

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA

**GEOTECNOLOGIAS E PLANEJAMENTO URBANO:
PROPOSTA METODOLÓGICA E AVALIAÇÃO DE DADOS OBTIDOS POR
AERONAVES REMOTAMENTE PILOTADAS (RPA) COMO
CONTRIBUIÇÃO À CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA**

ELEUDO ESTEVES DE ARAUJO SILVA JUNIOR

ORIENTADOR: NEWTON MOREIRA DE SOUZA
COORIENTADOR: LENILDO SANTOS DA SILVA

TESE DE DOUTORADO EM GEOTECNIA
PUBLICAÇÃO: G.TD – 155/19

BRASÍLIA / DF
JULHO DE 2019

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR.

APROVADA POR:

NEWTON MOREIRA DE SOUZA, DSc. (UnB)
(ORIENTADOR)

LENILDO SANTOS DA SILVA, DSc. (UnB)
(COORIENTADOR)

MANOEL PORFÍRIO CORDÃO NETO, DSc. (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)

PATRÍCIA DE ARAÚJO ROMÃO, DSc. (UFG)
(EXAMINADORA EXTERNA)

GEORGE FERNANDES AZEVEDO, DSc. (UFMA)
(EXAMINADOR EXTERNO)

DATA: BRASÍLIA / DF, 30 DE JULHO DE 2019.

DEDICATÓRIA

À minha esposa e filhos.

À minha família e aos verdadeiros amigos que dela fazem parte.

Em especial à minha comadre Natalia Assis de Melo Perez (in memoriam), exemplo de fé.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos que me ajudaram e encorajaram durante a elaboração deste trabalho, particularmente ao Professor Newton Moreira de Souza, meu orientador e amigo, por todo o conhecimento compartilhado e orientação competente.

Ao meu coorientador, Professor Lenildo Santos da Silva e ao Projeto μ VANT – Micro Veículo Aéreo Não Tripulado da Universidade de Brasília, sem seu auxílio nada disso seria possível.

Ao piloto Rodolpho Gondim, pela competência e apoio nos aerolevantamentos realizados.

Aos professores da área de Representação Gráfica do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília, muito obrigado. Registro um agradecimento especial aos professores Edison Pratini e Evangelos Christakou por sempre me incentivarem e apoiarem de forma incondicional.

Aos professores Cláudio Henrique Pereira e Cláudia Marcia Gurjão pelo apoio, José Camapum e Maurício Sales pelos comentários e contribuições na Banca de Qualificação do Projeto de Doutorado e George Fernandes Azevedo por todo apoio e conhecimento partilhado.

Agradeço aos professores, servidores e colaboradores do programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília.

Aos professores Manoel Porfírio, Alessandro Tarantino e Enrique Romero por terem viabilizado meu estágio na Universidade Politécnica da Catalunha (UPC) e ao Professor Aitor Martin Sierra, pela orientação e supervisão na UPC/Terrassa.

Ao Projeto GREAT pelo apoio financeiro durante a realização do estágio doutoral.

Aos amigos da “Sala do Fundo”, desde a época do Pedro Henrique, Carlos Petrônio, Conrad, Marcelo Borges até os mais recentes Fabiani, Manuelle, Silvana e em especial ao Bruno Oliveira.

Aos alunos envolvidos na pesquisa, em especial à Natalia Battaglini e ao Guilherme Rivero, pela dedicação e ideias partilhadas.

Não poderia deixar de agradecer a colaboração e atenção de todos os servidores da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, em especial do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental na pessoa do meu amigo Diego Henrique.

Por fim, agradeço ao Professor Márcio Muniz pelos conselhos e direcionamentos essenciais ao longo do doutorado e ao Bruno Esteves Távora, primo e parceiro de ideias.

De forma especial para pessoas especiais: Cecília, minha esposa; Guilherme e Isadora, meus filhos; meus pais, minha irmã e cunhado, sogros e a Deus Pai.

GEOTECNOLOGIAS E PLANEJAMENTO URBANO: PROPOSTA METODOLÓGICA E AVALIAÇÃO DE DADOS OBTIDOS POR AERONAVES REMOTAMENTE PILOTADAS (RPA) COMO CONTRIBUIÇÃO À CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA

RESUMO

A cartografia e o geoprocessamento, em especial a Cartografia Geotécnica aplicada ao Planejamento Urbano, tratam das questões relativas aos critérios de seleção de sítios urbanos, estudos de suscetibilidade e análise de riscos de impactos ambientais decorrentes ou não da urbanização, sob uma abordagem preventiva e orientativa. Entretanto, a escala temporal das cartas geotécnicas muitas vezes não acompanha a velocidade da dinâmica territorial, nesse sentido as Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPA), também denominadas Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) ou popularmente drones, são dispositivos de uso cada vez mais frequentes na realização de vários tipos de atividades, tais como serviços de monitoramento e aquisição de dados aerofotogramétricos. Nesse sentido, a hipótese principal desta pesquisa é a possibilidade de melhoria da qualidade das cartas geotécnicas com ganhos no detalhamento espacial e temporal utilizando-se dados obtidos por aerolevanteamento com RPA, bem como dados obtidos por sensores a bordo de missões de satélite com a utilização de processamento geoespacial em plataforma baseada em nuvem e sua aplicação na elaboração de diretrizes de uso e ocupação do solo. Para tanto, a metodologia adotada na pesquisa busca atender às orientações recentes de acordo com a legislação federal de combate e prevenção de desastres e ordenamento territorial e baseia-se nos trabalhos de metodologias consagradas de Cartografia Geotécnica nacional e internacional, tendo como inovação a utilização de dados obtidos por aerolevanteamento com RPA, utilização de processamento geoespacial em plataforma baseada em nuvem e a integração com um sistema de análise quantitativa de risco por escorregamentos deflagrados por chuvas. Como resultados alcançados, destacam-se a proposta metodológica elaborada e as cartas resultantes em cada uma das fases da metodologia, a saber: Cartas Complementares, Cartas Analíticas, Carta de Suscetibilidade à Erosão, Carta de Aptidão à Urbanização, Cartas de Ameaça de Escorregamentos e rotinas computacionais criadas para apoio ao planejamento urbano.

GEOTECHNOLOGY AND URBAN PLANNING: METHODOLOGICAL PROPOSAL AND EVALUATION OF DATA OBTAINED BY REMOTELY PILOTED AIRCRAFT (RPA) AS A CONTRIBUTION TO GEOTECHNICAL CARTOGRAPHY

ABSTRACT

Mapping and geoprocessing, especially the Geotechnical Cartography applied to Urban Planning, deal with issues related to the selection criteria of urban sites, susceptibility studies and analysis of risks of environmental impacts arising from urbanization or not, under a preventive and orientative approach. However, the time scale of geotechnical charts often does not follow the speed of territorial dynamics, in this sense, Remotely Aircraft (RPA), also known as Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) or popularly drones, are increasingly used in carrying out various types of activities, such as aerial and photogrammetric data acquisition and monitoring services. In this sense, the main hypothesis of this research is the possibility of improving the quality of geotechnical charts with gains in spatial and temporal detail using data obtained by aerial surveying with RPA, as well as data obtained by sensors on board satellite missions with the use of geospatial processing in a cloud-based platform and its application in the elaboration of land use and land use guidelines. In order to do so, the methodology adopted in the research seeks to comply with recent guidelines in accordance with the federal legislation on disaster prevention and control and territorial planning and is based on the work of established methodologies of National and International Geotechnical Cartography, using as innovation the use of data obtained by aerial surveying with RPA, use of geospatial processing in a cloud-based platform and integration with a system of quantitative risk analysis by rain-triggered slides. The results obtained include the methodological proposal elaborated and the resulting letters in each of the phases of the methodology, namely: Complementary Charts, Analytical Charts, Erosion Susceptibility Chart, Chart of Aptitude to Urbanization, Slip and Threat Menacing Chart and computational routines created to support urban planning.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1.	JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO	2
1.2.	OBJETIVOS	4
1.3.	ESCOPO DA TESE.....	5
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1.	GEOPROCESSAMENTO E GEOTECNOLOGIAS.....	6
2.1.1.	SENSORIAMENTO REMOTO	14
2.1.2.	SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS	28
2.1.2.1.	PLATAFORMA GOOGLE EARTH ENGINE	34
2.1.3.	FOTOGRAMETRIA E AEROLEVANTAMENTO.....	37
2.2.	AERONAVES REMOTAMENTE PILOTADAS	47
2.2.1.	APLICAÇÕES E POTENCIALIDADES.....	50
2.3.	CARTOGRAFIA.....	58
2.3.1.	CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA.....	61
2.4.	PLANEJAMENTO URBANO E TERRITORIAL	68
2.4.1.	INFORMAÇÕES SOBRE O TERRITÓRIO – ESCOLHA DO SÍTIO	70
2.4.2.	LEIS APLICADAS AO PLANEJAMENTO E OCUPAÇÃO DO SOLO.....	72
2.4.3.	ELEMENTOS MORFOLÓGICOS DO ESPAÇO URBANO	84
3.	CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO.....	87
3.1.	JUSTIFICATIVA DE ESCOLHA DA ÁREA DE ESTUDO.....	87
3.1.1.	ESCOLHA DO SITIO: COMISSÃO CRULS E RELATÓRIO BELCHER	89
3.1.2.	EDITAL DO CONCURSO - PLANO PILOTO DA NOVA CAPITAL	91
3.1.3.	BRASÍLIA CONSTRUÍDA	93
3.2.	SETOR HABITACIONAL TAQUARI	96
3.2.1.	GEOLOGIA.....	98
3.2.2.	GEOMORFOLOGIA.....	99

3.2.3.	PEDOLOGIA.....	101
3.2.4.	VEGETAÇÃO	103
3.2.5.	RECURSOS HÍDRICOS	105
3.2.6.	SETOR HABITACIONAL TAQUARI – ETAPA II	106
4.	MATERIAIS E METODOLOGIA APLICADA.....	113
4.1.	MATERIAIS	115
4.1.1.	PRODUTOS CARTOGRÁFICOS	115
4.1.2.	IMAGENS DE SENSORIAMENTO REMOTO	116
4.1.3.	PROGRAMAS COMPUTACIONAIS UTILIZADOS	116
4.1.4.	EQUIPAMENTOS	117
4.1.5.	MATERIAIS UTILIZADOS NO AEROLEVANTAMENTO COM RPA	117
4.2.	METODOLOGIA APLICADA	118
4.2.1.	FASE PRELIMINAR: INVENTÁRIO.....	120
4.2.1.1.	MONTAGEM DA BASE DE DADOS	121
4.2.1.2.	PROCESSAMENTO DE MODELOS NUMÉRICOS DO TERRENO	123
4.2.1.3.	PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGEM	126
4.2.1.4.	ELABORAÇÃO DE CARTAS	131
4.2.1.5.	OPERAÇÕES CARTOGRÁFICAS	131
4.2.1.6.	PROCESSAMENTO GEOESPACIAL COM O GEE	131
4.2.2.	FASE I - GERAL: CARTA DE SUSCETIBILIDADE.....	132
4.2.2.1.	CARTA DE SUSCETIBILIDADE À EROSÃO	133
4.2.3.	FASE II - INTERMEDIÁRIA: CARTA DE APTIDÃO À URBANIZAÇÃO ..	136
4.2.3.1.	CARTA DE APTIDÃO À URBANIZAÇÃO	138
4.2.3.2.	GEORREFERENCIAMENTO DOS ALVOS.....	140
4.2.3.3.	AEROLEVANTAMENTO COM RPA ASA-FIXA E MULTIROTOR.....	144
4.2.3.4.	PROCESSAMENTO DOS DADOS OBTIDOS	147
4.2.4.	FASE III - DETALHE: CARTA DE RISCO	150

4.2.4.1. ZONEAMENTO DA AMEAÇA DE ESCORREGAMENTOS E DEFINIÇÃO DE ÁREAS DE RISCO	151
5. RESULTADOS E ANÁLISES	155
5.1. PLATAFORMA GEE – RESULTADOS	156
5.2. PROPOSTA METODOLÓGICA: GEOTECNOLOGIAS APLICADAS AO PLANEJAMENTO URBANO	163
5.3. RESULTADOS DA FASE PRELIMINAR	164
5.4. RESULTADOS DA FASE I - GERAL.....	185
5.5. RESULTADOS DA FASE II - INTERMEDIÁRIA.....	188
5.5.1. GEORREFERENCIAMENTO DOS ALVOS	189
5.5.2. AEROLEVANTAMENTOS REALIZADOS	190
5.5.2.1. VOOS PREVISTOS E VOOS REALIZADOS – RPA ASA-FIXA.....	191
5.5.2.2. PROCESSAMENTO DOS DADOS NO AGISOFT PHOTOSCAN	195
5.6. RESULTADOS DA FASE III – DETALHE	200
6. CONCLUSÕES.....	205
6.1. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	207
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	208
APÊNDICE A – DADOS DO AEROLEVANTAMENTO COM RPA.....	219
APÊNDICE B – TABULAÇÕES CRUZADAS	258
APÊNDICE C – ROTINAS COMPUTACIONAIS	261

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Composições coloridas com bandas espectrais do Landsat 8 e respectivos usos e aplicações.	22
Tabela 2.2 – Características das bandas do sensor presente nos satélites Sentinel-2.....	27
Tabela 2.3 – Estimativa de produtividade com RPAs asa fixa e asa rotatória (modificado de DronEng, c2014b).	54
Tabela 2.4 - Resumo do aerolevante executado: Luziânia-GO.....	57
Tabela 2.5 - Classificação dos níveis de “Sensibilidade do Solo” em função da Erodibilidade (modificado de GDF, 2019).	78
Tabela 2.6 - Nível de sensibilidade (risco ecológico de perda de solo por erosão) das classes de solo no Distrito Federal (modificado de GDF, 2019).	78
Tabela 2.7 - Sensibilidade natural dos aquíferos porosos à contaminação (modificado de GDF, 2019).....	80
Tabela 4.1 - Coordenadas do Retângulo Envolvente da área de estudo: Fase Preliminar	120
Tabela 4.2 - Coordenadas do Retângulo Envolvente da área de estudo: Fase I.....	133
Tabela 4.3 - Critérios utilizados na elaboração da Carta de Suscetibilidade à Erosão.	135
Tabela 4.4 - Coordenadas do Retângulo Envolvente da área de estudo: Fase II.	137
Tabela 4.5 - Critérios utilizados na elaboração da Carta de Aptidão Urbana.	139
Tabela 4.6 - Georreferenciamento dos pontos de controle.....	141
Tabela 4.7 - Coordenadas do Retângulo Envolvente da área de estudo: Fase III.	150
Tabela 4.8 - Parâmetros utilizados nas análises pelos tipos de solo encontrados na área de estudo (Azevedo <i>et al.</i> , 2013).	153
Tabela 4.9 - Dados pluviométricos.	154
Tabela 5.1 – Tabela resumo das fases, dados utilizados e resultados.	163
Tabela 5.2 – Medidas de classes temáticas: Carta de Hipsometria (dados da Base Cartográfica)	166
Tabela 5.3 - Medidas de classes temáticas: Carta de Declividade.	169
Tabela 5.4 - Medidas de classes temáticas: Carta de Orientação de Vertentes.....	171
Tabela 5.5 – Relação de classes temáticas utilizadas nas classificações de uso e cobertura .	177
Tabela 5.6 - Medidas de classes temáticas: Carta de Temperatura de Brilho de Superfície..	179
Tabela 5.7 - Medidas de classes temáticas: Carta de Perda de Suscetibilidade à Erosão	185
Tabela 5.8 – Medidas de classes temáticas: Carta de Perda de Solo por Erosão.	186
Tabela 5.9 - Medidas de classes temáticas: Carta de Perda de Aptidão a Urbanização.....	188

Tabela 5.10 - Tabulação cruzada entre Aptidão e Uso e cobertura (km ²).	189
Tabela 5.11 - Tabela com as coordenadas dos GCP corrigidas com a base do IBGE.	190
Tabela 5.12 - Dados do voo 1 realizado em 17 de maio de 2017	191
Tabela 5.13 - Dados do voo 2 realizado em 17 de maio de 2017.	191
Tabela 5.14 - Dados do voo 3 realizado em 17 de maio de 2017.	192
Tabela 5.15 - Dados do voo 4 realizado em 17 de maio de 2017.	192
Tabela 5.16 - Dados do voo 5 realizado em 17 de maio de 2017.	193
Tabela 5.17 - Dados do voo 6 realizado em 17 de maio de 2017.	193
Tabela 5.18 - Dados do voo 7 realizado em 17 de maio de 2017.	194
Tabela 5.19 - Dados do voo 8 realizado em 17 de maio de 2017.	194
Tabela 5.20 - Dados do voo 9 realizado em 17 de maio de 2017.	195
Tabela 5.21 – Processamentos dos dados no <i>Agisoft Photoscan</i>	197
Tabela 5.22 – Comparativo de PR nos cenários 1 e 5 do cálculo.	202

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Mapa Temático de Declividade.	7
Figura 2.2 – Mapa cadastral (modificado de www.dpi.inpe.br).	7
Figura 2.3 – Mapa do Metrô-DF 2019 (disponível em www.metro.df.gov.br).	8
Figura 2.4 - MNT com representação de grade regular de altimetria.	8
Figura 2.5 - Imagem do Plano Piloto de Brasília - 2019 (modificado de Google Earth Pro). ...	9
Figura 2.6 – Diferentes níveis de obtenção de dados de sensoriamento remoto.....	14
Figura 2.7 – Diferentes resoluções espaciais para uma mesma imagem (modificado de Almeida <i>et al.</i> , 2014).....	15
Figura 2.8 - Espectro eletromagnético. (Ilustração: Peter Hermes Furian - disponível em www.shutterstock.com)......	16
Figura 2.9 - Diferentes resoluções radiométricas para uma mesma imagem (modificado de Oliveira, 2016).	16
Figura 2.10 - <i>Timeline</i> do Projeto Landsat (USGS, 2015).	18
Figura 2.11 - Composições coloridas RGB em diferentes satélites (USGS, 2013).	21
Figura 2.12 - Características espectrais do Landsat 7 e 8 (USGS, 2013).	22
Figura 2.13 - Comparação dos satélites Sentinel-2, Landsat 7 e 8 (USGS, 2015).....	27
Figura 2.14 - Sobreposição de camadas de dados e geração de novos mapas em ambiente SIG (modificado de ESRI, c2019).....	28
Figura 2.15 - Arquitetura de Sistemas de Informação Geográfica. (Câmara <i>et al.</i> , 2001).....	30
Figura 2.16 – Etapas do PDI.	31
Figura 2.17 – Fluxograma do PDI.....	31
Figura 2.18 – Curvas de reflectância da vegetação, água e quartzito (modificado de Meneses & Almeida, 2012).....	32
Figura 2.19 – Diagrama do Editor de códigos do GEE (modificado de Google Earth Solidário, c2019).....	34
Figura 2.20 – Variável para importação de imagem única e coleção de imagens.	35
Figura 2.21 – Pesquisa das Imagens na plataforma GEE.....	36
Figura 2.22 – Parâmetros para ajuste da visualização no GEE.....	36
Figura 2.23 - <i>Boston, as the Eagle and the Wild Goose See It</i> – fotografia aérea tomada em 1860 (disponível em iphoto.com.br).	38
Figura 2.24 – Fases do mapeamento aerofotogramétrico.	40
Figura 2.25 – Parâmetros utilizados para o cálculo da escala da fotografia.	41

Figura 2.26 – Esquema de cobertura aerofotogramétrica.	42
Figura 2.27 – Exemplo de alvo (GCP) utilizado na pesquisa.	42
Figura 2.28 – Fotografia falsa-cor (composição colorida RGB543 – Landsat 8).	45
Figura 2.29 – Ortofotomosaico real (a) e clássico (b).	46
Figura 2.30 - RPA Asa fixa (Projeto μ VANT-UnB).	48
Figura 2.31 - RPA Asa rotativa (Projeto μ VANT-UnB).	48
Figura 2.32 - Planejamento de voo do drone multirotor (DronEng, c2014b).	53
Figura 2.33 - Planejamento de voo do drone asa fixa (DronEng, c2014b).	53
Figura 2.34 - Planos de voo 1 a 7 – voo completo (modificado de Google Earth Pro).	55
Figura 2.35 – Modelo de RPA utilizado no aerolevanteamento.	55
Figura 2.36 - Fluxograma das fases realizadas em campo.	56
Figura 2.37 – Resultados após processamento dos dados obtidos no aerolevanteamento.	57
Figura 2.38 - Mapa de Bedolina (disponível em 4.bp.blogspot.com).	58
Figura 2.39 – Mapa de Ga-Sur (modificado de Carvalho & Araújo, 2008).	58
Figura 2.40 – Diagrama do método utilizado por Eratóstenes (modificado de Carvalho & Araújo, 2008).	59
Figura 2.41 - Análise de sítio – adequabilidade (modificado de McHarg, 1969).	71
Figura 2.42 – Funções da cidade e critérios de escolha dos sítios.	71
Figura 2.43 - Combate a Grilagem e Ocupações Irregulares (GDF, 2019).	75
Figura 2.44 - Risco Ecológico de Perda de Área de Recarga de Aquífero. (GDF, 2019).	77
Figura 2.45 - Risco Ecológico de Perda de Solo por Erosão. (GDF, 2019).	79
Figura 2.46 - Risco Ecológico de Contaminação do Subsolo. (GDF, 2019)	81
Figura 2.47 - Risco Ecológico de Perda de Áreas Remanescentes de Cerrado Nativo (GDF, 2019).	82
Figura 2.48 – Colocalização dos riscos ecológicos (modificado de GDF, 2016).	83
Figura 2.49 – <i>Skylines</i> de grandes cidades (disponível em www.shutterstock.com).	84
Figura 2.50 – Diferentes arranjos de quarteirões (modificado de Google Earth Pro, 2018).	85
Figura 2.51 – Modelo evolutivo e gradualista de largura de rua (Santos, 1988).	85
Figura 2.52 – Traçado gerador do plano (Costa, 1991).	86
Figura 2.53 - Imagens mostrando invasões no logradouro público do DF – proximidades da UnB (modificado do Google Earth Pro, 2019).	86
Figura 3.1 - Brasília Revisitada – áreas propostas (Costa, 1987).	88
Figura 3.2 - Mapa Retângulo Belcher - demarcações dos retângulos e sítios (modificado de Belcher, 1957).	90

Figura 3.3 – Mapa de Geologia (modificado de Belcher, 1957).....	90
Figura 3.4 – Mapa de Solos para Engenharia (modificado de Belcher, 1957).	91
Figura 3.5 - Plano Piloto de Brasília: croqui apresentado no concurso (Costa, 1991).....	92
Figura 3.6 - Plano Piloto de Brasília – alterações realizadas (Costa & Lima, 1985).....	93
Figura 3.7 - Áreas de risco à erosão (SEDUMA, 2009).	95
Figura 3.8 – Comparação entre mapas de suscetibilidade à erosão do solo no DF (modificado de SEDUMA, 2009 e GDF, 2019).	95
Figura 3.9 – Localização da Área de Estudo.....	96
Figura 3.10 – Implantação do SHTq nos anos 2002, 2010 e 2017 (modificado de Google Earth Pro).....	97
Figura 3.11 - Geologia - referência aos dobramentos na área.....	98
Figura 3.12 – Mapa geológico simplificado do DF (modificado de GDF, 2012).....	99
Figura 3.13 - Compartimentação geomorfológica do DF (modificado de GDF, 2012).....	100
Figura 3.14 - Mapa pedológico do DF (modificado de GDF, 2012).	101
Figura 3.15 - Perfil de corte em cambissolo (a) e perfil de solo residual em Chapada (b). ...	103
Figura 3.16 -Tipos de vegetação do Cerrado (Agência de Informação Embrapa, 2014).....	104
Figura 3.17 - Vegetação típica do Bioma Cerrado.....	104
Figura 3.18 – Carta da Hidrografia e das restrições ambientais do Taquari (modificado de Oliveira, 2018).	105
Figura 3.19 – APM Taquari (modificado de IBRAM, 2014).....	106
Figura 3.20 - Divisão e localização SHTq (SEDHAB, 2013).....	107
Figura 3.21 – Características da ocupação no SHTq II (modificado de Google Earth Pro)..	107
Figura 3.22 - Regularização fundiária SHTq (SEDHAB, 2013).....	108
Figura 3.23 - Sistema Viário do SHTq (SEDHAB, 2013).....	109
Figura 3.24 - Zoneamento de Usos do SHTq (SEDHAB, 2013).	109
Figura 3.25 - Parâmetros Urbanísticos do SHTq (SEDHAB, 2013).....	111
Figura 3.26 - Zoneamento APA Lago Paranoá (SEDHAB, 2013).	112
Figura 4.1 - Etapas metodológicas da Cartografia Geotécnica (modificado de Souza, 1994).	113
Figura 4.2 - Fases do Detalhamento Progressivo (modificado de Bitar <i>et al.</i> , 2015).	114
Figura 4.3 – Etapas e fases da Metodologia aplicada.	115
Figura 4.4 – Metodologia do Mapeamento Geotécnico.....	118
Figura 4.5 - Fluxograma do aerolevanteamento com RPA.....	119
Figura 4.6 – Área de abrangência da Fase Preliminar (Google Earth Pro).....	120

Figura 4.7 – Categorias de Modelo de Dados no SPRING.....	122
Figura 4.8 – Hipsometria – classes temáticas.	124
Figura 4.9 – Rosa dos ventos com indicação dos ângulos utilizados no fatiamento.....	125
Figura 4.10 – Histograma com distribuição de NC na função linear.	127
Figura 4.11 – NDVI (a) e SAVI (b) – realizados no GEE.	132
Figura 4.12 - Área de abrangência da Fase I - Geral (Google Earth Pro).....	132
Figura 4.13 – Rotina computacional de suscetibilidade à erosão (SPRING/LEGAL).	134
Figura 4.14 – Operações booleanas entre dados pedológicos e declividade.....	135
Figura 4.15 – Área de interesse do sobrevoo com RPA – Fase II (modificado de Google Maps).	136
Figura 4.16 - Área de abrangência da Fase II - Geral (Google Earth Pro).....	137
Figura 4.17 – Rotina computacional de aptidão à urbanização (SPRING/LEGAL).	138
Figura 4.18 – Piquetes de madeira fabricados na PRC/UnB.....	140
Figura 4.19 – Georreferenciamento com GPS <i>Ashtec ProMark 2</i>	140
Figura 4.20 – Pontos de apoio/GCP previstos e realizados.....	141
Figura 4.21 – Pontos levantados no dia 3 de março de 2017.	142
Figura 4.22 - Pontos levantados no dia 4 de março de 2017.....	142
Figura 4.23 - Pontos levantados no dia 6 de março de 2017.....	143
Figura 4.24 – Planos de voo longitudinais e transversais (modificado de Google Earth Pro).	144
Figura 4.25 – RPA’s utilizados no aerolevanteamento (Projeto μ VANT-UnB).	145
Figura 4.26 – Pontos de controle (alvos em papel) fixados.	145
Figura 4.27 - Planos de voo longitudinais (modificado de Google Earth Pro).....	146
Figura 4.28 - Planos de voo transversais (modificado de Google Earth Pro).....	146
Figura 4.29 – Exemplos de fotos inclinadas obtidas durante os voos.....	147
Figura 4.30 – Coordenadas geográficas gravadas na fotografia.	147
Figura 4.31 – Processamento dos dados - fase da geração de nuvem densa de pontos (Agisoft, 2018).....	148
Figura 4.32 - Área delimitada para análise de suscetibilidade e perigo de deslizamento.	150
Figura 4.33 - Esquema ilustrativo do modelo SLIDE de talude infinito (Azevedo, 2015)....	152
Figura 4.34 - Interface gráfica para modelo SLIDE probabilístico (Azevedo, 2015).....	153
Figura 4.35 - Chuva acumulada em 12/2014 (INMET, 2016).	154
Figura 5.1 – NDVI calculado para o DF – imagens do Landsat 8 (modificado de GEE).....	156
Figura 5.2 - SAVI calculado para o DF – imagens do Landsat 8 (modificado de GEE).	157

Figura 5.3 - NDMI calculado para o DF – imagens do Landsat 8 (modificado de GEE).....	158
Figura 5.4 – NDBI calculado para o DF – imagens do Landsat 8 (modificado de GEE).....	159
Figura 5.5 – NDBI calculado para o DF – imagens do Sentinel 2A (modificado de GEE)...	159
Figura 5.6 – Tela do GEE com resultados do B_u e gráfico de evolução temporal.	160
Figura 5.7 – Aplicação do B_u em áreas urbanas com adensamentos diferentes (modificado de GEE).....	161
Figura 5.8 – Imagens inicial (a) e resultante do B_u (b) (modificado de GEE).	162
Figura 5.9 – Carta de Localização da área de estudo.	164
Figura 5.10 – Carta de Hipsometria (dados do SRTM).	165
Figura 5.11 – Carta de Hipsometria (dados do Base Cartográfica Digital).	165
Figura 5.12 – Curva Hipsométrica da área.....	166
Figura 5.13 – Perfil Topográfico SW-NE.	167
Figura 5.14 – Carta de Declividade (dados da Base Cartográfica Digital).	168
Figura 5.15 – Carta de Declividade (dados do SRTM).....	169
Figura 5.16 – Carta de Orientação de Vertentes (dados do SRTM).	170
Figura 5.17 – Carta de Orientação de Vertentes (dados da Base Cartográfica Digital).....	170
Figura 5.18 – Carta Solar de Brasília (modificado de http://projeteec.mma.gov.br/).....	171
Figura 5.19 – Visualização 3D: dados de MNT com aplicação de texturas.	172
Figura 5.20 – Carta de Relevo Sombreado (dados da Base Cartográfica Digital).....	172
Figura 5.21 – Curvatura de Terreno (Plana e Perfil).....	173
Figura 5.22 – Carta de Geologia (Freitas-Silva & Campos, 1998).....	174
Figura 5.23 – Carta de Geomorfologia (GDF, 2012).....	175
Figura 5.24 – Carta de Solos (Embrapa, 1978).	176
Figura 5.25 – Cartas Imagem – satélites diversos.....	176
Figura 5.26 – Carta Imagem – Etapas do SHTq.	177
Figura 5.27 – Carta de Uso e Cobertura do Solo – 2016 (Classificador <i>Bhattacharya</i>).....	178
Figura 5.28 – Carta de Uso e Cobertura do Solo - 2016 (Classificador Maxver).....	178
Figura 5.29 – Carta de Temperatura de Brilho de Superfície.	179
Figura 5.30 – Carta de APP (Distância das drenagens).	180
Figura 5.31 – NDVI calculado para o SHTq (modificado de GEE).	181
Figura 5.32 - NDMI calculado para o SHTq (modificado de GEE).	181
Figura 5.33 - SAVI calculado para o SHTq (modificado de GEE).....	182
Figura 5.34 - EVI calculado para o SHTq (modificado de GEE).	182
Figura 5.35 – B_u calculado para o SHTq (modificado de GEE).	183

Figura 5.36 – Gráfico da evolução temporal dos índices calculados.	183
Figura 5.37 – Composição colorida RGB432 – Landsat 8 (modificado de GEE).	184
Figura 5.38 – Imagem pancromática – Landsat 8 (modificado de GEE).....	184
Figura 5.39 – Carta de Suscetibilidade à Erosão.....	185
Figura 5.40 – Carta de Perda de Solo por Erosão (adaptada de GDF, 2019).....	186
Figura 5.41 – Comparação dos resultados de suscetibilidade à erosão: (a) ZEE-DF e (b) proposta da tese	187
Figura 5.42 – Carta de Aptidão à Urbanização.	188
Figura 5.43 - Voo 01: previsto e realizado (modificado de Google Earth Pro).	191
Figura 5.44 - Voo 02: previsto e realizado (modificado de Google Earth Pro).	191
Figura 5.45 - Voo 03: previsto e realizado (modificado de Google Earth Pro).	192
Figura 5.46 - Voo 04: previsto e realizado (modificado de Google Earth Pro).....	192
Figura 5.47 - Voo 05: previsto e realizado (modificado de Google Earth Pro).	193
Figura 5.48 - Voo 06: previsto e realizado (modificado de Google Earth Pro).	193
Figura 5.49 - Voo 07: previsto e realizado (modificado de Google Earth Pro).	194
Figura 5.50 - Voo 08: previsto e realizado (modificado de Google Earth Pro).	194
Figura 5.51 - Voo 09: previsto e realizado (modificado de Google Earth Pro).	195
Figura 5.52 – Processamento dos voos transversais – resultados da tentativa 1.....	196
Figura 5.53 - Processamento dos voos transversais – resultados da tentativa 2.	196
Figura 5.54 – Processamento dos voos longitudinais – resultados da tentativa 1.....	197
Figura 5.55 – Processamento dos voos realizados com RPA multirrotor – resultados.	198
Figura 5.56 – Carta Imagem – Ortofotomosaico resultante do sobrevoo com RPA multirrotor.	199
Figura 5.57 – Carta Uso e Cobertura – Ortofotomosaico classificado (algoritmo Maxver)..	199
Figura 5.58 - Área piloto utilizada para cálculo da PR (Silva Junior <i>et al.</i> , 2016a; 2016b)..	200
Figura 5.59 – Carta de Ameaça de Escorregamentos: área piloto (adaptado de Silva Junior <i>et al.</i> , 2016a; 2016b).....	200
Figura 5.60 - Verificação de edificações nas áreas com PR entre 20 e 40% (Silva Junior <i>et al.</i> , 2016a; 2016b).....	201
Figura 5.61 – Matrizes temáticas de PR geradas para cada passo de chuva no <i>RiskLab</i> (cenários).....	202
Figura 5.62 – Carta de Ameaça de Escorregamentos: Taquari Etapa I e II.	203
Figura 5.63 - Carta de Ameaça de Escorregamentos: área de interesse para detalhamento. .	204

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

μVANT: Micro Veículo Aéreo Não Tripulado

ACI: Associação Cartográfica Internacional

AHP: *Analytic Hierarchy Process* (análise hierárquica de processo)

ALOS: *Advanced Land Observation Sattelite*

ANA: Agência Nacional de Águas

ANAC: Agência Nacional de Aviação Civil

APA: Área de Proteção Ambiental

API: *Application Programming Interface* (Interface de Programação de Aplicativos)

APM: Área de Proteção de Mananciais

APP: Área de Preservação Permanente

ARINE: Área de Regularização de Interesse Específico

ASP: *American Society of Photogrametry* (Sociedade Americana de Fotogrametria)

AVNIR-2: *Advanced Visible and Near Infra-red Radiometer type 2*

B_u: *built-up area* ou área construída

BQA: *Band Quality Assessment* (avaliação de qualidade de banda)

c': Coesão efetiva do solo

CAST: *China Academy of Space Technology* (Academia Chinesa de Tecnologia Espacial)

CBERS: *China-Brazil Earth Resources Satellite* (Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres)

CBT: Companhia Brasileira de Tratores

CCD: *High Resolution Camera* (Câmera Imageadora de Alta Resolução)

CComGEx: Centro de Comunicações e Guerra Eletrônica do Exército

CDSR: Centro de Dados de Sensoriamento Remoto

CE: Comissão Europeia

CGIAR-CSI: *Consortium for Spatial Information/Consultative Group for International Agriculture Research*

CIAM: Congresso Internacional de Arquitetura Moderna

CIGEx: Centro de Imagens e Informações Geográficas do Exército

CLDF: Câmara Legislativa do Distrito Federal

CNPM: EMBRAPA Monitoramento por Satélite

CNPS: Centro Nacional de Pesquisa de Solos

COCAR: Comissão de Cartografia (atualmente CONCAR - Comissão Nacional de Cartografia: órgão colegiado do Ministério do Planejamento, Desenvolvimento e Gestão)

CONPDEC: Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil

CPqD: Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da TELEBRAS

CPRM: Serviço Geológico do Brasil

CPTEC: Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos

CSR: Centro de Sensoriamento Remoto

DESA: Divisão das Nações Unidas para a População do Departamento dos Assuntos Econômicos e Sociais

DF: Distrito Federal

DSG: Diretoria do Serviço Geográfico

DWG: arquivo *drawing* do AutoCAD

EESC-USP: Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo

EMBRAPA: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

ENC-UnB: Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília

EPCT: Estrada Parque Contorno

EPIA: Estrada Parque Indústria de Abastecimento

EPPR: Estrada Parque Paranoá

EPTM: Estrada Parque Tamanduá

EROS: *Earth Resources Observation Satellites*

ERTS-1: *Earth Resources Technology Satellite*

ESA: Agência Espacial Europeia

ESECAE: Unidades de Conservação da Estação Ecológica de Águas Emendadas

ESEIAAT: Escola Superior de Engenharias Industrial, Aeroespacial e Audiovisual de Terrassa

ESRI: *Environmental Systems Research Institute*

ETM: *Enhanced Thematic Mapper*

ETM+: *Enhanced Thematic Mapper Plus*

EUA: Estados Unidos da América

FAL/UnB: Fazenda Experimental Água Limpa da Universidade de Brasília

FLIR: *Forward Looking Infra-Red*

FOSM: *First Order Second Moment*

FS: Fator de Segurança

FTP: *File Transfer Protocol* (Protocolo de Transferência de Arquivos)

GCP: *Ground Control Points* (pontos de controle de solo)

GDF: Governo do Distrito Federal

GEE: *Google Earth Engine*

GeoSNIC: Sistema Nacional de Informações das Cidades

GIS: *Geographical Information System*

GLCF: *Global LandCover Facility*

GLOVIS: *Global Visualization Viewer*

GLS: *Global Land Survey*

GMES: *Global Monitoring for Environment and Security*

GNSS: *Global Navigation Satellite System* (Sistema Global de Navegação por Satélite)

GOES: *Geostationary Operational Environmental Satellite*

GPS: *Global Positioning System* (Sistema de Posicionamento Global)

GREAT: *Geotechnical and geological Responses to climate change: Exchanging Approaches and Technologies on a world-wide scale*

Gs: Gravidade específica do solo

GSD: *Ground Sample Distance* (Distância de amostra do solo)

H: Espessura do solo

HRC: *High Resolution Camera* (câmera Pancromática de Alta Resolução)

IAEG: *International Association of Engineering Geology*

IBAMA: Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

IBRAM: Instituto Brasília Ambiental

IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IBM: *International Business Machines* (Máquinas de Negócio Internacionais)

IMU: *Inertial Measurement Unit* (Unidade de Medição Inercial)

INPE: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IPEA: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada

IPT: Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo

IRMSS: *Infrared Multispectral Scanner* (Imageador por Varredura de Média Resolução)

IRS: *Multispectral and Thermal Scanner* (Imageador Multiespectral e Termal)

ISPRS: *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*

ITC: *International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation*

JAXA: *Japan Aerospace Exploration Agency*

K: Erodibilidade do solo

km: quilômetro

Kt: Capacidade global de drenagem

KML: *Keyhole Markup Language*

Landsat: *Land Remote Sensing Satellite*

LAPIG: Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento

LDCM: Missão de Continuidade de Dados do Landsat

LIDAR: *Light Detection And Ranging*

Maxver: Máxima verossimilhança

MCidades: Ministério das Cidades

MDE: Modelo Digital de Elevação

MDT: Modelo Digital de Terreno

MidIR: Infravermelho médio

MMA: Ministério do Meio Ambiente

MNT: Modelo Numérico de Terreno

MPDFT: Ministério Público do Distrito Federal e Territórios

MSI: *Multispectral Instrument*

MSS: *Multispectral Scanner System*

MUX: Câmera Multiespectral Regular

n: Porosidade

NASA: *National Aeronautics and Space Administration* (Agência Espacial Americana)

NC: Níveis de cinza

NDBI: *Normalized Difference Built-up Index* ou Índice por Diferença Normalizada para Áreas Construídas

NDMI: *Normalized Difference Moisture Index* ou Índice de Umidade por Diferença Normalizada

NDVI: *Normalized Difference Vegetation Index* ou Índice de Vegetação por Diferença Normalizada

NDWI: *Water Index* ou Índice de Água

NESDIS: *National Environmental Satellite and Information Service*

NIR: *Near Infrared* (infravermelho próximo)

NOAA: *National Oceanic Atmospheric Administration*

NOVACAP: Companhia Urbanizadora da Nova Capital do Brasil

OLI: *Operational Land Imager* (Imageador Terrestre Operacional)

OLI-2: *Operational Land Imager-2*

ONU: Organização das Nações Unidas

P&B: Preto e branco

PAN: Pancromática

PDF: *Portable document format*

PDI: Processamento Digital de Imagens

PDOT: Plano Diretor de Ordenamento Territorial

PDTU: Plano Diretor de Transporte Urbano e Mobilidade do Distrito Federal

PETROBRÁS: Petróleo Brasileiro S.A

PEOT: Plano Estrutural de Ordenamento Territorial

PI: plano de informação

Pixel: *Picture element* (elemento da imagem)

PNB: Parque Nacional de Brasília

PNPDEC: Política Nacional de Proteção e Defesa Civil

POT: Plano de Ocupação Territorial do Distrito Federal

POUSO: Plano de Ocupação e Uso do Solo

PR: Probabilidade de Ruptura

PRC/UnB: Prefeitura da Universidade de Brasília

PRISM: *Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping*

PUCE: *Pattern, Unit, Component, Evaluation* (Padrão, Unidade, Componente, Avaliação)

PUC-RJ: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

QGIS: *Quantum GIS*

R: *Red* (vermelho)

RBAC: Regulamento Brasileiro de Aviação Civil Especial

RBMC: Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS

RBV: *Return Beam Vidicon*

RGB: *Red, Green, Blue* (vermelho, verde, azul)

RIDE-DF: Região Integrada de Desenvolvimento do Distrito Federal e Entorno

RiskLab: *Risk-Landslide-Laboratory*

RPA: *Remotely Piloted Aircraft* (Aeronave Remotamente Pilotada)

RPAS: *Remotely Piloted Aircraft Systems* (Sistema de Aeronaves Remotamente Pilotadas)

RPS: Estação de Pilotagem Remota

RTK: *Real Time Kinematic*

SAVI: *Soil-Adjusted Vegetation Index* ou Índice de Vegetação Ajustado ao Solo

SAR: Radar de Abertura Sintética

SDE: Secretaria de Estado de Desenvolvimento Econômico

SEDHAB: Secretaria de Habitação, Regularização e Desenvolvimento Urbano

SEGETH: Secretaria de Estado de Gestão do Território e Habitação

SEMA: Secretaria de Estado do Meio Ambiente

SEMARH: Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Hídricos

SHTq: Setor Habitacional Taquari

SIG: Sistemas de Informação Geográfica

SINPDEC: Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil

SLC: *Scan Line Corrector*

SLIDE: *SLope - Infiltration - Distributed Equilibrium*

SPOT: *Satellite Pour l'Observation de la Terre*

SPRING: Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas

SR: *Simple Ratio* ou Razão Simples

SR: Sensoriamento Remoto

Sr: Grau de saturação do solo

SRTM: *Shuttle Radar Topography Mission*

SWIR: *Short Wave Infrared* ou infravermelho de ondas curtas

T: Tolerância à perda de solo

Terracap: Companhia Imobiliária de Brasília

TIN: Redes de Triangulação Irregular

TIR: Infravermelho Termal

TIRS: *Thermal Infrared Sensor* sensores térmicos do infravermelho

TIRS-2: *Thermal Infrared Sensor-2*

TM: *Thematic Mapper*

UAS: *Unmanned Aircraft Systems*

UAV: *Unmanned Air Vehicles*

UFF: Universidade Federal Fluminense

UFG: Universidade Federal de Goiás

UFRJ: Universidade Federal do Rio de Janeiro

UMD: *University of Maryland*

UnB: Universidade de Brasília

UNESCO: Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura

UNDRR: *United Nations Office for Disaster Risk Reduction*

UPC: Universidade Politécnic da Catalunha

USGS: *United States Geological Survey* (Serviço Geológico Americano)

VANT: Veículo Aéreo Não Tripulado

Web: *World Wide Web* - *www* (rede de alcance mundial)

WFI: *Wide Field Imager* (Imageador de Amplo Campo de Visada)

WMS: *Warehouse Management System* (Sistema de Gerenciamento de Armazém)

WPM: Câmera Multiespectral e Pancromática de Ampla Varredura

ZCVS: Subzona de Conservação da Vida Silvestre

ZEE: Zoneamento Ecológico-Econômico do Brasil

ZEE-DF: Zoneamento Ecológico-Econômico do Distrito Federal

ZPVS: Subzona de Preservação da Vida Silvestre

α : Parâmetro que retrata a tendência não linear da curva de coesão

λ : Coeficiente de intensidade relacionado ao tipo de solo

ϕ' : Ângulo de atrito efetivo do solo

1. INTRODUÇÃO

A área do conhecimento das Geotecnologias, em especial da Cartografia Geotécnica para o Planejamento Urbano, trata das questões relativas aos critérios de seleção de sítios urbanos, estudos de suscetibilidade, análise de riscos de impactos ambientais, preservação e reabilitação de áreas degradadas, entre outros. Este conhecimento tem como objetivo orientar o planejamento, a ocupação, o manejo e a conservação destas áreas ou porções do território.

Dada a importância do tema, o presente texto tem por finalidade apresentar os objetivos, passos metodológicos e resultados alcançados na Pesquisa de Doutorado, dessa forma o documento está organizado em seis partes além das Referências Bibliográficas e dos Apêndices. Na parte introdutória encontram-se a justificativa, motivação da pesquisa e seus objetivos e a segunda parte trata da revisão bibliográfica. As características da área de estudo estão na terceira parte, materiais e metodologia aplicada encontram-se na quarta parte e, por fim, resultados e análises e as conclusões como quinto e sexto itens da tese, respectivamente.

O planejamento urbano tem enfrentado dificuldades operacionais por parte dos gestores públicos. Muitas vezes trata-se de um documento de consolidação de ações passadas contendo diretrizes que buscam amenizar os prejuízos frente ao crescimento descontrolado. Assim foi com o Plano Estrutural de Ordenamento Territorial (PEOT), primeiro instrumento específico de planejamento territorial do Distrito Federal - DF, criado em 1977, quase duas décadas após a inauguração da cidade de Brasília.

Cabe citar a importância do Plano Diretor para o planejamento urbano e territorial, cujo objetivo é ordenar o uso do solo e garantir a qualidade de vida da população. Trata-se do instrumento básico da política de desenvolvimento e de expansão urbana, obrigatório para municípios com mais de vinte mil habitantes desde a Constituição Federal de 1988.

Com o atual aumento progressivo e descontrolado da população urbana, observa-se também o aumento dos diferentes tipos de riscos urbanos e a deterioração ambiental. Como consequência, a *United Nations Office for Disaster Risk Reduction* (UNDRR) destaca cinco orientações para prevenção de riscos no documento *Hyogo Framework for Action 2005-2015: Building the Resilience of Nations and Communities to Disasters* (Quadro de Ação de Hyogo 2005-2015: Construindo a Resiliência das Nações e Comunidades às Catástrofes), dentre elas, identificar, avaliar e monitorar as áreas com risco de desastre e melhorar o sistema de alerta à população (UNDRR, 2007).

Nesse contexto, o Brasil, após os desastres naturais de 2008 em Santa Catarina e 2011 na Região Serrana do Rio de Janeiro, criou a Lei 12.608, de 10 de abril de 2012 que institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC), dispõe sobre o Sistema Nacional de

Proteção e Defesa Civil (SINPDEC) e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil (CONPDEC) e autoriza a criação de sistema de informações e monitoramento de desastres (Brasil, 2012a).

Para tanto, a Cartografia Geotécnica aplicada ao Planejamento Urbano mostra-se como um importante instrumento de apoio à tomada de decisões. O objetivo das cartas geotécnicas é estudar as características do ambiente para o planejamento e construção de obras de engenharia. Entretanto, a escala temporal dessas cartas muitas vezes não acompanha a velocidade da dinâmica territorial, pois o processo de produção de tais documentos e relatórios demanda tempo, conhecimento e altos custos operacionais.

Nesse sentido as Aeronaves Remotamente Pilotadas (*Remotely Piloted Aircraft – RPA*), também denominadas Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) ou popularmente drones, são dispositivos de uso cada vez mais frequentes na realização de vários tipos de atividades, tais como serviços de monitoramento e controle, aquisição de dados aerofotogramétricos, entre outros. Tratam-se de plataformas dotadas de asas fixas ou rotativas, que podem ser operados por controle remoto ou executar roteiros de voo predefinidos (missões programadas). No presente trabalho utilizam-se ambos os termos RPA (termo oficial para uso não recreativo) e drone (termo popular) para designar as aeronaves remotamente pilotadas que transportam os sensores de imageamento (câmeras fotográficas).

1.1. JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO

Segundo dados divulgados no relatório da Organização das Nações Unidas (ONU) “Perspectivas da Urbanização Mundial” (*World Urbanization Prospects*) produzido pela Divisão das Nações Unidas para a População do Departamento dos Assuntos Econômicos e Sociais (DESA) em 2018, na década de 1940 cerca de 70% da população vivia em áreas rurais e, atualmente, mais de 55% da população mundial migrou para ambientes urbanos com uma perspectiva de crescimento de 68% para a década de 2050 (ONU, 2018).

Devido ao aumento populacional, o meio ambiente passou por transformações em decorrência das atividades antrópicas resultantes da ocupação desenfreada dos espaços urbanos. No Brasil, na década de 1980, a preocupação em relação às questões urbanas resultou na inclusão de um capítulo dedicado à Política Urbana no Texto da Constituição de República Federativa do Brasil de 1988.

O referido capítulo define que a política de desenvolvimento urbano tem por objetivo ordenar o desenvolvimento das funções sociais da cidade e garantir o bem-estar de seus habitantes. No Art. 182, § 1º, o Plano Diretor fica obrigatório para cidades com mais de vinte

mil habitantes e passa a ser o instrumento básico da política de desenvolvimento e de expansão urbana (Brasil, 1988).

Nos anos seguintes, as ações públicas relacionadas à política urbana se tornaram mais presentes, entretanto o acelerado crescimento das cidades exigiu, por parte dos gestores, a ampliação das ferramentas de gestão com um maior número de informações possíveis para otimizar os resultados.

Dessa forma, o uso de ferramentas que permitam uma melhor visualização do território tornou-se objeto de pesquisa visando auxiliar os gestores nas tomadas de decisões. Isso resultou no crescimento e desenvolvimento dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG).

Câmara (1996) lembra que, no Brasil, o Geoprocessamento foi introduzido no início dos anos 1980, com as ações de divulgação e formação pessoal feitas pelo Prof. Jorge Xavier da Silva da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Como uma dessas ações, cabe destacar a visita ao Brasil do Dr. Roger Tomlinson, responsável pela criação do primeiro SIG (*Canadian Geographical Information System*), em 1982.

Como resultado dos esforços realizados, surgem vários grupos interessados em desenvolver novas tecnologias: Laboratório de Geoprocessamento do Departamento de Geografia da UFRJ, sob a orientação do professor Jorge Xavier; Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da TELEBRÁS (CPqD) responsável pelo desenvolvimento de aplicações de Geoprocessamento no setor de telefonia; Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), dentre outros (Câmara, 1996).

Paralelamente, a evolução da tecnologia de geoprocessamento no mundo ampliou as possibilidades de utilização das denominadas geotecnologias no âmbito do planejamento urbano e territorial. Imagens de satélite, topografia digital e novas técnicas de mapeamento aéreo estão sendo utilizadas há algum tempo e são fundamentais para uma gestão urbana mais eficiente.

Por esses motivos, faz-se necessário pesquisar instrumentos viáveis que auxiliem no planejamento e gestão territorial integrados. As cartas geotécnicas são alternativas que subsidiam as ações de planejamento e de gestão do uso do solo e a possibilidade da utilização de aerolevanteamento por RPA amplia a capacidade de obtenção de resultados em menor tempo, mais econômicos e com boa qualidade geométrica e cartográfica.

O mapeamento aéreo com RPA tem se expandido, principalmente aqui no Brasil, por conta das altas demandas e por ser uma tecnologia mais barata e produtiva em relação aos métodos tradicionais de aquisição de informações geoespaciais. No início do ano de 2015, o principal mercado era o de agricultura, porém algumas outras áreas ganharam importância no cenário

nacional nos últimos tempos. O mais recente foi a gestão pública de cidades, devido às leis de atualização cadastral dos municípios e georreferenciamento de imóveis urbanos.

A grande vantagem do uso de RPA é seu baixo custo de aquisição, manutenção e operação quando comparado com alternativas tradicionais. Por suas características operacionais e pequenas dimensões podem voar a baixa altura, obtendo fotos aéreas de alta resolução espacial e nitidez em qualquer época do ano.

Da mesma forma, outros avanços recentes na área das geotecnologias aplicadas ao planejamento urbano tornaram o trabalho dos gestores públicos e pesquisadores da área mais produtivo e ágil. A oferta de imagens orbitais gratuitas aumentou e tornou-se mais acessível e, a evolução da capacidade de processamento dos computadores e da recente *cloud computing* (em português: computação em nuvem), ampliou a possibilidade de automatização de processos e geração de resultados.

Nesse contexto, a hipótese principal desta pesquisa é a possibilidade de melhoria da qualidade das cartas geotécnicas com ganhos no detalhamento espacial e temporal utilizando-se dados obtidos por aerolevanteamento com RPA, bem como dados obtidos por sensores a bordo de missões de satélite com a utilização de processamento geoespacial em plataforma baseada em nuvem e sua aplicação na elaboração de diretrizes de uso e ocupação do solo.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo principal desta tese é sistematizar uma metodologia para confecção e atualização de cartas geotécnicas voltadas ao planejamento urbano com auxílio de geotecnologias, como processamento geoespacial em plataforma baseada em nuvem e aerolevanteamento com RPA e avaliar os resultados obtidos na elaboração de diretrizes de uso e ocupação do solo, bem como na análise de áreas de risco geotécnico.

Os objetivos específicos, por sua vez, são:

- Abordar historicamente os referenciais da cartografia geotécnica presentes na evolução urbana do Distrito Federal (DF).
- Elaborar cartas do meio físico, biótico e antrópico (Cartas Complementares e Cartas Analíticas).
- Elaborar Carta Geotécnica de Suscetibilidade à Erosão, Carta Geotécnica de Aptidão à Urbanização e Carta de Zoneamento de Ameaça de Escorregamentos segundo a Metodologia do Detalhamento Progressivo.

- Testar e avaliar a utilização dos dados obtidos no âmbito do Projeto μ VANT/UnB (Micro Veículos Aéreos Não Tripulados) para confecção e atualização de cartas geotécnicas.
- Realizar tabulação cruzada e operações aritméticas entre os planos de informação e as diretrizes urbanísticas, a fim de identificar conflitos de uso e adequabilidade.
- Avaliar a aplicação e potencialidade da ferramenta *Google Earth Engine* (GEE) para apoio ao planejamento urbano, quando comparada a outros programas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), pela utilização de operações aritméticas que resultam em índices de vegetação, umidade e área construída.

1.3. ESCOPO DA TESE

Para atingir os objetivos propostos no subitem anterior, organizou-se a tese em seis capítulos, descritos resumidamente a seguir, além das referências bibliográficas utilizadas no decorrer da pesquisa e dos itens complementares: apêndices A, B e C.

O capítulo 1 descrito até aqui, contém a introdução, justificativa e motivação da pesquisa, objetivos e escopo da tese.

O capítulo 2 contém a revisão bibliográfica a respeito de Geoprocessamento e Geotecnologias; Aeronaves Remotamente Pilotadas; Cartografia, em especial Cartografia Geotécnica e, por fim, Planejamento Urbano e Territorial.

O capítulo 3 foi dedicado às características da área de estudo e dividido em justificativa de escolha e descrição de características do meio físico da área (geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e recursos hídricos), bem como diretrizes urbanísticas propostas pelo poder público.

O capítulo 4 apresenta os materiais e a metodologia aplicada na pesquisa, organizada em subitens de acordo com as fases metodológicas (inventário, geral, intermediária e detalhe).

No capítulo 5 são apresentados e analisados os resultados obtidos na tese.

Por fim, o capítulo 6 trata das conclusões geradas na presente tese e sugestões de pesquisas futuras.

Quanto aos apêndices, estes foram organizados em três partes: a Apêndice A contém os dados do aerolevanteamento com RPA, o Apêndice B contém dados das tabulações cruzadas e, o Apêndice C apresenta as rotinas computacionais desenvolvidas na tese.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo busca revisar as principais características relativas ao geoprocessamento e às geotecnologias; com detalhe para o sensoriamento remoto, sistema de informações geográficas, fotogrametria e aerolevanteamento. Destacando-se, ainda, questões relacionadas às aeronaves remotamente pilotadas; suas características, aplicações e potencialidades.

Não menos importante, discorre-se sobre os princípios da cartografia com destaque para a cartografia geotécnica. Por fim, trata-se dos conteúdos relacionados ao planejamento do espaço urbano, critérios para escolha dos territórios, leis relacionadas ao planejamento e ocupação do solo e alguns de seus elementos morfológicos.

2.1. GEOPROCESSAMENTO E GEOTECNOLOGIAS

Fitz, 2008b; Moura, 2014 e Tôsto *et al.*, 2014, definem o Geoprocessamento como um conjunto de tecnologias e ferramentas computacionais para tratamento e análise de dados geográficos. O processo envolve as etapas de coleta, manipulação e apresentação de informações geoespaciais.

Importante destacar que as informações geoespaciais têm como característica principal a localização, ou seja, estão ligadas ao posicionamento no espaço geográfico por meio de suas coordenadas e esse princípio contribui para que o geoprocessamento seja uma tecnologia interdisciplinar, que permite a convergência de diferentes áreas do conhecimento para o estudo de fenômenos ambientais e urbanos. Sociólogos, geólogos, arquitetos, urbanistas, geógrafos, engenheiros, dentre outros, buscam coletar e tratar informações espaciais para um objetivo específico.

Conforme Câmara *et al.* (2001): se “onde” é importante para você, então Geoprocessamento é sua ferramenta de trabalho.

O surgimento do geoprocessamento está ligado ao desenvolvimento da ciência da computação e é conhecido, em outras línguas, como *geomatic*, que diz respeito aos instrumentos e técnicas para a coleta, distribuição, armazenamento, análise, processamento e apresentação de dados ou informações geográficas. Suas atividades envolvem a cartografia, a topografia, mapeamentos digitais, sensoriamento remoto, sistemas de informações geográficas, hidrografia e outros (Moura, 2014; ISO, c2014).

Câmara *et al.* (2001), definem cinco tipos de dados no Geoprocessamento, a saber:

- Dados Temáticos: tratam uma grandeza geográfica expressa de forma qualitativa. Estes dados são obtidos a partir de levantamento de campo e são inseridos no

sistema por digitalização ou a partir da classificação de imagens. Como exemplo, a Figura 2.1 apresenta um Mapa Temático de Declividade.

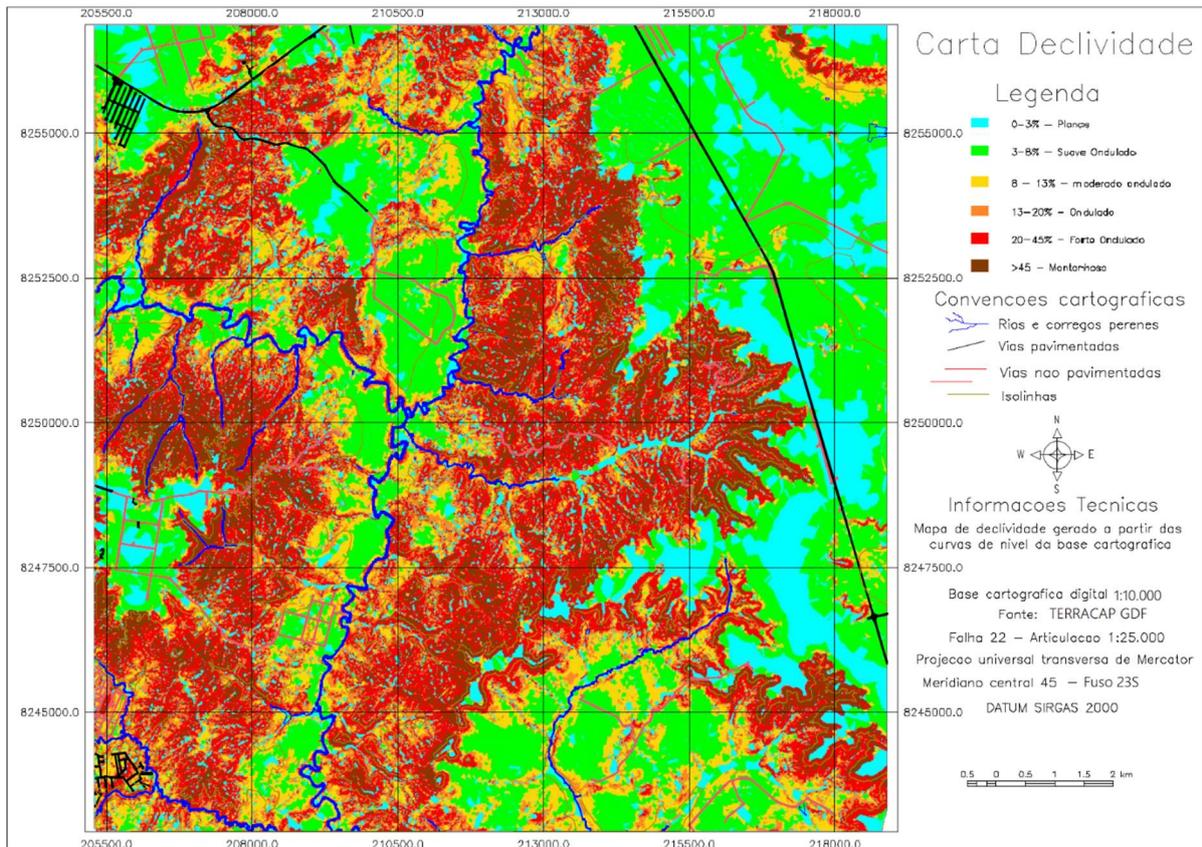


Figura 2.1 – Mapa Temático de Declividade.

- **Dados Cadastrais:** são dados em que cada um de seus elementos é um objeto geográfico que possui atributos e pode estar associado a várias representações gráficas. Os atributos estão armazenados no banco de dados. A Figura 2.2 apresenta um mapa da América do Sul com a descrição e dados de alguns países.

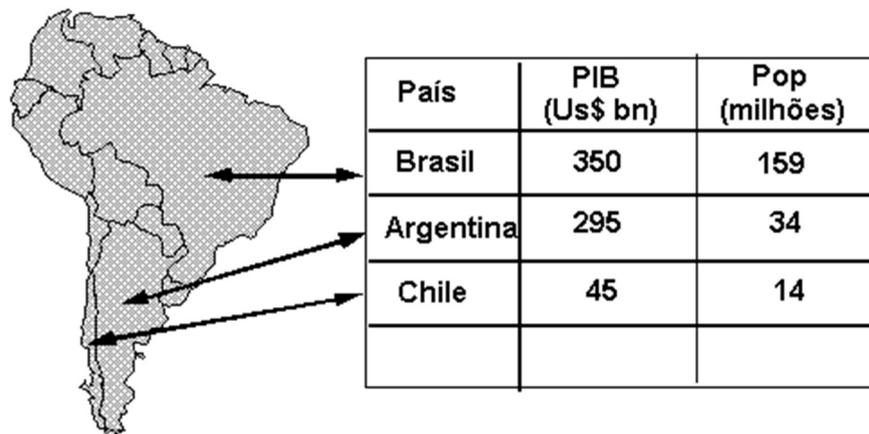


Figura 2.2 – Mapa cadastral (modificado de www.dpi.inpe.br).

