha (TOMINAGA, 2015).

Segundo Guerra (2009) tal movimento possui uma superfície de ruptura côncava para cima onde se dá o movimento rotacional da massa de solo. São movimentos que ocorrem em solos espessos e homogêneos, mais comuns em encostas compostas por material de alteração advindo de rochas argilosas. Esse movimento está, na maioria das vezes, associado a cortes na base dos materiais, sejam estes cortes artificiais ou naturais.

Gerscovich (2012) traz que os movimentos rotacionais podem ainda ser denominados múltiplos quando mobilizam simultaneamente mais de uma superfície de ruptura.

A Figura 7 apresenta o movimento rotacional, com superfície de escorregamento curva embasado em um eixo de rotação imaginário, que forma degraus de abatimento ao longo da área movimentada.

2.4.4.2 Escorregamentos translacionais ou planares

É o mais frequente dentre todos os movimentos de massa (TOMINAGA, 2015). Possui uma superfície de ruptura plana associada a solos heterogêneos e rochas que apresentam descontinuidades, possuem velocidades médias de metros por hora a altas de metros por segundo (AMARAL, 2015).

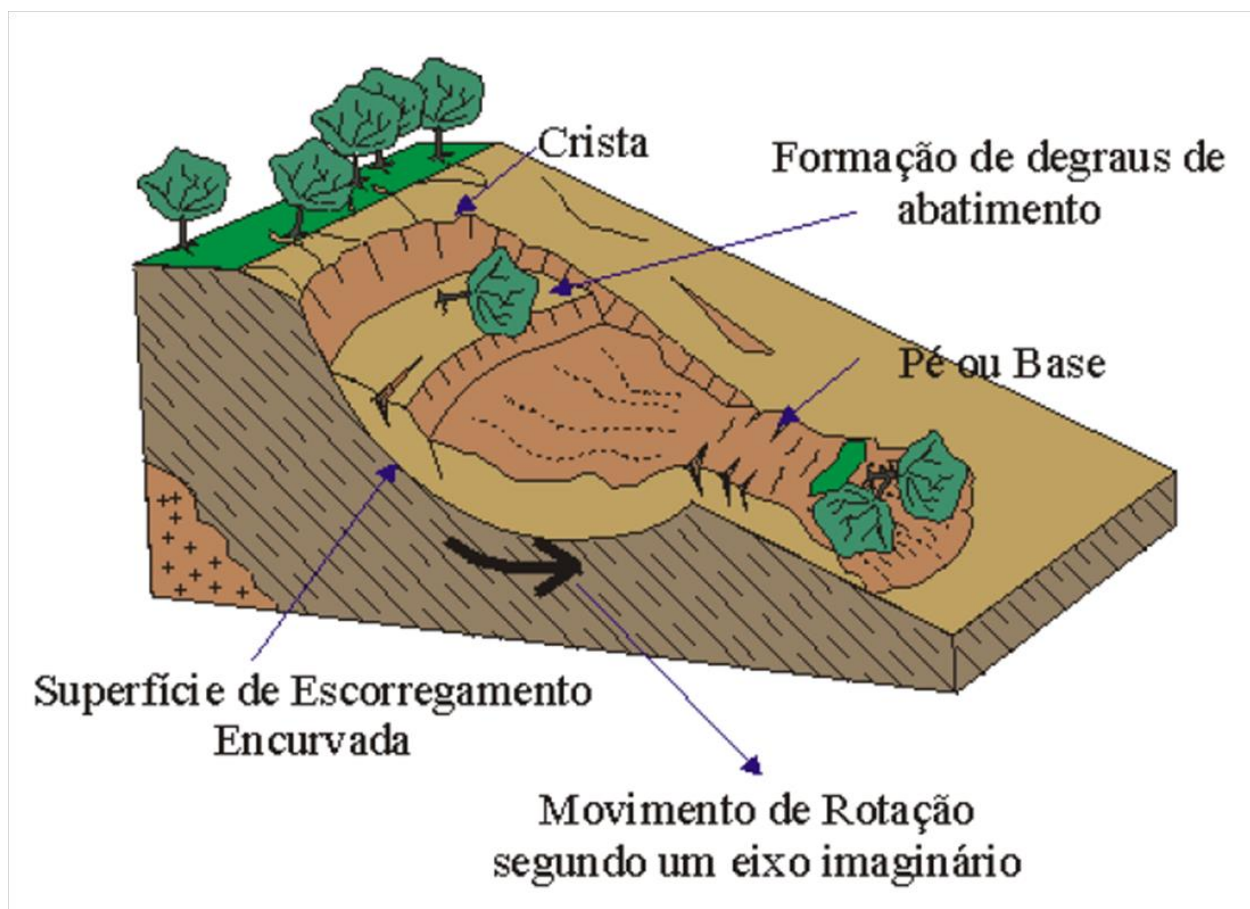


Figura 7 - Escorregamento rotacional
Fonte: Reis (2001)

Geralmente ocorrem durante períodos de intensa precipitação. São originados ao longo do contato entre o solo e a rocha sã, local que se apresenta com grande descontinuidade mecânica e hidrológica. Essa ruptura ocorre rapidamente devido ao aumento da poropressão positiva resultante de eventos pluviométricos de elevada intensidade ou duração (GUERRA, 2009). São movimentos comuns em solos de colúvio com pouca espessura o qual está sobrejacente a um embasamento rochoso. Desta forma as camadas de menor resistência não são paralelas à superfície do talude (GERSCOVICH, 2012).

Os escorregamentos translacionais ou planares podem ser movimentos resultantes de atividades e processos geológicos como acamamentos e fraturas, geomorfológicos como depósitos de encostas ou pedológicos como o contato entre o solo e o saprolito (GUERRA, 2009).

Segundo Tominaga (2015), esses movimentos possuem a característica de serem rasos, com profundidade média de 0,5 m a 5,0 m e apresentando maiores extensões no comprimento. Ocorrem em encostas de baixa e elevada declividade

podendo atingir centenas até milhares de metros. Os materiais transportados pelo escorregamento planar podem ser constituídos de rochas, de solo ou de rocha e solo.

- ▶ Escorregamento translacional de rocha: ocorre em planos de fraqueza em superfícies associadas à estrutura geológica.
- ▶ Escorregamento translacional de solo: ocorre ao longo de uma superfície plana, no interior do manto de alteração, possui forma tabular e espessura que depende da natureza das rochas, do clima e do revelo. Esse movimento é de curta duração com elevada velocidade e grande potencial de destruição. Quando associado a maiores quantidades de água podem se tornar corridas de massa ou se converterem a rastejo após a acumulação do material movimentado no pé da vertente (TOMINAGA, 2015).
- ▶ Escorregamento translacional de rocha e solo: a massa movimentada se apresenta com um volume de rocha significativo, constituído por blocos rochosos e fragmentos de diversos tamanhos.

Nos escorregamentos planares é comum que a superfície de ruptura coincida com a interface solo – rocha. A ação das águas nesses movimentos é mais superficial e a ruptura ocorre em um curto espaço de tempo durante ou logo após períodos de chuvas intensas (TOMINAGA, 2015).

Tal comportamento difere dos associados a escorregamentos rotacionais, os quais podem resultar de uma infiltração de água mais profunda e lenta. Dessa forma, tanto as características morfológicas da encosta e as propriedades hidráulicas dos materiais envolvidos possuem destaque como condicionantes da geração dos escorregamentos translacionais.

A Figura 8 apresenta um escorregamento planar onde a massa escorregada se consiste do solo. O movimento se dá de forma paralela à superfície que sofreu ruptura. A Figura 9 apresenta um escorregamento planar onde a massa escorregada é a rocha, o movimento é o mesmo, apresentando o movimento paralelo à linha de ruptura do talude.

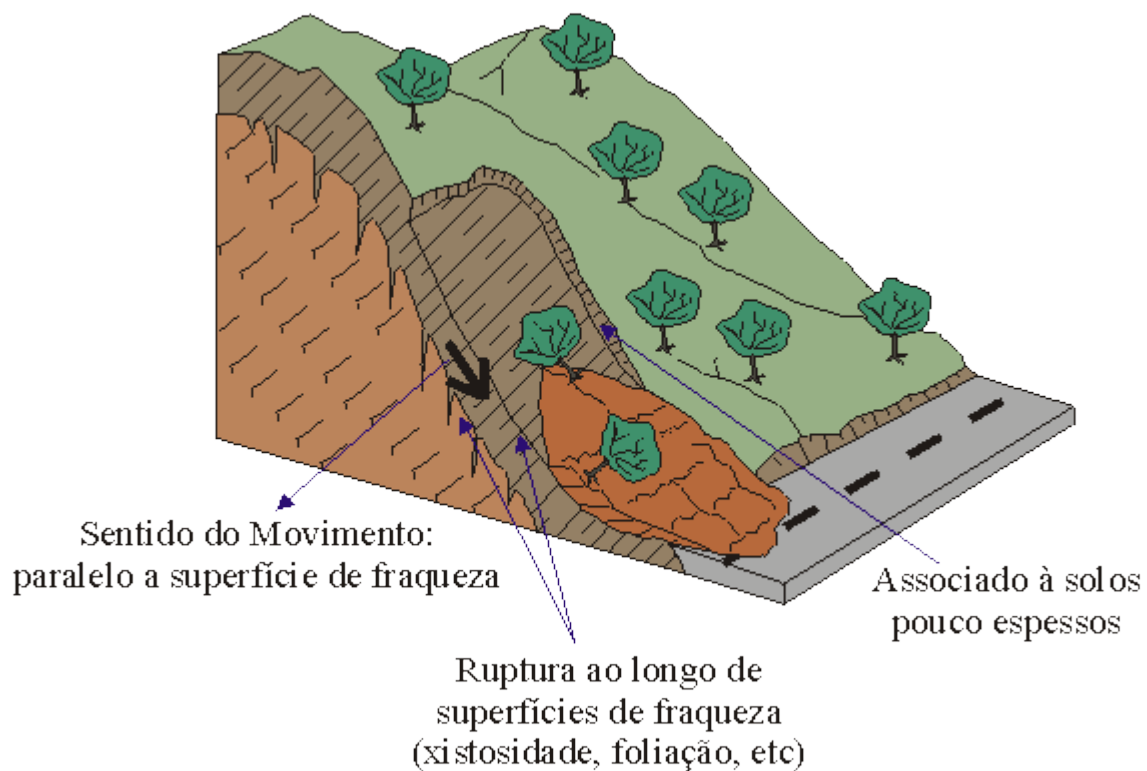


Figura 8 - Escorregamento translacional plano de solo.
Fonte: Levett (2015)

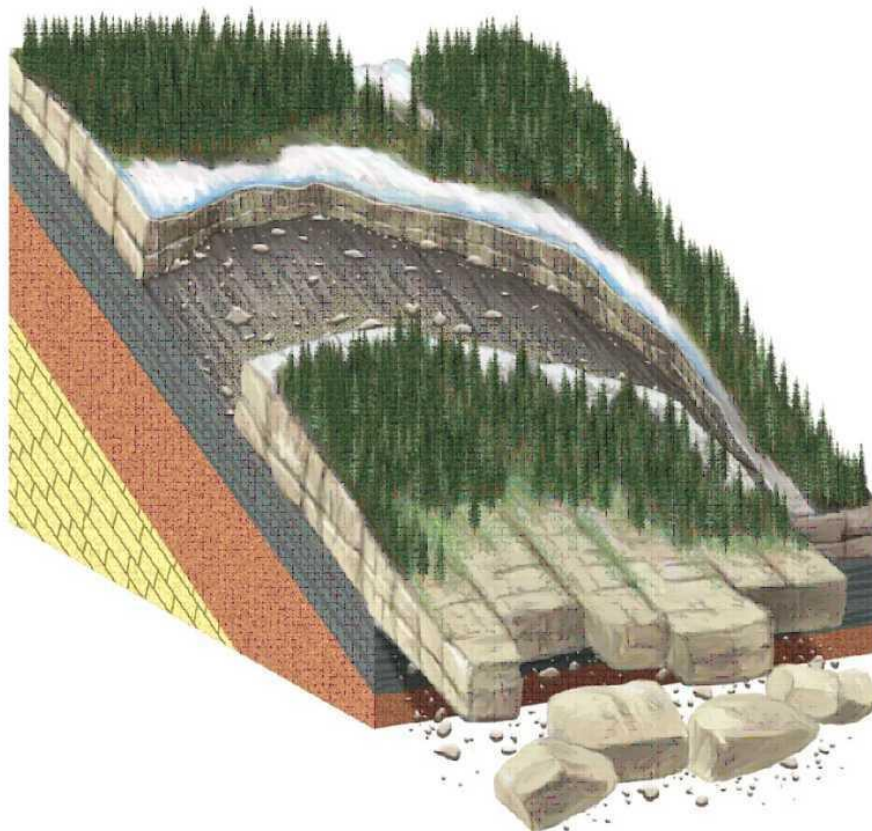


Figura 9 - Escorregamento translacional plano de rocha.
Fonte: Levett (2015)

2.4.4.3 Escorregamentos em Cunha

Segundo Tominaga (2015), os escorregamentos em cunha ocorrem mais restritamente em áreas que apresentam um relevo fortemente controlado por estruturas geológicas. Estão atrelados a maciços rochosos pouco e muito alterados que possuem estruturas planares desfavoráveis à estabilidade. Possuem ocorrência em taludes de corte ou que sofreram algum desconfinamento seja ele antrópico ou natural.

A Figura 10 apresenta o escorregamento em cunha, onde o movimento é condicionado por duas superfícies de ruptura, e a massa movimentada segue a direção onde se dá a intersecção dos planos de ruptura.

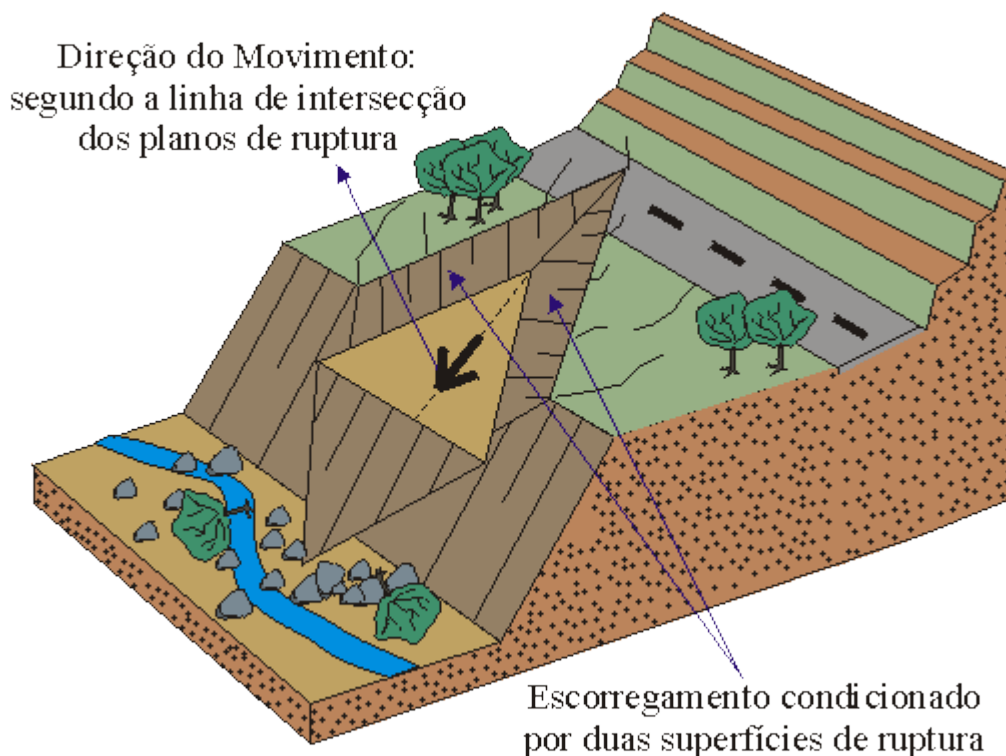


Figura 10 - Escorregamento em Cunha.
Fonte: Reis (2001)

2.4.5 Fatores condicionantes dos escorregamentos

Os processos de escorregamentos envolvem uma grande diversidade de eventos contínuos de causa e efeito, os quais resultam na ruptura dos materiais terrestres, o solo e a rocha, quando as forças de solicitações são maiores do que as forças de resistência dos terrenos (AUGUSTO FILHO, 1995).

Diversos aspectos podem atuar como condicionantes de um movimento de massa. Muitos possuem origem associada a processos geológicos e geomorfológicos os quais atuaram no passado e ainda atuam em um determinado local. Dentre esses fatores destacam-se as fraturas, falhas, foliações e bandamento composicional, descontinuidades no solo, morfologia da encostas e depósitos de encosta (GUERRA, 2009).

A instabilidade de um talude é deflagrada quando as tensões de cisalhamento se igualam à resistência ao cisalhamento. Essa condição pode ser atingida caso haja um aumento das tensões cisalhantes ou uma redução da resistência ao cisalhamento (GERSCOVICH, 2012)

As principais condicionantes dos escorregamentos, destacadas por Mota (2003) e Amaral (2015), são as mesmas em ambos os movimentos, sendo elas: as características de pluviosidades, inclinação amplitude e forma das encostas, regime das águas de superfície e subsuperfície e as características de uso e ocupação do solo, a cobertura vegetal e as formas de intervenção antrópica com cortes e aterros.

Gerscovich (2012) diz que em encostas naturais o movimento de massa induzido pela infiltração de águas de chuva é um fenômeno comum em regiões montanhosas tropicais, porém em outras análises constata-se que a infiltração de água através da superfície do solo não é suficiente para deflagrar a ruptura.

O Quadro 3 traz uma associação entre as ações de aumento de sollicitação e redução de resistência em uma encosta, os fatores e os fenômenos envolvidos.

A ocorrência de desmoronamentos de pequeno e grande portes é disseminada pelo crescimento urbano em áreas desfavoráveis e sem o planejamento adequado do uso do solo (TOMINAGA, 2015).

No processo de ocupação urbana as áreas de encostas devem possuir um controle mais rígido, conforme defende Mota (2003), evitando assim que esses locais se tornem problemáticos. Há a necessidade de uma política pública voltada a tais áreas, com o objetivo de identificá-las, protegendo tanto a cobertura vegetal natural quanto o sistema de drenagem de águas pluviais e, quando necessário, executando obras de estabilização.

Segundo Gerscovich (2012) e Augusto Filho (1995) a ação antrópica pode se manifestar tanto como indutora de aumento das tensões cisalhantes, assim como na redução da resistência ao cisalhamento, sendo a ação antrópica o mais importante agente modificador da dinâmica das encostas com o avanço das diversas formas de

uso e ocupação do solo em áreas naturalmente susceptíveis a movimentos de massa, acelerando estes processos.

Quadro 3 – Associações entre os fatores causadores de aumento de solicitações e resistências e os fenômenos envolvidos.

Ação	Fatores	Fenômenos Geológicos/Antrópicos
Aumento da solicitação	Remoção de massa	Erosão Escorregamentos Cortes
	Sobrecarga	Peso da água de chuva, neve, granizo, etc. Acúmulo natural de material (depósitos) Peso da vegetação Construção de estruturas, aterros, etc.
	Solicitações dinâmicas	Terremotos, ondas, vulcões, etc. Explosões, tráfego, sismos induzidos.
	Pressões laterais	Água em trincas Congelamento Material expansivo
Redução da resistência ao cisalhamento	Características do material	Características geomecânicas do material
	Mudanças ou fatores variáveis	Ação do intemperismo provocando alterações físico-químicas nos minerais originais, causando quebra das ligações e gerando novos minerais com menor resistência. Processos de deformação em decorrência de variações cíclicas de umedecimento e secagem, reduzindo a resistência. Variação das poropressões: elevação do lençol freático por mudanças no padrão natural de fluxo; infiltração da água em meios não saturados, causando redução das pressões de água negativas (sucção); geração de excesso de poropressão, como resultado de implantação de obras. Fluxo preferencial através de trincas ou juntas, acelerando os processos de infiltração.

Fonte: Gerscovish (2012)

São ações indutoras do aumento das tensões cisalhantes:

- ▶ Execução de cortes com altura e inclinação incorretas, superiores aos limites estabelecidos.
- ▶ Execução incorreta de aterros como geometria, compactação e fundação.
- ▶ Lançamento de lixo nas encostas e taludes.

São ações que reduzem a resistência ao cisalhamento:

- ▶ Remoção da cobertura vegetal.
- ▶ Lançamento e concentração de águas pluviais e/ou servidas.
- ▶ Vazamentos na rede de abastecimento, esgoto e presença de fossas.

2.4.5.1 Influência da vegetação

A vegetação pode produzir efeitos favoráveis ou desfavoráveis na estabilidade de uma encosta, sendo favoráveis quanto o vento sopra a favor da encosta (de baixo para cima) e desfavoráveis quanto o vento sopra contra a mesma (de cima para baixo). A vegetação protege o solo de diversos efeitos climáticos e suas raízes podem aumentar a resistência do solo no sistema solo/raiz. Dessa forma, o desmatamento promove mais condições favoráveis à instabilidade das encostas (GERSCOVICH, 2012).

Segundo Gerscovich (2012) a deposição da matéria orgânica sobre a superfície do talude absorve parte da água precipitada, o que auxilia na proteção do talude quanto aos efeitos da erosão superficial.






As copas, os caules e as raízes têm interferência no sistema de interação entre o solo e a vegetação. As copas protegem o solo, superficialmente, da ação dos agentes climáticos (intemperismo) e reduzem o volume total de água que incide sobre a superfície do talude (GERSCOVICH, 2012).

Os caules geram um caminho preferencial de escoamento de água concentrando a infiltração da água precipitada na região do caule e raízes e podem estar sujeitos a ação dos ventos, gerando uma tensão adicional que dependendo da direção do vento acaba por gerar instabilidade à encosta. Segundo Fiori & Carmignani (2009), a ação do vento pode derrubar as árvores e com isso favorecer a infiltração de água no solo.

O sistema radicular, por sua vez, pode atuar como reforço da estabilidade do talude conforme o diâmetro da raiz. Pode apresentar um caminho preferencial de infiltração, acelerando a variação da poropressão no solo, e ainda podem promover a redução de umidade do solo, a qual retorna para a atmosfera por evapotranspiração (GERSCOVICH, 2012).

O Quadro 4 apresenta a variação do diâmetro das raízes e sua relação com a estabilidade dos taludes.

Quadro 4 - Morfologia do sistema radicular.

Tipo	Característica	Função
	Tipo H: mais de 80% das raízes se desenvolvem até uma profundidade de cerca de 60 cm; muitas se estendem horizontalmente.	Indicadas para a estabilização do talude.
	Tipo V – H: o desenvolvimento máximo se dá a profundidades maiores, mas a maioria situa-se até 60 cm de profundidade; a raiz central é forte e as laterais crescem horizontalmente, com comprimentos longos.	
	Tipo R: o desenvolvimento máximo atinge grandes profundidades e somente 20% situam-se nos 60 cm iniciais; muitas raízes se estendem obliquamente e sua abrangência lateral é extensa.	
	Tipo V: semelhante ao tipo V – H, mas as raízes horizontais são curtas.	Benéfica para resistir ao vento.
	Tipo M: mais de 80% das raízes ocorrem na faixa dos 30 cm de profundidade, com extensão lateral pequena.	Aumento da resistência superficial do talude.

Fonte: Fiori & Carmignani (2009).

Segundo Tabalipa (2009), quando se considera a influência da vegetação na avaliação de estabilidade de encostas, devem ser quantificados alguns parâmetros como a força de arrasto do vento que incide sobre a copa das árvores quando o mesmo sopra no sentido da inclinação das vertentes, a resistência acrescida pelas raízes, o peso das árvores sobre o solo e a tensão suportada pelas raízes na resistência do solo à ruptura.

A Figura 11 apresenta a influência da vegetação no talude que exerce um peso sobre o mesmo, porém a tensão das raízes contribui na coesão do solo. A força tirante das árvores pode trabalhar a favor da encosta sempre que o vento estiver no sentido a favor da encosta, ou de forma contra a encostaria quando estiver no sentido oposto.

A influência dos ventos incididos nas copas das árvores foi estudada por Tabalipa (2009), e adotada a atuação do vento como o pior caso possível, quando o vento sopra no sentido contrário da inclinação da encosta, essa força deve ser adicionada às forças que são favoráveis ao movimento sempre que a velocidade dos

ventos for igual ou maior que 40 km/h, conforme valores de força de arrasto apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores atribuídos para a força de arrasto do vento atuando na copa das árvores no sentido contra a encosta.

Tipo de vegetação	σ_{ve} (kgf)
Floresta	70 km/h – 0,6270
	60 km/h – 0,4428
	56 km/h – 0,3857
	52 km/h – 0,3326
	48 km/h – 0,2834
	42 km/h – 0,2170
	40 km/h – 0,1968
	35 km/h – 0,1507
Capoeira	70 km/h – 0,6270
	60 km/h – 0,4428
	56 km/h – 0,3857
	52 km/h – 0,3326
	48 km/h – 0,2834
	42 km/h – 0,2170
	40 km/h – 0,1968
	35 km/h – 0,1507

Fonte: Tabalipa (2009).

A vegetação aumenta o peso sobre o talude, com uma variação de 2,5 kPa a 5 kPa (FIORI & CARMIGNANI, 2009). E o sistema radicular apresenta em geral um ângulo médio de 45°, conforme Tabalipa (2009) e Kozciak (2005).

2.4.5.2 A água no solo

A água no solo pode ter diversas origens, sendo a principal a água advinda da precipitação. A água é um dos fatores que mais interfere na estabilidade dos taludes. A sua pressão pode ser positiva ou negativa e variar conforme a existência ou não de movimentação (GERSCOVICH, 2012).

Augusto Filho (1995) traz que as chuvas atuam como o principal agente deflagrador dos escorregamentos devido a dinâmica climática e geológica do Brasil. Sendo que os grandes acidentes relacionados a movimentos de massa estão associados a períodos chuvosos. Dessa forma, os índices pluviométricos críticos para a instabilização do solo e deflagração do movimento dependem do tipo de movimento.

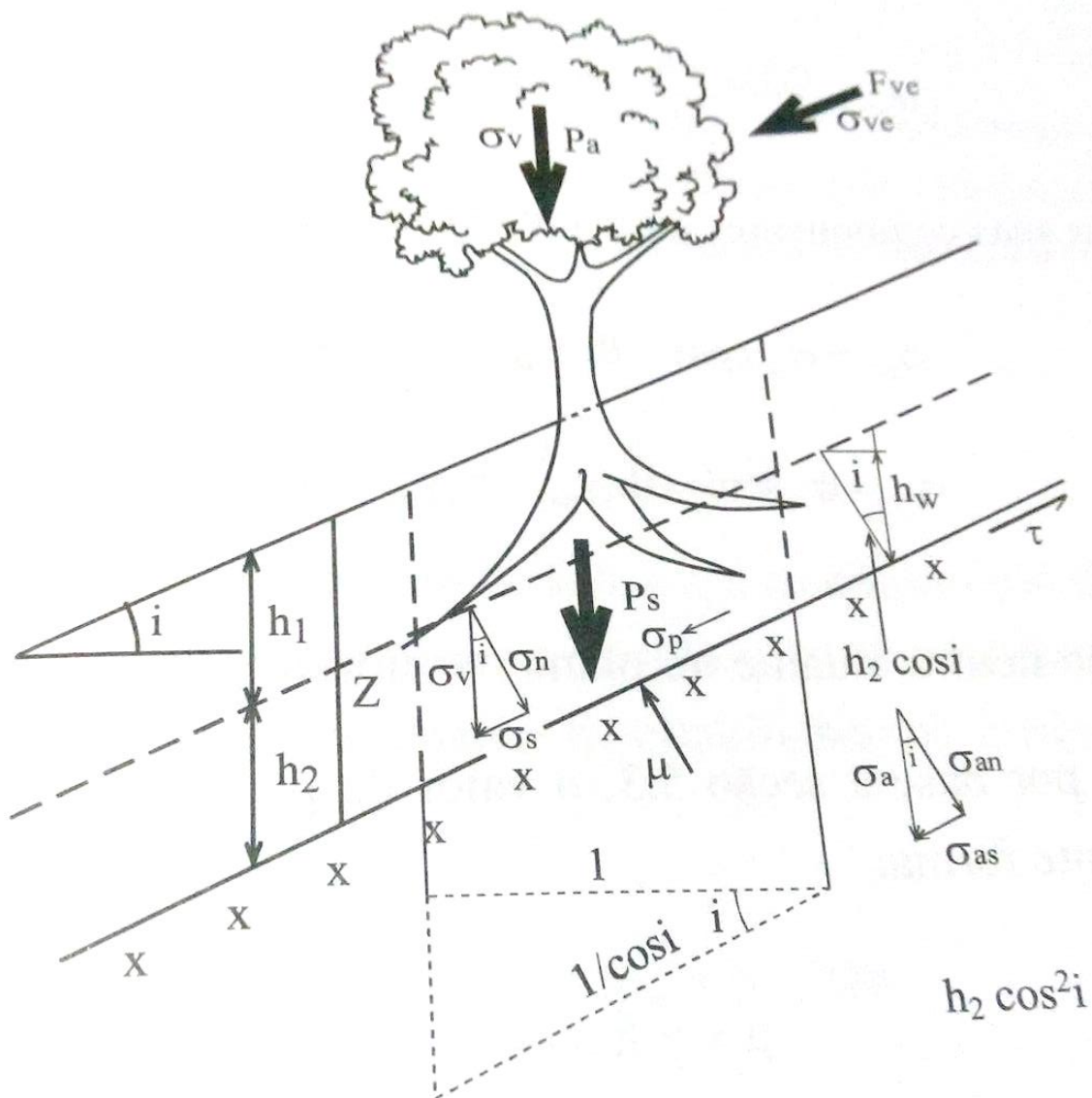


Figura 11 - Influência da Vegetação na estabilidade de taludes
Fonte: Fiori & Carmignani (2009).

Os escorregamentos induzidos são deflagrados por índices menores do que os escorregamentos naturais, já as corridas de massa necessitam de índices pluviométricos bem superiores para ocorrerem. Os escorregamentos em rocha são condicionados por planos de fraqueza e são mais susceptíveis a precipitações concentradas, sendo estes menos afetados por índices pluviométricos acumulados em dias anteriores ao evento (AUGUSTO FILHO, 1995).

Segundo Augusto Filho (1995), as chuvas contribuem de forma direta para a instabilidade das encostas através dos seguintes mecanismos:

- ▶ Alteração do nível de água no solo gerando forças de percolação;

- ▶ Preenchimento temporário de falhas e fraturas gerando pressão hidrostática;
- ▶ Formação de frentes de saturação sem a formação de solos não saturados, reduzindo a resistência natural dos solos ocasionada pela perda da coesão aparente entre as partículas.

A infiltração de água no solo é o processo pelo qual se dá a entrada de água no solo. Quando uma determinada quantidade de água chega à superfície não saturada inicia-se o processo de infiltração.

O fluxo de infiltração varia conforme as condições de umidade da região não saturada do solo. Em alguns casos pode ocorrer a alteração da altura da superfície freática, ou a geração de um fluxo de água subsuperficial (GERSCOVICH, 2012).

A capacidade máxima de água que um solo consegue absorver em uma determinada condição por unidade de área horizontal é tida como a vazão máxima ou capacidade de infiltração. Essa capacidade de infiltração é verificada quando a intensidade precipitada excede a capacidade do solo em absorver a água, tendo então a precipitação excedente e esse volume excedente escoar superficialmente, movimento conhecido como *runoff* (PINTO, 2011).

Segundo Gerscovich (2012), a infiltração varia conforme a capacidade de infiltração do solo, a condutividade hidráulica e a intensidade da chuva. Já Pinto (2011) destaca que a variação do índice de infiltração em um solo se dá pelo tipo do solo, a altura de retenção superficial, a altura da camada saturada, o grau de umidade do solo, a ação da precipitação sobre o solo, o grau de compactação apresentado, a macroestrutura do terreno, a cobertura vegetal presente na área, a temperatura e a presença de ar no solo interferindo em seus vazios.

Assim sendo, Gerscovich (2012) ainda destaca que quando a inclinação do talude não for significativa e sempre que a precipitação for inferior à taxa de infiltração de um solo, tal infiltração ocorrerá continuamente. Já quando a taxa de precipitação superar a infiltrabilidade haverá acúmulo de água na superfície que escoará superficialmente.

Quanto às pressões ocorridas no solo devido à infiltração de água, Gerscovich (2012) diz que as pressões positivas de água tendem a afastar as partículas sólidas, enquanto as pressões negativas atuam com atração entre as

partículas. Dessa forma, a região não saturada do solo possui uma resistência extra devido à sucção (poropressão negativa), que varia com as condições ambientais e o tempo. A sucção aumenta durante as épocas de seca e se reduz nas épocas chuvosas.

Pinto (2011) traz como métodos para determinação da capacidade de infiltração de um solo os Infiltrômetros, também conhecidos como simuladores de chuva, podendo ser Infiltrômetro com aplicação de água por inundação ou Infiltrômetro com aplicação de água por aspersão.

Os infiltrômetros são tubos cilíndricos curtos, fabricados com metal possuindo diâmetros que variam entre 200 a 900 mm, os quais são cravados verticalmente no solo de modo a restar uma altura livre sobre eles. Podem ainda ser utilizados um ou dois tubos concêntricos, onde o segundo tubo (externo) tem como função atenuar o efeito da dispersão da água do tubo interno e deve-se manter uma camada de água com espessura entre 5 e 10 mm nos dois tubos (PINTO, 2011).

2.5 PROJETOS DE ESTABILIDADE

Um projeto de estabilidade tem como objetivo avaliar a possibilidade da ocorrência de um movimento de massa do solo presente no talude natural ou construído. As análises, segundo Gerscovich (2012), são realizadas comparando-se as tensões cisalhantes mobilizadas com a resistência ao cisalhamento, definindo-se então um fator de segurança (F_s) como:

$$F_s = \frac{\tau_f}{\tau_{mob}} \quad (1)$$

Onde:

τ_f – Forças Resistentes;

τ_{mob} – Forças Mobilizantes ou Favoráveis as movimentações.

Tal forma de análise é denominada determinística, haja vista ser estabelecido um determinado valor para o F_s , considerando-se um valor mínimo a ser atingido e variando em função do tipo de obra e sua vida útil. Dentre os métodos determinísticos, tem-se o método de análise de tensões e o método de equilíbrio limite.

O método de análise de tensões está baseado nos métodos de elementos finitos (MEF) ou método das diferenças finitas (MDF). Essa metodologia possui como vantagem a disponibilidade de programas computacionais no mercado os quais permitem a incorporação de diversas características dos materiais envolvidos como não linearidade, não homogeneidade. Dessa forma, as análises das condições de estabilidade podem ser feitas mediante a comparação das tensões cisalhantes mobilizadas com a resistência ao cisalhamento, sendo possível estabelecer áreas rompidas, níveis de tensão de interesse e conhecer a magnitude das deformações (GERSCOVICH, 2012).

O método do equilíbrio limite consiste na determinação do equilíbrio de uma massa de solo ativa e pode ter uma delimitação qualquer. Esse método assume que todos os elementos de uma superfície atingem simultaneamente a mesma condição, de $F_s = 1$. Assume ainda que a superfície de ruptura tem forma pré-determinada e o solo acima dessa superfície é considerado um corpo livre, o equilíbrio é calculado por equações estáticas, o fator de segurança é admitido como constante em toda a superfície, a tensão cisalhante mobilizada ao longo da superfície de ruptura é determinada de forma que a massa esteja em equilíbrio limite, a superfície potencial de ruptura é associada ao F_s mínimo. Essa metodologia apresenta como vantagem uma grande precisão dos resultados e simplicidade de aplicação (GERSCOVICH, 2012).

Segundo Augusto Filho (1995), o princípio básico de análise das cartas de susceptibilidade é a divisão da área em reticulados de malhas variáveis, e caracterização de cada célula resultante com diferentes atributos, os quais são tratados estatisticamente e suas contribuições para a deflagração dos escorregamentos são determinadas.

A carta de susceptibilidade é gerada a partir da delimitação de áreas homogêneas quanto a tipologia, susceptibilidade e raio de alcance dos movimentos de massa em uma determinada região, consideram-se as inter-relações entre a dinâmica dos processos e as variadas formas de uso e ocupação do solo (AUGUSTO FILHO, 1995).

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1 LOCALIZAÇÃO

O município de Francisco Beltrão possui área total de 735,111 km² e área urbana de 49,525 km². Está localizado no Sudoeste do estado do Paraná, com coordenadas geográficas dos pontos extremos sendo:

Latitude	Longitude
26° 07' 23,90" S	53° 05' 09,01" W
26° 01' 27,25" S	53° 01' 19,44" W

A cidade encontra-se a aproximadamente 508 km da capital, Curitiba. A ligação de Francisco Beltrão com a capital é realizada através da rodovia federal BR – 372 (ligação principal), rodovia federal BR – 277 e rodovia federal BR – 280.

São municípios limítrofes de Francisco Beltrão os municípios de Ampére, Pinhal de São Bento, Manfrinópolis, Flor da Serra do Sul, Marmeleiro, Renascença, Bom Sucesso do Sul, Itapejara d'Oeste. A Figura 12 mostra a localização da Cidade de Francisco Beltrão no estado do Paraná.

A população da cidade, segundo estimativa do IBGE para o ano de 2015, é de 86.499 habitantes. Desses, 73.905 habitantes, 85,44%, compõem a população urbana de Francisco Beltrão.



Figura 12 - Localização Município de Francisco Beltrão na mesorregião e no Estado do Paraná.
Fonte: Daleffe (2014).

A área de estudo concentra-se na área delimitada pelo perímetro urbano do município, apresentado pela Figura 13.

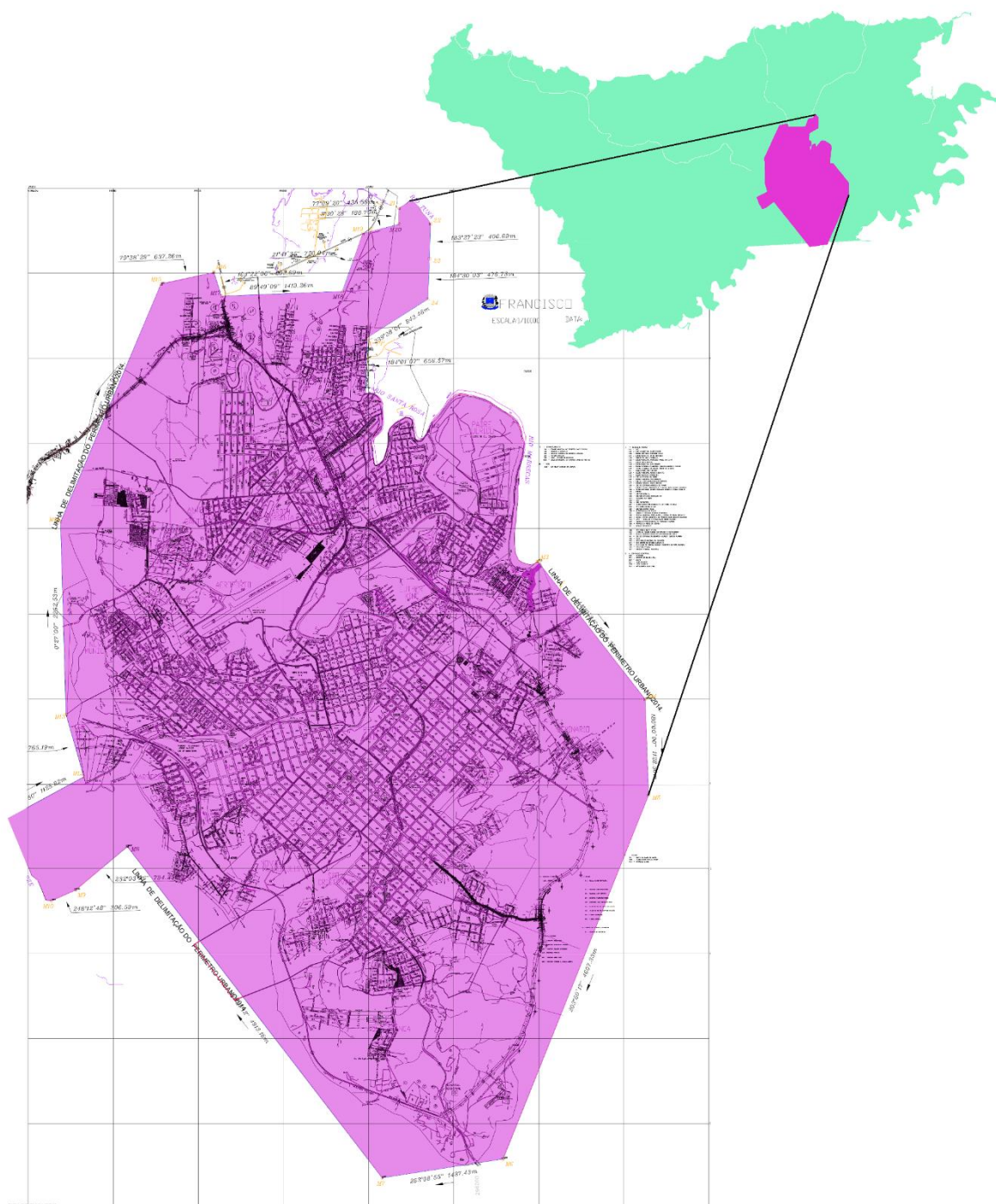


Figura 13 - Representação do Perímetro Urbano da cidade de Francisco Beltrão - PR.