- Dados de Redes: cada objeto geográfico possui uma localização geográfica exata e está sempre associado a atributos descritivos presentes no banco de dados. No Geoprocessamento o conceito de rede está associado a redes de drenagem, rodovias, transporte e serviços de utilidade pública (água, luz e telefone) e são resultado da intervenção humana sobre o meio-ambiente, conforme a Figura 2.3.

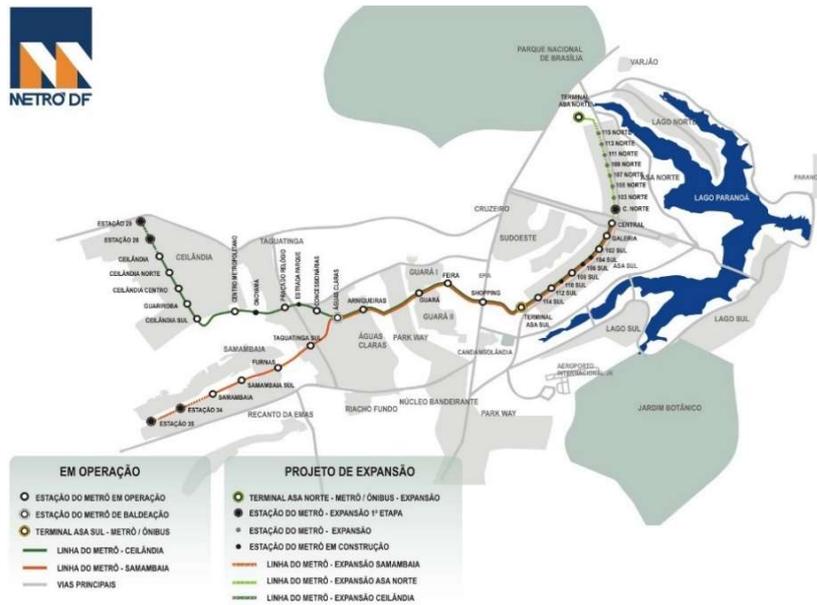


Figura 2.3 – Mapa do Metrô-DF 2019 (disponível em www.metro.df.gov.br).

- Dados de Modelos Numéricos De Terreno (MNT): Um MNT pode ser definido como um modelo matemático que reproduz uma superfície real a partir de algoritmos e de um conjunto de pontos (x,y) em um referencial qualquer, que descreve a variação contínua da superfície, ou seja, é a representação quantitativa de uma grandeza ou fenômeno geográfico que varia de forma contínua no espaço. O exemplo mais usual de um MNT tem como grandeza o dado de altimetria (Figura 2.4).

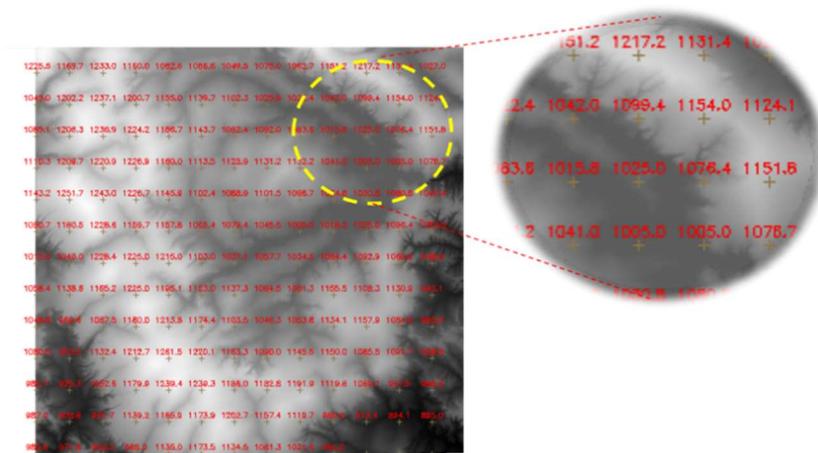


Figura 2.4 - MNT com representação de grade regular de altimetria.

- Dados de Imagens ou Sensoriamento Remoto (SR): as imagens representam formas de captura indireta de informação espacial. São armazenadas de forma matricial e cada elemento de imagem, denominado *pixel* (contração de *picture element*, ou elemento da imagem) tem um valor proporcional à energia eletromagnética refletida ou emitida pela área da superfície terrestre (Figura 2.5).

Observam-se algumas características relevantes nos dados de imagens que serão descritas no item 2.1.1 – Sensoriamento Remoto (resolução espectral, resolução espacial, resolução radiométrica e resolução temporal).

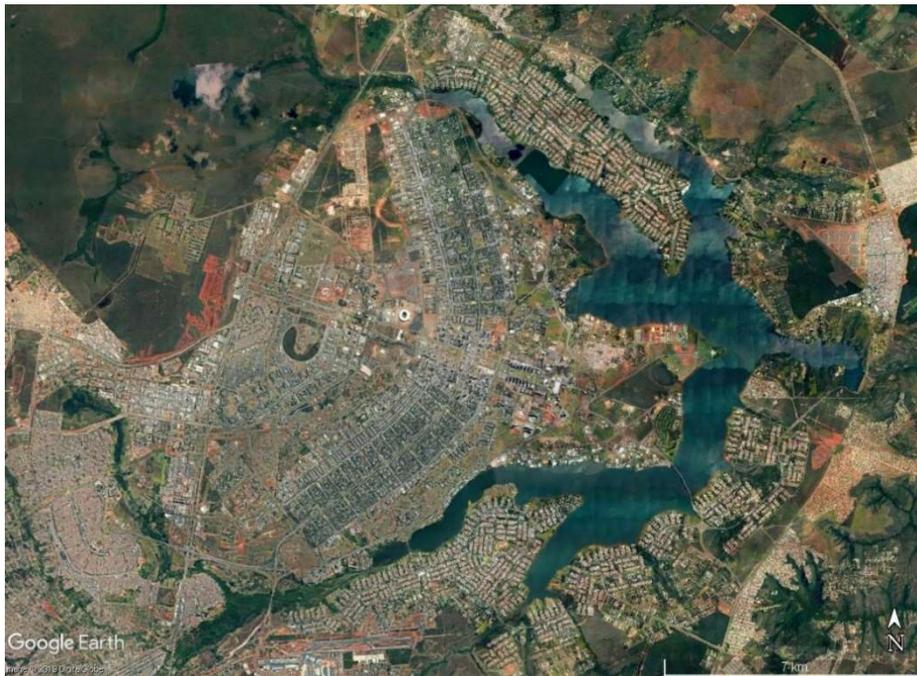


Figura 2.5 - Imagem do Plano Piloto de Brasília - 2019 (modificado de Google Earth Pro).

Ainda segundo Câmara *et al.* (2001), o espaço geográfico pode ser modelado de duas maneiras complementares, são elas os modelos de geo-campos e de geo-objetos. Os modelos de geo-campos representam a distribuição espacial de uma variável geográfica sobre uma superfície contínua, enquanto que nos modelos de geo-objetos a realidade é vista como uma superfície ocupada por entidades distintas e identificáveis e cada posição (x,y) do espaço poderá, ou não, conter um elemento. Cada entidade possui características próprias tais como posição, geometria e atributos descritivos.

Em termos gerais, diversos autores consideram a existência de dois tipos de dados no geoprocessamento: dados espaciais e dados alfanuméricos ou não-espaciais (Fitz, 2008b; Câmara *et al.*, 2001). Os dados espaciais são aqueles representados de forma gráfica e estão

associados ao conceito de localização espacial ou georreferenciamento. Esses dados podem ser representados de forma matricial ou vetorial.

- Dados espaciais em forma matricial: representação em forma de malha quadriculada ou grade (*raster structure*) composta por linhas (n) e colunas (m) que estruturam uma matriz (n, m) na qual cada célula pode ser denominada *pixel* e apresenta um valor (z) associado que corresponde ao atributo representado.
- Dados espaciais em forma vetorial: a representação de um elemento busca ser a mais fiel possível, composta por elementos gráficos básicos (pontos, linhas, polígonos e volumes).

Os dados alfanuméricos ou não-espaciais são dados gerais não georreferenciados que podem ser armazenados em tabelas na forma de banco de dados. Um exemplo desse tipo de dado são as informações cadastrais de um lote urbano (número de inscrição, dados de IPTU, entre outros).

As geotecnologias são, segundo Fitz (2008b), Tôsto *et al.* (2014) e Rosa (2011) as tecnologias desenvolvidas para coleta, processamento, análise e disponibilização de informações com referência geográfica. Envolve o desenvolvimento de aplicações em *hardware* e *software* elaboradas por pesquisadores da área de tecnologia da informação geográfica e, dentre as geotecnologias existentes, destacam-se os Sistemas de Informação Geográfica (SIG), Cartografia Digital, Sensoriamento Remoto (SR), Sistema Global de Navegação por Satélite (*Global Navigation Satellite System - GNSS*), Aerofotogrametria, Topografia, Geodésia, dentre outros.

As possibilidades de aplicação das geotecnologias e da geoinformação são diversas devido às suas potencialidades, sendo utilizadas na agricultura, nos estudos ecológicos e de impacto ambiental, produção de mapas, suporte para análise espacial, gestão do território, monitoramento de uso e cobertura da terra, serviços públicos de saneamento, energia elétrica, telecomunicações, meteorologia, transporte, segurança, desenvolvimento de cidades inteligentes (*smart cities*) e muitos outros.

Os avanços tecnológicos, bem como a ampliação da capacidade de processamento e armazenamento de dados e informações geoespaciais, facilitaram a popularização dessas ferramentas. Um exemplo disso são os diversos aplicativos de navegação para *smartphones* ou dispositivos móveis utilizados cotidianamente por parte da população mundial, especialmente nos grandes centros urbanos a exemplo do *Waze*, *Google Maps*, entre tantos outros.

Os desafios para o cenário das geotecnologias no futuro consistem basicamente no desenvolvimento de *software* e *hardware* com ganhos contínuos em redução de custos,

ampliação da intercomunicação entre equipamentos e utilização da computação em nuvem (*cloud computing*) facilitando o acesso remoto e armazenamento dos dados através da Internet.

Uma pesquisa desenvolvida pela Universidade Federal Fluminense (UFF) disponibiliza uma relação de sites com dados e informações geoespeciais gratuitas (Carvalho & Di Maio, 2011). O material está dividido em aquisição de dados vetoriais, matriciais, vetoriais e matriciais na mesma fonte, informações tabulares (cadastrais), projetos educacionais que fazem uso de geotecnologias, indicação de *softwares* de geoprocessamento gratuitos e *geolinks*.

Cabem destaque os seguintes sites:

- Download Geociências - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

Servidor de FTP (*File Transfer Protocol*) do IBGE que disponibiliza um vasto acervo de informações georreferenciadas para *download*. Os dados estão no formato ESRI (*Environmental Systems Research Institute*) *Shapefile*, DWG (arquivo *drawing* do AutoCAD), raster (imagem) e PDF (*portable document format*). Disponibiliza também, softwares gratuitos para visualização dos dados.

- Mapas Interativos – IBGE.

SIG Web do IBGE que apresenta diferentes temas geográficos em escala nacional. Possibilita o *download* de alguns temas no formato ESRI *Shapefile*.

- IBGE Cidades@ – IBGE.

Dispõe de informações sobre os municípios brasileiros e permite a exportação dos dados consultados.

- Banco de Metadados Geoespaciais – IBGE.

Reúne várias informações sobre diferentes dados (imagens, mapas, entre outros) de variadas instituições do governo e particulares. Apresenta os metadados (dados sobre os dados) e os contatos dos responsáveis pela produção e disponibilização dos conteúdos.

- Centro de Sensoriamento Remoto (CSR) - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA).

Possibilita o *download* de variados temas ambientais no formato ESRI *Shapefile*.

- GeoSNIC: Sistema Nacional de Informações das Cidades - Ministério das Cidades (MCidades).

SIG Web (*World Wide Web*) que possibilita o *download* de arquivos no formato ESRI *Shapefile* e tabulares (em tabelas). Dispõe de acervo de informações sobre os municípios brasileiros.

- HidroWeb - Agência Nacional de Águas (ANA).

Possibilita o *download* de arquivos no formato ESRI *Shapefile* sobre a hidrografia brasileira.

- GeoPortal digital – EMBRAPA-CNPS (Centro Nacional de Pesquisa de Solos da EMBRAPA).

Mapoteca digital da Embrapa Solos. Apresenta acervo sobre pedologia, geologia e meio ambiente. Permite o *download* dos dados no formato ESRI *Shapefile* e PDF. Dispõe de SIG Web para visualização dos dados. É necessário se cadastrar no site (cadastro gratuito).

- Brasil em Relevo - EMBRAPA Monitoramento por Satélite (CNPM).

Disponibiliza gratuitamente o Modelo Digital de Elevação (MDE) do SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) já tratado e dividido segundo a articulação do mapeamento sistemática do IBGE na escala 1/250.000.

- GeoSGB: sistema de geociências do Serviço Geológico do Brasil - CPRM.

O GeoSGB é um sistema gerenciador, via WEB, que envolve bases de dados temáticas, aplicativos de consulta e inserção de dados, soluções de espacialização e visualização de informações em tempo real, opções variadas de baixa de arquivos, ferramentas de geoprocessamento e serviços WMS (*Warehouse Management System*).

- Centro de Dados de Sensoriamento Remoto (CDSR) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Acervo de imagens orbitais do INPE. Possibilita o *download* de imagens dos satélites da série CBERS (Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres) 2 e 2B; Landsat 1, 2, 3, 5 e 7; ResourceSat-1, Terra 1, Aqua 1 e o conjunto de imagens ortorretificadas GLS 2005 (*Global Land Survey*) das imagens TM (*Thematic Mapper*) e ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper*) distribuído gratuitamente pelo Serviço Geológico Americano - *U.S. Geological Survey* (USGS). Para realizar o *download* é necessário realizar cadastro no site (gratuito).

- BDQUEIMADAS: Banco de Dados Queimadas - INPE.

Download dos focos de queimadas nos formatos ESRI *Shapefile*, KML (*Keyhole Markup Language*) para Google Earth e .txt.

- TOPODATA: Banco de Dados Geomorfométricos – INPE.

Oferece livre acesso a variáveis geomorfométricas locais derivadas de dados SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*) para todo o território nacional. Os dados foram refinados da resolução espacial original de 3 arco-segundos (~90m) para 1 arco-segundo (~30m).

- Exemplos de Bancos de Dados no formato SPRING (Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas) – INPE (Câmara *et al.*, 1996).

O site do SPRING disponibiliza alguns bancos de dados, compatíveis apenas com o *software*, sobre diversos temas.

- Projeto Educa SeRe III do INPE: elaboração de Carta Imagem para o Ensino de Sensoriamento Remoto – INPE.

Projeto do INPE que trabalha a inserção do SR nas aulas do ensino básico. Disponibiliza tutoriais, dados e apostilas.

- Download de dados geográficos do IPEA Mapas – (IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada).

Permite o *download* de dados econômicos e sociais no formato ESRI *Shapefile* do Brasil.

- *Global Visualization Viewer* (GLOVIS) - USGS.

O USGS liberou para acesso a biblioteca completa de imagens dos satélites da série Landsat, cobrindo 35 anos de imageamento da Terra. Além das imagens Landsat, possui imagens hiperespectrais do sensor Hyperion/EO-1, produtos de imagens MODIS, entre outros. Para realizar *download* de imagens é necessário se cadastrar no site (gratuito).

- *Global LandCover Facility* (GLCF) - *University of Maryland* (UMD).

Possui um acervo de imagens Landsat, Modelo Digital de Elevação (MDE) do SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), produtos de imagens MODIS, entre outros.

- *SRTM: Shuttle Radar Topography Mission - Consortium for Spatial Information / Consultative Group for International Agriculture Research (CGIAR-CSI)*.

Disponibiliza gratuitamente o Modelo Digital de Elevação (MDE) do SRTM.

- LAPIG: Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento – Universidade Federal de Goiás (UFG).

O site disponibiliza imagens e dados vetoriais sobre o bioma do Cerrado.

Alguns *softwares* gratuitos mencionados: SPRING, TerraView, IpeaGEO, MARLIN, QUANTUM GIS (QGIS), GRASS GIS e vários outros.

No DF, cabe citar o Geoportal: mapa dinâmico do DF, um Sistema de Informações Territoriais e Urbanas que reúne, dentre outros, dados de escolas, equipamentos de esporte e lazer, além de lotes ocupados em todo DF (<https://www.geoportal.seduh.df.gov.br/mapa/>).

Por fim, destaca-se o projeto do Ministério do Meio Ambiente (MMA) que disponibiliza gratuitamente imagens da missão comercial *RapidEye*: um sistema alemão responsável por 5 satélites lançados em agosto de 2008, com órbita heliossíncrona, período de revisita de 1 dia e resolução espacial de 5 m. O Geo Catálogo MMA permite que órgãos públicos brasileiros utilizem as imagens em ações e pesquisas, caso a instituição faça parte do acordo nacional (Divisão de Geração de Imagens, 2008).

2.1.1. SENSORIAMENTO REMOTO

Florenzano (2011), Jensen (2009), Meneses & Almeida (2012) e Tôsto *et al.* (2014) definem o sensoriamento remoto como uma tecnologia que permite obter imagens e outros dados da superfície terrestre pela captação e registro da energia eletromagnética refletida ou emitida pela superfície. A obtenção de dados por meio de sensores instalados em plataformas terrestres, aéreas e orbitais refere-se ao termo sensoriamento, enquanto o termo remoto significa que a obtenção é feita sem contato físico entre o sensor e os objetos ou superfície terrestre. O uso do sensoriamento remoto popularizou-se bastante nas últimas décadas em função da evolução tecnológica.

Jensen (2009), Fitz (2008b) consideram as fases de obtenção, processamento, análise e interpretação dos dados obtidos como parte do sensoriamento remoto.

Os sensores remotos captam e registram a energia emitida ou refletida pelos elementos da superfície terrestre. Os dados de sensoriamento remoto podem ser obtidos de diversos níveis de altitude, conforme ilustrado na Figura 2.6, desde o nível do solo (ou de campo), passando pelos níveis de aerolevantamento ou suborbital (baixas, médias e altas altitudes) até o nível orbital (sensores a bordo de satélites artificiais). Existem quatro tipos de resolução que descrevem as características das imagens, são eles: espacial, espectral, radiométrica e temporal (Fitz, 2008b; Florenzano, 2011; Jensen, 2009; Meneses & Almeida, 2012).

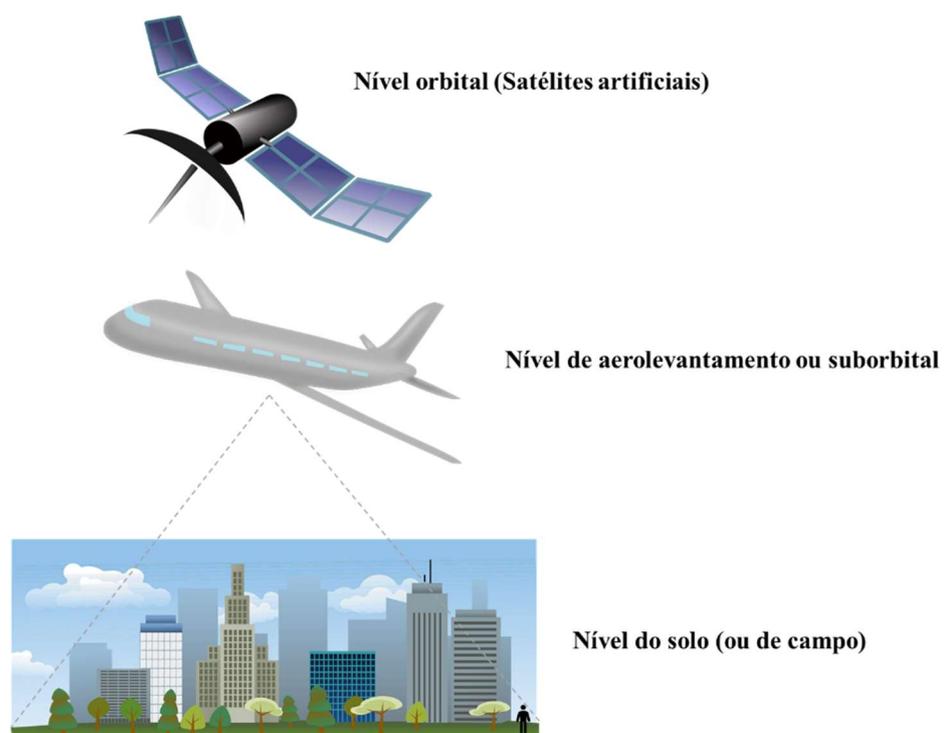


Figura 2.6 – Diferentes níveis de obtenção de dados de sensoriamento remoto.

- **Resolução Espacial:**

Trata-se da capacidade que o sensor apresenta para distinguir os objetos em função do tamanho, ou em outras palavras, a medida da menor distância angular ou linear que permite distinguir dois objetos na imagem obtida ou ainda o tamanho do menor objeto que pode ser identificado na imagem. Essa resolução é dada pelo tamanho do *pixel* ou GSD (*Ground Sample Distance*). Um sensor com resolução espacial de 30 m, por exemplo, é capaz de distinguir apenas objetos maiores que 30 m x 30 m (900 m²).

A Figura 2.7 apresenta uma mesma imagem de uma casa no DF, tirada com diferentes tamanhos de *pixel* indicados na figura, ilustrando o conceito de resolução espacial.

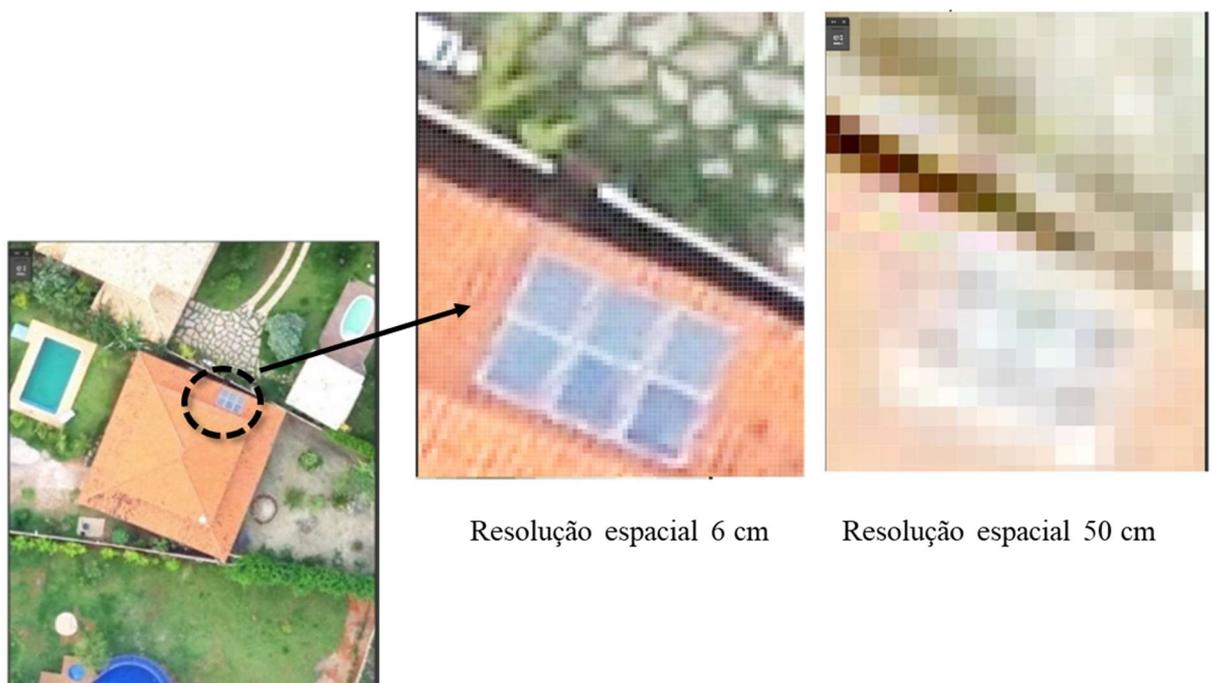


Figura 2.7 – Diferentes resoluções espaciais para uma mesma imagem (modificado de Almeida *et al.*, 2014).

- **Resolução Espectral:**

Entendida como o número ou tamanho de intervalos de comprimentos de onda eletromagnética específicos (também chamados de bandas ou canais) aos quais um determinado instrumento de sensoriamento remoto é sensível. Essa resolução está relacionada com três parâmetros importantes: o número de bandas que o sensor identifica, a largura das respectivas bandas em comprimento de onda e, as posições que as bandas estão situadas no espectro eletromagnético (Figura 2.8).

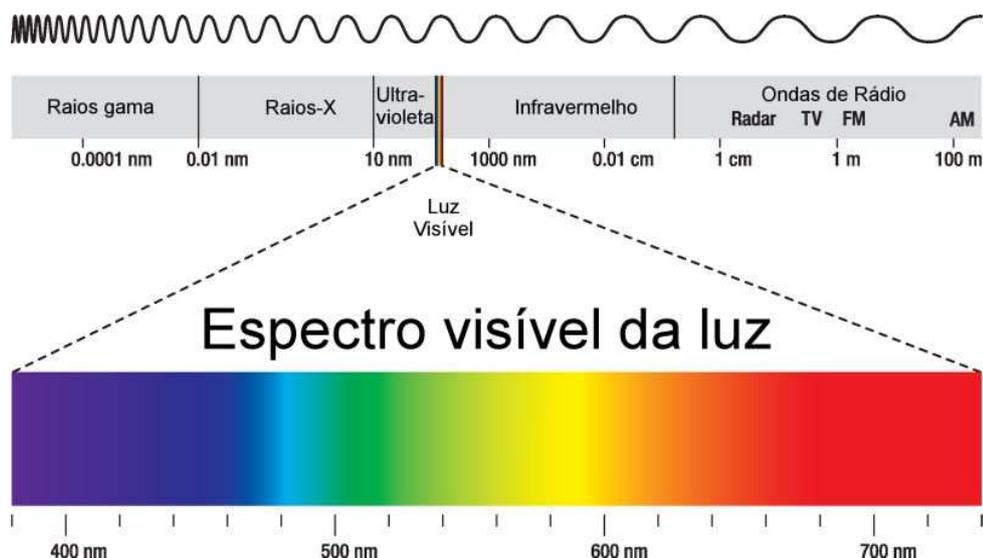


Figura 2.8 - Espectro eletromagnético. (Ilustração: Peter Hermes Furian - disponível em www.shutterstock.com).

Um determinado sensor tem melhor resolução espectral do que outro se ele possui maior número de bandas situadas em diferentes regiões espectrais e com faixas espectrais mais estreitas, de forma a registrar variações de energia refletida ou emitida pelos objetos. Dessa forma, os sistemas de sensoriamento remoto são multiespectrais, ou seja, registram a radiação eletromagnética em várias bandas distintas.

- **Resolução Radiométrica:**

Refere-se a capacidade que o sensor tem para discriminar intensidade de energia refletida ou emitida pelos objetos. Na prática, essa resolução está relacionada com a quantidade de níveis digitais ou níveis de cinza (NC) presentes em uma imagem e, quanto maiores forem esses níveis, maior será a resolução radiométrica (Figura 2.9). Esses valores são apresentados na forma de valores binários (*bits*) e, portanto, expressos em potências de 2. Por exemplo, uma imagem com 8 *bits* tem 256 NC ($2^8 = 256$ NC).

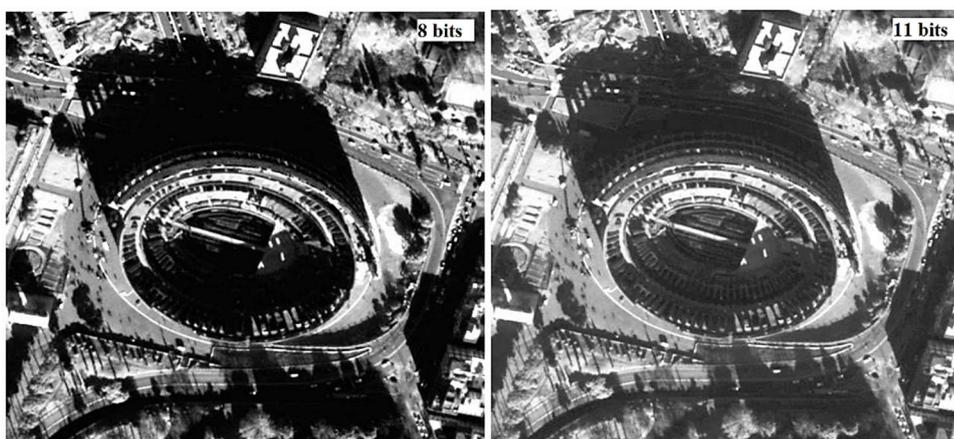


Figura 2.9 - Diferentes resoluções radiométricas para uma mesma imagem (modificado de Oliveira, 2016).

- **Resolução Temporal:**

A resolução temporal relaciona-se com o intervalo de tempo que o sensor leva para a obtenção da imagem, ou seja, qual frequência temporal com que se obtém a imagem de uma determinada área. Dessa forma, quanto maior for a frequência, ou menor for o período, maior é a resolução temporal.

Complementando, Meneses & Almeida (2012) definem que resolução e escala são termos recorrentes na escolha e utilização de dados de SR. Da mesma forma, Ceccato *et al.* (1993) e Jensen (2009) ressaltam a importância das imagens de satélite para a análise da expansão urbana, pois a resolução temporal de grande parte dos satélites é adequada para o monitoramento do crescimento urbano.

O satélite Landsat, por exemplo, tem resolução temporal de 16 dias enquanto o Sentinel 2A e 2B tem frequência de revisita de 5 dias com ambos os satélites simultaneamente ou 10 dias quando se considera apenas um dos satélites.

Os sistemas sensores, de forma geral, classificam-se em passivos e ativos. Os sistemas passivos captam a emissão térmica e a energia do Sol refletida pelas diferentes superfícies, enquanto os sistemas ativos emitem uma radiação em um determinado comprimento de onda e recebem a leitura da resposta do sinal emitido (Jensen, 2009; Câmara *et al.*, 2001; Tôsto *et al.*, 2014).

Atualmente existem diversos projetos ou missões de satélites sensores capazes de fornecer imagens com diversas resoluções e para os mais diversos fins, tais como, mapeamentos urbanos e rurais, estudos de áreas verdes urbanas, estimativas de colheitas e demarcação de propriedades rurais, monitoramento ambiental, previsão meteorológica, monitoramento de desastres naturais e outros.

Destacam-se, por exemplo, a série de satélites SPOT (*Satellite Pour l'Observation de la Terre*), iniciada no final da década de 1970; o IKONOS II, lançado em 1999; o NOAA (*National Oceanic Atmospheric Administration*), iniciado em 1960 com os satélites da série TIROS; o *QUICKBIRD*, iniciado em 2000; o RADARSAT, lançado em 1995; o *RapidEye*, iniciado em 2008; o *GeoEye*, desde 2006; a série GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellite*), iniciada em 1970; o WorldView; iniciado em 2007; a missão Landsat (*Land Remote Sensing Satellite*), iniciada na segunda metade da década de 1960; o CBERS (*China-Brazil Earth Resources Satellite* ou Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres), implantado em 1988; a missão Sentinel, com lançamento do primeiro satélite em 2014; entre outros (Embrapa Monitoramento por Satélite, 2013; ESA, c2000; USGS, 1972).

Três projetos merecem destaque nesta pesquisa, por disponibilizarem imagens gratuitas e atualizadas com escalas adequadas para o planejamento territorial e monitoramentos diversos:

- **Projeto Landsat (USGS, 1972).**

O projeto teve início na segunda metade da década de 60, a partir da missão *Project EROS* (*Earth Resources Observation Satellites*), desenvolvida pela Agência Espacial Americana (*National Aeronautics and Space Administration - NASA*) e dedicada à observação dos recursos naturais terrestres, e em 1972 passou a se chamar Landsat (Figura 2.10).

O Landsat, em grande parte, foi gerenciado pela NASA e pela *U.S. Geological Survey* (USGS) e envolveu o lançamento de oito satélites. O nono satélite da série está sendo desenvolvido com data de lançamento prevista para 2020.

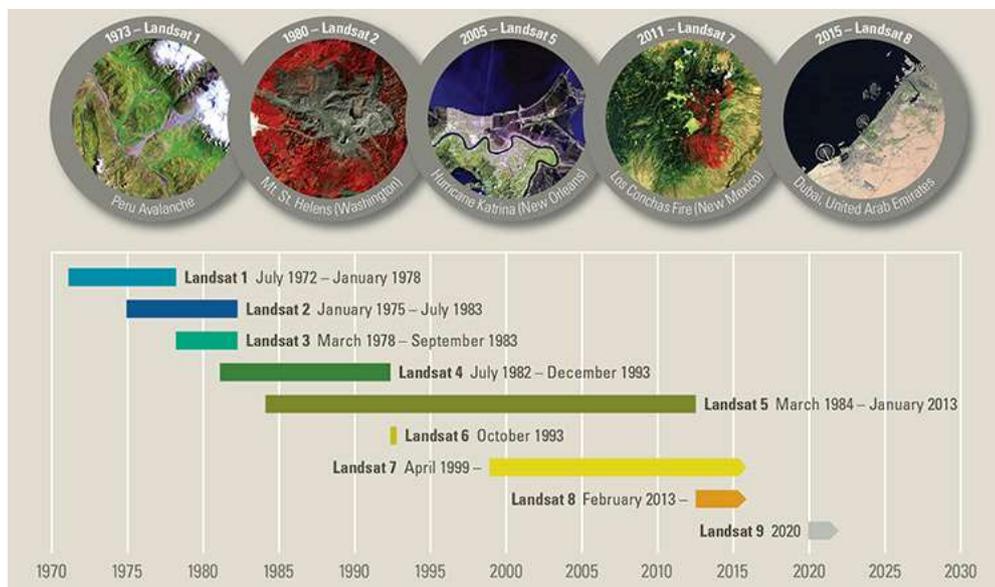


Figura 2.10 - *Timeline* do Projeto Landsat (USGS, 2015).

O primeiro satélite foi lançado em 1972 e denominado ERTS-1 (*Earth Resources Technology Satellite*) ou Landsat 1. Esse satélite levou a bordo duas câmeras ou sensores: RBV (*Return Beam Vidicon*) e MSS (*Multispectral Scanner System*).

O sensor RBV apresentava resolução espacial de 80 metros e três bandas espectrais:

- Banda 1 - azul-verde (475-575 nm).
- Banda 2 - laranja-vermelho (580-680 nm).
- Banda 3 - vermelho para infravermelho próximo (690-830 nm).

O sensor MSS também tinha resolução espacial de 80 metros e quatro bandas espectrais:

- Banda 4 - verde (0,5 a 0,6 μm).

- Banda 5 - vermelho (0,6 a 0,7 μm).
- Banda 6 - infravermelho próximo (0,7 a 0,8 μm).
- Banda 7 - infravermelho próximo (0,8 a 1,1 μm).

Na sequência os satélites Landsat 2 e Landsat 3, lançados em 1975 e 1978 respectivamente, levaram a bordo os mesmos sensores do Landsat 1. Entretanto, no Landsat 3 o sensor RBV foi reprojetoado para usar duas câmeras, lado a lado, com resposta espectral pancromática e resolução espacial de 40 metros, portanto superior à do Landsat 1 e Landsat 2.

O Landsat 4 foi lançado em 1982, levando a bordo o MSS e o novo sensor TM (*Thematic Mapper*). As imagens coletadas estão disponíveis para download no *EarthExplorer*, *GloVis* e no *LandsatLook Viewer*.

O sensor TM apresentou melhores resoluções, tanto espacial quanto espectral e incluiu uma banda na faixa do termal com resolução espacial de 120 m.:

- Banda 1 - azul (0,45 - 0,52 μm), resolução espacial de 30 m.
- Banda 2 - verde (0,52 - 0,60 μm), resolução espacial de 30 m.
- Banda 3 - vermelho (0,63 - 0,69 μm), resolução espacial de 30 m.
- Banda 4 - infravermelho próximo (0,76 - 0,90 μm), resolução espacial de 30 m.
- Banda 5 - infravermelho médio (1,55 - 1,75 μm), resolução espacial de 30 m.
- Banda 6 - infravermelho termal (10,40 - 12,50 μm), resolução espacial de 120 m.
- Banda 7 - Infravermelho médio (2,08 - 2,35 μm), resolução espacial de 30 m.

O Landsat 5 foi lançado em março de 1984 e transportou os mesmos sensores do Landsat 4 (MSS e TM). Segundo dados da USGS, esse satélite forneceu dados de imagem da Terra por quase 29 anos e estabeleceu um Recorde Mundial do *Guinness* como "O mais longo Satélite Operacional de Observação da Terra", antes de ser desativado em 2013.

O Landsat 6 foi lançado em outubro de 1993, mas não conseguiu atingir a órbita terrestre devido algumas falhas no lançamento. O satélite transportava o *Enhanced Thematic Mapper* (ETM), uma versão melhorada dos instrumentos do Landsat 4 e do Landsat 5, que incluía uma banda pancromática de 15 metros de resolução espacial.

O Landsat 7 foi lançado em abril de 1999 e carrega o sensor ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*). Esse sensor é uma evolução do antecessor ETM, com a melhoria da resolução espacial da banda 6 (infravermelho termal) para 60 metros e a possibilidade de fusão das bandas espectrais com a banda pancromática para geração de composições coloridas com 15 m de resolução espacial. Dessa forma, o ETM+ apresenta as seguintes características:

- Banda 1 - azul (0,45 - 0,52 μm), resolução espacial de 30 m.
- Banda 2 - verde (0,52 - 0,60 μm), resolução espacial de 30 m.
- Banda 3 - vermelho (0,63 - 0,69 μm), resolução espacial de 30 m.
- Banda 4 - infravermelho próximo (0,77 - 0,90 μm), resolução espacial de 30 m.
- Banda 5 - infravermelho próximo (1,55 - 1,75 μm), resolução espacial de 30 m.
- Banda 6 - infravermelho termal (10,40 - 12,50 μm), resolução espacial de 60 m.
- Banda 7 - infravermelho médio (2,08 - 2,35 μm), resolução espacial de 30 m.
- Banda 8 - pancromática (PAN) (0,52 - 0,90 μm), resolução espacial de 15 m.

Desde junho de 2003 o sensor apresentou avarias no espelho corretor de linha SLC (*Scan Line Corrector*) e as imagens continuaram sendo enviadas para a Terra, entretanto para utilização desses dados são necessárias correções e análise de acurácia no posicionamento dos *pixels*. De acordo com a USGS, no final de 2020, o satélite Landsat 9 substituirá o Landsat 7 em órbita.

Finalmente, a continuidade da série aconteceu em 2013 com o lançamento do Landsat 8 que carrega os sensores OLI (*Operational Land Imager*) e TIRS (*Thermal Infrared Sensor*). O satélite tem resolução temporal de 16 dias e, da mesma forma que os demais satélites da missão, os dados coletados estão disponíveis para download no *EarthExplorer*, *GloVis* e no *LandsatLook Viewer*.

O sensor OLI deu continuidade aos dados gerados pelos sensores TM e ETM+ e trouxe algumas novidades, sendo um total de nove bandas espectrais, incluindo uma banda pancromática:

- Banda 1 - costeira/aerossol (0,43 - 0,45 μm), resolução espacial de 30 m.
- Banda 2 - azul (0,450 - 0,51 μm), resolução espacial de 30 m.
- Banda 3 - verde (0,53 - 0,59 μm), resolução espacial de 30 m.
- Banda 4 - vermelho (0,64 - 0,67 μm), resolução espacial de 30 m.
- Banda 5 - infravermelho próximo (*near infrared* - NIR) (0,85 - 0,88 μm), resolução espacial de 30 m.
- Banda 6 - infravermelho de ondas curtas SWIR 1 (1,57 - 1,65 μm), resolução espacial de 30 m.
- Banda 7 - SWIR 2 (2,11 - 2,29 μm), resolução espacial de 30 m.
- Banda 8 - Pancromática (PAN) (0,50 - 0,68 μm), resolução espacial de 15 m.
- Banda 9 - Cirrus (1,36 - 1,38 μm), resolução espacial de 30 m.

A banda 1, também chamada de Costeira ou aerossol foi desenvolvida para estudos dos recursos hídricos e investigação da zona costeira e a banda 9, conhecida como Cirrus, criada para a detecção de nuvens. Também há o acréscimo de uma banda de garantia de qualidade (*Quality Assessment* - BQA) que apresenta informações sobre condições de superfície, atmosfera e sensor que podem afetar a qualidade dos dados de um determinado *pixel*.

O sensor TIRS apresenta duas bandas espectrais:

- Banda 10 - infravermelho termal TIRS 1 (10,6 - 11,19 μm), resolução espacial de 100 m.
- Banda 11- infravermelho termal TIRS 2 (11,5 - 12,51 μm), resolução espacial de 100 m.

As bandas 10 e 11 estão no infravermelho termal (TIR) e medem a radiação térmica emitida a partir da superfície terrestre.

Como o Landsat 8 possui bandas adicionais, as combinações usadas para criar composições coloridas (*red, green, blue* - RGB) diferem do Landsat 5 e Landsat 7 (Figura 2.11). Por exemplo, as bandas 4, 3, 2 são usadas para criar uma composição colorida/infravermelho (RGB432) utilizando imagens do Landsat 5 ou 7. Utilizando as bandas do Landsat 8 a mesma composição colorida será feita com as bandas 5, 4 e 3 (RGB543).

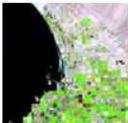
		Landsat 7 Landsat 5	Landsat 8
	Color Infrared:	4, 3, 2	5,4,3
	Natural Color:	3, 2, 1	4,3,2
	False Color:	5,4,3	6,5,4
	False Color:	7,5,3	7,6,4
	False Color:	7,4,2	7,5,3

Figura 2.11 - Composições coloridas RGB em diferentes satélites (USGS, 2013).

Em artigo disponível no site da ESRI encontram-se listadas as possíveis combinações coloridas RGB e para diversas utilidades, conforme a Tabela 2.1 (ESRI, 2013):

Tabela 2.1 - Composições coloridas com bandas espectrais do Landsat 8 e respectivos usos e aplicações.

USO / ÊNFASE	Bandas Landsat8 (RGB)
Cor Natural	4 3 2
Falsa Cor (áreas urbanas)	7 6 4
Infravermelho (áreas vegetadas)	5 4 3
Agricultura	6 5 2
Penetração atmosférica	7 6 5
Saúde Vegetal	5 6 2
Terra/Água	5 6 4
Natural com Atmosfera removida	7 5 3
Infravermelho Curto	7 5 4
Análise de Vegetação	6 5 4

A Figura 2.12 mostra um comparativo entre as bandas do Landsat 8 na parte superior (sensores OLI e TIRS) e do Landsat 7 (sensor ETM+) na parte inferior do gráfico.

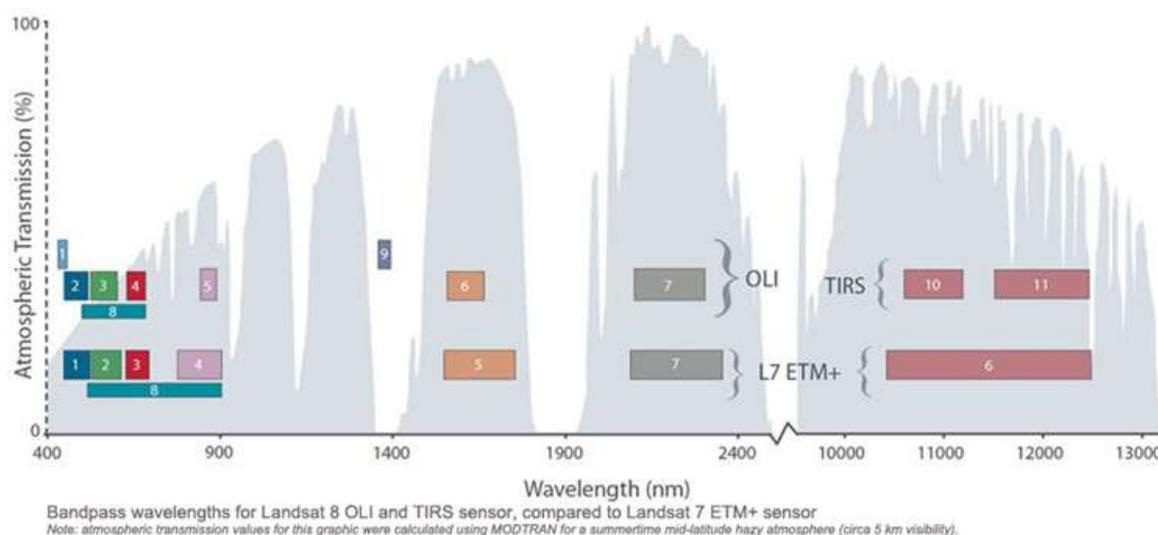


Figura 2.12 - Características espectrais do Landsat 7 e 8 (USGS, 2013).

A missão Landsat 9 já aparece no site da USGS com lançamento previsto para dezembro de 2019 e carregará a bordo os sensores *Operational Land Imager-2* (OLI-2) e *Thermal Infrared Sensor-2* (TIRS-2). A proposta é dar continuidade na coleta de dados e imagens amplamente utilizadas na agricultura, monitoramentos diversos e planejamento territorial.

- **Programa CBERS (Embrapa Monitoramento por Satélite, 2013; CBERS, c2018).**

O programa CBERS (*China-Brazil Earth Resources Satellite* ou Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres) foi iniciado em 1988 após acordo de parceria assinado entre o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e a Academia Chinesa de Tecnologia Espacial (CAST), num convênio técnico-científico bilateral envolvendo China e Brasil. Os dados coletados são utilizados em importantes áreas do desenvolvimento, tais como controle do desmatamento e queimadas, monitoramento de recursos hídricos, agricultura, crescimento urbano, uso e ocupação do solo, educação, entre outras. As imagens são distribuídas gratuitamente aos usuários em território nacional.

No primeiro momento o programa previa o desenvolvimento e construção de dois satélites de sensoriamento remoto (CBERS-1 e 2) que levassem a bordo câmeras imageadoras e um repetidor para o Sistema Brasileiro de Coleta de Dados Ambientais. Em 2002 foi assinado um acordo para continuação do programa com a construção de novos satélites e, recentemente um terceiro acordo foi assinado em maio de 2015 e promulgado por decreto presidencial em 2016.

Em resumo, seis satélites fazem parte do programa até o presente momento:

- CBERS-1 - Lançado em 1999 e inativo desde 2003.
- CBERS-2 - Lançado em 2003 e inativo desde janeiro de 2009.
- CBERS-2B - lançado em 2007 e operante até o início de 2010.
- CBERS-3 - Lançado em 2013 e perdido no lançamento devido a falhas operacionais.
- CBERS-4 - Lançado em dezembro de 2014.
- CBERS-04A - Sendo desenvolvido no INPE com lançamento previsto para o segundo semestre de 2019 em Shanxi na China.

Os satélites do programa CBERS possuem ao todo diversos sensores ou câmeras tais como WFI (Câmera de Amplo Campo de Visada, do CBERS-1, 2 e 2B), CCD (Câmera Imageadora de Alta Resolução, do CBERS-1, 2 e 2B), IRMSS (Imageador por Varredura de Média Resolução, do CBERS-1, 2), HRC (Câmera Pancromática de Alta Resolução, do CBERS-2B), PAN (Câmera Pancromática e Multiespectral, do CBERS-3 e 4), MUX (Câmera Multiespectral Regular, do CBERS-3, 4 e 04A), IRS (Imageador Multiespectral e Termal, do CBERS-3 e 4), WFI (Câmera de Campo Largo, do CBERS-3, 4 e 04A) e WPM (Câmera Multiespectral e Pancromática de Ampla Varredura, do CBERS 04A).

Cada um deles apresenta características próprias que os tornam mais adequados a determinadas aplicações nas diversas áreas do conhecimento.

O sensor WFI ao bordo do CBERS-1, 2 e 2B possuía duas bandas espectrais com resolução espacial de 260 metros:

- Vermelho - (0,63 - 0,69 μm).
- Infravermelho próximo (10,77 - 0,89 μm).

O sensor CCD, também a bordo do CBERS-1, 2 e 2B possuía bandas com resolução espacial de 20 metros:

- Pan - (0,51 - 0,73 μm).
- Azul - (0,45 - 0,52 μm).
- Verde - (0,52 - 0,59 μm).
- Vermelho - (0,63 - 0,69 μm).
- Infravermelho próximo - (0,77 - 0,89 μm).

Por sua vez, o sensor IRMSS a bordo apenas no CBERS-1, 2, apresentava resolução espacial de 160 m na banda do infravermelho termal) e 80 m nas demais bandas:

- 0,50 - 1,10 μm (pancromática).
- 1,55 - 1,75 μm (infravermelho de ondas curtas).
- 2,08 - 2,35 μm (infravermelho de ondas curtas).
- 10,40 - 12,50 μm (infravermelho termal).

Presente no satélite CBERS-2B, o HRC atuava no espectro do visível e parte do infravermelho próximo (0,50 - 0,80 μm) e suas imagens se destacam pela alta resolução espacial de 2,7 metros.

A bordo do CBERS-3 e 4 a câmera PAN apresenta as características abaixo:

- B01: 0,51 - 0,85 μm , resolução espacial de 5 m.
- B02: 0,52 - 0,59 μm , resolução espacial de 10 m.
- B03: 0,63 - 0,69 μm , resolução espacial de 10 m.
- B04: 0,77 - 0,89 μm , resolução espacial de 10 m.

Em relação à câmera MUX, também a bordo dos mesmos satélites que a PAN, trata-se uma nova versão da CCD (CBERS-1, 2 e 2B) com os mesmos 20 metros de resolução espacial e tem as seguintes características:

- B05: 0,45 - 0,52 μm .
- B06: 0,52 - 0,59 μm .
- B07: 0,63 - 0,69 μm .
- B08: 0,77 - 0,89 μm .

Ainda a bordo do CBERS-3 e 4, o sensor IRS apresenta resolução espacial de 40 metros nas bandas pancromática (0,50 - 0,90 μ m) e do infravermelho de ondas curtas - SWIR (1,55 - 1,75 μ m e 2,08 - 2,35 μ m) e de 80 metros na banda termal (10,4 - 12,5 μ m).

Finalmente a WFI apresenta resolução espacial de 64 metros nas quatro bandas espectrais:

- B13: 0,45 - 0,52 μ m.
- B14: 0,52 - 0,59 μ m.
- B15: 0,63 - 0,69 μ m.
- B16: 0,77 - 0,89 μ m.

Conforme dados apresentados no *site* do INPE, o CBERS-4A levará a bordo três câmeras imageadoras (WPM; MUX e WFI) além de gravador de dados digital, sistema de coleta de dados e monitor do ambiente espacial.

- **Projeto SENTINEL (ESA, c2000).**

A Comissão Europeia (CE), em parceria com a Agência Espacial Europeia (ESA), coordena o programa Copernicus, anteriormente denominado *Global Monitoring for Environment and Security* (GMES), traduzido para o português como Programa Global de Monitoração para o Meio Ambiente e a Segurança.

O Programa Copernicus é o programa europeu para observação da Terra e foi criado pelo Regulamento 377/2014 do Parlamento Europeu e tem como objetivo principal disponibilizar dados e informações confiáveis sobre o meio ambiente, gestão de emergências, segurança e proteção civil e monitoramento das alterações climáticas. Toda a informação gerada pelo Copernicus visa atender questões relacionadas às áreas de proteção do ambiente, gestão urbana, planejamento territorial, agricultura, alterações climáticas, proteção civil, entre outras. As imagens de satélite e demais dados produzidos serão distribuídos sem custos por meio de uma política de acesso aberto.

Os satélites Sentinel são um conjunto satélites que foram desenvolvidos no âmbito do Programa da Componente Espaço (*Space Componente*) para dar resposta às demandas do Copernicus no que diz respeito à obtenção, pré-processamento e distribuição de dados obtidos a partir de sensores remotos instalados em satélites.

Em resumo, sete missões compõem o Programa Sentinel: Sentinel-1, Sentinel-2, Sentinel-3, Sentinel-4, Sentinel-5, Sentinel-5P e Sentinel-6.

O Sentinel-1 fornece imagens de radar para todas as condições meteorológicas, dia e noite, para ambientes terrestres e oceânicos. Os satélites Sentinel-1A e Sentinel-1B foram lançados respectivamente em abril de 2014 e em abril de 2016.

O Sentinel-2 fornece imagens de alta resolução para diversos serviços terrestres. Ele fornece, por exemplo, imagens da vegetação, cobertura do solo e áreas costeiras. O Sentinel-2 também fornece informações para serviços de emergência. Os satélites Sentinel-2A e Sentinel-2B foram lançados respectivamente em junho de 2015 e em março de 2017.

O Sentinel-3 fornece dados ópticos, de radar e altimétricos de alta precisão para serviços marítimos e terrestres. Ele tem como objetivos as medições topográficas da superfície do oceano, medição da temperatura na superfície da terra e dos oceanos e, caracterização da cor dos oceanos e da refletância da cobertura do solo. Os satélites Sentinel-3A e Sentinel-3B foram lançados respectivamente em fevereiro de 2016 e em abril de 2018.

Quanto ao Sentinel-4, trata-se de uma missão que fornecerá dados para o monitoramento da composição atmosférica e qualidade do ar. Será uma missão *payload* - sensor transportado a bordo de satélites em órbita geoestacionária com previsão de lançamento para o ano 2019.

O Sentinel-5 também será dedicado ao monitoramento da qualidade do ar. Trata-se de um espectrômetro embarcado nos satélites *MetOp Second Generation*. Visa fornecer dados de abrangência global para monitorar a qualidade do ar e tem previsão de lançamento em 2021.

O Sentinel-5P é uma missão de satélite precursora que tem como objetivo dar continuidade de dados entre a desativação do satélite Envisat e lançamento do Sentinel-5. O satélite foi lançado com sucesso em 13 de outubro de 2017 a partir do Cosmódromo de Plesetsk, no Norte da Rússia.

Finalmente o Sentinel-6 fornecerá altimetria de alta precisão para medir a altura global da superfície do mar, principalmente para oceanografia operacional e para estudos climáticos. É uma missão cooperativa em parceria entre a Europa e os EUA com lançamento previsto para 2020.

Cabe destacar os satélites da missão Sentinel-2 devido ao fornecimento gratuito de imagens de média resolução para diversos serviços terrestres. A missão imageadora multispectral tem uma órbita circular e heliosíncrona com altitude de 786 km e dispõe de um sensor MSI (*Multispectral Instrument*) com 13 bandas espectrais com grande resolução espacial (10, 20 ou 60 m, dependendo da banda) e uma resolução temporal de 10 dias com um satélite e de 5 dias com os dois satélites operacionais simultâneos (2A e 2B). A resolução radiométrica é de 12 bits e as imagens são entregues ortorretificadas, em UTM/WGS84 e com a largura de faixa imageada de 290 km.

Bandas multiespectrais do Sensor MSI/Sentinel-2 (Tabela 2.2):

- 4 bandas no visível e no infravermelho, resolução espacial de 10 m.
- 6 bandas (*red edge* e infravermelho de ondas curtas), resolução espacial de 20 m.
- 3 bandas para correções atmosféricas, resolução espacial de 60 m.

Tabela 2.2 – Características das bandas do sensor presente nos satélites Sentinel-2.

Resolução espacial	Nº da banda	Nome de banda	Comprimento de Onda (nm)
10 m	B02	Blue (azul)	490
	B03	<i>Green</i> (verde)	560
	B04	<i>Red</i> (vermelho)	665
	B08	NIR (infravermelho próximo)	842
20 m	B05	<i>Red edge</i> 1	705
	B06	<i>Red edge</i> 2	740
	B07	<i>Red edge</i> 3	783
	B08A	<i>Red edge</i> 4	865
	B11	SWIR 1	1610
	B12	SWIR 2	2190
60 m	B01	Aerossol	443
	B09	<i>Water Vapor</i>	940
	B10	<i>Cirrus</i>	1375

Dessa forma, citam-se algumas composições coloridas tradicionais como, por exemplo, cor verdadeira (RGB432) e falsa cor (RGB843, RGB 483).

A Figura 2.13 mostra uma comparação das bandas espectrais dos satélites Landsat 7, 8 e do Sentinel-2.

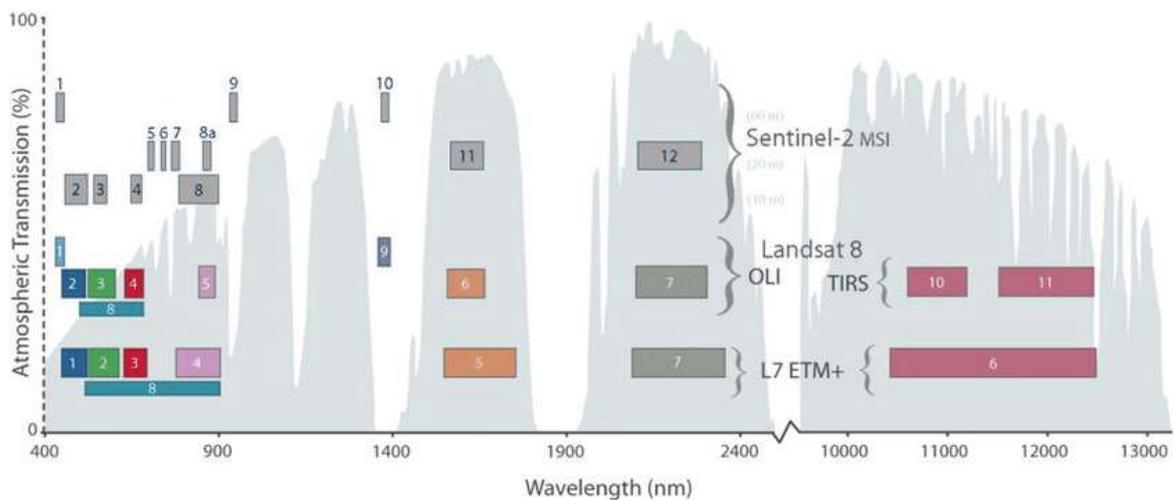


Figura 2.13 - Comparação dos satélites Sentinel-2, Landsat 7 e 8 (USGS, 2015).

2.1.2. SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS

Considerando que o geoprocessamento é o conjunto de tecnologias relacionadas à coleta e tratamento de dados espaciais ou geográficos, as atividades inerentes ao geoprocessamento são executadas por sistemas específicos denominados de Sistemas de Informação Geográfica (SIG).

Segundo Câmara *et al.* (2001), a principal ferramenta do geoprocessamento é o *Geographical Information System* (GIS) ou Sistema de Informação Geográfica, em português. Esse sistema permite realizar atividades e análises complexas, já que é possível reunir dados de diversas fontes e criar bancos de dados georreferenciados (Figura 2.14). Por exemplo, dados cartográficos, imagens de satélite, dados de censo e cadastro urbano e rural, redes e modelos numéricos de terreno são integrados a um banco de dados único, possibilitando combinar as diversas informações com uso de algoritmos de manipulação e análise, visando consultar, recuperar e visualizar o conteúdo dessa base de dados e gerar novas cartas e mapas.

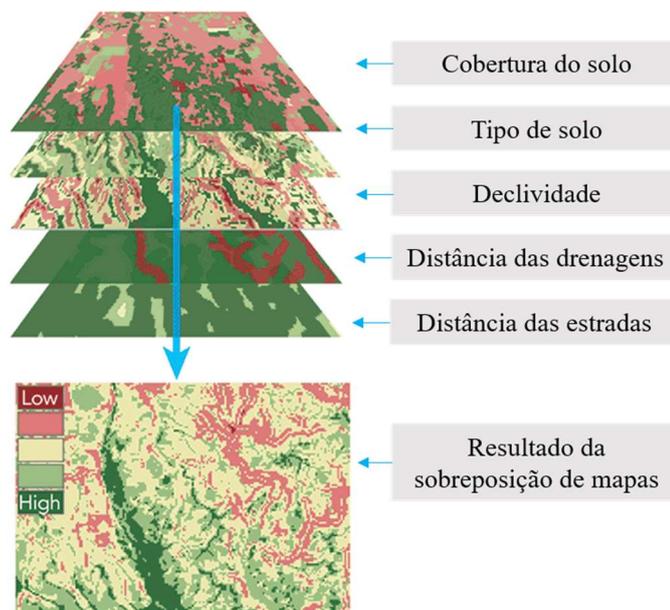


Figura 2.14 - Sobreposição de camadas de dados e geração de novos mapas em ambiente SIG (modificado de ESRI, c2019).

Na Figura 2.14, os diferentes dados de cobertura do solo, tipo de solo, declividade, distância das drenagens e das estradas, apesar da possibilidade de serem visualizados e tratados separadamente, foram combinados considerando diferentes ponderações e relações topológicas resultando um novo mapa. A possibilidade de utilizar o SIG para visualizar, manipular e analisar os diferentes tipos de dados, de forma individual ou conjunta, representa uma das principais contribuições dessa ferramenta nas diversas ações do geoprocessamento, ressaltando a interdisciplinaridade necessária para as geotecnologias digitais.

O SPRING é um exemplo de SIG com funções de processamento de imagens, análise espacial, modelagem numérica de terreno e consulta a bancos de dados espaciais. Trata-se de um projeto desenvolvido pela Divisão de Processamento de Imagens (DPI/INPE), em parceria com a EMBRAPA, PUC-RJ (Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro), IBM Brasil (*International Business Machines*) e PETROBRÁS (Petróleo Brasileiro S.A) com financiamento do CNPq. O projeto consiste em uma plataforma gratuita que pode ser instalada nos sistemas Windows, Linux e Mac, sua primeira versão foi desenvolvida no ano de 1991 e a versão atual do sistema é a 5.5.5. A interface com o usuário contém a possibilidade da linguagem de álgebra de mapas LEGAL (Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico), uma linguagem de programação que pode ser facilmente programável pelos usuários. Essa ferramenta possibilita a realização de análises espaciais através de álgebra de mapas (Câmara *et al.*, 1996).

Outro exemplo que merece destaque é o *Google Earth Engine* (GEE), também considerado uma ferramenta de SIG que pode ser usada para monitoramento e análise de dados geográficos e ambientais no mundo todo.

O GEE é uma plataforma de processamento geo baseada em nuvem (*cloud computing*) que combina um catálogo de vários petabytes (10^{15} bytes) de imagens de satélite e conjuntos de dados geoespaciais com recursos de análise de dados ambientais em escala planetária e os disponibiliza para cientistas, pesquisadores e desenvolvedores para detectar mudanças, mapear tendências e quantificar diferenças na superfície da Terra.

Devido ao armazenamento de imagens na nuvem, a plataforma conta com mais de 35 anos de imagens globais de satélite, ou seja, imagens históricas e atuais do mundo todo. As possibilidades de uso por meio da plataforma são inúmeras, por exemplo: pesquisas com sensoriamento remoto, previsão de surtos de doenças, gerenciamento de recursos naturais, detecção de áreas desmatadas, classificação de uso e cobertura da terra e suas alterações, além de outros mapeamentos diversos.

A interface de criação e manipulação de algoritmos se dá pela integração com o *Python* e *JavaScript* no ambiente integrado *online* usando o editor de códigos (*code editor*). Observa-se que é possível usar diferentes tipos de dados (imagens de satélite, dados de geofísica, dados de demografia, modelos meteorológicos, entre outros).

Ressalta-se que a grande vantagem do GEE é a possibilidade do processamento de dados por meio do servidor em nuvem, otimizando e acelerando os resultados que podem ser exibidos em um visualizador cartográfico dinâmico (Google Earth Solidário, c2019).

Dessa forma, têm-se como aplicações de um SIG de forma geral (Tôsto *et al.* 2014; Fitz, 2008b; Câmara *et al.*, 2001):

- Banco de dados geográficos, com funções de armazenamento e recuperação de informações geográficas.
- Suporte para análise espacial de diversos fenômenos.
- Ferramenta para produção de relatórios e gráficos diversos.
- Ferramenta para produção de mapas e cartas.

Por se tratar de um sistema que processa dados espaciais gráficos e não gráficos, ou seja, dados alfanuméricos com ênfase em análises espaciais e modelagens de superfícies, os benefícios mais comuns de um SIG são o melhor armazenamento e atualização dos dados, rapidez na análise de alternativas para problemas específicos, recuperação de informações de forma mais eficiente, dentre outros.

Um SIG estrutura-se segundo a Figura 2.15 e é composto por interface com usuário, entrada e integração de dados, funções de processamento gráfico e de imagens, visualização e plotagem, armazenamento e recuperação de dados.

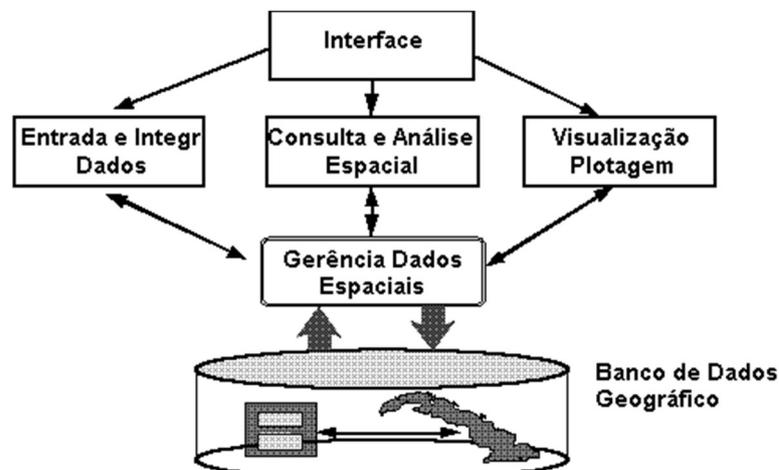


Figura 2.15 - Arquitetura de Sistemas de Informação Geográfica. (Câmara *et al.*, 2001).

Conforme citado, o Processamento Digital de Imagens (PDI) é uma das funções de um SIG e consiste na manipulação de uma imagem digital por meio de computadores, de modo que a entrada e a saída do processamento sejam imagens. Tem por objetivo melhorar o aspecto visual de certas feições estruturais para o usuário, fornecendo outros elementos para sua interpretação, inclusive gerando produtos que possam ser posteriormente submetidos a outros processamentos (DPI/INPE, c2006).

O PDI envolve etapas cujas tarefas são interconectadas, desde a tomada, aquisição ou captura da imagem digital até a extração de características (classificação temática) e posterior reconhecimento e interpretação (Florenzano, 2011; Tôsto *et al.*, 2014; Marques Filho & Vieira Neto, 1999; Jensen, 2009). A Figura 2.16 apresenta um esquema resumido das etapas do PDI e a Figura 2.17 apresenta um fluxograma com o detalhamento das possibilidades em cada fase do processo, a saber: Pré-processamento, Realce e Classificação.

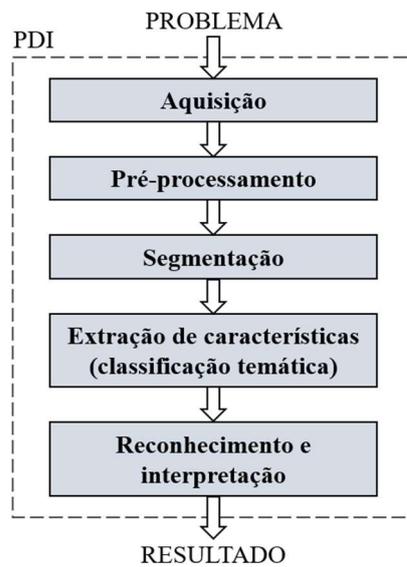


Figura 2.16 – Etapas do PDI.

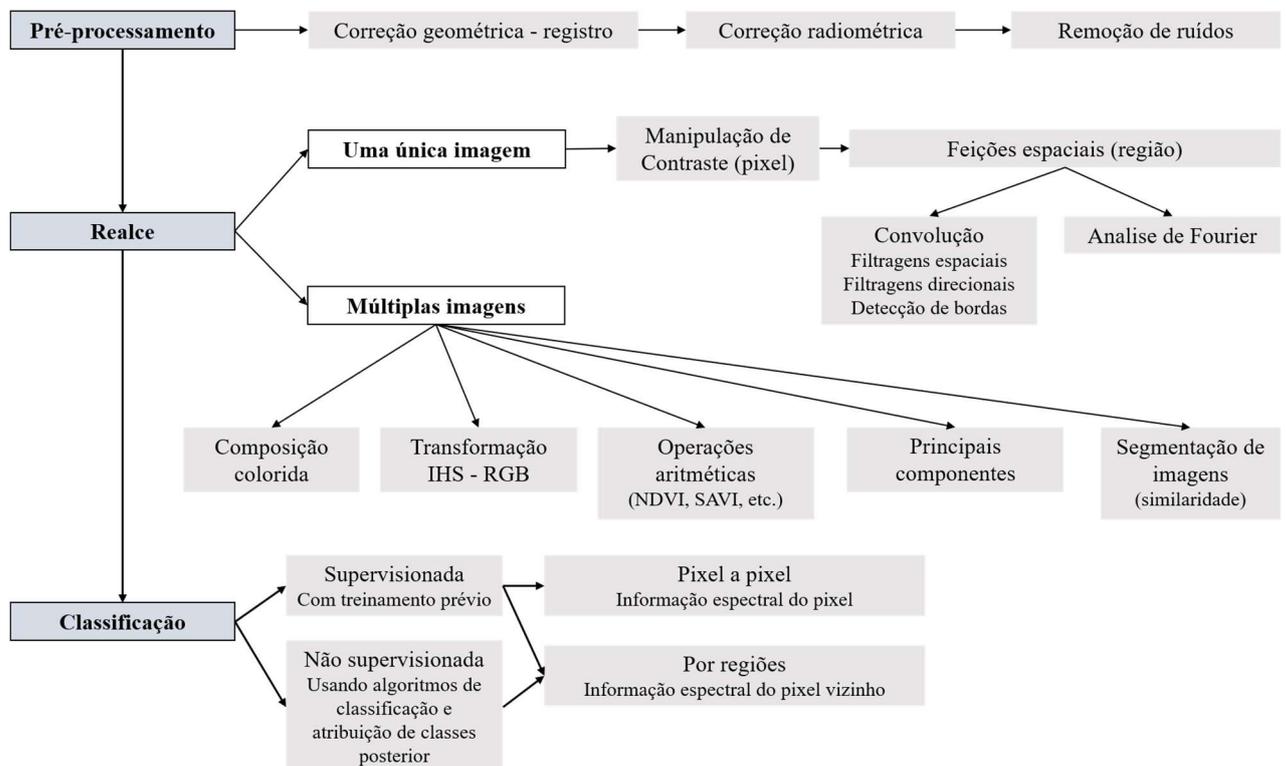


Figura 2.17 – Fluxograma do PDI.

As operações aritméticas entre bandas espectrais podem ser consideradas uma das mais simples formulações algorítmicas de PDI com resultados expressivos. É possível executar operações de soma, subtração, multiplicação e divisão entre bandas gerando novas imagens que correspondem, por exemplo, a índices de vegetação, umidade, construção, solo, entre outros (Jensen, 2009; Meneses & Almeida, 2012).

Segundo Meneses & Almeida (2012), o índice mais conhecido é resultado da divisão (razão) entre bandas, visando realçar as variações de densidade da cobertura vegetal, chamado índice de vegetação.

De acordo com Jensen (2009) há muitos índices de vegetação e alguns são redundantes em conteúdo. Em termos gerais, o índice de vegetação baseia-se no comportamento de reflectância da vegetação, conforme observa-se na Figura 2.18.

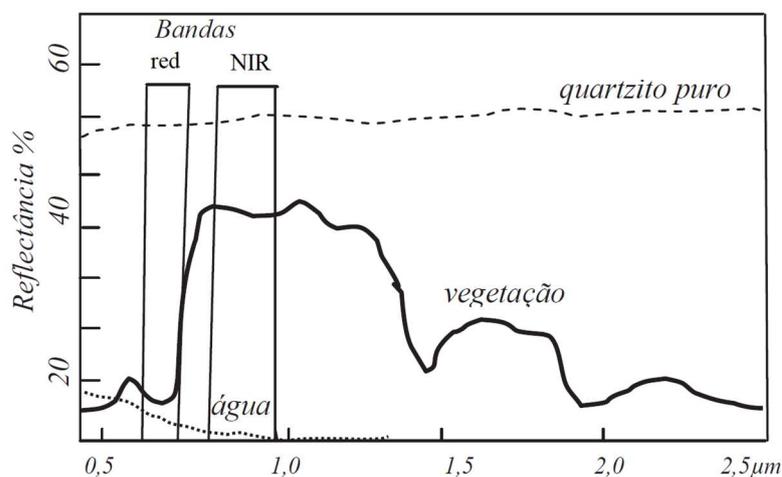


Figura 2.18 – Curvas de reflectância da vegetação, água e quartzito (modificado de Meneses & Almeida, 2012).

De acordo com a curva apresentada; na vegetação, a principal banda de absorção está na região espectral dos 650 nm, faixa do visível na luz vermelha (R) enquanto a região de maior reflectância corresponde ao infravermelho próximo (NIR), comprimentos de onda entre 760 nm a 900 nm (Jensen, 2009; Meneses & Almeida, 2012).

Essa diferença ou gradiente faz com que a curva da vegetação apresente um trecho característico, quase vertical, diferente dos demais alvos (água e quartzito puro) que tem curvas praticamente sem declividades entre as bandas R e NIR.

Ao realizar a divisão da banda que corresponde ao NIR pela banda que corresponde ao R, o resultado vai realçar os pixels das áreas com vegetação cujos valores serão maiores que 1. Por outro lado, nas curvas da água e do quartzito a divisão entre bandas resultará em valores próximos de 1, portanto não haverá realce. Dessa forma, as áreas vegetadas aparecerão na imagem resultante em tons mais claros do que as não vegetadas (Jensen, 2009; Meneses & Almeida, 2012).

Esse índice é conhecido como Razão Simples (Equação 2.1) ou *Simple Ratio* (SR), observando-se que a regra é dividir a banda de maior reflectância pela banda de menor reflectância (Jensen, 2009; Meneses & Almeida, 2012).

$$SR = \frac{NIR}{RED} \quad (2.1)$$

Onde NIR refere-se ao infravermelho próximo e RED à banda do vermelho.

De forma análoga, relaciona-se outros índices resultantes de divisão entre bandas amplamente conhecidos e utilizados (Jensen, 2009; Meneses & Almeida, 2012):

- Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (Equação 2.2) ou *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI).

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (2.2)$$

Segundo Jensen (2009), o NDVI é funcionalmente equivalente ao SR.

- Índice de Umidade por Diferença Normalizada - *Normalized Difference Moisture Index* (NDMI) ou Índice de Água - *Water Index* (NDWI), conforme Equação 2.3.

$$NDMI \text{ ou } NDWI = \frac{NIR - MidIR}{NIR + MidIR} \quad (2.3)$$

Onde MidIR refere-se ao infravermelho próximo.

- Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (Equação 2.4) ou *Soil-Adjusted Vegetation Index* (SAVI) (Huete, 1988).

$$SAVI = \frac{(1 + L) (NIR - RED)}{NIR + RED + L} \quad (2.4)$$

Onde L é um fator de ajuste constante, determinado empiricamente para minimizar a sensibilidade do índice de vegetação às variações de reflectância dos tipos de solo, variando entre 0 a 1, a depender da densidade da vegetação. O valor 1 é considerado para áreas com pouca cobertura vegetal.

- Índice por Diferença Normalizada para Áreas Construídas (Equação 2.5) ou *Normalized Difference Built-up Index* (NDBI) (Zha *et al.*, 2003).

$$NDBI = \frac{MidIR - NIR}{MidIR + NIR} \quad (2.5)$$

$$B_u = NDBI - NDVI \quad (2.6)$$

Onde B_u (Equação 2.6) significa *built-up area*, ou em português, área construída.

O NDBI é de relevante importância quando deseja-se estimar e monitorar a distribuição espacial urbana, ou seja, áreas construídas urbanas. São dados que podem ser utilizados para análise de escoamento de bacias hidrográficas e ações de planejamento urbano (Jensen, 2009).

2.1.2.1. PLATAFORMA GOOGLE EARTH ENGINE

Para a utilização do GEE é necessário possuir uma conta Google, com a qual o usuário fará o *login* de acesso para se vincular à plataforma acessando a página de código (<https://code.earthengine.google.com>).

Os processamentos são realizados no editor de códigos do GEE (Figura 2.19), a partir da janela de script (*code editor* - janela 2), programada em linguagem JavaScript API (*Application Programming Interface* ou Interface de Programação de Aplicativos, em português).

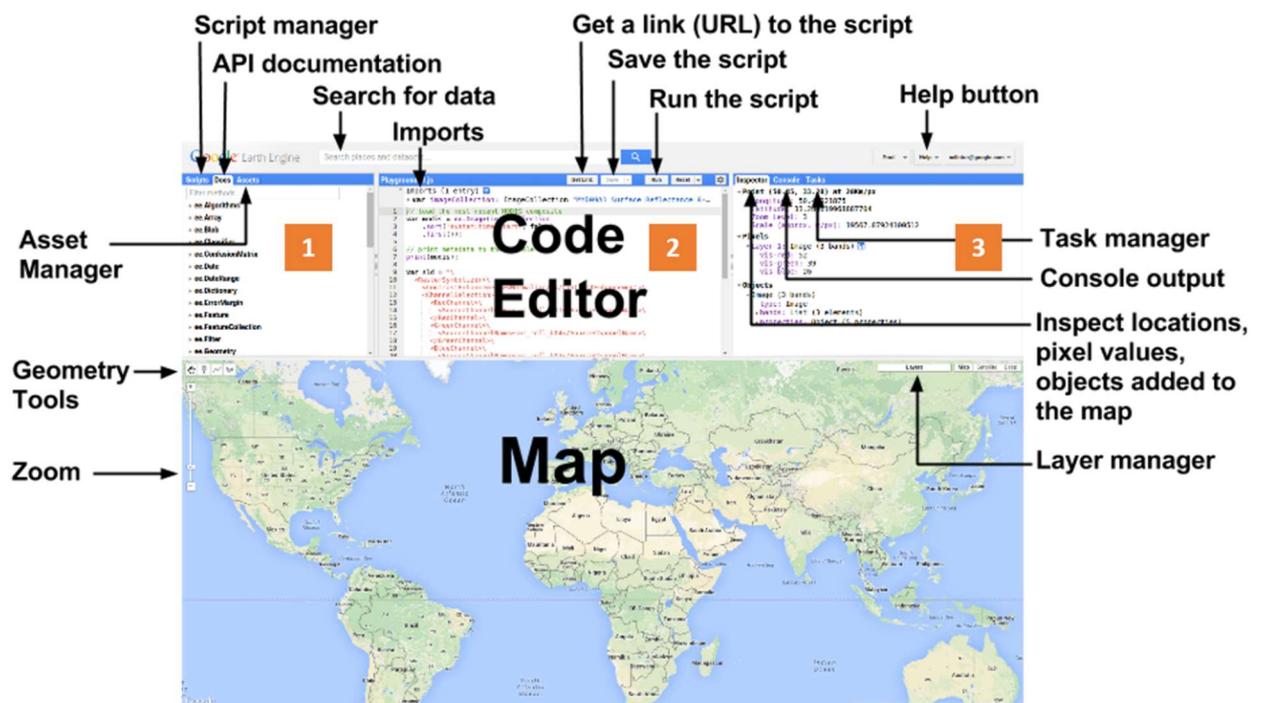


Figura 2.19 – Diagrama do Editor de códigos do GEE (modificado de Google Earth Solidário, c2019).

Na janela 1 estão os exemplos de códigos pré-definidos e os códigos desenvolvidos pelo usuário. A janela 3 é destinada às abas de saída e gerenciador de tarefas da plataforma. Além dessas janelas principais, o editor de códigos tem outros elementos como a área do mapa, gerenciador de camadas, zoom, ferramentas de desenho de geometria, área de pesquisa e botão de ajuda; os dois últimos na parte superior da tela (Google Earth Solidário, c2019).

Os limites ou contornos das áreas de interesse são criados com o *Google Fusion Tables*, um serviço da web fornecido pelo *Google* para gerenciamento de dados que funciona no ambiente do *Google Drive* e gera tabelas a partir de dados de arquivos *shapefile* ou até mesmo *.kml* do Google Earth.

As análises podem ser realizadas utilizando-se apenas uma imagem ou uma coleção de imagens. Para a utilização de apenas uma imagem, é necessário saber o código da imagem (ID) que se deseja utilizar. Para tal, utiliza-se a função inspecionar (*inspector*) do GEE e, clicando-se sobre o mapa, é possível analisar obter informações das imagens para uma determinada região, como por exemplo: dados de cobertura de nuvem, a data de aquisição da imagem e demais especificações.

Para a utilização de uma imagem única, cria-se uma variável no código (*script*) atribuindo uma função do tipo: *ee.Image* (CODIGO_DA_IMAGEM).

Quanto à utilização de uma coleção de imagens, o procedimento é semelhante, entretanto, cria-se uma variável e atribui-se a ela uma função de coleção de imagem. No caso da coleção de imagens do Landsat 8, por exemplo, atribui-se a seguinte função: *ee.ImageCollection* ('LANDSAT/LC08/C01/T1_RT_TOA').

A Figura 2.20 apresenta a diferença entre as duas formas de importar e utilizar imagens.

```

NDWI_DF_comp_imagem_unica
1 //Aplicação inicial para identificar a melhor imagem a ser utilizada, no
2 // 0% de cobertura de nuvem
3 //var img = ee.ImageCollection('LANDSAT/LC08/C01/T1_RT_TOA')
4 // .filterBounds(geometry)
5 // .filterMetadata('CLOUD_COVER', 'less_than', 2);
6
7 // script utilizando apenas uma imagem
8 var img = ee.Image('LANDSAT/LC08/C01/T1_RT_TOA/LC08_221071_20130729');
9
10 var NDWI_veg = img.expression(
11   '(nir - swir) / (nir + swir)',
12   {
13     swir: img.select('B6'),
14     nir: img.select('B5'),
15   });
16
17 var NDWI_agua = img.expression(
18   '(green - nir) / (green + nir)',
19   {
20     green: img.select('B3'),
21     nir: img.select('B5'),
22   });
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
NDWI_DF_colecao
19   green: image.select('B3'),
20   nir: image.select('B5'),
21 });
22 image = image.addBands(NDWI_agua.rename('NDWI_agua'));
23
24 return image;
25
26
27 //Coleção de imagens
28 var OLI = ee.ImageCollection('LANDSAT/LC08/C01/T1_RT_TOA')
29   .filterDate('2017-01-01', '2017-12-31')
30   .filterBounds(geometry)
31   .map(app);
32
33 // Make a palette: rampa de cor
34 var palette_a = ['070FFF', '37A314', 'FF8507', '00FFCF', '004EFF'];
35
36 //Gráficos
37 var lon = ui.Label();
38 var lat = ui.Label();
39
40 // Register a callback on the default map to be invoked when the map is
41 Map.onClick(function(coords)
42 {

```

Figura 2.20 –Variável para importação de imagem única e coleção de imagens.

Para utilizar outras coleções de imagens (Sentinel 2, Sentinel 5, Landsat 7, entre tantas) basta realizar-se uma busca no campo de pesquisa e clicar em importar. Assim, a coleção de imagens é importada diretamente na página do código (*script*) do GEE. Tal processo pode ser observado na Figura 2.21. Importante citar a possibilidade que a plataforma oferece na importação de imagens com menor percentual de cobertura de nuvens utilizando uma função específica para isso.

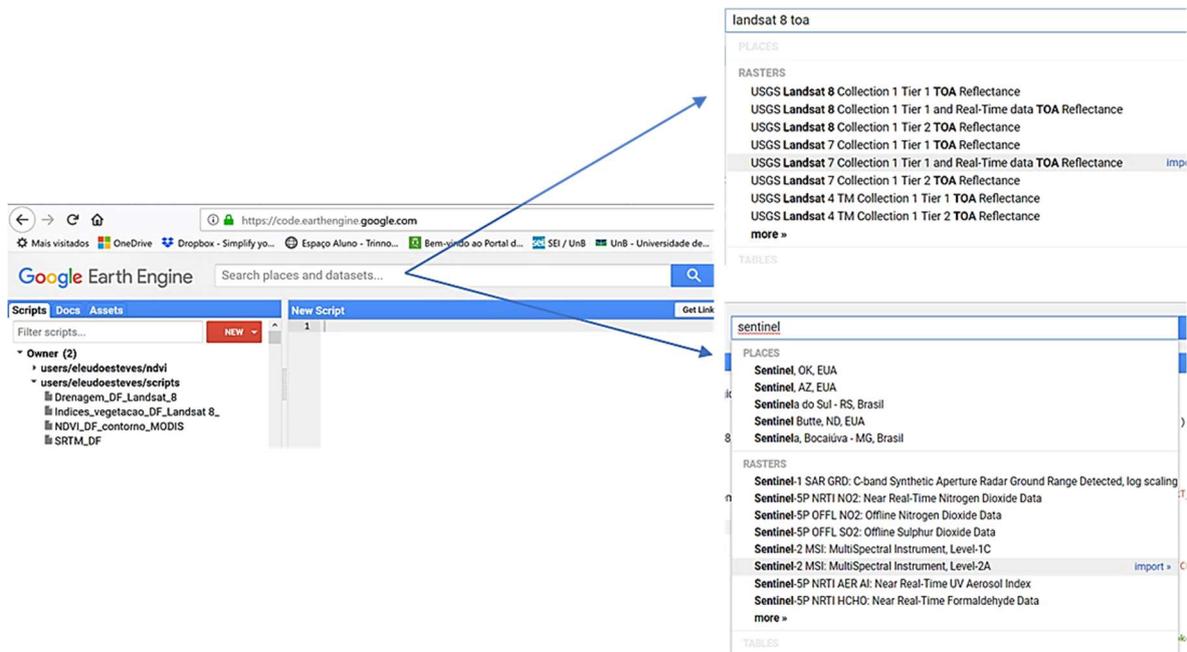


Figura 2.21 – Pesquisa das Imagens na plataforma GEE.

A função de realce da imagem ou ajuste de parâmetros de visualização pode ser realizada na aba de parâmetros da imagem, ilustrada na Figura 2.22, a partir da função *stretch*, aplicando-se os limites mínimos e máximos de correção na imagem.

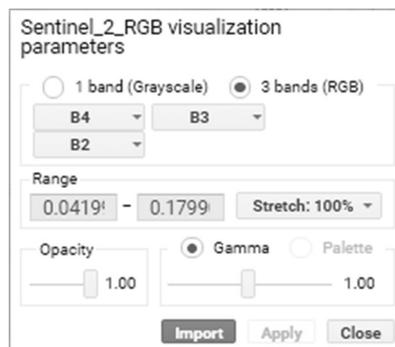


Figura 2.22 – Parâmetros para ajuste da visualização no GEE.

A plataforma contém uma janela de ajuda/dicas gerais acionada pela combinação de teclas (*Ctrl* + barra de espaço), com a qual é possível obter explicações e funcionalidades de uma determinada função. Outro atalho bastante utilizado é o (*Ctrl* + *Enter*) que roda o código que está na janela de *script*. Além de funções de operações aritméticas entre bandas espectrais para criação de índices de vegetação, por exemplo, o GEE tem outros recursos como a classificação de cobertura do solo, tanto a supervisionada como a não supervisionada. Para o aprendizado da ferramenta, durante o desenvolvimento e escrita da tese, optou-se por utilizar como área de estudo o DF (resultados apresentados no item 5.1 – Plataforma GEE - Resultados). Em seguida, trabalhou-se especificamente na área de estudo da pesquisa, no âmbito da Fase Preliminar, destinada ao inventário, utilizando coleções de imagens do Landsat 8 e do Sentinel 2A.

2.1.3. FOTOGRAMETRIA E AEROLEVANTAMENTO

Segundo a *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing* (ISPRS), a Fotogrametria é a arte, ciência e tecnologia de obtenção de informações confiáveis sobre objetos físicos e o meio ambiente com o uso de processos de registro, medições e interpretações de imagens fotográficas e padrões de energia eletromagnética e outros fenômenos (ASP, 1980; Tommaselli, 2009; Jensen, 2009). Considerando-se a etimologia do termo, três palavras gregas dão origem à palavra fotogrametria: *photos*, que significa luz, *gramma* que significa algo escrito ou desenhado e *metron*, que significa medir.

A invenção do Daguerreótipo em 1839 por Louis Daguerre, não só antecedeu a prática da fotogrametria como tornou-a possível. O processo criado por Daguerre consistia na evolução das ideias e experimentos do inventor francês Joseph Nicephore Niépce que, em 1793, conseguiu “imprimir” a luz em uma superfície sem usar qualquer tipo de tinta, porém as imagens desapareciam algum tempo depois. O daguerreótipo permitia que a imagem registrada fosse fixada em uma placa de metal rígida e espelhada, por isso é conhecido como o primeiro equipamento fotográfico a ser anunciado e fabricado em escala comercial (Tommaselli, 2009; Jensen, 2009; Loch & Lapolli, 1998).

Outros notáveis também participaram do contexto histórico da fotogrametria: Aristóteles, em 350 A.C., ao tratar da possibilidade de projetar imagens por meio ótico; Leonardo da Vinci, em 1492, ao estudar os princípios da projeção ótica e do polimento de lentes; Johannes Kepler, em 1600, ao formular a definição para estereoscopia, entre outros (Tommaselli, 2009).

Da mesma forma que outras geotecnologias, a fotogrametria encontra-se em constante evolução desde 1840 quando o geodesta François Arago, membro da Academia de Ciências Francesa, defendeu a possibilidade do uso da fotografia para a elaboração de cartas topográficas. Já em 1849 o Coronel francês Aimé Laussedat fez uma experiência com o uso de balões na elaboração de mapeamento topográfico, entretanto, em função das dificuldades encontradas na obtenção de fotos aéreas, Laussedat dedicou-se ao mapeamento usando fotogrametria terrestre, por isso é conhecido como "Pai da Fotogrametria" (Casaca *et al.*, 2011; Tommaselli, 2009; Loch & Lapolli, 1998).

Com a invenção do avião, a fotogrametria evoluiu e o termo aerofotogrametria tornou-se comum no meio científico. Em 1913 o avião foi utilizado pela primeira vez para obtenção de fotografias aéreas que seriam utilizadas para mapeamento e, durante a Primeira Guerra Mundial, as aerofotos foram utilizadas principalmente para missões de reconhecimento (Tommaselli, 2009; Loch & Lapolli, 1998).

Os registros históricos da produção de fotografias aéreas citam o fotógrafo francês e balonista Gaspard-Félix Tournachon (Paris, 1820 – Paris, 1910), conhecido como "Nadar", que em 1858 sobrevoou Paris com um balão e realizou fotos para fins cartográficos. Outro registro importante trata da fotografia aérea intitulada *Boston, as the Eagle and the Wild Goose See It* (em português: Boston, como as águias e os gansos a veem) tirada por James Wallace Black e Samuel Archer King em 13 de outubro de 1860 (Figura 2.23), que retrata a cidade de Boston, a partir de uma altura aproximada de 350 m (Jensen, 2009).



Figura 2.23 - *Boston, as the Eagle and the Wild Goose See It* – fotografia aérea tomada em 1860 (disponível em iphoto.com.br).

Em resumo, entende-se por Aerofotogrametria ou Fotogrametria Aérea, a utilização de fotografias aéreas (cobertura aerofotográfica) executada para fins de mapeamento, feita a bordo de qualquer veículo aéreo, desde aviões, balões, dirigíveis e helicópteros, especialmente as RPAs. Existem relatos comprovados de câmeras fotográficas adaptadas ao peito de pombos na tentativa de obtenção de imagens aéreas em 1903 (Jensen, 2009).

A fotogrametria, atualmente, se desenvolve basicamente em duas áreas complementares (Tommaselli, 2009; Fitz, 2008b):

- Fotogrametria Métrica: responsável pelos métodos de obtenção de dados quantitativos (distâncias entre pontos, áreas, volumes, ângulos, entre outros) e elaboração de mapas e cartas, e;
- Fotogrametria Interpretativa ou Fotointerpretação: consiste na obtenção de dados qualitativos com base na análise das aerofotos e imagens de satélite com o objetivo de reconhecer e identificar objetos e feições diversas.

Com o avanço tecnológico proporcionado pelas máquinas fotográficas digitais e pelos computadores pessoais, surgem os termos Fotogrametria Digital e Fotogrametria Assistida por Computador (Jensen, 2009; Tommaselli, 2009; Konecny, 1994; Loch & Lapolli, 1998).

De acordo com Tommaselli (2009), Loch & Lapolli (1998) e Jensen (2009) são inúmeras as aplicações para a fotogrametria; segundo os autores, se houver necessidade de obtenção de medidas, certamente pode-se utilizar um processo fotogramétrico. Dessa forma, as possibilidades de aplicação são diversas: desde a Cartografia, Planejamento Urbano e Territorial, Engenharia Civil, Engenharia Florestal, Geografia, Arquitetura, Medicina, Agricultura, Geologia, Área Militar, História, dentre outras.

Atividades como produção de cartas topográficas, locação e manutenção de estradas, realização de inventários florestais e minerais, agricultura de precisão, cadastramento territorial urbano e monitoramento de desastres ambientais são exemplos da utilização de técnicas de fotogrametria métrica e fotointerpretação.

Quanto às vantagens da fotogrametria, Tommaselli (2009) destaca que a aquisição dos dados é rápida, o objeto a ser medido não é tocado e que as fotografias apresentam grandes quantidades de informações geométricas, bem como do cotidiano das pessoas. O registro fotográfico representa e materializa um momento específico no tempo; com data, hora e principalmente a localidade de obtenção.

O mapeamento aerofotogramétrico é realizado em etapas subsequentes, após o planejamento da operação através de um estudo detalhado com todas as especificações sobre o tipo de cobertura a ser executado, conforme estão resumidas na Figura 2.24 (Silva, 2018).

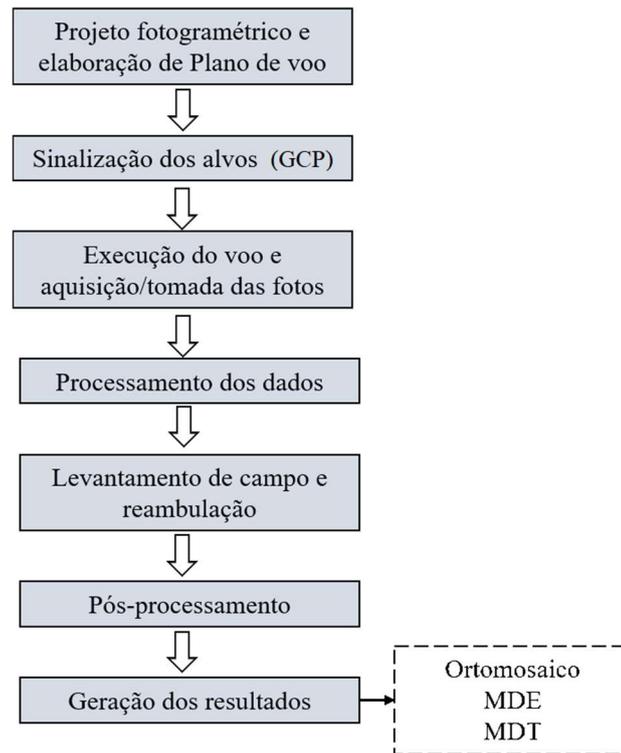


Figura 2.24 – Fases do mapeamento aerofotogramétrico.

Jensen (2009), Casaca *et al.* (2011) e Silva (2018) ressaltam que o planejamento da missão de aerolevantamento deve levar em consideração fatores como o relevo do terreno a ser mapeado, o uso e ocupação da área (urbana ou rural), o acesso à área e principalmente as condições atmosféricas, tanto locais como diárias. Com base nesses e em outros critérios mais específicos o plano de voo elaborado especificará, em termos gerais, a altitude do voo, a escala das fotos, as superposições ou sobreposições longitudinais e laterais entre fotos e o número de pontos de controle ou *Ground Control Points* (GCP) necessários.

De acordo com o IBGE as fotografias aéreas devem ser tomadas sempre com elevação do Sol superior a 30°, em dias claros, nos quais as condições climáticas permitam a tomada de fotos bem contrastadas (IBGE, 1999).

Importante citar e definir alguns conceitos fotogramétricos essenciais para o entendimento do tema: escala da foto, cobertura aerofotogramétrica, estereoscopia, pontos de amarração e controle, reambulação, aerotriangulação, entre outros (Casaca *et al.*, 2011; Jensen, 2009; Tommaselli, 2009; Loch & Lapolli, 1998; Florenzano, 2011; Silva, 2018).

- Escala da foto: a escala fotográfica segue a definição de escala de desenho técnico, ou seja, é uma razão entre a medida no mapa ou na fotografia e a distância correspondente no terreno. portanto, se 1 cm medido na fotografia corresponder a 50 m no terreno, a escala da foto será 1:5.000.

Importante ressaltar que fotografias verticais (aéreas) são projeções perspectivas onde as características do relevo ou do tipo de área a ser sobrevoada (área rurais ou urbanas com edifícios altos) interferem no resultado, pois as variações de escala são mais significativas já que a altura do voo não é uma constante.

Dessa forma, a relação matemática para calcular a escala da foto é calculada conforme a Equação 2.7 e representado na Figura 2.25:

$$E = \frac{f}{H} \quad (2.7)$$

Onde:

H significa a altura do voo;

f corresponde à distância focal da câmara.

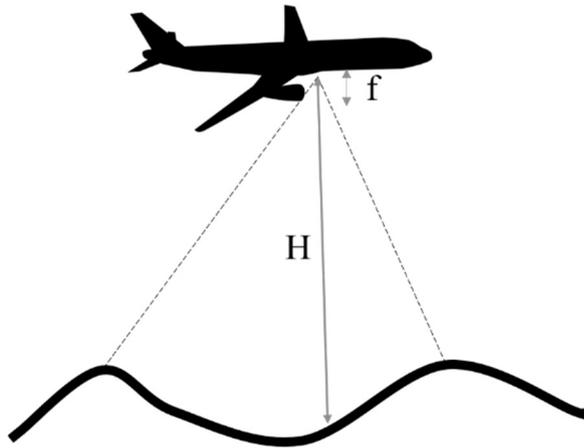


Figura 2.25 – Parâmetros utilizados para o cálculo da escala da fotografia.

- Cobertura aerofotogramétrica: é a representação do terreno através de fotografias aéreas expostas sucessivamente, ao longo de uma direção de voo (faixa de voo).

Essa sucessão é feita em intervalo de tempo de forma que, entre duas fotografias, haja uma superposição longitudinal de cerca de 60%, formando uma faixa. Nas faixas laterais, dispostas paralelamente para compor a cobertura de uma área, é mantida uma distância entre os eixos de voo de forma que haja uma superposição lateral de 20% a 30% entre as faixas vizinhas. Portanto, alguns pontos do terreno, dentro da área de cobertura, são fotografados várias vezes em ambas as faixas. Os recobrimentos têm como objetivo evitar a ocorrência de vazios ou buracos (área sem fotografar) na cobertura aerofotogramétrica (ver Figura 2.26).

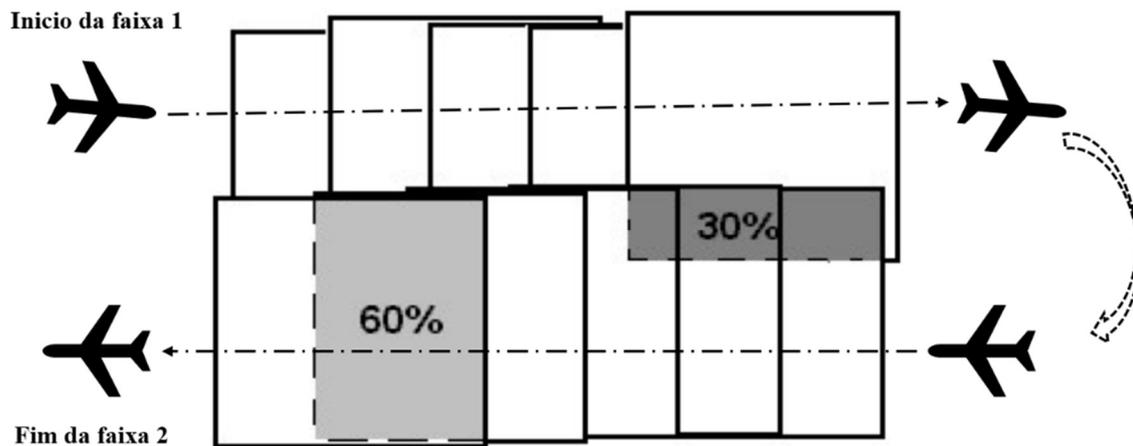


Figura 2.26 – Esquema de cobertura aerofotogramétrica.

- Estereoscopia: trata-se do estudo de métodos e técnicas que permitem a visão tridimensional (perspectiva). Visão estereoscópica significa visão tridimensional, enquanto estereoscopia é um dos processos da obtenção da visão tridimensional.

Para uma imagem estereoscópica são necessárias duas fotografias tomadas de dois pontos de vista distintos conhecido como par estereoscópico de imagens.

- Pontos de amarração e controle (Figura 2.27): tratam-se pontos de referência em solo, capazes de serem identificados nas fotografias (pontos foto identificáveis ou GCP).

Na prática, são objetos, alvos ou detalhes no terreno que irão aparecer nas imagens aéreas. São utilizados para fazer a relação entre o sistema de coordenadas da imagem com o sistema de coordenadas do terreno aumentando a acurácia do mapeamento gerado pela aeronave no momento do voo (DronEng, c2014a). As coordenadas do ponto de controle são rastreadas com equipamentos de GPS.

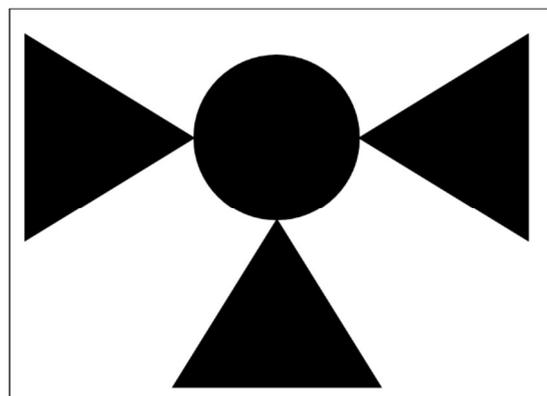
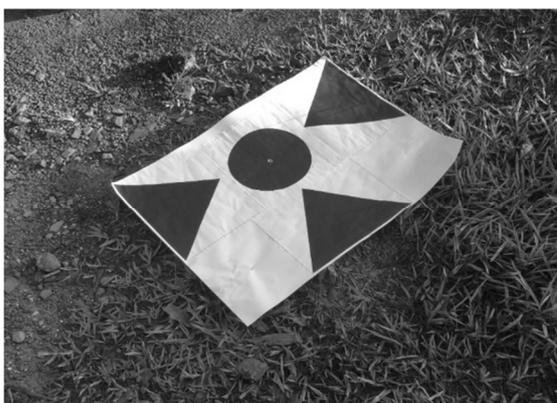


Figura 2.27 – Exemplo de alvo (GCP) utilizado na pesquisa.

- Reambulação: é uma fase da elaboração cartográfica que consiste no trabalho realizado em campo, com base nas fotografias aéreas, destinada à identificação, localização, denominação e esclarecimentos de acidentes geográficos naturais e artificiais existentes na área da fotografia.
- Aerotriangulação (Esteio, 2008; Loch & Lapolli, 1998): tem como objetivo densificar os pontos de controle utilizados na correlação entre as imagens aéreas e o sistema de coordenadas do mapeamento, partindo de pontos com coordenadas conhecidas na fotografia aérea (imagem) e no terreno. É o método fotogramétrico empregado para determinação de pontos fotogramétricos, buscando estabelecer controle horizontal e vertical.

Entende-se por voo apoiado aquele ligado ao uso de um Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS), acoplado ao avião. Esse sistema permite orientar a navegação durante o voo e é capaz de obter uma posição exata de determinados alvos em solo. Cabe citar o trabalho de Ackermann (1994), no qual foram analisados voos apoiados por GPS para posterior aerotriangulação durante aproximadamente uma década cujos resultados foram satisfatórios.

Cerca de 20 voos foram analisados e os resultados de ajustamento obtiveram êxito, mesmo utilizando-se modelos diversos de receptores GPS. Os respectivos voos foram realizados em diversas regiões pelo mundo com escalas de voo variando entre 1:6.000 e 1:50.000 e número de fotografias tomadas entre 12 e 1600 fotos. Diante dos resultados analisados, conclui-se que o método é operacional e confiável (Ackermann, 1994).

As fotografias aéreas podem ser classificadas quanto à orientação do eixo da câmara (vertical ou oblíqua), ao sistema ótico (simples ou múltiplo) e às características do filme/sensor ou propriedades da fotografia (Jensen, 2009; Casaca *et al.*, 2011; Loch & Lapolli, 1998; Tommaselli, 2009).

- As fotografias verticais são tomadas com o eixo da câmara na vertical na posição mais próxima da verticalidade, tolerando-se no máximo 3° de inclinação.

Na prática o eixo ótico se mantém próximo da perpendicularidade em relação ao solo. A verticalidade é controlada e corrigida com sistemas presentes nas câmaras das aeronaves que diminuem os erros ocorridos durante a aquisição das fotografias. Esse é o tipo de fotografia mais utilizada para a geração dos mapeamentos.

- As fotografias oblíquas ou inclinadas são tomadas com o eixo da câmara inclinado em relação ao eixo vertical. Podem ser classificadas em oblíquas altas, quando o horizonte aparece na fotografia e oblíquas baixas, sem aparecer o horizonte na fotografia. Esse tipo de fotografia é mais utilizado para apoio no processo de fotointerpretação.

Quanto ao sistema ótico, ele pode ser simples, quando composto por apenas uma câmera ou múltiplo, que consiste em duas ou mais câmeras montadas para obtenção de imagens simultâneas com diferentes ângulos ou posicionamentos (Loch & Lapolli, 1998; Tommaselli, 2009).

Em relação ao tipo de filme, encontram-se disponíveis no mercado diversos filmes desde os pancromáticos, coloridos, infravermelho preto e branco e infravermelho colorido (Florenzano, 2011).

Os filmes pancromáticos ou preto e branco (P&B) são amplamente utilizados para mapeamento e fotointerpretação. Os filmes coloridos, por sua vez, são mais indicados quando houver necessidade de interpretação de objetos e cenas mais complexas, pois apresentam maior riqueza de detalhes em função do atributo cor.

Os filmes infravermelhos têm a vantagem de serem sensíveis à faixa do infravermelho, portanto tem maior resolução espectral do que um filme P&B pancromático e são bastante utilizados para análise de vegetação e umidade do solo. O filme infravermelho colorido é conhecido como falsa-cor, pois a cena registrada não é reproduzida com a cor vista pelo olho humano, por sua vez denominada cor verdadeira. As fotografias obtidas com filmes infravermelhos fornecem mais informações sobre vegetação devido à refletância do comprimento de onda na faixa do infravermelho ser maior do que a refletância do verde na vegetação (Florenzano, 2011).

A Figura 2.28 apresenta uma composição colorida infravermelha falsa-cor RGB543 do satélite Landsat 8. Observa-se que a vegetação está representada em tons de vermelho, onde as tonalidades mais claras representam as vegetações mais saudáveis, enquanto os tons mais escuros significam vegetações doentes ou mais velhas (Florenzano, 2011).



Figura 2.28 – Fotografia falsa-cor (composição colorida RGB543 – Landsat 8).

Os produtos gerados pelo mapeamento aerofotogramétrico consistem em dados ou modelos 2D e 3D. As nuvens de pontos e os modelos digitais de elevação e de terreno são resultados possíveis em ambiente 3D, enquanto as ortofotos e os ortomosaicos são resultados 2D (DronEng, c2014b; Herreros, 2015).

- Nuvem de pontos: nuvem com coordenadas georreferenciadas utilizada para geração de dados topográficos e estudos de movimentação de terra, por exemplo.
- MDE (Modelo Digital de Elevação) ou MDS (Modelo Digital de Superfície): produto utilizado para estudos do relevo, possibilitando analisar dados planimétricos e altimétricos. Levam em consideração, além do relevo natural dos terrenos, a representação planialtimétrica de objetos naturais e artificiais (vegetação e edificações).
- MDT (Modelo Digital de Terreno): também utilizado para estudos de relevo. Diferentemente do MDE/MDS, o MDT não representa os objetos acima do solo como edificações e árvores, portanto representa o relevo natural dos terrenos.
- Ortofoto: produto aerofotogramétrico resultante da transformação de uma foto original (tomada) em uma fotografia onde os deslocamentos decorrentes do relevo e da inclinação da foto são eliminados.
- Ortofotomosaico: resultado do processo de aerotriangulação e mosaico das ortofotos.

Os ortofotomosaicos, por sua vez, podem ser classificados em real ou verdadeiro e clássico ou convencional (Figura 2.29):

- No ortofotomosaico real ou verdadeiro os objetos acima do nível do terreno estarão em vista ortogonal, tamanhos em verdadeira grandeza e sem ocultação de outros objetos independente do ângulo de visão do centro de projeção: decorrem de projeções cilíndricas ou ortogonais – Figura 2.29 (a).
- No ortofotomosaico clássico ou convencional os objetos acima do nível do terreno poderão ter vista perspectiva, variação de tamanho e ocultação de outros objetos, a depender do ângulo de visão do centro da projeção, ou seja, os objetos são representados inclinados: decorrem de projeções cônicas ou perspectivas – Figura 2.29 (b).



Figura 2.29 – Ortofotomosaico real (a) e clássico (b).

Outros sensores além dos imageadores (câmeras analógicas e digitais) também são embarcados nas aeronaves com finalidades de aerolevanteamento. Destacam-se os multiespectrais, hiperespectrais, câmera termográfica FLIR (*Forward Looking Infra-Red*), LIDAR (da sigla *Light Detection And Ranging*) e RADAR.

Usando o LIDAR, tecnologia de perfilamento a Laser aerotransportado, por exemplo, é possível a elaboração de modelos digitais de terreno (MDT) e de superfície (MDS) em escalas cartográficas mais detalhadas.

2.2. AERONAVES REMOTAMENTE PILOTADAS

Segundo Munaretto (2017), na presente década estão em constante desenvolvimento e divulgação as denominadas *Remotely Piloted Aircraft* (RPA) traduzidas no Brasil como Aeronaves Remotamente Pilotadas, comercialmente e popularmente conhecidas como drones. Existem outras denominações válidas e igualmente utilizadas tais como *Unmanned Aircraft Systems* (UAS) ou *Unmanned Air Vehicles* (UAV) traduzido para o português como Veículos Aéreos não Tripulados (VANT).

Assim como em várias tecnologias desenvolvidas pelo homem, os drones ou RPA tiveram sua origem na área militar. A denominação drone, conhecida mundialmente, vem da associação do barulho produzido por zangões, do inglês *drone*, com o dos motores quando estão em funcionamento.

Entretanto, a utilização de RPA teve início em 1917 com o Engenheiro inglês Archibald Low (1888-1956) que demonstrou a possibilidade de controlar uma aeronave guiada por rádio. Na sequência os diversos problemas apresentados levaram a Força Aérea Britânica perder o interesse no tema e, posteriormente, em 1960, os Estados Unidos da América (EUA) utilizaram drones controlados por rádio para executar missões de reconhecimento militar captando imagens aéreas (Herreros, 2015). Segundo Munaretto (2017), no Brasil, a utilização e desenvolvimento de RPAs iniciou em 1982 com um projeto da extinta Companhia Brasileira de Tratores (CBT) para a construção de um drone à jato denominado BQM-1BR.

Em termos gerais os drones se popularizaram bastante, com diversos modelos dos mais variados preços e usos, desde recreação até execução de missões de reconhecimento civil e militar controladas por GNSS e essa popularização reforça a necessidade de regulamentação e normatização de uso.

Segundo Amorim *et al.* (2012) e Munaretto (2017) existem RPAs com autonomies e capacidades de carga diferenciadas, com mecanismos de propulsão elétricos ou a partir de combustíveis líquidos, do tipo asa rotativa (helicópteros ou multirotores) ou do tipo asa fixa como os aviões convencionais. Ambos podem ser operados por controle remoto ou executar missões de voo programadas previamente.

As formas de classificação das aeronaves são várias, entretanto é comum encontrarmos segundo a forma de sustentação dos veículos aéreos: asa fixa (Figura 2.30) ou asa rotativa, também denominados de multirotores (Figura 2.31).



Figura 2.30 - RPA Asa fixa (Projeto μ VANT-UnB).



Figura 2.31 - RPA Asa rotativa (Projeto μ VANT-UnB).

Os modos de operação, por sua vez, são divididos em modo manual, modo assistido, modo automático e modo autônomo.

Quanto aos componentes dos RPAs, toda aeronave tem no mínimo 4 (quatro) itens essenciais: a plataforma, o sistema de comunicação, a carga útil (*payload*) e a estação de controle ou pilotagem (DECEA, 2016; Munaretto, 2017).

- A plataforma é o RPA propriamente dito incluindo os sistemas e demais sensores necessários para o voo;
- O sistema de comunicação ou enlace de pilotagem refere-se ao enlace entre o RPA e a Estação de Pilotagem Remota para a condução do voo que pode ser através de linha de visada ou rádio e satélites, por exemplo;
- A carga útil é o sensor embarcado no RPA com o objetivo de cumprir a missão programada. Na prática são as câmeras ou sensores que podem armazenar os dados para serem coletados após o pouso ou transmiti-los para a Estação de Pilotagem Remota, inclusive em tempo real através de enlaces de carga útil, e;

- A estação de controle, definida por DECEA (2016) como Estação de Pilotagem Remota (RPS) é o componente que contém os equipamentos necessários à pilotagem da RPA fornecendo ao piloto condições ideais para monitorar e controlar a aeronave.

Quanto ao funcionamento, a controladora de voo é o componente principal de um drone, responsável por processar os sinais de entrada e gerar saídas para as interfaces. As controladoras são dotadas de um conjunto de sensores responsáveis pela orientação espacial, o giroscópio, o magnetômetro e o acelerômetro, que formam a *Inertial Measurement Unit* (IMU), responsável pela estabilização da aeronave em voo. Todos os demais componentes embarcados em um RPA são periféricos conectados a estas controladoras, a exemplo dos motores, dos controladores de velocidade, do sistema de rádio para comandos e telemetria de voo, sistema de navegação por satélite, servos eletromecânicos, sensores diversos, entre outros.

Segundo Munaretto (2017), o sistema completo - Sistema de Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPAS), por sua vez, é composto pela RPA (segmento de voo); a estação de pilotagem RPS e os meios de lançamento e recuperação da aeronave (segmento de solo) e os enlaces de pilotagem e das câmeras ou sensores embarcados (segmento de comunicações).

Um dos limitantes da tecnologia dos drones ainda é a bateria, ela está diretamente ligada à autonomia de voo. Por ser um limitante, esta tecnologia de baterias evolui constantemente tornando-se, cada vez menores, mais leves e com maior capacidade de armazenamento de energia (Smith, 2016).

A escolha do tipo de sensor que será embarcado do RPA depende de alguns fatores tais como o objetivo do trabalho, a precisão esperada, os custos e a capacidade de carga útil da aeronave (Munaretto, 2017; Jensen, 2009; Smith, 2016).

Recentemente a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) aprovou o regulamento para uso de aeronaves RPA - Regulamento Brasileiro de Aviação Civil Especial - RBAC - E nº 94, publicado no Diário Oficial da União em maio de 2017. O documento diferencia e define como aeromodelo, toda aeronave não tripulada com finalidade recreativa e RPA como aeronave não tripulada pilotada a partir de uma estação de pilotagem remota com finalidade diversa da recreação, tais como comercial, corporativa e experimental (ANAC, 2017).

Entre os destaques, de agora em diante há a exigência de habilitação para pilotos de equipamentos com mais de 25 kg e fica proibido pilotar RPA sobre pessoas, salvo se houver autorização por parte delas. Caso contrário, apenas estão autorizados os voos a uma distância mínima de 30 m das pessoas. Importante também observar que as aeronaves autônomas, aquelas

onde o piloto remoto não é capaz de intervir durante o voo, continuam proibidas no Brasil de acordo com a legislação recente.

Os RPA foram categorizados em três classes, de acordo com o peso máximo de decolagem do equipamento: Classe 1 (acima de 150 kg), Classe 2 (acima de 25 kg e abaixo ou igual a 150 kg), Classe 3 (abaixo ou igual a 25 kg). As aeronaves menores e mais leves, com até 250 g, não precisam ser cadastradas ou registradas, independentemente de sua finalidade, para uso recreativo ou não.

2.2.1. APLICAÇÕES E POTENCIALIDADES

Atualmente, além dos usos militares de controle, fiscalização e capacidade bélica, os RPAs oferecem várias possibilidades de aplicação nos diversos setores da engenharia. Uma breve pesquisa demonstra que os usos desses veículos aéreos já são realidade nas inspeções de infraestruturas, investigações atmosféricas, levantamentos topográficos, suporte na agricultura de precisão, filmagem e fotografia, fiscalização de atividades predatórias, controle ambiental, mapeamento de erosões, gestão de riscos e desastres naturais, exploração mineral e geológica, suporte ao planejamento urbano e territorial, aplicações cartográficas, aplicações hidrológicas, combate ao incêndio, gestão de patrimônio, controle de fronteiras, ações de resgate, vigilância e controle, entre outros (Cunha, 2016; Herreros, 2015; Silva, 2018).

Dessa forma, os benefícios dessa tecnologia abrangem as áreas de Engenharia Cartográfica e de Agrimensura, Engenharia Civil, Engenharia de Transportes, Engenharia de Minas, Engenharia Ambiental, Engenharia Florestal, Engenharia Agrícola, Agronomia, Geografia, Arquitetura e Urbanismo e outras mais.

Observa-se que as possibilidades de uso abrangem desde atividades mais simples como filmagens aéreas e fotografias tomadas de ângulos menos usuais utilizadas em campanhas publicitárias até questões de maior complexidade nos diversos ramos das engenharias utilizando o apoio das geotecnologias. Exemplo disso são os aerolevantamentos de áreas urbanas que, se comparados ao método tradicional com aeronaves tripuladas, mostram-se mais eficazes pois entregam resultados satisfatórios em menor tempo e com boa qualidade espacial. Dependendo da escala desejada, é possível a aquisição de pontos de controle e checagem em campo visando ampliar a precisão gráfica dos produtos cartográficos.

Jensen (2009) também ressalta as características dos drones em relação ao uso para planejamento urbano e cita que os modelos recentes são equipados com sistemas de posicionamento e navegação por satélite (*Global Navigation Satellite Systems - GNSS*) e

podem carregar uma carga útil variada desde câmeras digitais comuns, câmeras infravermelho termais e sensores hiperspectrais.

De acordo com o nível de altitude na obtenção das imagens, as características de tamanho da área observada, resolução e escala variam. Nesse contexto, as imagens obtidas com RPA apresentam alta resolução espacial quando comparadas com imagens obtidas por aeronaves tripuladas.

A utilização de drones para a agricultura cresce a cada dia e os resultados alcançados ampliaram a oferta de serviços e desenvolvimento de aeronaves destinadas ao agronegócio. Atividades como o manejo de culturas agrícolas, mapeamento de áreas para aplicação de defensivos ou adubagem, análise da plantação, demarcação do plantio, monitoramento e combate a incêndios, entre outras; são facilitadas com a ajuda dos drones e de *softwares* específicos.

Da mesma forma, na área ambiental, a utilização de drones amplia a capacidade de trabalho para diversas análises do meio ambiente quando comparado a outras tecnologias. Dentre as aplicações destacam-se: monitoramento de áreas degradadas, mapeamento e monitoramento de erosões, observação e mapeamento de áreas costeiras, análises meteorológicas, entre outras.

O setor de Mineração também utiliza os dados obtidos com drones juntamente com tecnologias de sensores LIDAR e posicionamento RTK (*Real Time Kinematic*) para otimizar o cálculo de volume em pilhas de minério e o monitoramento de barragens de rejeitos, por exemplo.

Por outro lado, a fotogrametria com RPA é uma das aplicações mais difundidas na área das engenharias, a possibilidade de realização de levantamentos topográficos e mapeamentos aéreos com drones promoveu uma revolução tecnológica que, de certa forma, popularizou a topografia com a diminuição dos custos, da logística e facilidade na operação.

Uma publicação da DronEng – Drones & Engenharia analisa a qualidade dos produtos gerados a partir das imagens obtidas por sensores embarcados (câmeras) nos drones *Phantom 4 Advanced* (multirotor) e *Batmap I* (asa fixa). Aborda também a produtividade nas etapas de um projeto de mapeamento aéreo urbano executado por cada aeronave e verifica se os produtos atendem às necessidades do mercado de gestão pública. A área de estudo de 24 ha, localizada na cidade de Presidente Prudente - SP., foi escolhida por apresentar características de uma área urbana, com prédios, casas, ruas asphaltadas e arborização (DronEng, c2014b).

Quanto aos equipamentos utilizados, destacam-se os drones supracitados e os computadores Notebook core i3, 4 GB de memória RAM, 1 TB de armazenamento e um

modelo Desktop core i7, 32GB de memória RAM, placa gráfica (GPU) NVIDIA 1080 com memória de 11 GB e SSD de 480 GB de armazenamento.

Em relação aos *softwares* utilizados pela equipe da DronEng, têm-se o *Google Earth Pro* para análise do terreno e planejamento dos pontos de apoio, o *Drone Deploy* e o *Mission Planner* para o planejamento e execução dos voos, *Topcon Tools* para Processamento dos dados GNSS, PC-CDU para configuração dos receptores GNSS e *Agisoft Photoscan* para o processamento dos dados obtidos no aerolevanteamento.

O *software Agisoft PhotoScan* é uma solução de modelagem 3D baseada em imagens, criando conteúdo a partir de imagens fixas. Baseado na tecnologia de reconstrução 3D *multi-view*, possibilita que as fotos sejam tiradas de qualquer posição, desde que o objeto a ser reconstruído seja visível em pelo menos duas fotos. O alinhamento das imagens e a reconstrução do modelo 3D são totalmente automatizados (Agisoft, 2018).

A metodologia adotada pela equipe executora compreende as fases de planejamento, definição e coleta dos pontos de apoio, planejamento e execução dos voos, processamento dos dados coletados e avaliação dos resultados.

Na fase de Planejamento, inicia-se pela definição do GSD (*Ground Sample Distance*) levando em consideração o objetivo do aerolevanteamento, no caso relatado o GSD foi definido com 7,5cm.

Com base em Grahan & Koh (2002) considera-se que as precisões de escala de mapeamento em planimetria (coordenadas x,y) e altimetria (coordenada z) são respectivamente, 2 e 3 vezes o valor do GSD das imagens.

A equipe executora utilizou, na prática, valores entre 1 a 1,5 vezes na planimetria e 2 a 3 vezes na altimetria. Dessa forma, com base nisso, estimou-se para a planimetria entre 11,25 a 15 cm e para a altimetria entre 15 a 22,5 cm de precisão.

Quanto aos pontos de apoio, utilizou-se 15 pontos de controle e 7 pontos de verificação e, considerando o tempo de deslocamento, pintura dos alvos e rastreamento dos pontos com GPS, o tempo total dessa fase foi de 6h30 minutos, conforme relatado.

Em relação ao planejamento dos voos, para o drone multirrotor *Phantom 4* (Figura 2.32):

- Quantidade de voos: 1;
- Área sobrevoada: 50 ha;
- Tempo de voo: 11 min.;
- Quantidade de imagens: 74.

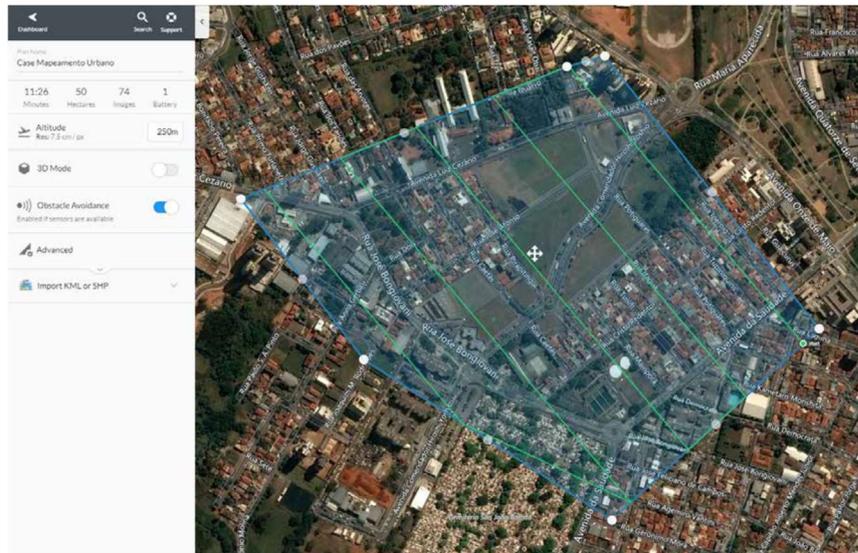


Figura 2.32 - Planejamento de voo do drone multirotor (DronEng, c2014b).

Para o drone asa fixa *Batmap I* (Figura 2.33):

- Quantidade de voos: 1;
- Área sobrevoada: 52 ha;
- Tempo de voo: 8 min.
- Quantidade de imagens: 54.



Figura 2.33 - Planejamento de voo do drone asa fixa (DronEng, c2014b).