3.2 PRECIPITAÇÃO

Segundo o Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR) a região Sudoeste do estado do Paraná não possui estação seca definida, registrando os maiores índices pluviométricos do interior do estado, ficando entre 1600 a 2000 mm anuais, como é apresentado pela Figura 14, variando muito devido a eventos como o El Niño.

As chuvas são bem distribuídas ao longo do ano com maior incidência na primavera e no outono. Apesar da boa regularidade pluviométrica, secas e períodos de pouca precipitação são registrados periodicamente, causando elevadas perdas em produtividade na agricultura (IAPAR, 2008).

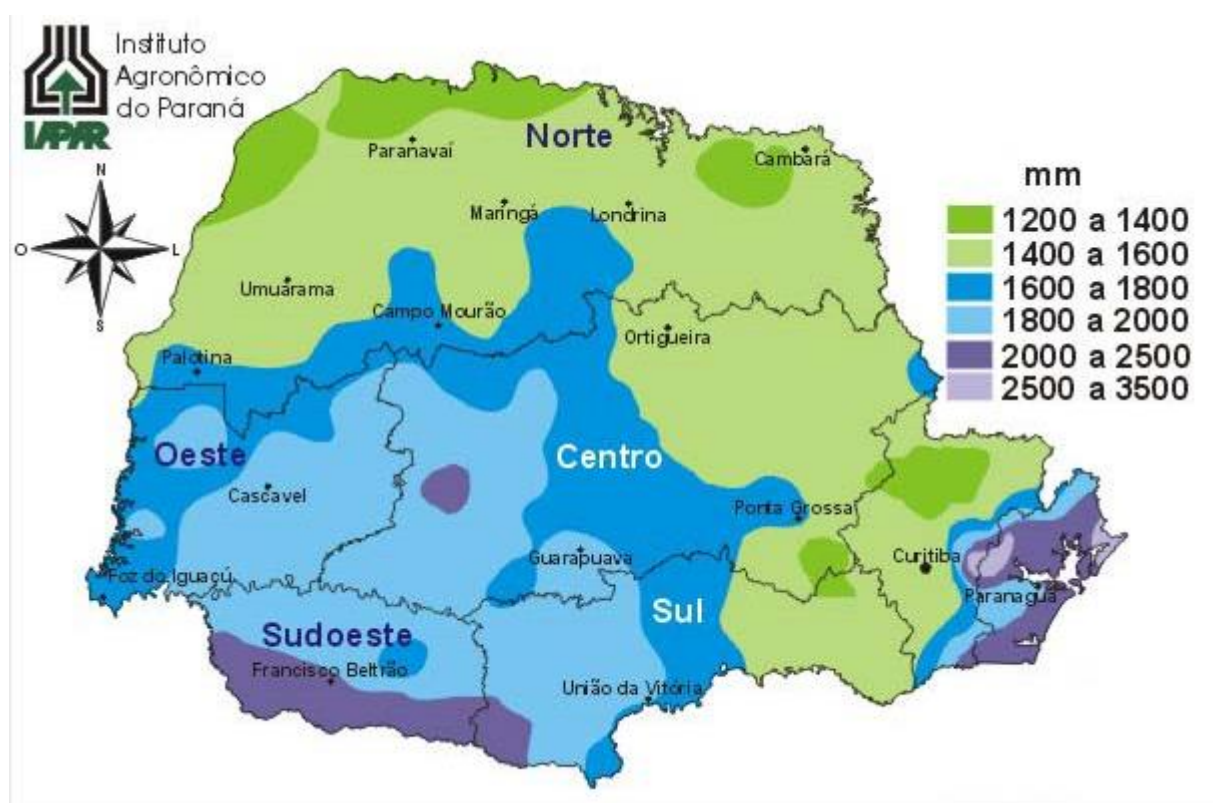


Figura 14 – Precipitação Média Anual para o estado do Paraná.

Fonte: IAPAR (2016)

Os dados de pluviosidade mensal e total acumulado anual do período de 1979 a 2015 são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Dados mensais de pluviosidade acumulada para a cidade de Francisco Beltrão - PR durante o período de 1979 à 2015.

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Ju	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
1979	38,2	164,2	53,0	225,1	470,4	23,5	192,7	202,6	195,3	482,6	246,3	244,4	2.538,30
1980	276,8	178,9	98,2	50,6	158,0	49,6	101,2	159,3	108,6	168,9	81,6	146,5	1.578,20
1981	120,8	172,0	100,0	244,6	23,6	139,9	10,0	177,0	94,9	137,7	267,6	388,6	1.876,70
1982	49,3	249,4	128,5	39,1	128,4	396,9	296,6	176,1	51,2	264,6	540,6	183,1	2.503,80
1983	91,4	259,6	357,7	265,0	614,2	209,5	667,7	27,6	262,2	179,8	220,0	170,2	3.324,90
1984	262,2	218,5	216,5	136,8	151,9	291,2	81,4	225,1	129,5	149,1	205,3	209,4	2.276,90
1985	39,2	228,3	166,8	140,6	87,5	36,5	116,5	64,9	118,1	129,1	176,8	44,2	1.348,50
1986	188,7	169,3	178,0	194,9	303,5	41,4	91,6	129,8	268,0	127,8	144,6	69,9	1.907,50
1987	177,2	190,7	84,4	345,8	340,2	132,4	120,4	77,8	43,8	197,0	226,2	154,3	2.090,20
1988	155,5	62,8	102,6	219,8	205,5	189,4	3,9	9,1	30,0	203,9	29,8	195,6	1.407,90
1989	391,5	243,0	131,3	131,3	111,5	118,9	132,9	145,5	275,3	246,4	78,4	80,7	2.086,70
1990	473,1	158,7	108,1	356,2	274,4	302,9	191,6	242,3	279,0	262,2	123,8	217,2	2.989,50
1991	112,6	73,0	58,0	236,4	42,9	387,6	39,7	51,8	120,0	157,3	125,8	256,1	1.661,20
1992	40,9	211,1	212,7	124,6	386,1	270,5	124,0	153,5	121,4	229,7	214,1	84,0	2.172,60
1993	243,2	81,5	75,0	51,2	339,0	220,5	179,6	18,5	263,6	209,5	104,8	124,8	1.911,20
1994	121,5	240,8	106,1	113,9	29,0	208,3	209,5	20,4	139,1	257,1	262,0	309,0	2.016,70
1995	185,9	110,2	165,8	170,1	15,1	175,5	90,1	35,0	219,4	240,3	99,3	92,2	1.598,90
1996	306,8	376,8	304,9	65,6	46,9	207,4	139,9	97,0	240,6	465,1	170,5	284,8	2.706,30
1997	143,6	256,7	42,1	86,3	271,2	372,1	126,0	232,4	213,2	414,0	258,0	140,2	2.555,8
1998	202,6	299,5	315,6	439,5	208,8	59,2	124,5	293,7	339,8	383,4	35,1	165,7	2.867,4
1999	192,7	227,7	50,9	209,4	118,9	182,7	112,2	16,2	100,7	311,8	52,1	126,6	1.701,9
2000	210,1	227,6	164,5	138,0	124,5	114,8	112,3	111,7	220,0	294,9	127,0	114,4	1.959,8
2001	203,1	237,6	141,8	249,4	125,7	147,4	137,3	52,9	205,8	199,8	156,6	138,2	1.995,6
2002	282,5	61,2	164,6	70,9	346,7	76,1	81,0	142,0	169,1	410,6	365,2	250,9	2.420,8
2003	163,2	280,1	124,0	98,0	122,8	106,7	78,3	43,3	135,1	230,5	202,6	268,2	1.852,8
2004	179,3	32,9	132,5	96,9	239,4	136,2	163,5	45,7	122,5	363,2	186,6	79,0	1.777,7
2005	169,4	9,8	62,1	219,9	343,1	291,8	118,3	125,6	245,6	393,6	46,9	22,4	2.048,5
2006	167,1	61,9	205,3	149,2	21,8	75,1	80,6	116,6	156,2	187,5	123,1	246,8	1.591,2
2007	315,7	193,0	50,4	321,4	257,1	19,6	159,7	28,8	50,3	201,6	287,3	161,3	2.046,2
2008	104,7	73,3	50,0	265,3	73,9	172,3	49,3	107,5	124,1	295,1	135,1	65,2	1.515,8
2009	218,6	57,3	64,9	63,8	239,4	114,0	158,4	123,5	240,6	403,2	127,2	120,9	1.931,8
2010	258,5	112,5	237,3	390,6	179,7	69,7	120,4	52,3	45,3	240,8	82,9	300,1	2.090,1
2011	246,6	232,0	96,2	124,2	15,8	142,2	207,2	275,0	200,2	313,6	155,8	60,4	2.069,2
2012	124,2	309,8	46,0	301,8	77,0	145,6	112,8	0,8	75,0	248,6	21,4	321,9	1.784,9
2013	181,8	245,4	354,6	139,3	257,2	384,1	93,7	146,8	207,3	222,6	130,5	194,9	2.558,2
2014	167,0	98,4	301,8	311,3	114,9	434,4	149,9	54,6	435,6	94,3	216,5	182,9	2.561,6
2015	327,7	151,1	176,3	55,0	241,9	155,6	318,2	75,2	111,2	133,0	298,4	481,6	2.525,2

Fonte: Adaptado de Arquivo Digital da Defesa Civil – Francisco Beltrão.

3.3 TEMPERATURA

O Sudoeste do estado do Paraná está totalmente situado na região de clima temperado úmido com verão quente, o Cfa, conforme é demonstrado na Figura 15. Nesse tipo climático tem-se a característica de clima úmido com ocorrência de precipitação em todos os meses do ano e inexistência de estação seca definida. A temperatura média no mês mais quente é superior a 22°C e a média do mês mais frio é inferior a 10°C, se apresentando com invernos brandos e verões quentes, podendo ocorrer gradientes de até 5°C ao dia.

A amplitude térmica anual média é de 9°C, sendo uma das maiores do estado, o que faz com que os invernos sejam mais frios e os verões mais quentes. A Tabela 5 apresenta os dados históricos de temperaturas máximas e mínimas, bem como as médias máximas e mínimas de temperatura histórica para a cidade de Francisco Beltrão, com observações do ano de 1974 ao ano de 2015.

A temperatura média anual para a cidade de Francisco Beltrão, segundo o IAPAR, apresentado no mapa de temperaturas, na Figura 16, encontra-se entre 19 e 20°C.

Tabela 5 - Dados climatológicos para Francisco Beltrão de 1974 a 2015.

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Temperatura máxima registrada (°C)	36,5	37,6	37,4	33,8	31,9	31,0	31,0	34,0	35,7	36,4	38,3	38,2
Temperatura máxima média (°C)	30,2	29,9	29,2	26,1	22,3	20,8	20,8	23,4	24,4	26,8	28,4	29,7
Temperatura mínima média (°C)	18,4	18,3	17,0	14,1	10,7	9,4	9,4	10,3	11,9	14,6	15,9	17,7
Temperatura mínima registrada (°C)	8,0	8,7	3,4	1,0	-0,2	-4,1	-5,0	-2,4	-0,4	3,3	4,8	5,6

Fonte: IAPAR (2016)



Figura 15 - Classificação Climática do Paraná.
Fonte: IAPAR (2016)

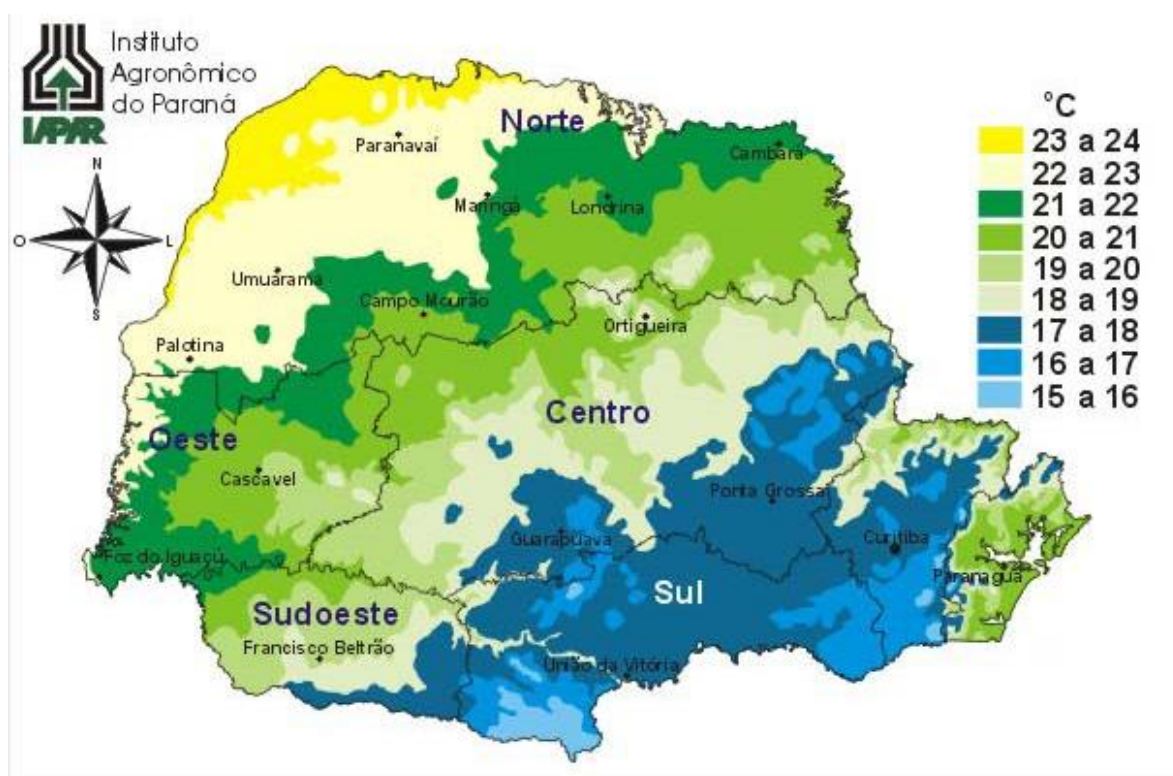


Figura 16 - Temperatura média anual do Paraná
Fonte: IAPAR (2016)

3.4 EVAPOTRANSPIRAÇÃO

A evapotranspiração máxima ocorre nos meses de janeiro e dezembro (média de 116,8 mm mensais) e a mínima ocorre nos meses de junho e julho (média de 37,75 mm mensais).

Pode-se observar, na Figura 17, que a evapotranspiração média anual para a cidade de Francisco Beltrão encontra-se na faixa entre 1000 a 1100 mm anuais.

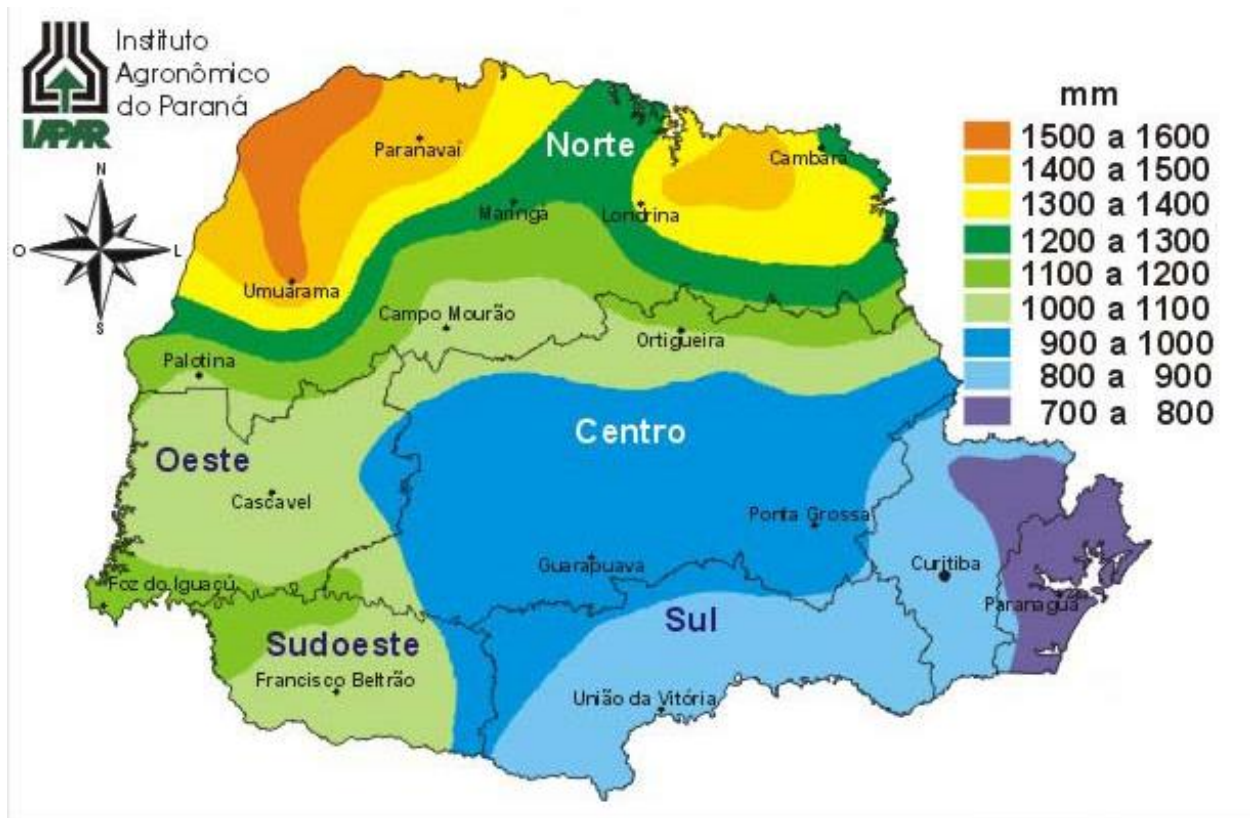


Figura 17 - Evapotranspiração Anual para o estado do Paraná.
Fonte: IAPAR (2016)

3.5 GEOLOGIA

O Sudoeste do Paraná está inserido na bacia sedimentar do Paraná, na parte centro oriental, no Terceiro Planalto ou Planalto de Guarapuava. Esta região se caracteriza por um derrame basáltico antigo que ocupa quase 75% do território paranaense, recobrando-o por rochas vulcânicas.

Segundo o Mapa Hidrogeológico da América do Sul, elaborado pela UNESCO & CPRM (1996), a bacia sedimentar do Paraná cobre uma área aproximada de 1.295.000 km², sendo que desses 1.000.000 km² estão localizados no Brasil e o restante se divide entre Argentina, Uruguai e Paraguai. O mesmo mapa apresenta a

geologia da região Sudoeste do Paraná como rochas basálticas do grupo São Bento, formação Serra Geral.

Um único derrame de rocha basáltica pode atingir 30 a 40 metros de espessura e compõem-se de três partes principais: base, central e topo. A base constitui a zona vítrea e vesicular, que se altera facilmente. A parte central é a mais espessa e formada por basalto maciço, porém é recortado por numerosas fraturas verticais e horizontais. O topo de um derrame apresenta os famosos “olhos de sapo”, pois ao se resfriarem, os gases concentram-se na superfície, formando vesículas. O padrão de fraturamento e as zonas vesiculares do topo dos derrames funcionam como canais alimentando os aquíferos subterrâneos (MINEROPAR, 2006).

Segundo a Mineropar (2006), em Francisco Beltrão, o derrame basáltico apresenta pouca alteração, com uma camada de solo rasa e uma espessa camada de rocha e matacões com coloração cinza-escuro, textura fina e fraturamento vertical.

Os basaltos da Formação Serra Geral cobrem todo o território do município de Francisco Beltrão, ocorrendo diferenciações de natureza mais ácida, representadas por basaltos pórfiros, dacitos, riódacitos e riolitos. As rochas dessa formação têm ampla potencialidade de exploração como saibro, brita, pedras de talhe, cantaria e revestimento (MINEROPAR, 2006).

Tomazoni (2003) esclarece sobre a composição mineral essencial dos basaltos encontrados na região:

São minerais essenciais dos basaltos os feldspatos álcali-cálcicos e piroxênios, ambos totalizando de 70 a 80% do volume da rocha. A maioria dos plagioclásios está na faixa da andesina, ocorrendo também os feldspatos potássicos, geralmente microcristalinos, constituindo até 10% da rocha. Dos piroxênios destacam-se as pigeonitas e os clinopiroxênios sub-cálcicos, sendo que as augitas e ferroaugitas estão nos equivalentes intrusivos. Os opacos encontrados são as magnetitas. É comum a existência de basaltos amigdalóides, às vezes preenchidos por quartzo, variedades microcristalinas ou hidratadas de sílica, calcitas e zeólitas.

Tomazoni (2003), destaca que no sudoeste do estado do Paraná a estrutura geológica encontrada está caracterizada como pertencente à província geológica da Bacia do Paraná Central – BPC, onde tem-se a presença de rochas básicas a intermediárias efusivas e vulcânicas. Essa estrutura rochosa foi formada por fluxos de lavas basálticas os quais se consolidaram como basaltos teleíticos com teor de óxido de titânio baixo (menos de 2% do peso total).

Na cidade de Francisco Beltrão, conforme observações em cavas de minas, elas apresentam profundidade entre 16 e 36 metros de basalto maciço, sendo que após essa profundidade são encontrados “olhos de sapo”.

3.6 PEDOLOGIA

A Mineropar (2002) traçou um estudo na cidade de Francisco Beltrão e destacou que a mesma possui um intemperismo pouco variável tendo um predomínio do Latossolo Roxo (classificação atual Latossolo Vermelho distroférico), bastante profundo, nas porções mais planas do relevo, e a terra roxa estruturada (classificação atual Nitossolo Vermelho distroférico), nas encostas com declividade acentuada, sendo que em terrenos íngremes e escarpados são abundantes os afloramentos rochosos com fina camada de solo em início de formação, com grande quantidade de pedras, sendo estes solos litólicos (classificação atual Neossolo litólico). Desta forma, tais solos apresentam comportamento como suporte a obras civis, sendo base para edificação destas, e como fontes de matérias-primas.

Através da classificação da EMBRAPA, associaram-se os tipos de solos existentes na área definindo-os como sendo das classes Latossolo, Nitossolo, Cambissolo e Neossolo.

Latossolo – Solos maduros, com horizonte B bem desenvolvido e composição argilosa, sua principal característica é apresentar grande espessura, com geralmente 3 metros, podendo ultrapassar os 10 metros em regiões de relevo plano, típicos em relevos com declividade de até 15%. Esses solos possuem alta resistência ao cisalhamento, porém não suportam fundações rasas para obras maiores e se recomenda utilizar fundações profundas preferencialmente até a formação rochosa (MINEROPAR, 2002).

Nitossolo – Também conhecido como terra roxa estruturada, se desenvolve em relevos mais ondulados, com declividades de 5% a 20% e em alguns casos acima de 20%. O seu comportamento quanto a obras civis não é diferente do latossolo.

Chernossolo – São solos minerais, não hidromórficos, de profundidade média, são moderados e bem drenados. Apresentam sequência de horizontes A, B e C, com transição normalmente clara. Esses solos são evoluídos, mas não o suficiente para decompor totalmente minerais primários de fácil intempérie, como feldspato, mica, augita e outros (VIEIRA & VIEIRA, 1983 e LARACH *et al.*, 1984). Possui uma

profundidade razoavelmente rasa e elevada reatividade das argilas sendo um solo expansível por efeito da água, não possuindo condições favoráveis às obras civis (MINEROPAR, 2002).

Neossolo – São solos pouco desenvolvidos, não hidromórficos, geralmente com pouca espessura até a rocha sólida, que pode variar de 20 a 80 cm. Apresenta sequência de horizontes A/C/R e o horizonte A possui espessura entre 15 e 40 cm. Abaixo do horizonte A ocorrem calhaus e pedras. A proximidade do material de origem caracteriza um constante processo de rejuvenescimento (MINEROPAR, 2002). São comuns em encostas na região sudoeste do estado principalmente em relevo montanhoso e escarpado, com declividades acima de 20% e solos com grande quantidade de cascalhos, blocos e matacões. Devido a sua pequena profundidade, a presença de pedras na superfície e a alta reatividade das argilas, que o torna expansível por efeito da água, possui condições desfavoráveis às obras civis (MINEROPAR, 2002).

3.7 GEOMORFOLOGIA

O município de Francisco Beltrão está localizado dentro da unidade morfoescultural denominada Planalto de Francisco Beltrão, segundo o Atlas Geomorfológico do Paraná (MINEROPAR, 2006), apresentando uma área de ocupação de 2.414,40 km². O relevo composto por rochas da Formação Serra Geral apresenta um gradiente de 520 metros com altitudes variando entre 500 e 1020 m, formado por topos alongados, vertentes convexas e vales em “V” aberto.

Segundo MINEROPAR (2002), a região é caracterizada por relevos ondulados e até montanhoso a escarpado nas encostas de maiores elevações, formando um relevo típico de platôs elevados com áreas planas limitadas por quebras de relevo com desníveis acentuados.

3.8 HISTÓRICO DE MOVIMENTOS DE MASSA NA ÁREA DE ESTUDO

A cidade de Francisco Beltrão possui o registro de nove movimentos de massa realizados pela Coordenadoria Municipal de Prevenção e Defesa Civil (COMPDEC). Em visitas em campo foram verificados mais quatro pontos de

movimentação de massa, os quais não haviam registros junto a Defesa Civil municipal, dentre esses, três se consistem em rastejos, e um como quedas de blocos.

A distribuição dos pontos no perímetro urbano é apresentada na Figura 18, por ordem cronológica, onde o Ponto 01 pois o registro apresenta apenas a ocorrência do fato sem mais especificações. São apresentados dois locais como Ponto 05, pois na mesma data ocorrem dois eventos simultâneos em locais diferentes.

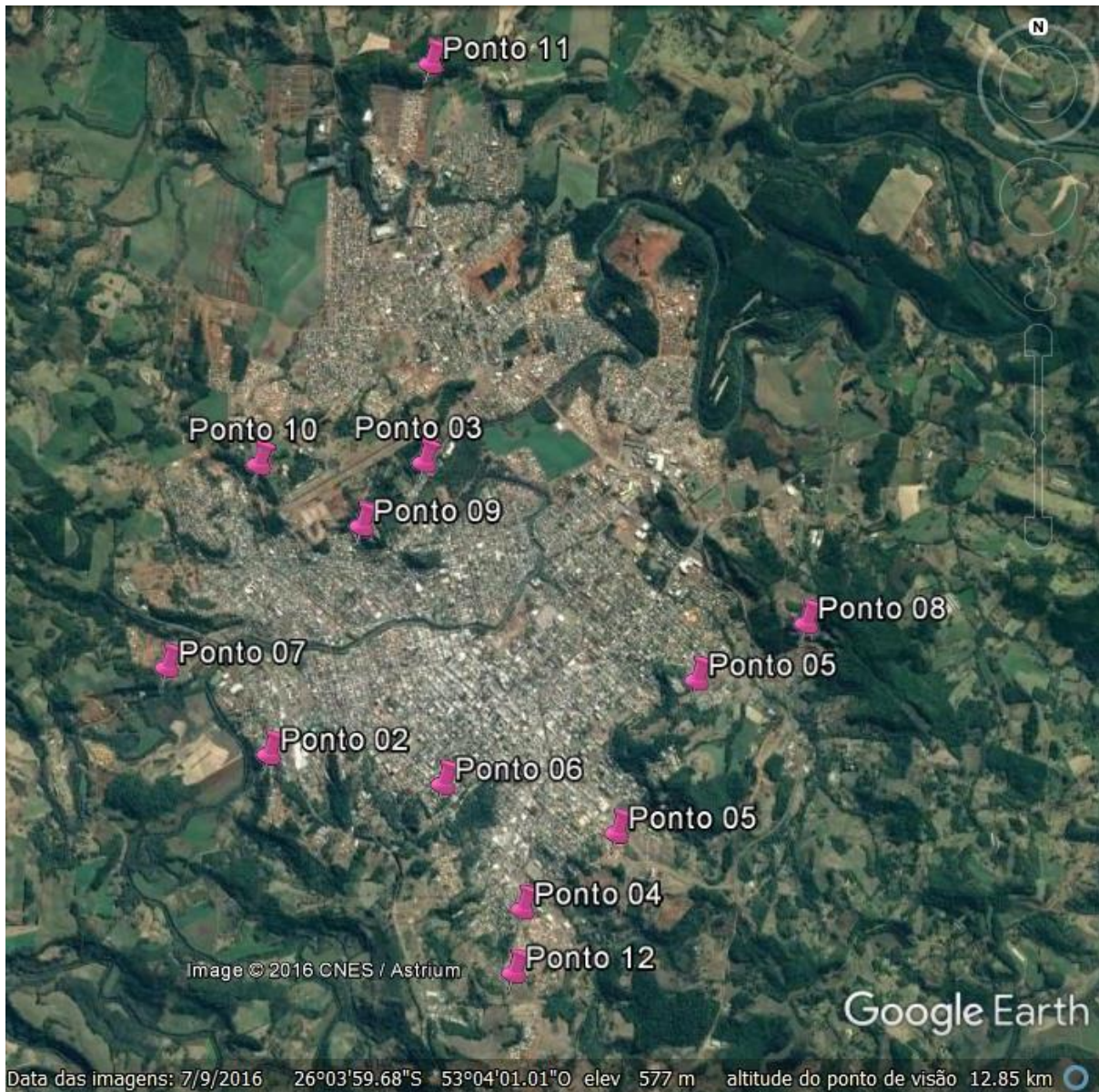


Figura 18 – Localização dos pontos de registro de movimentos de massa na cidade de Francisco Beltrão – PR.

O primeiro movimento de massa registrado pela defesa civil da cidade ocorreu em 07 de fevereiro de 2007, envolvendo a classe de escorregamento/deslizamento no perímetro urbano da cidade, o qual não possui maior detalhamento de local nem mesmo arquivos fotográficos.

O segundo evento registrado (ponto 02 da Figura 18) ocorreu no ano de 2012, envolvendo uma fratura do solo de aproximadamente 15 cm após as movimentações de terraplenagem no terreno vizinho localizado abaixo do local onde seria implantado um loteamento. Essa situação ainda é discutida por profissionais da área, visando estabelecer se a fratura foi originária dos desmontes.

O terceiro evento registrado se consistiu de uma corrida de massa (ponto 03 da Figura 18), nas datas de 26 e 27 de novembro de 2015 e, segundo o Somar meteorologia, entre às 20h e 23h do dia 26 foram registrados o equivalente a 96 mm de precipitação em duas horas e meia, e ventos localizados de até 100 km/h, deflagrando o movimento por volta das 24 h do mesmo dia após uma precipitação. As fotos apresentadas na Figura 19 demonstram situações encontradas após o evento.



Figura 19 – Situação encontrada após a corrida de massa na cidade de Francisco Beltrão.
Fonte: Arquivos da Defesa Civil de Francisco Beltrão.

O quarto evento registrado (ponto 04 da Figura 18) foi quase na sequência no dia 30 de novembro de 2015 envolvendo deslizamento de uma área de corte localizada no bairro São Cristóvão. A área de corte se apresentava em um talude de aproximadamente 30 metros de altura antes do deslizamento, e tal evento contou com uma precipitação acumulada nos últimos três dias de 51,4 mm. A Figura 19 traz imagens da área após o evento.



Figura 20 – Situação encontrada após o deslizamento ocorrido em 30 de novembro de 2015, no Bairro São Cristóvão.

Outro evento registrado (ponto 05 da Figura 18) ocorreu em 06 de dezembro de 2015 e teve como registro de enchente, porém o mesmo desencadeou uma corrida de massa no bairro Jardim Seminário, e uma corrida de massa, após o rompimento de um muro de concreto armado no bairro São Cristóvão. A precipitação acumulada naqueles últimos três dias foi de 31,2 mm, porém contando com uma precipitação acumulada na última semana de 79,2 mm. A figura Figura 21 traz o registro fotográfico dos detritos carregados nesse evento e as condições finais do muro rompido, para o bairro São Cristóvão.



Figura 21 – Situações encontradas durante e após o evento que ocorreu no dia 06 de dezembro de 2015, no Bairro São Cristóvão.

O sexto evento registrado (ponto 06 da Figura 18) também foi no ano de 2015, em 18 de dezembro, após uma precipitação acumulada de 58 mm, envolvendo um deslizamento no bairro Nossa Senhora Aparecida. Esse evento foi mais significativo pois ocorreu próximo ao centro da cidade gerando maior visibilidade e chamando atenção para o assunto na cidade. Foi o único local interditado onde a família residente no local teve de deixar sua moradia. A Figura 22 demonstra o local após o ocorrido.

Em 2016 foram registrados dois eventos, um no dia 20 de maio, após uma precipitação acumulada de 72,2 mm em três dias, em um corte de estrada que faz o trajeto até a Universidade Tecnológica Federal do Paraná, na Linha Santa Bárbara (ponto 07 da Figura 18), ainda dentro do perímetro urbano. A Figura 23 apresenta o deslizamento ocorrido.

O segundo evento registrado no ano de 2016 foi um deslizamento, em 30 de maio (ponto 08 da Figura 18), após uma precipitação acumulada de 24,2 mm, ocorrido em um corte de talude de 20 m com inclinação aproximada de 70°, no bairro Jardim Seminário, onde o topo do talude deslizou com uma massa composta de solo e rochas com diâmetros variados de até 1 m. A Figura 24 apresenta fotografias do evento.



Figura 22 – Deslizamento ocorrido no dia 18 de dezembro de 2015, no Bairro Nossa Senhora Aparecida.

Fonte: Defesa Civil de Francisco Beltrão.



Figura 23 – Deslizamento ocorrido no dia 20 de maio de 2016, na Linha Santa Bárbara.



Figura 24 – Deslizamento ocorrido no dia 30 de maio de 2016, no bairro Jardim Seminário.
Fonte: Defesa Civil de Francisco Beltrão.

Em visitas em campo foram identificados quatro pontos de movimentação de massa, os quais não haviam registro junto a Defesa Civil municipal. Dentre esses três se consistem em rastejos, e um como queda de blocos.

O movimento de queda de blocos possui como registro blocos de rocha rolados em local próximo a um corte realizado para edificação de uma estrada e superfície de corte intemperizada (ponto 09 da Figura 18), conforme é apresentado na Figura 25.



Figura 25–Vestígio de queda de blocos encontrada no bairro Cristo Rei na cidade de Francisco Beltrão.

Os movimentos de rastejo foram encontrados com vestígios em três bairros, sendo eles:

- ▶ São Francisco (ponto 10 da Figura 18) conforme apresentado na Figura 26, onde é possível visualizar a formação de diferentes níveis no terreno ao longo da encosta, bem como árvores inclinadas.
- ▶ Sadia (ponto 11 da Figura 18) conforme apresentado na Figura 27, onde as árvores apresentam inclinação e curvatura severa, em todas as fases de crescimento.
- ▶ Água Branca (ponto 12 da Figura 18) conforme apresentado na Figura 28, onde o terreno apresenta níveis ao longo da encosta além de pequenos degraus de abatimento. No corte da encosta é possível perceber os vestígios do movimento na camada mais profunda do solo.



Figura 26 – Vestígio de rastejo no bairro São Francisco, na cidade de Francisco Beltrão.



Figura 27 – Vestígio de rastejo encontrado no bairro Sadia.



Figura 28 - Vestígios de rastejo encontrado no bairro Água Branca.

4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Inicialmente, foi desenvolvido um estudo bibliográfico sobre o assunto, buscando conhecer os métodos e aplicações para o desenvolvimento deste trabalho. Em seguida, delimitou-se a área de estudo, sendo esta o perímetro urbano da cidade de Francisco Beltrão, definido pela Lei 2.280 de 2007 e alterado pela Lei 3.679 de 2010.

Dando continuidade ao mesmo, foi realizada a coleta de dados pertinentes à área de interesse, realizando levantamentos junto à prefeitura da cidade, buscando informações digitais do local, como a declividade, áreas ocupadas e atual delimitação do perímetro urbano.

Em seguida, foi construído um banco de dados da área, com os dados base de hipsometria (curvas de nível), hidrografia, perímetro da área de estudo, divisão de quadras e imagem de satélite. O trabalho foi realizado com auxílio dos programas ArcGIS 10.1 (*Architecture Geographic Information System*), SPRING 5.2.7 (Sistema de Processamento de Informações Georeferenciadas), AutoCAD 2015 (aplicativo de Desenho Assistido por Computador - CAD) e TopoEVN 10.7 (Sistema Profissional para Cálculos, Desenhos e Projetos Topográficos), principalmente.

4.1 BASE CARTOGRÁFICA

Para criação do projeto, os dados altimétricos e planimétricos da área de estudo foram delimitados a partir da base de restituição aerofotogramétrica realizada pelo programa Paraná Urbano no município de Francisco Beltrão, no ano de 1995, a qual apresentou-se com uma escala de 1:2000.

Os dados altimétricos (curvas de nível cotadas) foram importados em uma categoria MNT (Modelo Numérico do Terreno), pelo formato DXF-R12/DWG para o programa ArcGIS. A altimetria possuía isolinhas de 5 em 5 metros. A partir das classes de altimetria foi gerada uma imagem *raster*, os valores de altitude foram convertidos em declividade, podendo essa ser em percentagem ou em graus, mas optou-se pela utilização da escala em percentagem. Essa modelagem permite que as informações morfológicas sejam representadas e consideradas durante esta geração, propicia uma modelagem da superfície do terreno e preserva as suas características originais.

O mapeamento do declive em percentagem foi gerado através de uma ferramenta do programa ArcGIS, no modelo *Slope*. Esse mapeamento foi efetuado com base nas curvas de nível e da imagem *raster*, a partir de um fatiamento do terreno, resultando em um mapa de categoria temática com as classes de declividade recomendada pela EMBRAPA (2006), as quais são apresentadas na Tabela 1 (página 31) de modo simplificado. Essa classificação apresenta o relevo e a declividade em percentagem, cujas associações englobam e demonstram a divisão do terreno utilizada neste trabalho.

A partir dos dados de altimetria e declividade foi gerado um mapa temático com a orientação das encostas que considera para o direcionamento a declividade do pixel e dos pixels vizinhos. A orientação das encostas segue a mesma orientação dos pontos cardeais e essa serve como guia para a direção tomada pelo escoamento superficial, bem como a exposição da região a intempéries climatológicas, como a força dos ventos.

4.2 SOLOS

Para a classificação pedológica da área de estudo, utilizou-se como base o mapa de classes de solo da EMBRAPA (2008), o qual apresenta de forma abrangente a classificação dos solos da região. O mapa de classes de solo da EMBRAPA não é muito detalhado, por isso o solo é classificado de modo mais abrangente. Tal mapeamento possui um referencial EMBRAPA & IAPAR (1984) sendo que cada polígono de solo pode ser reclassificado através da declividade, conforme apresentado na Tabela 6. Dessa forma a classificação do solo se dá com maior detalhe e precisão.

O supracitado método de classificação do solo é recomendado em diversos estudos, como por TOMAZONI (2009) e demonstrado por SILVA (2011) e DALEFFE (2014).

Também foram traçados perfis do solo realizando visitas *in loco* para a confirmação do tipo de solo encontrado bem como análises texturais.

Para a classificação textural do solo encontrado foram realizadas análises de sedimentação granulométrica do solo, tendo como resultado a quantificação das frações areia, silte e argila encontradas em cada ponto. Posteriormente plotada no

triângulo textural, conforme apresentado na Figura 29, gerando um mapa textural do solo.

Tabela 6 - Classes do solo conforme a declividade do terreno.

Classe do Solo	Polígono do mapa da EMBRAPA (2008)	Declividade
Latossolo	LVdf8	0 – 5
	LVdf8	5 – 8
	LVdf8	8 – 15
	NVdf6	0 – 5
	NVdf6	5 – 8
	RRe9	0 – 5
Nitossolo	LVdf8	15 – 20
	NVdf6	8 – 15
	NVdf6	15 – 20
	RRe9	5 – 8
Chernossolo	LVdf8	20 – 30
	NVdf6	20 – 30
	RRe9	8 – 15
	RRe9	15 – 20
Neossolo	LVdf8	30 – 45
	LVdf8	> 45
	NVdf6	30 – 45
	NVdf6	> 45
	RRe9	20 – 30
	RRe9	30 – 45
	RRe9	> 45

Para a classificação de infiltração do solo utilizou-se o método do infiltrômetro de anéis que traz como resultado final a taxa básica de infiltração – TBI ou mais comumente conhecida como velocidade básica de infiltração – VBI.