Importante observar que devido à área ser relativamente pequena, apenas um voo foi executado com cada drone, resultando em economia de bateria e tempo em campo. Em relação às vantagens e desvantagens dos drones, a equipe executora relata que o *Phantom*, por ser multirotor, possui a vantagem de decolar e pousar na vertical e a desvantagem é sua autonomia máxima de aproximadamente 15 minutos.

Em relação ao modelo de asa fixa *Batmap I*, como desvantagens a equipe cita que o drone exige habilidade de pilotagem para pouso e local aberto para decolagem e pouso, e como vantagens a autonomia, pois voa no mínimo 1h30, e a qualidade do sensor embarcado.

A fase de processamento fotogramétrico foi feita no *software Agisoft PhotoScan* para ambos casos e com os mesmos parâmetros para fins de comparação. O processamento dos dados obtidos pelo *Phantom* durou 1h50 min, enquanto do *Batmap* durou um pouco menos, totalizando 1h13 min.

Na avaliação dos resultados obtidos, com base na qualidade posicional das coordenadas resultantes do processamento fotogramétrico, a equipe executora relata, em resumo, que em relação à planimetria (x,y) estimada na fase de planejamento (15 cm), o modelo *Phantom 4* executou 3,67 cm e o modelo *Batmap I* executou 2,37 cm de valores médios. Para os resultados de altimetria (z), o estimado foi de 22,5cm e os valores executados foram 3,44 cm para o *Phantom 4* e 6,14 cm para o *Batmap I* (DronEng, c2014b).

Por fim, com base nos resultados obtidos, a equipe da DronEng faz uma estimativa do mapeamento para toda a cidade de Presidente Prudente, com tamanho aproximado de 9000 ha. (Tabela 2.3):

Tabela 2.3 – Estimativa de produtividade com RPAs asa fixa e asa rotatória (modificado de DronEng, c2014b).

	<i>Phantom 4</i>	<i>Batmap I</i>
Quantidade de voos	140	20
Quantidade de pontos de controle	360	360
Dias de campo	28	7
Quantidade de fotos	21.500	13.200
Tempo de processamento	268 h	182 h

Concluindo, com base na produtividade alcançada, o modelo *Batmap I* obteve um maior rendimento em relação ao *Phantom 4* devido às suas características técnicas. O tempo de processamento está relacionado com a quantidade de fotos obtidas e a quantidade de voos está relacionada com a autonomia das aeronaves, assim como os dias de campo. Por outro lado, observa-se que o modelo multirrotor possui a vantagem de decolar e pousar na vertical, o que facilita encontrar um local adequado para pouso e decolagem.

Durante a escrita desta tese realizou-se um aerolevanteamento com RPA asa-fixa como parte das atividades desenvolvidas em conjunto com outros professores e pesquisadores do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília (ENC/UnB).

Trata-se de um aerolevanteamento realizado no município de Luziânia-GO, na microbacia do Ribeirão Sarandi - Usina Hidrelétrica Corumbá IV (Almeida *et al.*, 2017).

Foram previstos 7 (sete) voos, conforme os planos de voo apresentados na Figura 2.34 e realizados 8 (oito) voos, pois o voo n.6 precisou ser executado em duas etapas (6.1 e 6.2), em função da duração da bateria da aeronave e condições de vento no momento.

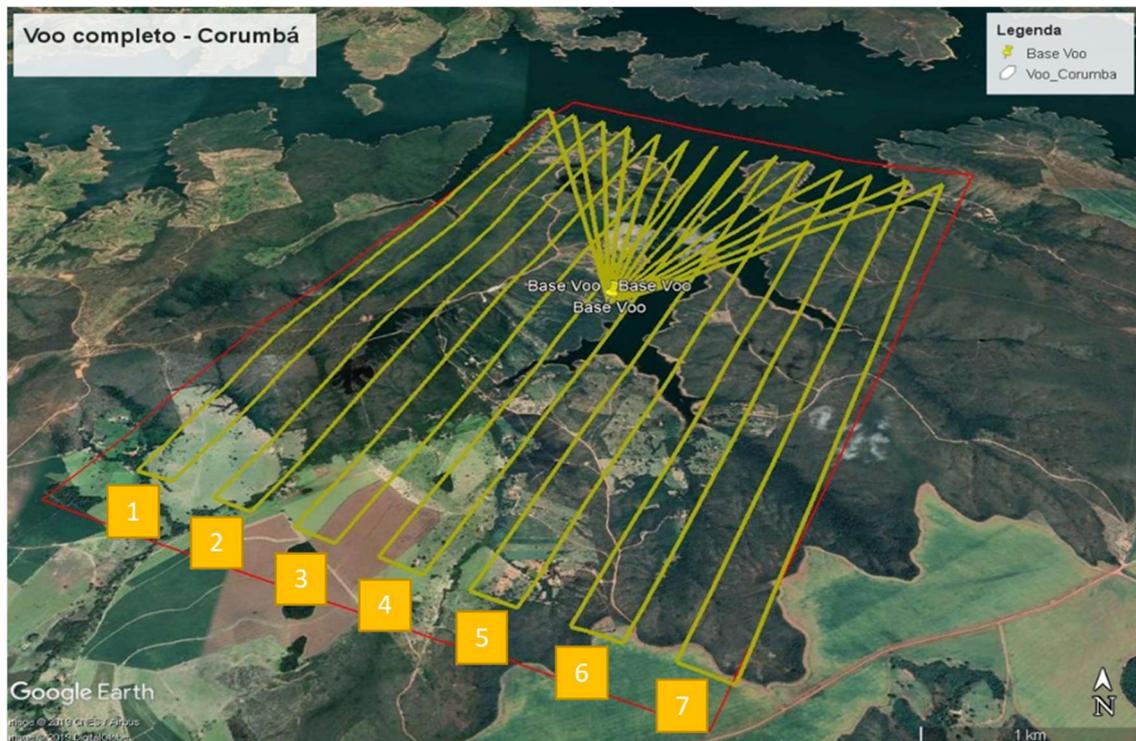


Figura 2.34 - Planos de voo 1 a 7 – voo completo (modificado de Google Earth Pro).

O aerolevanteamento totalizou cerca de 2600 fotos, o primeiro voo foi iniciado às 8h e o último voo às 14h, no dia 30 de setembro de 2016. Utilizou-se um RPA de asa-fixa pertencente ao Projeto μ VANT-UnB (Figura 2.35).



Figura 2.35 – Modelo de RPA utilizado no aerolevanteamento.

A metodologia do aerolevanteamento seguiu o apresentado no item 4.2 – Metodologia aplicada, Figura 4.5 - Fluxograma do aerolevanteamento com RPA., conforme resumido a seguir:

- Planejamento do voo;
- Elaboração dos planos de voo;
- *Checklist* em solo (verificar a aeronave e carregar os dados do plano de voo);
- Decolagem, execução do plano de voo e pouso;
- Descarregar os dados obtidos;
- Avaliação dos dados obtidos, e;
- Processamento e avaliação dos resultados alcançados.

As fases de checklist em solo; decolagem, execução do voo e pouso; descarregar e avaliar os dados obtidos durante o voo foram realizadas em campo, conforme Figura 2.36.

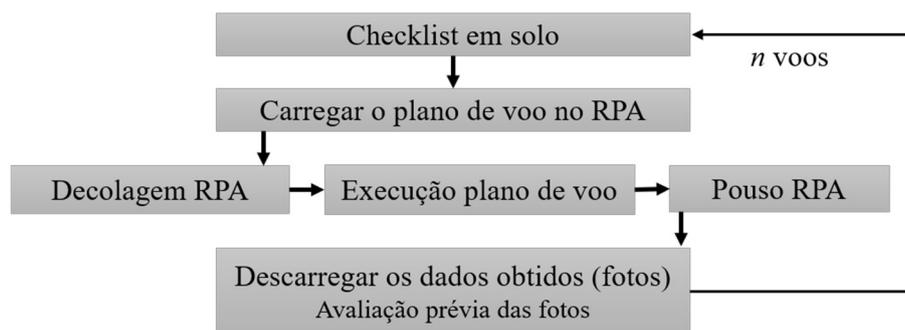


Figura 2.36 - Fluxograma das fases realizadas em campo.

Parâmetros utilizados na aerofotogrametria:

- Máquina fotográfica Canon modelo PowerShot S100 (5.2mm).
- Altura do voo: 400 m.
- Exposição velocidade: 1/1600 s.
- Abertura: f/4.5.
- ISO 200 (voos 1,2,3 e 5) e ISO 100 (demais voos).

Em resumo, a Tabela 2.4 apresenta dados do aerolevanteamento que teve duração de 05h50 minutos e foram obtidas 2568 fotografias para a cobertura de uma área de 18 km². Os dados detalhados de cada sobrevoo encontram-se no Apêndice A – Dados do Aerolevanteamento com RPA.

Tabela 2.4 - Resumo do aerolevanteamento executado: Luziânia-GO.

Horário de início	08h20
Horário de término	14h10
Duração do levantamento	05h50
Total de fotos	2568
Rendimento fotos/min	7,33
Média de duração por voo	00h43
Área sobrevoada	18 km ²
Rendimento fotos/km2	142,66

Observa-se que cada plano de voo foi executado com duração média de 00h43min e foram necessárias cerca de 142 fotos por km² de área sobrevoada. As fases de processamento dos dados seguiram conforme descrito no item 4.2.3.4 – Processamento dos dados obtidos.

Como resultados do processamento no *software Agisoft Photoscan* obtiveram-se um MDT e uma ortofoto da área (Figura 2.37).

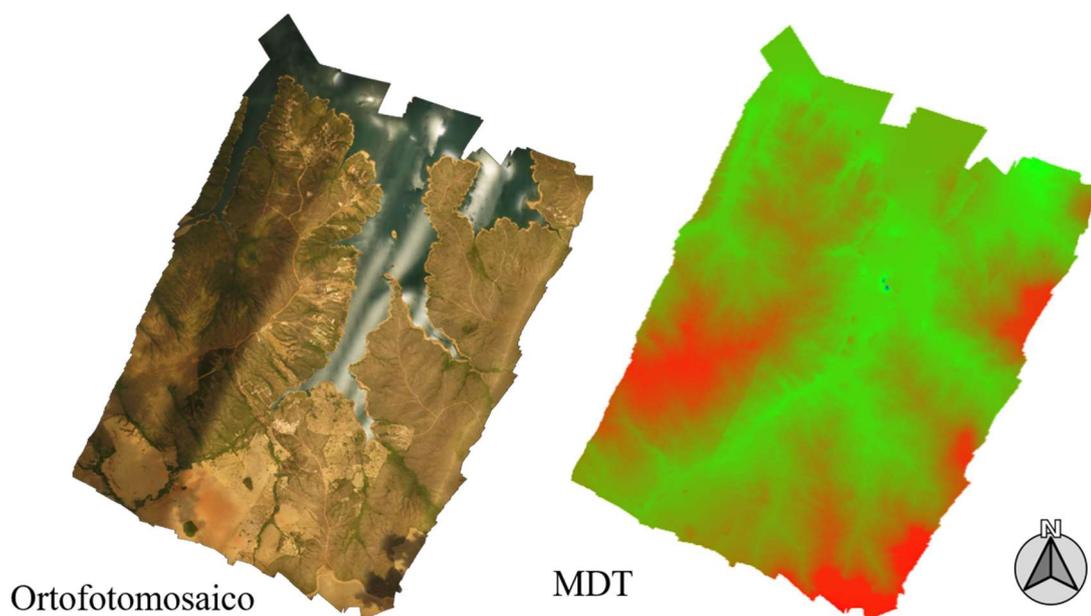


Figura 2.37 – Resultados após processamento dos dados obtidos no aerolevanteamento.

As possibilidades de produtos resultantes dos aerolevanteamentos após o processamento fotogramétrico são inúmeras, conforme mencionado no subitem 2.1.3 – Fotogrametria e Aerolevanteamento. Destacam-se as nuvens de pontos com coordenadas georreferenciadas, os modelos digitais de superfície (MDS), os modelos digitais de terreno (MDT), curvas de nível, perfis, ortofotos e mosaico de ortofotos (Jensen, 2009; Herreros, 2015).

2.3. CARTOGRAFIA

Historicamente, antes mesmo da invenção da escrita, o homem criou um meio de registrar sua localização e representar os caminhos por onde passou em busca de comida e condições ideais de vida. Essas representações feitas em pinturas rupestres nas cavernas são consideradas os primórdios da cartografia e, dentre tantas, pode-se citar o conjunto de pinturas encontradas na região do Rio Pó, no Norte da Itália, destacando-se o Mapa de Bedolina (Figura 2.38) que representa uma aldeia e sua organização incluindo detalhes das atividades desenvolvidas pelos Camônios por volta de 2.400 a.C. (Oliveira, 1993; Anderson, 1982; Carvalho & Araújo, 2008; Martinelli, 2014).

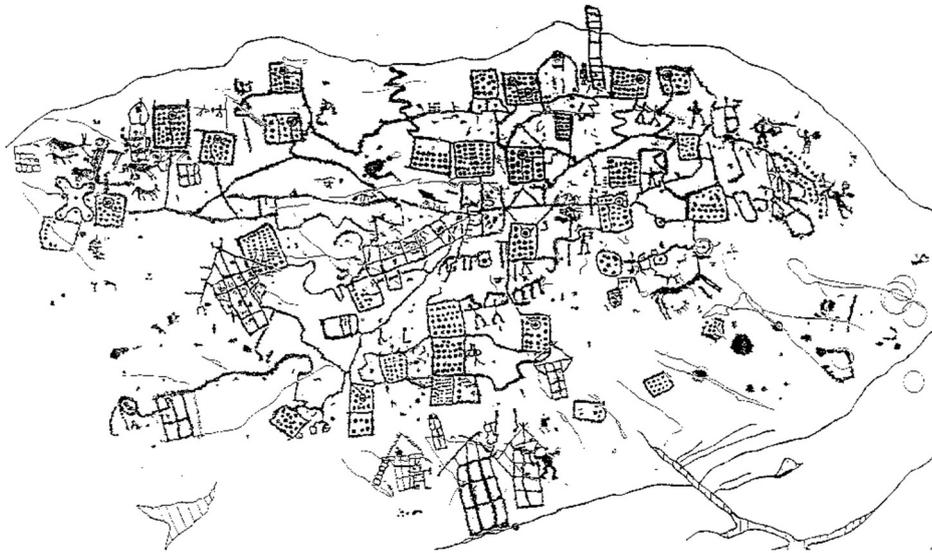


Figura 2.38 - Mapa de Bedolina (disponível em 4.bp.blogspot.com).

Da mesma forma, o homem desenvolveu outras técnicas e produziu mapas em diversos materiais tais como placas de barro, madeira, pergaminho e atualmente no meio digital. Um dos mapas mais antigos que se tem conhecimento data de 2.500 a.C. (Figura 2.39), feito em argila cozida retrata uma região de vale da cidade de Ga-Sur, ao norte da Babilônia (Carvalho & Araújo, 2008).

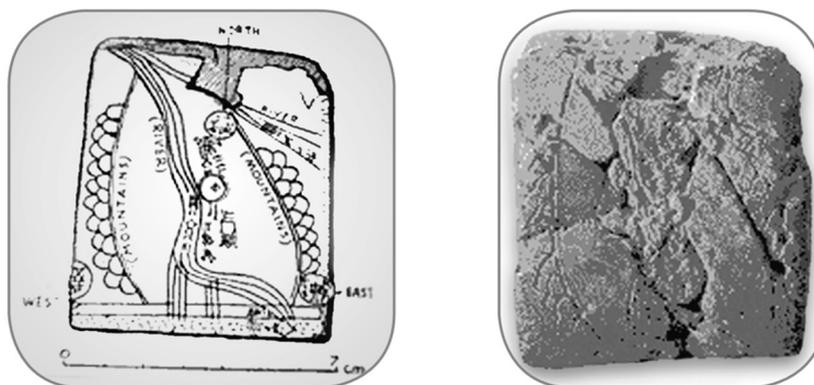


Figura 2.39 – Mapa de Ga-Sur (modificado de Carvalho & Araújo, 2008).

A habilidade de fazer mapas, portanto, acompanha a civilização desde a antiguidade e o comércio entre os povos de diferentes localidades contribuiu para o desenvolvimento do que atualmente denominamos Cartografia. Observa-se, também, a contribuição dada pelos períodos de guerra e busca por novos territórios (Martinelli, 2014; Anderson, 1982; Carvalho & Araújo, 2008).

Na Antiguidade Clássica, os gregos contribuíram bastante para o desenvolvimento da cartografia. Diversos pensadores destacaram-se na época: Hiparco de Nicéia (190 - 120 a.C.), astrônomo, cartógrafo e matemático grego lançou os primeiros fundamentos da ciência cartográfica ao utilizar métodos astronômicos para determinar posições na superfície da Terra (Anderson, 1982). Segundo Colaço & Bauab (2016), Hiparco elaborou o primeiro catálogo de estrelas com cerca de 850 estrelas, calculou a distância entre a Terra e a Lua com margem de erro baixa, determinou a duração do ano terrestre com 365 dias, descobriu a precessão dos equinócios e é considerado o pai da Trigonometria.

Outro importante sábio grego foi Eratóstenes de Cirene (276 - 194 a.C.), bibliotecário da famosa Biblioteca de Alexandria. Ele foi responsável pelo cálculo da circunferência da Terra, com relativa precisão, especialmente para a época, considerando-se que o erro cometido foi de aproximadamente 10% (Carvalho & Araújo, 2008; Fitz, 2008a).

Para efetuar o cálculo Eratóstenes utilizou como referência a posição do Sol e a distância entre as cidades de Alexandria e Siena (5.000 estádios ou *stadium* que equivalem a aproximadamente 925 km), chegando ao valor de 46.250 km, muito próximo do valor correto de 41.700 km (Figura 2.40).

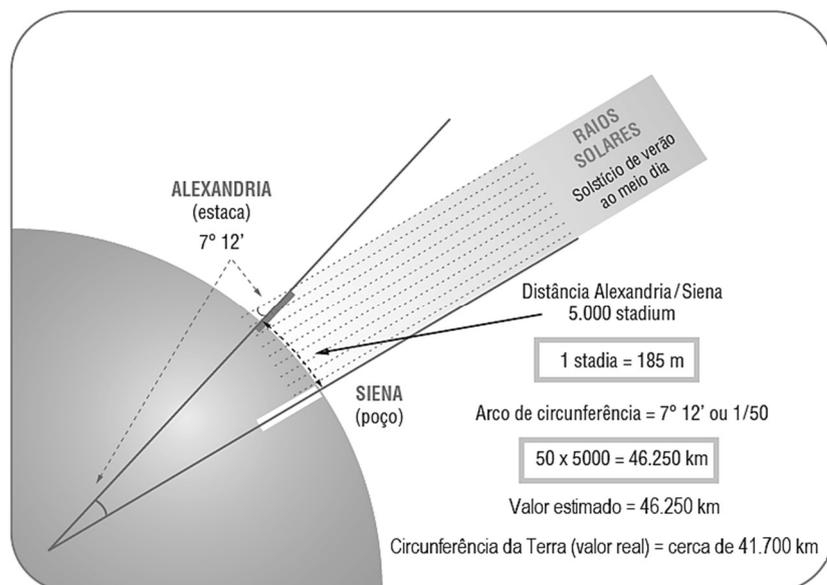


Figura 2.40 – Diagrama do método utilizado por Eratóstenes (modificado de Carvalho & Araújo, 2008).

O conhecimento geográfico e cartográfico da Grécia Antiga está registrado na obra “Geografia” do astrônomo, geógrafo e cartógrafo grego Cláudio Ptolomeu de Alexandria (90-168 d.C.). A obra, escrita em oito volumes, aborda os princípios da Cartografia Matemática, das projeções e os métodos de observação astronômica (Anderson, 1982).

O termo ou palavra cartografia tem sua origem na língua portuguesa, registrada pela primeira vez em 1839 numa carta escrita pelo historiador português Manuel Francisco Carvalhosa ao historiador brasileiro Francisco Adolfo de Varnhagen, expressando a noção de um traçado de mapas (IBGE, 1999).

Atualmente, em termos gerais e conforme estabelecido pela Associação Cartográfica Internacional (ACI) em 1966, entende-se a Cartografia como o conjunto de estudos e operações científicas, artísticas e técnicas, baseados nos resultados de observações diretas ou de análise de documentação, com vistas à elaboração e preparação de mapas, cartas, projetos e outras formas de expressão, assim como a sua utilização (IBGE, 1999).

De acordo com IBGE (1999), mapa é a representação plana dos aspectos geográficos, naturais, culturais e artificiais, delimitada por elementos físicos e político-administrativos, normalmente em escala pequena e destinada a fins temáticos, culturais ou até mesmo ilustrativos. Carta, por sua vez, é a representação plana dos aspectos artificiais e naturais de uma área, subdividida em folhas articuladas de maneira sistemática, em escala média ou grande e destinada à avaliação de pormenores (detalhes) com grau de precisão compatível com a escala. Por fim, planta é um caso específico de carta, de uma área menor e em escala grande, com maior número de detalhes.

Anderson (1982) observa que a descoberta e posterior aprimoramento da bússola no século XV permitiu a navegação precisa e mais segura, intensificando o comércio e os descobrimentos durante a Era dos Descobrimentos ou das Grandes Navegações; dessa forma, segundo o autor, a bússola foi um marco na revolução cartográfica. Outro marco importante foi a invenção da prensa ou máquina de impressão tipográfica por Johann Gutenberg no século XV.

Atualmente, dois itens merecem destaque na inovação cartográfica: o uso da aerofotogrametria, que se aprimorou após a invenção do avião e o Sistema de Navegação Global por Satélite (*Global Navigation Satellite System* - GNSS), presente nos aparelhos de telefone celular, possibilitando a navegação e a determinação da posição geográfica através de coordenadas. São exemplos de GNSS o sistema americano GPS, o sistema russo GLONASS, o europeu GALILEO e o chinês BEIDOU.

2.3.1. CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA

Santos (2014) observa que a cartografia geotécnica exige uma abordagem multidisciplinar, pois é um tema amplo que envolve diversas áreas do conhecimento. Matula (1979), Zuquette & Gandolfi (2004), Prandini *et al.* (1995), Diniz & Freitas (2013, citados por Bressani & Costa, 2015) ressaltam que o mapeamento geotécnico tem sido uma importante ferramenta na gestão e fiscalização da ocupação territorial, permitindo minimizar os impactos decorrentes da interação homem e meio ambiente. Culshaw & Price (2013) abordam a contribuição da geologia urbana ao desenvolvimento, recuperação e conservação de cidades.

Zuquette & Gandolfi (2004) tratam da origem e conceitos da cartografia geotécnica. Para os autores, é após o desenvolvimento da cartografia digital que a cartografia geotécnica ganha impulso como um dos instrumentos para planejamento e gestão, constituindo uma representação gráfica das limitações e potencialidades do meio físico.

Ainda segundo Zuquette & Gandolfi (2004), em 1883 o “*British Geological Survey*” definiu orientações para a elaboração de mapas geológicos e que, a partir de 1900, existem registros de mapas que retratavam informações necessárias à implantação de obras civis e estruturais. Para Zuquette & Nakazawa (1998), no Brasil, a cartografia geotécnica começou a ser praticada na década de 1970 e consolidou-se na década de 1980 após o desenvolvimento de metodologias por universidades e instituições de pesquisa.

De acordo com Zuquette (1987) a cartografia geotécnica é um processo que tem por finalidade básica levantar, avaliar e analisar as características que compõem o meio físico. As informações são manipuladas por diversos processos e interpretadas de forma que possam ser representadas em mapas, cartas e anexos descritivos utilizados para fins de engenharia, planejamento urbano, entre outros. A diversidade de aplicação das cartas geotécnicas trata de termos como suscetibilidade, risco, aptidão e vulnerabilidade que são analisados em diversas escalas de mapeamento.

Cerri (1990), Cerri *et al.* (1996) e Santos (2014) afirmam que a cartografia geotécnica é a representação das características do meio físico natural, englobando a distribuição espacial dos diferentes tipos de solos e rochas, das formas de relevo, da dinâmica dos processos atuantes e eventuais alterações decorrentes da implantação de obras de engenharia e das diferentes formas de uso e ocupação do solo.

Varnes (1974) e Zuquette & Gandolfi (2004) definem que para a elaboração dos mapas e cartas geotécnicas são necessárias operações básicas de adição, seleção, generalização e transformação dos dados da litologia, dos solos e rochas, da hidrogeologia, geomorfologia e dos processos geológicos.

Para Zuquette & Nakazawa (1998) e Bressani & Costa (2015) o produto da cartografia geotécnica é a carta geotécnica composta por um conjunto cartográfico (cartas e respectivos quadros legendas) e um relatório descritivo. As cartas geotécnicas visam, sobretudo, subsidiar as ações de planejamento e gestão de uso do solo de forma a adequar as diversas formas de ocupação humana no território.

Zuquette & Gandolfi (2004) classificam os documentos cartográficos quanto ao conteúdo (mapas fundamentais ou cartas interpretativas e derivadas) e à finalidade (cartas para uso múltiplo ou cartas para uso específico). Mapas fundamentais servem para o registro de informações sobre os diversos componentes do meio físico, enquanto as cartas são elaboradas a partir de atributos que estão registrados nos mapas fundamentais. Um exemplo de uso específico são as cartas para planejamento urbano e territorial cujos destaques são a localização de vias de acesso, disposição de resíduos domésticos e industriais, abastecimento de água, drenagem superficial, adequação entre edificações e topografia, controle de erosão, construção e aterros, proteção das áreas de recarga dos aquíferos, avaliação de locais adequados à extração de materiais de construção, entre outros.

Em relação às diretrizes para avaliação da suscetibilidade a deslizamentos, ameaça e zoneamento de risco para o planejamento do uso do solo, Fell *et al.* (2008a), tratam das definições e terminologias que devem ser adotadas internacionalmente. Dessa forma, destacam-se as seguintes definições:

- Deslizamento: trata-se do movimento de uma massa de rocha, detritos ou solo (terra) descendo uma encosta.
- Suscetibilidade ao deslizamento: refere-se à avaliação quantitativa ou qualitativa da classificação, volume, área e distribuição espacial de deslizamentos que existem ou que possam ocorrer em uma determinada área.
- Ameaça: em resumo, trata-se de uma condição com potencial para causar uma consequência indesejável e a probabilidade de sua ocorrência dentro de um determinado intervalo de tempo.
- Elementos em risco: população, edifícios, obras de engenharia e outras infraestruturas, atividades econômicas, serviços de utilidade pública que estejam localizados em áreas potencialmente afetadas pela ameaça dos deslizamentos.
- Vulnerabilidade: grau de perda para um determinado elemento ou conjunto de elementos dentro da área afetada pelo deslizamento. É indicada em uma escala que varia de 0 (sem nenhuma perda) a 1 (perda total).

- Risco: refere-se à probabilidade de um evento adverso à vida (saúde), à propriedade ou ao meio ambiente ocorrer. É estimado pelo produto entre a probabilidade da ocorrência do evento e as consequências ou danos provocados pelo evento. As consequências, por sua vez, são produto da vulnerabilidade e do valor total dos elementos em risco.
- Zoneamento: divisão da terra em áreas homogêneas e sua classificação de acordo com os graus de susceptibilidade, ameaça ou risco decorrente de deslizamento atual ou potencial.

Para Fell *et al.* (2008b), os inventários de deslizamento são realizados com base nas consequências observadas na natureza, entretanto também podem ser feitos com algum grau de interpretação, baseados em atributos geomorfológicos identificados em fotografias aéreas ou mapeado em campo. Quanto ao zoneamento de suscetibilidade, os autores citam que envolve a distribuição espacial e a classificação das unidades de terreno de acordo com sua capacidade para produzir deslizamentos, de acordo com características de topografia, geologia, propriedades geotécnicas, clima, vegetação e fatores antropogênicos, como supressão da vegetação e alterações de uso do solo. Tratam ainda dos zoneamentos de ameaça e risco.

Quanto à escala de trabalho, o objetivo da carta geotécnica determina a escala e quais os detalhamentos necessários, podendo ser realizada para o planejamento regional, local ou de uma determinada área de interesse (Fell *et al.*, 2008b).

Santos (2014) destaca quatro tipos de documentos cartográficos: mapas de geodiversidade, mapas de suscetibilidade, cartas geotécnicas e cartas de risco e enfatiza a importância preventiva da cartografia geotécnica como instrumento básico do planejamento urbano. Segundo o autor, as cartas geotécnicas têm como foco o perímetro urbano permitindo a regulação geotécnica da urbanização.

De acordo com Cerri (1990) as cartas geotécnicas podem ser classificadas em cartas clássicas, cartas de suscetibilidade e cartas de risco. Diniz (1998) classifica as cartas geotécnicas segundo sua finalidade em três aplicações, a saber: cartas de aptidão à urbanização; cartas de suscetibilidade, perigo e riscos geológicos a processos do meio físico e cartas geológico-geotécnicas para estudos de viabilidade e execução de projetos de infraestrutura.

De acordo com Zuquette & Gandolfi (2004) o processo de mapeamento geotécnico requer uma classificação hierárquica de forma a orientar a elaboração dos diversos documentos cartográficos segundo uma sequência lógica de 8 níveis ou classes hierárquicas, desde os básicos (nível I) até os conclusivos de orientações (nível VIII). Dentre esses, cabe destacar:

- Nível I - as cartas de declividade, os mapas de feições do terreno, mapas de material inconsolidado, mapa de inventário de uso e ocupação e mapa de valoração econômica;
- Nível II - mapas de condições geotécnicas, mapas de zoneamento e restrições geotécnicas;
- Nível III - cartas interpretativas e derivadas;
- Nível IV - cartas de eventos perigosos (*hazards*);
- Nível V - cartas de risco;
- Nível VI - cartas de procedimento;
- Nível VII - cartas de viabilidade potencial tais como adequabilidade para o desenvolvimento urbano, e;
- Nível VIII - cartas conclusivas de orientação a exemplo da carta de recomendação de uso e limitações.

Sobreira & Souza (2012) e Souza & Sobreira (2014) definem suscetibilidade como a possibilidade de ocorrência de processos geodinâmicos que ocorram naturalmente ou por consequência das formas de uso e ocupação do meio físico. Os autores definem também que a aptidão à urbanização pode ser definida como a capacidade que os terrenos possuem para suportar os diferentes usos e práticas da engenharia e do urbanismo, minimizando os impactos e aumentando a segurança. Nesse contexto, questões como declividade, drenagem e caracterização das coberturas superficiais (material inconsolidado) restringem ou direcionam as formas de ocupação.

Para Bressani & Costa (2013) a suscetibilidade representa uma expectativa técnica de quais são as áreas mais sujeitas a sofrer certos eventos adversos tais como inundações, escorregamentos, alagamentos, entre outros. Baseia-se na análise crítica de eventos históricos, fatores antrópicos e dados geoambientais e é adimensional, podendo ser definida em termos qualitativos (alta, média ou baixa) ou quantitativos (probabilidade de ocorrência do evento).

Em relação às cartas de aptidão à urbanização, por exemplo, o objetivo principal é definir as áreas com aptidão à ocupação (áreas regularizáveis), áreas que podem ser ocupadas segundo determinados critérios (áreas regularizáveis sob condições) e as áreas inaptas para a ocupação (áreas não consolidáveis ou não regularizáveis), resultado da análise dos atributos do meio físico em relação às ocupações existentes ou propostas em projetos de urbanização e infraestrutura urbana (Souza & Sobreira, 2014).

Santos (2014) define que as cartas de risco têm como objetivo orientar decisões emergenciais e corretivas sobre áreas de risco, sejam eles naturais decorrentes de características geológicas ou induzidos pelas diferentes formas de ocupação e uso do solo.

Segundo Freitas & Campanha (2007), as cartas geotécnicas são bastante utilizadas como base na leitura técnica do município e constituem-se referências na elaboração dos instrumentos de planejamento tais como os planos diretores e leis de uso do solo, pois definem as limitações, potencialidades e intervenções necessárias à correta consolidação urbana. Diniz (2012) ressalta que a carta geotécnica, georreferenciada em ambiente SIG, poderia ser adicionada na base cadastral dos municípios.

Zuquette & Gandolfi (2004) analisam as metodologias tradicionais da cartografia geotécnica desenvolvidas nos diversos países. Dentre essas, encontram-se a Metodologia IAEG (*International Association of Engineering Geology*) e a Metodologia PUCE (*Pattern, Unit, Component, Evaluation* ou Padrão, Unidade, Componente, Avaliação em português). No caso do Brasil, os autores citam a importância dos trabalhos do Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT) baseados na metodologia do geólogo Fernando Prandini. Os resultados desses trabalhos podem ser agrupados em cartas geotécnicas propriamente ditas, cartas de risco, cartas de suscetibilidade e cartas de atributos ou parâmetros.

Importante ressaltar que os trabalhos desenvolvidos pelo IPT consideram as formas de ocupação do solo e as solicitações sobre o meio físico como fatores básicos na determinação do desempenho dos terrenos (Zuquette & Gandolfi, 2004).

Segundo Zuquette & Gandolfi (2004), as formas de ocupação mais frequentes no Brasil estão agrupadas em três classes principais: áreas urbanizadas, áreas regionais e áreas rurais. As diversas formas de uso e ocupação relacionam-se com informações do meio físico com diferentes intensidades de interação:

- Ocupação urbana: uso residencial, industrial, comercial, áreas de recreação, serviços de utilidade pública (água, luz, telefone, transporte público), obras enterradas, entre outros exemplos;
- Ocupação regional: uso para rodovias, ferrovias, linhas de transmissão, barragens, mineração, turismo, polos industriais, e;
- Ocupação rural: uso agroindustrial, pecuária, agricultura, agrovilas e projetos de irrigação.

Dearman (1991) trata das escalas adequadas para o mapeamento urbano e acentua que a definição da melhor escala está vinculada às condições de uso e cobertura do solo.

Borges *et al.* (2015) relacionam quantidade do número mínimo de sondagens, área de influência de cada sondagem e escala de trabalho, resultando em um gráfico de área de influência da investigação em função da escala do mapeamento geotécnico.

Cerri *et al.* (1996) tratam da metodologia do Detalhamento Progressivo para o mapeamento geotécnico em três etapas sucessivas. Posteriormente, Zaine (2000) classificou as etapas como geral (escalas entre 1:50.000 e 1:25.000), intermediária (escalas entre 1:25.000 e 1:10.000) e de detalhe (escalas maiores que 1:5.000).

Sobreira & Souza (2012) definem o modelo de Detalhamento Progressivo em níveis hierárquicos relacionados com a suscetibilidade (geral), aptidão à urbanização (intermediário) e risco (detalhe). Para Diniz & Freitas (2013, citado por Bressani & Costa, 2015), as escalas da cartografia geotécnica aplicada ao planejamento territorial seguem o mesmo conceito, ou seja, Carta de Suscetibilidade em escala 1:25.000 e Carta de Aptidão Urbanística frente aos Desastres Naturais em escala 1:10.000 ou maior.

Diniz (2012) aborda a metodologia de classificação de unidades de terreno e cita diversos autores que trataram da análise de terrenos para planejamento, uso e ocupação da terra nas décadas de 1960 e 1970. Dentre eles, destaca os trabalhos de Meijerink (1988, citado por Diniz, 2012) sobre a análise de terrenos utilizada no *International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation* - ITC, Holanda.

Meijerink (1988, citado por Diniz, 2012) define diversas classificações de terrenos, tais como de análise geomorfológica, geomorfométricas, fisiográficas, biogeográficas e lito-geológicas.

Outro método para classificação de terrenos é conhecido como Metodologia PUCE (Grant, 1975). A classificação dos terrenos é realizada conforme quatro classes hierárquicas denominadas província, padrão de terreno, unidade de terreno e componente de terreno (Zuquette & Gandolfi, 2004).

Segundo Diniz (2012), a metodologia PUCE utiliza uma codificação numérica para os diversos níveis de terreno de forma compatível com o processamento por computador e a classificação dos terrenos é obtida por fotointerpretação e trabalho de campo. A autora ressalta a aplicabilidade dessa metodologia aos estudos de viabilidade e planejamento territorial e urbano por tratar-se de um sistema simples e compatível com a informatização de dados cujo produto cartográfico representa uma grande quantidade de informações.

A metodologia PUCE é baseada na divisão das porções de terreno em função de características de relevo (princípios geomorfológicos), geologia, características do solo e da vegetação (Diniz, 2012; Zuquette & Gandolfi, 2004):

- Província: fatores geológicos (grupo e formação);
- Padrão de terreno: fatores da paisagem; características básicas dos solos e rochas, vegetação e padrão de drenagem;
- Unidades de terreno: formas de relevo, principais características dos solos, rochas e formações vegetais;
- Componentes de terreno: tipo de talude, litologia, solo e associação de vegetação.

A IAEG organizou uma comissão que tratou da padronização dos conceitos para elaboração da cartografia geotécnica e publicou um Guia para preparação de mapas geotécnicos em 1976. (IAEG, 1976). De acordo com o documento, os mapas e cartas geotécnicas podem ser classificados de acordo com a finalidade (especial ou multifinalidade), conteúdo (analíticos ou sintéticos) e escala (grande, média ou pequena). Os fatores determinantes das condições geotécnicas são os solos e rochas, a água, as condições geomorfológicas e os fenômenos geodinâmicos. Em relação à metodologia do mapeamento geotécnico, ressalta a importância da preparação do mapa base topográfico e da aquisição das informações geológicas por meio de mapas e aerofotos existentes e diversos trabalhos de campo. Trata também do memorial descritivo que acompanha os mapas e as cartas geotécnicas.

Para Santos (2014), os passos metodológicos básicos para a elaboração das cartas geotécnicas consistem na aquisição e/ou produção de mapas temáticos básicos, definição das feições fisiográficas críticas, compartimentação geotécnica (elaboração das cartas propriamente ditas) e elaboração de documentação orientativa composta por tabelas, relatórios e folheto técnico contendo, de forma clara e didática, as diretrizes de ocupação urbana (arranjos urbanísticos mais adequados).

Xavier *et al.* (2015), ressaltam que a necessidade de investimentos no desenvolvimento e uso da cartografia geotécnica ganhou maior relevância com a aprovação das leis 12.340 de 2010 e 12.608 de 2012 que instituíram a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil – PNPDEC. Com base nas referidas leis, o Governo Federal criou o cadastro nacional de municípios com áreas suscetíveis à ocorrência de deslizamentos de grande impacto, inundações bruscas ou processos geológicos ou hidrológicos e determinou que os municípios cadastrados devem elaborar o mapeamento das áreas suscetíveis à ocorrência dos processos geodinâmicos, bem como a elaboração da carta geotécnica de aptidão à urbanização.

2.4. PLANEJAMENTO URBANO E TERRITORIAL

Castells (1983) define Urbanização como uma concentração espacial de uma população, a partir de certos limites de dimensão e densidade. Para Ribeiro (1988) o Planejamento Urbano é a ação de identificar necessidades e decidir qual a melhor maneira de atendê-las.

Santos (2004) considera o planejamento como um processo disciplinado, abrangendo a coleta, organização e análise de informações utilizando métodos e técnicas na busca de alternativas para o aproveitamento dos recursos disponíveis, tendo como objetivo o desenvolvimento harmônico da região e a integridade dos ambientes físico, biológico e social.

Parte dos problemas enfrentados na dinâmica urbana decorre da falta de planejamento adequado ou da negligência com os ambientes públicos por parte as autoridades competentes. O objetivo do planejamento territorial é disciplinar o uso da terra bem como as atividades que ocorrem no tecido urbano buscando a correta interação dos sistemas que compõem o ambiente (Almeida, 1993).

Diante disso, historicamente cabe citar o IV Congresso Internacional de Arquitetura Moderna (CIAM) realizado em 1933, na cidade de Atenas - Grécia, que resultou em um manifesto urbanístico chamado A Carta de Atenas. O documento apresenta como funções essenciais da cidade, as condições ideais de habitar, trabalhar, recrear e circular. Para tanto, a setorização das áreas e o planejamento do uso do solo aparecem como ordenadores do território urbano tendo como instrumento de medida a escala humana. Tudo parte da célula habitacional (moradia) e suas relações com o meio físico.

Na primeira parte do documento encontram-se os elementos constitutivos considerados como condicionantes da relação entre o plano da cidade e o plano regional. A situação geográfica e topográfica, a situação econômica (recursos disponíveis na região), a situação política e administrativa e a avaliação histórica são fatores essenciais para o correto planejamento territorial. (CIAM IV, 1964) Tempos depois Corbusier (1971) acrescenta uma nova dimensão ou função ao documento síntese do IV CIAM: a paisagem.

Em relação ao Brasil, dados atuais demonstram que o crescimento urbano pelo qual passou a sociedade brasileira trouxe impactos, especialmente na área socioeconômica. De acordo com dados da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD) 2015 a maior parte da população brasileira, 84,72%, vive em áreas urbanas enquanto 15,28% dos brasileiros vivem em áreas rurais (IBGE, 2016).

Para Xavier *et al.* (2015), o planejamento urbano surge no Brasil nos últimos vinte e cinco anos do século XIX, como resultado de preocupações com a saúde da população e o avanço de uma nova classe dominante que deu início a intervenções de caráter estético e sanitarista nas cidades.

Villaça (1999) faz um relato histórico dos períodos ou fases que marcaram o urbanismo brasileiro. Em resumo, segundo ele, cronologicamente tem-se:

- 1875 a 1930 – planos de melhoramento e embelezamento;
- 1930 a 1965 – planos de conjunto;
- 1965 a 1971 – planos de desenvolvimento integrado, e;
- 1971 a 1992 – planos sem mapas.

O início do primeiro período, pautado pelos planos de melhoramento e embelezamento com base na tradição europeia, define o surgimento do planejamento urbano no Brasil com a apresentação do relatório inicial da Comissão de Melhoramentos da Cidade do Rio de Janeiro (1875), onde as premissas urbanas de “plano” e “conjunto” foram utilizadas pela primeira vez (Xavier *et al.*, 2015; Villaça, 1999).

Os planos de melhoramento e embelezamento consistiam, basicamente, no alargamento de vias, extinção da ocupação de baixa renda nas áreas centrais, implantação e melhoria de infraestrutura com ênfase nas questões sanitárias e ajardinamento de praças e parques. Destacam-se no período as ações do Engenheiro Francisco Saturnino Rodrigues de Britto (1864-1929), mais conhecido como Saturnino de Britto, responsável por importantes estudos de saneamento básico e urbanismo em várias cidades brasileiras (Villaça, 1999).

Na fase seguinte, dos planos de conjunto, a cidade passou a ser tratada de forma mais abrangente, já que os planos buscaram a integração entre os núcleos urbanos (centro e bairros, por exemplo) através da implantação de vias de circulação e sistemas de transporte mais eficazes. Desde 1866 já existiam dispositivos básicos de zoneamento territorial, mas, a partir do período dos planos de conjunto, os zoneamentos e a legislação de controle de uso e ocupação do solo começaram a ser elaborados (Villaça, 1999; Leme, 1999).

Na terceira fase, para Xavier *et al.* (2015), os planos de desenvolvimento integrado são “marcados pela extrapolação da dimensão físico-territorial da cidade, incorporando outros aspectos, tais como os econômicos e sociais”. Villaça (1999) ressalta que os planos desse período se caracterizam pela divergência entre as propostas e o que, de fato, foi implementado.

Por fim, na fase dos planos sem mapas, Villaça (1999) observa que os planos simplificados, feitos quase sem mapas e pelos próprios técnicos municipais, deixaram de lado os extensos diagnósticos e a complexidade técnica e intelectual.

Rolnik (1995) define a cidade como resultado da imaginação e trabalho articulado de vários profissionais, ou seja, uma obra coletiva em constante desafio com o meio ambiente. A ação antrópica gera efeitos em decorrência da duração dos diversos materiais e técnicas utilizados

na modificação e construção do espaço. Para a autora, a cidade também é uma forma de registro concretizando sua própria história.

Japiassú & Lins (2014) definem expansão urbana como um processo referente à dinâmica da cidade resultando em seu crescimento que pode ser dividido em dois grupos, a depender de seu resultado em termos de ocupação do solo: crescimento territorial urbano intensivo e extensivo. O crescimento intensivo tem como característica principal a estimulação do uso e ocupação do solo, ao passo que o crescimento extensivo está baseado na extensão do tecido urbano.

Para avaliar esse processo de expansão urbana, que invariavelmente resulta em crescimento, muitos autores utilizam o dado demográfico como indicador (Grostein, 2001; Brito & Souza, 2005; Costa, 2001). Outro indicador leva em consideração o aspecto territorial, por meio do crescimento físico da área ocupada pela cidade. Observa-se que ambos estão relacionados na medida que, quando a cidade cresce territorialmente a população se redistribui pelo território urbano (Santoro, 2012; Brito & Souza, 2005).

2.4.1. INFORMAÇÕES SOBRE O TERRITÓRIO – ESCOLHA DO SÍTIO

Diversos autores ressaltam a necessidade de mapear e inventariar as características preexistentes primordiais à correta escolha do melhor terreno para uma determinada atividade. Para Corbusier (1971) é importante inventariar o capital-natureza existente e disponível.

Para Santos (1988) as informações relativas às unidades geomorfológicas, rede hidrográfica e acessibilidade devem ser mapeadas e identificadas para subsidiar a escolha do sítio. Ribeiro (1988) trata dos diagnósticos físico-territorial, socioeconômico e político-administrativo e Mascaró (2005) ressalta a importância da declividade, das áreas de preservação, da ventilação, do escoamento pluvial e da delimitação das bacias hidrográficas.

Veiga (2005) vai além e trata do mapeamento físico e biológico do território observando os seguintes aspectos: topografia do terreno, análise geológica do solo, existência de mananciais, ecossistema e dados meteorológicos tais como ventos, clima e regime de chuvas.

Veiga (2005) e Santos (1988) também mencionam os mapeamentos socioeconômicos (hábitos, economia local, qualidade de vida) e mapeamento histórico e antropológico.

McHarg (1969) considera para a análise do sítio os seguintes temas: declive (*slope*), drenagem superficial (*surface drainage*), drenagem do solo (*soil drainage*), substrato rochoso (*bedrock foundation*), tipo de solo (*soil foundation*) e suscetibilidade à erosão (*susceptibility to erosion*). Para o autor cada área tem adequabilidade intrínseca para certos usos e o adequado é aquilo não prejudicial aos processos naturais (Figura 2.41).

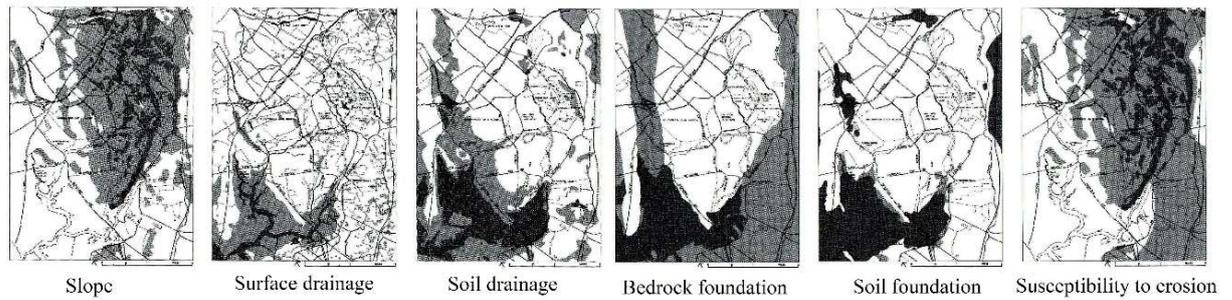


Figura 2.41 - Análise de sítio – adequabilidade (modificado de McHarg,1969).

Em síntese, segundo o CIAM e descrito na Carta de Atenas (CIAM IV, 1964), os condicionantes iniciais da escolha do sítio são Situação Geográfica e Topográfica (água, terra, solo, clima, natureza), Situação Econômica (recursos disponíveis na região), Situação Política e Avaliação Histórica. Quanto às funções da cidade, consideram-se o habitar, trabalhar, recrear e circular. Posteriormente foi incluído o termo paisagem por Le Corbusier ressaltando que o capital-natureza deve ser inventariado (Corbusier, 1971).

Quanto aos critérios para escolha dos sítios têm-se o solo e sua capacidade de drenagem e propriedades de estabilidade, a topografia especialmente características planimétricas e altimétricas, a disponibilidade de recursos naturais, questões relacionadas ao clima (regime de chuvas, insolação e temperaturas máximas, mínimas e médias) e acessibilidade no tocante às distancias e tempo de deslocamento (Figura 2.42).

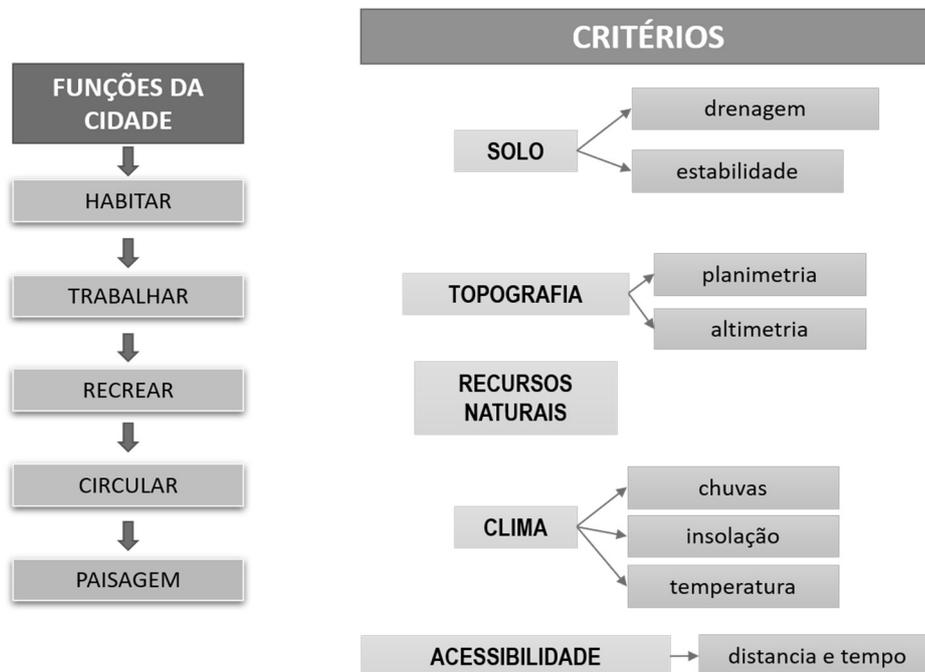


Figura 2.42 – Funções da cidade e critérios de escolha dos sítios.

2.4.2. LEIS APLICADAS AO PLANEJAMENTO E OCUPAÇÃO DO SOLO

Dentre as leis que regulam o planejamento e ocupação do solo merecem destaque a Lei 6766/1979 - Dispõe sobre o Parcelamento do Solo Urbano; a Lei 10.257/2001 - Estatuto da Cidade; a Lei 12.608/2012 - Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil e a Lei Distrital 6.269/2019 - Institui o Zoneamento Ecológico-Econômico do Distrito Federal (ZEE-DF). Além dessas leis, cabe mencionar a ABNT NBR 13296:1995 que trata da classificação do Espaço físico para o uso do solo urbano.

A NBR 13296, publicada em 30/04/1995, classifica o espaço físico para o uso do solo urbano, com vistas à elaboração de levantamentos, planos e legislação a respeito. Classifica o espaço físico em adaptado, adaptado utilizado e adaptado utilizado urbano. Os espaços físicos adaptados são lotes cuja conformação ou composição tenha sido modificada fisicamente para permitir a sua utilização para atividades humanas. Os espaços físicos adaptados utilizados são aqueles que estão sendo efetiva e continuamente utilizados para quaisquer atividades humanas. Por fim, os espaços físicos adaptados utilizados urbanos, são aqueles que estão sendo continuamente utilizados para atividades humanas no meio urbano, classificados em residencial, comercial, serviços, industrial, espaço aberto, circulação com respectivas subcategorias tais como unirresidencial ou multirresidencial, entre outras (ABNT, 1995).

A Lei nº 6766/1979, em seu Art. 3º - Parágrafo único, trata dos parâmetros que proíbem o parcelamento do solo, tais como (Brasil, 1979):

- Em terrenos alagadiços e sujeitos a inundações, antes de tomadas as providências para assegurar o escoamento das águas;
- Em terrenos que tenham sido aterrados com material nocivo à saúde pública, sem que sejam previamente saneados;
- Em terrenos com declividade igual ou superior a 30% (trinta por cento), salvo se atendidas exigências específicas das autoridades competentes;
- Em terrenos onde as condições geológicas não aconselham a edificação, e;
- Em áreas de preservação ecológica ou naquelas onde a poluição impeça condições sanitárias suportáveis, até a sua correção.

O Estatuto da Cidade, Lei nº 10.257 de 10 de julho de 2001, regulamenta os artigos 182 e 183 da Constituição Federal de 1988. O artigo 182 define que a política urbana é responsabilidade do Município e deve garantir as funções sociais da cidade e o desenvolvimento dos cidadãos. Estabelece, ainda, que o Plano Diretor Municipal é o instrumento básico e obrigatório do ordenamento territorial urbano, devendo definir os usos e as características de

ocupação de cada porção do território municipal para cidades com população acima de vinte mil habitantes. O artigo 183, por sua vez, trata da aquisição da propriedade pelo ocupante de imóvel urbano que o utiliza para sua moradia ou de sua família, garantindo o direito de propriedade àquele que respeita as destinações de uso estabelecidas legalmente (Brasil, 2001).

O plano diretor deverá conter, no mínimo, a delimitação das áreas urbanas onde poderá ser aplicado o parcelamento, edificação ou utilização compulsórios, considerando a existência de infraestrutura e de demanda para utilização, englobando o território do município como um todo. No caso de cidades com mais de quinhentos mil habitantes, também deverá ser elaborado um plano de transporte urbano integrado em conformidade com o plano diretor (Brasil, 2001).

Nesse contexto, as informações geológicas e geotécnicas são importantes dados para orientar os planos diretores quanto ao zoneamento, pois levam em consideração a capacidade de suporte e adequação dos diferentes solos e demais características dos terrenos.

Em relação à Lei nº 12.608/2012 - Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil - PNPDEC; dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil - SINPDEC e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil - CONPDEC; autoriza a criação de sistema de informações e monitoramento de desastres e dá outras providências. Em resumo, a lei trata da importância das cartas geotécnicas de aptidão à urbanização, cartas de suscetibilidade e mapeamento das áreas de risco (carta geotécnica de risco) como instrumentos de prevenção de desastres e ordenamento territorial do uso e ocupação do solo de forma a estimular o desenvolvimento de cidades resilientes e processos sustentáveis de urbanização. (Brasil, 2012a)

De acordo com o Decreto Federal nº 4.297/2002, artigo 1º, o Zoneamento Ecológico-Econômico do Brasil (ZEE) é um instrumento previsto pela Política Nacional do Meio Ambiente e está previsto na Lei Orgânica do Distrito Federal. O ZEE-DF tem como objetivo principal subsidiar as ações de planejamento do Governo do Distrito Federal (GDF), a fim de direcionar a gestão e o uso do território, principalmente no que diz respeito a ocupações desordenadas e indevidas, promovendo o desenvolvimento sustentável do DF (GDF, 2019).

Cronologicamente o ZEE-DF passou pelas seguintes fases:

- Em 2005, o GDF iniciou as tratativas com o Ministério do Meio Ambiente (MMA) para firmar um Acordo de Cooperação Técnica que auxiliaria na elaboração do Zoneamento Ecológico-Econômico do Distrito Federal (ZEE-DF).
- Em 2007, início da fase 1, o ZEE-DF tornou-se um dos compromissos institucionais firmados pelo GDF junto ao Ministério Público do Distrito Federal

e Territórios (MPDFT) no Termo de Ajustamento de Conduta – TAC nº 002/2007, que trata do processo de regularização dos parcelamentos irregulares de solo.

- Em 2009, o GDF contratou a empresa Greentec Tecnologia Ambiental para elaborar o ZEE-DF. A coordenação ficou a cargo da então Secretária de Estado de Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente (SEDUMA).
- Em 2011, três secretarias de governo se aproximam para acompanhar a execução do contrato e a continuidade dos trabalhos (Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SEMARH), Secretaria de Estado de Habitação, Regularização e Desenvolvimento Urbano (SEDHAB) e a Secretaria de Estado de Desenvolvimento Econômico (SDE).
- Em 2012, o contrato com a *Greentec* Tecnologia Ambiental foi encerrado com a entrega de uma série de estudos e documentos técnicos – final da fase 1 (GDF, 2012).
- Em dezembro de 2012, surgiu a proposta de se realizar uma segunda fase do ZEE-DF com o objetivo de aprofundar as análises técnicas relativas à Matriz Socioeconômica e produzir estudos complementares que subsidiassem a elaboração do zoneamento levando em consideração a Região Integrada de Desenvolvimento do Distrito Federal e Entorno (RIDE-DF). Essa fase durou até 2014.
- Em junho de 2015, início da terceira fase, foi firmado um Acordo de Cooperação Técnica entre a Secretaria de Estado do Meio Ambiente (SEMA) e o Ministério do Meio Ambiente (MMA), visando à finalização e implementação do ZEE-DF.
- Durante os anos de 2015 e 2016, os trabalhos técnicos estiveram na fase do Pré-Zoneamento, com base nos conteúdos e análises da Matriz Ecológica e da Matriz Socioeconômica do DF.
- Em outubro de 2016, deu-se início à etapa de participação popular do ZEE-DF, com a realização de consultas regionais, inclusive on-line. Após análises e adequações das sugestões recebidas pela sociedade, uma minuta preliminar do anteprojeto de lei do ZEE-DF foi encaminhada à Casa Civil do Distrito Federal para avaliação da assessoria jurídica.
- No dia 11 de abril de 2018, o governador do DF encaminhou a versão final do ZEE-DF para a Câmara Legislativa do Distrito Federal (CLDF), onde passou a tramitar como o Projeto de Lei nº 1988/2018.

- Finalmente, em 17 de dezembro de 2018, o Projeto de Lei 1988/2018, que institui o ZEE-DF, foi aprovado em segundo turno pela CLDF.
- Já sancionada, a Lei Distrital nº 6.269/2019, que institui o Zoneamento Ecológico-Econômico do Distrito Federal (ZEE-DF), foi publicada no Diário da Câmara Legislativa (DCL) e no Diário Oficial do Distrito Federal (DODF) em 30 de janeiro de 2019.

A Lei sancionada, ressalta no parágrafo único do Art. 1, que o ZEE-DF é um zoneamento de riscos ecológicos e socioeconômicos, a ser obrigatoriamente considerado para a definição de zoneamentos de usos, no âmbito do planejamento e gestão territorial do DF (GDF, 2019).

Ao todo o ZEE-DF apresenta em anexo 22 mapas diversos, com destaque para os mapas de risco, anteriormente denominados mapas de sensibilidade ambiental (GDF, 2019):

- Risco Ecológico de Perda de Área de Recarga de Aquífero no Distrito Federal;
- Risco Ecológico de Perda de Solo por Erosão no Distrito Federal;
- Risco Ecológico de Contaminação do Subsolo no Distrito Federal, e;
- Risco Ecológico de Perda de Áreas Remanescentes de Cerrado Nativo no Distrito Federal.

Outro mapa que merece destaque é o Mapa 12 - Combate à Grilagem e Ocupações Irregulares no Distrito Federal. Elaborado como instrumento orientador da Fiscalização de todo o território e dos atos autorizativos no DF (Figura 2.43).

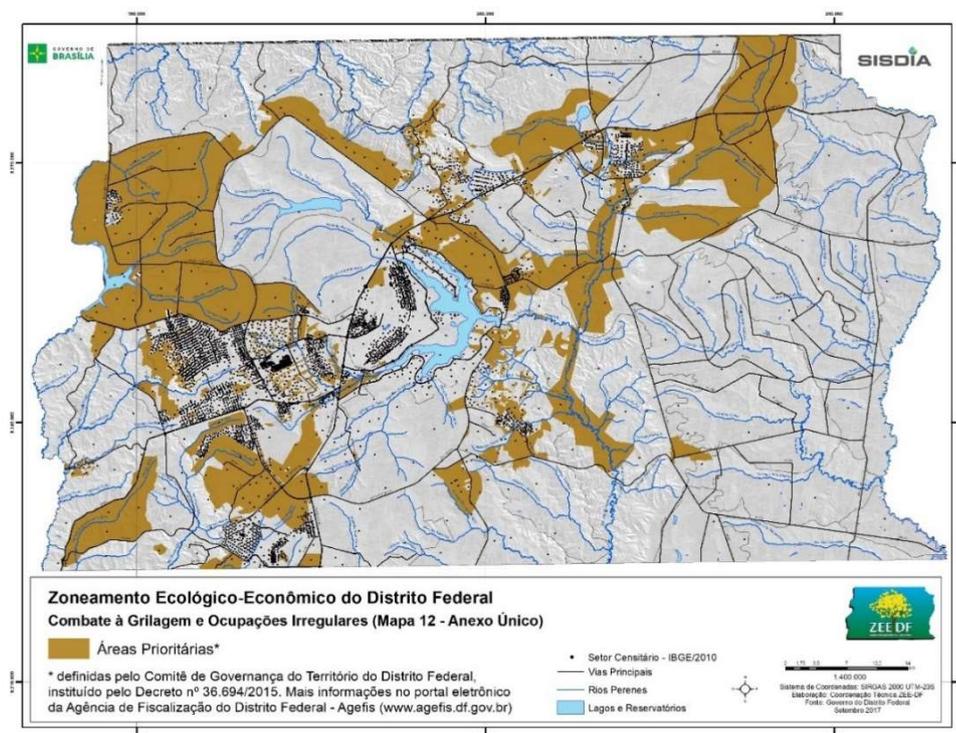


Figura 2.43 - Combate a Grilagem e Ocupações Irregulares (GDF, 2019).

O Mapa 5 - Risco Ecológico de Perda de Área de Recarga de Aquífero no Distrito Federal foi elaborado utilizando-se os seguintes planos de informação (GDF, 2019):

- Representação dos sistemas aquíferos do domínio poroso no DF (ZEE-DF, Etapa 1, Subproduto 3.1, elaborado em 2010).
- Níveis de sensibilidade à recarga e à produção hídrica para o fator condutividade hidráulica no DF (ZEE-DF, Etapa 1, Subproduto 3.1, elaborado em 2010).
- Representação da compartimentação geomorfológica no DF (ZEE-DF, Etapa 1, Subproduto 3.1, elaborado em 2010).
- Níveis de sensibilidade à recarga e à produção hídrica para o fator geomorfologia no DF (ZEE-DF, Etapa 1, Subproduto 3.1, elaborado em 2010).
- Representação dos sistemas aquíferos dos domínios fraturado e fissuro-cárstico no DF (ZEE-DF, Etapa 1, Subproduto 3.1, elaborado em 2010).
- Nível de sensibilidade à recarga e à produção hídrica para o fator domínio fraturado no DF (ZEE-DF, Etapa 1, Subproduto 3.1, elaborado em 2010).

Os pressupostos adotados na elaboração do mapa foram que os processos que mais contribuem para sua degradação estão relacionados à redução da quantidade da água armazenada, que envolve a questão da recarga e os níveis de produção hídrica dos aquíferos e à modificação da sua qualidade, que está relacionada ao risco de sua contaminação por diferentes fontes poluidoras (pontuais ou difusas).

Conforme o relatório, as variáveis que impactam na redução da recarga dos aquíferos são o domínio poroso, a compartimentação geomorfológica e a vazão registrada nos domínios fraturado e fissuro-cárstico (GDF, 2019).

No que diz respeito à compartimentação geomorfológica, observa-se que a morfologia da paisagem representa um fator de controle das áreas de recarga dos aquíferos, em função do fluxo vertical e lateral das águas de infiltração, a partir da precipitação pluviométrica.

Dessa forma, as áreas ocupadas por planos elevados (chapadas), rebordos e planos intermediários constituem os melhores sítios para a efetivação da recarga dos aquíferos; por outro lado, as áreas ocupadas por rampas íngremes (escarpas) e vales dissecados, com predominância de solos rasos e menos permeáveis (cambissolos), são as localidades menos eficazes em termos da contribuição para a recarga dos aquíferos.

Como resultado, foi gerado o Mapa de Sensibilidade à Perda de Recarga, posteriormente reinterpretado como Mapa de Risco de Perda de Recarga (Figura 2.44). Cabe destacar que os pontos pretos presentes no mapa representam os setores censitários do IBGE no DF.

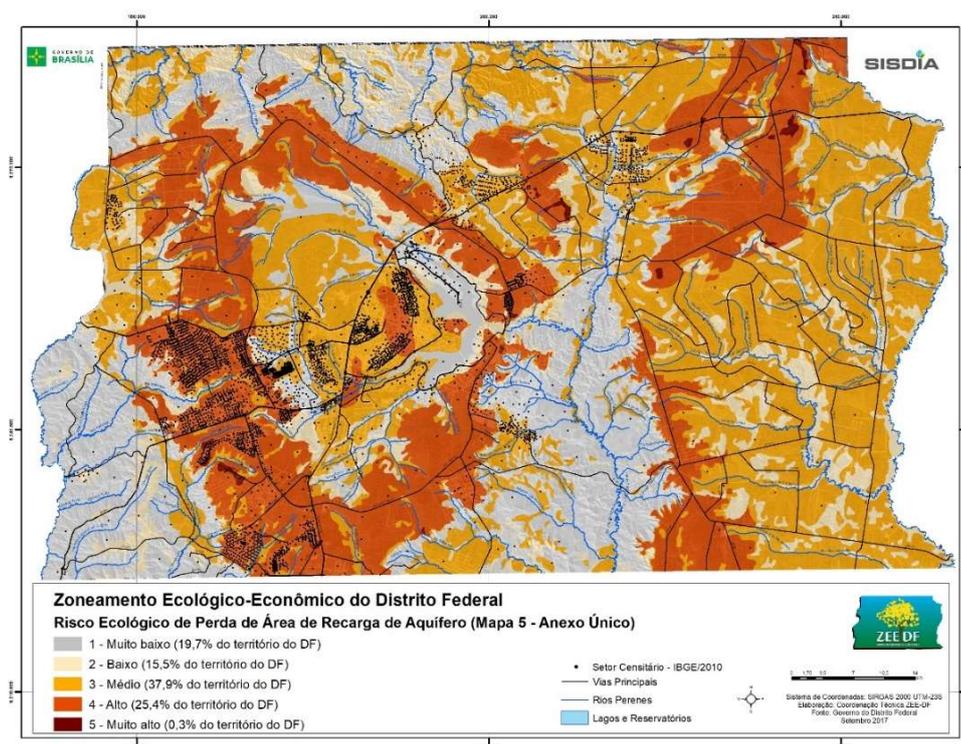


Figura 2.44 - Risco Ecológico de Perda de Área de Recarga de Aquífero. (GDF, 2019).

Em resumo, observa-se que cerca de 36% do DF apresenta risco muito baixo e baixo de perda de recarga de aquíferos, cerca de 38% do território apresenta risco médio de perda de recarga de aquíferos e cerca de 26% apresenta risco alto e muito alto de perda de recarga.

Importante destacar que as áreas com alto e médio risco de perda de recarga estão nos domos estruturais do Paranoá e do Pipiripau, aonde avançam as ocupações desordenadas e os parcelamentos irregulares do solo. Esse dado deve ser levado em consideração pelo poder público na definição da política de fiscalização do território.

As áreas com alto risco pertencem ao anel prioritário de recarga na divisa da bacia hidrográfica do Rio Paranoá, área entre Sobradinho e Planaltina, área da sub bacia do Pipiripau e a porção sudeste do vale do São Bartolomeu.

O Mapa 6 - Risco Ecológico de Perda de Solo por Erosão no Distrito Federal foi elaborado utilizando-se dos seguintes planos de informação (Figura 2.45):

- Mapa de solos do Distrito Federal / escala 1:100.000 (EMBRAPA, 1978 citado por GDF, 2019).
- Erodibilidade do Solo (EMBRAPA, 1978 citado por GDF, 2019).
- Tolerância do solo à erosão (EMBRAPA, 1978, citado por GDF, 2019).
- Declividade de Vertentes (SICAD, 2009 citado por GDF, 2019).

Os pressupostos adotados na elaboração do mapa foram:

- As características de erodibilidade dos solos, que representa a facilidade do solo em ser erodido pelas intempéries (Bertoni & Lombardi Neto, 1991 e Wischmeier & Smith, 1978) citado por GDF (2019);
- A tolerância dos solos à erosão, que representa a perda máxima que o solo pode suportar sem que ocorra a sua degradação permanente (Wischmeier, 1976 citado por GDF, 2019), e;
- A declividade das vertentes, que aponta o grau de inclinação da superfície do terreno em relação à horizontal.

Em relação a precipitação pluviométrica, optou-se por não utilizar os dados de precipitação, pois as amplitudes pluviométricas, mensais e anuais, registradas para o Distrito Federal são pequenas e atuam de forma praticamente uniforme sobre o território (GDF, 2019).

A partir do mapa de solos na escala 1:100.000, elaborado pela EMBRAPA (1978), citado por GDF (2019), os tipos de solos foram classificados por suas características de erodibilidade (K) parametrizadas por Chaves (2006), citado por GDF (2019) e relacionados na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 - Classificação dos níveis de “Sensibilidade do Solo” em função da Erodibilidade (modificado de GDF, 2019).

Classe de solo	Nível de sensibilidade
Latossolos	Muito baixa
Argissolos e Espodossolos	Baixa
Neossolosquartzarênicos, Nitossolos, Gleissolos	Média
Neossolosflúvicos, Plintossolos	Alta
Cambissolos	Muito alta

A tolerância à perda de solo (T) é dada em milímetros por ano. Para a elaboração do mapa, a tolerância T foi obtida com base no estudo de Lombardi Neto & Bertoni (1975), citado por GDF (2019) a partir das características de profundidade efetiva do solo e da relação textural entre os horizontes A e B (Tabela 2.6).

Tabela 2.6 - Nível de sensibilidade (risco ecológico de perda de solo por erosão) das classes de solo no Distrito Federal (modificado de GDF, 2019).

Classe de solo	Tolerância T (mm ano⁻¹)	Nível de sensibilidade
Latossolos e Nitossolos	> 1,05	Muito baixa
Espodossolos e Neossolosflúvicos	1,00 – 1,05	Baixa
Plintossolos e Gleissolos	0,90 – 1,00	Média
Cambissolos e Argissolos	0,80 – 0,90	Alta
Neossolos quartzarênicos	< 0,80	Muito alta

Portanto, a fórmula utilizada para a elaboração do mapa de perda de solo (Equação 2.8) foi:

$$Ss = K + T + \frac{D}{3} \quad (2.8)$$

Onde:

Ss = Sensibilidade dos solos à erosão;

K = Erodibilidade do solo;

T = Tolerância do solo à erosão;

D = Declividade da vertente.

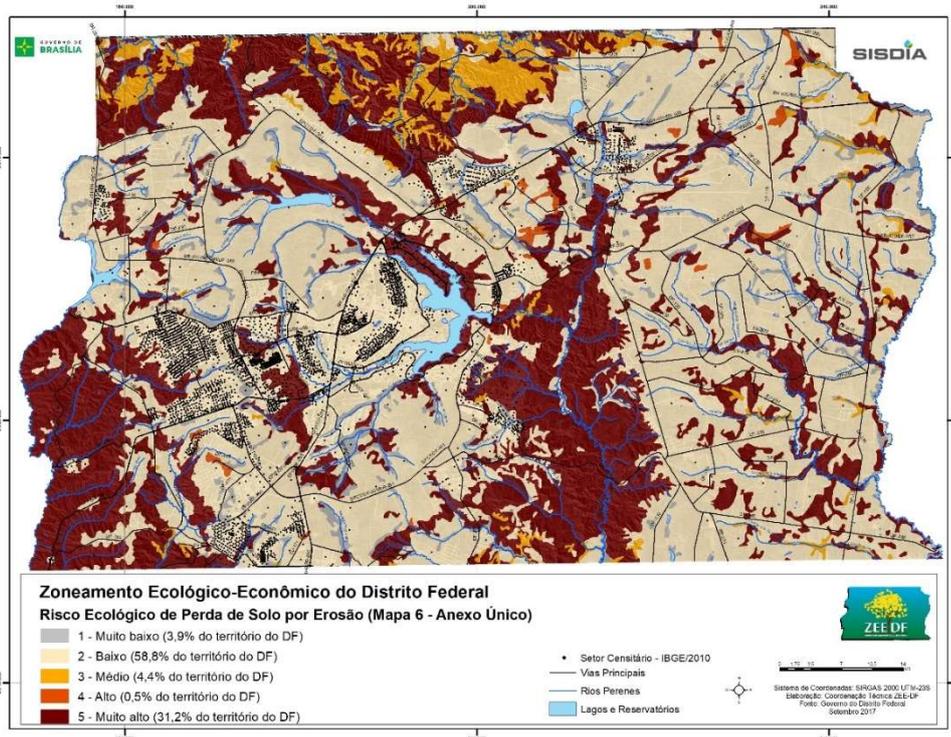


Figura 2.45 - Risco Ecológico de Perda de Solo por Erosão. (GDF, 2019).

Analisando-se os resultados apresentados, observa-se que 62,7% da área do DF apresenta risco baixo e muito baixo de perda de solos por erosão. São áreas que correspondem às áreas mais planas (Bacia Hidrográfica do Rio Paranoá, Bacia Hidrográfica do Rio Preto e a Bacia Hidrográfica do Rio São Bartolomeu em sua fração Norte).

Aproximadamente um terço da área total do DF (31,2%) apresenta risco muito alto de perda de solo por erosão. Conforme observa-se no mapa, essas áreas estão localizadas na parcela Norte do DF (na Bacia Hidrográfica do Rio Maranhão), Sudoeste (no trecho sul da Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto) e no vale do Rio São Bartolomeu.

O Mapa 7 - Risco Ecológico de Contaminação do Subsolo no Distrito Federal, foi elaborado com base no que foi desenvolvido na primeira etapa do ZEE/DF - Representação dos sistemas aquíferos do domínio poroso no Distrito Federal, Subproduto 3.1, em 2010.

O sistema de classificação baseou-se na correlação entre o tipo de aquífero e as classes de solos, conforme a Tabela 2.7. Em síntese, quanto maior a vazão média de cada classe de solo, maior o risco de contaminação e de perda de recarga de aquífero.

Tabela 2.7 - Sensibilidade natural dos aquíferos porosos à contaminação (modificado de GDF, 2019).

Aquífero	Classe de solo	Peso
Sistema P1	Latossolo	4
	Neossolo Quartzarênico	5
Sistema P2	-	3
Sistema P3	Plintossolo	2
	Gleissolo	5
Sistema P4	-	1

A classificação de risco relacionada às classes de solo e tipo de aquífero baseou-se nas seguintes características (GDF, 2019):

O Sistema P1 é considerado de moderada sensibilidade à contaminação em função de suas características: apresenta maior espessura, ocorre em áreas de menor declividade, apresenta nível freático a mais de 3 metros, tem a presença de argilominerais, além de óxidos e hidróxidos. Caso esse sistema aquífero freático seja desenvolvido sob neossolos quartzarênicos, a sensibilidade à contaminação é considerada extrema, em função da ausência de argilominerais.

O Sistema P2 tem comportamento similar ao P1 quanto à sensibilidade natural à contaminação, sendo o peso reduzido pela maior quantidade de argila nos horizontes subsuperficiais que funcionam como filtros naturais para atenuação das cargas contaminantes.

O Sistema P3, representado predominantemente pelos gleissolos, é considerado de extrema sensibilidade à contaminação. As demais classes de solos que compõem esse sistema apresentam valores mais reduzidos de sensibilidade à contaminação.

O Sistema P4 ocorre em áreas de elevada declividade e é confinado em inúmeros casos, por isso é considerado como de muito baixa sensibilidade à contaminação.

Como resultado, foi gerado o Mapa de Sensibilidade à Contaminação, reinterpretado como Mapa de Risco de Contaminação de Subsolo.

Com base no mapa resultante (Figura 2.46), observa-se que 58,8% da área do DF apresenta risco alto de contaminação do subsolo, distribuídos na Bacia Hidrográfica do Lago Paranoá, Bacia Hidrográfica do Rio Preto e parcela Norte da Bacia Hidrográfica do São Bartolomeu onde estão localizadas as Regiões Administrativas de Planaltina e Sobradinho.

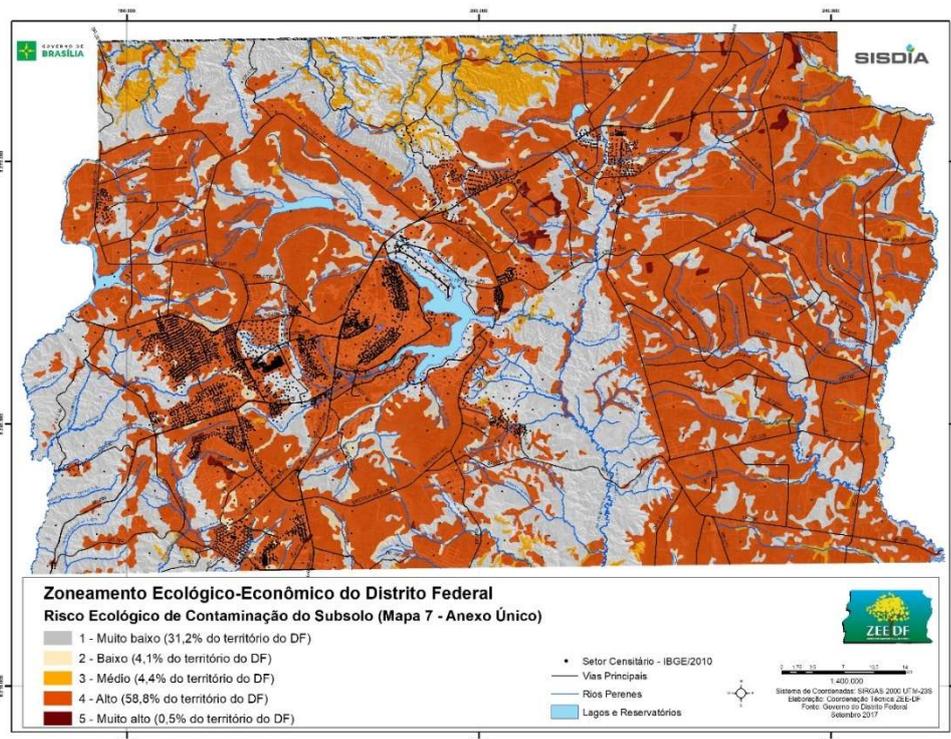


Figura 2.46 - Risco Ecológico de Contaminação do Subsolo. (GDF, 2019)

O restante da área, correspondente a cerca de 40%, apresenta riscos muito baixo, baixo e médio, enquanto apenas 0,5% do território apresenta risco muito alto de contaminação de subsolo.

O Mapa 8 - Risco Ecológico de Perda de Áreas Remanescentes de Cerrado Nativo no Distrito Federal, foi elaborado com base no seguinte plano de informação:

- Distribuição espacial dos fragmentos de vegetação de Cerrado no Distrito Federal por tipo de formação vegetal para o ano de 2009. (ZEE-DF, Etapa 1, Subproduto 3.2, elaborado em 2010 e revisado em 2013 pela SUGAP/IBRAM – Instituto Brasília Ambiental).

Em função do cenário de crescente ocupação territorial no DF, considerou-se que não há áreas remanescentes do cerrado com risco muito baixo e baixo de desmatamento ou degradação. Portanto, o mapa gerado apresenta apenas 3 (três) classes: médio, alto e muito alto risco de perda de remanescentes de Cerrado nativo (Figura 2.47).

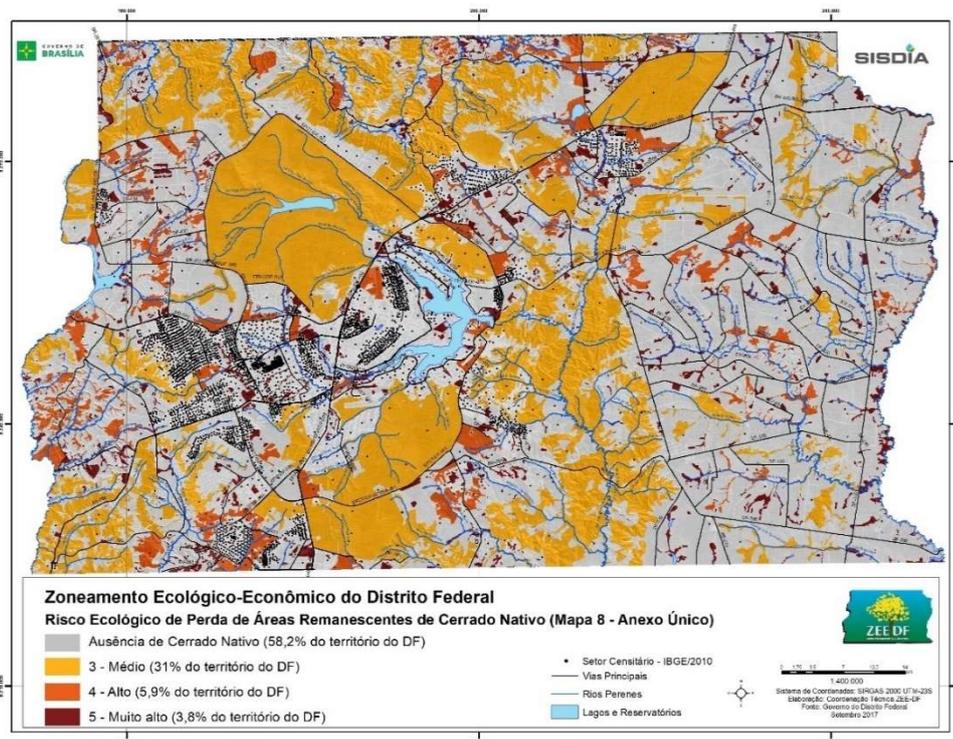


Figura 2.47 - Risco Ecológico de Perda de Áreas Remanescentes de Cerrado Nativo (GDF, 2019).

Conforme o mapa apresentado na Figura 2.47, 58,2% do território do DF não tem mais Cerrado Nativo. Importante observar que as áreas de cerrado nativo mais significativas no DF correspondem às Unidades de Conservação da Estação Ecológica de Águas Emendadas, ao Parque Nacional de Brasília e ao bloco formado pela Estação Ecológica do Jardim Botânico, Reserva Biológica do IBGE e Fazenda Experimental Água Limpa da Universidade de Brasília (FAL/UnB). Como não são áreas pequenas em extensão, os efeitos da fragmentação da paisagem são reduzidos e, por isso, foram classificadas como risco médio (31%).

Por outro lado, as demais áreas do DF apresentam-se com uma crescente fragmentação do cerrado em função da expansão urbana e da pressão imobiliária. Somente onde os custos de implantação de parcelamentos urbanos são altos, em função de características de relevo não plano, é que se observa algum nível de preservação do cerrado.

Durante o período da terceira fase do ZEE-DF, em julho de 2016, a coordenação geral técnica do ZEE-DF promoveu uma palestra no SINDUSCON-DF apresentando dados e metodologia da finalização e implantação do zoneamento. Na ocasião foi ressaltada a inclusão do termo risco ecológico na elaboração do documento final, sob alegação da utilização dos dados censitários do IBGE, coletados em 2010 na elaboração dos mapas (GDF, 2016).

Na fase 1 do ZEE-DF (entre 2009 a 2011), foram produzidos quatro mapas de sensibilidade ambiental do território que, nas fases posteriores de elaboração do ZEE/DF foram revistos e os responsáveis pelo relatório adotaram o conceito de risco ecológico, relacionado aos riscos intrínsecos da ocupação do território, levando em consideração a população (GDF, 2019).

Os mapas de risco foram elaborados utilizando-se um gradiente de classificação em 5 (cinco) níveis de risco relacionados ao grau que um sistema pode absorver as pressões sem sofrer alterações a longo prazo, bem como sua resiliência.

Os termos Risco de Perda de Solo por Erosão, Risco de Perda de Cerrado Nativo, Risco de Perda de Áreas de Recarga de Aquíferos e Risco de Contaminação de Subsolo foram trabalhados em forma de mapa e posteriormente sobrepostos gerando um único Mapa de Colocalização dos Riscos Ecológicos (Figura 2.48).

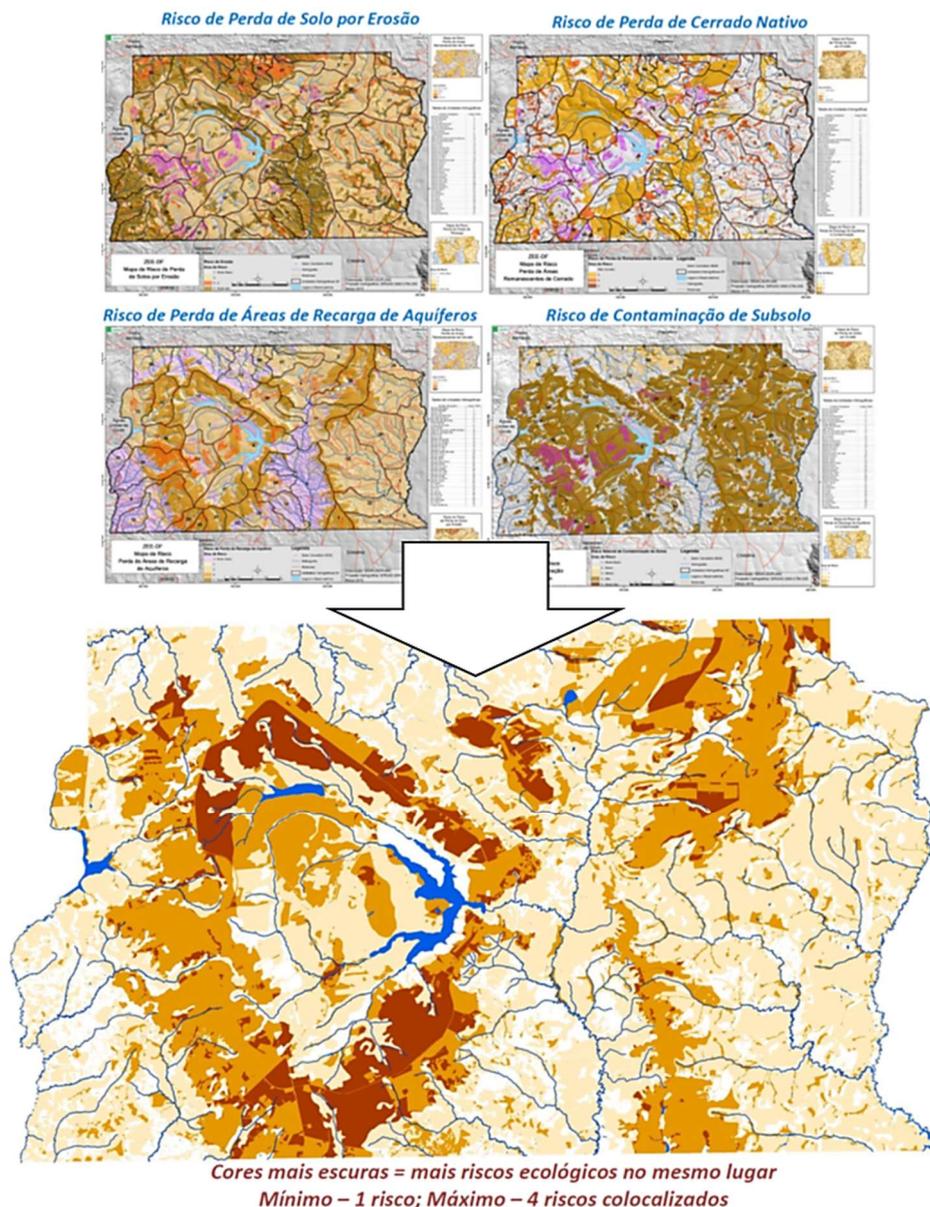


Figura 2.48 – Colocalização dos riscos ecológicos (modificado de GDF, 2016).

2.4.3. ELEMENTOS MORFOLÓGICOS DO ESPAÇO URBANO

Em relação aos elementos morfológicos do espaço urbano, Lamas (2004) elenca os seguintes itens: solo, edifício, lote, fachada, logradouro, traçado ou rua, praça, monumento, mobiliário urbano, árvore e a vegetação.

Mascaró (1994), Santos (1988) e Mausbach (1981) simplificam e definem como elementos estruturantes o traçado urbano, os lotes, bairros e a arborização urbana.

Lamas (2004) define o solo como pavimento cuja topografia serve de condicionante para o desenho da cidade. Segundo o autor, o solo é frágil e sujeito a alterações, facilmente suscetível a erosões. Lamas (2004) e Santos (1988) também definem e caracterizam o lote como parcela fundiária sobre a qual se assenta o edifício e ressaltam a importância dos índices urbanísticos como reguladores da densidade demográfica e ocupação do solo, relacionado com custos de urbanização, ressaltam ainda que o solo é cenário de conflitos de interesse entre o público e o privado, por exemplo. Segundo Santos (1988), a forma ideal do lote é a retangular.

Os lotes terão área mínima de 125,00 m² e frente mínima de 5 metros, salvo quando o loteamento se destinar a urbanização específica ou edificação de conjuntos habitacionais de interesse social (Brasil, 1979).

O edifício, segundo Lamas (2004), é o elemento mínimo e seu conjunto configura o perfil do parcelamento, denominado *skyline* urbano, ou em português, panorama urbano (Figura 2.49). As formas dos edifícios configuram os demais elementos: ruas, praças, becos, passeios, por exemplo.

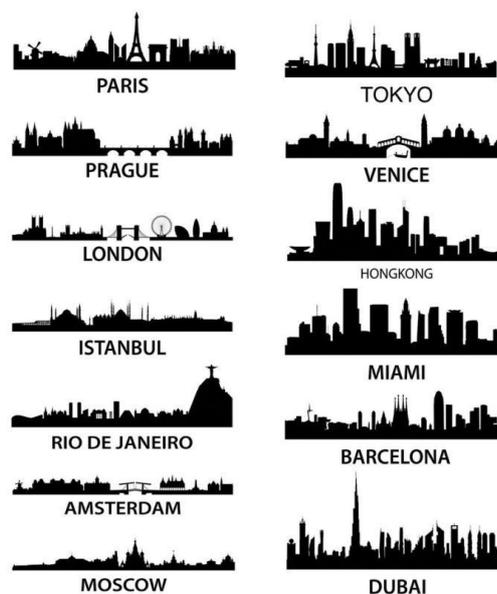


Figura 2.49 – *Skylines* de grandes cidades (disponível em www.shutterstock.com).

Lamas (2004) e Santos (1988) definem o quarteirão como uma agregação de lotes formando um conjunto com acessos comuns, resultado do traçado da divisão fundiária. Para os autores, trata-se do conjunto de edifícios agrupados entre si em anel ou sistema fechado separado dos demais. As formas de arranjo espacial do quarteirão são diversas, conforme a Figura 2.50.

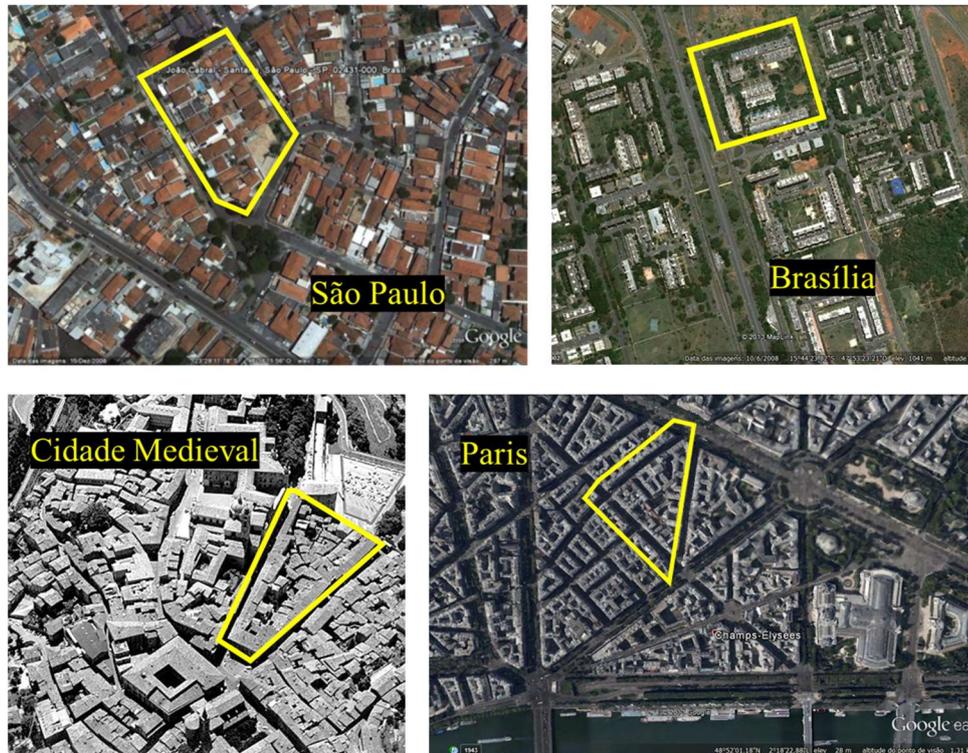


Figura 2.50 – Diferentes arranjos de quarteirões (modificado de Google Earth Pro, 2018).

Santos (1988), Mascaró (1989) e Lamas (2004) tratam do traçado/rua como um elemento morfológico permanente, de difícil alteração, cujos custos de implantação são da ordem de 50% do custo total de urbanização. Santos (1988) define um modelo evolutivo e gradualista com largura de 23,00 m (Figura 2.51). Ainda segundo Mascaró (1989) o traçado/rua ocupa uma parcela entre 20 a 25% do solo urbano e é o elemento que está mais vinculado aos usuários.

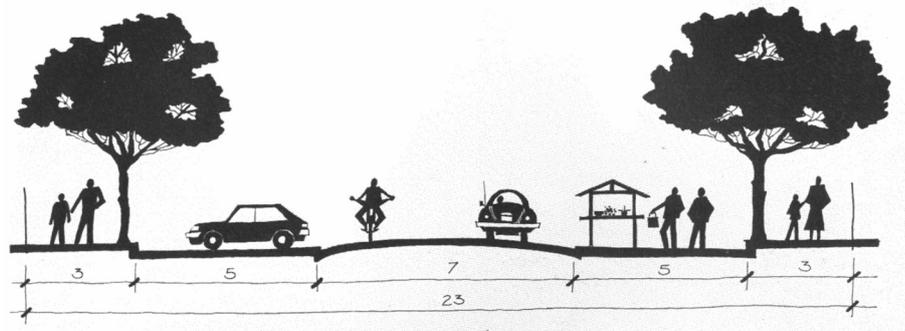


Figura 2.51 – Modelo evolutivo e gradualista de largura de rua (Santos, 1988).

Foi o traçado de duas linhas perpendiculares que se cruzam que definiu o partido do Plano Piloto de Brasília (Figura 2.52). No primeiro momento o urbanista trata do gesto primário de quem assinala um lugar em forma de cruz, na sequência releva o interesse em adaptar à topografia local, ao escoamento natural das águas, à orientação solar e ao rigor geométrico do triângulo equilátero (Costa, 1991).

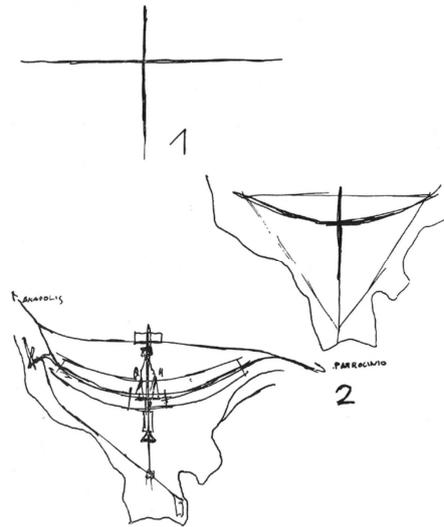


Figura 2.52 – Traçado gerador do plano (Costa, 1991).

Outro elemento de destaque é o logradouro. Trata-se, segundo Lamas (2004), de espaço (privado ou público) não ocupado dentro do parcelamento (Figura 2.53). O logradouro público requer fiscalização e cuidado, pois é facilmente invadido mudando de destinação da noite para o dia.



Figura 2.53 - Imagens mostrando invasões no logradouro público do DF – proximidades da UnB (modificado do Google Earth Pro, 2019).

3. CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO

A cidade de Brasília, desde sua concepção até a construção, passou por fases de escolha do sítio e concurso para elaboração de projeto urbanístico, nas quais os parâmetros geotécnicos foram estudados pelas equipes responsáveis pelo reconhecimento da área (Missão Cruls e Relatório Belcher) e fizeram parte do Edital para o concurso (Belcher, 1957; Cruls, 1894).

Para a escolha do local onde seria construída a nova capital do Brasil buscou-se evitar os problemas das cidades sem planejamento, baseando a definição do sítio em fatores econômicos e científicos, bem como nas condições do clima e da paisagem, segundo preceitos da Carta de Atenas (CIAM IV, 1964).

Apesar disso, o crescimento urbano acelerado deixou de lado os conceitos de adequabilidade do terreno e a cidade se desenvolveu de forma desorganizada, principalmente fora dos limites do Plano Piloto, iniciando um processo de segregação urbana e social.

3.1. JUSTIFICATIVA DE ESCOLHA DA ÁREA DE ESTUDO

Brasília é uma cidade planejada, criada segundo preceitos urbanísticos modernos que, apesar disso, apresenta problemas de cidades tradicionais decorrentes da falta de planejamento e fiscalização frequentes e mau uso do solo. O entorno da cidade está sendo ocupado de forma irregular e descontrolada, ocasionando diversos problemas socioambientais.

A omissão do Estado para atender à demanda por habitação e sua incapacidade de combater a irregularidade resultaram na implantação, em menos de duas décadas, de cerca de quinhentos condomínios ilegais espalhados pelo DF, segundo dados publicados em 2000 pela Secretaria de Estado de Gestão do Território e Habitação (SEGETH/DF).

A ocupação do Distrito Federal surge com a implantação do Projeto do Plano Piloto de Lúcio Costa, vencedor do Concurso Público, elaborado segundo preceitos da cartografia geotécnica ressaltados no Relatório Belcher e de acordo com as recomendações da Carta de Atenas. O referido plano baseou-se em mapas topográficos e informações sobre solos, rochas, drenagem, disponibilidade de água, clima e uso do solo. Entretanto, a prática urbanística que sucedeu a inauguração de Brasília não levou adiante o uso adequado dessas informações. Prova disso é a lacuna de quase duas décadas para a elaboração do primeiro plano de ordenamento territorial para o Plano Piloto de Brasília em 1977.

O Distrito Federal apresenta um cenário de acelerada expansão urbana que exerce forte pressão sobre as áreas desocupadas. Levando em consideração a peculiaridade do tombamento urbanístico, que limita intervenções no projeto original, a definição de novas áreas para

ocupação urbana, bem como a instalação de infraestrutura e serviços básicos devem ser priorizadas pelas ações do governo local.

Diante da necessidade de planejar novas áreas para ocupação urbana, o arquiteto e urbanista Lúcio Costa, autor do plano piloto de Brasília, realizou entre 1985 e 1987 o estudo “Brasília Revisitada” - Anexo I do Decreto nº 10.829/1987 - GDF e da Portaria nº 314/1992 - Iphan, com o propósito de suprir essa demanda de crescimento urbano na capital federal respeitando as características fundamentais do plano vencedor do Concurso público (Costa, 1987).

Uma das áreas listadas no documento como opções para a ocupação, predominantemente residencial, próximo do centro urbano, ou seja, na bacia do Lago Paranoá e integrando-se ao existente é o que Costa (1987) denominou Asa Nova Norte, conforme mostrado na Figura 3.1 (Área F).

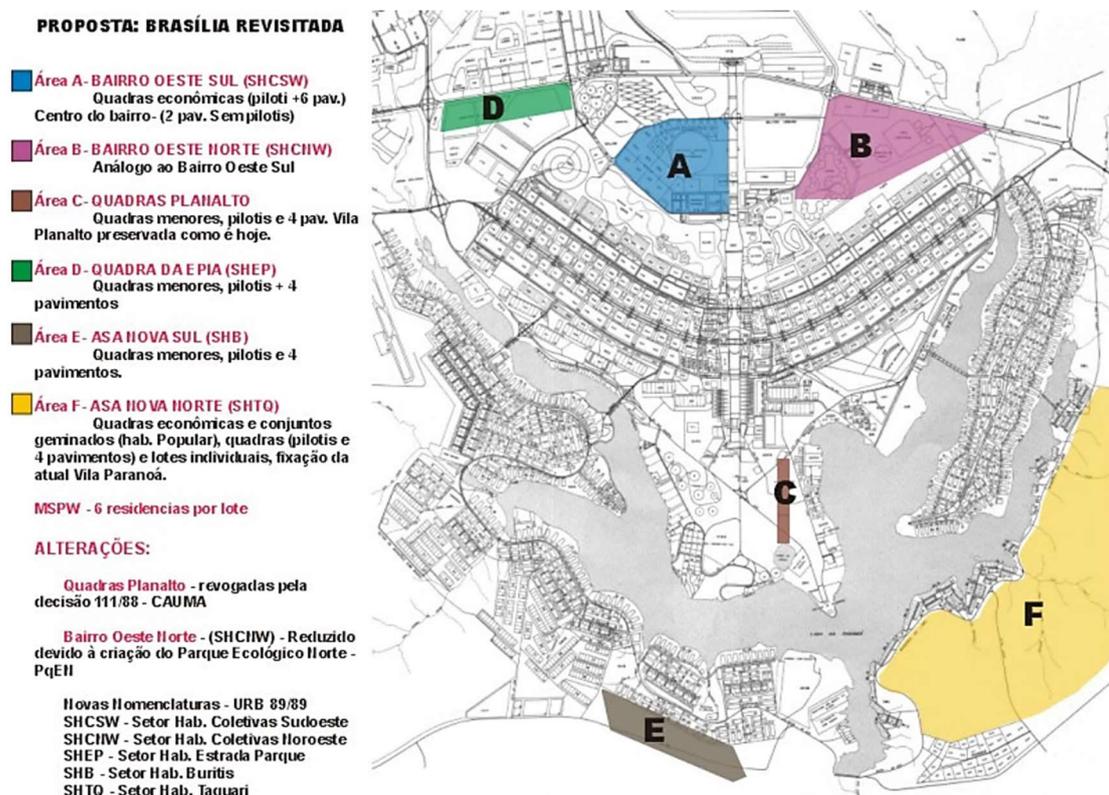


Figura 3.1 - Brasília Revisitada – áreas propostas (Costa, 1987).

Essa área, hoje conhecida como Setor Habitacional Taquari (SHTq), está localizada entre o Lago Paranoá e a Estrada Parque Contorno (EPCT) ou DF-001 e, devido à sua excelente localização, foi parcialmente ocupada por parcelamentos urbanos informais predominantemente destinados à população de alta e média renda. Atualmente parte da área encontra-se implantada e o restante está desocupado e em fase de estudos preliminares de ocupação e urbanização.

Por outro lado, ações realizadas por gestões recentes do GDF buscaram regularizar áreas ocupadas indevidamente, levando em consideração alguns aspectos de ameaça à ocorrência de eventos geotécnicos, bem como a delimitação de áreas de vereda do Cerrado.

3.1.1. ESCOLHA DO SÍTIO: COMISSÃO CRULS E RELATÓRIO BELCHER

Em 1892 foi criada a Comissão Exploradora do Planalto Central do Brasil, denominada Missão Cruls, chefiada por Luiz Cruls, com o propósito de analisar o melhor sítio e demarcar as terras que seriam posteriormente incorporadas a um novo Distrito Federal (Cruls, 1894).

A Comissão Exploradora buscou um sítio que apresentasse o maior número de condições favoráveis à vida e mapeou clima, topografia, geologia, flora, fauna, cursos d'água, modo de vida dos habitantes, os aspectos urbanos das cidades encontradas no caminho e os recursos materiais da região do Planalto Central. O Relatório Cruls foi publicado em 7 de maio de 1894 e o sucesso da missão resultou na criação da Comissão de Estudos da Nova Capital da União.

O Relatório Técnico sobre a Nova Capital da República, conhecido como Relatório Belcher, começou a ser preparado em 1954, quando foi contratada a empresa norte-americana *Donald J. Belcher and Associates* que ficou encarregada dos serviços de engenharia necessários à definição precisa do sítio do Distrito Federal.

O Relatório Belcher, entregue em 1955, é um marco na cartografia do Distrito Federal. Adotou-se o sistema aerofotogramétrico para a produção de diversos documentos, dentre eles um relatório descritivo, 41 fotomosaicos e 217 mapas temáticos sobre solos para agricultura, solos para engenharia, drenagem, geologia e utilização da terra (Belcher, 1957).

Entre os cinco sítios selecionados e identificados com cores diferentes (castanho, verde, azul, vermelho e amarelo), a Comissão de Localização da Nova Capital escolheu, em 15 de abril de 1955, o sítio Castanho (Figura 3.2).

Belcher (1957) define o sítio castanho como uma área convexa, adequada às influências dos ventos dominantes, cuja forma topográfica promove a drenagem do ar através da área da cidade para dentro do vale florestado do Rio São Bartolomeu. As condições gerais de drenagem do solo e cobertura vegetal influenciam favoravelmente o microclima da área, justamente um dos fatores primordiais que foram pontuados na escolha do sítio castanho: clima e salubridade favoráveis.

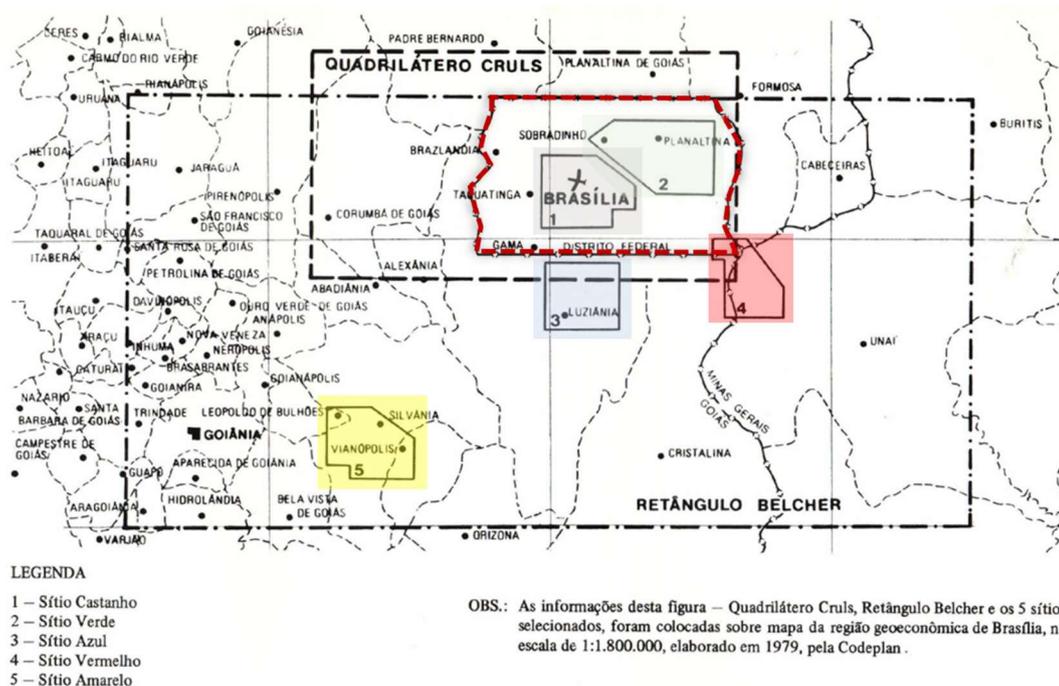


Figura 3.2 - Mapa Retângulo Belcher - demarcações dos retângulos e sítios (modificado de Belcher, 1957).

O retângulo de 50.000 km², conhecido como Retângulo Belcher, foi dividido em 18 quadrículas e estudado de forma minuciosa gerando mapas e maquetes na escala 1:25.000. Os temas topografia, drenagem, geologia, utilização da terra, solos para engenharia e para agricultura foram mapeados para cada um dos sítios selecionados. O capítulo que trata da geologia traz a seguinte afirmação: “a condição geológica ideal para a localização de uma cidade é aquela em que os solos são friáveis e bem drenados e onde a rocha-base está a uma distância razoável abaixo da superfície da terra.” (Belcher, 1957).

Observa-se, no Mapa de Geologia gerado pelo relatório Belcher, a predominância de Ar - Flh (Arenito e Folhelho), principalmente na área do Plano Piloto e adjacências (Figura 3.3).

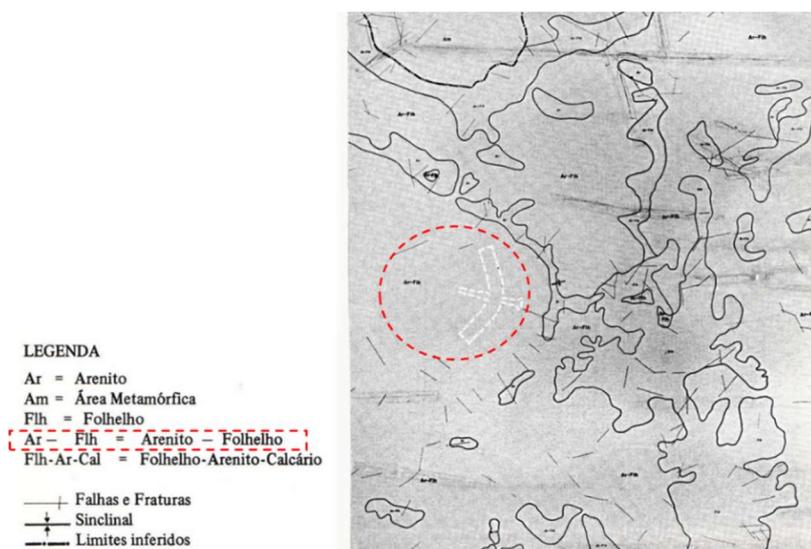


Figura 3.3 – Mapa de Geologia (modificado de Belcher, 1957).

O capítulo que trata de solos para engenharia é um dos maiores e mais detalhados do relatório, apresentando dados sobre as propriedades físicas, problemas de solo, erosão, exsudação, agregados, efeitos da estabilidade do solo na construção de estradas e aeroportos, classificação dos solos e utilização da terra; nos vários fotomosaicos, perfis de solo, tabelas e fotografias.

O Mapa de Solos para Engenharia (Figura 3.4) mostra um predomínio de argilas friáveis e solos lateríticos granulares; areias, margas arenosas e solos de cascalho quartzoso na região do Plano Piloto e adjacências (Belcher, 1957).

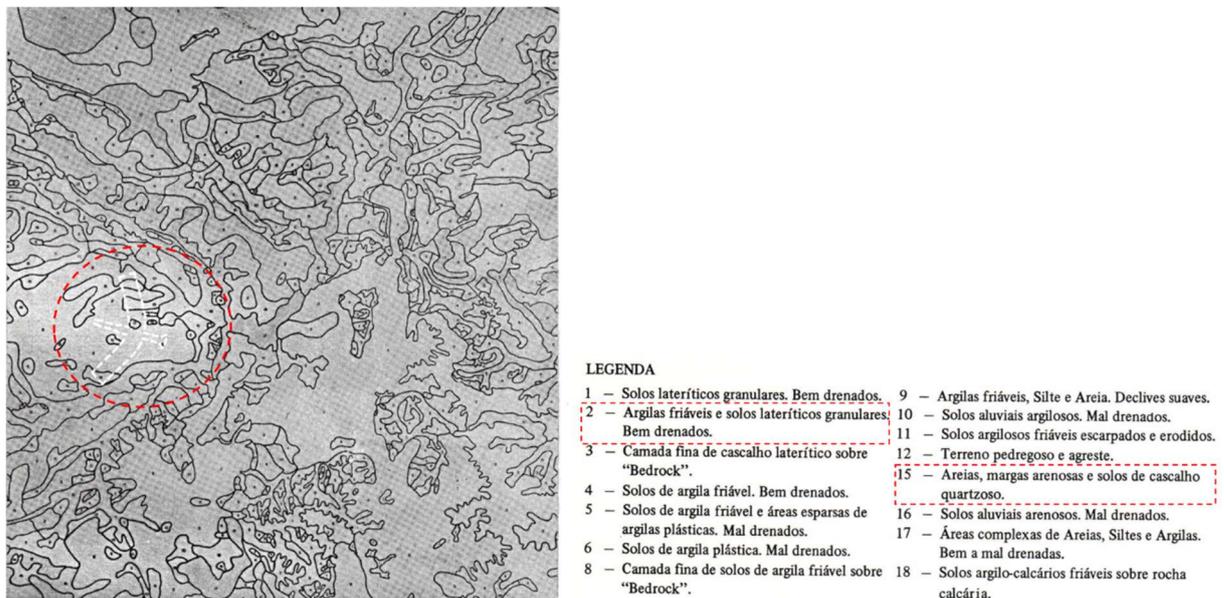


Figura 3.4 – Mapa de Solos para Engenharia (modificado de Belcher, 1957).

As argilas friáveis, segundo o relatório, são os solos mais encontrados no retângulo, principalmente nas áreas a Leste de Anápolis e, embora apresentem elevado teor de argila, podem ser considerados friáveis devido à intemperização que tende a reduzir sua plasticidade (Belcher, 1957).

3.1.2. EDITAL DO CONCURSO - PLANO PILOTO DA NOVA CAPITAL

O edital foi publicado em 20 de setembro de 1956. Segundo Carpintero (1998), tratava-se de um concurso de ideias pois, conforme o item 3 do referido documento, o Plano Piloto deveria abranger um traçado básico da cidade em escala 1:25.000 e um Relatório Justificativo.

O item 18 do Edital oferecia vasto material cartográfico, com boa precisão, feito segundo os dados levantados nas comissões supracitadas, especialmente do Relatório Belcher. Foram disponibilizados, dentre tantos, os seguintes documentos (Brasil, 1956; Costa, 1991):

- Mosaico aerofotográfico (escala 1:50.000) com curvas de forma a cada 20 metros;
- Mapas de drenagem;
- Mapas de geologia;
- Mapas de solos para obras de engenharia;
- Mapas de solos para agricultura, e;
- Mapas de utilização atual da terra; mapa topográfico regular, na escala de 1:25.000, com curvas de nível de 5 em 5 metros, executado por aerofotogrametria.

Entretanto, nem tudo estava definido para um projeto de Capital do País. Dessa forma encontram-se alguns esclarecimentos na carta resposta do então Diretor do Departamento de Urbanismo e Arquitetura da NOVACAP, Arquiteto Oscar Niemeyer, aos concorrentes do Concurso (Carpintero, 1998; Brasil, 1956; Costa, 1991):

- Ventos dominantes – predomínio Leste;
- Uma estrada de ferro deveria ligar Anápolis ou Vianópolis à Nova Capital;
- Deveria ser projetada uma estrada de rodagem entre Anápolis e Brasília;
- A represa (nível na cota 997 m), o hotel e o palácio residencial ficariam situados de acordo com a planta já fixada (nela constava, também, o aeroporto em construção), e;
- Densidade – previsão para 500.000 habitantes, no máximo.

O concurso encerrou-se em 10 de março de 1957 e o júri selecionou 10 dos 26 projetos apresentados. O plano de Lúcio Costa foi, segundo o júri, o mais adequado às circunstâncias específicas em que se propunha a mudança da capital (Figura 3.5).

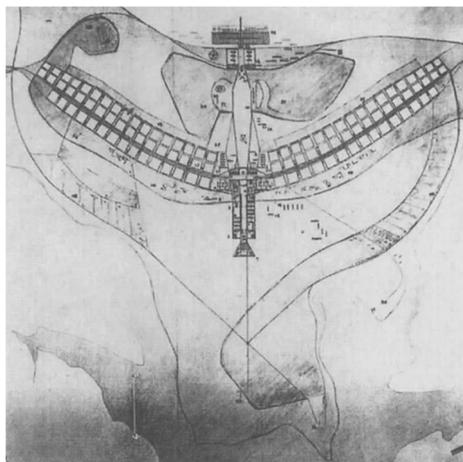


Figura 3.5 - Plano Piloto de Brasília: croqui apresentado no concurso (Costa, 1991).

Como críticas ao plano apresentado, a comissão levantou os seguintes pontos: havia muita área (solo) sem destinação entre a cidade e o lago, o aeroporto deveria ser mais afastado, as penínsulas deveriam ser utilizadas para habitação e não foi especificado o tipo de estradas regionais.

É importante ressaltar o modo como o urbanista locou a cidade na sua proposta tirando partido das condições topográficas do local de forma a minimizar o trabalho, tempo e os custos com movimento de terra, cortes e aterros durante a obra da cidade (Costa, 1991).

3.1.3. BRASÍLIA CONSTRUÍDA

Logo após o concurso, a Comissão Julgadora do Concurso e a Companhia Urbanizadora da Nova Capital do Brasil (NOVACAP) propuseram algumas modificações que alteraram a estrutura urbana da proposta vencedora e Brasília foi inaugurada em 1960.

Resumidamente, pode-se citar as mais impactantes (Costa & Lima, 1985): inicialmente só existiam as quadras 100, 200, 300 e 500 (foram acrescentadas as quadras 400, 600, 700 e 900) e a cidade teve que avançar em relação ao Lago Paranoá, pois a comissão julgadora achou que havia muita área sem uso específico entre a cidade e a orla do lago (Figura 3.6).

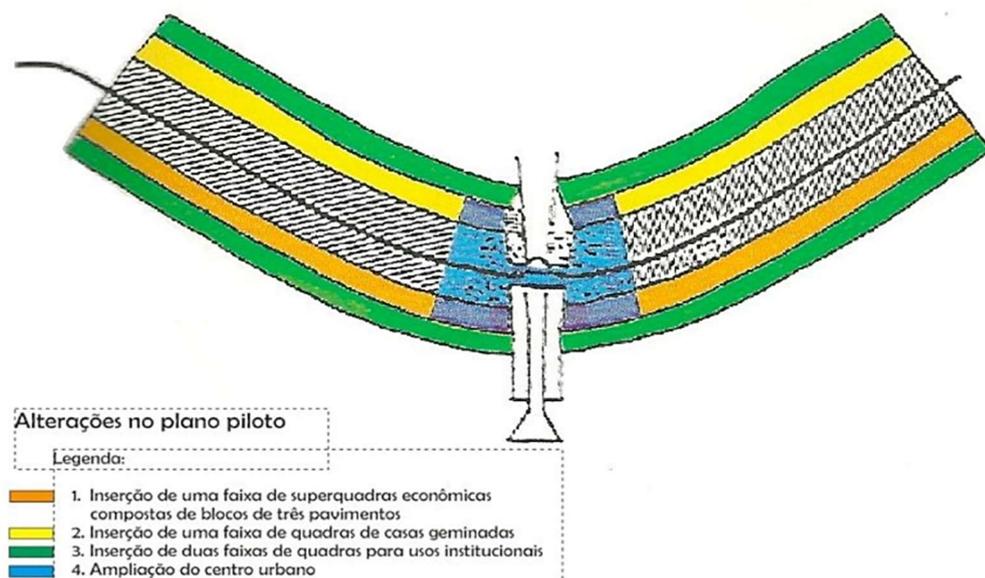


Figura 3.6 - Plano Piloto de Brasília – alterações realizadas (Costa & Lima, 1985).

A dinâmica urbana aconteceu de forma polinucleada. As cidades satélites, hoje denominadas Regiões Administrativas, com exceção do Núcleo Bandeirante e Guará, foram criadas fora da bacia do Lago Paranoá, seguindo orientações do Código Sanitário do DF, elaborado em 1964, de forma a preservar as características naturais da bacia.

Em 1978, o Plano Estrutural de Ordenamento Territorial (PEOT) foi criado, esse plano é considerado o marco inicial do macrozoneamento do DF, com propostas de cenários de longo prazo. Em seguida, foram elaborados o Plano de Ocupação Territorial do Distrito Federal (POT) em 1985, Brasília Revisitada 85-87 em 1987, Plano de Ocupação e Uso do Solo (POUSO) em 1990, Plano Diretor de Ordenamento Territorial (PDOT/92) em 1992, Plano Diretor de Ordenamento Territorial (PDOT/97) em 1997 e, atualmente, o Plano Diretor de Ordenamento Territorial (PDOT/2009), aprovado pela Lei Complementar nº 803, de 25 de abril de 2009, e atualizado pela Lei Complementar nº 854/2012 está vigente.

O POT/1985 buscou consolidar as propostas de macrozoneamento do PEOT e foi a base para a elaboração do Brasília Revisitada/1987, importante documento que serviu de referência para a declaração de Brasília como Patrimônio Cultural da Humanidade em 1987.

O POUSO/1990, por sua vez, propôs a divisão do DF em duas grandes classes de uso do solo: rural e urbano, inclusive utilizando a definição zona de expansão urbana para os cenários futuros.

Os planos PDOT/1992, PDOT/1997 e PDOT/2009 são posteriores à Constituição Federal de 1988 e, portanto, considerados obrigatórios enquanto Plano Diretor para cidades com mais de 20.000 habitantes. Atendendo ao Estatuto da Cidade, esses planos buscaram abordar questões do planejamento e gestão do território de forma integrada.

Poucos são os itens que tratam de questões geotécnicas nos planos diretores do DF. Na leitura do PDOT/2009 (SEDUMA, 2009), encontra-se um Mapa de Risco à Erosão elaborado a partir do cruzamento de dados pedológicos com dados de declividade para identificação de áreas suscetíveis à erosão (Figura 3.7).

Foram utilizados os mapas temáticos de pedologia (Mapa de reconhecimento dos Solos do DF/EMBRAPA-1978, Escala 1:100.000) e de Declividades do terreno (CODEPLAN-1989, Escala 1:100.000).

No mapa de declividades, foram destacados os intervalos mais íngremes (entre 10% e 20% e acima de 20%) e, no mapa pedológico, utilizaram-se os tipos de solo mais suscetíveis aos processos erosivos (na categoria de suscetíveis, os solos brunizem avermelhados; e na categoria de muito fortemente suscetíveis, os cambissolos e as areias quartzosas).

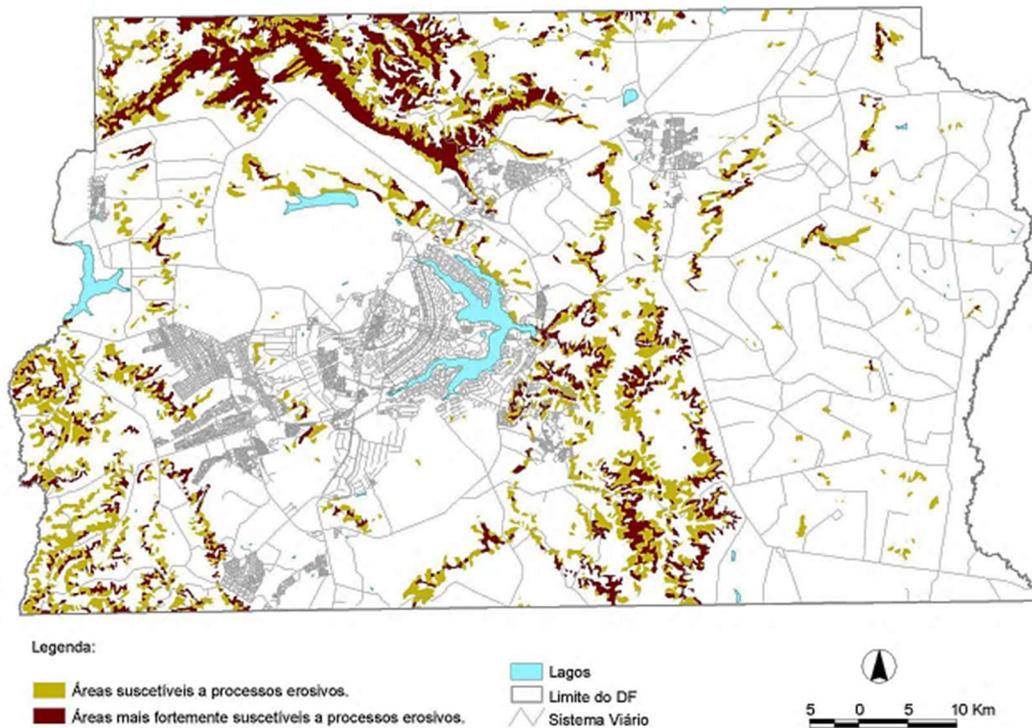


Figura 3.7 - Áreas de risco à erosão (SEDUMA, 2009).

Conforme mencionado no item 2.4.2 - Leis aplicadas ao Planejamento e Ocupação do Solo, o ZEE-DF (GDF, 2019) também elaborou um Mapa de Risco Ecológico de Perda de Solo por Erosão para o DF (mapa 6), com base no mesmo Mapa de Solos do DF (EMBRAPA, 1978) e nos dados de declividade das vertentes (SICAD, 2009). Como inovação, incluem-se os dados de erodibilidade do solo e tolerância do solo à erosão (EMBRAPA, 1978).