A classificação unificada do solo se deu com a metodologia descrita por Souza Pinto (2000), sendo que o solo coletado após ser seco ao ar e destorroado é submetido a peneiramento, através da peneira ABNT número 200 com malha de 0,075mm. Tendo mais de 50% do material retido nesta peneira o solo é de granulometria grossa, G ou S, e caso o material que passou pela peneira seja superior a 50% do material peneirado o solo é de granulometria fina sendo classificado apenas como M, C ou O. Conforme apresentado na terminologia adotada no sistema na Tabela 7, se um solo for classificado como SW-CL, significa que é uma areia bem graduada argilosa de baixa compressibilidade.

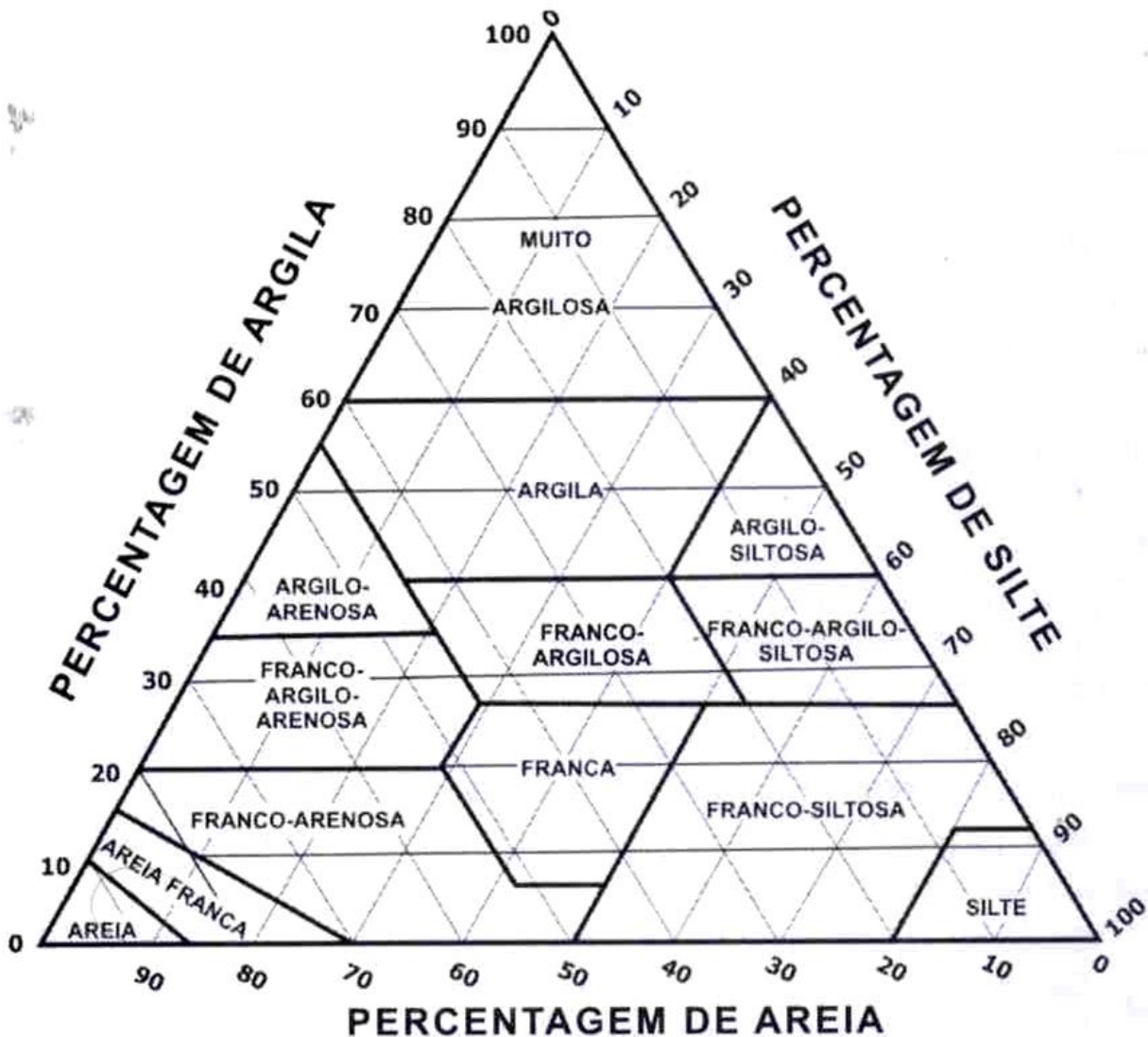


Figura 29 - Ábaco para classificação textural do solo – Triângulo Textural.
 Fonte: Santos (2005).

Tabela 7 – Terminologia adotada no sistema unificado.

	Terminologia	Característica
Tipo principal do solo	G	Pedregulho
	S	Areia
	M	Silte
	C	Argila
	O	Solo Orgânico
Dados complementares	W	Bem Graduado
	P	Mal Graduado
	H	Alta Compressibilidade
	L	Baixa Compressibilidade

Fonte: PINTO (2000).

No caso do solo ser de granulação grosseira tem-se:

- ▶ Se o material peneirado tiver uma quantidade de material fino (que passou pela peneira nº 200), inferior a 5% deve-se verificar como é a sua composição granulométrica.
- ▶ Se o teor de finos se encontrar em 5 e 12% o sistema de classificação unificada recomenda que para esses solos se apresentem as duas características secundárias que são a uniformidade da granulometria e as propriedades dos finos (limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade), nesse caso os solos terão classificações intermediárias.
- ▶ Se o teor de finos se encontrar acima de 12% a uniformidade granulométrica não aparece como característica secundária. A característica secundária se dará pelo posicionamento do ponto representativo dos índices de consistência (limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade) na Carta de Plasticidade.

Os solos granulares podem ser classificados como pedregulho ou areia, dependendo da fração granulométrica predominante. Esses podem ainda ser classificados como bem graduados ou mal graduados.

A expressão bem graduado traz o fato da existência de grãos com diversos diâmetros no solo o qual tende a possuir um melhor comportamento do ponto de vista da engenharia, pois as partículas ocupam os espaços vazios criando entrosamento entre as partículas resultando em uma menor compressibilidade e maior resistência (SOUZA PINTO, 2000).

Essa característica dos solos granulares é expressa pelo coeficiente de não uniformidade – *CNU*, a qual é definida pela relação entre o D_{60} , que é o diâmetro abaixo do qual se situam 60% do material mais fino peneirado e o D_{10} , que é o diâmetro abaixo do qual se encontram 10% do material. Tal coeficiente indica a amplitude dos tamanhos dos grãos, o sistema unificado considera que um pedregulho é bem graduado quando seu *CNU* é superior a 6.

$$CNU = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (2)$$

A NBR 6502 (ABNT, 1995) classifica os solos conforme o coeficiente de não uniformidade sendo:

Uniformes	$CNU < 5$
Mediamente Uniformes	$5 < CNU < 15$
Desuniformes	$CNU > 15$

O que determina o comportamento do solo argiloso não é apenas o teor de argila, mas também a atividade de tais argilas. Dessa forma, são os índices de consistência o que melhor indicam o comportamento do solo argiloso (SOUZA PINTO, 2000).

A classificação da granulação fina dos solos se dá pelo Limite de Liquidez – LL e Limite de Plasticidade – LP para a classificação dos solos como silte (M), argila (C) ou matéria orgânica (O), cujos valores são plotados na carta de plasticidade apresentada pela Figura 30. O mesmo sistema ainda classifica o solo como de alta compressibilidade (H) ou de baixa compressibilidade (L), conforme o LL desses solos seja inferior ou superior a 50, sendo segregados pela Linha B da carta de plasticidade. Quando o solo se apresenta com valores muito próximos às linhas A ou B da carta de plasticidade, esse solo passa a ser considerado um caso intermediário e as duas classificações são apresentadas.

Os solos orgânicos se distinguem dos siltes devido a sua coloração característica – marrom escuro, cinza- escuro ou preto.

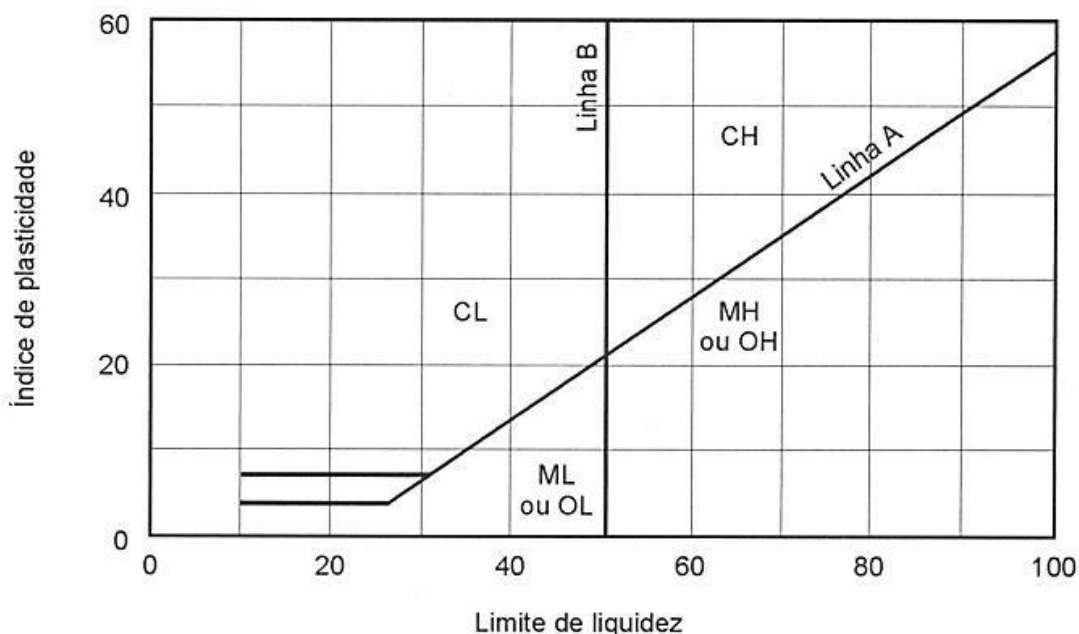


Figura 30- Carta de Plasticidade do Solo.
Fonte: Souza Pinto (2000)

A classificação do uso e ocupação do solo se deu por meio do programa SPRING - Sistema de Processamento de Informações Geográficas, em um método de classificação supervisionada, utilizando o algoritmo de MAXVER, apresentado na sequência. A imagem para classificação de uso e ocupação do solo utilizada foi do satélite ALOS, do ano de 2009 com uma resolução espacial de 2,5 metros.

Os algoritmos de classificação multiespectral *pixel-a-pixel* mais comuns são: máxima verossimilhança (MAXVER), distância mínima e método do paralelepípedo. Para este estudo foi utilizada a classificação supervisionada de MAXVER. Tal método considera a ponderação das distâncias entre médias dos níveis digitais das classes, utilizando parâmetros estatísticos. Para que a classificação por máxima verossimilhança seja precisa o suficiente, é necessário um número razoavelmente elevado de *pixels*, para cada conjunto de treinamento. Os conjuntos de treinamento definem o diagrama de dispersão das classes e suas distribuições de probabilidade, considerando a distribuição de probabilidade normal para cada classe do treinamento (INPE, 2013).

4.3 ANÁLISES FÍSICAS E MECÂNICAS DO SOLO

As análises geotécnicas do solo permitem caracterizar os solos através de ensaios de parâmetros geotécnicos e classificá-los em uma categoria de comportamento (TABALIPA, 2008).

Os ensaios utilizados neste estudo consistem em: análise granulométrica, teor de umidade, limite de liquidez, limite de plasticidade, massa específica, cisalhamento direto e permeabilidade. Possuem como metodologia as apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 - Ensaios realizados e Metodologia empregada.

Ensaio	Metodologia empregada
Preparação das Amostras	NBR 6457/1986
Análise Granulométrica	NBR 7181/1984
Teor de umidade	NBR 6457/1986
Densidade	EMBRAPA (1997)
Limite de Liquidez	NBR 6459/1984
Limite de Plasticidade	NBR 7180/1984
Índice de Consistência	Fiori & Carmignani (2009).
Permeabilidade	Infiltrômetro de anéis

Para essas análises, os locais determinados de coleta do solo se consistiram em áreas de declividade mais acentuada sendo pontos de importância para o estudo, os quais já sofreram movimentos de massa, mas que não apresentassem cortes nem aterros e que possibilitassem a coleta. E mais, tomaram-se alguns pontos na área central da cidade, representando áreas mais baixas. Dessa forma foram mapeados os pontos 1 a 24, dispostos conforme apresentado na Figura 31.

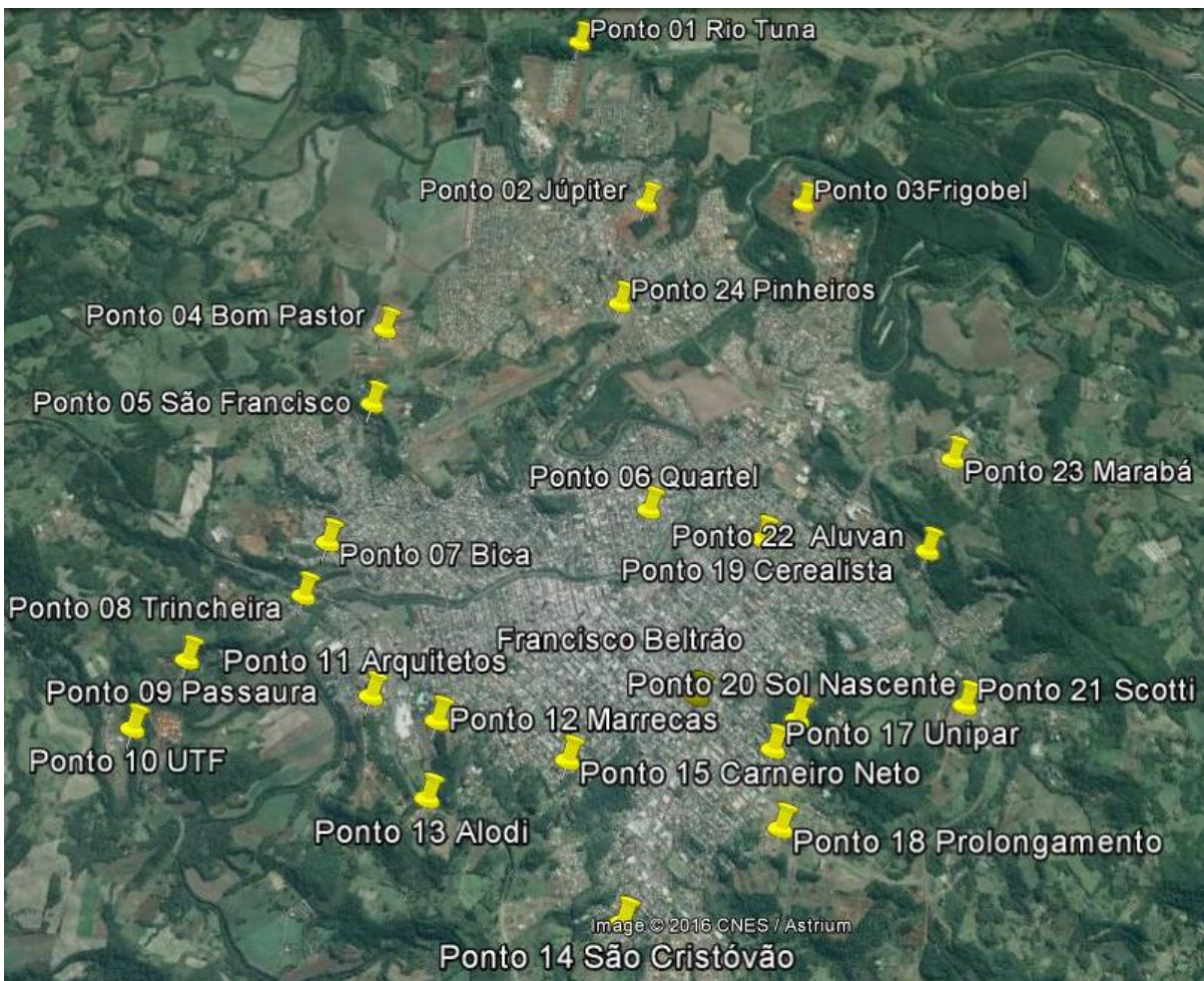


Figura 31- Mapa de pontos de coleta de solo.

Os locais de coleta do solo foram devidamente georeferenciados com o auxílio de GPS e foram distribuídos ao longo da área estudada. Não foram em todos os pontos mapeados inicialmente que se deu a coleta de solo, pois ao chegar ao local previsto alguns pontos apresentavam diretamente o horizonte R, não possuindo camada de solo para coleta, alguns pontos já haviam sofrido alteração antrópica não apresentando características naturais do terreno e alguns pontos não possibilitavam acesso.

Para coleta do solo iniciou-se o processo com a limpeza superficial do terreno, retirando a camada de gramíneas e folhas encontradas no ponto de coleta. A coleta se fez com o auxílio de trado holandês, sendo que a coleta ocorreu a cada 20 centímetros até encontro do horizonte C ou R, conforme o caso, e em cinco pontos a coleta deu-se até a profundidade de 140 centímetros, sendo esse o alcance máximo do trado.

O solo foi disposto para classificação do perfil em todos os pontos de coleta e então armazenado e etiquetado. A Tabela 9 apresenta a profundidade até onde deu-se a coleta e os horizontes encontrados ao final da coleta para cada ponto.

Tabela 9– Localização dos pontos de coleta do solo, profundidade da coleta e horizonte encontrado.

Ponto	Localização	Profundidade	Horizonte encontrado
Ponto 01	Rio Tuna	0 – 86 cm	C
Ponto 02	Bairro Júpiter	0 - 140 cm*	B
Ponto 03	Frigobel	0 – 60 cm	C
Ponto 04	Loteamento Bom Pastor – Bairro Aeroporto	0 - 84 cm	R
Ponto 05	Bairro São Francisco	0 - 119 cm	R
Ponto 06	CTG – Quartel	0 – 140 cm**	B
Ponto 07	Bica	0 – 80 cm	C
Ponto 08	Trincheira	0 – 120 cm	R
Ponto 09	Loteamento Passaura	0 - 60 cm	C
Ponto 10	UTF	0 – 140 cm**	B
Ponto 11	Arquitetos	0 – 80 cm	C - R
Ponto 12	Bairro Marrecas	0 - 88 cm	R
Ponto 13	Alodi	0 - 74 cm	C
Ponto 14	Bairro São Cristóvão	0 - 62 cm	C
Ponto 15	Carneiro Neto	0 - 84 cm	R
Ponto 16	Sanderson	1 – 140 cm**	B
Ponto 17	Unipar	1 – 140 cm**	B
Ponto 18	Prolongamento	0 - 81 cm	C
Ponto 19	Cerealista	0 - 140 cm	R
Ponto 20	Sol Nascente	0 - 61 cm	R
Ponto 21	Scotti	0 - 114 cm	C - R
Ponto 22	Aluvan	0 – 80 cm	C
Ponto 23	Marabá	0 – 20 cm	R
Ponto 24	Pinheiros	0 – 20 cm	C - R

* Para o ponto 02 a profundidade medida até o horizonte C foi de 240 cm.

** Para os pontos 06, 10, 16 e 17 não foi possível medir a profundidade até o horizonte C ou R.

4.3.1 Análise granulométrica

A textura ou granulometria refere-se à proporção de partículas de argila, silte e areia do solo. Essa análise é de grande valia para a classificação do perfil do solo. A metodologia empregada foi a da EMBRAPA (1997), juntamente com a NBR 7181 (ABNT, 1984).

O procedimento de coleta se constitui na limpeza da superfície do solo (Figura 32a), retirada na profundidade de 0 - 60 cm (em média) com auxílio de trado holandês (Figura 32b), traçado o perfil do solo (Figura 32c), e então etiquetado e armazenado.



Figura 32 - Coleta de amostra de solo: a) limpeza superficial; b) trado holandês; c) traçado do perfil do solo.

No início das análises o solo foi destorroado manualmente e foram desmanchados os aglomerados maiores, que se formaram no ato de coleta com o trado holandês e armazenamento do solo, devido à umidade presente no mesmo. Em seguida foi seco ao ar em temperatura ambiente, à sombra, no laboratório de solos da UTFPR *campus* Francisco Beltrão. Já secas as amostras foram destorroadas com cuidado para apenas desmanchar os aglomerados de solo que ainda restaram devido à umidade com auxílio de almofariz.

As peneiras utilizadas para separação da granulometria são apresentadas na Tabela 10, até a malha de 2 mm o material se apresenta como granulometria grosseira e abaixo dos 0,075 mm o material se apresenta como granulometria fina.

Tabela 10–Peneiras utilizadas para a granulometria

Malha (mm)	Número ABNT	Mineralogia dos grãos*
31,5	1,14"	Matacão
16	5,8"	Pedra
8	5/16"	Pedra
4	5	Areia Grossa e Brita
2	10	Areia Grossa
1	18	Areia Média
0,6	30	Areia Média
0,425	40	Areia Média
0,3	50	Areia Média
0,15	100	Areia Fina
0,075	200	Areia Fina

Fonte: ABNT NBR 7181/1984.

As amostras do solo foram submetidas a agitação média no ro-tap durante 15 minutos, após foram pesadas em todas as frações permitindo confecção da curva de distribuição das frações granulométricas do solo.

4.3.1.1 Sedimentação

Para a análise granulométrica utilizou-se o método de Dispersão Total, mais conhecido como Método da Pipeta. Ele se baseia na velocidade de queda das partículas que compõe o solo segundo a Lei de Stokes, pois se fixa o tempo para queda das partículas na suspensão do solo com água, acrescido de um dispersante, no caso utilizou-se o Hidróxido de Sódio (NaOH) em concentração 1N (1 normal, ou seja, 1 mol de Hidróxido de Sódio para 1 litro de água).

Colocou-se 20 g de solo fino em Becker plástico de 250 ml. Adicionou-se 100 ml de água e 10 ml de solução 1N de hidróxido de sódio. Agitou-se o material com bastão de vidro e deixou-se em repouso durante uma noite, cobrindo o copo com vidro de relógio.

Transferiu-se o conteúdo para copo metálico do agitador elétrico "stirrer" com o auxílio de um jato de água, deixando o volume em torno de 300 ml. Colocou-se o copo no agitador e procedeu-se à agitação durante 15 minutos, pois se tratavam de solos argilosos.

Passou-se o conteúdo através de peneira de 20 cm de diâmetro e malha de 0,053 (n° 270), colocada sobre um funil tendo logo abaixo uma proveta de 1000 ml. Lavou-se o material retido na peneira com água. Completou-se o volume da proveta até o aferimento, com o auxílio de uma pisseta, e para tanto utilizou-se água destilada.

Agitou-se a suspensão durante 20 segundos com um bastão de vidro com ponteira de silicone perfurada e marcou-se o tempo após concluir a agitação. Calculou-se o tempo de sedimentação da argila (fração menor que 0,002mm de diâmetro), em suspensão aquosa, para uma profundidade de 5cm, de acordo com a temperatura encontrada na amostra e os dados constantes na Tabela 11, A seguir foram calculados pela Lei de Stokes, considerou-se a densidade de partícula (real) igual a 2,65, sendo este o valor da partícula de quartzo. Apesar de que os solos da região chegam com uma densidade de partícula maior que 2,9.

Após concluído o tempo de sedimentação, foi inserida uma pipeta de 50ml, juntamente a um pipetador de borracha (pêra) e coletada os 50 ml da suspensão de argila. A mesma foi transferida para um cadinho de porcelana, previamente calcinado, seco em dessecador e pesado. Após secagem, durante uma noite em estufa a 40°C, o cadinho com a suspensão coletada foi esfriado em dessecador e então obteve-se o peso da argila.

Tabela 11 - Velocidade de Sedimentação pela Lei de Stokes.

Temperatura °C	Tempo	Temperatura °C	Tempo
10	5h11'	23	3h43'
11	5h03'	24	3h38'
12	4h55'	25	3h33'
13	4h47'	26	3h28'
14	4h39'	27	3h24'
15	4h33'	28	3h19'
16	4h26'	29	3h15'
17	4h20'	30	3h10'
18	4h12'	31	3h07'
19	4h06'	32	3h03'
20	4h00'	33	2h58'
21	3h54'	34	2h55'
22	3h48'	35	2h52'

Fonte: EMBRAPA, 1997.

Ao completar a lavagem da areia retida na peneira de 0,053 mm com jato forte de água, transferiu-se a fração areia para Becker numerado e de peso conhecido,

e colocou-se na estufa. Após secagem (3 a 5 horas), deixou-se esfriar e obteve-se, com precisão de 0,05 g, o peso da areia.

Para calcular o teor de cada componente, argila, silte e areia, foram utilizadas as seguintes equações:

$$\text{Teor de argila} = [\text{argila (g)} + \text{dispersante (g)}] - \text{dispersante (g)} \times 1.000. \quad (3)$$

$$\text{Teor de areia} = \text{areia (g)} \times 50. \quad (4)$$

$$\text{Teor de silte} = 1.000 - [\text{argila (g)} + \text{areia (g)}]. \quad (5)$$

4.3.2 Densidade e Teor de Umidade

A densidade do solo foi determinada pelo método do anel a partir da coleta de amostra indeformada de solo com auxílio de extrator a 30 cm de profundidade do solo.

Ao se utilizar o anel para retirada do solo tomou-se o cuidado durante a obtenção da amostra para evitar sua deformação ou ruptura. O anel foi inserido sob pressão, sendo que em solos que apresentem corpos rígidos como cascalho, calhaus ou raízes grossas deve-se evitar danificar a superfície cortante do anel e não deformar a amostra de solo.

A densidade é definida como:

$$D = \frac{m}{V} \quad (6)$$

Onde:

m – massa de solo seco;

V – volume de solo.

Para o teor de umidade do solo utilizou-se solo fofo a profundidade de 30 cm. O teor de umidade é dado por:

$$h = \frac{M1 - M2}{M2 - M3} \cdot 100 \quad (7)$$

Onde:

h – teor de umidade em percentagem;

M1 – massa do solo úmido mais a massa do recipiente, em gramas;

M2 – massa do solo seco mais a massa do recipiente, em gramas;

M3 – massa do recipiente.

Na Figura 33 são apresentadas as capsulas preparadas para análise de umidade e densidade do solo.



Figura 33 - Análises de densidade e umidade do solo

4.3.3 Limite de Liquidez

O Limite de Liquidez (WL) é definido como sendo a umidade abaixo da qual o solo se comporta como material plástico. É o limite de umidade de transição entre os estados líquido e plástico do solo.

A análise é realizada com o auxílio do aparelho Casagrande, cinzel e excêntrico.

Para análise do limite de liquidez a massa de solo é seca ao ar, destorroada com auxílio de almofariz e peneirada através da peneira número 40 ABNT, malha de 0,425 mm com obtenção de 200 g de solo.

A massa de solo é então umidificada com água destilada até obtenção de um material pastoso, quase líquido e cuidadosamente disposto sobre a concha, de forma a não permitir espaços vazios. Com o auxílio do cinzel a massa do solo é dividida em duas partes de forma que se forme uma ranhura na praça central, para esse procedimento a concha deve ser mantida na horizontal.

Na sequência iniciam-se os golpes na concha contra a base em uma razão de duas voltas por segundo até que na parte inferior da concha a ranhura se feche ao longo de aproximadamente 1,3 cm de comprimento. O solo é então retirado com o auxílio do excêntrico, pesado e disposto em estufa a 100°C para secagem.

O ensaio é repetido quatro vezes.

O limite de liquidez é expresso a partir da construção de um gráfico com os valores obtidos no ensaio com o número de golpes (em escala logarítmica) no eixo das ordenadas (Y) e o teor de umidade (em escala aritmética) no eixo das abcissas (X). Dessa forma se traça uma reta onde o teor de umidade correspondente a 25 golpes será o LL do solo. Na Figura 34 apresenta-se o procedimento para análise do limite de liquidez.



Figura 34 - Análise de limite de liquidez - LL.

4.3.4 Limite de Plasticidade

O Limite de Plasticidade (WP) é definido como sendo a umidade em que o solo deixa de ser plástico tornando-se quebradiço. É a umidade de transição entre o estado plástico e semissólido do solo.

Para realização do ensaio se faz uso de placa de vidro com uma das superfícies esmerilhada e gabarito cilíndrico com 3 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento.

Para análise do limite de plasticidade a massa de solo é seca ao ar, destorroada com auxílio de almofariz e peneirada através da peneira número 40 ABNT, malha de 0,425 mm, com obtenção de 200 g de solo.

A amostra foi disposta em cápsula de porcelana e adicionada água destilada até umidade em que se pudesse formar uma bolinha de solo perfeita na palma da mão. Essa massa de solo de aproximadamente 10 g foi rolada na placa de vidro esmerilhado até formar o cilindro de 3 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento, conforme procedimento apresentado na Figura 35. Ao formar esse cilindro se a massa de solo começava a se fragmentar o mesmo era pesado e encaminhado para estufa para secagem, caso a massa de solo se partisse antes de ter as dimensões conforme o gabarito era retomado à cápsula de porcelana e umidificada. Caso a amostra de solo não se partisse o procedimento era repetido.

A análise é realizada com o auxílio de um vidro esmerilhado e um gabarito cilíndrico de 3 mm de diâmetro, analisando a umidade em que o solo começa a se tornar quebradiço.

O ensaio foi repetido pelo menos três vezes.

Os resultados dos ensaios permitem calcular o Índice de Plasticidade – IP, onde:

$$IP = LL - LP \quad (8)$$

O índice de plasticidade é expresso em percentagem.



Figura 35 - Ensaio de limite de plasticidade - LP.

4.3.5 Índice de Consistência – “Liquidity”

O índice de consistência é a relação entre a diferença do limite de liquidez e a umidade natural do solo e o índice de plasticidade. É o índice que dá a proporção de umidade natural na amostra de solo. A Tabela 12 apresenta a classificação do solo conforme este índice, que é calculado por meio da equação 9.

$$IL = \frac{LL - h}{IP} \quad (9)$$

Onde:

h – umidade natural da amostra;

LL – Limite de Liquidez;

IP – Índice de Plasticidade.

Tabela 12 – Classificação do solo conforme o índice de consistência – “Liquidity”.

Índice de Consistência	Classificação do solo
Menor que 0,5	Muito mole
0,5 à 0,65	Mole
0,65 à 0,85	Médio
0,85 à 1,00	Rija
Maior que 1,00	Dura

Fonte: Fiori & Carmignani (2009).

4.3.6 Permeabilidade

A permeabilidade do solo foi analisada com base em testes de infiltração de água no solo. A infiltração de água no solo é a passagem de água pelo solo e que se acumula em seus vazios antes ocupados por ar.

A infiltração de água no solo é influenciada por diversos fatores como a textura do solo, a massa específica, a porosidade, a composição das argilas, a capacidade de retenção de água, a condutividade hidráulica e a umidade.

O método aplicado para medir a capacidade de infiltração de água no solo e a velocidade de infiltração de água no solo se consistiu do método do infiltrômetro de anéis. O infiltrômetro de anéis são dois cilindros de bordas biseladas que são dispostos no solo de forma concêntrica, o segundo anel possui diâmetro igual ao dobro do primeiro anel. Para este estudo foi utilizado o infiltrômetro com anéis de 15 cm e 30 cm de diâmetro respectivamente, conforme apresentado na Figura 36.

Segundo Brandão (2003), o cilindro externo tem como finalidade reduzir o efeito da dispersão lateral da água infiltrada no cilindro interno. Dessa forma, a água do cilindro interno infiltra pelo perfil do solo em direção predominantemente vertical, evitando assim que a taxa de infiltração seja superestimada.

A infiltração do solo tende a ser mais rápida no início pois o solo não está saturado e a pressão de sucção do solo ainda existe, à medida que o solo vai saturando esta pressão irá diminuir, diminuindo também a velocidade de infiltração de água no solo. Assim sendo, a infiltração foi medida durante o tempo necessário para que a taxa de infiltração se estabilizasse apresentando uma infiltração constante. O tempo do ensaio variou para cada ponto amostrado, conforme a umidade encontrada, a classe de solo, a profundidade do solo e a textura eram diferentes.

Brandão (2003), recomenda que o ensaio seja realizado até que a taxa de infiltração medida no cilindro interno torne-se aproximadamente constante com o tempo, ou seja, que o valor de leitura se repita pelo menos três vezes para um mesmo tempo de infiltração.

A partir desse ensaio tem-se a VBI, a velocidade básica de infiltração; ela pode ser definida em cm/h ou em mm/h, para este estudo optou-se por fazer o uso em mm/h para poder ser facilmente comparada com índices, apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 - Velocidade de infiltração.

Tipo de infiltração	VBI (mm/h)
Muito alta	>300
Alta	150 – 300
Média	50 – 150
Baixa	< 50

Fonte: Bernardo et all (2006) apud Fagundes (2012).

Os solos argilosos bem estruturados tendem a possuir maiores taxas de infiltração do que os solos que se apresentam com estrutura instável, visto que sofrem dispersão quando são umedecidos, o que é ocasionado pelos agentes cimentantes representados pela matéria orgânica, óxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al). Dessa forma, quanto maior for a quantidade de agentes cimentantes no solo maior é a possibilidade de o solo se apresentar com estrutura mais estável (SHAINBERG & LEVY, 1995; SILVA & KATO, 1997 appud FAGUNDES, 2012).



Figura 36 - Ensaio de infiltração de água no solo.

4.4 DADOS DE SONDAGEM A PERCUSSÃO SPT (*STANDART PENETRATION TEST*)

Segundo a ABNT – NBR 6502, a coesão do solo é uma parcela da resistência do mesmo aos esforços de cisalhamento, depende fundamentalmente da natureza e da composição da rocha-mãe.

Para obtenção dos dados de coesão do solo e ângulo de atrito interno, foi empregada a metodologia descrita por Schnaid & Odebrecht (2012), que faz uso dos dados de sondagem a percussão – SPT realizados na área de estudo.

Segundo Vaz (2014), as sondagens SPT representam uma das investigações mais difundidas e utilizadas no Brasil, visto que possibilitam reduzir custos com o estudo de instabilidades de vertentes e devido à utilização da grande quantidade de informação existente. Essa base de dados pode ser utilizada para obtenção de mapas de susceptibilidade a escorregamentos, sendo aplicada de maneira extensiva em áreas que ainda não possuem estudos de estabilidade.

O ensaio SPT permite classificar os solos em relação à sua resistência à penetração, pela compactidade, quando se tratar de areia ou silte arenoso, ou pela consistência para o caso das argilas ou silte argiloso (ABNT, 2001).

Conforme NBR 6484 (ABNT, 2001) o SPT consiste de três procedimentos principais: I) Locação dos furos e quantidade; II) Processo de perfuração; III) Amostragem e SPT. Sendo o processo II alternado com III em cada metro da sondagem. A perfuração é realizada com o emprego do trado-concha ou cavadeira

manual e circulação de água que utiliza um trépano de lavagem como ferramenta de escavação. A amostragem é realizada com um amostrador padrão com diâmetro externo de 50 mm, coletando amostras representativas a cada metro de profundidade.

O índice de resistência à penetração SPT (NSPT) é determinado pelo número de golpes correspondentes à cravação de 30 cm do amostrador-padrão, após a cravação inicial de 15 cm. A cravação é realizada por meio de impactos sucessivos do martelo padronizado caindo livremente da altura de 75 cm, sendo utilizada uma corda de sisal para levantá-lo.

Segundo Pinto (2000) devido a deformação provocada no solo, a amostra obtida não se presta para ensaios mecânicos em que a estrutura natural do solo deve ser preservada, sendo útil para identificação visual e para ensaios de caracterização.

Os valores de resistência à penetração podem ser utilizados para a obtenção de valores de ângulo de atrito e coesão, conforme apresentado por Vaz (2014). Sendo os passos apresentados a seguir:

1) Obtém-se o valor corrigido (N_1) considerando a tensão de referência em 100 kPa (LIAO e WITHMAN, 1986), e realizando-se o produto entre a tensão vertical efetiva (σ_v') e o coeficiente de correção (CN), considerando-se a profundidade (z) e o peso específico do solo natural (γ_{nat}), conforme Equações 10, 11 e 12.

$$\sigma_v' = z \times \gamma_{nat} \quad (10)$$

$$CN = \sqrt{\frac{100}{\sigma_v'}} \quad (11)$$

$$N_1 = N_{SPT} \times CN \quad (12)$$

2) Normaliza-se com base no padrão americano de N_{60} , Schnaid (2000) indica a correção do N_{spt} para um valor de referência, e a energia liberada é de 60%, e o valor da Energia aplicada de 0,66, conforme Equação 13.

$$N_{60} = \frac{N_{SPT} \times \text{Energia aplicada}}{0,6} \quad (13)$$

3) Realiza-se a correção direta em relação à energia aplicada ao sistema e ao nível de tensões (N_1)₆₀ proposta por Hatanaka e Uchida (1996), corrigindo N_{spt} para o caso de materiais granulares, Equação 14.

$$(N_1)_{60} = N_{60} \times \sqrt{\frac{100}{\sigma_v'}} \quad (14)$$

4) E obtém-se o ângulo de atrito (ϕ) conforme Equação 15.

$$\Phi = 20 + \sqrt{(15,4 \times (N_1)_{60})} \quad (15)$$

5) Encontra-se a resistência não-drenada S_u para o caso de materiais coesivos, de acordo com Stroud (1989), como apresentado na Equação 16.

$$S_u = 5 \times N_{60} \quad (16)$$

6) Para encontrar o valor da coesão (c') calcula-se o valor da resistência ao cisalhamento (τ) conforme Equação 17.

$$\tau = \sigma_v' \times \tan(\Phi) \quad (17)$$

7) Supondo um material coesivo-friccional, com o valor da resistência ao cisalhamento (τ) é possível obter o valor da coesão do solo (c') utilizando-se um valor fixo para ϕ , conforme Equação 18. Optou-se utilizar para ϕ o menor valor encontrado durante a perfuração do ponto.

$$c' = \tau - \sigma_{v0}' \times \tan(\Phi) \quad (18)$$

4.5 CÁLCULO DO FATOR DE SEGURANÇA

O valor do fator de segurança foi obtido a partir de álgebra de mapas, onde foram correlacionados mapas temáticos tendo uma integração entre a base cartográfica de dados e as análises físicas do solo.

Para tal cálculo utilizou-se os mapeamentos de declividade, uso e ocupação do solo, tipo de solo, e dados de peso específico, coeficiente de coesão, ângulo de atrito e profundidade do solo. Com essa relação pode-se estabelecer áreas de risco de movimento de massa, principalmente em encostas e vertentes, as quais são classificadas como apresentado na Tabela 14.