Os resultados de ambos podem ser comparados na Figura 3.8:

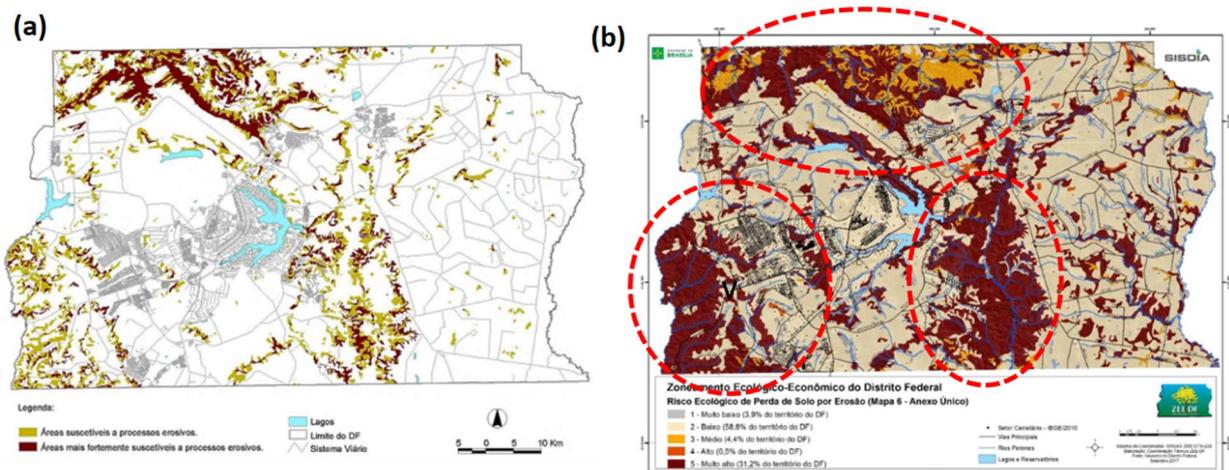


Figura 3.8 – Comparação entre mapas de suscetibilidade à erosão do solo no DF (modificado de SEDUMA, 2009 e GDF, 2019).

Observa-se, na Figura 3.8(a): Mapa do PDOT/2009, que a legenda da suscetibilidade à erosão do solo possui apenas 2 (duas) classes: áreas suscetíveis (em tons de sépia) e áreas mais fortemente suscetíveis (em tons marrons). Por outro lado, a Figura 3.8(b): Mapa elaborado no ZEE/DF em 2019, apresenta 5 (cinco) classes de sensibilidade dos solos à erosão que variam de muito baixo a muito alto, incluindo baixo, médio e alto risco ecológico.

Dessa forma, os resultados alcançados no mapa do ZEE/DF (GDF, 2019) apresentam maior número de regiões mapeadas com algum nível de suscetibilidade à erosão, especialmente nas áreas em destaque na Figura 3.8(b), classificadas como “Muito alto” na cor marrom escuro, ou seja, áreas mais suscetíveis aos processos erosivos.

3.2. SETOR HABITACIONAL TAQUARI

A área possui aproximadamente 34 km² e está localizada à Nordeste do Plano Piloto de Brasília na Região Administrativa do Lago Norte - RA XVIII (Figura 3.9).

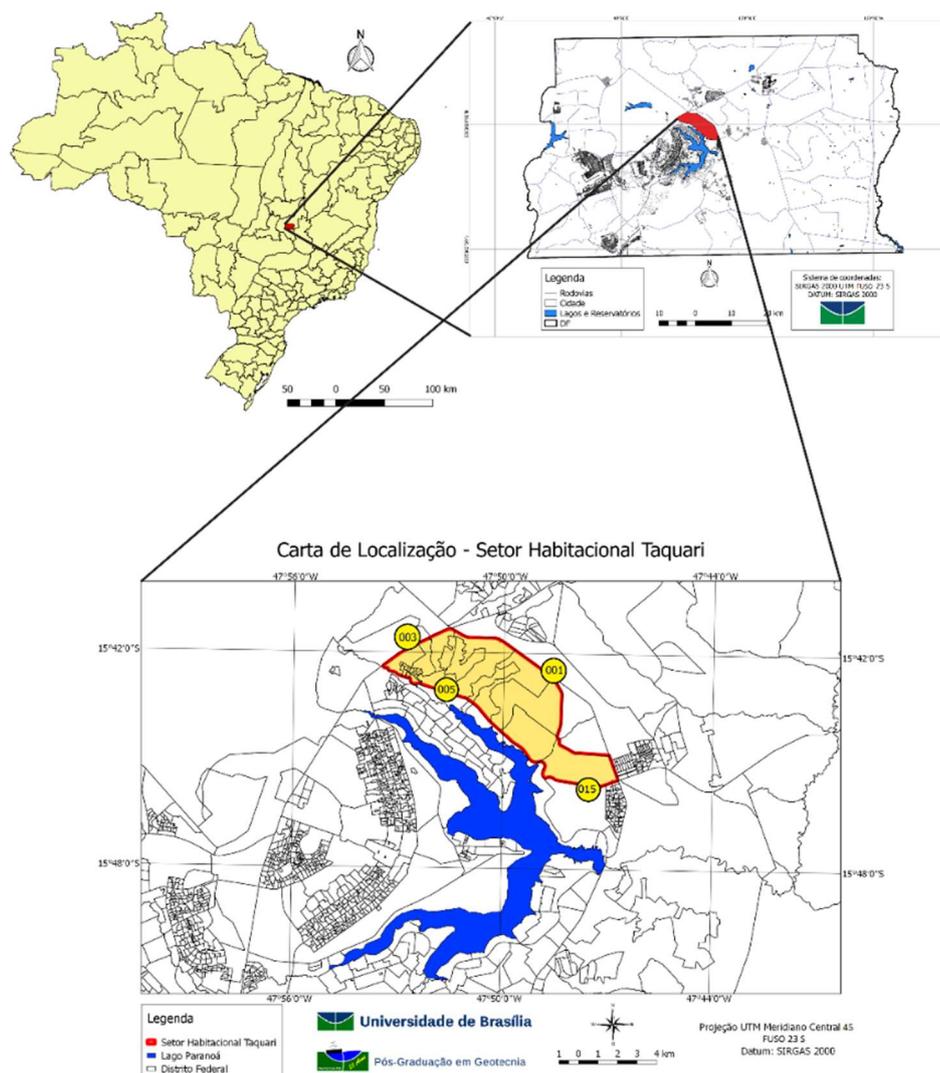


Figura 3.9 – Localização da Área de Estudo.

Limita-se a Sudoeste pela Estrada Parque Paranoá (EPPR) ou DF-005; a Noroeste pela Estrada Parque Indústria de Abastecimento (EPIA) ou DF-003; a Nordeste pela Estrada Parque Contorno (EPCT) ou DF-001; e a Sudeste pela Estrada Parque Tamanduá (EPTM) ou DF-015.

O acesso a partir do Plano Piloto pode ser feito pelas vias: EPIA ou DF-003, no seu trecho à Oeste; EPCT ou DF-001, no seu limite Norte, e a EPPR ou DF-005, pelo Sul.

A área de estudo está inserida em Zona Urbana de Uso Controlado 1, conforme estabelecido pelo PDOT/2009, sendo permitido o uso predominantemente residencial, de baixa densidade demográfica com comércio, prestação de serviços, atividades institucionais e equipamentos públicos e comunitários inerentes à ocupação.

A implantação do setor foi iniciada em novembro de 2002, quando a Companhia Imobiliária de Brasília (Terracap) promoveu a primeira licitação do Taquari, depois de ganhar na justiça a disputa pela posse das terras do Condomínio Hollywood.

O Taquari é dividido em duas áreas: Taquari I e II. A Etapa I está consolidada e a Etapa II está em estudo e implantação por parte do governo local. O Taquari I, com cerca de 14 km², é um setor predominantemente residencial, com comércio local e equipamentos públicos comunitários. Possui infraestrutura acessível a todos os lotes construídos com aproximadamente 2.900 moradores, atualmente.

A Figura 3.10 apresenta três momentos da implantação do Setor Habitacional Taquari (SHTq) com detalhe na Etapa I, atualmente consolidada.

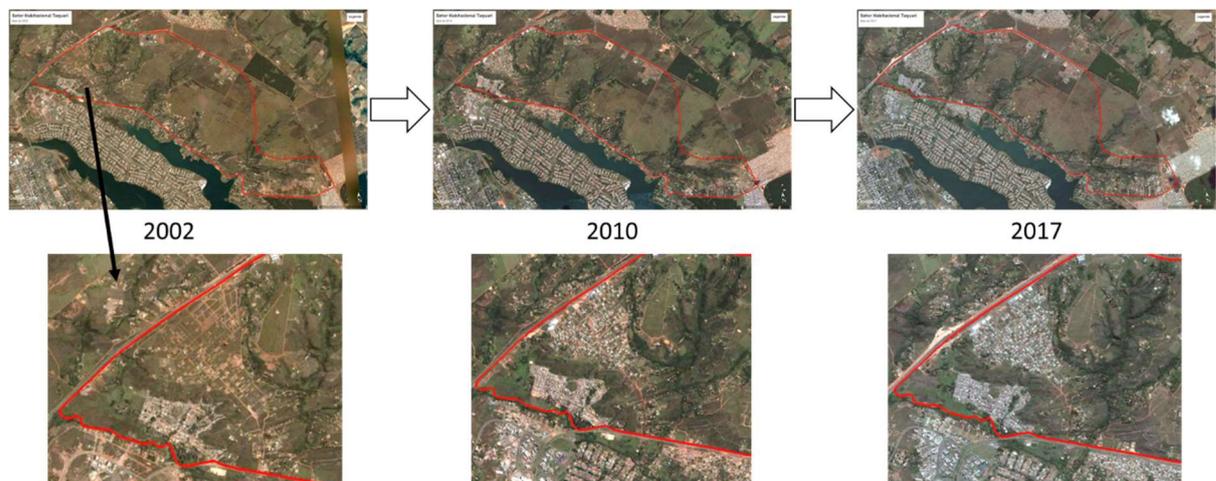


Figura 3.10 – Implantação do SHTq nos anos 2002, 2010 e 2017 (modificado de Google Earth Pro).

- Em 2002, início da implantação, a mancha urbana apresenta solo exposto e a fase inicial da abertura das vias de circulação.
- Em 2010 a mancha urbana da Etapa I mudou de textura e cor, de acordo com o estágio de implantação da infraestrutura e número de residências construídas e habitadas.

- Por fim, em 2017, o setor habitacional está mais desenvolvido e habitado e a coloração da mancha urbana apresenta menos tons de solo exposto e mais tons de cinza, próprios da representação de asfalto e impermeabilização do solo por construção de calçadas, edificações, estacionamentos e praças.

3.2.1. GEOLOGIA

As principais unidades litoestratigráficas do DF são os grupos Paranoá, Canastra, Araxá e Bambuí (Freitas-Silva & Campos, 1998; GDF, 2012).

A área em estudo está inserida no domínio geológico do Grupo Paranoá, com rochas metassedimentares relativas ao Neo-Proterozóico, xistos intercalados com quartzitos, argilitos e arenitos, dispostos em Unidades de Quartzito médio, Metarritmito arenoso e Ardósia (Martins *et al.*, 2004).

Como referência dos movimentos tectônicos é possível observar dobras na Unidade Metarritmito próximo à Torre Digital (Figura 3.11) - dobras que seguem o padrão estabelecido pela Faixa de Dobramentos Brasília (Freitas-Silva & Campos, 1998).



Figura 3.11 - Geologia - referência aos dobramentos na área.

Segundo Freitas-Silva & Campos (1998), o grupo Paranoá corresponde a uma sucessão psamo-pelito-carbonatada afetada por metamorfismo de baixo-grau preservando as estruturas sedimentares originais e depositada em condições plataformais, que se estende desde o Distrito Federal, a sul, até próximo da confluência dos rios Paranã e Tocantins no Estado de Goiás.

A Figura 3.12 apresenta o Mapa Geológico simplificado do DF (elaborado na escala 1:100.000), resultado do ZEE/DF em 2012, atualizado de Freitas-Silva & Campos (1998). A área de estudo está destacada na figura, como parte do Grupo Paranoá (MNPpa – Ardósias, MNPpq3 – Quartzitos médios e MNPpr3 – Metarritmito Arenoso).

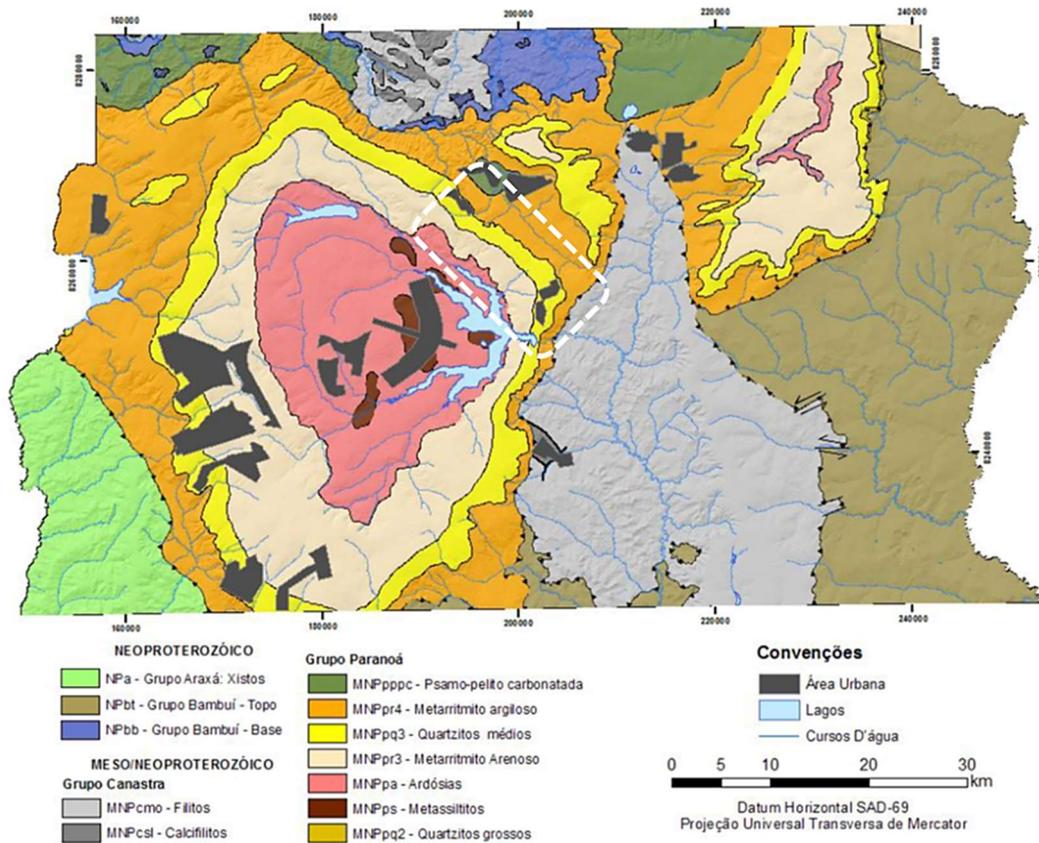


Figura 3.12 – Mapa geológico simplificado do DF (modificado de GDF, 2012).

3.2.2. GEOMORFOLOGIA

Belcher (1957) em seu relatório apresenta dois compartimentos de erosão, chamados de planos gerais da paisagem, um plano de erosão elevada e um plano de erosão inferior, inseridos em três estágios de sobre-elevação: chapada com bordas de lateritas; uma área de inclinação moderada; e, um terceiro compartimento: de ruptura abrupta de inclinação.

Como unidades de solo formados pela geomorfologia o Relatório Belcher (1957) apresenta 4 (quatro) unidades: argilas em processo de transformação em crostas (horizonte mosqueado); crostas celulares e conglomerados jaspeados (couraça); concreções soltas (horizonte de cascalhos lateríticos e linha de pedras) e concreções consolidadas (couraça nodular).

O Distrito Federal apresenta três tipos de paisagens ou unidades geomorfológicas: chapada, área de dissecação intermediária e região corrugada de vales fluviais. A depender de influências estruturais e litológicas, essas paisagens apresentam subtipos (Pinto, 1987; 1993):

- Região de Chapada - ocupa 34% da área do DF, caracterizada por topografia plana a plana ondulada acima da cota 1000 metros, as coberturas são formadas principalmente por couraças vesiculares/pisolíticas e latossolos (GDF, 2012).
- Área de Dissecação Intermediária - ocupa 31% do DF, corresponde às áreas fracamente dissecadas (GDF, 2012).
- Região Dissecada de Vale - corresponde à 35% do Distrito Federal, representada pelas depressões ocupadas pelos rios da região (GDF, 2012).

A Figura 3.13 apresenta uma proposta de compartimentação geomorfológica do Distrito Federal (elaborada na escala 1:100.000), publicada no ZEE-DF em 2012, adaptado de Novaes Pinto (1994) e Martins & Baptista (1998), citados por GDF (2012).

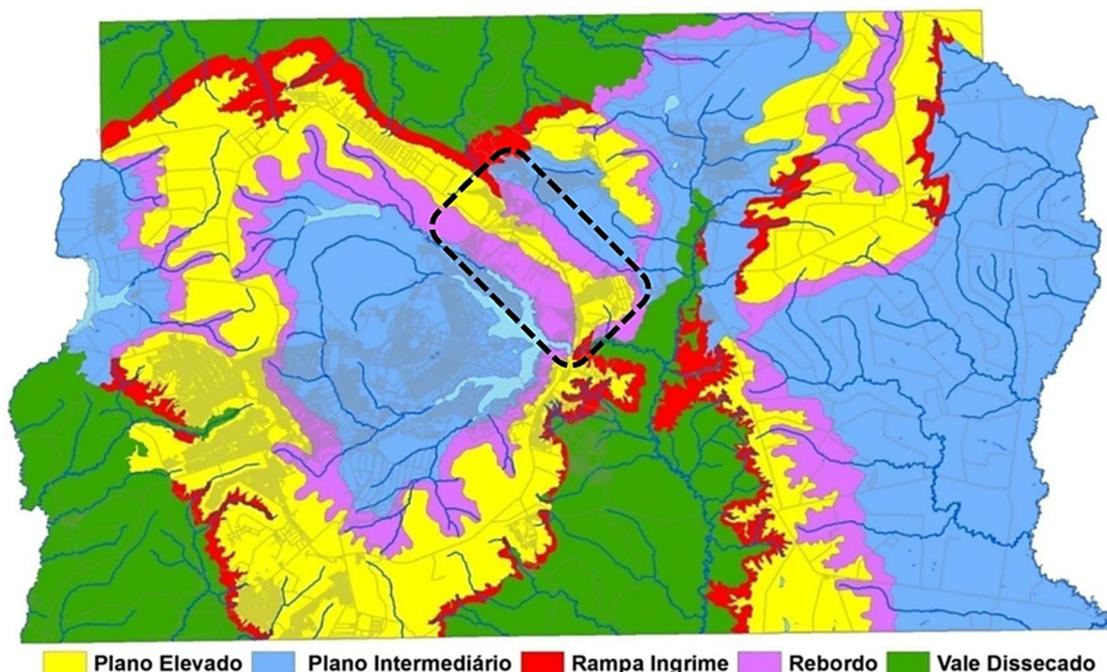


Figura 3.13 - Compartimentação geomorfológica do DF (modificado de GDF, 2012).

A área em destaque corresponde ao Setor Habitacional Taquari, ressaltando as formas de plano elevado (chapada) e rebordo:

- Plano Elevado (chapada), com padrão de relevo plano a suave ondulado, baixa densidade de drenagens, predominância de Latossolos, declividades inferiores a 10% e cotas superiores a 1.100m.

- Rebordo mostra padrão de relevo ondulado, moderada densidade de drenagem, predominância de Cambissolos, declividades entre 10 e 20% e cotas entre 950 e 1.100m.

Disso pode se inferir que a área estudada apresenta tendência à erosão dos solos e, caso o planejamento não observe a geomorfologia do rebordo, pode haver perda de solo e consequente geração de impactos ambientais. As áreas situadas nos compartimentos de vale dissecado e de rebordo se adequam melhor aos padrões de ocupação urbana de baixa intensidade, com infraestrutura adequada e técnicas de conservação dos solos priorizadas (GDF, 2012).

3.2.3. PEDOLOGIA

Conforme apresentado na Figura 3.14, a área de estudo em destaque tem sua superfície recoberta, basicamente, por latossolos vermelhos, latossolos vermelho-amarelos e cambissolos.

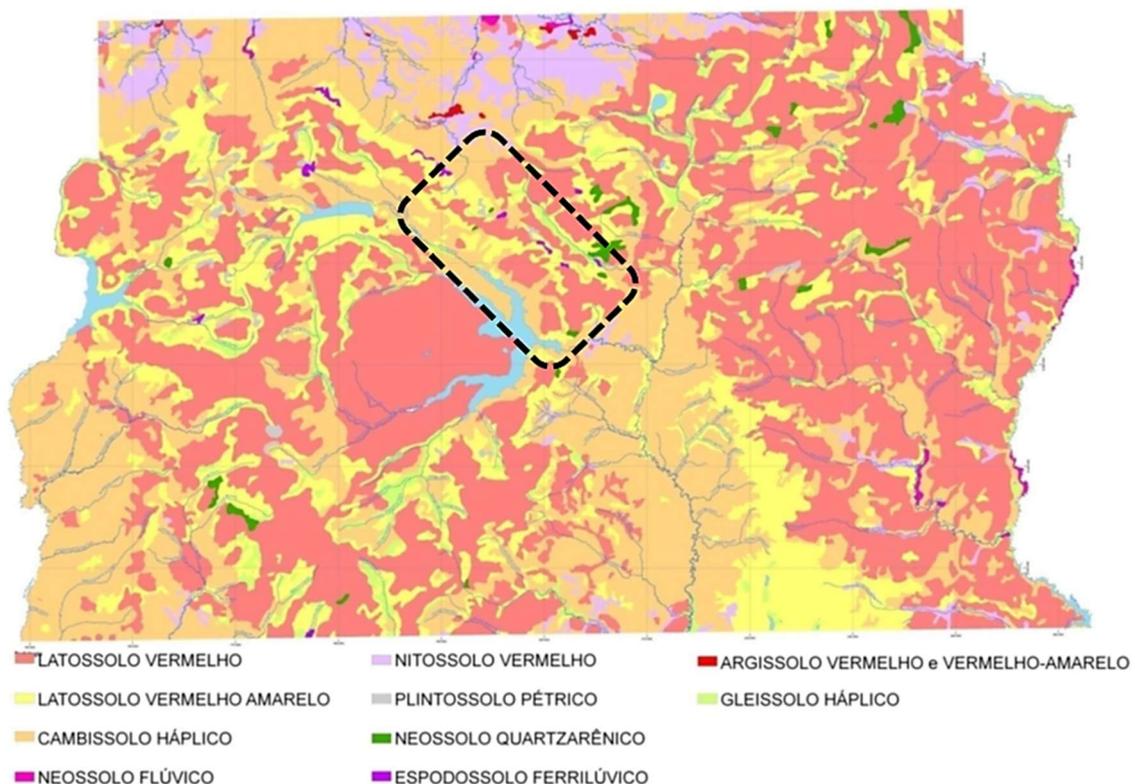


Figura 3.14 - Mapa pedológico do DF (modificado de GDF, 2012).

A Figura 3.14 corresponde ao Mapa pedológico do DF (elaborado na escala 1:100.000), apresentado no ZEE/DF em 2012, adaptado de Embrapa, (1978) com atualização da nomenclatura das classes conforme Embrapa (2006) (citados por GDF, 2012).

Segundo Reatto *et al.* (2004), os Latossolos são solos altamente intemperizados, resultantes da remoção de sílica e de bases trocáveis do perfil, concentrando minerais secundários do grupo da caulinita, óxidos, hidróxidos e oxi-hidróxidos de ferro e alumínio como hematita, goethita, gibbsita e outros, apresentando quartzo como mineral primário no perfil de alteração, tendo em vista a alta resistência desse ao intemperismo. Ocorrem predominantemente em residuais de superfícies de aplainamento (chapadas), de modo que na primeira superfície geomorfológica, a chapada, dominam aqueles mais intemperizados com maior porcentagem de óxidos de ferro e, principalmente, alumínio na forma de gibbsita, com matiz amarelado.

Na segunda superfície geomorfológica, o rebordo, ocorrem os Latossolos de origem de depósitos sedimentares, de maneira geral menos intemperizados, mais cauliniticos e vermelhos. Os Latossolos são profundos, com perfis superiores a 2 m, apresentando baixo teor de silte (10-20%) e teores de argila entre 15 e 80%, podendo ser excessivamente drenados, fortemente drenados e acentuadamente drenados, conforme a natureza da textura, da estrutura e da condição topográfica, possuindo alta permeabilidade de água. De acordo com o ZEE/DF (GDF, 2012), essa característica é responsável por uma maior resistência à erosão destes solos, que permitem qualquer tipo de uso urbano ou rural, com edificações de pequeno e médio porte, obras com pavimento em subsolo, instalação de sistemas de saneamento *in situ*, instalação de sistemas de recarga artificial dos aquíferos, caixas de dissipação de energia de águas pluviais, bacias de infiltração (de águas pluviais), agricultura irrigada, convencional ou em plantio direto.

Os Cambissolos são, segundo Reatto *et al.* (2004), solos que apresentam horizonte subsuperficial submetido a pouca alteração física e química, porém suficiente para desenvolvimento de cor e estrutura. Em geral, apresentam minerais primários facilmente intemperizáveis, teores mais elevados de silte, indicando baixo grau de intemperização. Estão associados a relevos mais movimentados (ondulados e forte-ondulados). Podem ser rasos ou profundos, com perfis variando entre 0,2 até 1 m. Apresentam coloração bruno-amarelada no horizonte superficial e vermelho-amarelada no subsuperficial, com estrutura bastante variável apresentando blocos subangulares, sendo observado em alguns perfis a presença de cascalho e material concrecionário, com textura variada, desde muito argilosa até franco-arenosa, com ou sem cascalho.

Conforme o ZEE-DF (GDF, 2012), os Cambissolos estão associados a uma vegetação de campo limpo, de modo que o alto teor de silte do horizonte A e a restrita profundidade do perfil fazem com que essa classe de solos tenha sua permeabilidade dificultada. A junção dessas características com as elevadas taxas de declividade nos locais onde esses solos ocorrem significam um sério empecilho à mecanização e os tornam mais susceptíveis à erosão, pois a

baixa permeabilidade agregada à ocorrência de chuvas torrenciais produz enxurradas que favorecem a formação de sulcos.

A Figura 3.15(a) apresenta um perfil em corte, localizado em encosta com forte declividade próxima à via EPPR, onde pode ser visualizado um exemplo de Cambissolo.

A Figura 3.15(b) exemplifica um perfil no qual pode ser visualizado um solo residual com cobertura concrecionária, correspondente a uma fotografia retirada ao lado da Torre Digital, situada em região de chapada, conforme descrição apresentada por Reatto *et al.* (2004).

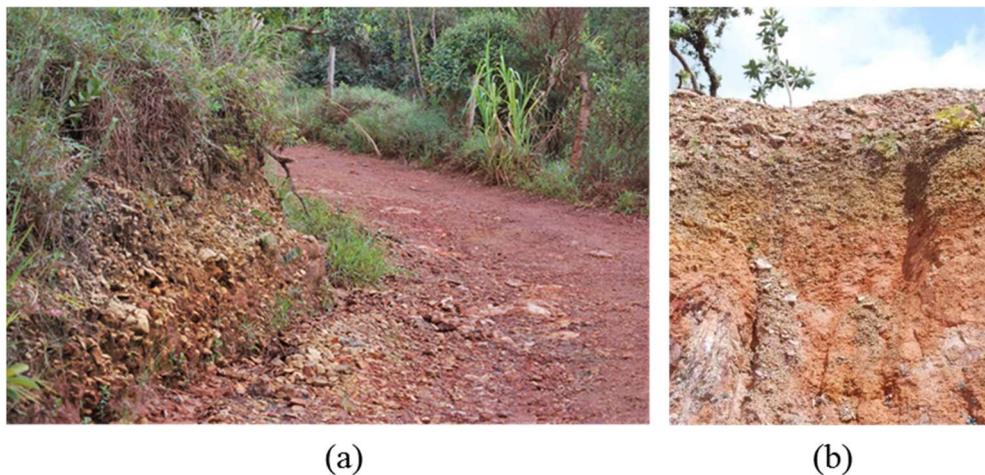


Figura 3.15 - Perfil de corte em cambissolo (a) e perfil de solo residual em Chapada (b).

3.2.4. VEGETAÇÃO

O limite da área de estudo está inserido no Bioma Cerrado que, segundo Ribeiro & Walter (2008), possui uma vegetação diversificada, dividida em três tipos fitofisionômicos principais: formações florestais, savânicas e campestres. A formação florestal se subdivide em Mata Ciliar, Mata de Galeria, Mata Seca e Cerradão; a formação savânica, em Cerrado Sentido Restrito, Parque de Cerrado, Palmeiral e Vereda; e a formação campestre, em Campo Sujo, Campo Limpo e Campo Rupestre.

O impacto do crescimento urbano ocorrido nos últimos cinquenta anos no DF é evidente, em estudo promovido pela Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO), denominado Vegetação no DF – Tempo e Espaço, constatou-se que aproximadamente 60% dos ambientes naturais de Cerrado existentes originalmente no DF foram convertidos em áreas antropizadas (UNESCO, 2002).

A Bacia do Lago Paranoá abriga alguns dos tipos fitofisionômicos descritos para o Cerrado. A Figura 3.16 é uma ilustração dos tipos de vegetação do bioma Cerrado (Agência de Informação Embrapa, 2014).

São descritos os tipos principais de vegetação para o bioma Cerrado, agrupados em formações florestais (Mata Ciliar, Mata de Galeria, Mata Seca e Cerradão), formações savânicas (Cerrado sentido restrito, Parque de Cerrado, Palmeiral e Vereda) e formações campestres (Campo Sujo, Campo Limpo e Campo Rupestre).



Figura 3.16 -Tipos de vegetação do Cerrado (Agência de Informação Embrapa, 2014).

A Figura 3.17 apresenta fotos tomadas na região, próxima da Torre Digital, nela pode-se observar a vegetação típica do Cerrado.



Figura 3.17 - Vegetação típica do Bioma Cerrado.

3.2.5. RECURSOS HÍDRICOS

No DF a geologia é caracterizada por rochas metamórficas, recobertas por espessos solos e observam-se três grandes grupos de aquíferos, que correspondem à classificação maior dos reservatórios subterrâneos de água: Domínio Aquífero Intergranular (ou Poroso), Domínio Aquífero Fraturado e Domínio Aquífero Físsuro-Cárstico (GDF, 2012).

No sistema poroso estão localizadas importantes áreas de recarga regionais dos aquíferos fraturados, distribuídos ao longo das chapadas. No aquífero fraturado a água subterrânea está armazenada ao longo de discontinuidades relacionadas a falhas, fraturas, juntas e diaclases. Este domínio é representado por sistemas de aquífero livres ou confinados, sendo responsáveis pelo armazenamento e circulação de águas subterrâneas profundas. (Campos & Freitas-Silva, 1998).

Na Bacia do Lago Paranoá ocorrem aquíferos do sistema poroso que recobrem os aquíferos fraturados do Sistema Paranoá. Os aquíferos do sistema poroso são do tipo intergranulares, normalmente associados aos latossolos.

A área de estudo está inserida na bacia hidrográfica do Lago Paranoá e dentro da área existem, ainda, subdivisões de bacias. As nascentes de córregos conhecidos pela população local dão nome aos Núcleos Rurais remanescentes, tais como Urubu, Sagui, Olhos d'água, Jervá, Palha, Taquari, Capoeira do Bálamo e Tamanduá (Figura 3.18).

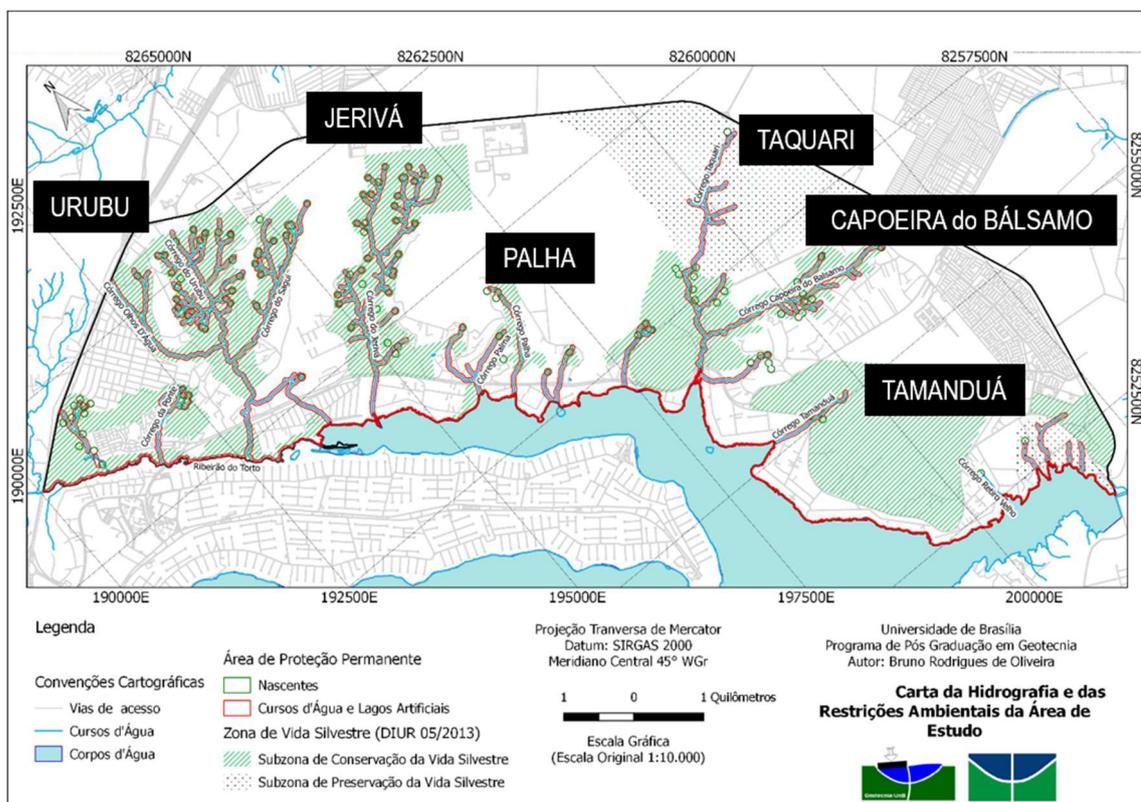


Figura 3.18 – Carta da Hidrografia e das restrições ambientais do Taquari (modificado de Oliveira, 2018).

Importante observar que existe uma APM (área de proteção de mananciais) na área de estudo, denominada APM Taquari, conforme observa-se na Figura 3.19 (IBRAM, 2014).

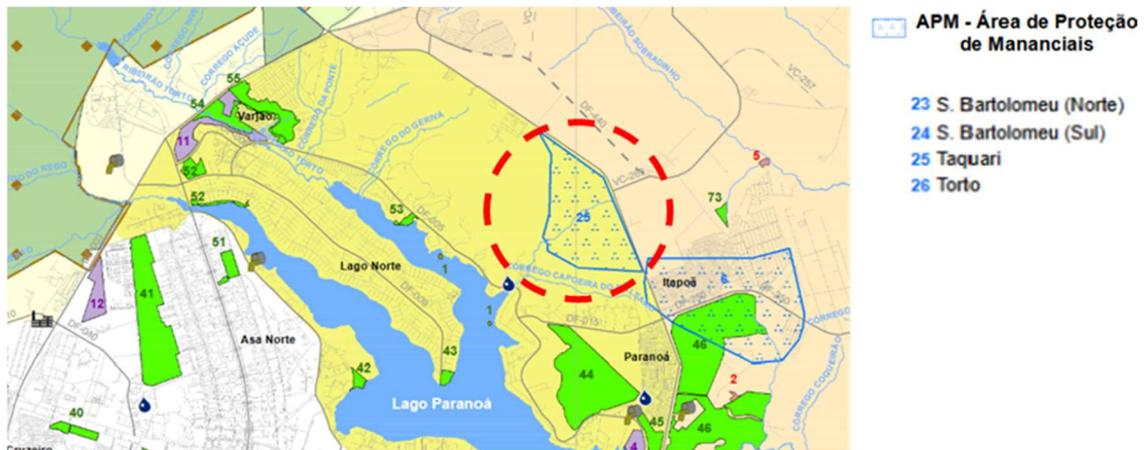


Figura 3.19 – APM Taquari (modificado de IBRAM, 2014).

Por esse motivo, a área da APM Taquari foi desconsiderada nas análises realizadas na pesquisa e os limites considerados para as áreas de estudo correspondem ao documento DIUR 05/2013.

3.2.6. SETOR HABITACIONAL TAQUARI – ETAPA II

A SEGETH/DF, criada por meio do Decreto nº 36.236, de 1º de janeiro de 2015, tem como competências o ordenamento, uso e ocupação do solo; o planejamento, desenvolvimento e intervenção urbana; a Gestão de Brasília como patrimônio cultural da humanidade e demais atribuições relacionadas com a habitação e licenciamento de atividades urbanas. Anteriormente denominada Secretaria de Habitação, Regularização e Desenvolvimento Urbano (SEDHAB), era o órgão responsável pelo planejamento urbano e territorial do DF e definia as diretrizes urbanísticas para novos parcelamentos urbanos, nos termos legais. Atualmente está denominada SEDUH/DF - Secretaria de Desenvolvimento Urbano e Habitação do DF.

O documento DIUR 05/2013, elaborado pela SEDHAB em outubro de 2013, apresenta as diretrizes iniciais para a região Setor Habitacional Taquari – Etapa II (SHTq II), com área aproximada de 21 km² (2.094,05 ha), que servirá como base para os projetos urbanísticos e planos de ocupação futuros (SEDHAB, 2013).

As diretrizes têm validade de 4 (quatro) anos, podendo ser reavaliadas se houver interesse público ou mudanças de legislação e fundamentam-se nas orientações do PDOT/2009 e do Zoneamento Ambiental da Área de Proteção Ambiental (APA do Lago Paranoá) - Decreto nº 33.537, de 14 de fevereiro de 2012.

As novas diretrizes para a área estão em fase de consulta pública, *on-line*, até setembro de 2019, conforme informações obtidas no site da SEDUH/DF.

Os primeiros estudos para o SHTq foram realizados entre 1989 e 1996 e revisados em 2006, sendo o SHTq dividido em duas etapas (Figura 3.20).

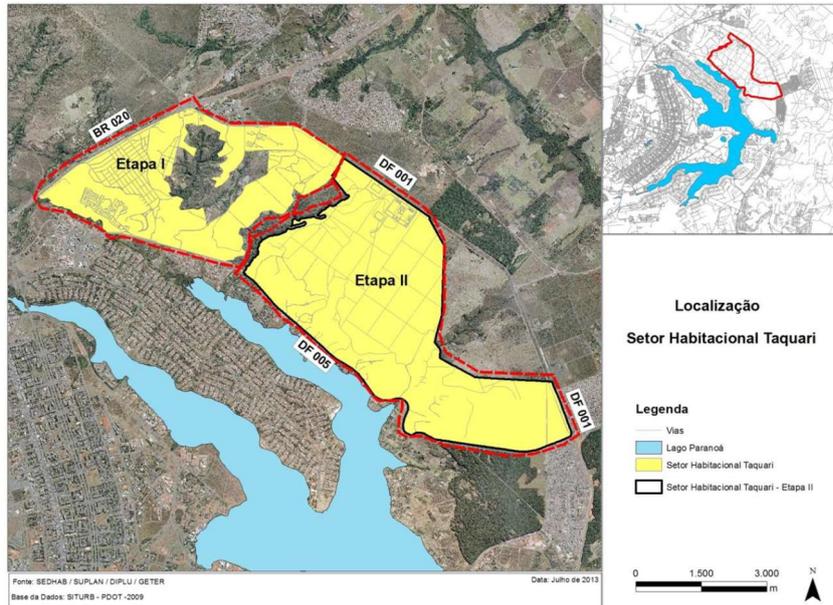


Figura 3.20 - Divisão e localização SHTq (SEDHAB, 2013).

A Etapa I abrange 32% da área e é constituída por três trechos, sendo que os trechos 1 e 2 estão consolidados, e o trecho 3 está em fase de aprovação de projeto. A Etapa II abrange 68% do Setor, sendo delimitada ao Sul pela EPPR, ao Norte pela EPCT, a Leste pela EPTM e a Oeste pelo Córrego do Jerivá.

A região SHTq II representa uma das últimas áreas de ocupação residencial próximas ao Plano Piloto (Figura 3.21).



Figura 3.21 – Características da ocupação no SHTq II (modificado de Google Earth Pro).

Conforme observado na Figura 3.21, a porção Nordeste é constituída por extenso plano elevado, com suave declive, sem ocupação, cercada e monitorada pela Terracap. Outra parte, direção Sudoeste rente à encosta da chapada, encontra-se ocupada com parcelamentos urbanos informais predominantemente destinados à população de alta e média renda

O SHTq II integra as Estratégias do PDOT de Oferta de Áreas Habitacionais e de Regularização Fundiária Urbana, seguindo orientações do texto Brasília Revisitada, citado anteriormente. Importante destacar que as áreas ocupadas com parcelamentos urbanos informais estão identificadas, em conformidade com o PDOT, como Área de Regularização de Interesse Específico (ARINE), conforme apresentado na Figura 3.22 (ARINE Taquari II e III).

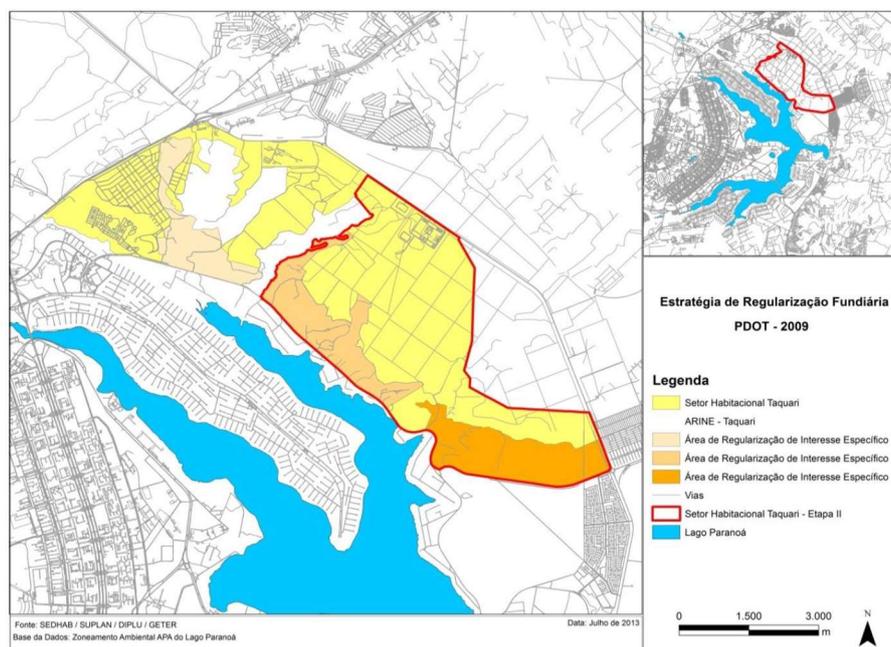


Figura 3.22 - Regularização fundiária SHTq (SEDHAB, 2013).

Em termos gerais, o planejamento do SHTq II baseou-se em dois elementos da estrutura urbana (Figura 3.23): a Avenida de Atividades, cujo objetivo principal é promover a centralidade urbana e os espaços verdes destinados para lazer e tentativa de preservação da vegetação típica do cerrado (SEDHAB, 2013).

Por outro lado, a proposta urbana integra o eixo multimodal de transporte denominado “nova saída norte” previsto no Plano Diretor de Transporte Urbano e Mobilidade do Distrito Federal (PDTU), Lei nº 4.566, de 04 de maio de 2013, com a implantação da 4ª ponte sobre o Lago Paranoá.

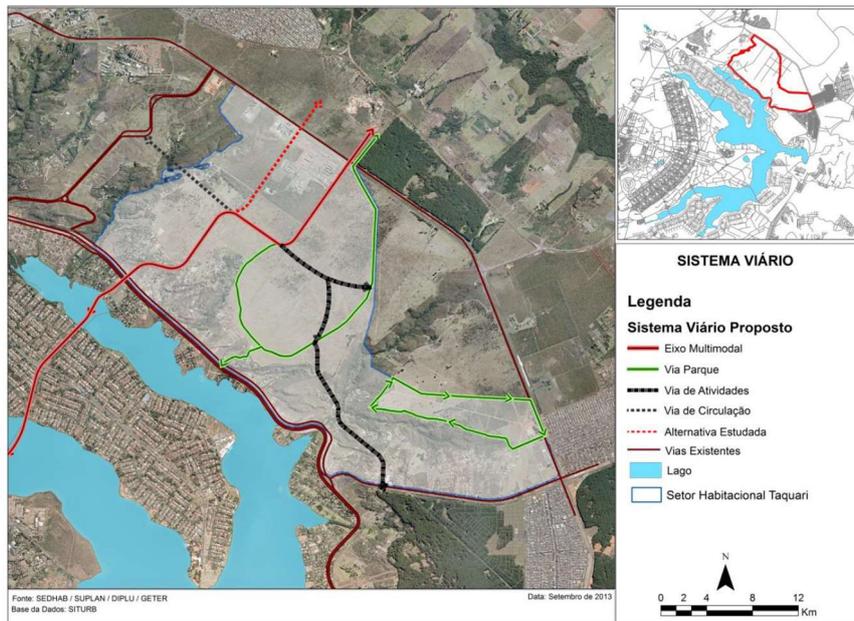


Figura 3.23 - Sistema Viário do SHTq (SEDHAB, 2013).

A região apresenta encostas e vales ambientalmente sensíveis que, em alguns casos, isolará determinadas áreas. Em função disso, serão necessárias algumas vias internas de ligação transpondo córregos e encostas íngremes com instalação de pontes.

Quanto ao zoneamento de uso (Figura 3.24), cabe ressaltar que as diretrizes apresentadas no documento são conceituais e não apresentam dimensões ou localizações precisas.

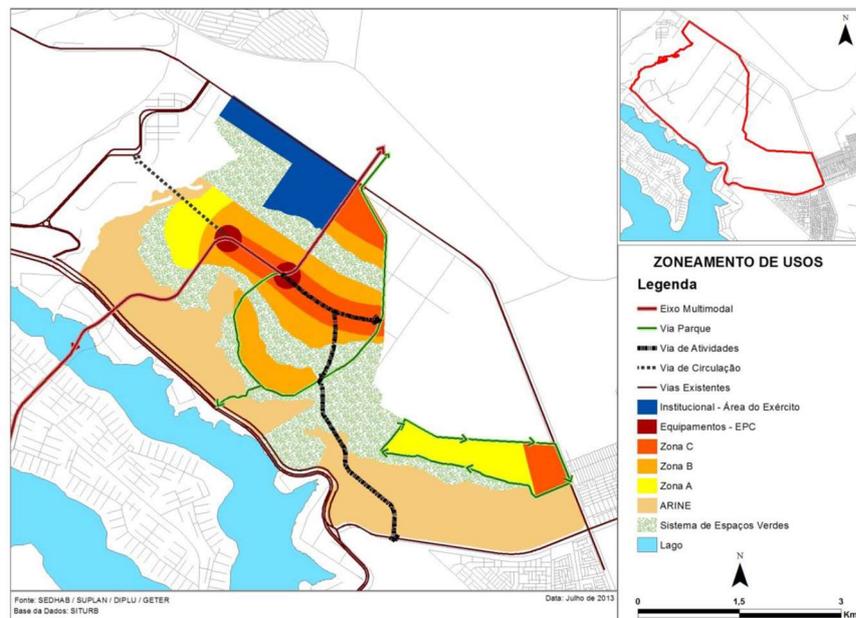


Figura 3.24 - Zoneamento de Usos do SHTq (SEDHAB, 2013).

A proposta de zoneamento servirá apenas como base para as fases posteriores de planejamento urbano, onde a avaliação geotécnica representa uma abordagem essencial sobre o meio físico e seus processos atuantes, sejam naturais ou induzidos. Observa-se que uma área merece destaque nesta análise resumida: trata-se da ARINE, estabelecida pelo PDOT/2009.

A ARINE está situada em terreno de encosta, com declives acentuados e em áreas que contornam ou estão nas proximidades das áreas de preservação permanente (APP). (SEDHAB, 2013). Por suas características naturais apresentam sensibilidade ambiental com risco de erosão e sua regularização levará em conta a proteção ao meio ambiente.

Outras áreas são destinadas às zonas residenciais, atividades econômicas, oferta de serviços e espaços verdes.

A Zona A corresponde às áreas limítrofes à ARINE e à Zona Rural de Uso Controlado, que por suas características morfológicas e condições de acesso deve ser destinada, preferencialmente, ao uso residencial unifamiliar ou multifamiliar.

A Zona B corresponde à área de relevo plano elevado de pouca declividade, portanto, deverá ser destinada preferencialmente ao uso residencial multifamiliar.

A Zona C destina-se à instalação de atividades econômicas não poluentes e geradoras de trabalho e renda.

O Exército Brasileiro possui atividades e organizações militares instaladas na zona Institucional – área do Exército Centro de Comunicações e Guerra Eletrônica do Exército (CComGEx) e Centro de Imagens e Informações Geográficas do Exército (CIGEx).

Por fim, o Sistema de Espaços verdes caracteriza-se por um mosaico de espaços livres de uso público, áreas verdes, parques urbanos e áreas ambientalmente protegidas. Estes espaços acomodarão diferentes usos e funções, como preservação e conservação dos recursos naturais, atividades lúdicas e de lazer, e de elementos da drenagem urbana (SEDHAB, 2013).

De acordo com o PDOT/2009, os parâmetros e diretrizes de ocupação do solo para o SHTq II correspondem a: densidade demográfica; percentual mínimo de equipamentos urbanos e comunitários e espaços livres de uso público; coeficiente de aproveitamento; taxa de permeabilidade mínima; e número de pavimentos para as edificações:

- Baixa densidade demográfica com valores de referência variando entre 15 (quinze) até 115 (cento e quinze) habitantes por hectare (ha), a depender da porção territorial, com valor médio de 50 (cinquenta) hab/ha. Considerando a área total do setor de aproximadamente 2.094,05 ha, a população máxima prevista será de aproximadamente 104.700 habitantes e, de acordo com a média de 3,3 moradores por domicílio apurada para o Distrito Federal (IBGE, Censo de 2010), a área

comporta o máximo aproximado de 31.700 unidades habitacionais (SEDHAB, 2013).

- Mínimo de 20% (vinte por cento) destinados às áreas públicas para a implantação de Equipamentos Urbanos e Comunitários e Espaços Livres de Uso Público, atendendo ao disposto nos anexos do PDOT/2009 (SEDHAB, 2013).

Importante observar que há uma recomendação para a realização de levantamento *in loco* das áreas com vegetação natural remanescente e com potencial para a implantação de Espaços Livres de Uso Público constituídos de áreas verdes. Esse item poderá ser realizado nesta pesquisa com o uso de aerolevanteamento com RPA e constitui, portanto, um dos objetivos durante a pesquisa.

- Coeficiente de aproveitamento máximo de 1,5 (um e meio) para os lotes do SHTq II, exceto para as ARINE, de acordo com a Estratégia de Oferta de Áreas Habitacionais do PDOT (SEDHAB, 2013).

Por definição, a taxa de permeabilidade corresponde ao mínimo percentual da área que não pode ser edificado ou pavimentado, permitindo a absorção das águas pluviais diretamente pelo solo e a recarga dos aquíferos subterrâneos.

- A taxa de permeabilidade definida para o setor deverá ser de, no mínimo, 20% para lotes destinados ao uso residencial e, para os usos restantes, deverá ser exigida taxa mínima de permeabilidade compatível com a taxa de ocupação. Nas áreas públicas, por exemplo, deverão ser garantidos o mínimo de 50% (cinquenta por cento) de áreas permeáveis (SEDHAB, 2013).

Quanto ao número de pavimentos, foram estipuladas três tipologias construtivas como padrões verticais, a saber: térreo mais 3 (três) pavimentos, térreo mais 6 (seis) pavimentos e térreo mais 2 (dois) pavimentos (Figura 3.25).

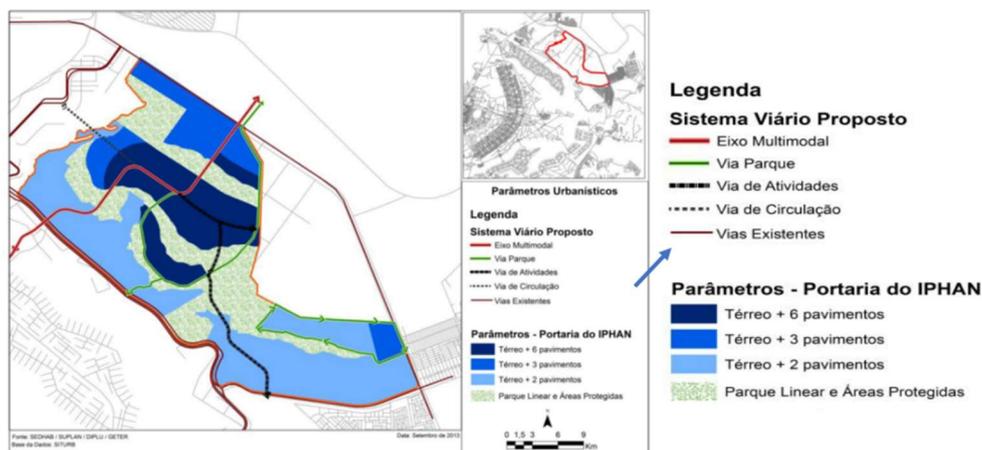


Figura 3.25 - Parâmetros Urbanísticos do SHTq (SEDHAB, 2013).

É permitida a construção de subsolo nas áreas do SHTq II. Devido ao relevo do terreno, que é caracterizado por uma encosta íngreme que contorna todo o lado oeste do setor, as diretrizes urbanísticas apresentadas ressaltam a importância de buscar soluções de drenagem e microdrenagem de forma a diminuir os impactos da urbanização no meio ambiente, seja diminuindo o nível dos alagamentos ou implantando alternativas de reuso das águas pluviais, cujo armazenamento dependerá de características de porosidade e percolação.

Outras medidas possíveis dizem respeito à redução do escoamento superficial das áreas impermeabilizadas, aumentando a infiltração através da utilização de pavimentos permeáveis, alocação de bacias de percolação ou trincheiras de infiltração como elementos de integração social dos espaços públicos, sugerindo a implantação de um projeto de drenagem urbana sustentável (SEDHAB, 2013).

Para finalizar, segundo o Decreto nº 33.537/2012 que dispõe sobre o zoneamento ambiental da Área de Proteção Ambiental (APA) do Lago Paranoá (Figura 3.26), no SHTq II incidem as diretrizes da Zona de Vida Silvestre, que é subdividida em duas subzonas: Preservação da Vida Silvestre – ZPVS (legenda em azul) e Conservação da Vida Silvestre – ZCVS (legenda em verde).

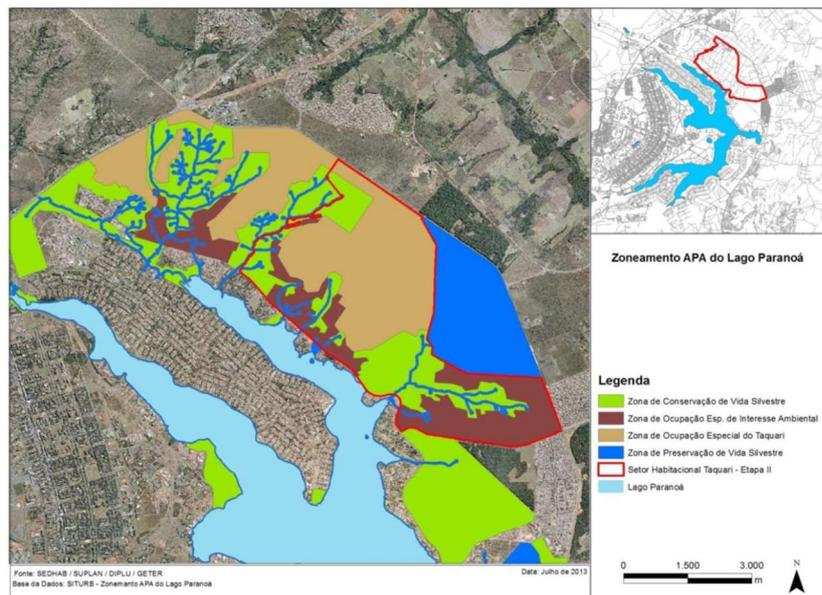


Figura 3.26 - Zoneamento APA Lago Paranoá (SEDHAB, 2013).

As demais áreas mapeadas, Zona de Ocupação Especial do Taquari (legenda em marrom claro) e Zona de Ocupação Especial de Interesse Ambiental (legenda em marrom escuro) são destinadas às moradias, comércio e outras atividades de acordo com a proposta de Zoneamento de Usos.

4. MATERIAIS E METODOLOGIA APLICADA

A pesquisa realizada pode ser classificada, quanto aos objetivos, como exploratória e descritiva. A natureza da pesquisa é aplicada, pois busca solucionar problemas específicos da Cartografia Geotécnica voltada ao planejamento urbano. A abordagem é quantitativa e, do ponto de vista dos procedimentos técnicos, também é bibliográfica, experimental e pesquisa de campo.

A metodologia do mapeamento geotécnico foi conduzida segundo a abordagem analítica, por meio da compreensão dos atributos do meio físico. A base conceitual da metodologia da pesquisa segue as premissas da Metodologia da Escola de Engenharia de São Carlos/EESC-USP proposta por Zuquette (1987) e aplicada por diversos autores e institutos de pesquisa. De acordo com Souza (1994), essa metodologia pode ser definida pelas etapas de Inventário, Diagnóstico ou Zoneamento Geotécnico, Prognóstico e, por fim, Proposição de ações de indução e orientações para ocupação (Figura 4.1).

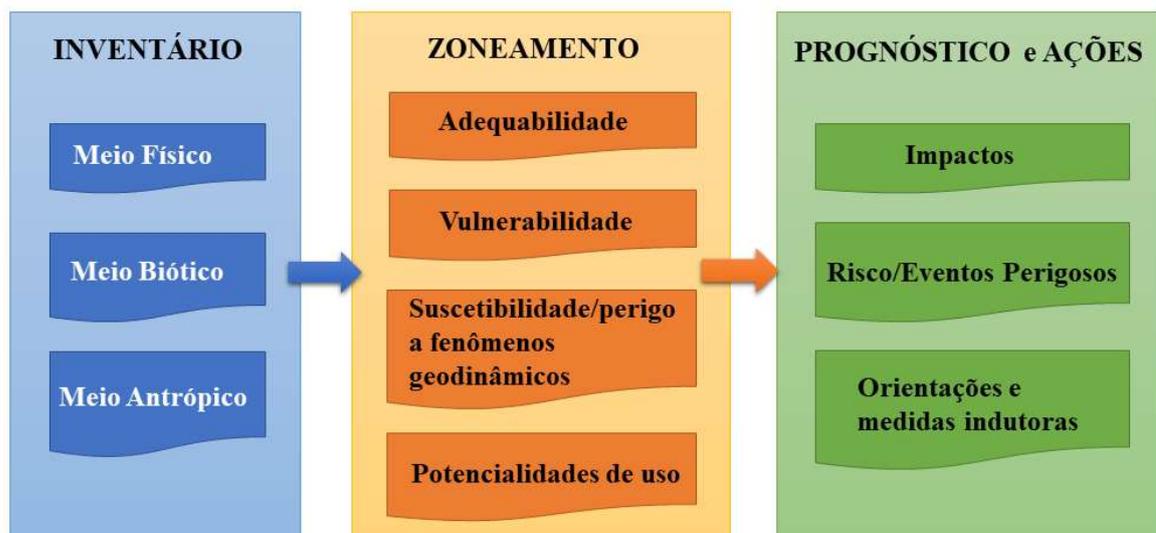


Figura 4.1 - Etapas metodológicas da Cartografia Geotécnica (modificado de Souza, 1994).

Por outro lado, segue também as recentes orientações apresentadas na Lei nº 12.608/2012, que estabelece a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil, mencionada na revisão bibliográfica, bem como baseia-se na Metodologia do Detalhamento Progressivo discutida e apresentada por diversos autores (Cerri *et al.*, 1996; Zaine, 2000; Sobreira & Souza, 2012; Souza & Sobreira, 2014; Bressani & Costa, 2015).

O IPT compilou as orientações e tópicos principais dessa metodologia no Guia Cartas Geotécnicas – orientações básicas aos municípios (Bitar *et al.*, 2015). Outras publicações

importantes que tratam do tema: Guia para elaboração de cartas geotécnicas de aptidão a urbanização frente aos desastres naturais (Souza & Sobreira, 2014) e Cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações: 1:25.000 (Bitar, 2014).

Conforme apresentado anteriormente, a Metodologia do Detalhamento Progressivo consiste em três fases sucessivas (Figura 4.2): Geral (escalas entre 1:50.000 e 1:25.000), Intermediária (escalas entre 1:25.000 e 1:10.000) e Detalhe (escalas maiores que 1:5.000). A etapa geral está relacionada com a suscetibilidade, a etapa intermediária diz respeito à aptidão à urbanização e a etapa de detalhe trata do risco associado aos assentamentos precários em áreas suscetíveis a processos do meio físico que podem gerar desastres (inundação, deslizamento, entre outros tantos), indicadas nas fases anteriores (geral e intermediária).



Figura 4.2 - Fases do Detalhamento Progressivo (modificado de Bitar *et al.*, 2015).

Dessa forma, a metodologia adotada na pesquisa busca atender às orientações recentes de acordo com a legislação federal de combate e prevenção de desastres e ordenamento territorial e baseia-se nos trabalhos propostos e apresentados por Zuquette (1987), tendo como originalidade a utilização conjunta de dados obtidos por aerolevanteamento com RPA, processamento geoespacial em plataforma baseada em nuvem (GEE) e a integração com o Sistema de Análise Quantitativa de Risco por Escorregamentos Rasos Deflagrados por Chuvas em Regiões Tropicais proposto por Azevedo (2015), denominado *RiskLab: Risk-Landslide-Laboratory*.

A metodologia aplicada foi dividida em três fases, além da fase preliminar destinada ao inventário, conforme apresentado na Figura 4.3, a saber:

1. Fase I - Geral: Critérios de Suscetibilidade.
2. Fase II - Intermediária: Critérios de Aptidão à Urbanização.
3. Fase III – Detalhe: Critérios de Risco.



Figura 4.3 – Etapas e fases da Metodologia aplicada.

4.1. MATERIAIS

Os materiais utilizados na tese podem ser divididos em produtos cartográficos, imagens de sensoriamento remoto, programas computacionais e equipamentos, conforme especificado a seguir.

4.1.1. PRODUTOS CARTOGRÁFICOS

- Base Cartográfica do DF - Desenvolvida na escala 1:10.000 com projeção UTM (Fuso 23S) e Datum SIRGAS 2000, em arquivo do *software* AutoCAD (*dwg*).
- MDE e ortomosaicos resultantes dos aerolevamentos (projeto μ VANT/UnB).
- MDE/SRTM/DF - MDE resultante da Missão Topográfica Radar Shuttle (SRTM) com resolução horizontal de 30 m, Datum WGS84.
- Mapas Temáticos de características físicas do DF (escala 1:100.000): Geologia (Freitas-Silva & Campos, 1998), Geomorfologia (GDF, 2012) e Solos (Embrapa, 1978).
- Mapas do ZEE-DF versões 2012 e 2019 (GDF, 2012; 2019), em formato PDF: mapas de Risco de Contaminação do Subsolo no DF; Risco de Perda de Recarga de Aquífero no DF; Risco de perda de Áreas Remanescentes de Cerrado Nativo no DF; Risco de Perda de Solo por Erosão no DF.
- Diretrizes Urbanísticas SEGETH-DF – imagens de mapas e cartas disponíveis no documento DIUR 05/2013 (SEDHAB, 2013).

4.1.2. IMAGENS DE SENSORIAMENTO REMOTO

- Imagens de Satélite do Landsat 8: sensores TIRS e OLI, projeção UTM e Datum WGS84. Resolução espacial 30 e 15m. Data: 21 de julho de 2016.
- Imagens de Satélite do Sentinel 2A: resolução espacial (10, 20 e 60 metros) com 13 bandas espectrais e resolução radiométrica de 12 bits. Data: 09 de março de 2017.
- Imagens do CBERS-4: resoluções espaciais que variam de 5 a 80 metros. Datas 24 de julho e 14 de setembro de 2016.
- Imagens do satélite *RapidEye*: resolução espacial de 5 m, resolução radiométrica de 12 bits. Data 11 de agosto de 2013.
- Imagens do satélite ALOS (*Advanced Land Observation Satellite*) de responsabilidade da JAXA (*Japan Aerospace Exploration Agency*): Data: agosto de 2009 e sensores AVNIR-2 (*Advanced Visible and Near Infra-red Radiometer type 2*) com resolução espacial de 10m; e PRISM (*Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping*) com resolução espacial de 2,5m.

As fontes de acesso às imagens estão descritas nos subitens 2.1 e 2.1.1.

4.1.3. PROGRAMAS COMPUTACIONAIS UTILIZADOS

- SPRING - versões 5.4.3. e 5.5.5.
- QGIS 2.18 - utilizado principalmente para georreferenciar imagens, vetorizar imagens e gerar subprodutos a partir do MDE/SRTM.
- *Google Earth Pro* v7.1.1871 - auxiliar no processo de treinamento da classificação das imagens para a criação de cartas de uso e cobertura do solo.
- *RiskLab* (Azevedo, 2015).
- Microsoft Excel 2016.
- Plataforma GEE (*Google Earth Engine*).

O QGIS é um *software* SIG de código aberto, funciona em Linux, Unix, Mac OSX, Windows e Android e suporta vários formatos de vetores, *rasters* e bases de dados. Foi lançado em 2002 e a versão atual é a 3.8.1 (QGIS 3.8 Zanzibar). Em relação ao SPRING (Câmara *et al.*, 1996), a versão 5.4.3 foi utilizada para a importação dos *layers* específicos (dados vetoriais) da base cartográfica digital do DF, disponível em arquivo do AutoCAD (*dwg*), e a versão mais recente (5.5.5) para os demais procedimentos da metodologia.

4.1.4. EQUIPAMENTOS

- Microcomputador com CPU i5 2300 2.8GHz, 16 GB DDR3 de memória RAM, placa mãe Asus P8H67-M, placa gráfica Nvidia Quadro 600 e disco rígido Samsung HD103SJ com Sistema Operacional Windows 7 Professional.
- Notebook ASUS S46C: Processador Intel® Core™ i7 3517U; memória DDR3 1600 MHz SDRAM, 8 GB; placa gráfica NVIDIA® GeForce® GT 635M com 2GB DDR3 VRAM.

4.1.5. MATERIAIS UTILIZADOS NO AEROLEVANTAMENTO COM RPA

Neste item descrevem-se os materiais utilizados na obtenção e processamento de dados por aerolevanteamento com RPA disponíveis no Projeto μ VANT-UnB e, portanto, segue resumidamente os tópicos a seguir:

- **Materiais e dados externos**
 - Pontos de controle: alvos em papel (GCP) e piquetes de madeira maciça.
- **Programas computacionais utilizados**
 - PVL – *software* de elaboração de planos de voo - Projeto μ VANT-UnB / Prof. Lenildo Santos da Silva (Silva, 2019);
 - Mission Planner - *software* de código aberto e gratuito, desenvolvido para suporte e controle dinâmico da aeronave;
 - PoeCoordExif – *software* para gravar coordenadas geográficas nas fotos obtidas no aerolevanteamento - Projeto μ VANT-UnB / Prof. Lenildo Santos da Silva (Silva, 2019);
 - Agisoft Photoscan – *software* utilizado no processamento dos dados obtidos para geração de ortofotomosaico e MDE (Projeto μ VANT-UnB);
 - Google Earth Pro v7.1.1871 – utilizado na fase inicial do planejamento da missão de aerolevanteamento, e;
 - *GNSS Solutions* – (www.spectravision.com): *software* com as ferramentas necessárias para processar dados de pesquisa e aquisição nos sistemas GPS, GLONASS e SBAS, nas fases de planejamento, processamento, controle de qualidade, relatórios e exportação de dados.

- **Equipamentos**

- Aeronave Remotamente Pilotada – modelo asa fixa (Projeto μ VANT-UnB).
- Aeronave Remotamente Pilotada – modelo *Phantom 4* (Projeto μ VANT-UnB).
- GPS topográfico – modelo *Ashtech ProMark2* - frequência simples (L1) (Programa de Pós-Graduação em Geotecnia/UnB).
- GPS portátil etrex10, marca *Garmin*.
- Microcomputador com CPU i7-4770 3.40GHz, 32 GB DDR3 de memória RAM, placa gráfica Nvidia GeForce GTX 650 e SSD 1 TB com Sistema Operacional Windows 7 Professional (Projeto μ VANT-UnB).

4.2. METODOLOGIA APLICADA

Conforme mencionado, a metodologia aplicada na tese engloba as fases de inventário, diagnóstico ou zoneamento geotécnico, prognóstico e proposição de ações de indução, bem como orientações para uso e ocupação do solo. Não menos importante, busca atender às orientações propostas pela lei que estabelece a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (Lei nº 12.608/2012).

O fluxograma a seguir demonstra, de forma resumida, a representação esquemática da execução da metodologia em **seis** etapas principais: Montagem da Base Cartográfica, Aerolevantamento com RPA, Processamento de MNT, Processamento Digital de Imagem, Processamento de dados no *RiskLab* e Operações Cartográficas (Figura 4.4).

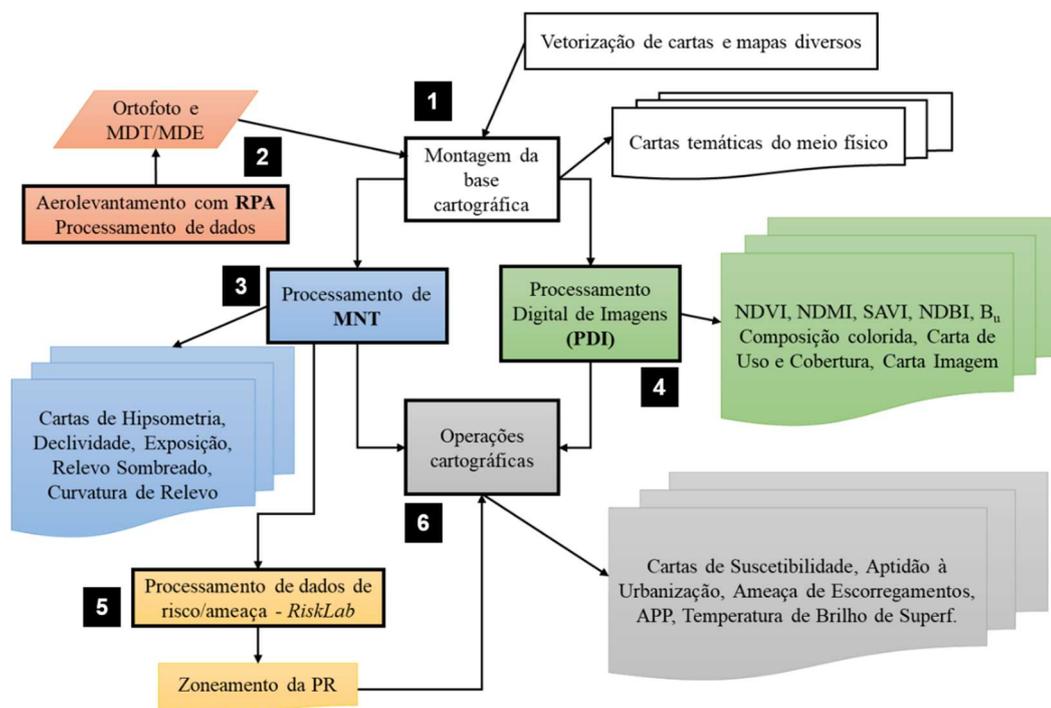


Figura 4.4 – Metodologia do Mapeamento Geotécnico.

Em relação ao Aerolevantamento com RPA, o fluxograma na Figura 4.5 apresenta a execução da metodologia em três etapas principais: Planejamento do voo, Execução do voo e Processamento dos dados obtidos.

Alguns processos e ações específicas das fases mencionadas podem ser realizados em campo ou em escritório; enquanto outras, obrigatoriamente, são realizadas em campo, a exemplo do georreferenciamento dos pontos de controle e execução do voo.

No caso do sobrevoo sem a utilização dos pontos de controle/alvos, a metodologia é a mesma, com exceção dos itens relativos à materialização, colocação e georreferenciamento dos alvos (Figura 4.5).

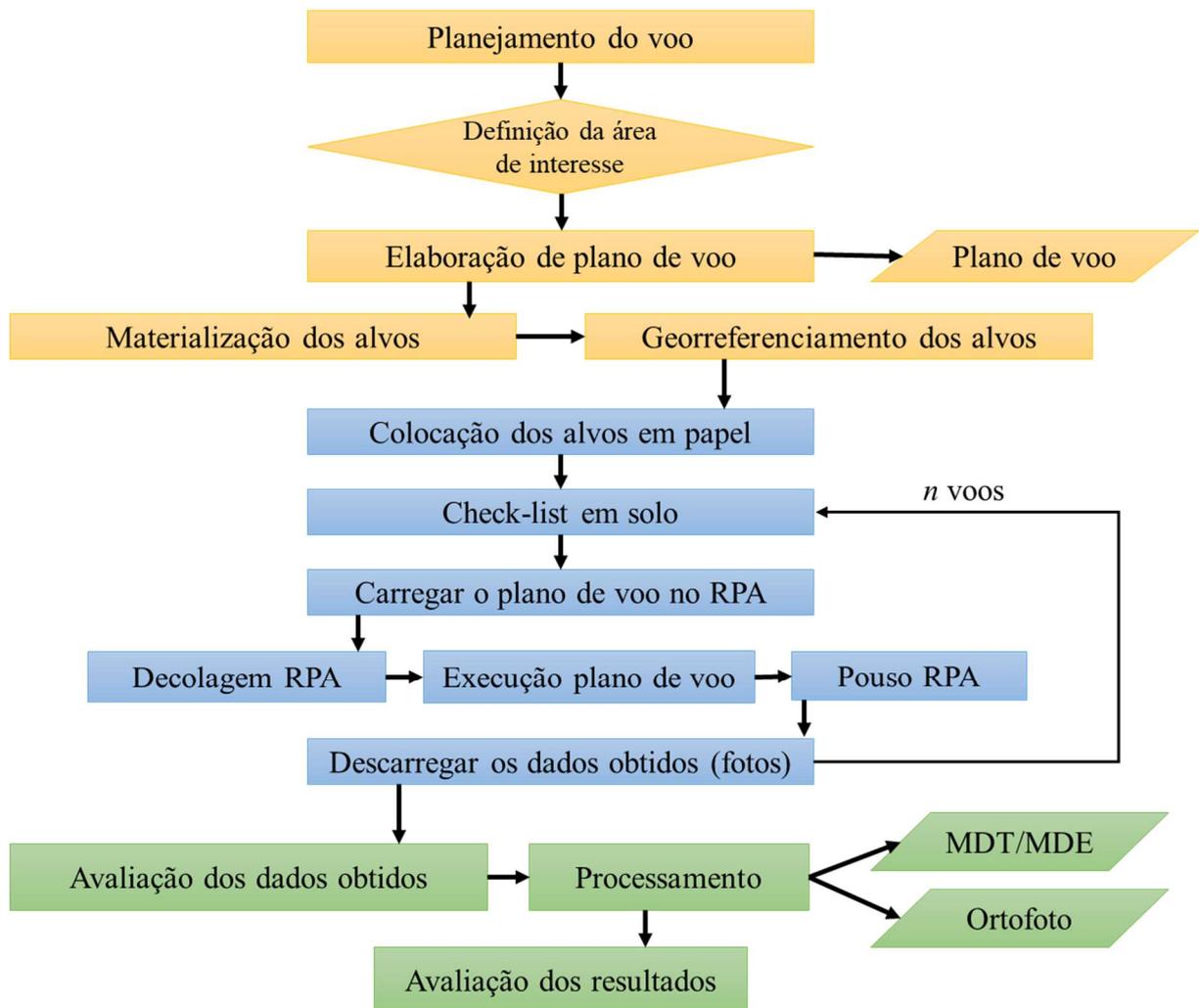


Figura 4.5 - Fluxograma do aerolevantamento com RPA.

Com os resultados gerados (ortofotomosaico e MDT/MDE) seguem as ações de Processamento de MNT e Processamento Digital de Imagens (PDI) nos softwares SPRING e QGIS, segundo o que foi apresentado na Figura 4.4.

4.2.1. FASE PRELIMINAR: INVENTÁRIO

Fase inicial da metodologia, abordando o inventário dos meios físico, biótico e antrópico. Os produtos cartográficos gerados nessa fase apresentam escala 1:25.000 e abrangem a área do SHTq Etapas I e II (ver Figura 4.6). Objetivou-se inventariar os dados relacionados aos meios físico, biótico e antrópico e montar a base cartográfica utilizada na pesquisa.

As coordenadas do retângulo envolvente são (Tabela 4.1):

Tabela 4.1 - Coordenadas do Retângulo Envolvente da área de estudo: Fase Preliminar

Coordenadas do retângulo envolvente (GMS)			
Long1	47°51'54.29"O	Long2	47°47'38.54"O
Lat1	15°40'24.98"S	Lat2	15°47'29.02"S



Figura 4.6 – Área de abrangência da Fase Preliminar (Google Earth Pro).

Passos metodológicos dessa fase, de forma resumida:

- Criação do Projeto e Montagem da base cartográfica:
 - importação de curvas de nível;
 - sistema viário;
 - drenagens, e;
 - dados matriciais.
- Operações de Modelo Numérico de Terreno (MNT) para geração de Redes de Triangulação Irregular (TIN), Grade retangular e Modelo Digital de Terreno (MDT) a partir dos dados de SRTM (Missão Topográfica Radar *Shuttle*) e da Base Cartográfica do DF em escala 1:10.000.

- Geração de produtos derivados do MNT, tais como Carta de Hipsometria, Carta de Declividade, Carta de Orientação de Vertentes, Carta de Relevo Sombreado, Carta de Curvatura de Relevo (Zevenbergen & Thorne, 1987).
- Processamento Digital de Imagens (PDI) para geração de Índice de Vegetação (NDVI, SAVI), Índice de Umidade (NDWI), Índice de Áreas Construídas (NDBI, B_u), Componentes Principais, Composições Coloridas, Fusão IHS-RGB, Imagem Segmentada e Carta de Uso e Cobertura do Solo (imagem classificada).

Alguns dos procedimentos acima foram realizados de forma otimizada ou incrementada com a utilização do SIG GEE.

4.2.1.1. MONTAGEM DA BASE DE DADOS

- **Criação do Banco de Dados**

No programa SPRING (versão 5.4.3), o passo inicial consiste na criação e ativação de um banco de dados, em seguida procede-se a criação de um projeto que, nesse caso, foi denominado TAQUARI_GERAL.

Os dados para criação do projeto foram:

- Retângulo envolvente:
 - Long1: 48°19'42" O, Long2: 47°46'20" O
 - Lat1: 16°06'36" S, Lat2: 15°26'56" S
- Projeção UTM/Datum SIRGAS 2000.
- Meridiano Central 45° WGr, Fuso 23S.

Após a criação do projeto, ele deverá ser ativado.

- **Criação das Categorias de Modelo de Dados**

Para acomodar os dados que serão importados ou criados no SPRING é necessário criar categorias de Modelo de Dados, conforme o tipo de dado, a saber:

- a. Temático;
- b. Cadastral;
- c. Rede;
- d. MNT, e;
- e. Imagem.

Foram criadas diversas categorias durante o desenvolvimento da pesquisa, conforme apresentado na Figura 4.7.

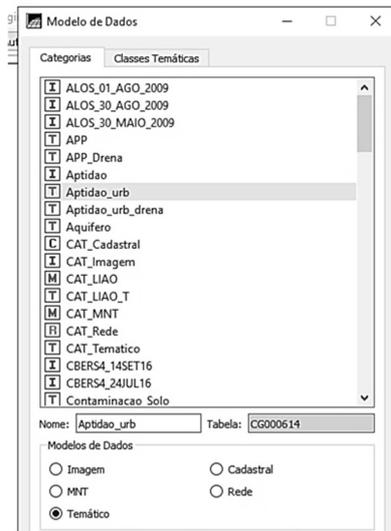


Figura 4.7 – Categorias de Modelo de Dados no SPRING.

• Importação de Dados

A importação de dados matriciais e vetoriais no SPRING (versão 5.4.3) se dá pelo menu “Arquivo/Importar/Importar Dados Vetoriais e Matriciais”.

Para importar os dados vetoriais do arquivo AutoCAD da Base Cartográfica do DF (escala 1:10.000, projeção UTM, Datum SIRGAS 2000), acionou-se o menu citado, buscou-se o arquivo “Geral_Final_R14.dwg” e especificou-se o sistema de projeção, enquanto na aba Saída especificou-se o Projeto, Categoria e PI (plano de informação) para onde tais dados seriam importados.

Foram importados os seguintes dados:

- Vias vicinais;
- Vias – estradas não pavimentadas;
- Vias – estradas pavimentadas;
- Drenagens – córregos intermitentes, e;
- Drenagens – córregos e rios permanentes.

Cabe ressaltar que é necessário criar as categorias de Modelo de Dados antes da importação de acordo com o dado que será importado. Por exemplo, dados vetoriais de vias urbanas (Categoria Temática VIAS), dados vetoriais das drenagens (Categoria Temática Drenagem), dados de curvas de nível (Categoria MNT Topo), dados matriciais de imagens de satélite (Categoria de Imagem LS8_21JUL2016), entre outros tantos.

Além dos dados supracitados, também foram importados mapas temáticos de características físicas do DF em formato SPRING: Geologia (Freitas-Silva & Campos, 1998), Solos (Embrapa, 1978) e Geomorfologia (GDF, 2012), ambos em escala 1:100.000.

- **Criação do limite das áreas**

O polígono de limite das áreas é utilizado como máscara na ferramenta “Recortar Plano de Informação”. Trata-se de um PI Temático que pode ser editado no menu “Temático/Edição Vetorial” e exportado como dado vetorial em formato *kml*, compatível com o *Google Earth*.

4.2.1.2. PROCESSAMENTO DE MODELOS NUMÉRICOS DO TERRENO

- **Importação dos dados da Base Cartográfica**

Para acomodar os PI's a serem criados na importação, criou-se a categoria de modelos de dados MNT Topo, de modo análogo a já descrito anteriormente.

Inicialmente, foram importadas as curvas de nível intermediárias e, na sequência, as curvas de nível mestras disponíveis nos *layers* da Base Cartográfica em CAD. A partir dos PI's MNT das curvas de nível importadas, realizou-se um mosaico das mestras e intermediárias para unificá-las num único PI “CN_Todas”, criado anteriormente (Categoria MNT: Topo).

As curvas de nível importadas são de toda a área do DF, portanto foi necessário recortar o excedente, utilizando-se a ferramenta “Recortar Plano de Informação”. O recorte foi realizado com base em uma máscara (PI Temático Limite).

Com o PI obtido, realizou-se a geração de sua grade triangular (Menu: “MNT/Geração de Grade Triangular”) para este mesmo PI como saída. Na sequência, fez-se a grade retangular deste PI (Menu: “MNT/Geração de Grade Retangular”) para um PI de saída “CN_Todas_rec” e este PI, por sua vez, recebeu nele mesmo isolinhas (Menu: “MNT/Geração de Isolinhas”).

- **Mapa Hipsométrico**

A partir do PI com as curvas de nível recortadas onde foram gerados o TIN e a grade retangular realizou-se um fatiamento deste (Menu: “MNT/Fatiamento”), gerando um PI temático resultante “Hipsometria_Geral_1” (Categoria: Hipsometrico_Geral) cujas classes temáticas correspondem a intervalos de faixas de altitude do terreno, a cada 5 m, por exemplo (ver Figura 4.8).

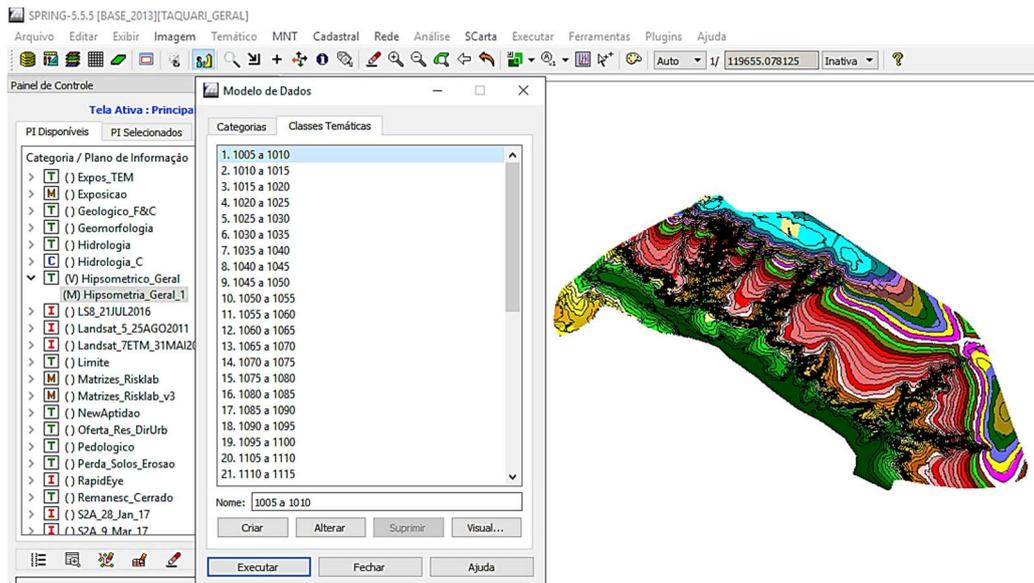


Figura 4.8 – Hipsometria – classes temáticas.

- **Perfil Topográfico**

Ainda com o mesmo PI ativo, gerou-se um perfil topográfico (Menu: “MNT/Perfil) de um alinhamento cortando a área de estudo no sentido transversal.

- **Mapa de Declividades**

A partir do PI utilizado para a hipsometria e geração de perfis topográficos, realizou-se uma análise de declividades do terreno (Menu: “MNT/Declividade, Declividade”), obtendo o PI MNT “Decliv_ %” (Categoria: Declividade_M). Ressalta-se que, tanto para a hipsometria quanto para a declividade e orientação de vertentes, foi necessário criar as respectivas categorias de Modelo de Dados antes da realização das operações de MNT e fatiamento temático.

A partir do resultado da declividade em porcentagem (PI MNT Decli), fez-se o fatiamento temático para separar diferentes níveis de declividade (porcentagem) em classes temáticas correspondentes, segundo Giboshi (1999) e Ramalho Filho & Beek (1995).

- 0 - 3% - Planos.
- 3 - 8% - Suave ondulado.
- 8 - 13% - Moderado ondulado.
- 13 - 20% - Ondulado.
- 20 - 45% - Forte ondulado.
- > 45% - Montanhoso.

- **Mapa de Orientação de Vertentes**

Com o PI “CN_Todas_rec”, realizou-se uma análise de orientação de vertentes ou exposição (Menu: “MNT/ Declividade, Exposição”), obtendo-se o PI MNT “Vertentes” (Categoria: Orientação_de_Vertentes_M).

A categoria temática criada para receber os dados do fatiamento contém 8 (oito) classes temáticas com base nos pontos cardeais e colaterais (N, NE, E, SE, S, SW, W e NW).

Dessa forma, fez-se o fatiamento para separar os intervalos de exposição (graus que variam de 0 a 360°) em classes temáticas de orientação das vertentes para as direções supracitadas.

Portanto, foram criados 7 (sete) intervalos com passo fixo de 45° iniciando em 22,5° e terminando em 337,5°. Além desses, foram necessários mais dois intervalos com passos variáveis de 0° a 22,5° e, de 337,5° a 360° (Figura 4.9).

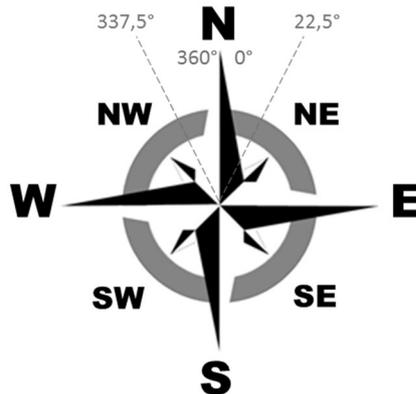


Figura 4.9 – Rosa dos ventos com indicação dos ângulos utilizados no fatiamento.

- **Mapa de Sombreamento de Relevo ou Imagem Sombreada**

Inicialmente, conforme descrito anteriormente, é necessário criar uma categoria de Modelo de Dados de Imagem (“Sombras”) para receber os resultados da geração de imagem MNT sombreada.

Fazendo uso do PI “CN_Todas_TIN_L”, realizou-se uma análise de sombreamento de relevo (Menu: “MNT/Geração de Imagem MNT”) para quatro conjuntos de valores distintos, conforme itens a seguir, obtendo-se quatro PI’s de Imagem como resultado.

- PI sombra_45_30_10
Parâmetros de azimuth = 45, elevação = 30 e exagero de relevo = 10;
- PI sombra_135_30_10
Parâmetros de azimuth = 135, elevação = 30 e exagero de relevo = 10;
- PI sombra_180_30_10
Parâmetros de azimuth = 180, elevação = 30 e exagero de relevo = 10;
- PI sombra_225_30_10
Parâmetros de azimuth = 225, elevação = 30 e exagero de relevo = 10.

Por fim, fez-se uma composição RGB com as três últimas imagens criadas, ou seja, “sombra_135_30_10” no canal R, “sombra_180_30_10” no canal G e “sombra_225_30_10” no canal B.

- **Mapa de Curvatura de Terreno (Zevenbergen & Thorne, 1987)**

A análise das curvaturas do terreno possibilita a identificação de áreas passíveis de ocorrência de fenômenos geodinâmicos, tais como:

- Inundação e alagamentos - Caso estejam sobre influência de corpos de água, as curvaturas horizontalizadas ou planas estão sujeitas a acúmulo de água.
- Fluxo de detritos - Vertentes convergentes são favoráveis à concentração de água, desde que as bacias de contribuição tenham área igual ou superior a 1 ha e linha de talvegue com declividades mínima de 17% (CPRM, 2018).
- Escorregamentos planares - As curvaturas de perfil convexas e retilíneas, associadas às altas declividades (>45%), pequenas espessuras de solo e amplitude altimétrica de 5 m favorecem a ocorrência desse tipo de movimento (CPRM, 2018).

Os procedimentos para a elaboração dos PI's de curvatura de terreno foram realizados no SPRING e geraram dois resultados: curvaturas planas e curvaturas de perfil.

Por fim, cabe ressaltar que os dados SRTM foram importados para o SPRING e obtidos no site Brasil em Relevo - EMBRAPA Monitoramento por Satélite, citado anteriormente e os procedimentos descritos: hipsometria, declividade, orientação de vertentes e relevo sombreado, também foram realizados com base nos dados topográficos providos pelo SRTM.

4.2.1.3. PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGEM

Primeiramente foi necessário importar os dados matriciais (imagens orbitais de Satélite) de modo análogo ao já descrito anteriormente (“Arquivo/Importar/Importar Dados Vetoriais e Matriciais”). Foram utilizadas imagens de diversos satélites e diferentes datas conforme descrito no item 4.1.2 – Imagens de Sensoriamento Remoto:

- CBERS-4 (24 de julho e 14 de setembro de 2016).
- Landsat 8 (21 de julho de 2016).
- Sentinel 2A (09 de março de 2017).
- *RapidEye* (11 de agosto de 2013).
- ALOS (agosto de 2009).

Com as imagens importadas, foi feito, então, o realce no intuito de melhorar a visibilidade das informações. Dentre tais operações de realce se incluem: manipulação de contraste, filtragens espaciais, operações aritméticas, composições coloridas, componentes principais, transformações RGB-IHS e segmentações, conforme apresentado na Figura 2.17 – Fluxograma do PDI.

- **Manipulação de Contraste**

A partir dos PI's de imagem, realizou-se o realce linear de contraste das bandas espectrais importadas, pelo Menu “Imagem/Contraste/Operação Linear”. O realce de contraste modifica os níveis de cinza através de funções matemáticas destacando informações espectrais e melhorando a qualidade visual.

No método linear a função de transferência é uma reta e o histograma da imagem de saída terá o mesmo formato da imagem de entrada, porém ampliado (Figura 4.10).

Função utilizada na ampliação linear de contraste ($y = ax+b$), onde:

- y = novo valor de NC;
- x = valor original de NC;
- a = inclinação da reta;
- b = fator de incremento.

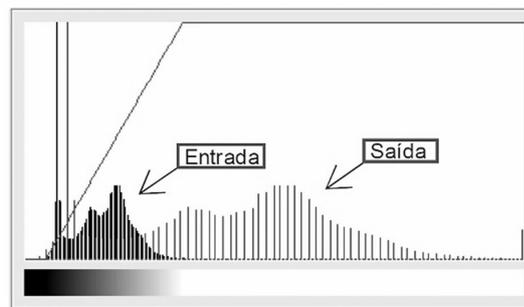


Figura 4.10 – Histograma com distribuição de NC na função linear.

- **Operações Aritméticas**

Os índices de vegetação (NDVI), índice de umidade (NDMI), índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI) e índice para áreas construídas (NDBI e B_u) foram criados segundo descrito no item 2.1.2 – Sistema de Informações Geográficas.

Além das operações acima, foram realizados os procedimentos para criação de Carta de Temperatura de Brilho de Superfície de acordo com os passos metodológicos descritos em (Souza & Silva Junior, 2015; Silva Junior & Souza, 2015), utilizando dados espectrais das imagens do Landsat 8.

Em síntese, as bandas 10 e 11 do sensor TIRS do Landsat 8 (ver item 2.1.1-Sensoriamento Remoto) possibilitam o cálculo da temperatura de brilho da superfície terrestre utilizando-se as equações de calibração e os parâmetros disponíveis nos metadados da imagem.

A temperatura de brilho da superfície corresponde à temperatura obtida pela radiação emitida pela superfície terrestre, no caso das imagens obtidas pelo Landsat 8, entre 10h e 10h30 (horário de passagem).

A temperatura de brilho de superfície foi calculada utilizando-se as equações fornecidas na página da missão Landsat e os parâmetros encontrados no arquivo de metadados que acompanha as imagens (USGS, 1972).

Segundo informações da página do Landsat, a radiância ($L\lambda$) pode ser calculada segundo a seguinte equação (Equação 4.1):

$$L\lambda = ML \times Q_{cal} + AL \quad (4.1)$$

Onde: ML e AL parâmetros obtidos no arquivo de metadados das imagens e Q_{cal} o nível de cinza das imagens dos sensores do Landsat 8.

Para o cálculo da temperatura em graus Célsius (T) utiliza-se a seguinte equação (Equação 4.2):

$$T = K2 / \ln((K1/L\lambda) + 1) - 273 \quad (4.2)$$

Sendo K1 e K2 parâmetros contidos no arquivo de metadados das respectivas imagens e $L\lambda$ obtido pela Equação 4.1.

O software SPRING possui uma ferramenta denominada LEGAL - Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico, própria para essas operações, conforme descrito em 2.1.2 – Sistema de Informações Geográficas. A partir da análise algébrica de mapas o programa utiliza atributos espaciais e não espaciais do banco de dados para a representação de entidades diversas utilizando operações booleanas, por exemplo.

O cálculo da temperatura de brilho foi realizado no LEGAL (ver programa no Apêndice C) e, na sequência, o PI (MNT) resultante foi fatiado e classificado gerando um PI temático de temperatura.

- **Componentes Principais**

As bandas de uma imagem multiespectral tendem a apresentar correlações causadas pelo efeito das sombras resultantes do relevo e até mesmo do comportamento espectral dos objetos. Dessa forma, duas bandas espectrais de uma mesma imagem podem apresentar informações redundantes. A ferramenta dos componentes principais (Menu: “Imagem/Componentes Principais”) cria novas imagens não-correlacionadas, independentes entre si e resultantes da transformação derivada da matriz de covariância dos valores originais (Santos *et al.*, 2010).

- **Transformação RGB-IHS**

Com o intuito de aproveitar as características de resolução espacial da banda PAN (banda 8 - Landsat 8) e espectral das multiespectrais (bandas 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7 - Landsat 8), foram feitas uma série de transformação RGB - IHS e IHS - RGB com tais bandas.

A transformação RGB - IHS utiliza três bandas multiespectrais de uma imagem e as associa a um dos componentes RGB. Assim, a informação de cores representadas no espaço RGB possuirá uma correspondência no espaço IHS.

O resultado é um conjunto de três novas imagens (Santos *et al.*, 2010): intensidade (I), matiz (H) e saturação (S).

- a. Imagem I: representa o brilho ou energia total da imagem.
- b. Imagem H: representa o comprimento de onda dominante da cor.
- c. Imagem S: representa a pureza da cor.

Estas imagens podem ser realçadas, melhorando o contraste e, quando transformadas de IHS para RGB (transformação inversa), permitem melhor separação das cores e, conseqüentemente, das feições que se deseja observar com a possibilidade de combinar imagens de diferentes resoluções espaciais.

- **Segmentação de imagens**

A segmentação consiste no passo metodológico que prepara as imagens para a classificação temática. Segmentar significa agrupar pixels com características similares em tom e textura, dividindo em regiões que apresentam uniformidade. A divisão em áreas consiste basicamente em um processo de crescimento de regiões, de detecção de bordas ou de detecção de bacias.

Fazendo uso dos PI's gerados pelas componentes principais, bem como das imagens multiespectrais, realizou-se a segmentação observando critérios ou parâmetros de similaridade e área (pixels) no Menu: "Imagem/Segmentação". O resultado é uma imagem rotulada.

- **Classificação**

O processo de classificação consiste em associar pixels a determinadas classes, criadas de acordo com o objetivo da imagem classificada.

Os classificadores podem ser "pixel a pixel" e por região:

- Pixel a pixel – utilizam apenas a informação espectral isolada de cada pixel para definir regiões homogêneas.
- Regiões – utilizam, além da informação espectral de cada pixel, a informação espacial que considera a relação entre os pixels e seus vizinhos.

A classificação também pode ser supervisionada, a qual envolve o treinamento prévio por parte do usuário ou não supervisionada, que não requer treinamento prévio.

No SPRING, encontram-se os algoritmos de classificação supervisionada pixel a pixel (paralelepípedo, distância mínima e máxima verossimilhança) e por região (*Bhattacharya*) e não supervisionada por região (Isoseg).

Em termos gerais, a classificação de uma imagem segmentada segue os seguintes passos (Santos *et al.*, 2010):

- a. Criação do arquivo de Contexto - arquivo que armazena as bandas que serão utilizadas no processo de classificação por regiões.
- b. Execução do treinamento – aquisição de amostras sobre uma imagem na área de desenho;
- c. Análise das amostras - permite verificar a validade das amostras coletadas;
- d. Extração de regiões - neste passo, o algoritmo extrai as informações estatísticas de média e variável de cada região, considerando as bandas indicadas no contexto;
- e. Classificação – realizada de acordo com o classificador escolhido;
- f. Pós-classificação - processo de extração de pixels isolados em função de um limiar e um peso fornecidos pelo usuário;
- g. Mapeamento para Classes - permite transformar a imagem classificada para um mapa temático *raster*.

Na presente tese, o treinamento da classificação por regiões foi realizado tendo como referência a Carta de Vegetação e Uso do Solo do ZEE-DF (escala 1:100.000) e as imagens do *Google Earth*. Finalizada a aquisição, salvou-se este e exportou-se o treinamento para o PI temático “Treinamento_Regiões” (Categoria: Treinamento_T).

Com o treinamento feito em regiões, criou-se um segundo contexto de análise, desta vez pixel-a-pixel, utilizando os mesmos PI’s do contexto anterior. Para o treinamento deste contexto, importou-se o PI anteriormente salvo da análise de regiões e procedeu-se, enfim, para a classificação pixel-a-pixel por Maxver (Máxima verossimilhança), com limiar de 100%. Após analisar as amostras e executar a classificação, obteve-se um PI imagem classificado “Classificação_Maxver_100”.

Com o PI de imagem classificada obtida, então, procedeu-se para seu mapeamento de classes para temático (Menu: “Imagem/Mapeamento de Classes para Temático”), obtendo-se novos PI’s temáticos de uso e cobertura (Categoria: Uso_e_Cobertura_T).

4.2.1.4. ELABORAÇÃO DE CARTAS

Terminados os processos de MNT e PDI, realizou-se a elaboração das respectivas cartas, uma a uma, iniciando pela Carta Base.

Para a montagem das cartas, inseriu-se, além do PI tema da carta (hipsometria, declividade, orientação das vertentes, relevo sombreado, uso e cobertura do solo, temperatura de brilho de superfície, imagem, entre outros) as seguintes informações básicas:

- PI's de vias pavimentadas e de cursos d'água permanentes sobrepondo o PI tema;
- Título da Carta;
- Convenções Cartográficas;
- Informações Técnicas;
- Escala;
- Norte;
- Grade Plana e/ou Geográfica, e;
- Legenda (caso o PI tema necessite).

• Recorte de PIs usando Máscara

Alguns dados precisam ser recortados para se adaptarem aos limites do projeto, para isso foi necessário recortar estes (Menu: “Ferramentas/Recortar Plano de Informação”) usando o PI limite da área como máscara.

4.2.1.5. OPERAÇÕES CARTOGRÁFICAS

• Delimitação de APPs – criação de mapa de distancias (*buffer*)

A criação de mapa de distâncias (*buffer*) no software SPRING se deu a partir dos PI's temáticos de drenagens importados da base cartográfica, conforme descrito em “Importação dos dados da Base Cartográfica”.

Para tanto, foi necessário criar classes temáticas a associá-las às linhas das drenagens (faixas de 0 a 30 m e de 30 a 50 m). O próximo passo consistiu em utilizar a ferramenta Mapa de Distâncias disponível no SPRING, no menu Temático.

4.2.1.6. PROCESSAMENTO GEOESPACIAL COM O GEE

Conforme descrito no item 2.1.2.1 - Plataforma *Google Earth Engine*, a plataforma GEE permite a criação de algoritmos ou simplesmente a utilização de *scripts* existentes para o processamento de dados de imagens. Baseia-se em processamento de dados geoespaciais em nuvem e utiliza o Editor de códigos do GEE para a programação.

Dessa forma, os seguintes processamentos também foram realizados no GEE:

- Cálculos de índices usando diferença normalizada entre bandas espectrais dos satélites Landsat 8 e Sentinel-2 (NDVI, NDMI, EVI, SAVI, NDBI, B_u). A Figura 4.11 apresenta, por exemplo, dois resultados obtidos no GEE: NDVI na Figura 4.11(a) e SAVI na Figura 4.11(b).

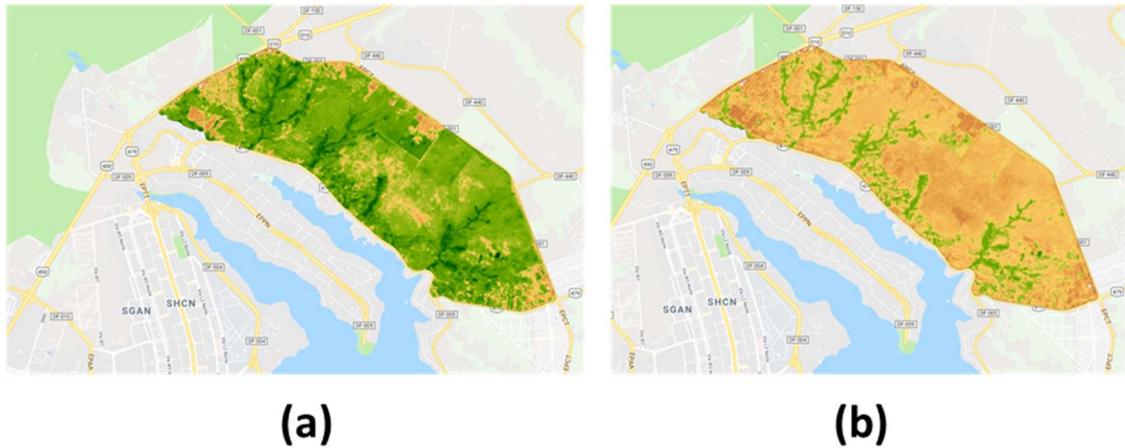


Figura 4.11 – NDVI (a) e SAVI (b) – realizados no GEE.

4.2.2. FASE I - GERAL: CARTA DE SUSCETIBILIDADE

Fase subsequente ao inventário, abordando critérios de suscetibilidade aos processos naturais ou induzidos (movimentos de massa, eventos de natureza hidrológica) associados às condições geomorfológicas e geotécnicas dos sítios.

Os produtos cartográficos gerados nessa fase apresentam escala 1:25.000 e abrangem a área do SHTq Etapa II, conforme apresentado na Figura 4.12. Objetivou-se mapear as áreas mais suscetíveis aos processos erosivos e elaborar cartas que foram utilizadas nas fases posteriores.

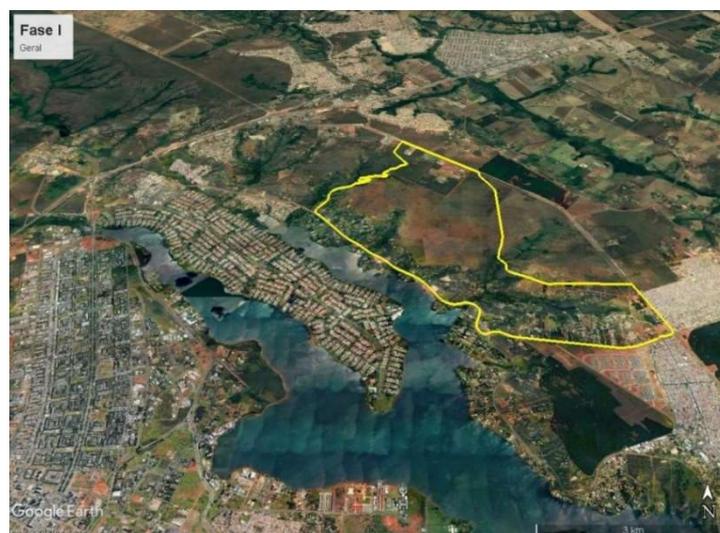


Figura 4.12 - Área de abrangência da Fase I - Geral (Google Earth Pro).

As coordenadas do retângulo envolvente são (Tabela 4.2):

Tabela 4.2 - Coordenadas do Retângulo Envolvente da área de estudo: Fase I

Coordenadas do retângulo envolvente (GMS)			
Long1	47°49'50.36"O	Long2	47°47'20.74"O
Lat1	15°41'31.21"S	Lat2	15°47'10.05"S

Passos metodológicos dessa fase, de forma resumida:

- Vetorização de mapas e cartas disponíveis no ZEE-DF, PDOT/2009 e DIUR 05/2013.
- Operações cartográficas para criação de Carta de Suscetibilidade à Erosão.

A vetorização dos dados disponíveis nos mapas e cartas foi realizada no programa QGIS e, em seguida, exportados para a utilização no SPRING.

4.2.2.1. CARTA DE SUSCETIBILIDADE À EROSÃO

Com base nas Cartas de Pedologia (escala 1:100.000) e de Declividade (escala 1:25.000) da área de estudo (resultados da fase de inventário) procede-se com a elaboração de uma Carta de Suscetibilidade à Erosão (escala 1:25.000) utilizando operações de álgebra de mapas, por intermédio da ferramenta LEGAL, utilizando-se operações booleanas. Cabe salientar que a condição ideal seria utilizar dados de pedologia na mesma escala que a declividade.

A operação Booleana envolve a expressão imagem, numérica, temática e condicional. O valor resultante da expressão é feito comparando-se pixels das imagens ou valores de grade por meio de operadores (<; >; <=; >=; ==; !=; &&; ||; !; ~) ou, ainda, da comparação entre classes de Planos de Informação (PI's).

Os operadores utilizados nas expressões booleanas significam:

- && (e lógico, intersecção).
- || (ou lógico, união).
- ! ou ~ (negação, complemento).
- == (comparação, igual a).
- != (comparação, diferente de).

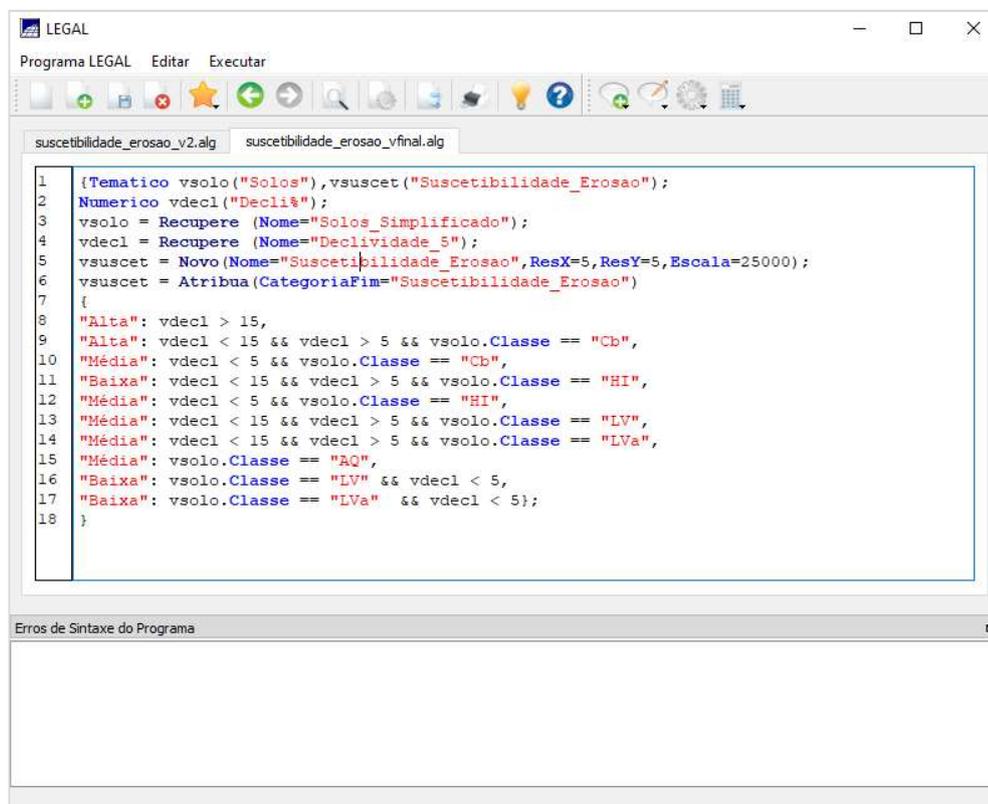
A programação em LEGAL foi feita a partir de linhas de comando baseada numa linguagem de texto (.txt), que utiliza símbolos, operadores e palavras específicas para denominar uma função ou algum PI.

No campo de programação, existem basicamente 3 etapas a serem seguidas:

- Declaração: Declaram-se as variáveis a partir de nomes que associem à categoria referente ao esquema.
- Instanciação: Recuperam-se PI's existentes do banco de dados ou criam-se novos PI's para serem associados ao resultado da programação.
- Operação: Realizam-se as operações algébricas (booleanas) gerando um resultado.

Dentre as diversas operações possíveis foi feito uma Carta de Suscetibilidade (Booleano). Para a execução dessa carta, seguiu-se os seguintes passos:

- a. Importação dos dados de solos do DF (Pedologia em escala 1:100.000).
- b. Geração dos dados de declividade (escala 1:25.000).
- c. Elaboração de programa em linguagem LEGAL, utilizando parâmetros de solo e declividade (Figura 4.13).
 - Criação de PI temático com classes de suscetibilidade à erosão (escala 1:25.000).
 - Criou-se uma categoria Temática denominada “Suscetibilidade_Erosao”.



```
LEGAL
Programa LEGAL  Editar  Executar
susctibilidade_erosao_v2.alg  susctibilidade_erosao_vfinal.alg
1 {Tematico vsolo("Solos"), vsusctet("Suscetibilidade_Erosao");
2 Numerico vdecl("Decliv");
3 vsolo = Recupere (Nome="Solos_Simplificado");
4 vdecl = Recupere (Nome="Declividade_5");
5 vsusctet = Novo (Nome="Suscetibilidade_Erosao", ResX=5, ResY=5, Escala=25000);
6 vsusctet = Atribua (CategoriaFim="Suscetibilidade_Erosao")
7 {
8 "Alta": vdecl > 15,
9 "Alta": vdecl < 15 && vdecl > 5 && vsolo.Classe == "Cb",
10 "Média": vdecl < 5 && vsolo.Classe == "Cb",
11 "Baixa": vdecl < 15 && vdecl > 5 && vsolo.Classe == "HI",
12 "Média": vdecl < 5 && vsolo.Classe == "HI",
13 "Média": vdecl < 15 && vdecl > 5 && vsolo.Classe == "LV",
14 "Média": vdecl < 15 && vdecl > 5 && vsolo.Classe == "LVa",
15 "Média": vsolo.Classe == "AQ",
16 "Baixa": vsolo.Classe == "LV" && vdecl < 5,
17 "Baixa": vsolo.Classe == "LVa" && vdecl < 5};
18 }
```

Figura 4.13 – Rotina computacional de suscetibilidade à erosão (SPRING/LEGAL).

Os termos Temático e Numérico referem-se à etapa de declaração. Na etapa de instanciação os termos Solos e Declividade são as categorias que foram utilizadas por meio da função “Recupere”. Em parêntese, coloca-se o nome do PI que se deseja utilizar para o mapa. Na etapa de operação, utiliza-se a função “atribua” para atribuir o PI resultante à categoria escolhida, no caso “Suscetibilidade_Erosao”.

Para as classes de suscetibilidade à erosão criadas (Alta, Média e Baixa) cada uma tem um significado embutido em sua sentença:

- Suscetibilidade será ALTA se Declividade for maior que 15 graus;
- Suscetibilidade será ALTA se Declividade for maior que 5 graus e menor que 15 graus E se a classe de solo for Cambissolo;
- Suscetibilidade será MÉDIA se Declividade for menor que 5 graus E se classe de Solo for Cambissolo;
- Suscetibilidade será MÉDIA se Declividade for maior que 5 graus e menor que 15 graus E se a classe de solo for Latossolo, e;
- Suscetibilidade será BAIXA se Declividade for menor que 5 graus E se classe de Solo for Latossolo.

A Tabela 4.3 apresenta os critérios definidos na tese e adotados na classificação de Alta, Média e Baixa suscetibilidade à erosão.

Tabela 4.3 - Critérios utilizados na elaboração da Carta de Suscetibilidade à Erosão.

BAIXA SUSCETIBILIDADE	MÉDIA SUSCETIBILIDADE	ALTA SUSCETIBILIDADE
Declividade < 5° E classe de solo = Latossolo	Declividade < 5° E classe de solo = Cambissolo	Declividade > 15°
	15° > Declividade > 5° E classe de solo = Latossolo	15° > Declividade > 5° E classe de solo = Cambissolo

O cruzamento (operações booleanas) entre dois planos temáticos: Pedologia_REC e Declividade_g gerou uma Capa de Suscetibilidade (Figura 4.14).

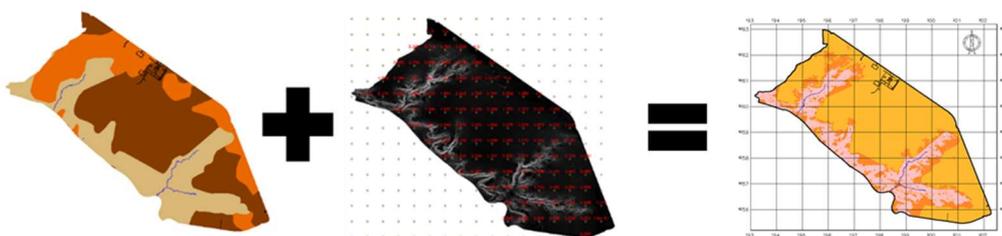


Figura 4.14 – Operações booleanas entre dados pedológicos e declividade.

4.2.3. FASE II - INTERMEDIÁRIA: CARTA DE APTIDÃO À URBANIZAÇÃO

Fase intermediária da metodologia, abordando critérios de adequabilidade ou aptidão à urbanização, classificados em quatro classes principais (alta aptidão, média aptidão, baixa aptidão e nenhuma aptidão). O objetivo final da Carta Geotécnica de Aptidão é orientar as áreas mais indicadas e adequadas para ocupação urbana.

Os produtos cartográficos gerados nessa fase apresentam escalas 1:25.000 e 1:10.000 e abrangem, respectivamente, o SHTq - Etapa II no tocante à análise das Diretrizes Urbanísticas propostas pelo GDF (DIUR 05/2013) e uma área específica dos Núcleos Rurais Córrego do Jerivá e Vale do Palha que foi objeto de aerolevantamento com RPA (ver Figura 4.15). Essa área apresenta características de ARINE, conforme descrito no item 3.2.6 – Setor Habitacional Taquari – Etapa II, portanto está ocupada com parcelamentos urbanos informais.

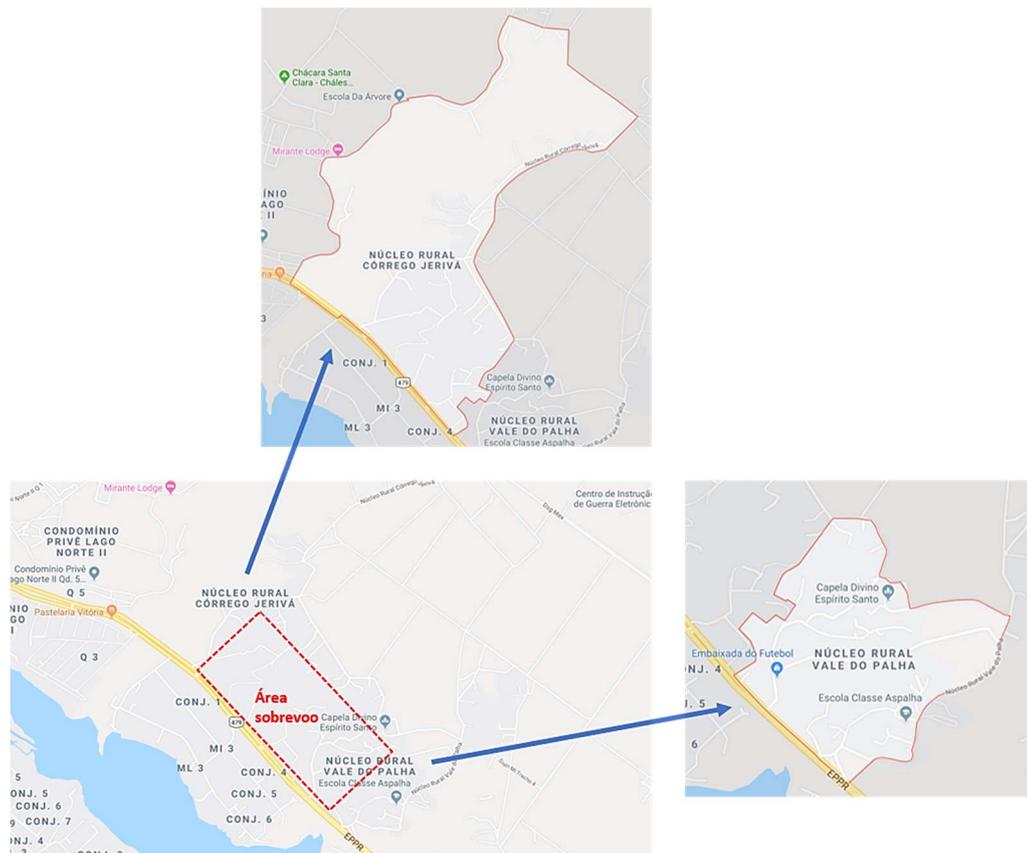


Figura 4.15 – Área de interesse do sobrevoado com RPA – Fase II (modificado de Google Maps).

Dessa forma, as áreas de estudo e abrangência desta fase foram (Figura 4.16):

- SHTq - Etapa II – escala 1:25.000 (em amarelo).
- Área específica (Núcleos Rurais Córrego do Jerivá e Vale do Palha) – escala 1:10.000 (em vermelho).



Figura 4.16 - Área de abrangência da Fase II - Geral (Google Earth Pro).

As coordenadas do retângulo envolvente são (Tabela 4.4):

Tabela 4.4 - Coordenadas do Retângulo Envolvente da área de estudo: Fase II.

Coordenadas do retângulo envolvente (GMS)			
Long1	47°49'50.36"O	Long2	47°47'20.74"O
Lat1	15°41'31.21"S	Lat2	15°47'10.05"S

Passos metodológicos desta fase, de forma resumida:

- Elaboração de Carta de Aptidão à Urbanização utilizando o LEGAL (escala 1:25.000).
- Aerolevanteamento com RPA asa fixa e multirrotor.
 - Materialização e colocação dos alvos (GCP) para georreferenciamento com GPS topográfico - *Ashtech ProMark2*;
 - Georreferenciamento dos alvos;
 - Sobrevoio na área do SHTq – etapa II com RPAs (projeto μ VANT/UnB) para posterior geração de ortomosaico e MDE, com utilização de coordenadas georreferenciadas dos alvos/pontos de controle.
 - Processamento dos dados obtidos no software *Agisoft Photoscan*.
- PDI com o ortofotomosaico resultante do aerolevanteamento.
- Tabulação cruzada entre a Carta Geotécnica de Aptidão à Urbanização (PI temático) e os resultados da vetorização dos mapas e cartas existentes nas Diretrizes Urbanísticas (DIUR 05/2013), bem como com a Carta de Uso e Cobertura resultante do PDI com dados obtidos no aerolevanteamento.

- Definição da área de interesse que foi investigada na escala de detalhe (Fase III) com suporte do Sistema de Análise Quantitativa de Risco por Escorregamentos Rasos Deflagrados por Chuvas em Regiões Tropicais, proposto por Azevedo (2015).

4.2.3.1. CARTA DE APTIDÃO À URBANIZAÇÃO

Seguindo o mesmo raciocínio do item 4.2.2.1 - Carta de Susceptibilidade à Erosão, adaptou-se o código de programa LEGAL, aproveitando os dados de pedologia e declividade, e incluindo o conceito de APP para a elaboração de uma Carta de Aptidão a Urbanização da área do SHTq Etapa II (Figura 4.17).

```

LEGAL
Programa LEGAL  Editar  Executar
-----
aptidao_urb_distDrena.alg
1 {Tematico vsolo("Pedologico"),vaptidao("Aptidao_urb_drena"), vdrena("Dist_Drena_T");
2 Numerico vdecl("Decliv");
3 vsolo = Recuperar (Nome="Pedologico_Terracap");
4 vdecl = Recuperar (Nome="Declividade_5");
5 vaptidao = Novo(Nome="Aptidao_Urbana_Drena",ResX=5,ResY=5,Escala=25000);
6 vdrena = Recuperar (Nome="Intermitentes");
7 vaptidao = Atribua(CategoriaFim="Aptidao_urb_drena")
8 {
9 "Nula": vdrena.Classe == "0 - 30m",
10 "Baixa": vdecl > 15 && vdrena.Classe == "30 - 100m",
11 "Baixa": vdecl < 15 && vdecl > 5 && vsolo.Classe == "CX" && vdrena.Classe == "30 - 100m",
12 "Média": vdecl < 5 && vsolo.Classe == "CX" && vdrena.Classe == "100 - 200m",
13 "Baixa": vdecl < 15 && vdecl > 5 && vsolo.Classe == "GX" && vdrena.Classe == "30 - 100m",
14 "Média": vdecl < 5 && vsolo.Classe == "GX" && vdrena.Classe == "100 - 200m",
15 "Média": vdecl < 15 && vdecl > 5 && vsolo.Classe == "LV" && vdrena.Classe == "100 - 200m",
16 "Média": vdecl < 15 && vdecl > 5 && vsolo.Classe == "LVA" && vdrena.Classe == "100 - 200m",
17 "Alta": vsolo.Classe == "LV" && vdecl < 5 && vdrena.Classe == ">500m",
18 "Alta": vsolo.Classe == "LVA" && vdecl < 5 && vdrena.Classe == ">500m");
19 }

```

Figura 4.17 – Rotina computacional de aptidão à urbanização (SPRING/LEGAL).

A análise da aptidão à urbanização baseou-se em critérios de declividade de terreno, tipologia de solo e definição de áreas de APP, segundo a Tabela 4.5, e resultou em quatro classes de aptidão urbana, a saber:

- Alta - aptas à ocupação (regularizáveis).
- Média - podem ser ocupadas, segundo critérios (regularizáveis sob condições).
- Baixa - inaptas à ocupação (não consolidáveis ou não regularizáveis).
- Nula - áreas de APP, proibidas por definição da Lei no12.651 (Brasil, 2012b).

Tabela 4.5 - Critérios utilizados na elaboração da Carta de Aptidão Urbana.

ALTA APTIDÃO	MÉDIA APTIDÃO	BAIXA APTIDÃO	NENHUMA (NULA)
Declividade < 5° E classe de solo = Latossolo E fora da APP	Declividade < 5° E classe de solo = Cambissolo E fora da APP	Declividade > 15° E fora da APP	Classe de distância de drenagem = 0 a 30m (dentro da area de APP)
	15° > Declividade > 5° E classe de solo = Latossolo E fora da APP	15° > Declividade > 5° E classe de solo = Cambissolo E fora da APP	

Considerações para a definição das classes de aptidão a urbanização:

- Excluem-se as áreas de APPs, por serem não edificantes por determinação de lei;
- Aptidão será BAIXA se Declividade for maior que 15 graus;
- Aptidão será BAIXA se Declividade for maior que 5 graus e menor que 15 graus E se a classe de solo for Cambissolo;
- Aptidão será MÉDIA se Declividade for menor que 5 graus E se classe de Solo for Cambissolo;
- Aptidão será MÉDIA se Declividade for maior que 5 graus e menor que 15 graus E se a classe de solo for Latossolo;
- Aptidão será ALTA se Declividade for menor que 5 graus E se classe de Solo for Latossolo.

Com a Carta de Aptidão (com classes de alta, média, baixa aptidão à urbanização e nula), realizou-se operações de Tabulação Cruzada com os dados de uso e cobertura, por exemplo, para verificar se havia interseção entre as classes desses dois PI's temáticos. A tabulação cruzada compara as classes temáticas de dois PI's, determinando a distribuição de suas intersecções e os resultados são apresentados em tabelas de duas dimensões (linhas e colunas).