Tabela 14 – Classificação das encostas quanto a estabilidade do terreno

Intervalo do Fator de Segurança	Diagnóstico
$0 < F_s < 1,5$	Instabilidade
$1,5 < F_s < 2$	Estabilidade Crítica
$2 < F_s < 3$	Boa Estabilidade
$3 < F_s < 4$	Alta Estabilidade
$4 < F_s < 10$	Excelente Estabilidade

Para o presente estudo foram estabelecidos quatro fatores de segurança diferenciados, sendo eles:

Fator de segurança considerando a vertente natural sem a influência da vegetação:

$$F_s = \frac{(C_s) + [Z \cdot \gamma_{nat} \cdot \cos^2(i)] \cdot tg(\phi)}{[(Z \cdot \gamma_{nat}) \cdot sen(i)] \cdot \cos(i)} \quad (19)$$

Fator de segurança considerando a vertente saturada sem a influência da vegetação:

$$F_s = \frac{(C_s) + [Z \cdot (\gamma_{sub} - \gamma_a) \cdot \cos^2(i)] \cdot tg(\phi)}{[(Z \cdot \gamma_{sub}) \cdot sen(i)] \cdot \cos(i)} \quad (20)$$

Fator de segurança considerando a vertente natural e com a influência da vegetação:

$$F_s = \frac{(C_s + S_r) + [(Z \cdot \gamma_{nat} + P_a) \cdot \cos^2(i) + T \cdot sen(\theta)] \cdot tg(\phi) + T \cdot \cos(\theta)}{[(Z \cdot \gamma_{nat} + P_a) \cdot sen(i) + F_{ve}] \cdot \cos(i)} \quad (21)$$

Fator de segurança considerando a vertente saturada e com a influência da vegetação:

$$F_s = \frac{(C_s + S_r) + [(Z \cdot \gamma_{sub} + P_a) \cdot \cos^2(i) + T \cdot sen(\theta)] \cdot tg(\phi) + T \cdot \cos(\theta)}{[(Z \cdot (\gamma_{sub} + \gamma_a) + P_a) \cdot sen(i) + F_{ve}] \cdot \cos(i)} \quad (22)$$

Onde:

F_s – fator de segurança (adimensional);

C_s – coesão do solo (kPa);

S_r – contribuição das raízes (kPa);

Z – distância do topo da vertente até a superfície potencial de escorregamento (m);

γ_{sub} – peso específico do solo submerso (kN/m³);

γ_{nat} – peso específico do solo submerso (kN/m³);

γ_a – peso específico da água (kN/m³);

P_a – peso das árvores (kN/m³);

F_{ve} – força de arrasto do vento (kN);

φ – ângulo de atrito com o solo (graus);

i – inclinação da vertente (graus);

T – tensão das raízes (kPa);

θ – ângulo das raízes (graus).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com a constituição do banco de dados em ambiente ArcGIS, do perímetro urbano da cidade de Francisco Beltrão – PR, foi possível definir as características básicas da área de estudo, constituídas pelas cartas de altimetria, declividade, classes de solo, permeabilidade do solo, uso e ocupação do solo, e foram relacionadas com os dados de coesão e ângulo de atrito, aplicando-se a fórmula do fator de segurança e efetuando o mapeamento da susceptibilidade à movimentação de massa na área de estudo.

A seguir são apresentados individualmente os resultados de cada parâmetro analisado, incluindo os resultados das análises físicas e mecânicas do solo e as cartas de susceptibilidade a movimentos de massa.

5.1 BASE CARTOGRÁFICA

Com a importação das curvas de nível para o ambiente ArcGIS, deu-se a construção do Modelo Numérico do Terreno (MNT) e com base neste mapeamento teve-se a construção dos demais mapas.

A análise da hipsometria do perímetro urbano da cidade de Francisco Beltrão resultou no mapa altimétrico da área. A altimetria se apresenta com a menor cota de 510 metros e maior cota altimétrica de 725 metros, possuindo uma maior concentração da área na faixa de altitude entre 553 e 575 metros, A Figura 37 apresenta o histograma para a altimetria da área de estudo e a Figura 38 apresenta a carta altimétrica para a área de estudo.

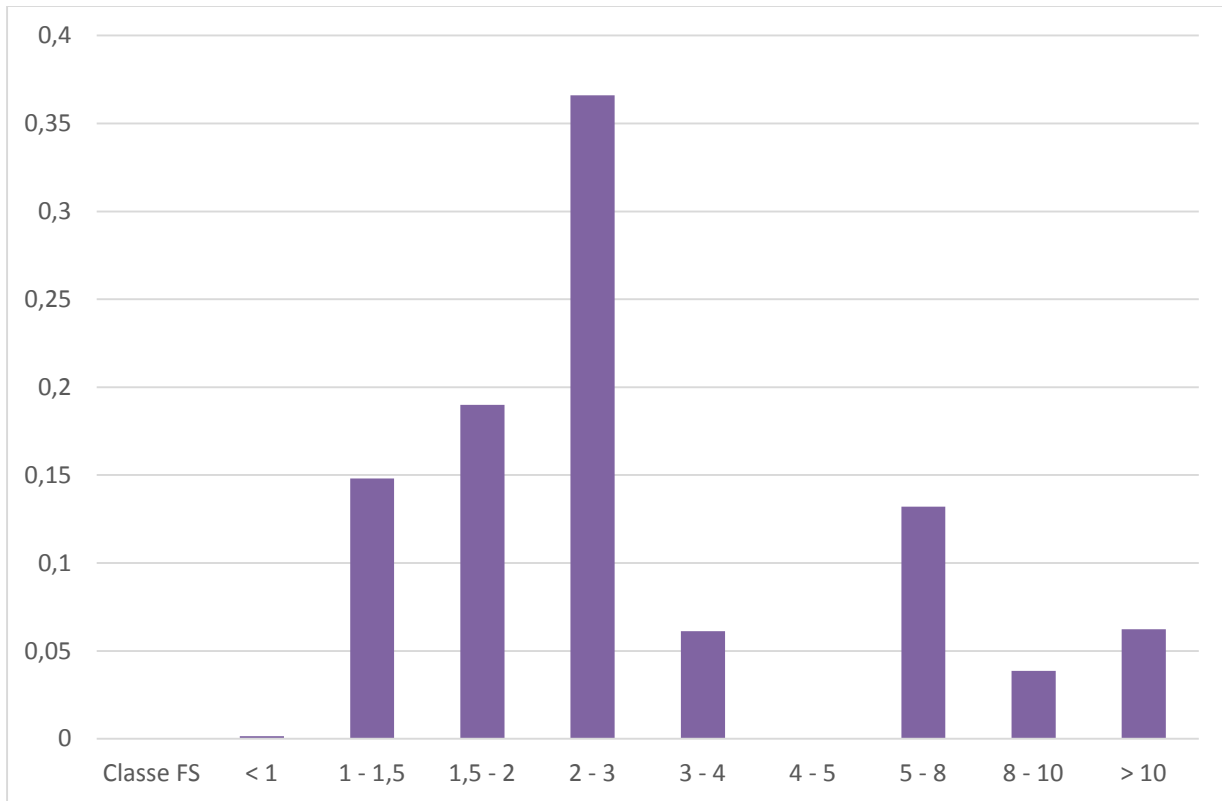


Figura 37 - Histograma de variação da altimetria com área em densidade de pixels.

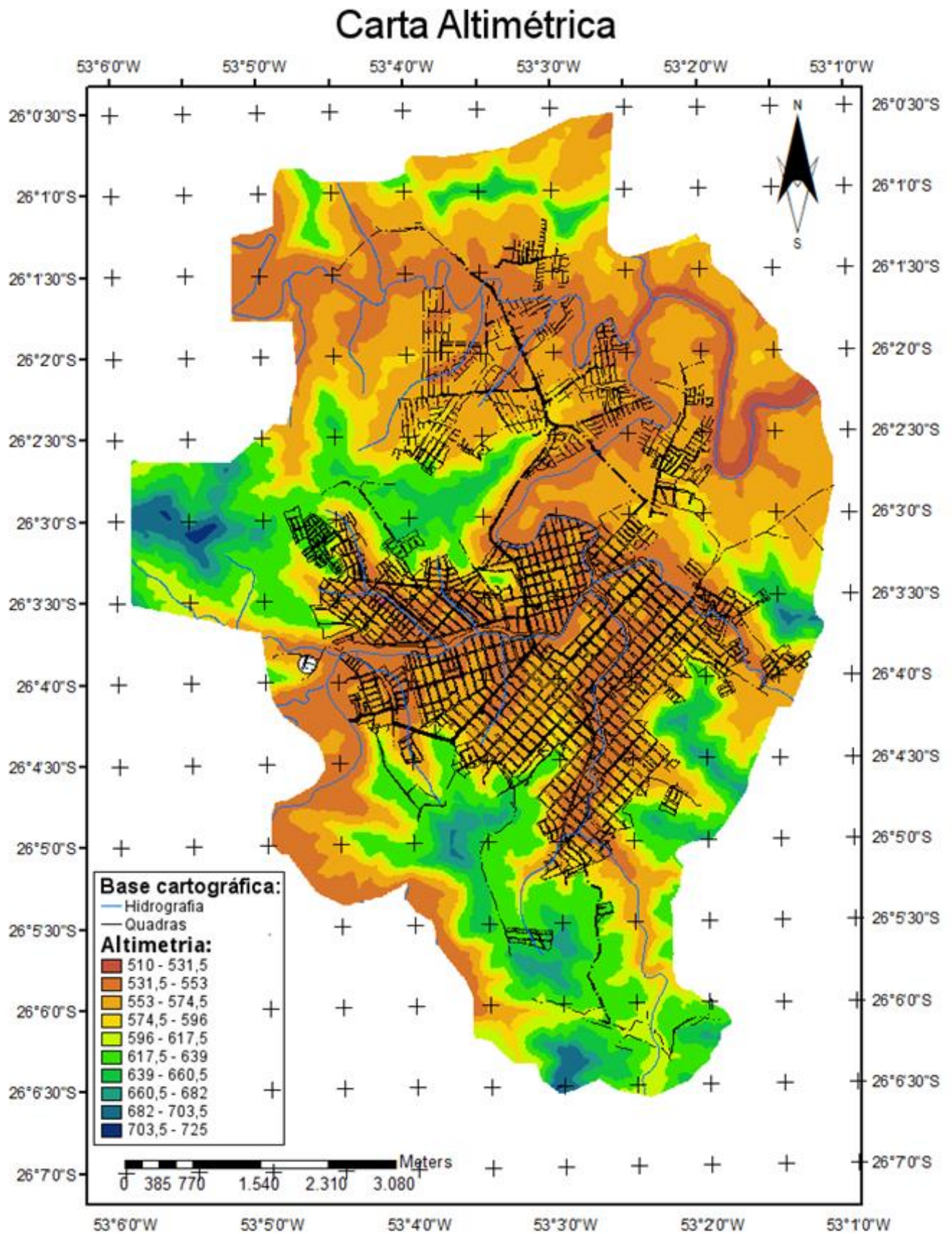


Figura 38 - Carta Altimétrica para área de estudo.

Após a altimetria, efetuou-se o levantamento da declividade, estabelecendo os limites conforme as classes da EMBRAPA (2006), sendo que na área de estudo a maior concentração se encontra na classe com declividade entre 8 – 15%, sendo classificado como revelo ondulado. A Tabela 15 apresenta a distribuição das classes de declividade para a área de estudo e a Figura 39 apresenta um gráfico com a distribuição em percentagem das classes de declividade encontradas na área de estudo. A Figura 40 apresenta a carta de declividade para a área de estudo.

Tabela 15 - Classes de declividade para área de estudo.

Classe de declividade (%)	Percentual da área total
0 – 5	21,94%
5 – 8	12,68%
8 – 15	31,69%
15 – 20	10,43%
20 – 30	10,58%
30 – 45	8,63%
45 – 75	3,86%
75 – 100	0,19%
Total	100,00%

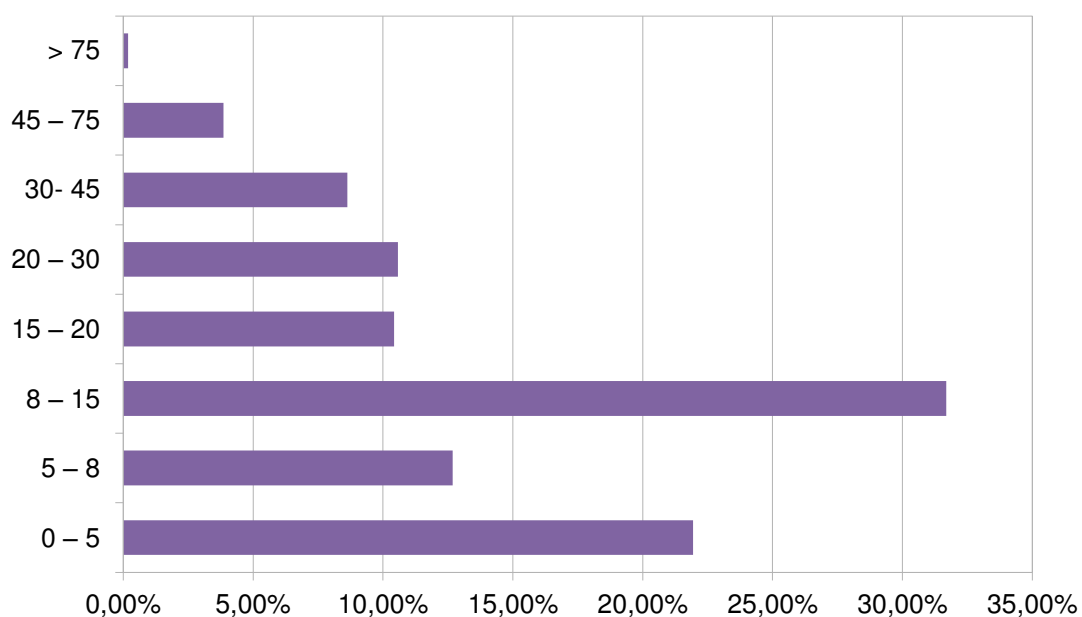


Figura 39 - Gráfico das classes de declividade com área em percentagem.

Carta de Declividade

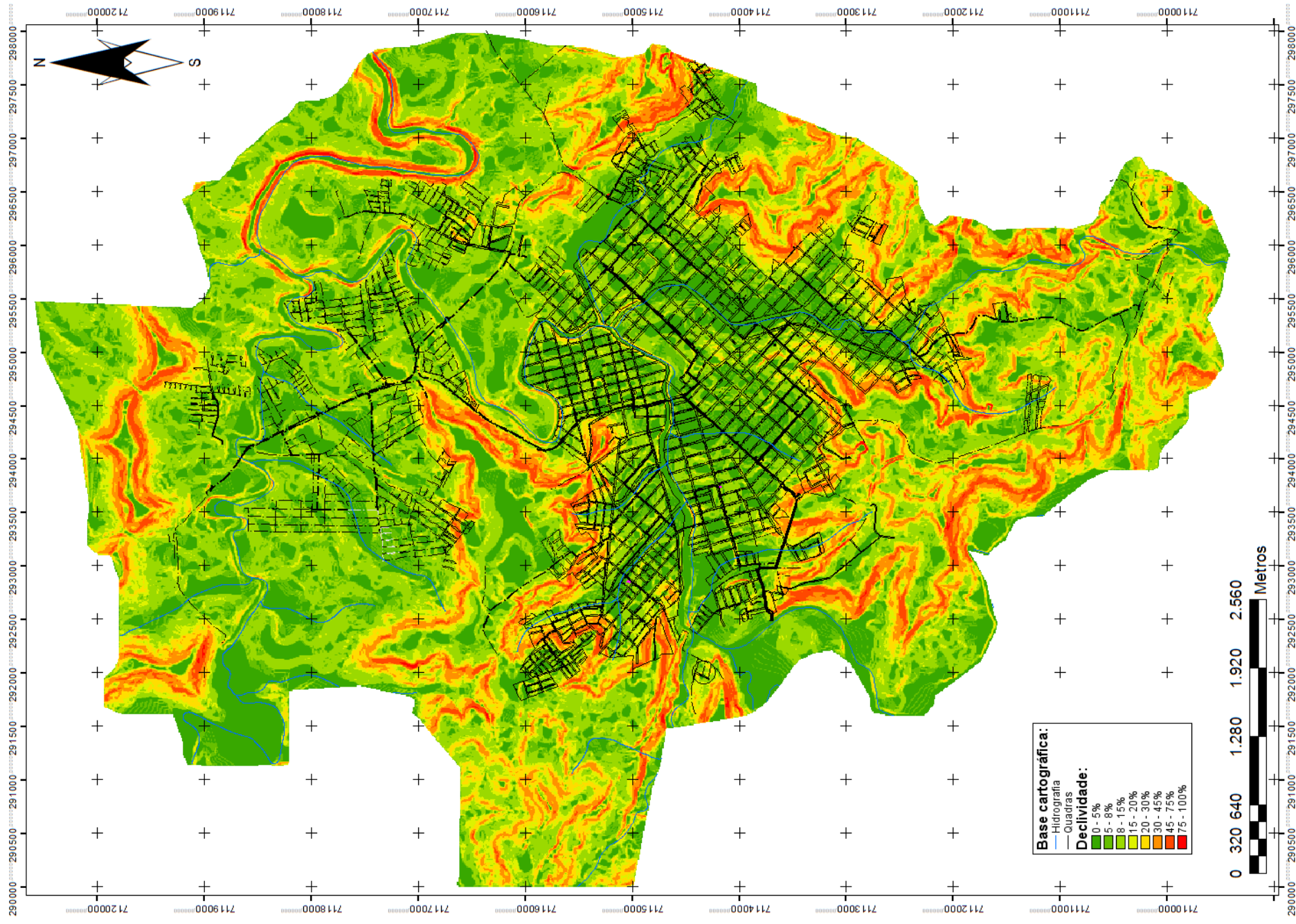


Figura 40 - Carta de Declividade para área de estudo.

Assim, gerou-se a partir do comando *Hilshade* um modelo de sombra da área de estudo, apresentado na Figura 41. Tal mapeamento tem a função de apresentar uma sensação de três dimensões, facilitando um entendimento do relevo encontrado na área de estudo e possibilitando a todos que venham a usufruir do trabalho uma fácil localização espacial quanto à declividade e altimetria.

Efetou-se então o levantamento da direção das encostas, as quais foram estabelecidos automaticamente pelo ArcGIS através da função “*Aspect*”, e como variável de entrada utilizou-se a declividade do terreno. Na área de estudo a maior concentração de área se encontra nas encostas com inclinação voltada para o nordeste, com 12,71% da área. As áreas não classificadas são áreas planas do terreno não tendo uma direção definida e são representadas por 13,13% da área de estudo. A Tabela 16 apresenta a distribuição da orientação das encostas e a Figura 42 apresenta o gráfico com a distribuição da direção das encostas, sendo que a classe 1 apresenta áreas não classificadas (ou planas), classe 2 encostas voltadas para o norte, a classe 3 encostas voltadas para o nordeste, classe 4 com encostas voltadas para o leste, classe 5 encostas voltadas para o sudeste, classe 6 encostas voltadas para o sul, classe 7 voltadas para o sudoeste, classe 8 encostas voltadas para o oeste e classe 9 encostas voltadas para o noroeste. A Figura 43 apresenta a carta de direção das encostas.

Hillshade

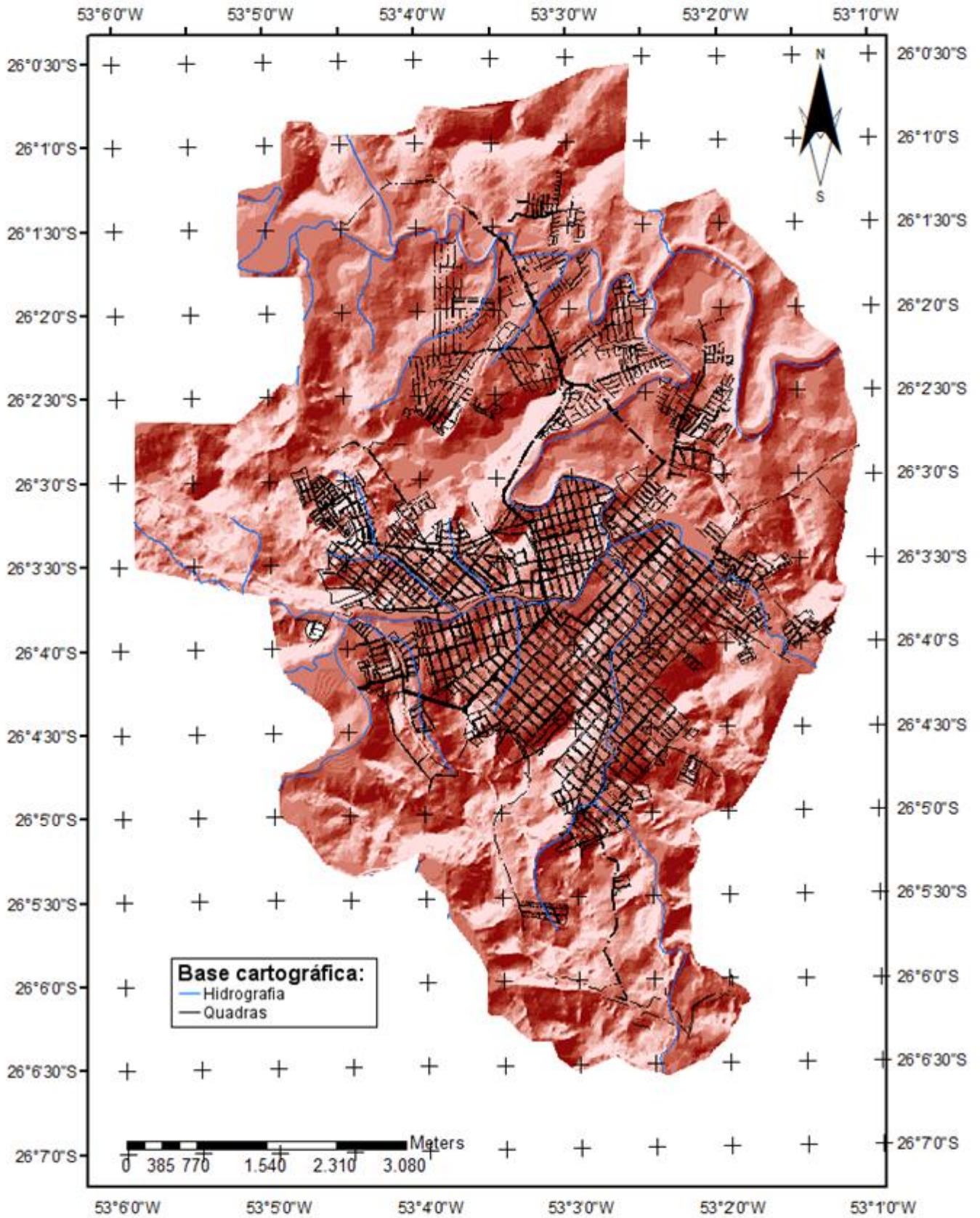


Figura 41 - Hillshade para área de estudo.

Tabela 16 - Direção das encostas na área de estudo.

Direção da encosta	Percentagem
Norte	11,51%
Nordeste	12,71%
Leste	10,01%
Sudeste	9,90%
Sul	8,36%
Sudoeste	11,74%
Oeste	10,48%
Noroeste	12,16%
Plana	13,13%
Total	100,00%

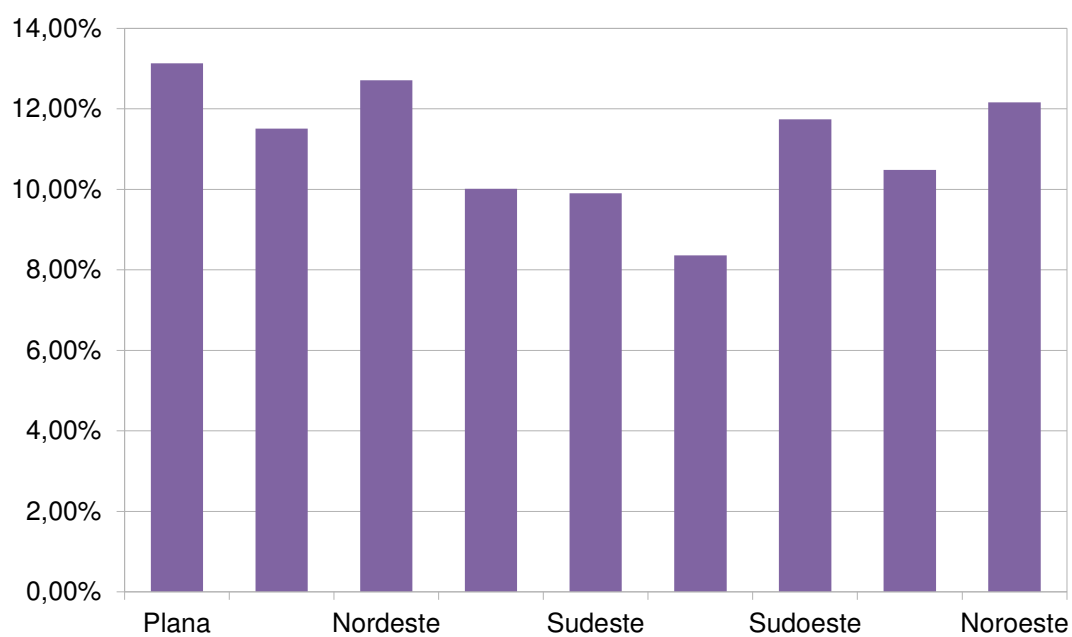


Figura 42 - Gráfico da direção das encostas com área em percentagem.

Carta de Direção das Encostas

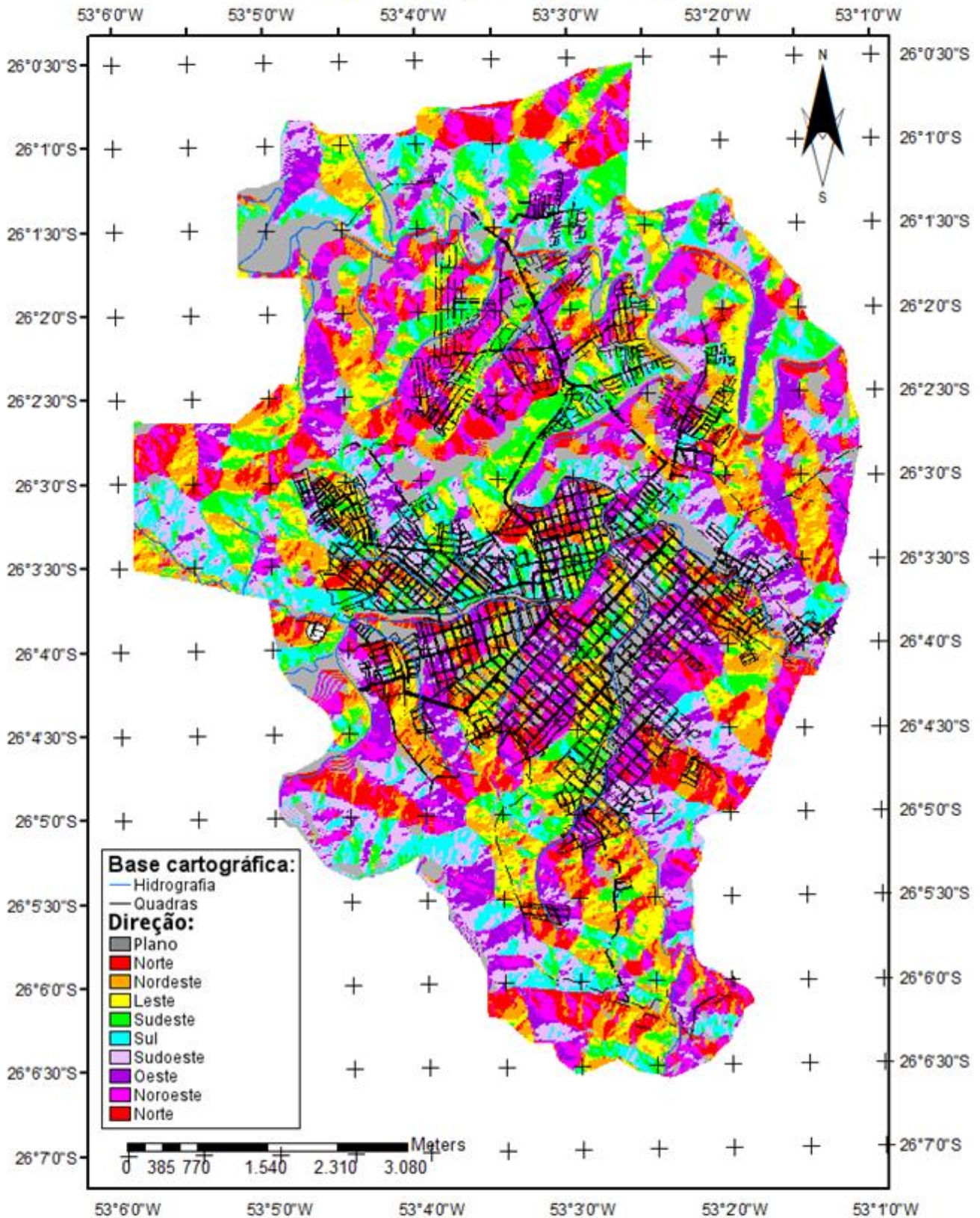


Figura 43 - Carta de Direção das Encostas para área estudada.

Efetuu-se, então, o levantamento da curvatura das encostas e foram estabelecidas automaticamente pelo ArcGIS através da função “*Curvature*”, como sendo positivas, negativas ou neutras. Posteriormente esses dados foram reclassificados para três classes de geometria: Convexa, Plana e Côncava, os valores positivos eram convertidos para geometria convexa, os valores neutros para geometria plana e os valores negativos para geometria côncava. Na região de estudo a distribuição entre as geometrias das encostas foi uniforme. A Tabela 17 apresenta a distribuição da área conforme a geometria das encostas e a Figura 44 apresenta o gráfico para a geometria das encostas. A Figura 45 Apresenta a carta de curvatura das encostas.

Tabela 17 - Geometria das encostas.

Geometria	Percentual da área total
Côncava	34,46%
Plana	32,83%
Convexa	32,71%
Total	100,00%

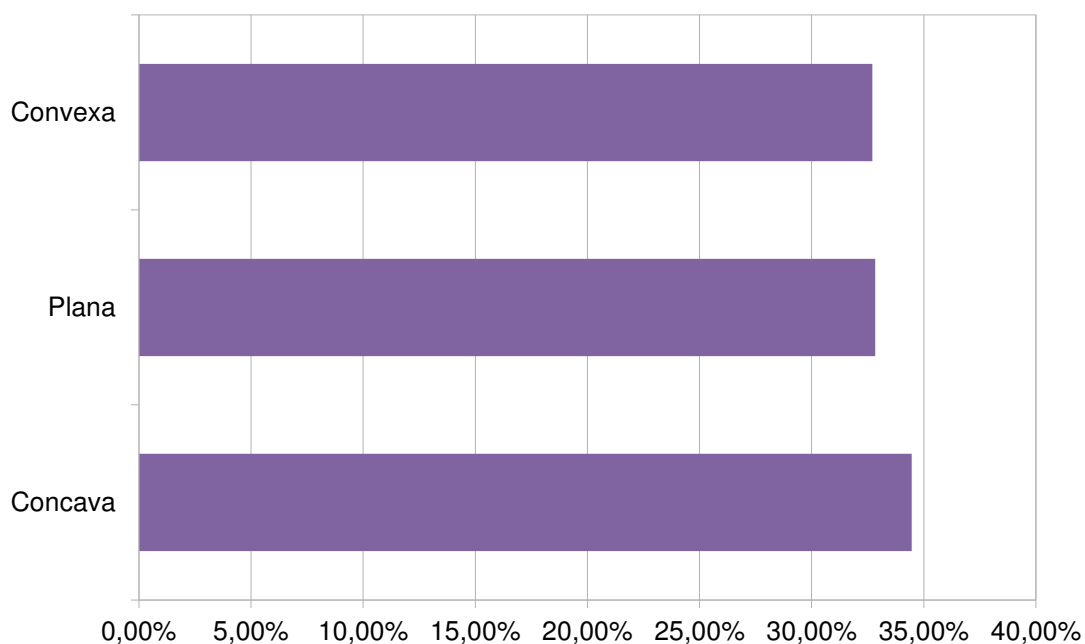


Figura 44 – Gráfico da distribuição da curvatura das encostas em percentagem.

Carta de Curvatura das Encostas

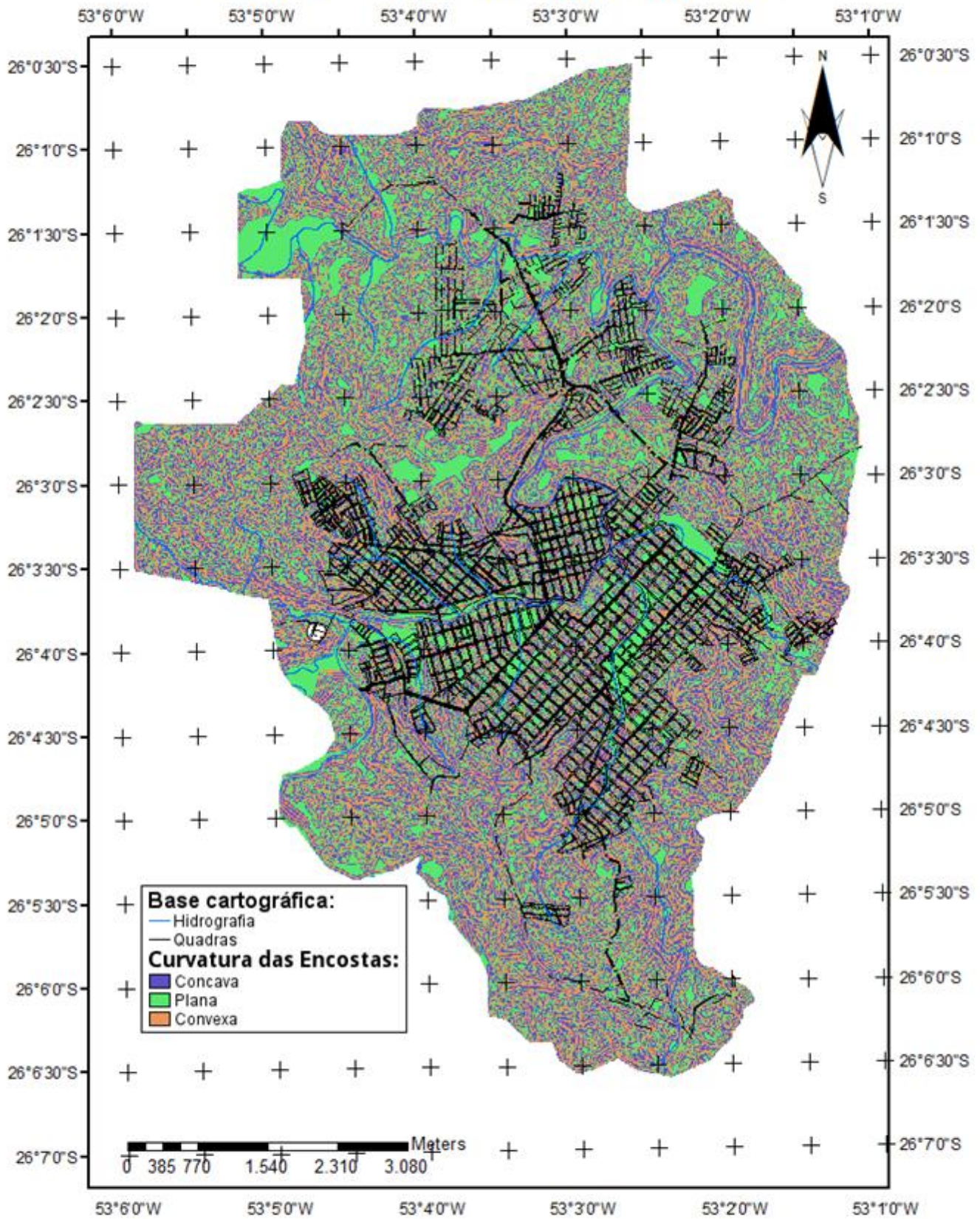


Figura 45 - Carta de curvatura das Encostas para área de estudo.

Para a classificação do uso e ocupação do solo fez-se uso do software SPRING e a imagem do satélite ALOS de 2009 foi importada para realização do treinamento e classificação com o algoritmo MAXVER – máxima verossimilhança.

Após a realização do treinamento obteve-se uma classificação total da área, com um desempenho geral de 89,65% e uma confusão média de 10,35%, além de cinco classes de uso do solo, sendo elas: Urbanização, Água, Gramíneas, Arbustos e Florestas. Os Arbustos se constituíram de vegetação menos densa e Florestas uma vegetação mais densa com uma área de copas maior e mais fechada.

Inicialmente planejou-se uma classe para solo exposto, porém o mesmo tem uma resposta espectral muito semelhante à resposta de áreas urbanizadas, o que impossibilitou essa classificação. As áreas de solo exposto são poucas e se concentraram em pequenas áreas de lavouras recém colhidas no entorno urbano.

A Figura 46 apresenta os dados de ocupação da área conforme as classes estabelecidas, com a área em porcentagem. A Figura 47 apresenta o mapa de uso e ocupação do solo para a área de estudo.

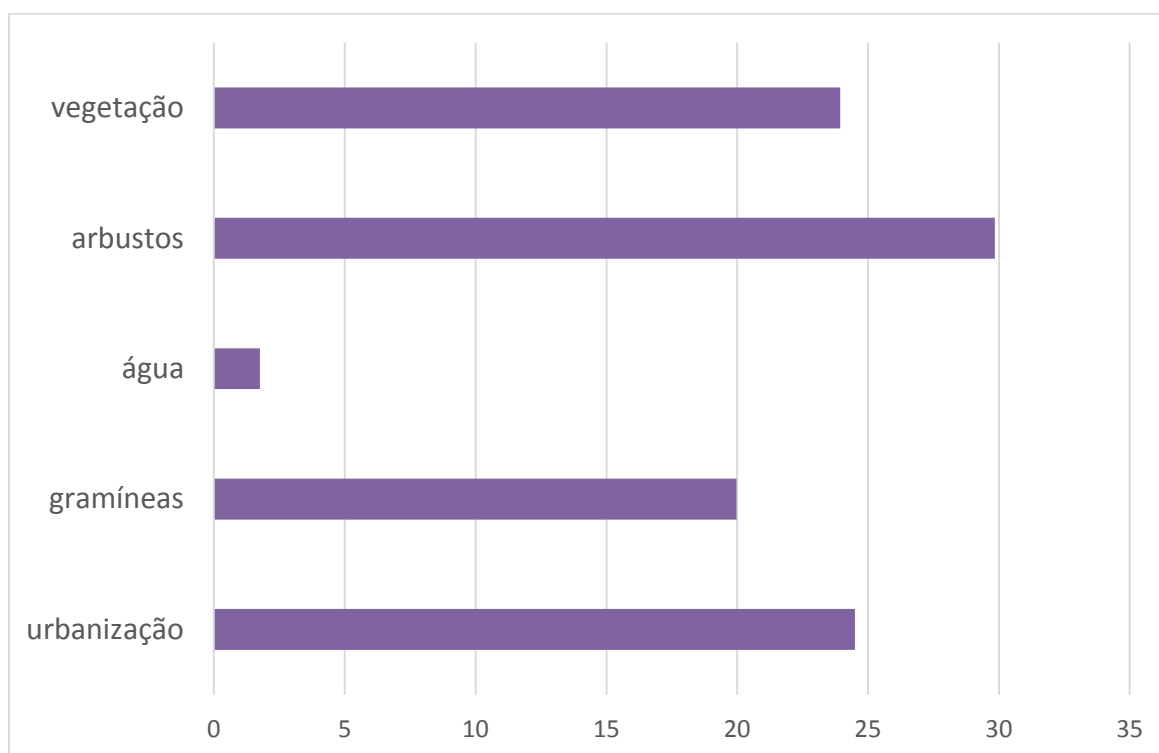


Figura 46 - Gráfico com as Classes de uso e ocupação do solo com área em porcentagem.

Carta de Uso e Ocupação do Solo

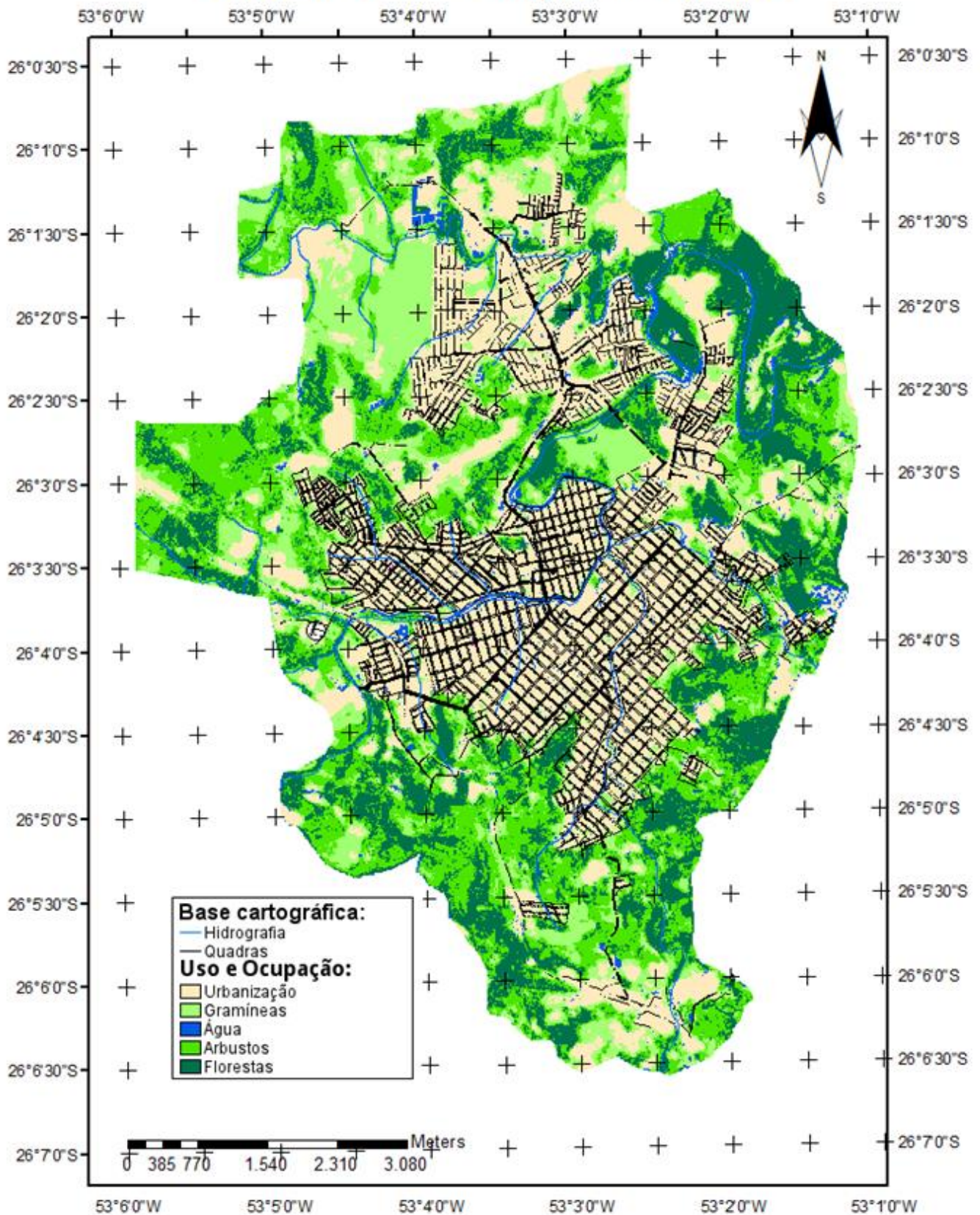


Figura 47 - Uso e ocupação do solo para área de estudo.

Para a definição das classes de solo existentes na área de estudo, partiu-se do mapa de solos da EMBRAPA, apresentado na Figura 48. Esse mapeamento se deu de forma mais abrangente de todo o território do estado do Paraná. Para um mapeamento mais detalhado das classes de solo encontradas na área de estudo utilizou-se álgebra de mapas e integrando a carta de declividade da área de estudo e o mapa de classes de solo da EMBRAPA, teve-se como resultado um mapeamento mais detalhado das classes de solo encontradas na área estudada, apresentado na Figura 49.

Carta Geral de Classes do Solo

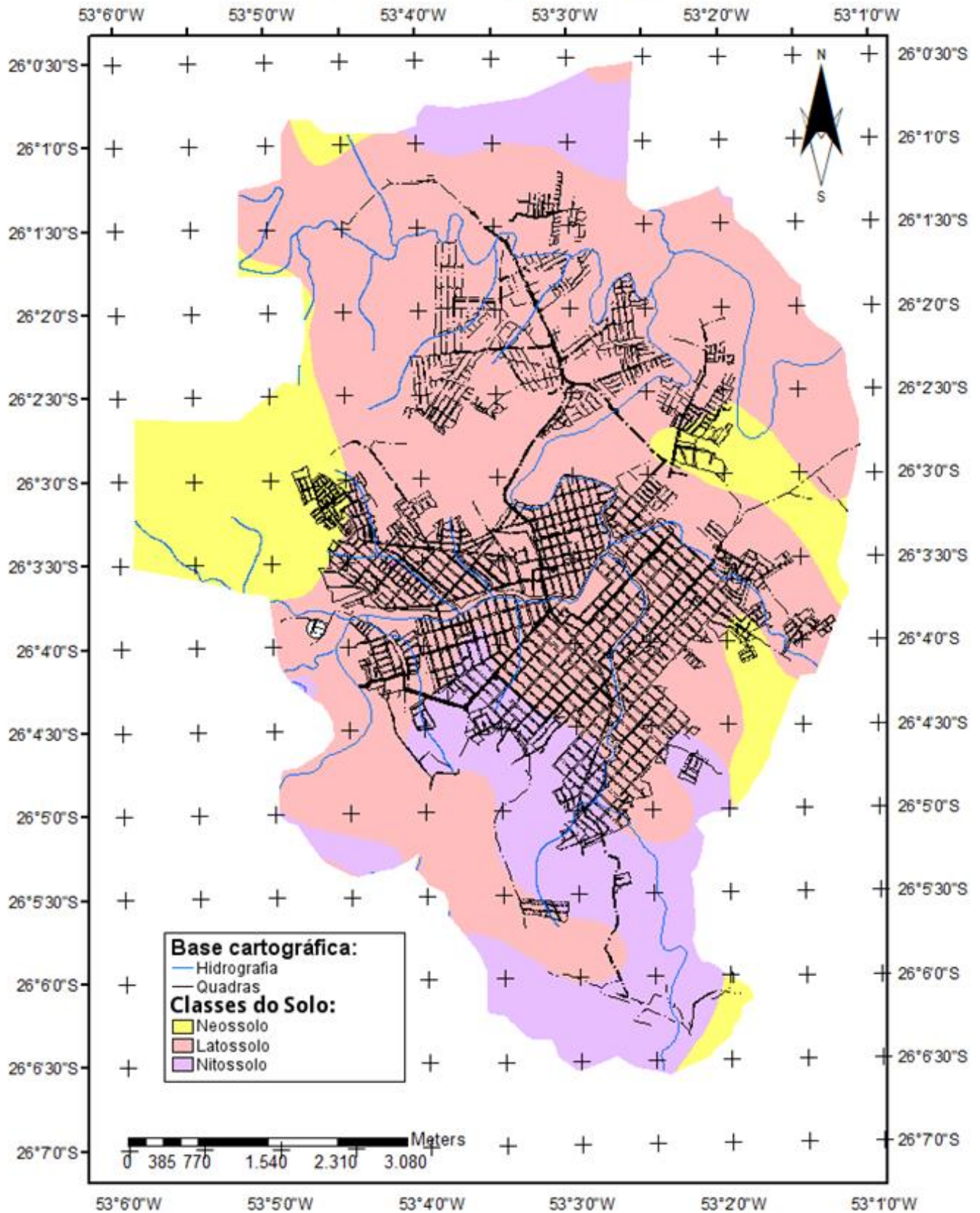


Figura 48 - Carta de Classes de Solo da EMBRAPA (2008), para área de estudo.

Carta de Classes de Solo

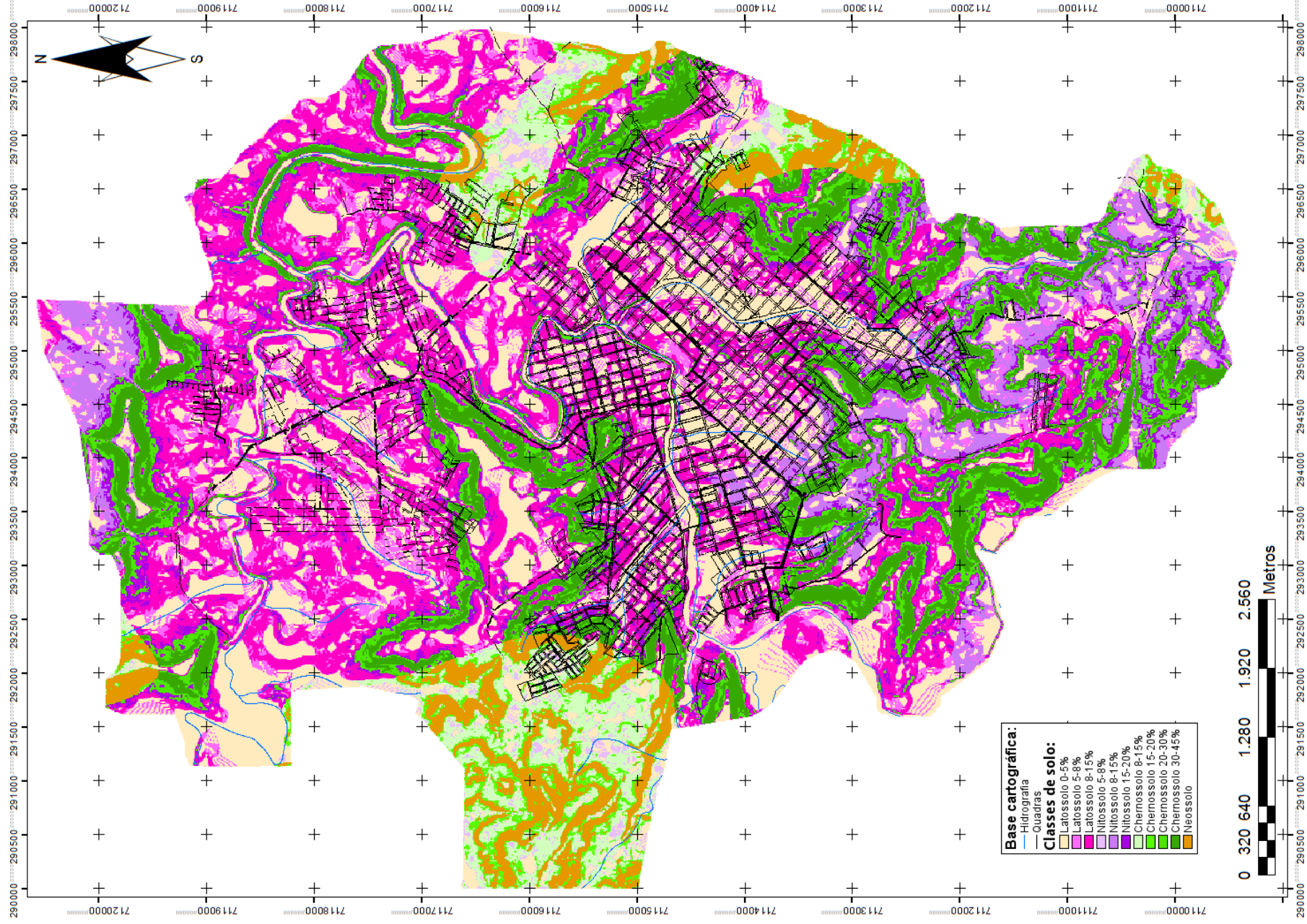


Figura 49 - Classes de solo para área de estudo.

5.2 ANÁLISES FÍSICAS E MECÂNICAS DO SOLO

Com as análises físicas do solo tem-se a caracterização da área de estudo. A Figura 50 apresenta a localização dos pontos analisados, os 24 pontos de análises físicas e geotécnicas do solo e os 63 pontos de análise de SPT.

Foram traçados onze perfis de solo para a área de estudo, apresentados no Quadro 5. Para esse traçado usou-se o trado holandês, e com o mesmo foi perfurado o solo até profundidade que permitisse a perfuração manual. Em alguns pontos o traçado ocorreu até o horizonte R, em outros, até início do horizonte C, conforme a condição de intemperização do solo encontrado. Em dois pontos não foram possíveis escavações além do horizonte B devido à profundidade do mesmo.

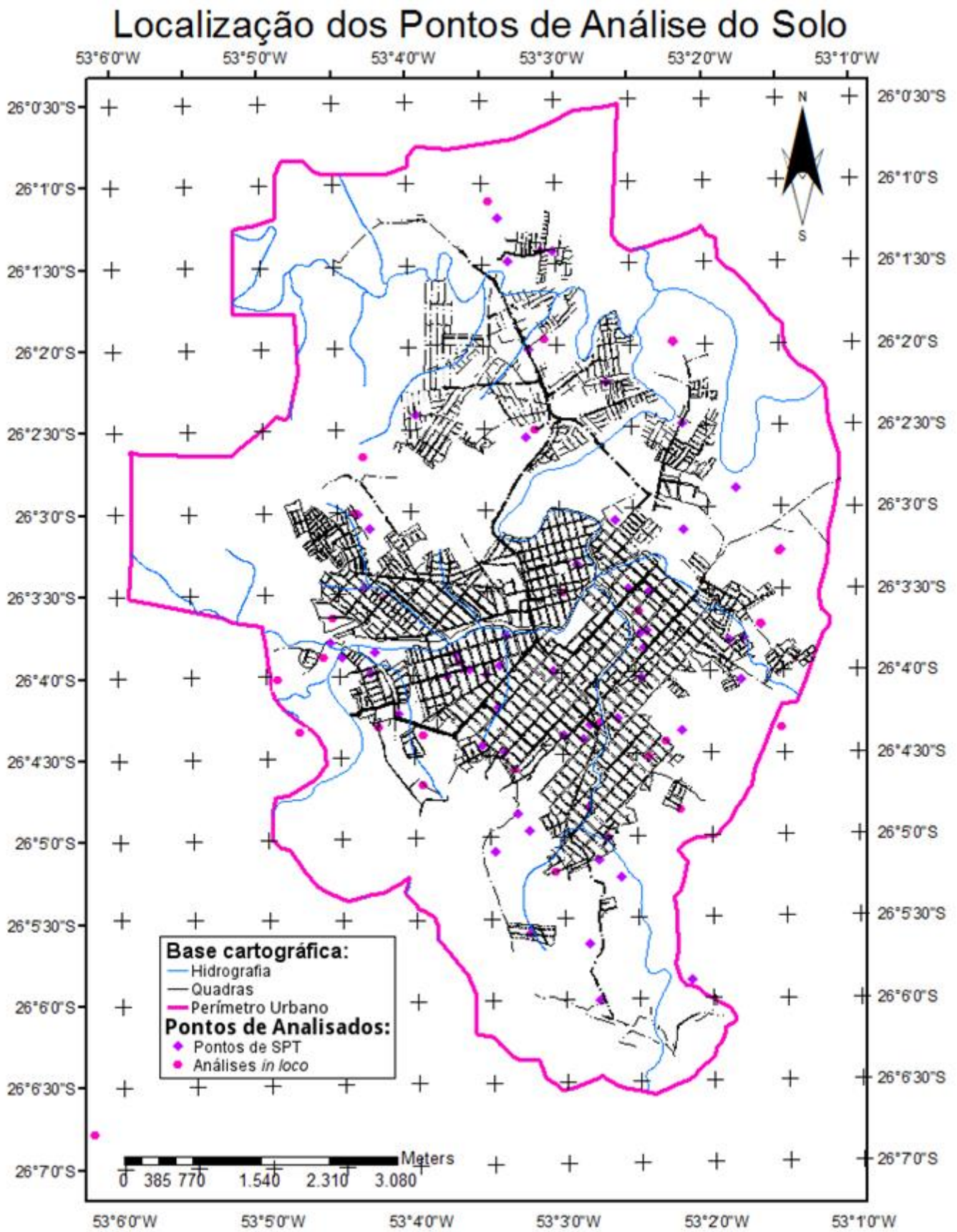


Figura 50 - Localização dos pontos de análise de solo.





Quadro 5 - Traçados dos principais pontos da área de estudo.

Ponto 01 – Rio Tuna	
	<p>Traçado de perfil do solo com auxílio de trado holandês. Profundidade: 0 – 86 cm Horizonte: C. Solo de características orgânicas. Classe de solo: Nitossolo</p>
	
Ponto 02 - Júpiter	
	<p>Traçado de perfil do solo com auxílio de trado holandês. Profundidade: 0 – 140 cm Horizonte: B. Para este traçado não se teve profundidade suficiente com o trado, e realizando medições no perfil do solo obteve-se um valor de 3 m até o horizonte C.</p>
	<p>Classe de solo: Latossolo</p>

(continuação do Quadro 5)

Ponto 04 – Bom Pastor	
	<p>Traçado de perfil do solo com auxílio de trado holandês. Profundidade: 0 – 84 cm Horizonte: R. Classe de solo: Chernossolo.</p> <p>O ponto de coleta e traçado do perfil do solo se deu na parte superior do talude, e a imagem do perfil apresenta a parte inferior do mesmo.</p>
	
Ponto 05 – São Francisco	
	<p>Traçado de perfil do solo com auxílio de trado holandês. Profundidade: 0 – 119 cm Horizonte: R. Solo de características orgânicas. Classe de solo: Nitossolo.</p>
	

(continuação do Quadro 5)

Ponto 09 - Passaura	
	Traçado de perfil do solo com auxílio de trado holandês. Profundidade: 0 – 60 cm Horizonte: C. Classe de solo: Neossolo.
	
Ponto 12 - Marrecas	
	Traçado de perfil do solo com auxílio de trado holandês. Profundidade: 0 – 89 cm Horizonte: R. Classe de solo: Chernossolo.
	

(continuação do Quadro 5)

Ponto 13 - Alodi	
	<p>Traçado de perfil do solo com auxílio de trado holandês. Profundidade: 0 – 74 cm Horizonte: C. Solo de características orgânicas. Classe de solo: Nitossolo.</p>
Ponto 14 – São Cristóvão	
	<p>Traçado de perfil do solo com auxílio de trado holandês. Profundidade: 0 – 62 cm Horizonte: C. Classe de solo: Chernossolo.</p>
	

(continuação do Quadro 5)

Ponto 15 – Carneiro Neto

Traçado de perfil do solo com auxílio de trado holandês.
Profundidade: 0 – 62 cm
Horizonte: C.
Classe de solo: Chernossolo.



(continuação do Quadro 5)

Ponto 18 - Prolongamento	
	<p>Traçado de perfil do solo com auxílio de trado holandês. Profundidade: 0 – 81 cm Horizonte: C. Classe de solo: Chernossolo.</p>
	
Ponto 20 – Sol Nascente	
	<p>Traçado de perfil do solo com auxílio de trado holandês. Profundidade: 0 – 61 cm Horizonte: R. Classe de solo: Chernossolo.</p>
	

(continuação do Quadro 5)

Ponto 21 – Scoti	
	<p>Traçado de perfil do solo com auxílio de trado holandês. Profundidade: 0 – 114 cm Horizonte: R.</p> <p>Para este ponto a partir dos 64 cm de profundidade deu-se encontro com horizonte C, intemperizado, que possibilitou continuidade do traçado do perfil até a profundidade de 114 cm, encontrado horizonte R. Classe de solo: Neossolo.</p>
	

A Tabela 18 traz os resultados obtidos da análise granulométrica por sedimentação das amostras. E a Figura 51 apresenta a alocação dos pontos no triângulo textural. Os gráficos de granulometria são apresentados no apêndice A, juntamente com as respectivas tabelas.

Tabela 18 - Análise granulométrica de sedimentação.

Ponto	% de Argila	% de Silte	% de Areia	Classe textural
Ponto 01 Rio Tuna	55,0	35,8	9,2	Argilosa
Ponto 02 Júpiter	86,0	11,8	2,2	Muito- Argilosa
Ponto 03 Frigobel	41,89	43,67	14,5	Argilo -Siltosa
Ponto 04 Bom Pastor	71,0	21,5	7,5	Muito - Argilosa
Ponto 05 São Francisco	67,8	27,2	5,0	Muito - Argilosa
Ponto 06 Quartel	68,86	26,56	4,58	Muito - Argilosa
Ponto 07 Bica	41,5	49,8	8,7	Argilo - Siltosa
Ponto 08 Trincheira	75,9	21,3	2,8	Muito - Argilosa
Ponto 09 Passaura	64,6	30,3	5,1	Muito - Argilosa
Ponto 10 UTF	76,0	20,7	3,3	Muito - Argilosa
Ponto 11 Arquitetos	48,1	30,5	21,4	Argilosa
Ponto 12 Marrecas	56,5	37,5	6,0	Argilosa
Ponto 13 Alodi	56	34,2	9,8	Argilosa
Ponto 14 São Cristóvão	60,2	35,4	4,4	Muito - Argilosa
Ponto 15 Carneiro Neto	58,2	36,4	5,4	Argilosa
Ponto 16 Sanderson	62,5	33,8	3,7	Muito - Argilosa
Ponto 17 Unipar	64,4	32,5	3,1	Muito - Argilosa
Ponto 18 Prolongamento	54,3	34,1	11,6	Argilosa
Ponto 19 Cerealista	73,86	21,2	4,94	Muito - Argilosa
Ponto 20 Sol Nascente	48,4	37,7	13,9	Argilosa
Ponto 21 Scotti	35,8	43,1	21,1	Franco-Argilosa
Ponto 22 Aluvan	59,6	36,2	4,2	Muito - Argilosa
Ponto 23 Marabá	41,3	50,2	8,5	Argilo - Siltosa
Ponto 24 Pinheiros	51,35	35,9	12,75	Argilosa

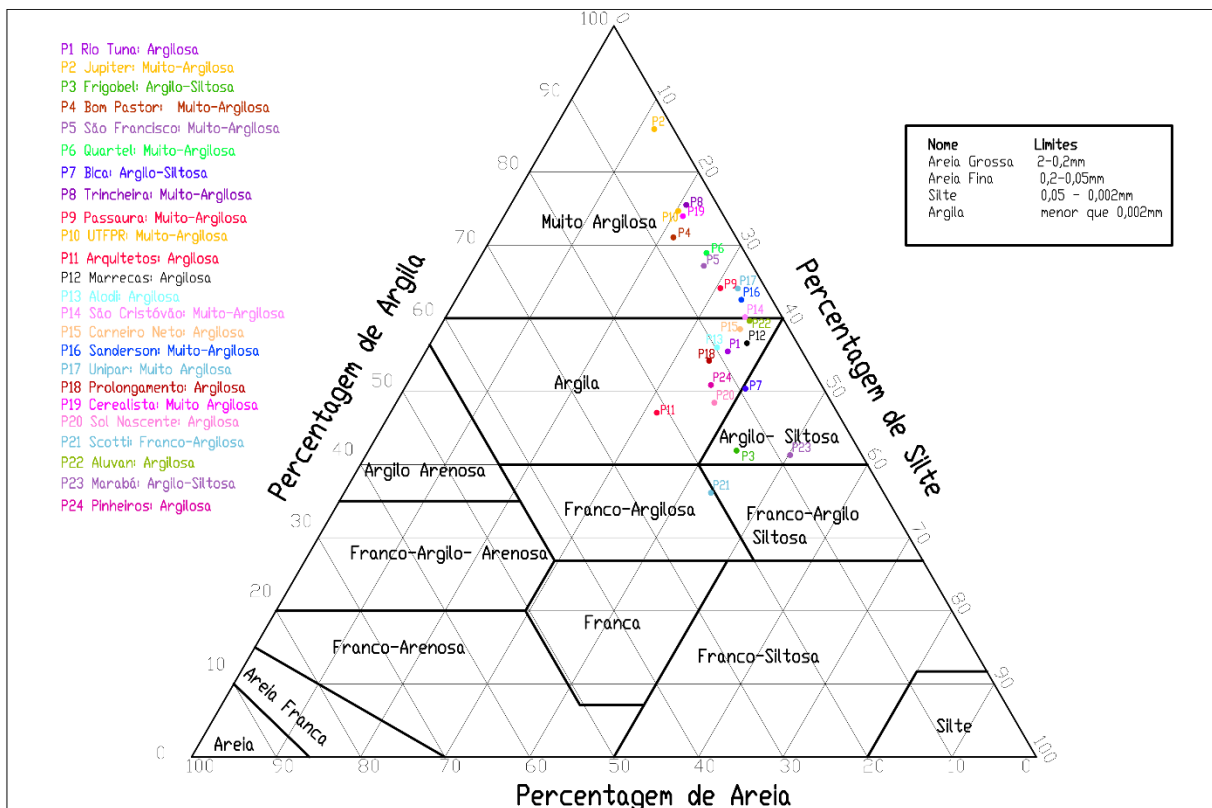


Figura 51 - Triângulo textural e locação dos pontos analisados.

Após os testes de infiltração do solo obteve-se como resultado a velocidade básica de infiltração – VBI, para 23 pontos de estudo. Com os testes de infiltração os dados primários, os quais são apresentados no apêndice B, foram submetidos à análise estatística para determinação empírica das equações de infiltração de água no solo, o método utilizado foi o de Kostiakov, e apresentam-se na Tabela 19 os resultados obtidos. Destaca-se que para o ponto 21, o teste de infiltração foi impossibilitado devido à implantação de um loteamento na área que realizou cortes e aterros no ponto amostrado e em seu entorno, após início do estudo.

Tabela 19 - Dados do teste de infiltração por infiltrômetro de anéis.

Ponto	VBI mm/h	Equação de Velocidade de Infiltração Média
Ponto 01 Rio Tuna	141,75	$VIm = 0,5775 \cdot T^{-0,15868}$
Ponto 02 Júpiter	274,65	$VIm = 2,3652 \cdot T^{-0,34641}$
Ponto 03 Frigobel	80	$VIm = 0,1821 \cdot T^{-0,02565}$
Ponto 04 Bom Pastor	293,30	$VIm = 1,9713 \cdot T^{-0,33582}$
Ponto 05 São Francisco	98,40	$VIm = 0,2933 \cdot T^{-0,1334}$
Ponto 06 Quartel	323	$VIm = 2,333 \cdot T^{-0,30316}$
Ponto 07 Bica	169,5	$VIm = 3,7999 \cdot T^{-0,54939}$
Ponto 08 Trincheira	56,04	$VIm = 0,1124 \cdot T^{-0,37915}$
Ponto 09 Passaura	183,78	$VIm = 5,1945 \cdot T^{-0,31282}$
Ponto 10 UTF	54,54	$VIm = 1,6543 \cdot T^{-0,99731}$
Ponto 11 Arquitetos	310,4	$VIm = 2,168 \cdot T^{-0,32779}$
Ponto 12 Marrecas	87,60	$VIm = 0,058 \cdot T^{0,272636}$
Ponto 13 Alodi	92,00	$VIm = 5,033 \cdot T^{-0,99994}$
Ponto 14 São Cristóvão	82,16	$VIm = 5,2166 \cdot T^{-0,9999}$
Ponto 15 Carneiro Neto	425,71	$VIm = 16,5802 \cdot T^{-0,97813}$
Ponto 16 Sanderson	92,55	$VIm = 1,99 \cdot T^{-0,12772}$
Ponto 17 Unipar	74,29	$VIm = 0,6563 \cdot T^{-0,41569}$
Ponto 18 Prolongamento	5,91	$VIm = 10,1036 \cdot T^{-0,99963}$
Ponto 19 Cerealista	66,4	$VIm = 0,0979 \cdot T^{0,047657}$
Ponto 20 Sol Nascente	69,54	$VIm = 0,157 \cdot T^{-0,02819}$
Ponto 21 Scotti	-	-
Ponto 22 Aluvan	54,11	$VIm = 0,74288 \cdot T^{-0,56249}$
Ponto 23 Marabá	171,66	$VIm = 0,471 \cdot T^{-0,18729}$
Ponto 24 Pinheiros	133,73	$VIm = 0,20106 \cdot T^{0,027588}$

Os resultados das análises de limites de consistência, Limite de liquidez (LL), Limite de Plasticidade (LP) Índice de Plasticidade (IP), Índice de Liquidez (IL), teor de umidade, peso específico – natural, saturado e submerso, dos 24 pontos amostrados são apresentados na Tabela 20.

A partir dos dados de análises físicas e geotécnicas das caracterizações dos solos, teve-se como principal resultado a classificação unificada dos solos, a qual é apresentada na Tabela 21 para os pontos amostrados, fazendo a classificação unificada dos pontos.

Tabela 20 - Resultados das análises geotécnicas do solo.

Ponto	LL	LP	IP	IL	W	γ_{sec}	γ_{nat}	γ_{sat}	γ_{sub}
Ponto 01 Rio Tuna	50,26	35,31	14,95	0,74	39,16	12,46	16,92	17,57	7,57
Ponto 02 Júpiter	60,48	52,27	8,21	1,71	46,42	10,36	14,93	17,06	7,06
Ponto 03 Frigobel	36,37	34,11	2,27	0,47	35,31	10,75	14,40	15,92	5,92
Ponto 04 Bom Pastor	50,95	36,93	14,02	0,49	44,04	10,76	15,46	17,15	7,15
Ponto 05 São Francisco	71,95	49,62	22,33	0,87	52,61	11,49	17,15	19,04	9,04
Ponto 06 Quartel	33,84	28,2	5,63	-0,22	35,09	11,12	16,83	16,85	6,85
Ponto 07 Bica	32,77	27,95	4,82	-1,53	40,15	12,85	18,00	13,61	3,61
Ponto 08 Trincheira	37,83	34,31	3,52	-3,57	50,38	13,24	19,91	19,90	9,90
Ponto 09 Passaura	48,34	49,36	40,38	0,19	40,48	9,35	12,95	14,31	4,31
Ponto 10 UTF	33,83	27,32	6,51	-0,44	36,68	14,12	18,83	20,82	10,82
Ponto 11 Arquitetos	29,89	26,21	3,68	-3,76	43,73	12,17	17,49	22,01	12,01
Ponto 12 Marrecas	46,32	49,66	35,38	0,02	45,72	11,41	16,24	18,54	8,54
Ponto 13 Alodi	45,08	32,07	13,01	1,07	31,11	14,62	18,71	18,77	8,77
Ponto 14 São Cristóvão	49,59	50,93	44,05	0,00	49,78	12,08	17,58	17,58	7,58
Ponto 15 Carneiro Neto	42,47	44,48	38,2	-0,01	42,84	9,70	14,59	17,51	7,51
Ponto 16 Sanderson	36,34	31,11	5,23	-0,79	40,49	10,65	15,58	17,23	7,23
Ponto 17 Unipar	36,8	32,47	4,33	-2,08	45,82	8,45	12,32	19,33	9,33
Ponto 18 Prolongamento	45,47	48,34	40,00	0,08	42,14	11,77	16,01	17,79	7,79
Ponto 19 Cerealista	38,97	25,47	13,50	0,55	31,5	13,72	18,17	18,22	8,22
Ponto 20 Sol Nascente	44,94	45,63	38,39	0,31	32,93	14,35	18,82	18,87	8,87
Ponto 21 Scotti	38,22	38,41	34,56	0,07	35,97	9,10	12,37	16,48	6,48
Ponto 22 Aluvan	69,7	47,65	22,05	0,98	48,18	8,86	13,13	15,53	5,53
Ponto 23 Marabá	52,07	37,8	14,27	2,28	19,52	14,07	16,82	20,07	10,07
Ponto 24 Pinheiros	45,09	22,13	22,96	1,01	21,8	16,90	20,58	23,11	13,11

Tabela 21 - Classificação unificada do solo para os pontos amostrados.

Ponto	Granulação Fina	Compressibilidade	Classificação Unificada
Ponto 01 Rio Tuna	Orgânico	Baixa – Alta	OLH
Ponto 02 Júpiter	Orgânico	Alta	MH
Ponto 03 Frigobel	Silte	Baixa	ML
Ponto 04 Bom Pastor	Silte	Baixa – Alta	MLH
Ponto 05 São Francisco	Orgânico	Alta	OH
Ponto 06 Quartel	Orgânico	Baixa	OL
Ponto 07 Bica	Silte	Baixa	ML
Ponto 08 Trincheira	Silte	Baixa	ML
Ponto 09 Passaura	Argila	Baixa	CL
Ponto 10 UTF	Argila - Orgânico	Baixa	COL
Ponto 11 Arquitetos	Argila	Baixa	CL
Ponto 12 Marrecas	Argila	Baixa	CL
Ponto 13 Alodi	Orgânico	Baixa	OL
Ponto 14 São Cristóvão	Argila	Baixa – Alta	CLH
Ponto 15 Carneiro Neto	Argila	Baixa	CL
Ponto 16 Sanderson	Orgânico	Baixa	OL
Ponto 17 Unipar	Orgânico	Baixa	OL
Ponto 18 Prolongamento	Argila	Baixa	CL
Ponto 19 Cerealista	Orgânico	Baixa	OL
Ponto 20 Sol Nascente	Argila	Baixa	CL
Ponto 21 Scotti	Argila	Baixa	CL
Ponto 22 Aluvan	Orgânico	Alta	HO
Ponto 23 Marabá	Silte	Baixa – Alta	LHM
Ponto 24 Pinheiros	Argila	Baixa	LC

Os dados de sondagem do solo foram obtidos junto a empresa GBS Fundações LTDA, forneceu os dados disponíveis para a cidade de Francisco Beltrão, totalizando 63 pontos, com distribuição espacial apresentada na Figura 50. Foram então submetidos aos cálculos descritos no item 4.3, obtendo como resultado o ângulo de atrito do solo e coesão para os pontos, apresentados na Tabela 22.

Tabela 22- Dados de Sondagem a percussão - SPT.

Ponto	NSPT	Classe do solo	Declividade (%)	Z (m)	ϕ (graus)	C (kPa)	γ' nat (kN/m ³)	γ' sub (kN/m ³)	γ' sat (kN/m ³)
SPT01	15	Latossolo	0 - 5	7	35,26	17,56	14,10	5,59	15,59
SPT02	18	Latossolo	5 - 8	7	36,60	22,43	15,24	6,64	16,64
SPT03	07	Latossolo	8 - 15	9	29,79	1,99	16,38	7,70	17,70
SPT04	27	Latossolo	0 - 5	12	37,77	45,20	14,10	5,59	15,59
SPT05	16	Latossolo	8 - 15	2,75	39,34	13,66	16,38	7,70	17,70
SPT06	20	Latossolo	8 - 15	4,9	39,31	21,40	16,38	7,70	17,70
SPT07	12	Chernossolo	8 - 15	2,6	37,56	9,11	17,17	8,74	18,74
SPT08	20	Latossolo	0 - 5	11	35,74	29,95	14,10	5,59	15,59
SPT09	20	Latossolo	5 - 8	9	36,43	28,13	15,24	6,64	16,64
SPT10	16	Latossolo	0 - 5	5	37,55	16,21	14,10	5,59	15,59
SPT11	30	Latossolo	0 - 5	10,6	39,14	48,95	14,10	5,59	15,59
SPT12	09	Latossolo	8 - 15	4	34,27	6,83	16,38	7,70	17,70
SPT13	29	Latossolo	5 - 8	4,8	43,62	30,50	15,24	6,64	16,64
SPT14	32	Latossolo	5 - 8	5	44,81	33,64	15,24	6,64	16,64
SPT15	25	Latossolo	5 - 8	9,6	38,44	36,32	15,24	6,64	16,64
SPT16	27	Latossolo	0 - 5	12,8	37,67	45,61	14,10	5,59	15,59
SPT17	35	Latossolo	8 - 15	2,35	49,49	28,40	16,38	7,70	17,70
SPT18	28	Latossolo	0 - 5	8,55	39,58	40,89	14,10	5,59	15,59
SPT19	11	Neossolo	> 45	4	35,38	9,35	14,05	6,96	16,96
SPT20	35	Latossolo	8 - 15	5,5	44,05	42,84	16,38	7,70	17,70
SPT21	30	Latossolo	5 - 8	8,9	40,74	42,12	15,24	6,64	16,64
SPT22	36	Latossolo	0 - 5	9,1	41,47	56,76	14,10	5,59	15,59
SPT23	29	Latossolo	0 - 5	12,8	38,76	47,44	14,10	5,59	15,59
SPT24	21	Latossolo	8 - 15	7,25	37,47	28,14	16,38	7,70	17,70
SPT25	09	Latossolo	0 - 5	8,57	31,19	6,80	14,10	5,59	15,59
SPT26	05	Latossolo	5 - 8	6	29,23	2,00	15,24	6,64	16,64
SPT27	29	Latossolo	0 - 5	10,45	39,10	45,93	14,10	5,59	15,59
SPT28	30	Latossolo	5 - 8	8,85	40,27	44,01	15,24	6,64	16,64
SPT29	34	Latossolo	0 - 5	11	40,68	54,44	14,10	5,59	15,59
SPT30	13	Latossolo	5 - 8	6,7	34,21	14,32	15,24	6,64	16,64
SPT31	32	Latossolo	5 - 8	5	44,81	33,64	15,24	6,64	16,64
SPT32	28	Latossolo	5 - 8	9	39,88	39,76	15,24	6,64	16,64
SPT33	37	Latossolo	8 - 15	5	46,47	39,46	16,38	7,70	17,70
SPT34	26	Latossolo	8 - 15	5	42,02	28,18	16,38	7,70	17,70
SPT35	27	Nitossolo	15 - 20	2	47,61	19,30	18,59	9,94	19,94
SPT36	15	Latossolo	8 - 15	6,63	35,15	17,72	16,38	7,70	17,70
SPT37	27	Latossolo	5 - 8	6	41,44	32,01	15,24	6,64	16,64
SPT38	27	Latossolo	5 - 8	6,6	41,13	32,94	15,24	6,64	16,64
SPT39	22	Nitossolo	15 - 20	2,4	42,68	19,04	18,59	9,94	19,94
SPT40	30	Latossolo	8 - 15	4,9	43,84	32,06	16,38	7,70	17,70
SPT41	29	Latossolo	0 - 5	6,7	42,08	34,87	14,10	5,59	15,59
SPT42	15	Latossolo	8 - 15	5,9	35,98	16,49	16,38	7,70	17,70
SPT43	27	Latossolo	0 - 5	9,8	38,87	40,68	14,10	5,59	15,59
SPT45	19	Nitossolo	5 - 8	3,8	40,56	2,00	18,59	9,94	19,94
SPT46	26	Latossolo	8 - 15	3,5	43,28	17,19	16,38	7,70	17,70
SPT47	24	Latossolo	8 - 15	3,9	42,37	25,23	16,38	7,70	17,70
SPT48	19	Latossolo	8 - 15	2,7	41,08	23,28	16,38	7,70	17,70
SPT49	21	Chernossolo	20 - 30	4	41,26	16,39	17,17	8,74	18,74

(continuação da Tabela 22)

Ponto	NSPT	Classe do solo	Declividade (%)	Z (m)	ϕ (graus)	C (kPa)	γ'_{nat} (kN/m ³)	γ'_{sub} (kN/m ³)	γ'_{sat} (kN/m ³)
SPT51	27	Latossolo	8 - 15	4	43,91	19,69	16,38	7,70	17,70
SPT52	28	Chernossolo	30 - 45	4,6	41,64	2,00	17,17	8,74	18,74
SPT53	35	Neossolo	> 45	1,94	58,20	25,80	14,05	6,96	16,96
SPT54	24	Chernossolo	8 - 15	3,5	42,37	33,80	17,17	8,74	18,74
SPT55	33	Latossolo	8 - 15	3	49,64	17,39	16,38	7,70	17,70
SPT56	22	Latossolo	8 - 15	2,8	43,38	23,28	16,38	7,70	17,70
SPT57	35	Nitossolo	15 - 20	3	49,49	24,99	18,59	9,94	19,94
SPT58	32	Latossolo	0 - 5	4,45	44,62	17,92	14,10	5,59	15,59
SPT59	32	Nitossolo	8 - 15	2	50,72	28,40	18,59	9,94	19,94
SPT60	23	Nitossolo	8 - 15	2,6	43,90	34,18	18,59	9,94	19,94
SPT61	7	Chernossolo	20 - 30	2,6	32,79	21,88	17,17	8,74	18,74
SPT62	27	Latossolo	0 - 5	12,8	37,67	18,74	14,10	5,59	15,59
SPT63	26	Latossolo	0 - 5	8,7	39,01	4,45	14,10	5,59	15,59

Para a realização do mapeamento de susceptibilidade, os dados foram agrupados conforme a classe de solo pertence e a classe de declividade, resultando em valores médios de ângulo de atrito, coesão e peso específico, apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 – Dados de SPT agrupados por características de solo e declividade.

Classe do solo	Declividade (%)	Z (m)	ϕ (graus)	C (kPa)	γ'_{nat} (kN/m ³)	γ'_{sub} (kN/m ³)	γ'_{sat} (kN/m ³)
Latossolo	0-5	9,49	38,60	33,67	14,10	5,59	15,59
Latossolo	5-8	7,07	40,08	31,57	15,24	6,64	16,64
Latossolo	8-15	4,72	40,94	22,40	16,38	7,69	17,69
Nitossolo	5-8	3,80	40,56	31,29	18,59	9,94	19,94
Nitossolo	8-15	2,30	47,31	31,29	18,59	9,94	19,94
Nitossolo	15-20	2,60	47,35	20,17	18,59	9,94	19,94
Chernossolo	8-15	3,05	39,96	21,45	17,17	8,73	18,73
Chernossolo	15-20	2,87	39,96	21,45	17,17	8,73	18,73
Chernossolo	20-30	2,87	40,55	19,18	17,17	8,73	18,73
Chernossolo	30-45	2,87	41,64	15,00	17,17	8,73	18,73
Neossolo	30-100	1,94	58,21	25,80	14,05	6,95	16,95

Paras as Tabela 23 e Tabela 23 considere-se:

Z – profundidade (m);

ϕ – ângulo de atrito com o solo (graus);

c – coesão (kPa);

γ_{sec} – peso específico do solo seco (kN/m³);

γ_{sub} – peso específico do solo submerso (kN/m³);

γ_{nat} – peso específico do solo natural (kN/m³);

γ_{sat} – peso específico do solo saturado (kN/m³);

5.3 MAPEAMENTO DE SUSCEPTIBILIDADE

Para o mapeamento de susceptibilidade a movimentos de massa, com base no cálculo do fator de segurança, os mapas base foram gerados utilizando álgebra de mapas. Dessa forma, obteve-se como resultado final quatro mapas distintos para o fator de segurança no perímetro urbano da cidade de Francisco Beltrão.

Foram consideradas duas possibilidades de saturação das encostas: primeiro solo natural, não saturado, a profundidade H_2 do solo foi tida como zero, e $H_1 = Z$; segundo solo saturado, simulando condições mais críticas de chuvas intensas, a profundidade H_1 do solo foi tida como zero e $H_2 = Z$.

Além das possibilidades de saturação se considerou o solo totalmente urbanizado, e o solo com a influência da vegetação para os cálculos do fator de segurança.

O mapa apresentado na Figura 52 representa a situação do solo natural (não saturado) e na Figura 53, o solo saturado, ambos para o caso de área completamente urbanizada, sem influência da cobertura vegetal. É possível perceber a diminuição significativa da resistência do solo após eventos de elevada pluviosidade, apresentado pela Figura 56 onde se destacam apenas os valores de redução do fator de segurança, para pontos onde o F_s foi reduzido abaixo de 1,5.

O solo natural, totalmente urbanizado (equação 19), apresenta 3% da área em condições instáveis, já com o solo saturado para área totalmente urbanizada (equação 20), observa-se que 6% do perímetro urbano apresentam instabilidades em suas vertentes, com F_s inferior a 1,5.

Correlacionando a cobertura vegetal e os índices de fator de segurança, verifica-se que as áreas instáveis são reduzidas para ambos os casos estudados (peso do solo natural e saturado). A Figura 54 apresenta o mapa de fator de segurança com o solo natural com a influência da vegetação e a Figura 55 o mapa de fator de segurança para o solo saturado com a influência da vegetação.

É possível perceber a diminuição significativa da resistência do solo após eventos de elevada pluviosidade, também para esse caso e os pontos em que o F_s tornou-se menor que 1,5 são apresentados pela Figura 57. Observa-se que para esse caso os pontos que se tornaram instáveis são bem mais numerosos do que para o caso anterior (sem influência da vegetação), pois além de a água contribuir para a

desestruturção do solo há o peso das árvores sobre o talude contribuindo com a deflagração do movimento.

O solo natural com influência da vegetação (equação 21), apresenta 2% da área em condições instáveis, uma redução de 1% da área com condições de instabilidade se comparado com o modelo que considera a área como totalmente urbanizada. Já com o solo saturado com influência da vegetação (equação 22), observa-se que 3% do perímetro urbano apresenta instabilidades em suas vertentes, uma redução de 3% da área com F_s inferior a 1,5, comparado ao mesmo caso sem a influência da vegetação.

No mapa gerado sem a influência da vegetação e solo saturado verifica-se o aumento das áreas instáveis ($F_s < 1,5$) quando comparado ao mapa de solo saturado com a influência da vegetação em 3,62% da área total de estudo. Dessa forma, a supressão da vegetação nesses pontos pode contribuir significativamente para a deflagração de movimentos de massa, principalmente nos pontos apresentados na Figura 58.

Quando se tem a cobertura vegetal no solo ela atua de forma a prevenir erosões e manter a estrutura do solo de forma mais firme, contribuindo com caminhos prioritários para o escoamento e infiltração das águas pluviais, contribuindo na sucção do solo e atuando como uma malha radicular de forma a melhorar a estrutura do solo e aumentar sua coesão aparente.

As áreas instáveis para o mapeamento do F_s com o solo saturado e influência da vegetação, concentram-se em pontos com declividade entre 20 – 30%, com uma percentagem de 93,8% de todas as áreas instáveis. A Tabela 24 apresenta as classes de declividade encontradas nas áreas com fator de segurança menor que 1,5 e as percentagens equivalentes.

Tabela 24 - Classes de declividade com fator de segurança $< 1,5$ para solo saturado com influência da vegetação.

Classe da declividade (%)	Percentual da área com $F_s < 1,5$
20 – 30	93,8%
30 – 45	1,6%
45 - 75	4,6%
Total	100,00%

Observa-se que as áreas que apresentam como classe o Chernossolo possuem a maior concentração de áreas instáveis, representando 94,4% de toda área instável do perímetro estudado, seguido pelo Neossolo com 5,6% das áreas instáveis

para esta classe de solo. O Neossolo é um solo mais raso, seu escorregamento geralmente está ligado a uma camada fina de solo superficial e um horizonte C com fragmentos de rocha intemperizada. Já os Chernossolos possuem um horizonte A mais desenvolvido seguido de um horizonte C ou diretamente sobre a rocha fracamente intemperizada, possibilitando maior fragilidade quanto a movimentos de massa, devido a desconexão entre a superfície rochosa e a camada de solo.

Dentre os escorregamentos registrados pela defesa civil da cidade de Francisco Beltrão (apresentados no item 3.8) apenas o escorregamento registrado como Ponto 02 não ocorreu em áreas com F_s menor que 1,5 para solo saturado com influência da vegetação. Destaca-se que o mesmo encontra-se sobre avaliação técnica para determinar se os cortes do talude tiveram influência na rachadura dos terrenos acima.

Comparando os pontos de escorregamentos que ocorrem com os mapas para solo natural percebe-se a mesma correlação, em todos os pontos, exceto o Ponto 02, pois ocorreram em áreas com F_s menor que 1,5. Dessa forma a pluviosidade possui grande influência na estabilidade de vertentes, pois a elevada infiltração de água no solo ocupa todos os espaços entre as partículas diminuindo sua coesão e facilitando a deflagração do movimento, pois todos os movimentos só deflagraram em dias de elevada pluviosidade.

Fs Solo Natural sem Vegetação

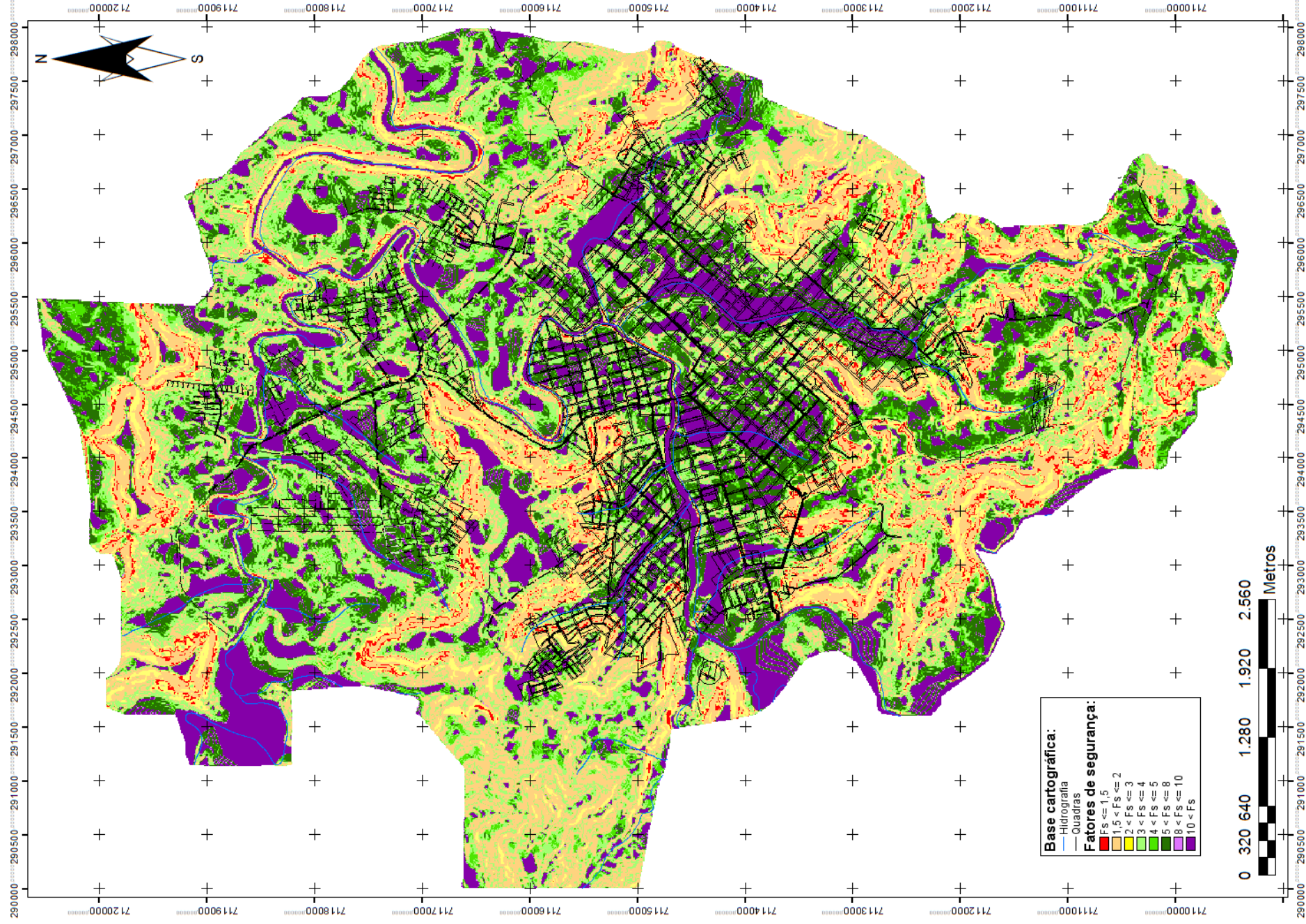


Figura 52 - Fator de Segurança para o solo Natural sem influência da Vegetação.

Fs Solo Saturado sem Vegetação

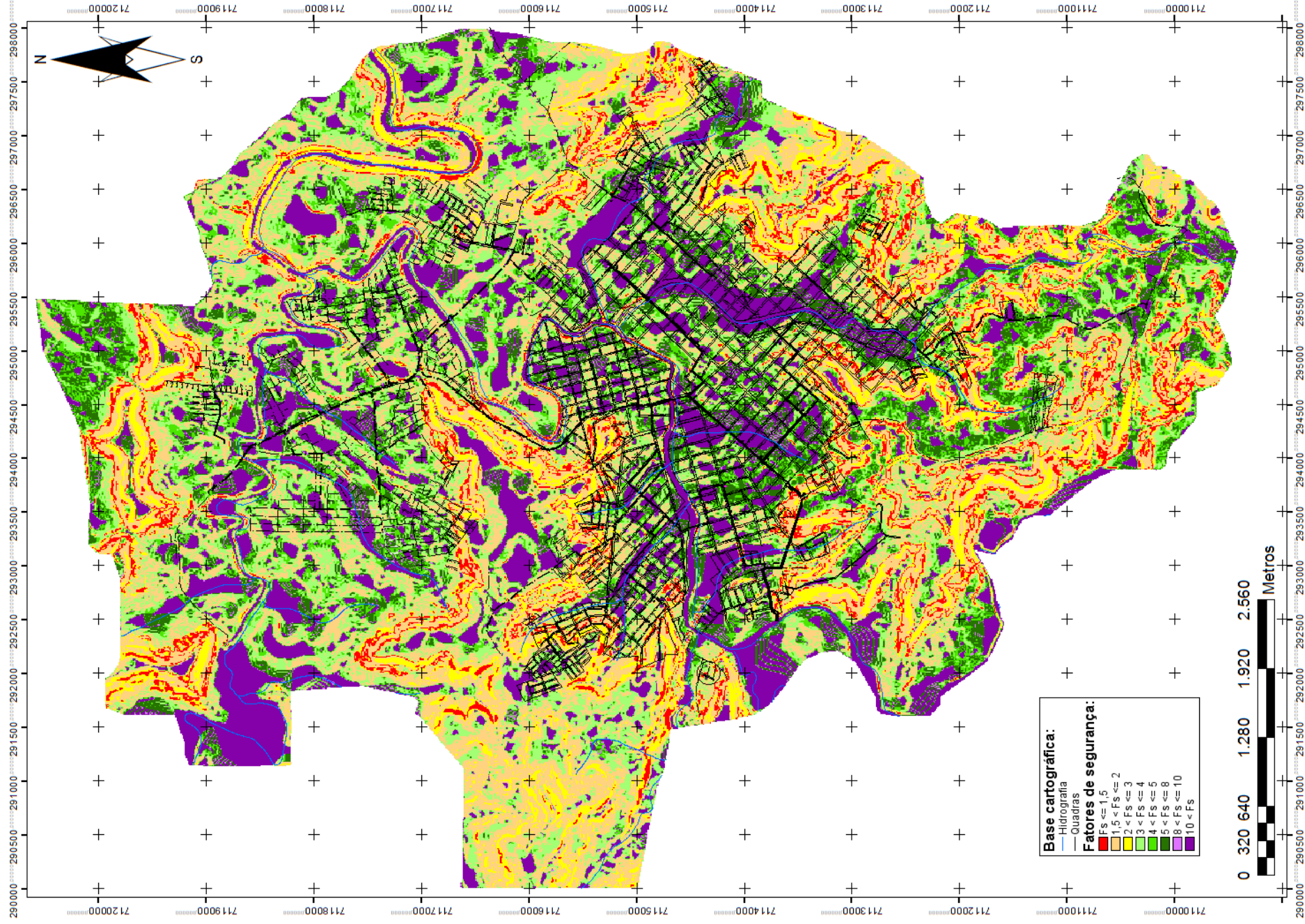


Figura 53 - Fator de Segurança para o solo saturado sem influência da vegetação.

Fs Solo Saturado com Vegetação

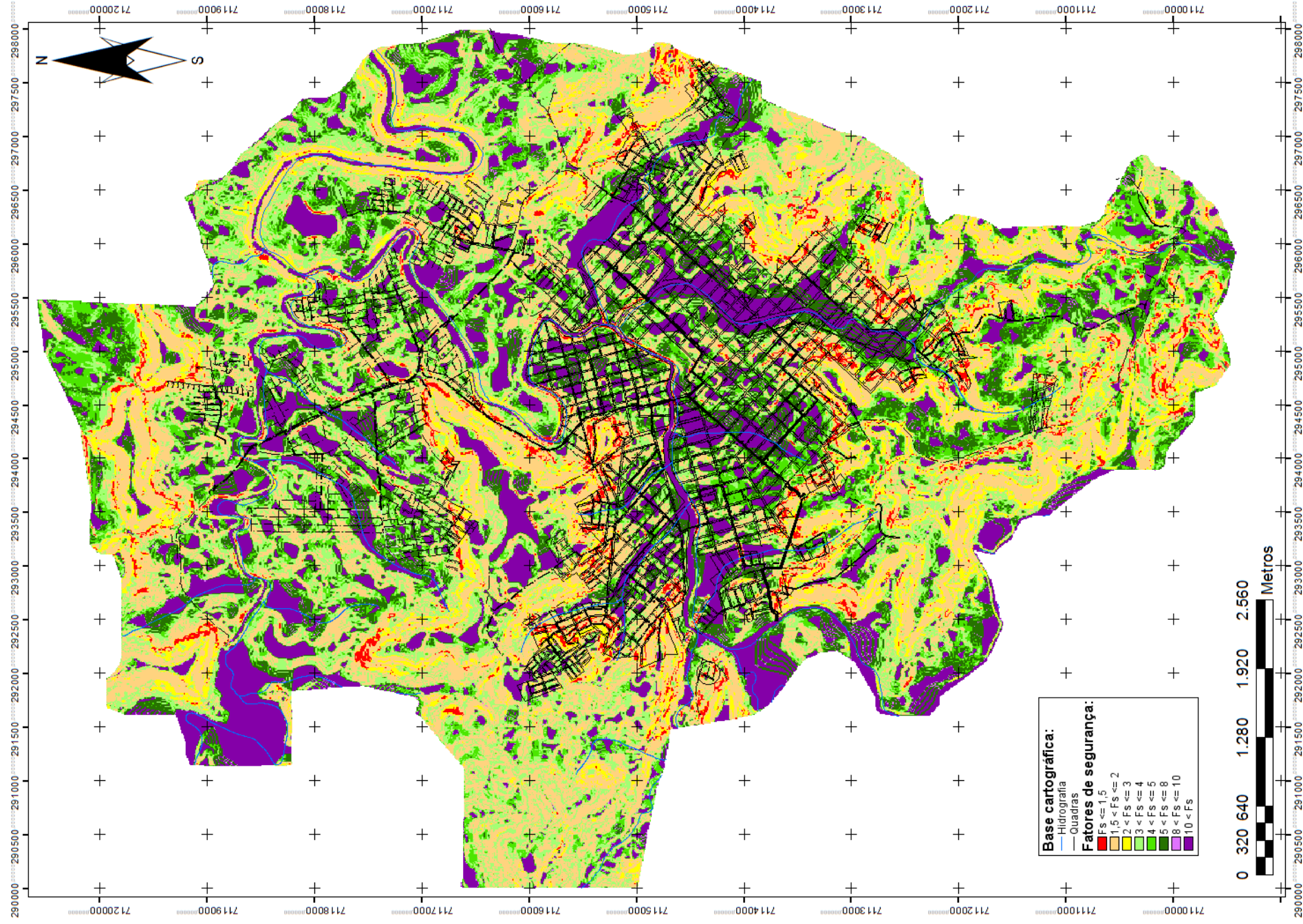


Figura 54 - Fator de Segurança para o solo Natural Com influência da Vegetação.

Fs Solo Natural com Vegetação

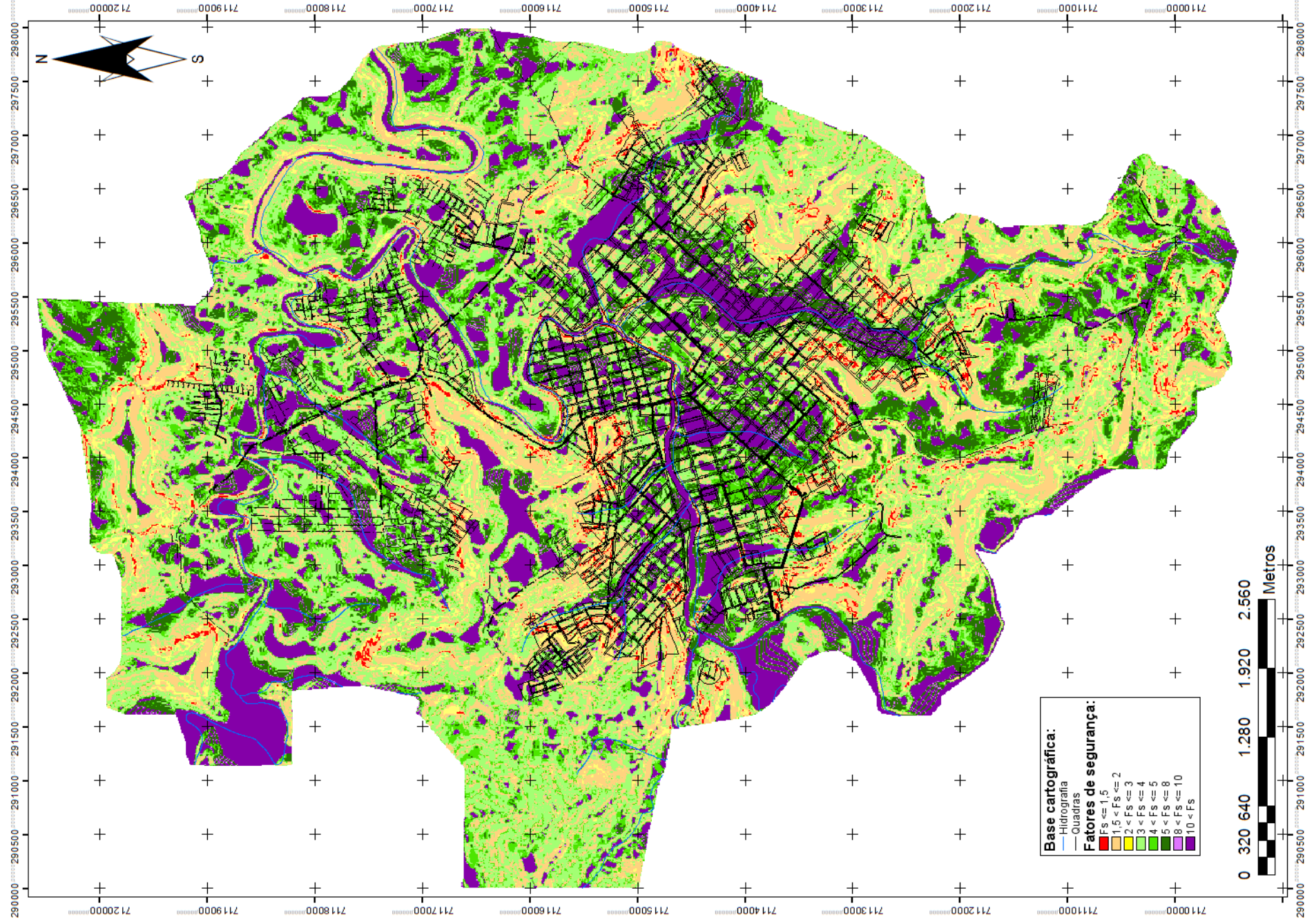


Figura 55 - Fator de Segurança para o Solo Saturado com Influência da Vegetação.

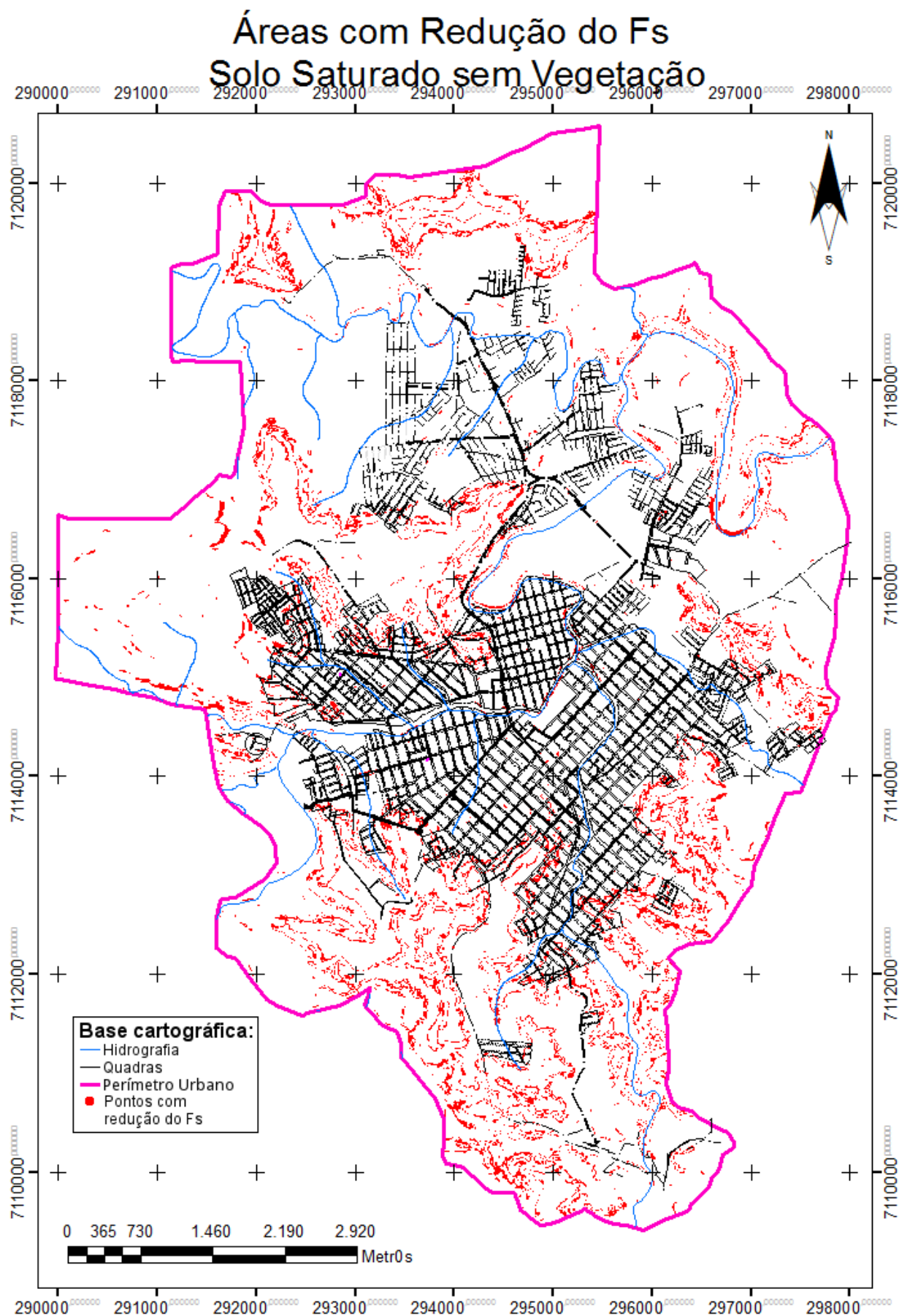


Figura 56 - Pontos de diminuição do fator de segurança, sem influência da vegetação, para solo saturado.

Áreas com Redução do Fs Solo Saturado com Vegetação

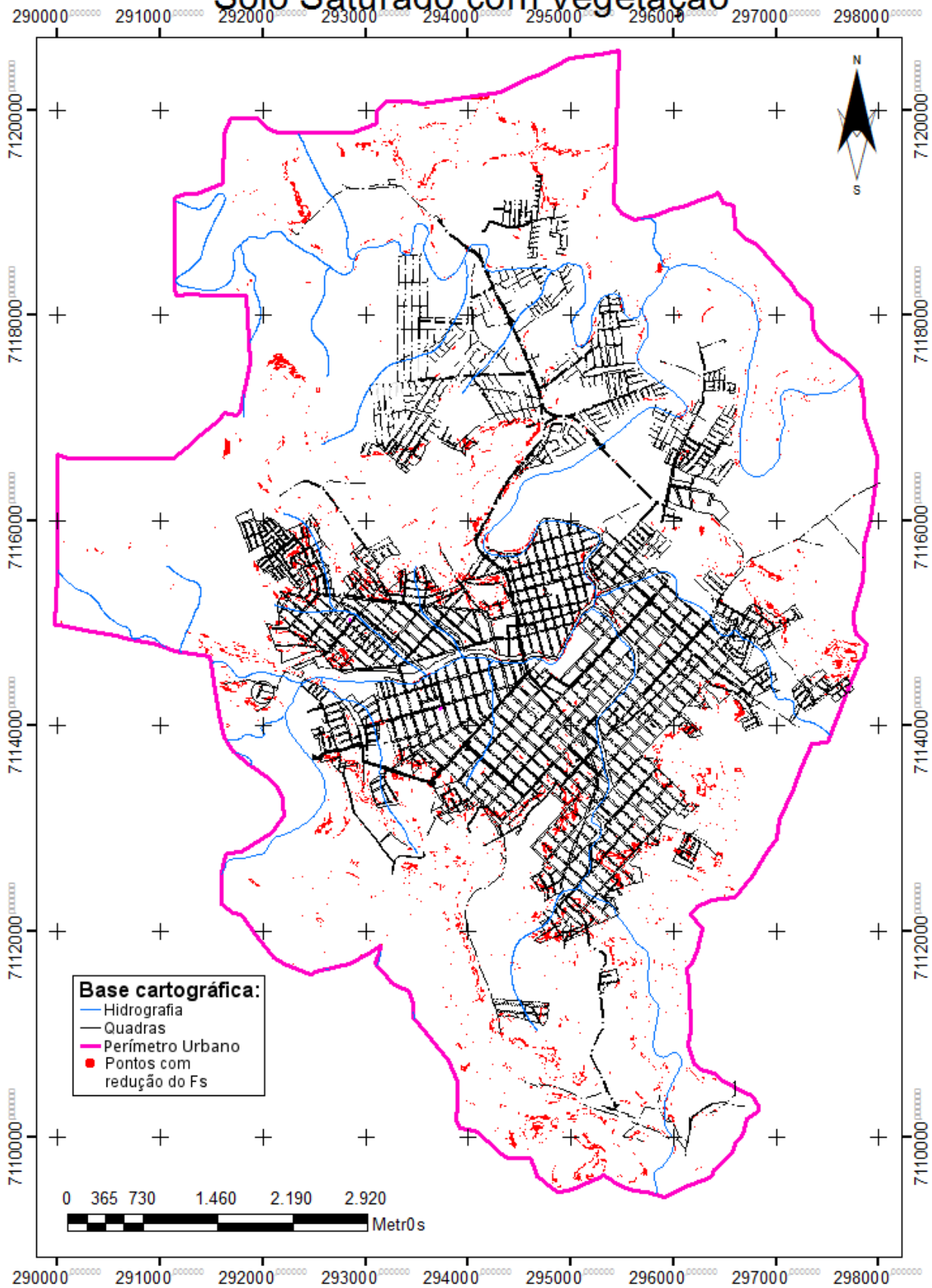


Figura 57 - Pontos de diminuição do fator de segurança para solo saturado com influência da vegetação.

Áreas com Redução do Fs em Solo Saturado

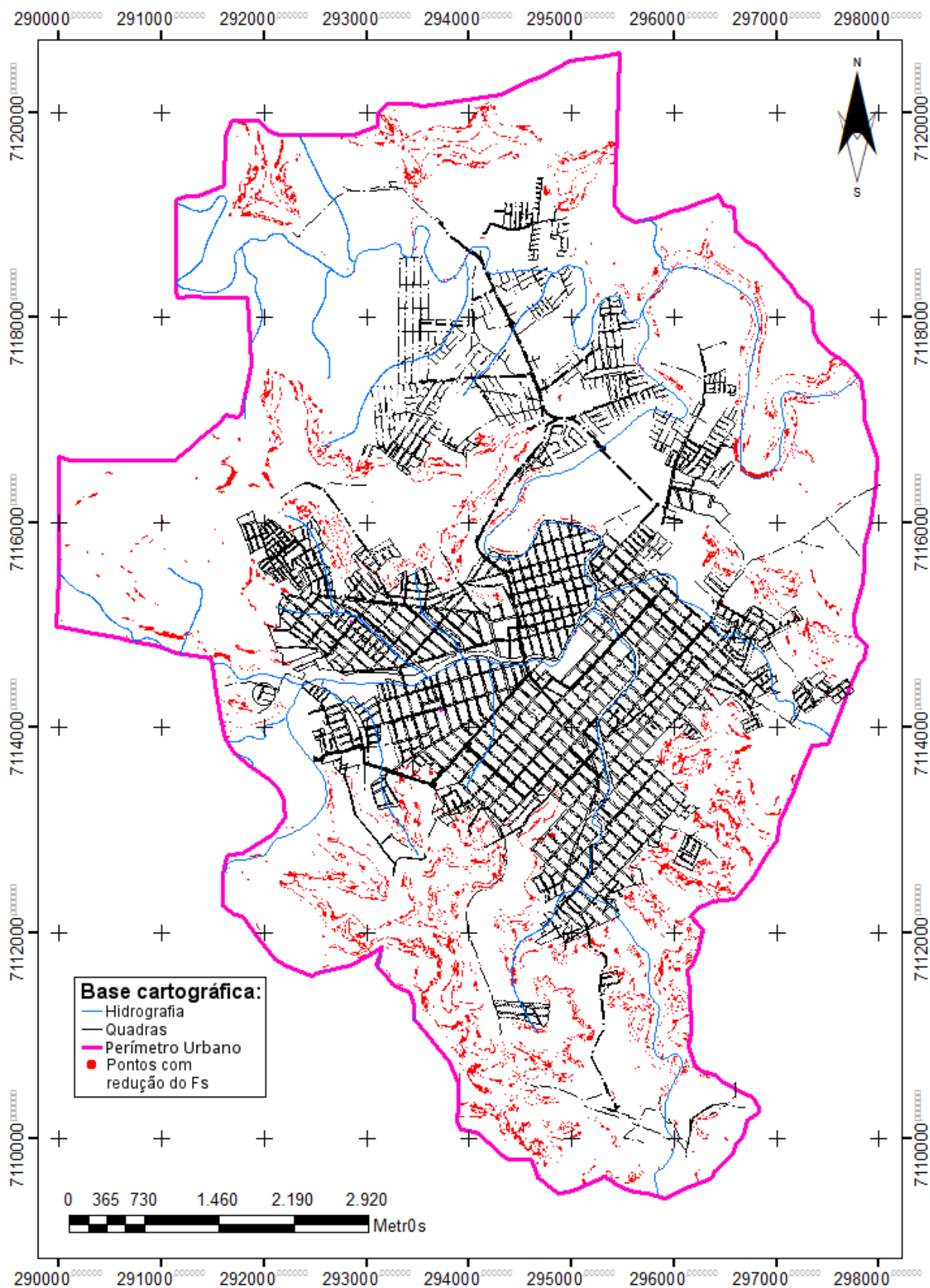


Figura 58 - Áreas de diminuição do fator de segurança, para solo saturado.

Gerando um comparativo entre os quatro mapas de fator de segurança gerados, representado graficamente na Figura 59, pode-se perceber a influência da vegetação e da saturação do solo para estabilidade ou instabilidade do terreno.

Em áreas vegetadas a estrutura do solo se mantém mais estável, sendo possível observar um aumento no percentual das áreas estáveis, com fator de segurança maior que 2 e uma redução nas classes abaixo de 2.

Quanto à saturação do solo, os solos saturados em comparação com o solo natural apresentam maior percentual nas classes de fator de segurança abaixo de 3, pois seu peso aumenta e a água possui grande influência reduzindo a coesão aparente das suas partículas.

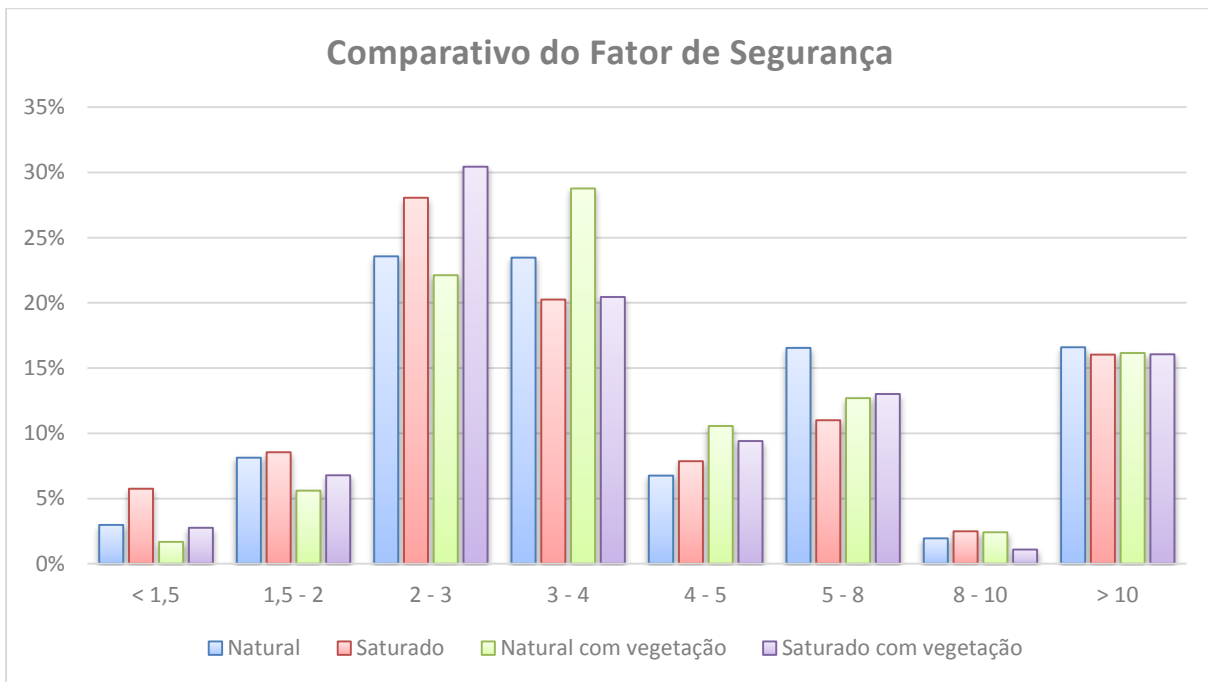


Figura 59 - Comparativo entre os quatro fatores de segurança para a área.

6 CONCLUSÕES

Os resultados apresentaram uma avaliação da situação da área urbana da cidade de Francisco Beltrão – PR, em relação a riscos de movimentos de massa, utilizando-se a metodologia determinística com a teoria do equilíbrio limite, verificando-se a existência de diversos pontos susceptíveis a escorregamentos.

A metodologia proposta fez o uso da base cartográfica e banco de dados geográficos estruturados em ambiente ArcGIS, com dados de declividade, classes de solo, uso e ocupação do solo, profundidade do solo e peso específico e os dados foram combinados por meio de álgebra de mapas gerando os mapas com o fator de segurança para a área.

Dentre as áreas de instabilidade com F_s menor que 1,5, destaca-se a classe de solo dos Chernossolos, que ocupou um percentual de 73,53% dessas áreas. Para a declividade, com um percentual de 73,33% das áreas instáveis, apresentaram-se na classe de declive de 20 – 30%.

Para os dois casos estudados, sem a influência da vegetação e com a influência da vegetação, têm-se que para a situação com solo saturado o fator de segurança diminuiu em diversos pontos, tendo um aumento das áreas com instabilidade do terreno, as quais podem deflagrar um movimento de massa.

Desta forma, considerando as variáveis analisadas e os resultados obtidos pode-se concluir que:

- ▶ Foi possível estabelecer áreas inaptas para o uso de edificações no perímetro urbano da cidade de Francisco Beltrão – PR a partir do mapeamento do F_s , o qual pode ser cruzado com loteamentos.
- ▶ Estabeleceu-se classes de risco para a área analisada e a mesma pode vir a ser monitorada em casos de F_s menor que 1,5, principalmente para eventos de elevada pluviosidade.
- ▶ Fez-se um comparativo entre o solo natural e solo saturado estimando elevada precipitação e as áreas de risco de movimentação.
- ▶ Para a região estudada a vegetação nos taludes tem grande importância no tangente a estabilidade dos terrenos.

O presente trabalho propicia uma base para a identificação de áreas de risco ao município de Francisco Beltrão haja vista que pode ser tomado como base para elaboração do plano diretor no município, em estudo no presente ano, visando reestabelecer princípios de ocupação do solo com base em medidas conservadoras quanto à estabilidade dos terrenos, supressão da vegetação e ocupação urbana.

A pesquisa dá como base a iniciação do cálculo de fator de segurança para o perímetro urbano da cidade de Francisco Beltrão e pode ser estendida para toda área do município pela mesma metodologia. Além desse estudo, tem-se como sugestões futuras a aplicação da metodologia Shalstab para o perímetro urbano assim como para toda a área do município, de forma a definir com maior precisão os pontos susceptíveis a movimentação de massa.

7 REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6457 Amostras de Solo – Preparação para Ensaio de Compactação e Ensaio de Caracterização**. Rio de Janeiro, 1986.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7180 Solo – Determinação do Limite de Plasticidade**. Rio de Janeiro, 1984.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7181 Solo – Análise Granulométrica**. Rio de Janeiro, 1984.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 76459 Solo – Determinação do Limite de Liquidez**. Rio de Janeiro, 1984.

AMARAL, Rosângela; GUTJAHR, Mirian R. **Cadernos de Educação Ambiental: Desastres Naturais**. 3. Ed. São Paulo: IG/SMA, 2015.

AUGUSTO FILHO, Oswaldo. **Escorregamentos em encostas naturais e ocupadas Análise e controle**, In: Curso de Geologia aplicada ao meio ambiente, São Paulo, Associação Brasileira de Geologia, Instituto de Pesquisa Tecnológica, Divisão de Geologia. 1995. Cap 3.4. p. 77-100

BOLLIAN, Levon e ALVES, Andressa. **Geografia espaço e vivência**. 1. ed. São Paulo: Saraiva, 2010.

BRANDÃO, Viviane, S et al. **Infiltração da Água no Solo**. 2. ed. Viçosa: UFV, 2003.

CARTER, Chuck. Debris Flow Avalanche. 2006. Ilustração. Color. Disponível em: <<https://s-media-cache-ak0.pinimg.com/564x/5d/f2/11/5df211825bc68313e6f61c012d14b355.jpg>>. Acesso em: 01 mai. 2016.

DALEFFE, Ediane C. S. **Avaliação da ocupação das encostas por meio de Geoprocessamento nos bairros Industrial, Jardim Seminário e São Cristóvão da cidade de Francisco Beltrão – PR**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Francisco Beltrão, 2014.

EMBRAPA, IAPAR. **Levantamento de Reconhecimento dos Solos do estado do Paraná – Tomo I e II**. Londrina, 1984.

EMBRAPA. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 2. ed. Rio de Janeiro, 1997.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2006.

FAGUNDES, Eliane Aparecida Antunes, KOETZ, Marcio, RUDEL, Norman, SANTOS, Tania Silveira dos, PORTO, Rebeca. **Determinação da infiltração e**

velocidade de infiltração de água pelo método de infiltrômetro de anel em solo de cerrado município de Rondonópolis-MT, In: Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer - Goiânia, 2012. v.8, N.14; p. 369-378.

FIORI, A. P; CARMIGNANI, L. **Fundamentos de Mecânica dos Solos e das Rochas, Aplicação na Estabilidade de Taludes**. 2ª Ed. Rev. E ampl. Curitiba: Ed. UFPR, 2009. 604p.

FLORENZANO, Teresa G. **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. Oficina de textos, São Paulo, 2008.

GERSCOVICH, Denise, M. S. **Estabilidade de Taludes**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

GUERRA, Antonio, J. T. e CUNHA, Sandra, B. **Impactos ambientais urbanos no Brasil**. 9. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2012.

HENAUT, Ivan Gonçalves, MARTINS, Ivomar Braz Oliveira e JOSÉ, Sebastião Aparecido Pereira. Movimentos gravitacionais de massa estudados pelo campo geográfico. Juiz de Fora, MG. 22 jun. 2011. Disponível em: <<http://ageoesta.blogspot.com.br/2011/06/movimentos-gravitacionais-de-massa.html>>. Acesso em: 01 mai. 2016.

IAPAR – Instituto Agrônomo do Paraná. Cartas Climáticas do Paraná – **Classificação Climática segundo Köppen**. Disponível em: <<http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=597>>. Último acesso em jul. 2016.

IAPAR – Instituto Agrônomo do Paraná. Cartas Climáticas do Paraná – **Evapotranspiração Anual**. Disponível em: <<http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=619>>. Último acesso em jul. 2016.

IAPAR – Instituto Agrônomo do Paraná. Cartas Climáticas do Paraná – **Temperatura Média Anual**. Disponível em: <<http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=604>>. Último acesso em jul. 2016.

IAPAR – Instituto Agrônomo do Paraná. Cartas Climáticas do Paraná – **Precipitação Média Anual**. Disponível em: <<http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=595>>. Último acesso em jul. 2016.

IBGE. **Manual técnico de pedologia**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2007. 316p.

INPE – Instituto Brasileiro de Pesquisas Espaciais. **Manual SPRING Básico**. Brasília, 2013. 97p.

KERTZMAN, Fernando F; DINIZ, Nóriz Costa. **As abordagens de solos utilizadas na geologia aplicada ao meio ambiente**, In: Curso de Geologia aplicada ao meio ambiente, São Paulo, Associação Brasileira de Geologia, Instituto de Pesquisa Tecnológica, Divisão de Geologia. 1995. Cap 3.1. p. 19-30.

LEPSCH, Igo, F. **Formação e Conservação dos Solos**. 2. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2010.

LEVETT, Kory. Mass Wasting and Mass Movement. 2015. 31 slides. Apresentação. Disponível em: <<http://slideplayer.com/slide/3815591/>>. Acesso em: 01 mai. 2016.

MANFREDINI, S. ; FurianDias, S.M. ; Queiroz Neto, J.P. ; OLIVEIRA, D. ; FERREIRA, R. P. D. . **Técnicas em Pedologia. Praticando a Geografia**. 2ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

MASSAD, Faíçal. **Obras de terra, curso básico de geotecnia**. 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2003.

MINEROPAR (2002) – **Projeto Riquezas Minerais – Avaliação do potencial mineral e consultoria técnica no município de Francisco Beltrão**. Curitiba, Set. 2002.

MINEROPAR, **Atlas geomorfológico do Estado do Paraná**: Escala base 1:250.000, modelos reduzidos 1:500.000. Universidade Federal do Paraná. 2006. 63 p.

MOTA, Suetônio. **Urbanização e Meio Ambiente**. 3 ed. Rio de Janeiro: ABES, 2003.

SOUZA PINTO, Carlos. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16Aulas**. Oficina de Textos, São Paulo, 2000, 247p.

PINTO, Nelson L de Souza; HOLTS, Antonio Carlos Tatit; MARTINS, José Augusto; GOMIDE, Francisco Luiz Sibut. **Hidrologia Básica**. São Paulo: Blucher, 2011.

PRESS, F.; SIEVER, R. **Understanding Earth**. 2. ed. New York: W. H. Freeman, 1998.

REIS, Fábio Augusto Gomes Vieira, Escorregamentos e Processos Correlatos, In: Curso de Geologia Ambiental via Internet, 2001. Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/ead/riscos/risco11a.html>>. Acesso em: 01 mai. 2016.

ROCHA, C. H B. **Geoprocessamento: Tecnologia Transdisciplinar**. Juiz de Fora, 2000.

SALSA, José. Ocupação Antrópica e Ordenamento. In: Cientic. Disponível em: <http://www.cientic.com/antropica_pp64.html>. Acesso em: 01 mai. 2016.

SANTOS, Raphael, D. et al. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 5. ed. Viçosa: Centro Nacional de Pesquisas de Solo, 2005.

SCHNAID, F; ODEBRECHT, E. **Ensaio de Campo e suas Aplicações à Engenharia de Fundações**. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 223p.

SILVA, T. G.; TOMAZONI, J. C. ; GUIMARAES, E. ; GOMES, T. C. . **Utilização de álgebra de mapas para caracterização dos solos da bacia hidrográfica do rio catorze**. In: XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2011, Curitiba PR. Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, 2011. p. 4840-4847.

TABALIPA, Ney Lyzandro, **Estudo da estabilidade de vertentes da bacia do rio Ligeiro, Pato Branco, Paraná**. 2008. 243 f. Tese (Doutorado) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2008.

TOMAZONI, J. C. **Morfodinâmica e Transporte Fluvial no Sudoeste do Estado do Paraná por método de levantamento de Microbacias Hidrográficas Através de Geoprocessamento**. Curitiba, 2003.

TOMAZONI, J. C.; GUIMARÃES, E. ; DALEFFE, E. C. . **Método para Determinação da Capacidade de Uso do Solo Urbano**. Synergismus Scyentifica UTFPR, v. 4, p. 1-3, 2009.

TOMINAGA, Lídia, K at all. **Desastres Naturais conhecer para prevenir**.3. ed. São Paulo: Instituto Geológico, 2015.

TROEH, F. R.; **Landform equations fitted to contour maps**. American Journal of Sciences, v. 263, p. 616-627, 1965.

VARNES, D J, Slope movement types and processes, **Landslide analysis and control**, Washington DC: National Academy of Sciences, 1978, p. 11-33.

8 APÊNDICES

APÊNDICE A - INFILTRAÇÃO

Ponto 01 – Rio Tuna

Tempo Acumulado (min)	Infiltração Acumulada (cm)
1	0,3
2	1,1
3	1,6
4	2,2
5	2,7
10	4,95
15	6,9
20	8,6
25	10,2
30	11,6
35	12,29
40	13,24
45	14,2
50	14,9
55	15,8
60	16,5
65	17,05
70	17,7
75	18,3
80	18,9

Forma Final da equação de Infiltração:

$$I = k T^a \quad \therefore I = 0,5775 \cdot T^{0,841322}$$

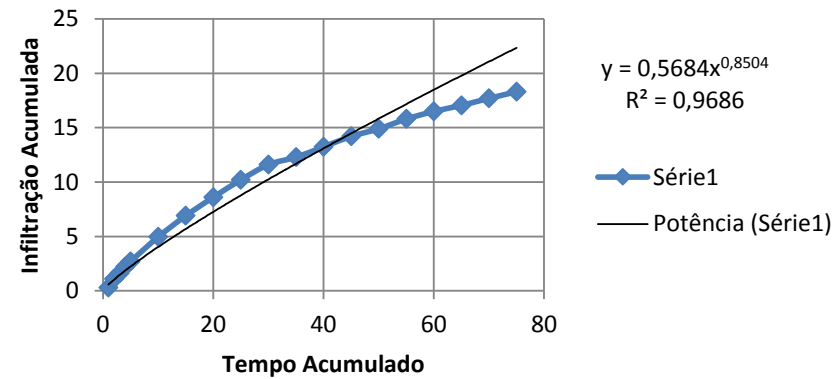
Forma Final da Equação de Velocidade Instantânea:

$$VI = A \cdot T^{a-1} \quad \therefore VI = 0,2384 \cdot T^{-0,15868}$$

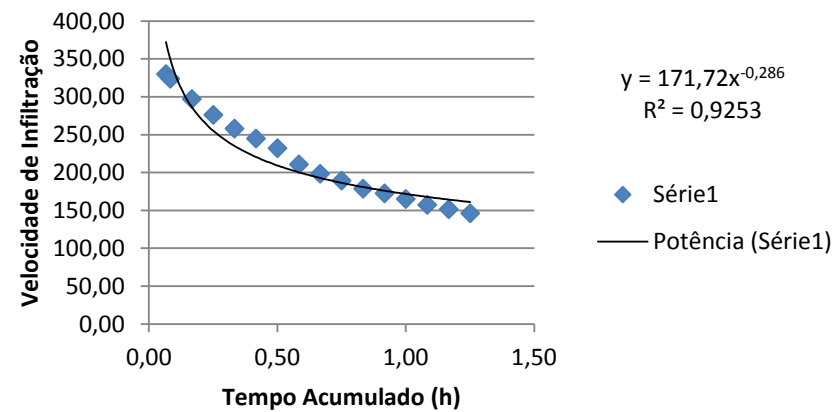
Forma Final da Equação de Velocidade de Infiltração Média

$$VI_m = k \cdot T^{a-1} \quad \therefore VI_m = 0,5775 \cdot T^{-0,15868}$$

Curva de Infiltração



Velocidade de Infiltração



Ponto 02 Júpiter

Tempo Acumulado (min)	Infiltração Acumulada (cm)
0	1,3
1	2,8
2	4,34
3	5,5
4	6,4
5	7,3
10	11,25
15	14,15
20	17,87
25	21,01
30	23,45
35	25,25
40	27,25
45	29,05
50	30,62
55	32
60	33,12
65	34,35
70	35,15
75	36,02
80	36,62

Forma Final da equação de Infiltração:

$$I = k T^a \quad \therefore I = 2,3652 \cdot T^{0,653593}$$

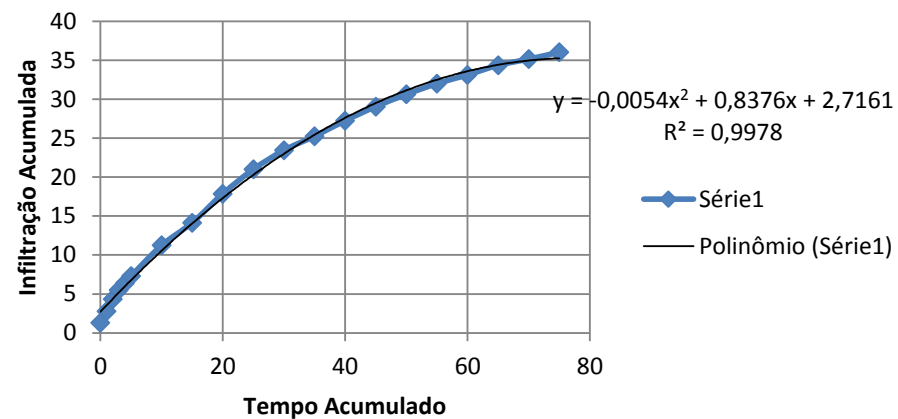
Forma Final da Equação de Velocidade Instantânea:

$$VI = A \cdot T^{a-1} \quad \therefore VI = 0,373875 \cdot T^{-0,34641}$$

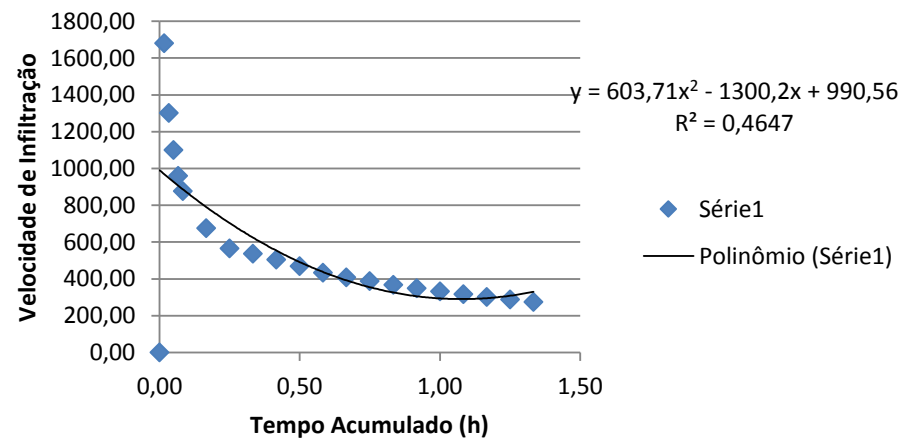
Forma Final da Equação de Velocidade de Infiltração Média

$$VI_m = k \cdot T^{a-1} \quad \therefore VI_m = 2,3652 \cdot T^{-0,34641}$$

Curva de Infiltração



Velocidade de Infiltração



Ponto 03 Frigobel

Tempo Acumulado (min)	Infiltração Acumulada (cm)
1	0,1
2	0,34
3	0,6
4	0,87
5	1,07
10	2,231
15	3,13
20	4
25	4,58
30	5,4
35	6,24
40	6,85
45	7,28
50	7,88
55	8,26
60	8,82
65	9,08
70	9,67
75	10

Forma Final da equação de Infiltração:

$$I = k T^a \quad \therefore \quad I = 0,1821 \cdot T^{0,974351}$$

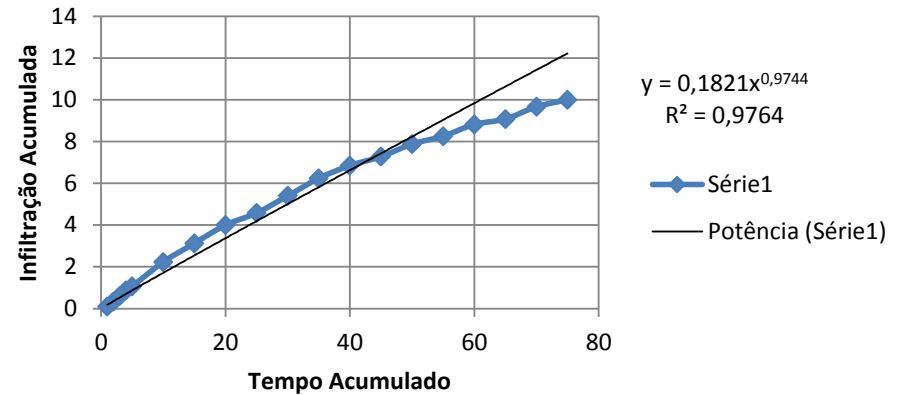
Forma Final da Equação de Velocidade Instantânea:

$$VI = A \cdot T^{a-1} \quad \therefore \quad VI = 0,73962 \cdot T^{-0,02565}$$

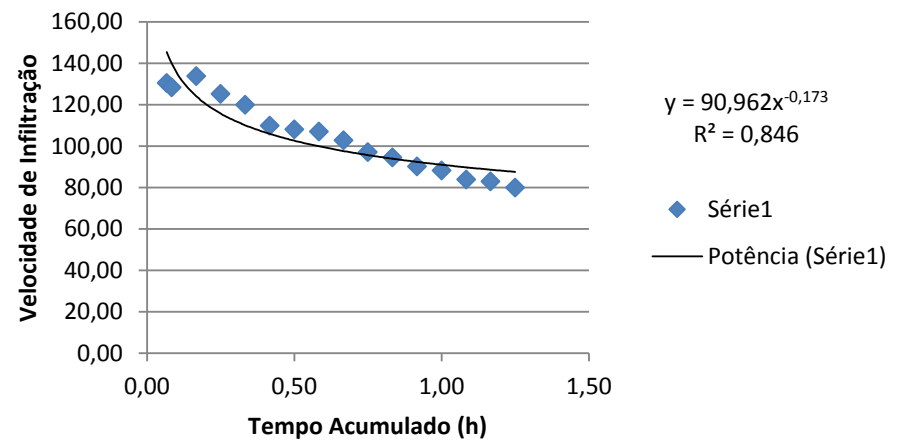
Forma Final da Equação de Velocidade de Infiltração Média

$$VI_m = k \cdot T^{a-1} \quad \therefore \quad VI_m = 0,1821 \cdot T^{-0,02565}$$

Curva de Infiltração



Velocidade de Infiltração



Ponto 04 Bom Pastor

Tempo Acumulado (min)	Infiltração Acumulada (cm)
1,36	0,02
3,08	0,03
4,41	0,05
5,6	0,07
6,87	0,08
10,52	0,13
11,97	0,22
13,81	0,30
15,42	0,38
17,05	0,47
18,42	0,55
19,72	0,63
21,02	0,72

Forma Final da equação de Infiltração:

$$I = k T^a \quad \therefore I = 1,9713 \cdot T^{0,664184}$$

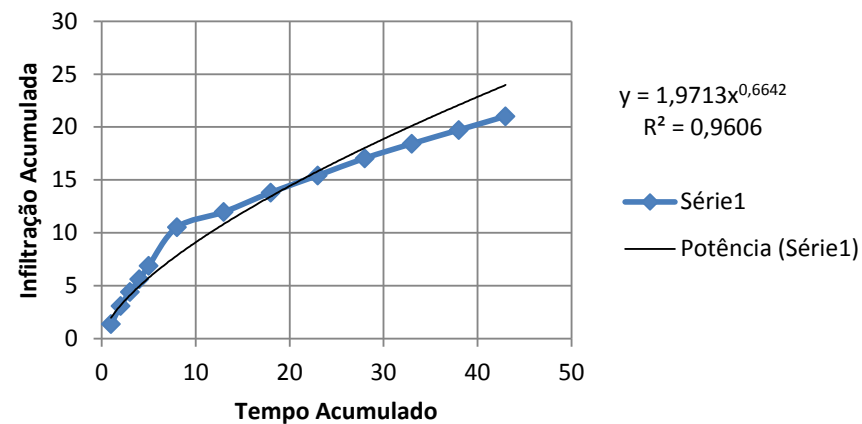
Forma Final da Equação de Velocidade Instantânea:

$$VI = A \cdot T^{a-1} \quad \therefore VI = 0,294759 \cdot T^{-0,33582}$$

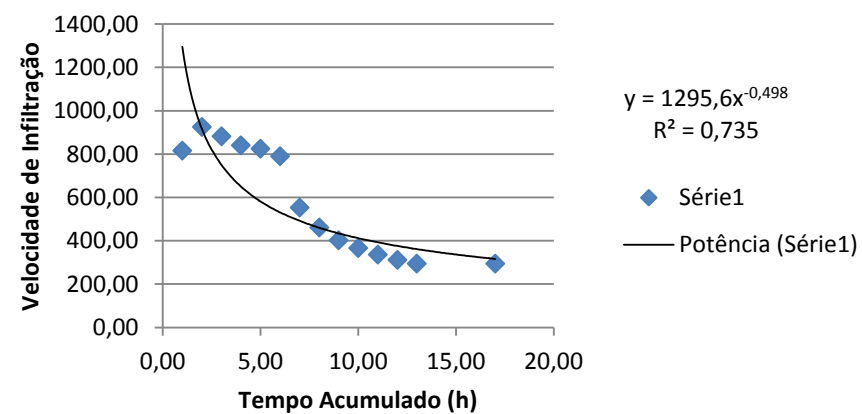
Forma Final da Equação de Velocidade de Infiltração Média

$$VI_m = k \cdot T^{a-1} \quad \therefore VI_m = 1,9713 \cdot T^{-0,33582}$$

Curva de Infiltração



Velocidade de Infiltração



Ponto 05 São Francisco

Tempo Acumulado (min)	Infiltração Acumulada (cm)
0	0,02
0,2	0,03
0,6	0,05
0,8	0,07
1,1	0,08
1,4	0,17
3,42	0,25
4,36	0,33
5,57	0,42
5,94	0,50
6,78	0,58
7,73	0,67
8,4	0,75
9,05	0,83
9,69	0,92
10,37	1,00
11,02	1,08
11,65	1,17
12,3	1,25

Forma Final da equação de Infiltração:

$$I = k T^a \quad \therefore I = 0,2933 \cdot T^{0,866604}$$

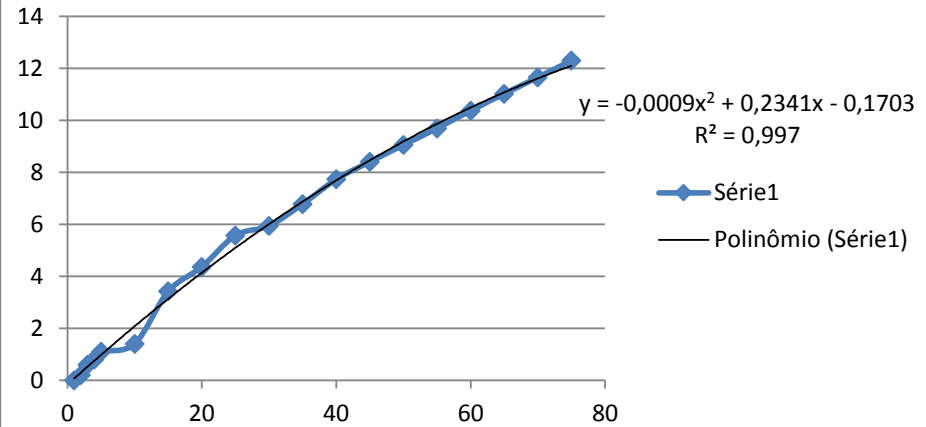
Forma Final da Equação de Velocidade Instantânea:

$$VI = A \cdot T^{a-1} \quad \therefore VI = 0,53255 \cdot T^{-0,1334}$$

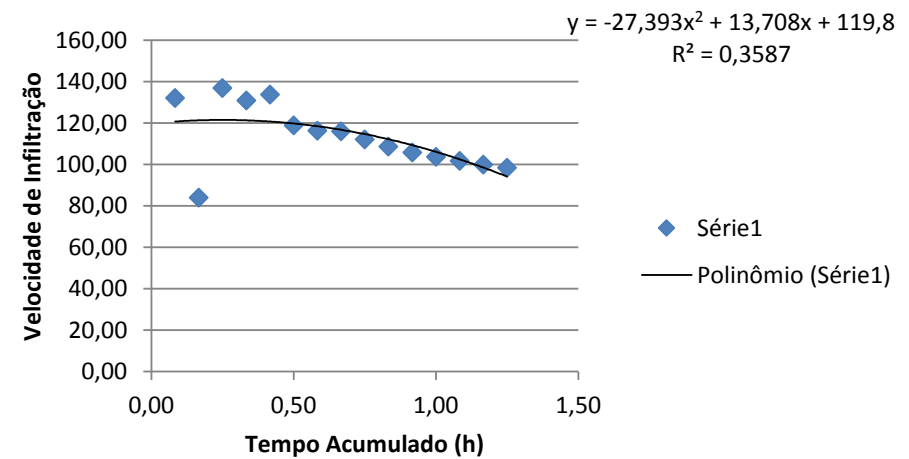
Forma Final da Equação de Velocidade de Infiltração Média

$$VI_m = k \cdot T^{a-1} \quad \therefore VI_m = 0,2933 \cdot T^{-0,1334}$$

Curva de Infiltração

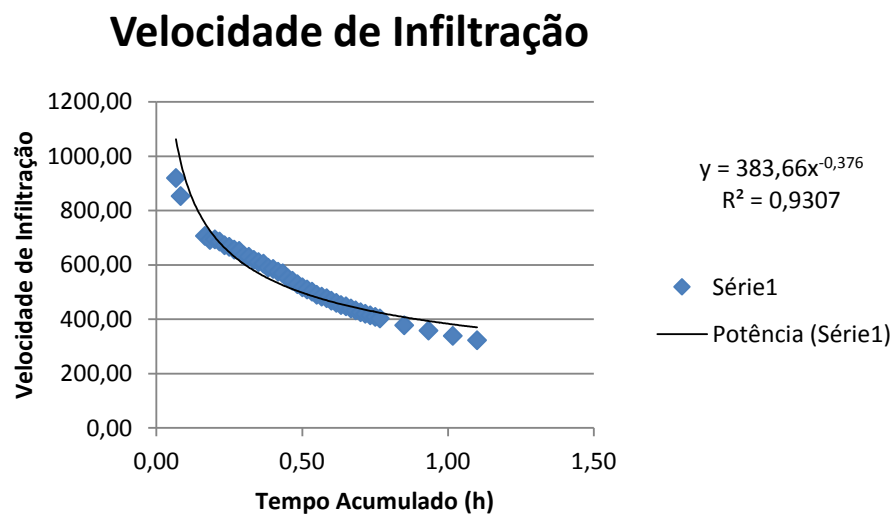
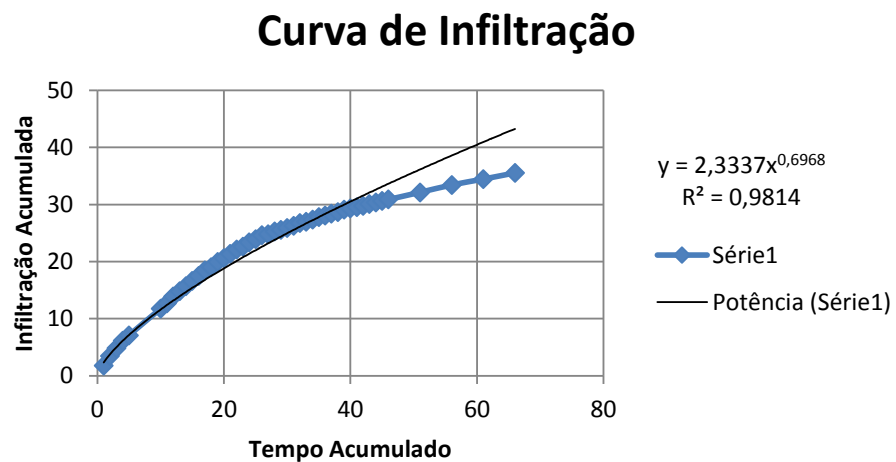


Velocidade de Infiltração



Ponto 06 - Quartel

Tempo Acumulado (min)	Infiltração Acumulada (cm)
1	1,8
2	3,46
3	4,83
4	6,13
5	7,11
10	11,78
11	12,68
12	13,88
13	14,85
14	15,69
15	16,65
16	17,48
17	18,47
18	19,03
19	19,94
20	20,62
21	21,37
22	22,14
23	22,6
24	23,38
25	23,94
26	24,65
27	24,79
28	25,27
29	25,57
30	25,88
31	26,29



32	26,75
33	26,97
34	27,37
35	27,82
36	28,05
37	28,39
38	28,65
39	29,11
40	29,3
41	29,55
42	29,77
43	30,09
44	30,34
45	30,65
46	30,88
51	32,13
56	33,42
61	34,45
66	35,53

Forma Final da equação de Infiltração:

$$I = k T^a \quad \therefore \quad I = 2,333 \cdot T^{0,696838}$$

Forma Final da Equação de Velocidade Instantânea:

$$VI = A \cdot T^{a-1} \quad \therefore \quad VI = 0,368038 \cdot T^{-0,30316}$$

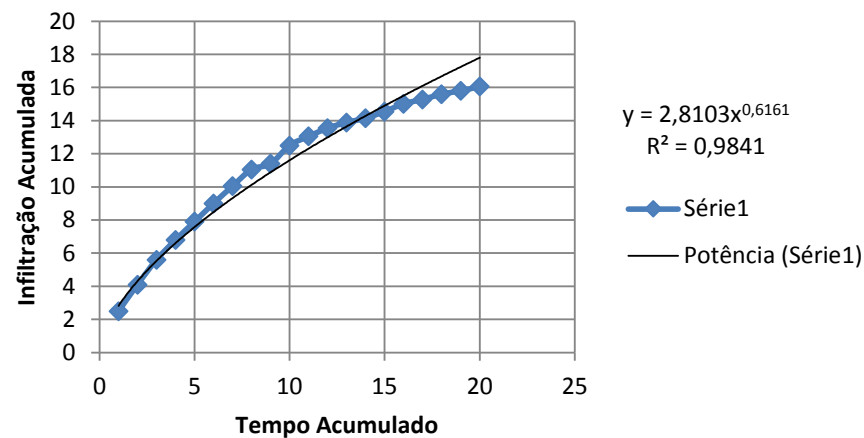
Forma Final da Equação de Velocidade de Infiltração Média

$$VI_m = k \cdot T^{a-1} \quad \therefore \quad VI_m = 2,333 \cdot T^{-0,30316}$$

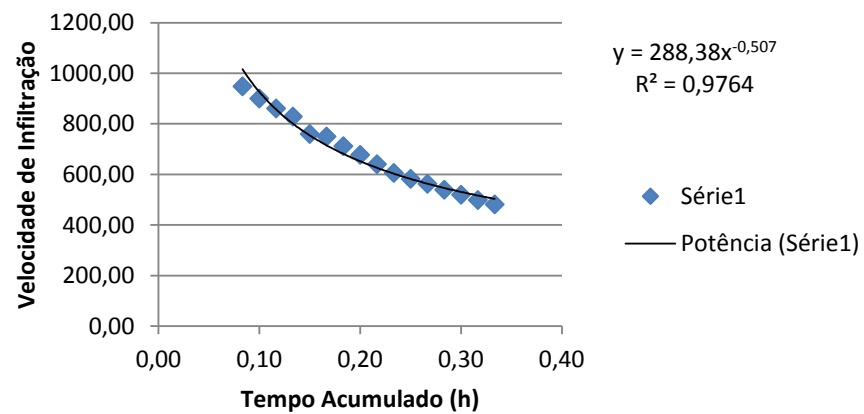
Ponto 07 Bica

Tempo Acumulado (min)	Infiltração Acumulada (cm)
1	2,49
2	4,1
3	5,6
4	6,8
5	7,9
6	9
7	10,05
8	11,05
9	11,4
10	12,5
11	13,05
12	13,55
13	13,89
14	14,15
15	14,55
16	15,02
17	15,28
18	15,6
19	15,8
20	16,06
25	17,6
30	17,9
35	18,6
40	19,55
45	19,88
50	20,4
55	20,66

Curva de Infiltração



Velocidade de Infiltração



60	21,4
65	21,6
70	21,95
75	22,5
80	22,6

Forma Final da equação de Infiltração:

$$I = k T^a \quad \therefore \quad I = 3,7999 \cdot T^{0,45061}$$

Forma Final da Equação de Velocidade Instantânea:

$$VI = A \cdot T^{a-1} \quad \therefore \quad VI = 0,57978 \cdot T^{-0,54939}$$

Forma Final da Equação de Velocidade de Infiltração Média

$$VIm = k \cdot T^{a-1} \quad \therefore \quad VIm = 3,7999 \cdot T^{-0,54939}$$

Ponto 08 Trincheira

Tempo Acumulado (min)	Infiltração Acumulada (cm)
0,29	0,08
0,45	0,17
0,6	0,25
0,75	0,33
0,8	0,42
1,05	0,50
1,15	0,58
1,2	0,75
1,32	1,00
1,8	1,50
2,2	2,00
2,4	2,50

Forma Final da equação de Infiltração:

$$I = k T^a \quad \therefore I = 0,1124 \cdot T^{0,620853}$$

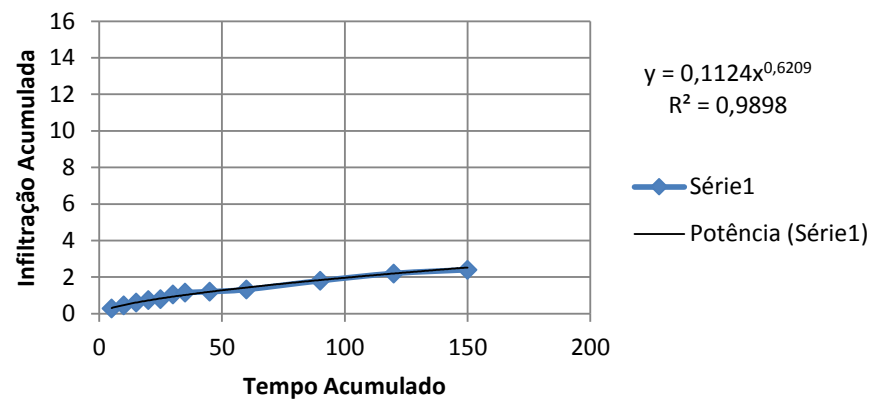
Forma Final da Equação de Velocidade Instantânea:

$$VI = A \cdot T^{a-1} \quad \therefore VI = 0,94921 \cdot T^{-0,37915}$$

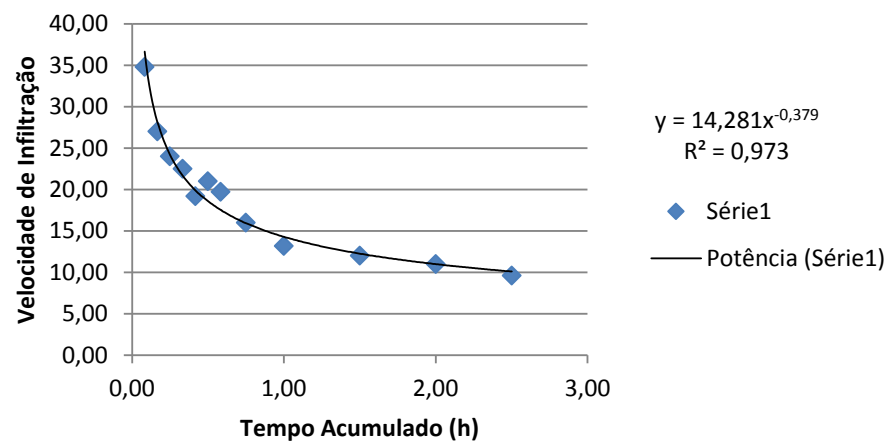
Forma Final da Equação de Velocidade de Infiltração Média

$$VI_m = k \cdot T^{a-1} \quad \therefore VI_m = 0,1124 \cdot T^{-0,37915}$$

Curva de Infiltração

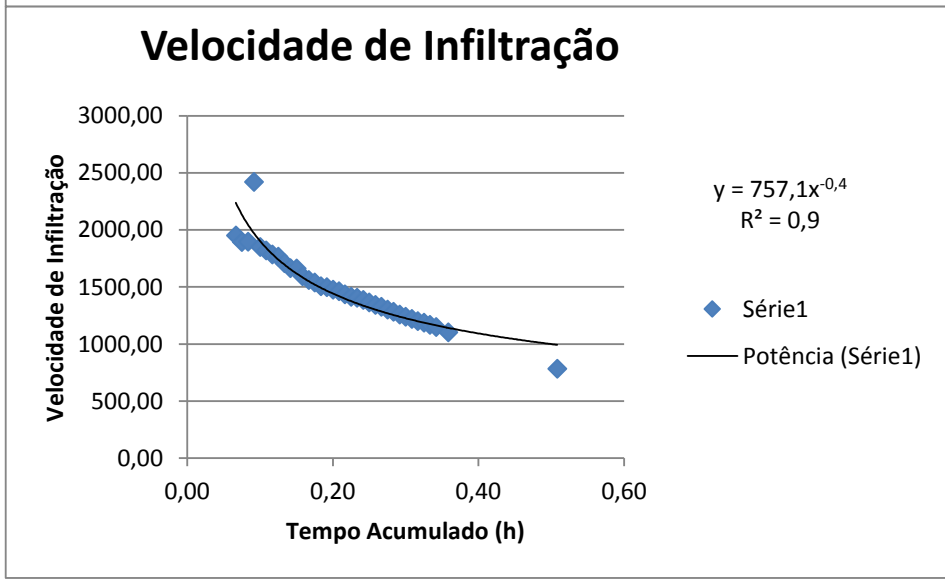
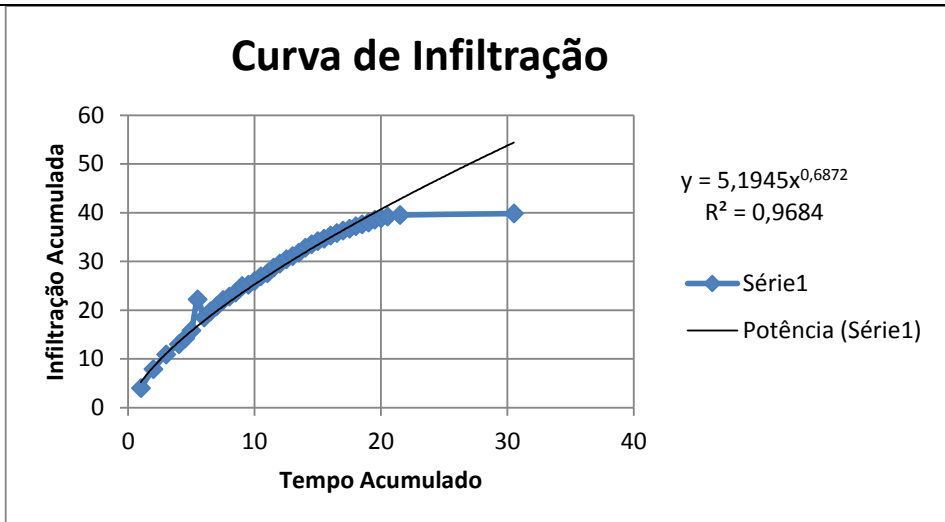


Velocidade de Infiltração



Ponto 09 Passaura

Tempo Acumulado (min)	Infiltração Acumulada (cm)
4,03	0,02
7,88	0,03
10,88	0,05
13	0,07
14,2	0,08
15,8	0,08
22,2	0,09
18,5	0,10
19,72	0,11
20,82	0,12
22,08	0,13
22,7639	0,13
23,6	0,14
24,939	0,15
25,24	0,16
26	0,17
26,92	0,18
27,61	0,18
28,72	0,19
29,55	0,20
30,48	0,21
31,08	0,22
31,79	0,23
32,8	0,23
33,52	0,24
34,14	0,25
34,7	0,26
35,34	0,27



35,807	0,28	<p>Forma Final da equação de Infiltração:</p> $I = k T^a \quad \therefore I = 5,1945 \cdot T^{0,687182}$ <p>Forma Final da Equação de Velocidade Instantânea:</p> $VI = A \cdot T^{a-1} \quad \therefore VI = 0,71555 \cdot T^{-0,31282}$ <p>Forma Final da Equação de Velocidade de Infiltração Média</p> $VIm = k \cdot T^{a-1} \quad \therefore VIm = 5,1945 \cdot T^{-0,31282}$
36,32	0,28	
36,72	0,29	
37,21	0,30	
37,6	0,31	
38,01	0,32	
38,57	0,33	
38,9	0,33	
39,21	0,34	
39,52	0,36	
39,82	0,51	

Ponto 10 UTF

Tempo Acumulado (min)	Infiltração Acumulada (cm)
0,2	0,08
0,6	0,17
1	0,25
1,3	0,33
1,6	0,42
2	0,50
2,4	0,58
2,8	0,67
3,7	0,75
4,5	0,83
5	0,92

Forma Final da equação de Infiltração:

$$I = k T^a \quad \therefore I = 1,6543 \cdot T^{0,002692}$$

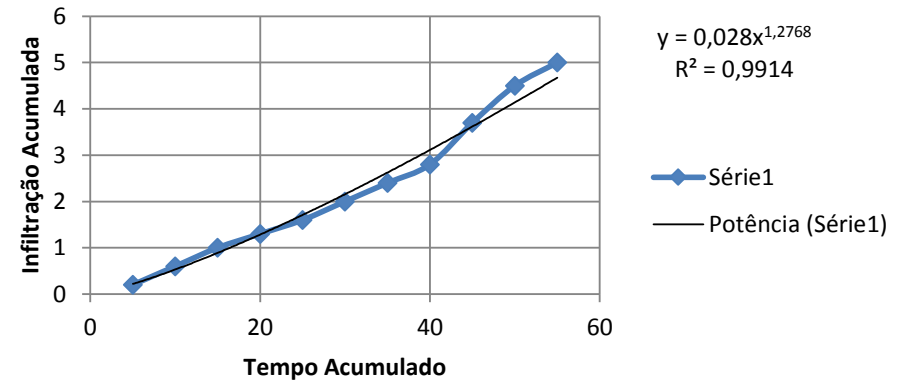
Forma Final da Equação de Velocidade Instantânea:

$$VI = A \cdot T^{a-1} \quad \therefore VI = 0,218624 \cdot T^{-0,99731}$$

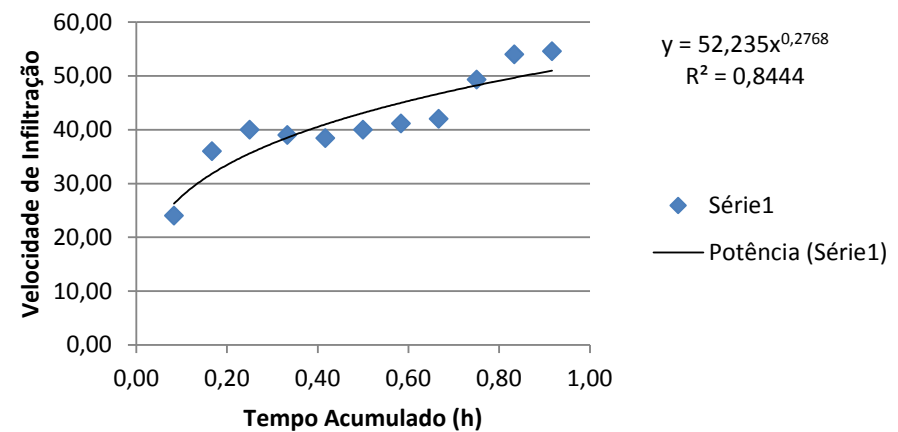
Forma Final da Equação de Velocidade de Infiltração Média

$$VIm = k \cdot T^{a-1} \quad \therefore VIm = 1,6543 \cdot T^{-0,99731}$$

Curva de Infiltração



Velocidade de Infiltração



Ponto 11 Arquitetos

Tempo Acumulado (min)	Infiltração Acumulada (cm)
1,69	0,02
3,05	0,03
4,4	0,05
5,6	0,07
6,7	0,08
7,8	0,10
8,8	0,12
9,55	0,13
10,5	0,15
11,58	0,17
12,53	0,18
12,58	0,20
13,27	0,22
13,68	0,23
14,03	0,25
16,33	0,33
18,22	0,42
19,63	0,50
20,98	0,58
22,28	0,67
23,28	0,75

Forma Final da equação de Infiltração:

$$I = k T^a \quad \therefore I = 2,168 \cdot T^{0,67221}$$

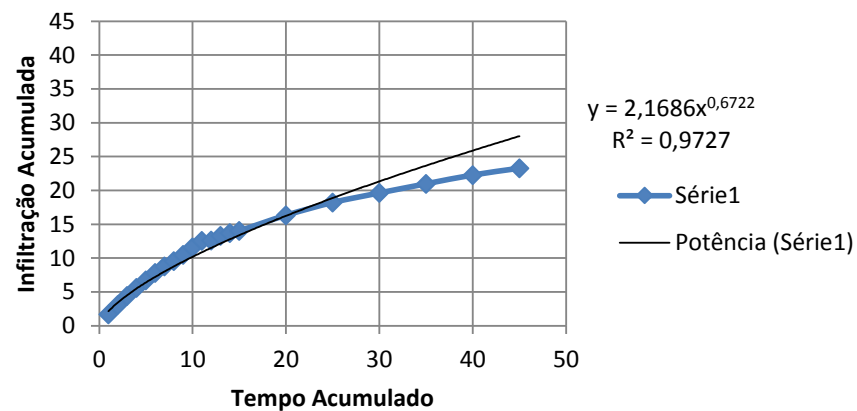
Forma Final da Equação de Velocidade Instantânea:

$$VI = A \cdot T^{a-1} \quad \therefore VI = 0,33619 \cdot T^{-0,32779}$$

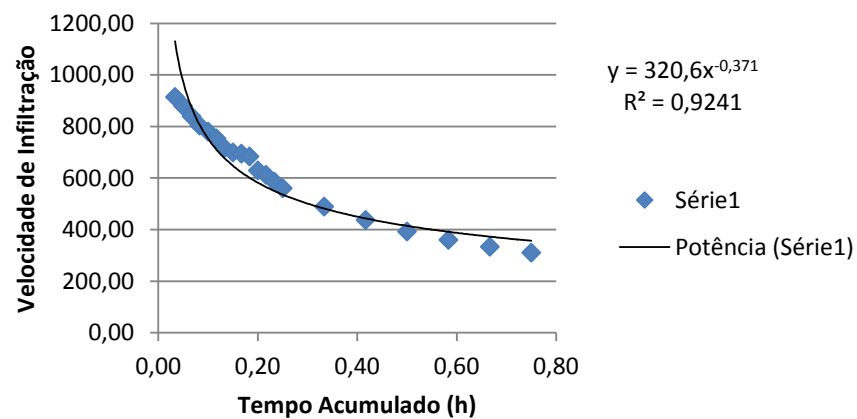
Forma Final da Equação de Velocidade de Infiltração Média

$$VI_m = k \cdot T^{a-1} \quad \therefore VI_m = 2,168 \cdot T^{-0,32779}$$

Curva de Infiltração



Velocidade de Infiltração



Ponto 12 Marrecas

Tempo Acumulado (min)	Infiltração Acumulada (cm)
0,2	0,07
0,63	0,08
1,2	0,17
2,2	0,25
3,12	0,33
3,71	0,42
4,5	0,50
5,23	0,58
5,93	0,67
6,6	0,75
7,3	0,83

Forma Final da equação de Infiltração:

$$I = k T^a \quad \therefore \quad I = 0,058 \cdot T^{1,272636}$$

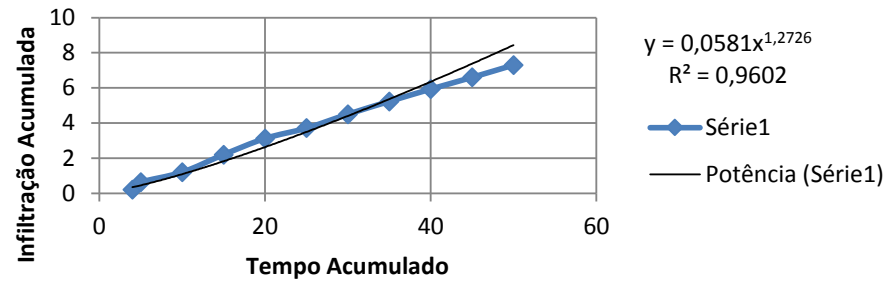
Forma Final da Equação de Velocidade Instantânea:

$$VI = A \cdot T^{a-1} \quad \therefore \quad VI = 0,54926 \cdot T^{0,272636}$$

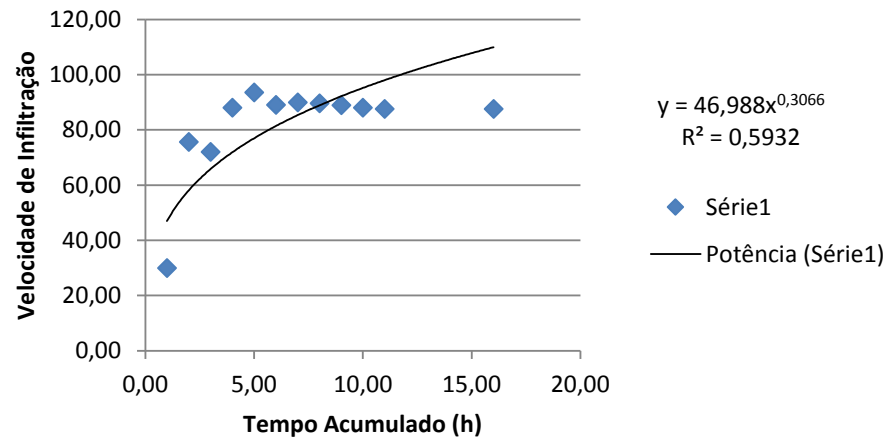
Forma Final da Equação de Velocidade de Infiltração Média

$$VI_m = k \cdot T^{a-1} \quad \therefore \quad VI_m = 0,058 \cdot T^{0,272636}$$

Curva de Infiltração



Velocidade de Infiltração



Ponto 13 Alodi

Tempo Acumulado (min)	Infiltração Acumulada (cm)
1,2	0,08
2,2	
3,2	0,25
4,2	0,33
5	0,42
5,8	0,50
6,45	0,58
7,1	0,67
7,55	0,75
8,8	0,83
9,2	0,92
9,2	1,00

Forma Final da equação de Infiltração:

$$I = k T^a \quad \therefore I = 5,033 \cdot T^{0,0000609}$$

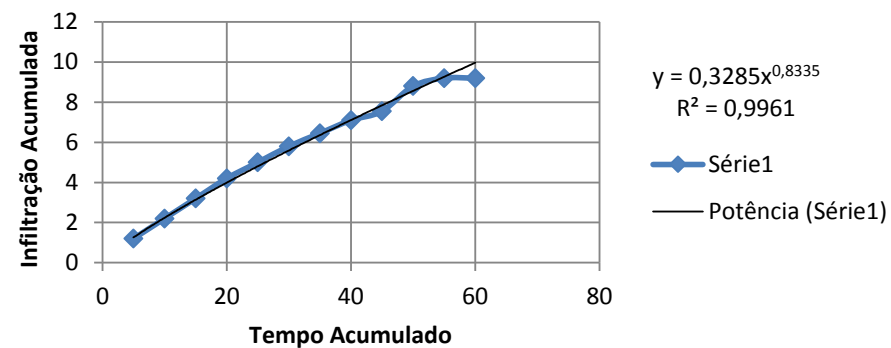
Forma Final da Equação de Velocidade Instantânea:

$$VI = A \cdot T^{a-1} \quad \therefore VI = 0,701849 \cdot T^{-0,99994}$$

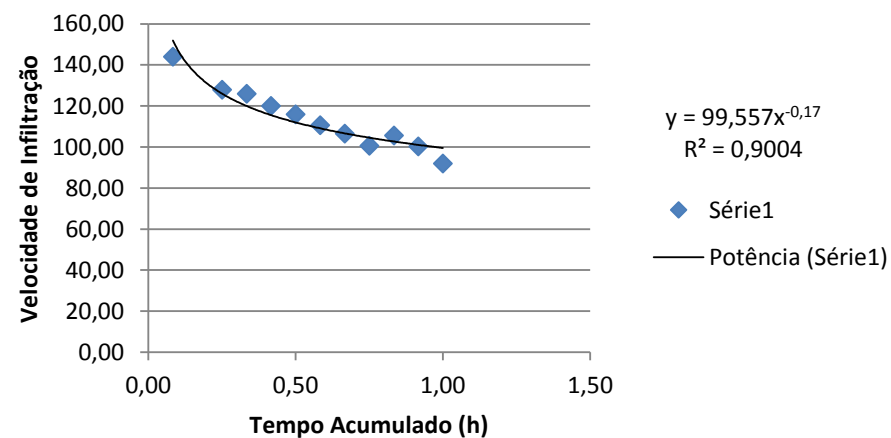
Forma Final da Equação de Velocidade de Infiltração Média

$$VI_m = k \cdot T^{a-1} \quad \therefore VI_m = 5,033 \cdot T^{-0,99994}$$

Curva de Infiltração



Velocidade de Infiltração



Ponto 14 São Cristóvão

Tempo Acumulado (min)	Infiltração Acumulada (cm)
1	0,8
2	1,5
3	2,15
4	2,65
5	3,13
10	4,5
15	5,4
20	5,86
25	6,42
30	6,92
35	7,3
40	7,82
45	8,2
50	8,57
55	8,87
60	9,2
65	9,53
70	9,9
75	10,27

Forma Final da equação de Infiltração:

$$I = k T^a \quad \therefore \quad I = 5,2166 \cdot T^{0,000104}$$

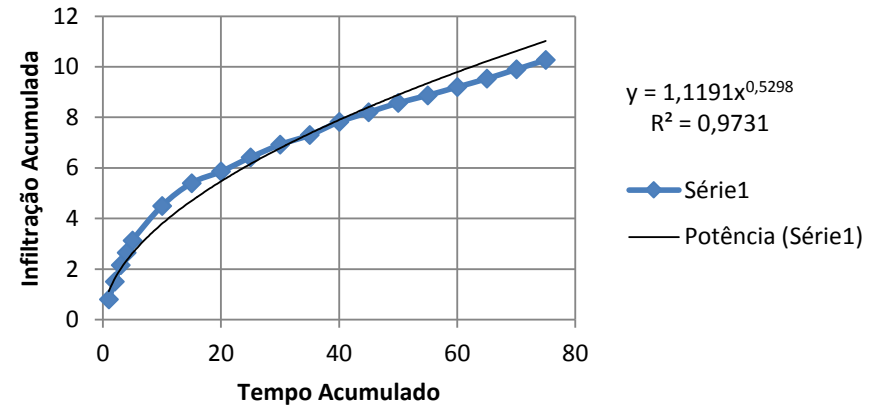
Forma Final da Equação de Velocidade Instantânea:

$$VI = A \cdot T^{a-1} \quad \therefore \quad VI = 0,717389 \cdot T^{-0,9999}$$

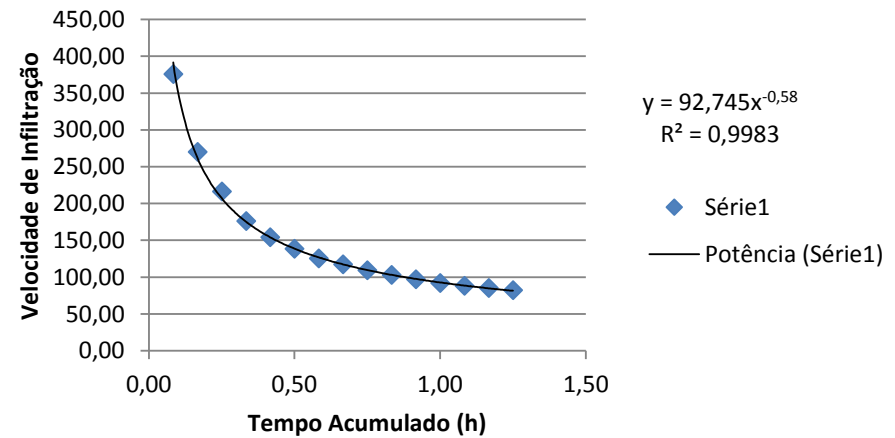
Forma Final da Equação de Velocidade de Infiltração Média

$$VI_m = k \cdot T^{a-1} \quad \therefore \quad VI_m = 5,2166 \cdot T^{-0,9999}$$

Curva de Infiltração



Velocidade de Infiltração



Ponto 15 Carneiro Neto

Tempo Acumulado (min)	Infiltração Acumulada (cm)
1	2,6
2	4,6
3	6,54
4	8
5	9,39
7	12,21
12	16,84
17	20,18
22	22,5
27	26,9
32	30,05
37	32,5
42	35,4
47	38,1
52	40,21
57	42,28
62	43,99

Forma Final da equação de Infiltração:

$$I = k T^a \quad \therefore I = 16,5802 \cdot T^{0,021866}$$

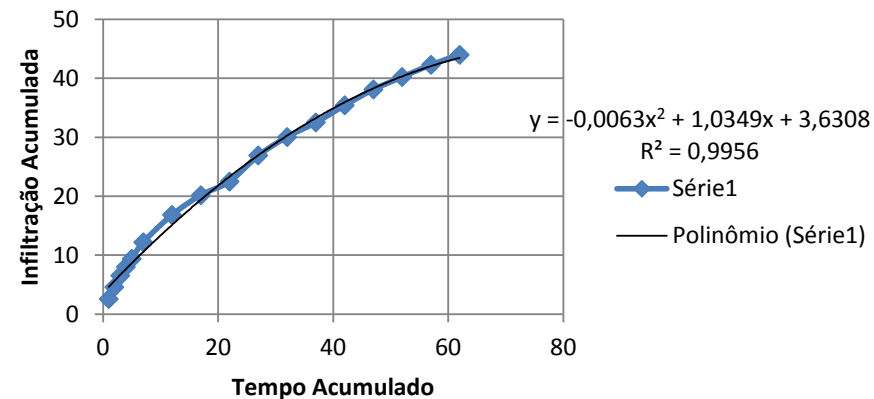
Forma Final da Equação de Velocidade Instantânea:

$$VI = A \cdot T^{a-1} \quad \therefore VI = 1,219588 \cdot T^{-0,97813}$$

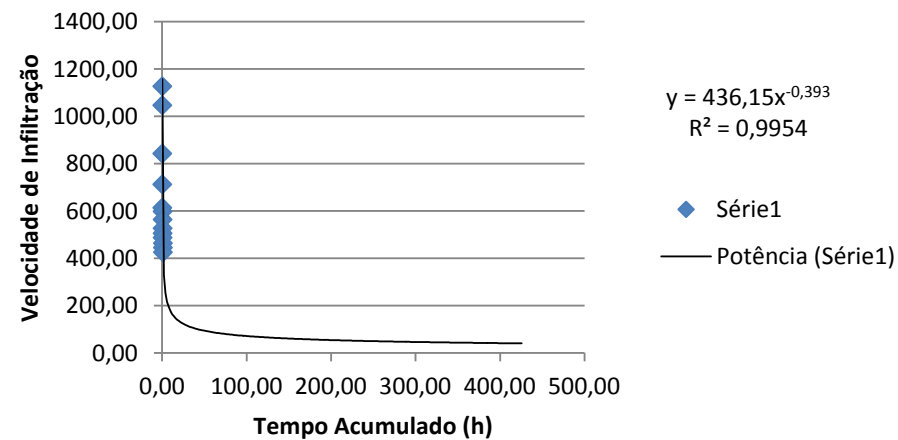
Forma Final da Equação de Velocidade de Infiltração Média

$$VI_m = k \cdot T^{a-1} \quad \therefore VI_m = 16,5802 \cdot T^{-0,97813}$$

Curva de Infiltração



Velocidade de Infiltração



Ponto 16 Sanderson

Tempo Acumulado (min)	Infiltração Acumulada (cm)
1	2,07
2	3,08
3	5,7
4	7,06
5	8,38
6	9,62
7	10,62
8	12
9	13,34
10	14,57
11	16,03
12	17,4
13	18,7
14	19,89
15	21,12
16	22,4
17	23,6

Forma Final da equação de Infiltração:

$$I = k T^a \quad \therefore I = 1,99 \cdot T^{0,872276}$$

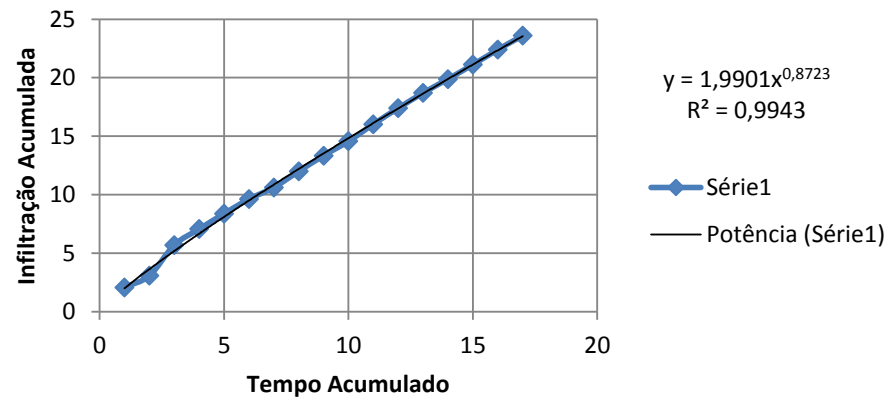
Forma Final da Equação de Velocidade Instantânea:

$$VI = A \cdot T^{a-1} \quad \therefore VI = 0,2988 \cdot T^{-0,12772}$$

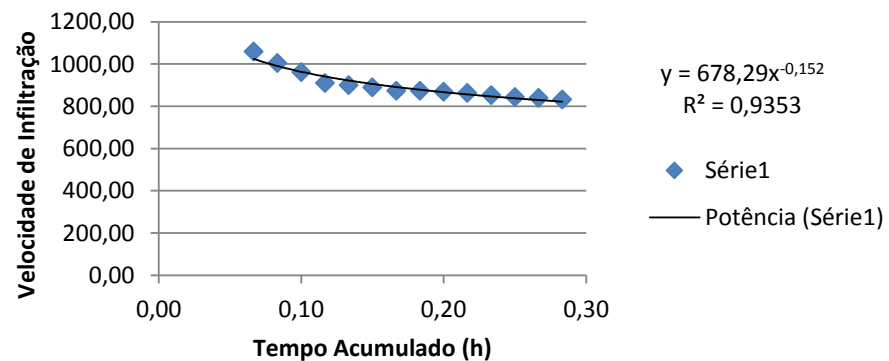
Forma Final da Equação de Velocidade de Infiltração Média

$$VI_m = k \cdot T^{a-1} \quad \therefore VI_m = 1,99 \cdot T^{-0,12772}$$

Curva de Infiltração



Velocidade de Infiltração



Ponto 17 Unipar

Tempo Acumulado (min)	Infiltração Acumulada (cm)
1	0,8
2	1
3	1,2
4	1,25
5	1,5
10	2,3
15	3,15
20	4,2
25	4,3
30	4,9
35	5,41
40	5,8
45	6,2
50	6,5
55	6,81

Forma Final da equação de Infiltração:

$$I = k T^a \quad \therefore \quad I = 0,6563 \cdot T^{0,58431}$$

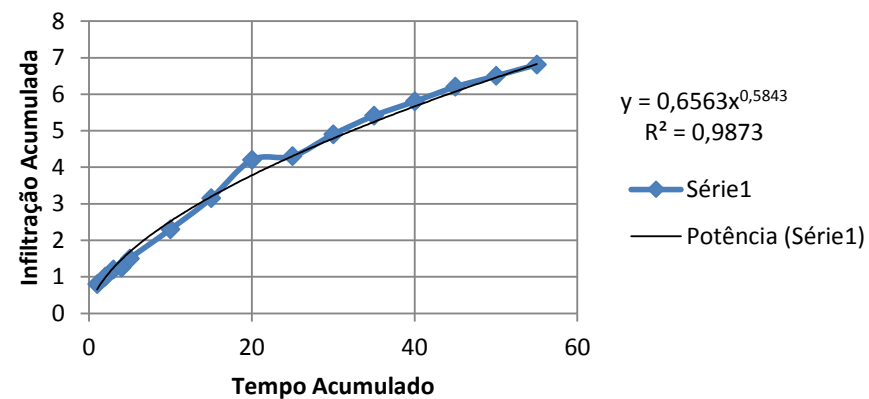
Forma Final da Equação de Velocidade Instantânea:

$$VI = A \cdot T^{a-1} \quad \therefore \quad VI = 0,18288 \cdot T^{-0,41569}$$

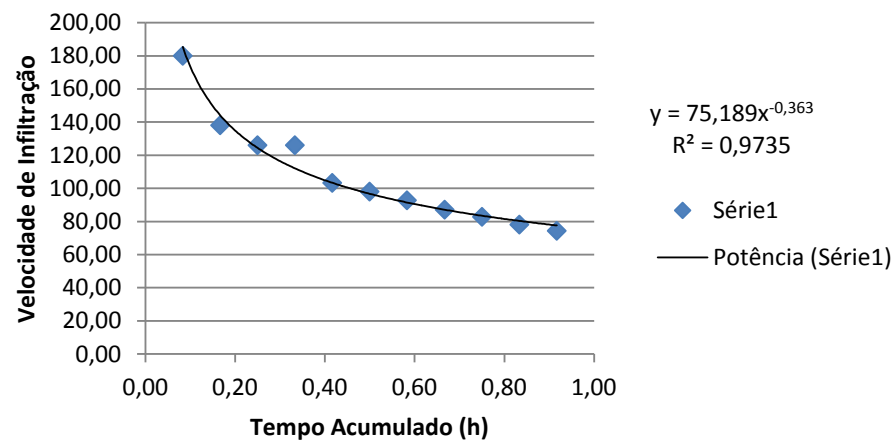
Forma Final da Equação de Velocidade de Infiltração Média

$$VI_m = k \cdot T^{a-1} \quad \therefore \quad VI_m = 0,6563 \cdot T^{-0,41569}$$

Curva de Infiltração



Velocidade de Infiltração



Ponto 18 Prolongamento

Tempo Acumulado (min)	Infiltração Acumulada (cm)
7,2	0,02
8,2	0,03
9,2	0,05
10,05	0,07
10,7	0,08
11,05	0,10
11,5	0,12
12	0,13
12,1	0,15
12,6	0,17
12,8	0,18
13,2	0,20
13,5	0,22
13,8	0,23

Forma Final da equação de Infiltração:

$$I = k T^a \quad \therefore I = 10,1036 \cdot T^{0,000366}$$

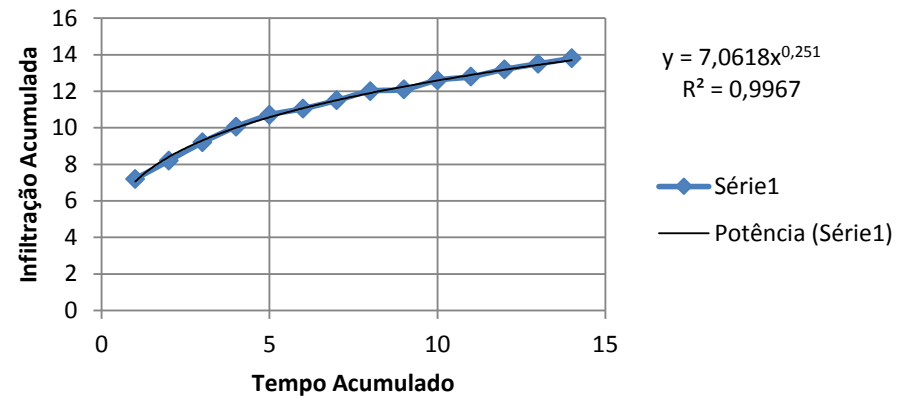
Forma Final da Equação de Velocidade Instantânea:

$$VI = A \cdot T^{a-1} \quad \therefore VI = 1,044776 \cdot T^{-0,99963}$$

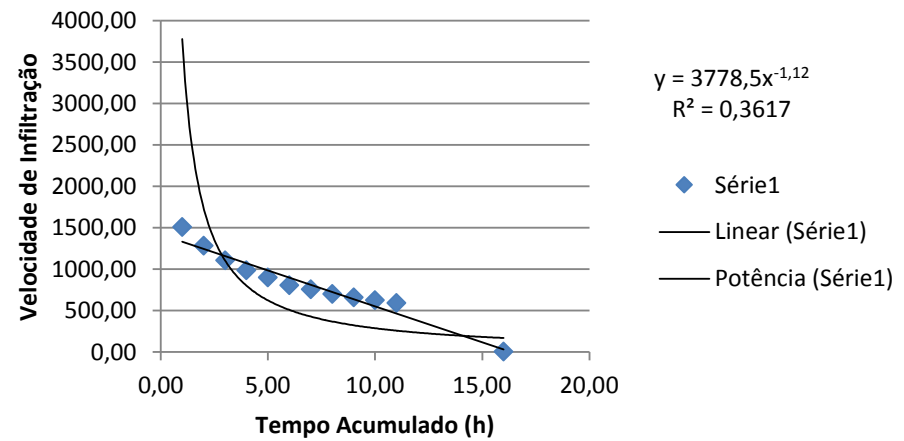
Forma Final da Equação de Velocidade de Infiltração Média

$$VI_m = k \cdot T^{a-1} \quad \therefore VI_m = 10,1036 \cdot T^{-0,99963}$$

Curva de Infiltração



Velocidade de Infiltração



Ponto 19 Cerealista

Tempo Acumulado (min)	Infiltração Acumulada (cm)
5	0,4
10	1,08
15	2,2
20	2,39
25	3,09
30	3,56
35	4,37
40	4,88
45	5,54
50	6,1
55	6,59
60	7,3
65	7,47
70	8,14
75	8,57
80	8,87
85	9,55
90	9,96

Forma Final da equação de Infiltração:

$$I = k T^a \quad \therefore I = 0,0979 \cdot T^{1,047657}$$

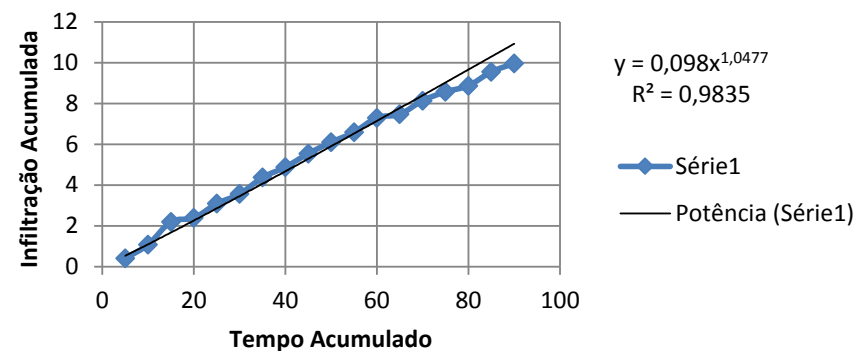
Forma Final da Equação de Velocidade Instantânea:

$$VI = A \cdot T^{a-1} \quad \therefore VI = 1,00888 \cdot T^{0,047657}$$

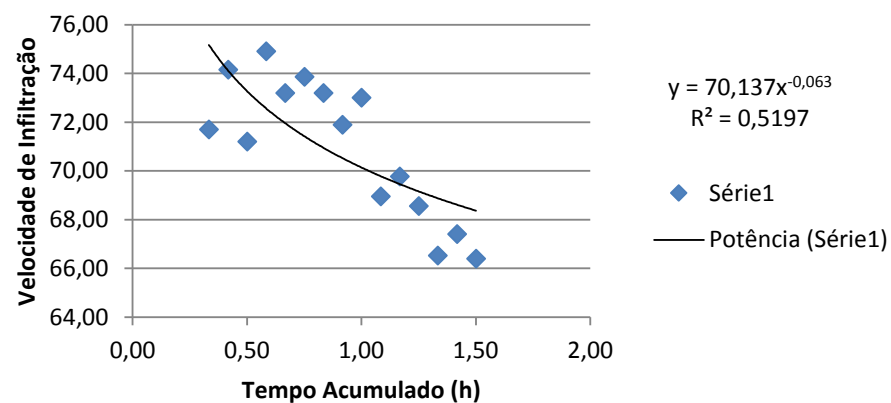
Forma Final da Equação de Velocidade de Infiltração Média

$$VIm = k \cdot T^{a-1} \quad \therefore VIm = 0,0979 \cdot T^{0,047657}$$

Curva de Infiltração



Velocidade de Infiltração



Ponto 20 Sol Nascente

Tempo Acumulado (min)	Infiltração Acumulada (cm)
0,5	0,08
1	0,17
3	0,25
4,28	0,33
5,04	0,42
5,5	0,50
5,67	0,58
6,58	0,67
7,26	0,75
7,6	0,83
7,55	0,92
7,67	1,00
8,24	1,08
8,81	1,17
9,28	1,25
9,66	1,33
10	1,42
10,43	1,50

Forma Final da equação de Infiltração:

$$I = k T^a \quad \therefore \quad I = 0,157 \cdot T^{0,971806}$$

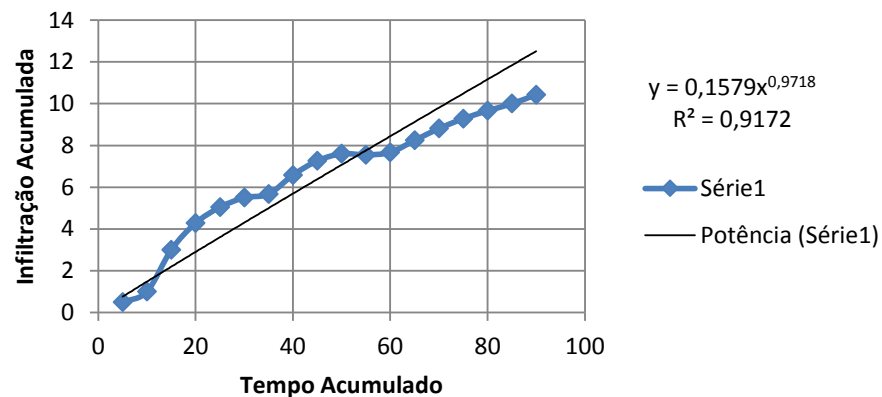
Forma Final da Equação de Velocidade Instantânea:

$$VI = A \cdot T^{a-1} \quad \therefore \quad VI = 0,80162 \cdot T^{-0,02819}$$

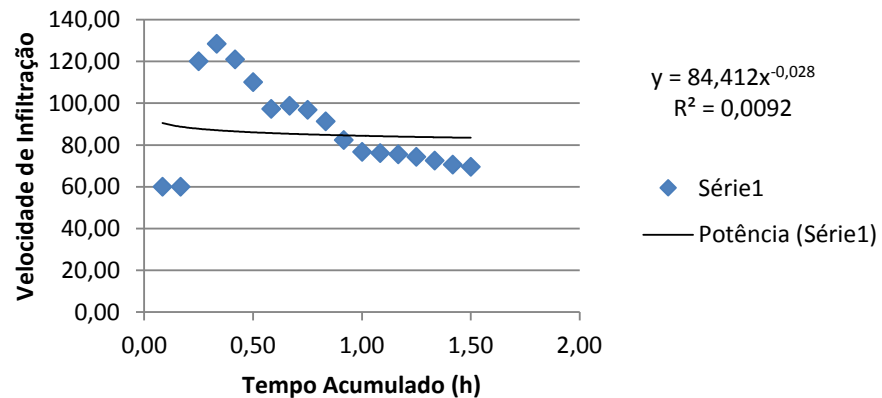
Forma Final da Equação de Velocidade de Infiltração Média

$$VI_m = k \cdot T^{a-1} \quad \therefore \quad VI_m = 0,157 \cdot T^{-0,02819}$$

Curva de Infiltração



Velocidade de Infiltração



Ponto 22 Aluvan

Tempo Acumulado (min)	Infiltração Acumulada (cm)
16	2,5
29	3,5
40	3
48,5	4,5
56	5
60	4

Forma Final da equação de Infiltração:

$$I = k T^a \quad \therefore \quad I = 0,74288 \cdot T^{0,437505}$$

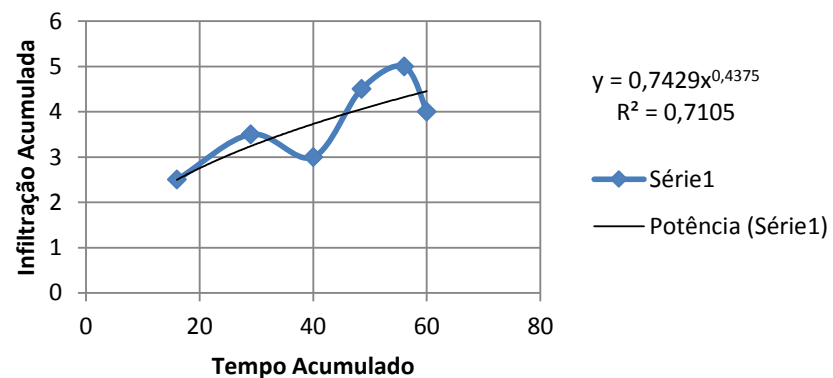
Forma Final da Equação de Velocidade Instantânea:

$$VI = A \cdot T^{a-1} \quad \therefore \quad VI = 0,12908 \cdot T^{-0,56249}$$

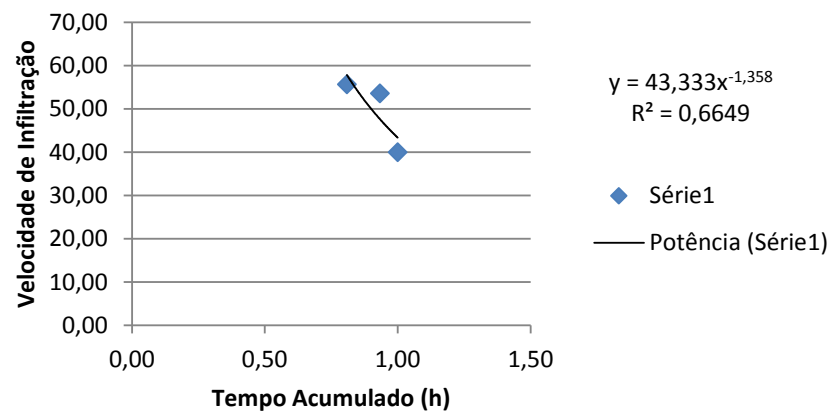
Forma Final da Equação de Velocidade de Infiltração Média

$$VI_m = k \cdot T^{a-1} \quad \therefore \quad VI_m = 0,74288 \cdot T^{-0,56249}$$

Curva de Infiltração



Velocidade de Infiltração



Ponto 23 Marabá

Infiltração Acumulada (cm)	Infiltração Acumulada (cm)
1	0,04
2	0,10
3	0,16
4	0,23
5	0,31
6	0,39

Forma Final da equação de Infiltração:

$$I = k T^a \quad \therefore I = 0,471 \cdot T^{0,812707}$$

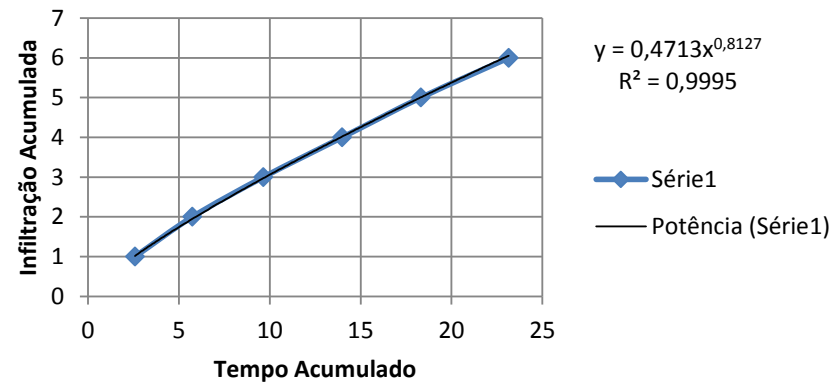
Forma Final da Equação de Velocidade Instantânea:

$$VI = A \cdot T^{a-1} \quad \therefore VI = 0,32668 \cdot T^{-0,18729}$$

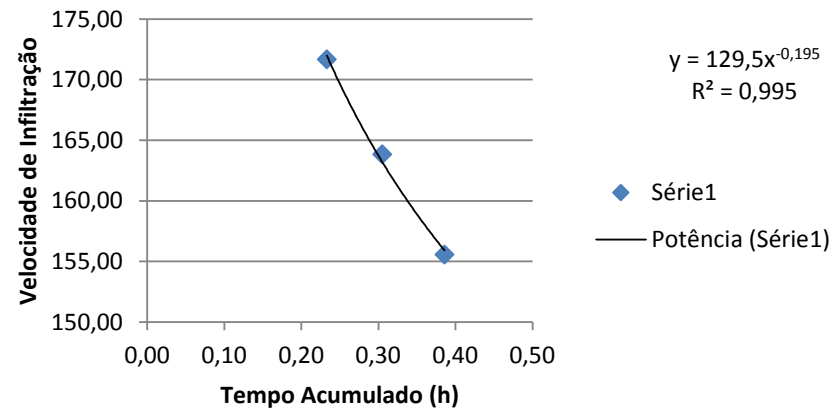
Forma Final da Equação de Velocidade de Infiltração Média

$$VI_m = k \cdot T^{a-1} \quad \therefore VI_m = 0,471 \cdot T^{-0,18729}$$

Curva de Infiltração



Velocidade de Infiltração



Ponto 24 Pinheiros

Infiltração Acumulada (cm)	Infiltração Acumulada (cm)
3	0,22
4,5	0,35
5	0,47
7	0,53
8	0,58
9,5	0,62

Forma Final da equação de Infiltração:

$$I = k T^a \quad \therefore I = 0,20106 \cdot T^{1,027588}$$

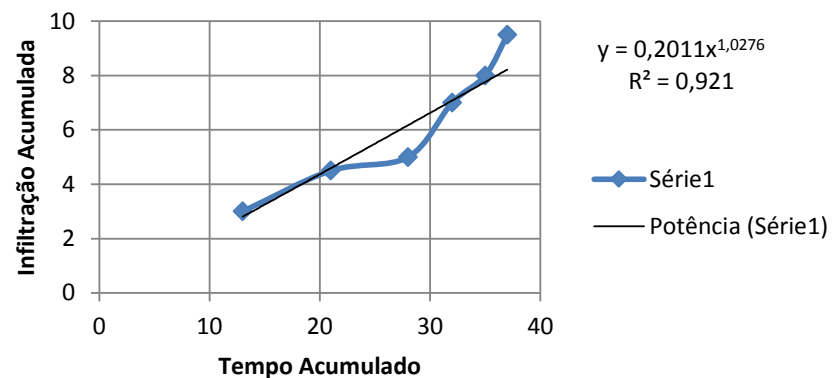
Forma Final da Equação de Velocidade Instantânea:

$$VI = A \cdot T^{a-1} \quad \therefore VI = 0,69667 \cdot T^{0,027588}$$

Forma Final da Equação de Velocidade de Infiltração Média

$$VIm = k \cdot T^{a-1} \quad \therefore VIm = 0,20106 \cdot T^{0,027588}$$

Curva de Infiltração



Velocidade de Infiltração