Não menos importante, observa-se que as operações de álgebra de mapas, também denominadas análise de múltiplos mapas, podem ser feitas utilizando a lógica *Fuzzy* (lógica difusa) e AHP (*Analytic Hierarchy Process* ou análise hierárquica de processo, em português), além da lógica booleana (utilizada nesta pesquisa para a avaliação de suscetibilidade e aptidão).

4.2.3.2. GEORREFERENCIAMENTO DOS ALVOS

Corresponde à etapa inicial do aerolevanteamento, relacionada ao georreferenciamento dos alvos que serão utilizados no aerolevanteamento.

O processo de georreferenciamento dos pontos de controle (GCP) foi iniciado com a fabricação dos piquetes de madeira maciça realizado com o apoio da Prefeitura da Universidade de Brasília (PRC/UnB) no dia 15 de fevereiro de 2017 (Figura 4.18).

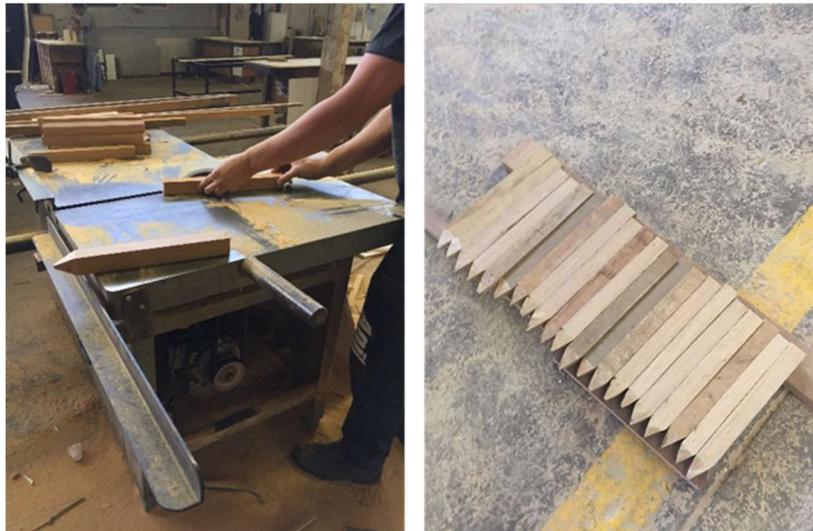


Figura 4.18 – Piquetes de madeira fabricados na PRC/UnB.

Foram fabricados 22 (vinte e dois) piquetes de seção quadrada (4x4cm) e comprimento de 35 cm em madeira maciça.

Os piquetes foram cravados no solo com auxílio de uma marreta de 2 kg, deixando cerca de 5 cm acima do nível do solo e, em seguida, georreferenciados com o GPS topográfico modelo *Ashtec ProMark 2* no modo estático (*static mode*), conforme observa-se na Figura 4.19.



Figura 4.19 – Georreferenciamento com GPS *Ashtec ProMark 2*.

Inicialmente, foram previstos 20 (vinte) pontos de controle, entretanto algumas áreas foram inacessíveis e dois deles não foram georreferenciados por dificuldades de acesso às localidades. Dessa forma, conforme apresentado na Figura 4.20, os pontos P12 e P20 (assinalados em vermelho) não foram realizados e, por outro lado, um novo ponto (P21), próximo da pista de acesso DF-005 (Estrada Parque Paranoá - EPPR), foi georreferenciado.



Figura 4.20 – Pontos de apoio/GCP previstos e realizados.

O georreferenciamento dos alvos durou três dias (3, 4 e 6 de março de 2017) e foram rastreados 19 (dezenove) pontos de controle conforme Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Georreferenciamento dos pontos de controle.

Dia 3 de março 2017	Dia 4 de março 2017	Dia 6 de março 2017
P9	P14	P19
P6	P13	P21
P5	P16	P08
P4	P15	P10
P3	P18	P3
P7	P17	P1
	P11	P2
	P7	

No dia 3 de março de 2017, primeiro dia de campo para levantamento de coordenadas, foram realizados 05 (cinco) levantamentos com duração média de 56 minutos e o sexto ponto (P7) foi interrompido pela chuva (Figura 4.21).

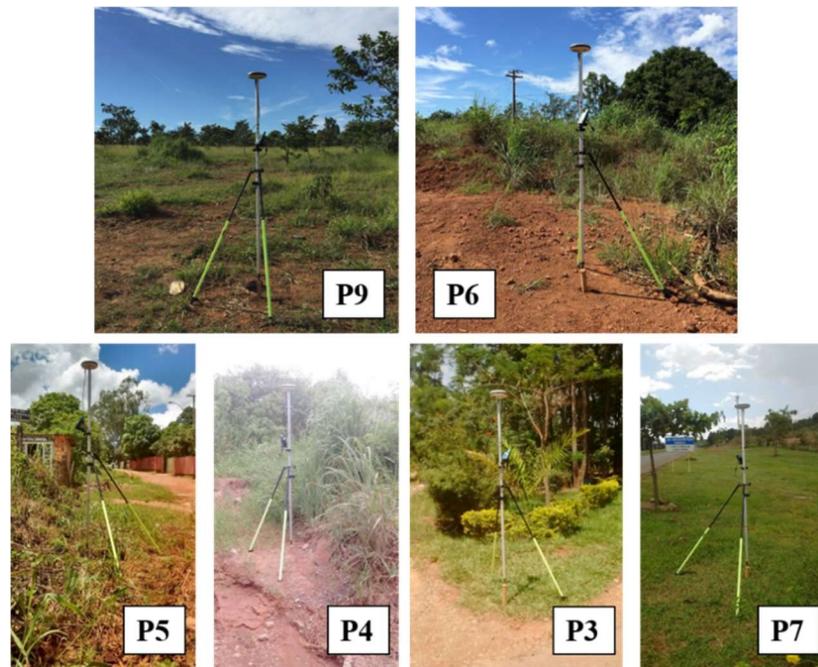


Figura 4.21 – Pontos levantados no dia 3 de março de 2017.

No dia 4 de março de 2017, segundo dia de campo para rastreamento das coordenadas, foram realizados 08 (oito) levantamentos com duração média de 54 minutos, incluindo o P7 que havia sido interrompido pela chuva no dia anterior (Figura 4.22).

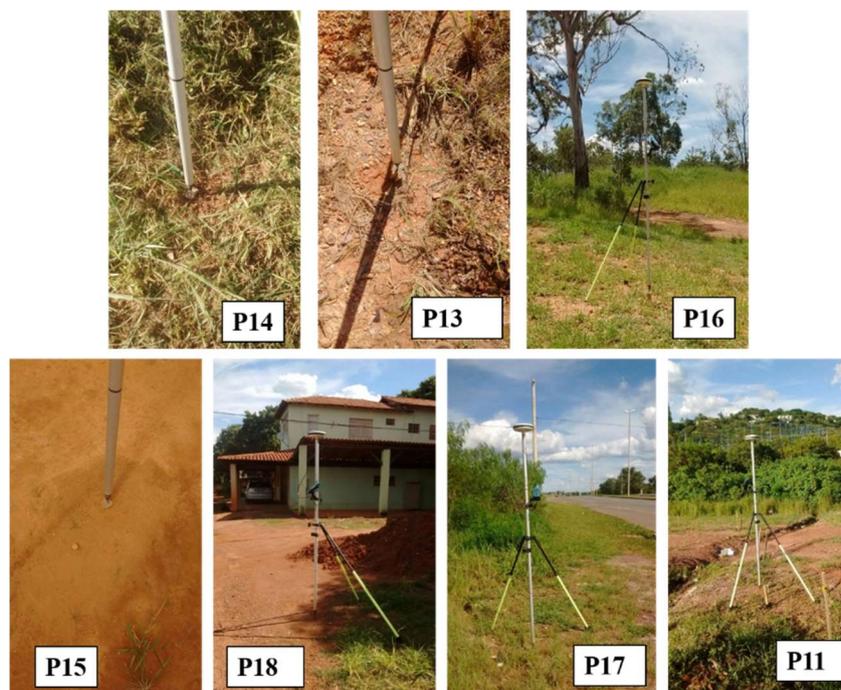


Figura 4.22 - Pontos levantados no dia 4 de março de 2017.

No dia 6 de março de 2017, último dia de campo para rastreamento de coordenadas, foram realizados 07 (sete) levantamentos com duração média de 58 minutos, incluindo o P3 que havia sido georreferenciado no primeiro dia e foi refeito por garantia, devido às condições atmosféricas desfavoráveis da tarde do dia 03 de março (Figura 4.23).

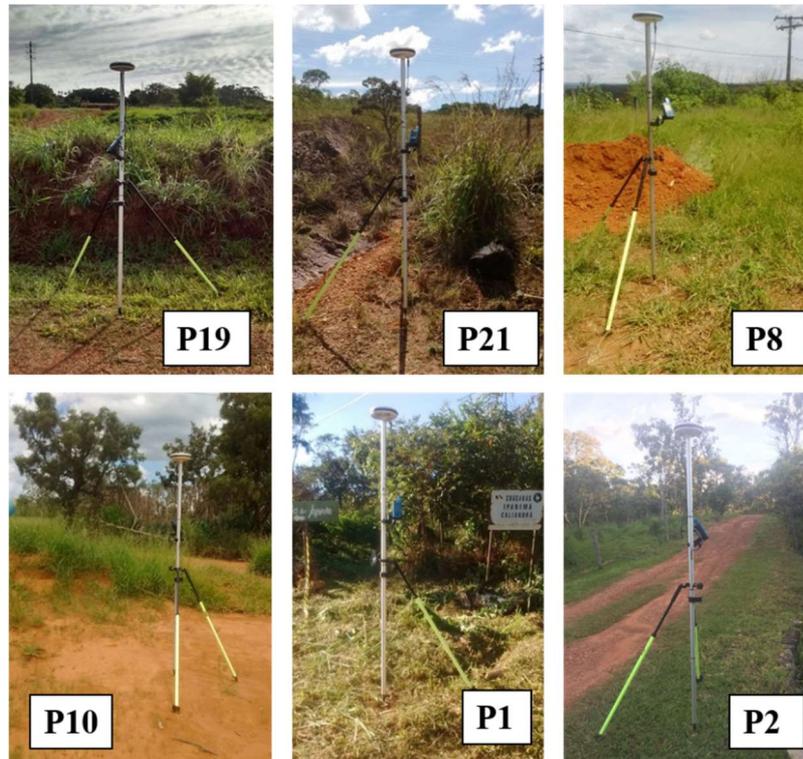


Figura 4.23 - Pontos levantados no dia 6 de março de 2017.

Posteriormente, realizou-se a correção e ajuste dos dados coletados pela base do IBGE no *software* GNSS Solutions 3.80 e os resultados estão apresentados no subitem 5.5.1 – Georreferenciamento dos Alvos.

Os dados brutos armazenados nos receptores GNSS foram descarregados e importados para o *software* GNSS Solutions para que as coordenadas geodésicas dos pontos rastreados fossem corrigidas por meio de posicionamento relativo tomando como referência a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC) do IBGE (IBGE, 2018).

4.2.3.3. AEROLEVANTAMENTO COM RPA ASA-FIXA E MULTIROTOR

Conforme relatado no item 4.2.3 – Fase II – Intermediária: Carta de Aptidão à Urbanização, o aerolevanteamento foi realizado em área localizada entre os Núcleos Rurais Córrego do Jerivá e vale do Palha, região escolhida após análise de suscetibilidade a erosão com ocupação urbana em assentamentos precários, sem condições adequadas de infraestrutura.

Para o RPA asa-fixa foram previstos 9 (nove) voos, sendo 4 (quatro) no sentido longitudinal e 5 (cinco) no sentido transversal conforme apresentado na Figura 4.24 e detalhados na sequência.



Figura 4.24 – Planos de voo longitudinais e transversais (modificado de Google Earth Pro).

A metodologia do aerolevanteamento seguiu o apresentado no subitem 4.2 – Metodologia aplicada, Figura 4.5 - Fluxograma do aerolevanteamento com RPA, conforme resumido a seguir:

- Planejamento do voo;
- Elaboração dos planos de voo;
- Colocação de alvos (GCP);
- Checklist em solo (verificar a aeronave e carregar os dados do plano de voo);
- Decolagem, execução do plano de voo e pouso;
- Descarregar os dados obtidos;
- Avaliação dos dados obtidos, e;
- Processamento e avaliação dos resultados alcançados.

Os itens colocação dos alvos (GCP), checklist em solo, decolagem, execução do voo, pouso e descarregar os dados obtidos foram realizados em campo.

Os aerolevanteamentos foram feitos com um RPA do tipo asa-fixa (Figura 4.25-a) e um modelo multirotor (Figura 4.25-b), ambos pertencentes ao Projeto μ VANT-UnB.



Figura 4.25 – RPA's utilizados no aerolevanteamento (Projeto μ VANT-UnB).

Parâmetros utilizados na aerofotogrametria do modelo asa-fixa:

- Máquina fotográfica Canon, modelo PowerShot S100 (5.2mm);
- Altura do voo: 200 m;
- Exposição velocidade: 1/1000 s.
- Abertura: f/4;
- ISO 100.

Antes da realização dos voos foram fixados os alvos em papel nos piquetes de madeira que haviam sido georreferenciados, conforme descrito no subitem 4.2.3.2. A fixação foi feita com um prego colocado na cabeça do piquete coincidindo os centros do alvo e do piquete (Figura 4.26).

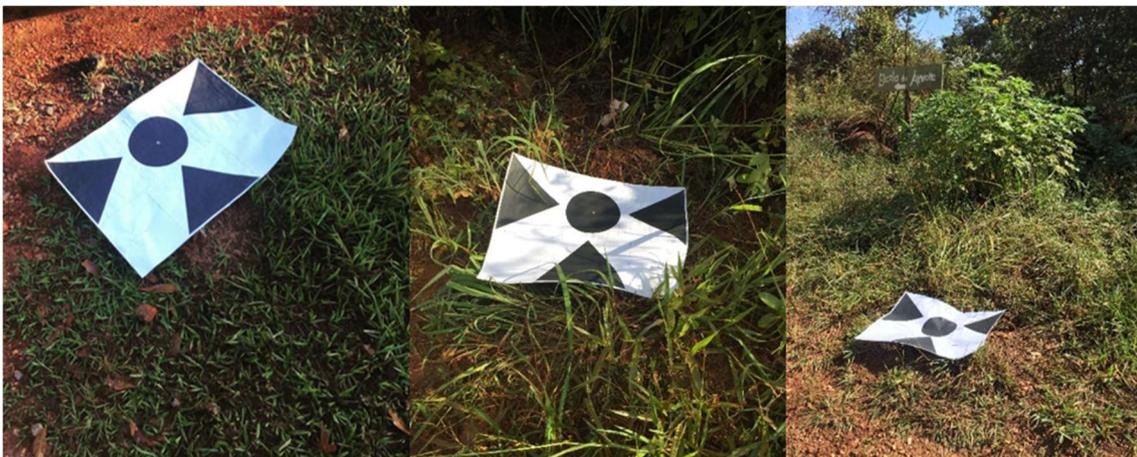


Figura 4.26 – Pontos de controle (alvos em papel) fixados.

Em relação ao aerolevantamento (RPA asa-fixa), seguem os planos de voo planejados no *software* PVL e exportados para visualização no *Google Earth Pro*:

- Voos 1 a 4 – longitudinais (Figura 4.27):



Figura 4.27 - Planos de voo longitudinais (modificado de Google Earth Pro).

- Voos 5 a 9 – transversais (Figura 4.28):

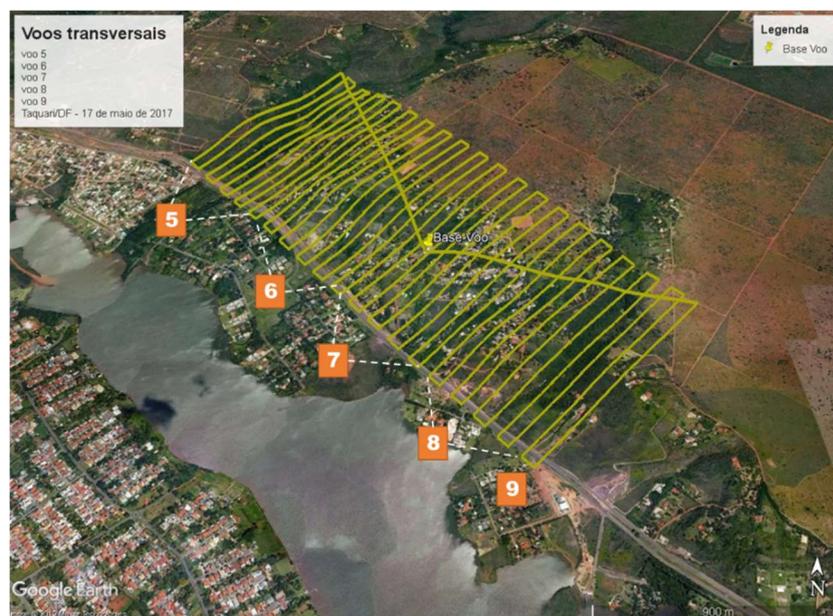


Figura 4.28 - Planos de voo transversais (modificado de Google Earth Pro).

Em relação ao RPA multirotor, foram previstos apenas 4 planos de voo no sentido transversal, com altura prevista de 240 m para a mesma área sobrevoada com o modelo asa-fixa.

4.2.3.4. PROCESSAMENTO DOS DADOS OBTIDOS

Neste tópico serão descritas as etapas do processamento dos dados obtidos no aerolevanteamento utilizando-se o software *Agisoft Photoscan* (Silva, 2018).

Inicialmente, conforme a Figura 4.5 - Fluxograma do aerolevanteamento com RPA, antes de realizar o processamento dos dados é preciso avaliar a qualidade das imagens obtidas.

Algumas fotos inclinadas ou sem foco foram descartadas e o restante foi organizado em pastas específicas para cada um dos nove planos de voo (Figura 4.29).



Figura 4.29 – Exemplos de fotos inclinadas obtidas durante os voos.

Nos sobrevoos realizados com o RPA modelo asa-fixa, foi necessário também utilizar o *software* PoeCoordExif (Projeto μ VANT-UnB) para gravar as coordenadas geográficas das posições do RPA no instante da tomada da fotografia (Figura 4.30). Ao final do processo, a fotografia terá as coordenadas geográficas gravadas nos seus metadados (GPS: Latitude, Longitude e Altitude), informação primordial para o processamento no *software* *Agisoft Photoscan*.

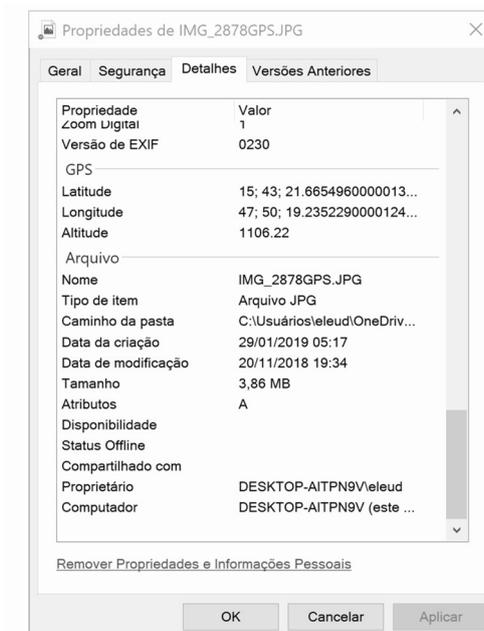


Figura 4.30 – Coordenadas geográficas gravadas na fotografia.

- **Alinhamento das Imagens e Nuvem de Pontos Esparsa**

Etapa inicial do processamento, necessária para posicionar e orientar a câmera no espaço, no instante em que as fotografias foram tiradas. O resultado dessa etapa é um modelo de nuvem esparsa de pontos, gerado pela utilização de algoritmos de visão computacional que encontram para cada fotografia um conjunto de *keypoints* e geram uma assinatura.

Em sequência os *keypoints* são comparados entre duas fotografias e selecionados como *match points*, caso possuam assinaturas iguais dentro de uma precisão estabelecida. Como opções de parâmetros nessa etapa tem-se a acurácia alta, média ou baixa e a definição pela alta gera, por exemplo, maior tempo de processamento e conseqüente demanda por capacidade computacional.

- **Nuvem Densa de Pontos**

Após o alinhamento das imagens e geração de nuvem esparsa de pontos, a próxima etapa consiste na geração de nuvem densa de pontos (*Build Dense Cloud*) no *Agisoft Photoscan*.

Nesse momento utilizam-se as coordenadas obtidas no georreferenciamento dos pontos de controle (item 4.2.3.2 – Georreferenciamento dos alvos).

Os pontos de controle são inseridos em arquivo texto (ver Apêndice A) e posicionados nas imagens de forma manual, buscando localizá-los exatamente no centro do alvo fotografado. Foram utilizados os 19 (dezenove) pontos de controle georreferenciados.

O próximo passo foi a otimização do alinhamento e a construção da nuvem densa de pontos com os parâmetros de qualidade alta (*high*) e o *Depth Filtering* no modo *agressive* (parâmetro que orienta o *Photoscan* a tratar os *outliers* no processo de interpolação para calcular a nuvem densa), conforme observado na Figura 4.31. Houve uma tentativa de processamento com o parâmetro de qualidade ultra alto (*Ultra High*), conforme detalhado no subitem 5.5.2.2.

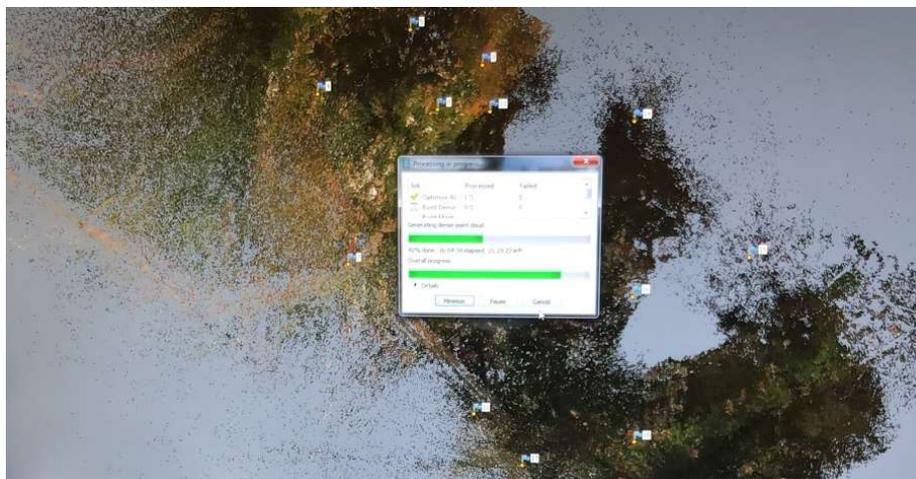


Figura 4.31 – Processamento dos dados - fase da geração de nuvem densa de pontos (Agisoft, 2018).

As nuvens densas de pontos são importantes para a construção do modelo 3D e um dos subprodutos obtidos na fotogrametria, conforme descrito no item 2.1.3 – Fotogrametria e Aerolevanteamento, utilizadas para geração de dados topográficos e estudos de movimentação de terra.

- **Superfície 3D**

Na sequência de trabalho do *Photoscan*, após a geração da nuvem densa de pontos, atua-se na interpolação de uma malha de modo a construir a superfície 3D sobre os pontos da nuvem densa. Utiliza-se a opção *Build Mesh* para a geração da malha 3D, cujos parâmetros são a *Surface Type* (modo *Arbitrary* ou *Height Field*) e *Surface Data* (opção por utilizar a nuvem esparsa ou a densa para a geração da malha).

Optou-se por utilizar o *Height Field*, mais adequado à geração de terrenos e relevos e a nuvem densa como referência.

- **Mapeamento da textura**

O último passo da sequência de trabalho no *Photoscan* consiste no mapeamento da malha de pontos a partir das fotografias originais, ou seja, para cada elemento da malha foi aplicada uma textura na área com base nas fotos tomadas.

Para a construção de texturas, o *Photoscan* oferece opções de acordo com o modelo de mapeamento que será utilizado: genérico, ortofoto adaptativo, ortofoto, esférico e câmera única (textura a partir de uma foto apenas). Selecionada a opção de mapeamento da textura, o próximo parâmetro diz respeito ao modo de mistura ou mesclagem das cores dos pixels (*Blending mode*). Nesse caso as opções são: mosaico, média, máxima e mínima intensidade e desativado. O *default* do programa é o modo *mosaic*, cujo valor de pixel é obtido por uma composição de valores dos pixels.

Por fim, após as etapas de alinhamento das imagens e nuvem de pontos esparsa, nuvem de pontos densa, superfície 3D e mapeamento da textura procede-se a geração dos produtos que pode ser realizada utilizando a opção *Batch Process* (processamento em batelada). Essa opção de processar em batelada permite salvar o projeto a cada etapa realizada pois, por definição, esse modo de processamento é recarregável (feito em lotes).

4.2.4. FASE III - DETALHE: CARTA DE RISCO

Fase final da metodologia, abordando a avaliação da suscetibilidade, ameaça e consequências ou situações de risco e impacto a pessoas, edificações ou meio-ambiente.

Os produtos cartográficos gerados nessa fase apresentam escalas maiores que 1:5.000 e abrangem áreas de interesse do SHTq - Etapa II que manifestam algum risco geotécnico decorrente de ocupação informal em áreas com assentamentos precários (Figura 4.32).

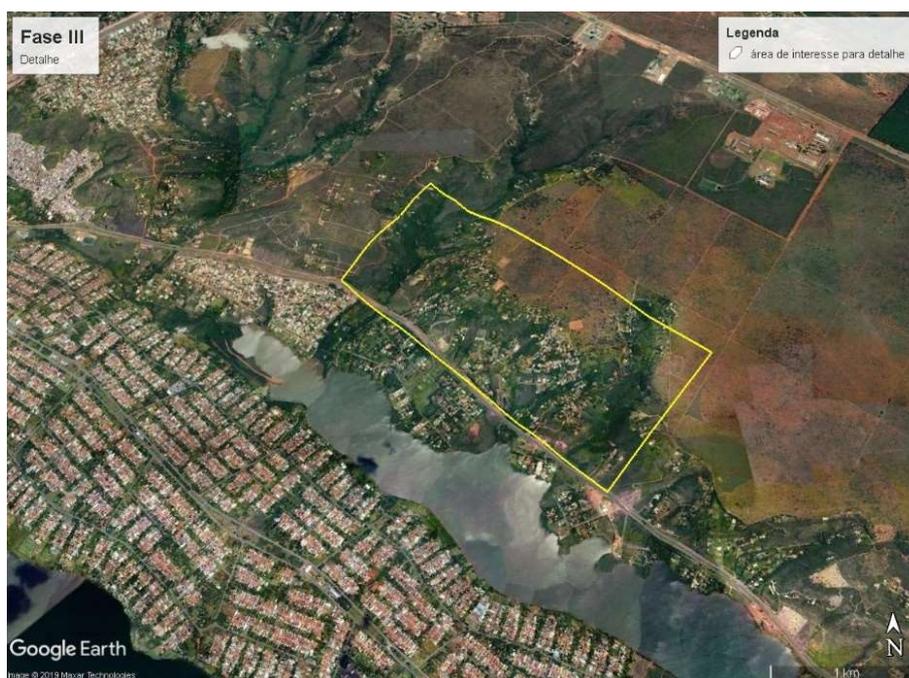


Figura 4.32 - Área delimitada para análise de suscetibilidade e perigo de deslizamento.

Optou-se por analisar uma área que abrange parte da APP do Córrego Jerivá e da ARINE que abriga os Núcleos Rurais Córrego Jerivá e Vale do Palha, ou seja, área de baixa aptidão à urbanização com ocupação urbana informal consolidada.

Normalmente a ocupação irregular acontece em áreas ambientalmente frágeis, tais como beira dos córregos, encostas, várzeas inundáveis, áreas de proteção de mananciais, entre outras e o PDOT/2009 denominou essas áreas como ARINE, conforme mencionado em 3.2.6 - Setor Habitacional Taquari – Etapa II.

As coordenadas do retângulo envolvente estão apresentadas na Tabela 4.7:

Tabela 4.7 - Coordenadas do Retângulo Envolvente da área de estudo: Fase III.

Coordenadas do retângulo envolvente (GMS)			
Long1	47°50'11.05"O	Long2	47°49'33.47"O
Lat1	15°42'57.39"S	Lat2	15°44'34.72"S

A análise da ameaça foi realizada segundo a metodologia proposta por Silva Junior *et al.* (2016a, 2016b) e seguindo critérios detalhados por Azevedo (2015).

Passos metodológicos desta fase:

- Visitas de campo para apoio na escolha da área de interesse, classificada como nula ou baixa aptidão à urbanização com ocupação urbana informal existente;
- Utilização do sistema *RiskLab*, proposto por Azevedo (2015), para definição de áreas de ameaça, e;
- Realização de operações cartográficas entre mapas/cartas e tabulação cruzada entre os dados obtidos pelo *RiskLab* e a Carta de Uso e Cobertura do Solo para posterior análise dos resultados e identificação de problemas, especialmente ocupação informal em áreas que apresentaram risco geotécnico.

4.2.4.1. ZONEAMENTO DA AMEAÇA DE ESCORREGAMENTOS E DEFINIÇÃO DE ÁREAS DE RISCO

O zoneamento da Probabilidade de Ruptura (PR) de encostas, a qual representa a componente da ameaça, foi realizado com a utilização do *software RiskLab* (Azevedo, 2015).

A metodologia aplicada neste subitem teve as seguintes etapas:

- Geração das matrizes numéricas de dados do solo e declividade no *software* SPRING que serão utilizadas no *RiskLab*;
- Processamento de dados, cálculo da PR no *RiskLab* e exportação das matrizes numéricas resultantes;
- Importação das matrizes geradas e fatiamento dos dados numéricos para um plano de informação (PI) Temático no SPRING, e;
- Geração de Carta de Ameaça de Escorregamentos (SPRING).

A definição ou zoneamento das áreas de risco levando em consideração a PR das encostas foi feita, conforme mencionado, utilizando-se a ferramenta computacional denominada *RiskLab* (Azevedo, 2015). Nesse programa estão disponíveis diferentes módulos para a análise das componentes de risco dos deslizamentos ocasionados por chuvas.

O cálculo da PR, no presente tópico, foi realizado utilizando-se um modelo preditivo para escorregamentos induzidos por chuvas, denominado SLIDE (*Slope - Infiltration - Distributed Equilibrium*) (Liao *et al.*, 2010), alterado pela aplicação do método probabilístico FOSM (*First Order Second Moment*), exatamente para fornecer a probabilidade de falha das encostas (Azevedo, 2015).

O modelo SLIDE, desenvolvido por Liao *et al.* (2010), tem como base uma formulação matemática que representa o fenômeno físico para os processos provocados por eventos de chuva, considerando a ação imposta à resistência ao cisalhamento dos solos, resultante tanto das forças desestruturantes causadas pelo fluxo subsuperficial, quanto da colaboração da saturação parcial, conforme ilustrado na Figura 4.33 (Azevedo, 2015).

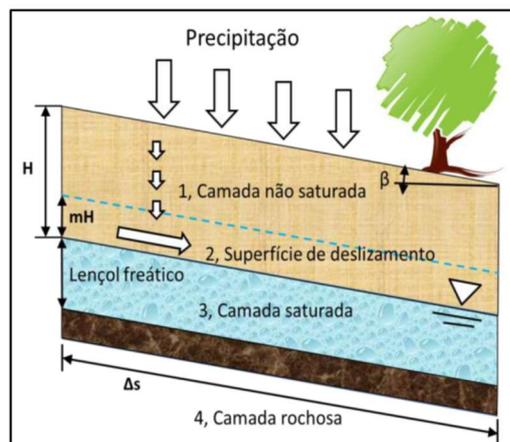


Figura 4.33 - Esquema ilustrativo do modelo SLIDE de talude infinito (Azevedo, 2015).

Na interface do *RiskLab* utilizou-se o modelo SLIDE Probabilístico que leva em consideração dados de precipitação e as seguintes características do solo:

- capacidade de drenagem (Kt), em 1/s;
- declividade, em graus;
- espessura do solo considerada como instável (H), em m;
- ângulo de atrito efetivo (ϕ'), em graus;
- peso específico relativo do solo (G_s), adimensional;
- porosidade (n), em decimal;
- grau de saturação (S_r), em decimal;
- coeficientes λ e α , característicos do solo;
- coesão efetiva (c'), em KPa.

Tal procedimento é realizado de forma automatizada para cada pixel da área de estudo a partir do uso do *RiskLab*. A interface gráfica referente ao modelo utilizado encontra-se na Figura 4.34.

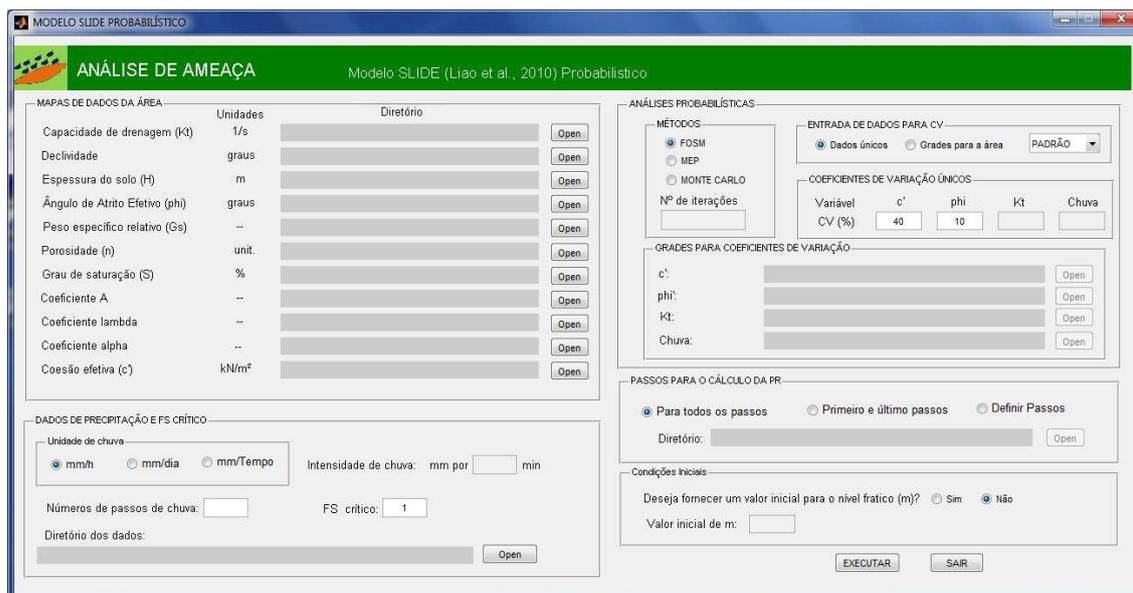


Figura 4.34 - Interface gráfica para modelo SLIDE probabilístico (Azevedo, 2015).

Como não se tinham disponíveis dados de dispersão para a coesão e o ângulo de atrito, utilizou-se os valores de coeficientes de variação consagrados e pré-estabelecidos no próprio *RiskLab* (40% para a coesão e 10% para o ângulo de atrito).

Em relação às condições iniciais do nível freático, optou-se por não fornecer um valor inicial para a condição imposta ao modelo SLIDE, pois não havia dados disponíveis ou confiáveis para toda a área.

Tratando-se dos parâmetros do solo, os dados empregados foram os mesmos utilizados por Azevedo *et al.* (2013) e encontram-se na Tabela 4.8, a seguir:

Tabela 4.8 - Parâmetros utilizados nas análises pelos tipos de solo encontrados na área de estudo (Azevedo *et al.*, 2013).

Solo	Parâmetros do solo								
	c'	ϕ'	H	Kt	Gs	n	Sr	A	λ
	KPa	°	m	1/s	-	%	%	-	-
Latossolo vermelho	10	20	3	10 ⁻⁶	2,8	60	40	100	0,4
Latossolo vermelho amarelo	10	20	3	10 ⁻⁷	2,8	50	60	100	0,4
Cambissolo háplico	5	25	0,7	10 ⁻⁸	2,7	30	60	100	0,4

Quanto aos dados de precipitação, utilizou-se a quantidade de chuva para as seguintes datas, conforme apresentado na Tabela 4.9:

Tabela 4.9 - Dados pluviométricos.

Data	Dados pluviométricos (mm/dia)
15/12/2014	12,3
16/12/2014	20,5
17/12/2014	84,5
18/12/2014	43,10
19/12/2014	12,20

A chuva do dia 17/12/2014 foi amplamente noticiada, pois causou transtornos e prejuízos à população do DF. Segundo dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) choveu 84,5 mm entre 10h do dia 16 e 10h do dia 17 de dezembro, porém quase toda chuva ocorreu entre 20h do dia 16 e 0h do dia 17 de dezembro, conforme Figura 4.35.

De acordo com o INMET, foi a maior quantidade de chuva registrada, em 24 h, no ano 2014 sobre Brasília (INMET, 2016).

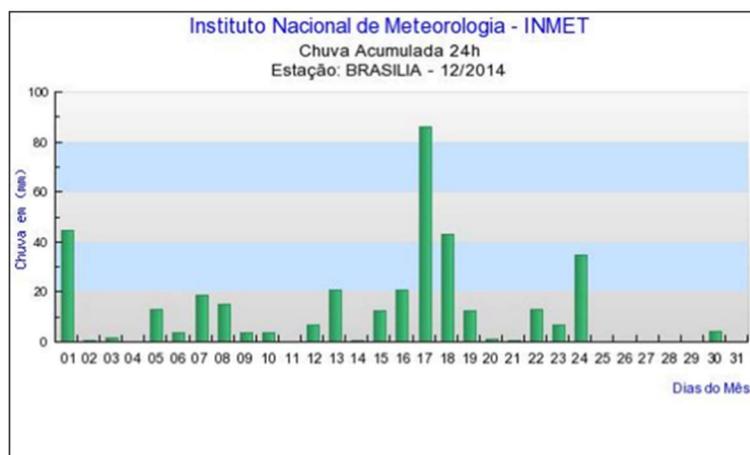


Figura 4.35 - Chuva acumulada em 12/2014 (INMET, 2016).

Os resultados de PR obtidos no *RiskLab* foram exportados e posteriormente processados em ambiente SIG, tal como o SPRING, categorizando em classes por meio da ferramenta de fatiamento e classificação, resultando em cartas de zoneamento de ameaça de escorregamentos.

É importante ressaltar que as equações (formulações matemáticas) utilizadas para o cálculo da PR no *RiskLab* estão descritas e explicadas em Azevedo (2015) e Silva Junior *et al.* (2016a; 2016b).

5. RESULTADOS E ANÁLISES

A parte da pesquisa relacionada à obtenção, tratamento e processamento das imagens obtidas com RPA foi desenvolvida em conjunto com outros professores do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da UnB, sendo coordenada pelo Prof. Dr. Lenildo Santos da Silva no âmbito do Projeto μ VANT-UnB e do Laboratório de Visualização, Interação e Simulação (L-VIS/UnB).

Os resultados parciais foram apresentados em congressos e eventos científicos e publicados no período entre 2014 até julho de 2019. Há, também, a publicação conjunta de um capítulo de livro, conforme apresentado a seguir:

- Artigo em evento: Estudo da Acurácia Posicional de Dados Geoespaciais Obtidos com RPA mediante Uso da Metodologia Proposta para Verificação do Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) (Diniz *et al.*, 2019).
- Capítulo de livro: Vulnerabilidade e modelagem ambiental em bacias hidrográficas (Almeida *et al.*, 2017).
- Artigo em evento: Avaliação dos Dados de Alta Resolução Espacial Obtido por Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) para Produção de Modelo Digital de Terreno (Almeida *et al.*, 2015).
- Artigo em revista: *Evaluation of unmanned aerial vehicles (UAV) high spatial resolution data to produce digital terrain model and visible spectral imagery* (Almeida *et al.*, 2014).

Entre maio e julho do ano 2017 realizou-se um estágio na Universidade Politécnica da Catalunha (UPC), supervisionado pelo Prof. Aitor Martin Sierra - Escola Superior de Engenharias Industrial, Aeroespacial e Audiovisual de Terrassa (ESEIAAT), com o objetivo de investigar o desenvolvimento e os diversos usos e aplicações dos drones na área de engenharia, no âmbito do Projeto GREAT (*Geotechnical and geological Responses to climate change: Exchanging Approaches and Technologies on a world-wide scale*).

Os resultados alcançados durante o estágio foram organizados e utilizados como referência na escrita do subitem 2.2 – Aeronaves Remotamente Pilotadas.

5.1. PLATAFORMA GEE – RESULTADOS

Os resultados apresentados a seguir foram obtidos durante o aprendizado da plataforma e realizados para o DF, com os seguintes dados de SR, disponíveis no GEE:

- a. *USGS Landsat 8 Collection 1 Tier 1 and Real-Time data TOA Reflectance*: coleção do Landsat ortoretificada, alimentada constantemente pela Nasa e com a maior quantidade de imagens disponível, com intervalo de revisita de 16 dias.
- b. *Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-2A*: coleção de imagens do Sentinel-2 coletadas pela missão Copernicus da ESA, com intervalo de revisita de 5 dias.

- **NDVI – Índice de Vegetação por Diferença Normalizada**

Com base na Equação 2.2, foi possível a realização do cálculo do NDVI (Figura 5.1) para o DF, considerando-se o período entre 01 de janeiro de 2017 e 11 de setembro de 2017, gerado a partir do cálculo da mediana dos valores obtidos nas imagens do Landsat 8 conforme apresentado no código elaborado (disponível no Apêndice C para conferência).



Figura 5.1 – NDVI calculado para o DF – imagens do Landsat 8 (modificado de GEE).

Observando-se a Figura 5.1, percebe-se que nas áreas em verde mais escuro encontram-se as vegetações mais exuberantes, como matas de galeria, matas ciliares e áreas agrícolas localizadas na porção Leste do DF, especialmente nos pivôs de irrigação (ressaltados na figura).

Por outro lado, as áreas não vegetadas (em tons de laranja e amarelo) correspondem às áreas construídas ou com solo exposto. Importante registrar que a visualização do NDVI se ajustou melhor com o *stretch* por desvio padrão, utilizando-se o “ 3σ ”, conforme citado no subitem 2.1.2.1 – Plataforma *Google Earth Engine*.

- **SAVI – Índice de Vegetação Ajustado ao Solo**

Utilizando-se a Equação 2.4, este índice proposto por Huete (1988) apresentou um melhor desempenho para áreas com pouca cobertura vegetal, ou seja, solo exposto. A Figura 5.2 apresenta o resultado do SAVI para o DF com a mesma coleção de imagens do Landsat 8 utilizada para o NDVI.

Em comparação com o NDVI, a Figura 5.2 apresenta mais áreas em tons de laranja e amarelo, que correspondem aos solos expostos, e áreas em branco (com exceção dos corpos hídricos como lago Paranoá) correspondendo as áreas construídas (ressaltadas na figura).



Figura 5.2 - SAVI calculado para o DF – imagens do Landsat 8 (modificado de GEE).

- **NDMI - Índice de Umidade por Diferença Normalizada**

O NDMI (Figura 5.3) foi calculado segundo a Equação 2.3, utilizando-se imagens da coleção Landsat 8 para o período do mês de julho de 2018.

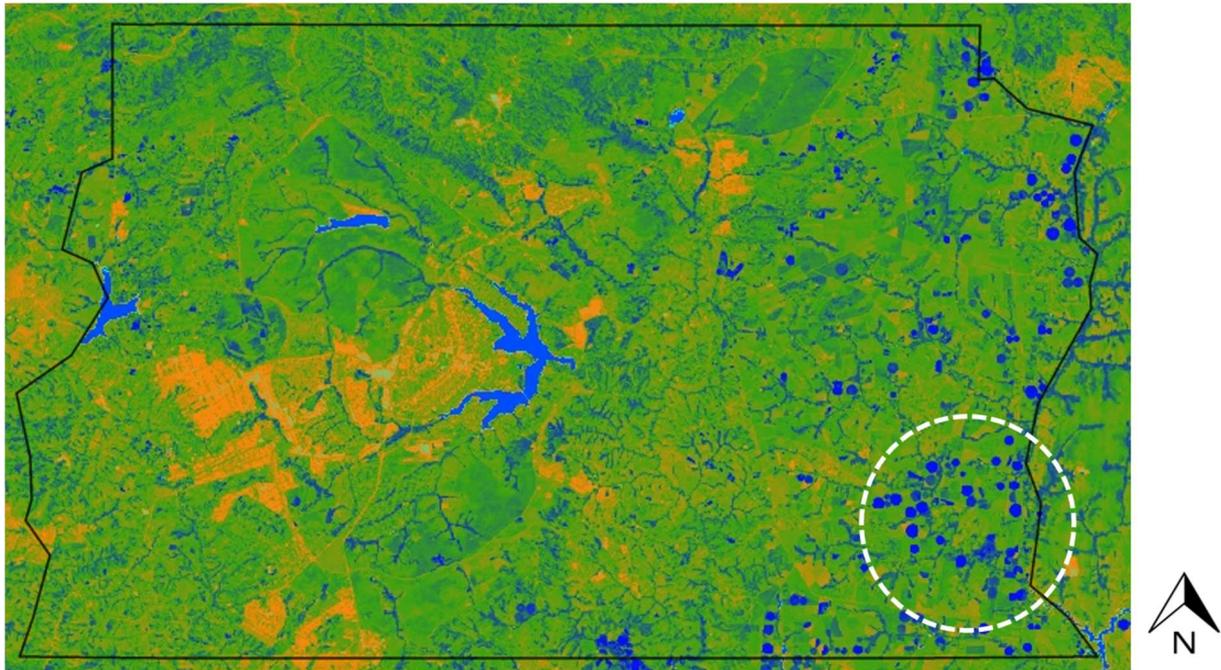


Figura 5.3 - NDMI calculado para o DF – imagens do Landsat 8 (modificado de GEE).

Observa-se, na Figura 5.3, que as regiões em tons de laranja correspondem as áreas urbanas e alguns solos expostos com pouca umidade. As regiões representadas em azul correspondem as áreas com mais umidade na vegetação ou no solo, resultado esperado pela utilização do NDVI que, por definição, usa a informação extraída da faixa do infravermelho médio (MidIR) ressaltando variações de umidade na superfície (Jin & Sader, 2005).

Dessa forma, por se tratar de imagens do período seco (mês de julho), os pivôs de irrigação representados em azul na porção Leste do DF sugerem que estão em funcionamento, garantindo a umidade necessária para a cultura cultivada nos locais irrigados.

- **NDBI - Índice por Diferença Normalizada para Áreas Construídas**

O cálculo do NDBI e do B_u , proposto por Zha *et al.* (2003), foi realizado segundo parâmetros apresentados nas Equação 2.5 e Equação 2.6 e adaptados para o *script* do GEE.

Utilizou-se imagens da coleção Landsat e Sentinel, gerando resultados para o ano 2019:

- a. Landsat 8 - período entre 01 de janeiro e 10 de maio de 2019 (Figura 5.4).
- b. Sentinel 2A - período entre 01 de janeiro e 13 de maio de 2019 (Figura 5.5).

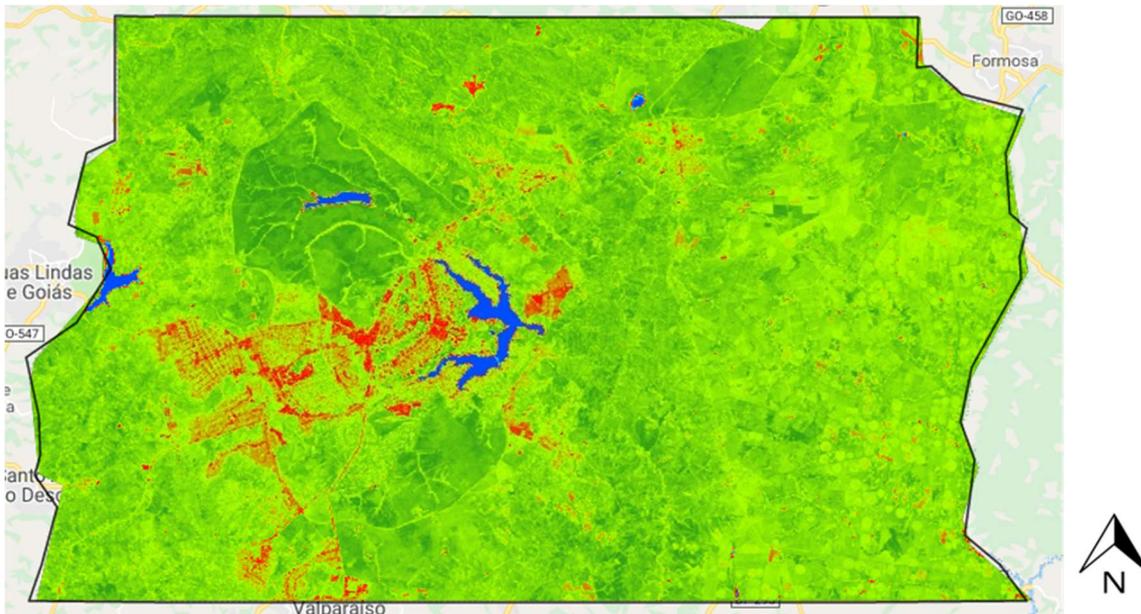


Figura 5.4 – NDBI calculado para o DF – imagens do Landsat 8 (modificado de GEE).

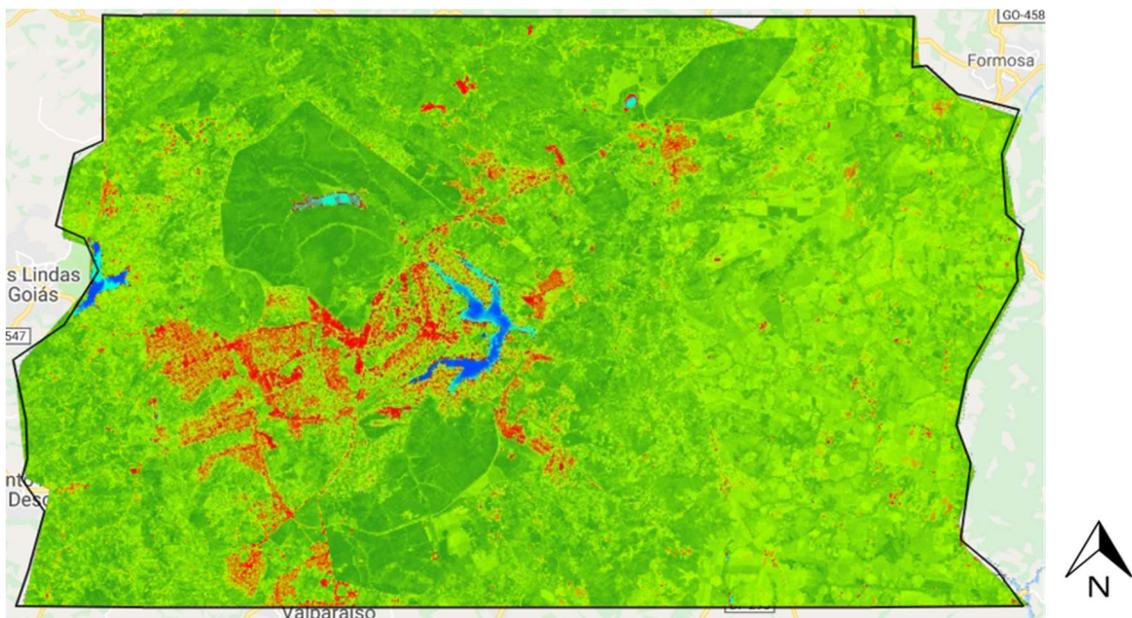


Figura 5.5 – NDBI calculado para o DF – imagens do Sentinel 2A (modificado de GEE).

Ao analisar as imagens resultantes do cálculo do NDBI para os dados do Sentinel 2A e Landsat 8, percebe-se que as manchas de áreas urbanas (em vermelho) são semelhantes e apresentam boa correspondência com a realidade, entretanto as imagens do Sentinel 2A (Figura 5.5) apresentam melhores resultados em decorrência da maior resolução espacial (10 m para o NIR, 20 m para o MidIR) quando comparada com a resolução do Landsat 8 (30 m).

Por outro lado, em ambos os resultados se observa que algumas áreas de solo exposto foram erroneamente interpretadas como área construída. Relacionado a isso, Jensen (2009) ressalta que a técnica do NDBI apresenta uma precisão de 92%. Dessa forma, a interpretação equivocada entre solo exposto e telhados de edificações encontra-se na faixa dos 8% restantes.

Na tentativa de minimizar as possíveis interpretações equivocadas, desenvolveu-se uma ferramenta de detecção de áreas construídas ou urbanizadas com a possibilidade de identificá-las em vermelho de forma isolada, pela utilização da função aplicar máscara de seleção ou corte de valores (ver código no Apêndice C).

Utilizou-se imagens do satélite Sentinel 2A, no período entre 01 de janeiro de 2017 e 24 de maio de 2019 com filtragem de porcentagem da cobertura de nuvens em 10%.

O cálculo do NDVI, NDBI e B_u foi realizado utilizando-se as Equações 2.2, 2.5 e 2.6 e considerando-se as seguintes bandas espectrais do Sentinel 2A:

- NIR (B8);
- red (B4), e;
- MidIR (B11).

Além dos cálculos dos índices, implementou-se a função de plotagem do gráfico da série (evolução temporal) do B_u , conforme apresentado na Figura 5.6. Tanto o gráfico quanto a imagem resultante podem ser exportados para utilização em outros *softwares* SIG ou editores de texto e imagem.

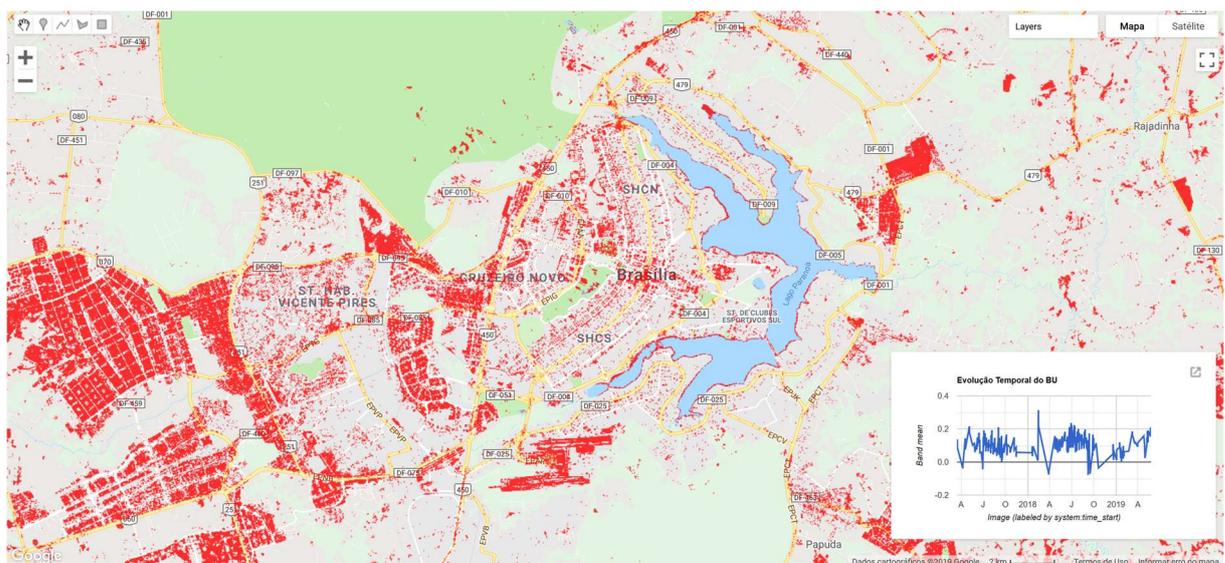


Figura 5.6 – Tela do GEE com resultados do B_u e gráfico de evolução temporal.

Conforme citado, as áreas em vermelho correspondem às áreas construídas ou com solo exposto, como por exemplo a marcação das bordas do Lago Paranoá, em função da variação do nível d'água ao longo do período analisado.

Ao testar a ferramenta de detecção em diversas tipologias urbanas, tais como áreas mais ou menos adensadas, observa-se que os resultados são satisfatórios, pois apresentam boa relação de conformidade com os objetos identificados como áreas construídas ou urbanizadas.

A Figura 5.7(a) apresenta os resultados alcançados em áreas urbanas mais adensadas (Ceilândia) e a Figura 5.7(b) em áreas menos adensadas (Asas Sul e Norte) do DF.

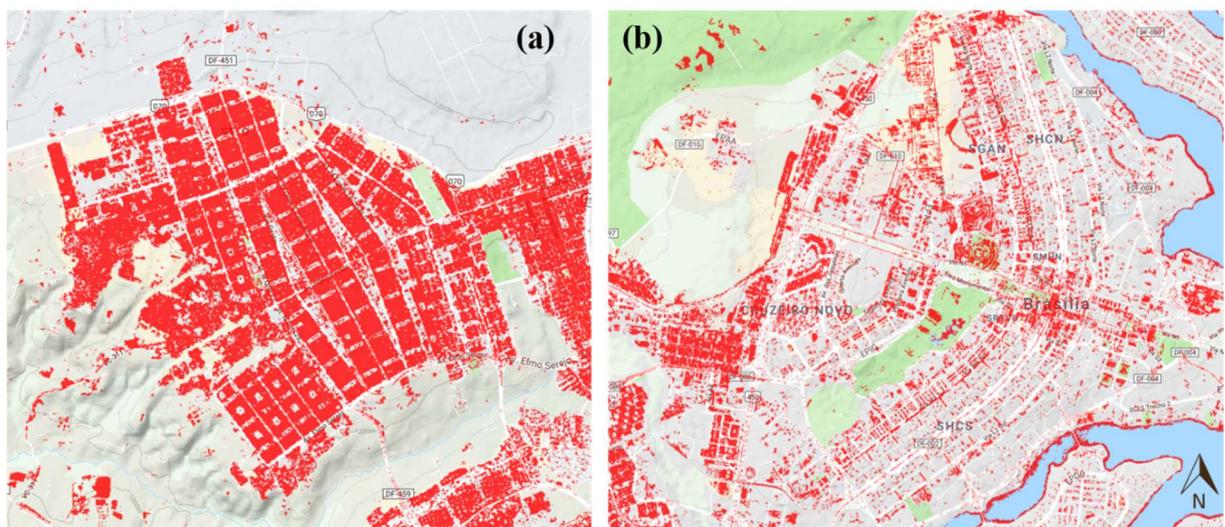


Figura 5.7 – Aplicação do B_u em áreas urbanas com adensamentos diferentes (modificado de GEE).

O GEE oferece a possibilidade de visualização em mapa, com ou sem relevo; e imagens de satélite, com ou sem marcadores (identificações de localização e vias).

A Figura 5.8 mostra dois momentos da visualização com imagens de satélite ao fundo:

- A imagem inicial antes de clicar no botão *Run script* (executar) (Figura 5.8-a), e;
- A imagem resultante do processamento do índice B_u sobreposta à imagem de satélite de fundo (Figura 5.8-b).

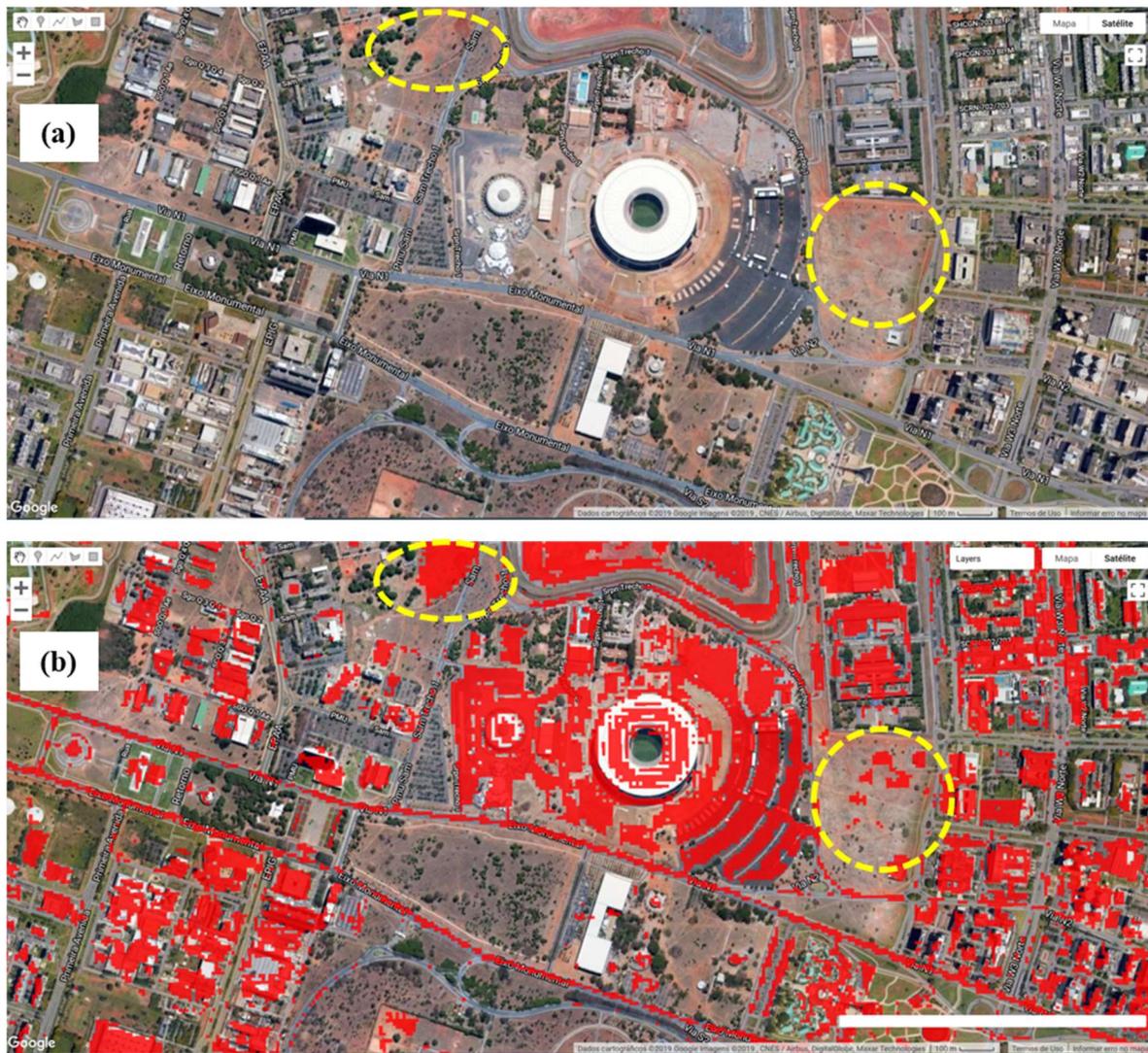


Figura 5.8 – Imagens inicial (a) e resultante do B_u (b) (modificado de GEE).

Em detalhe, nas regiões destacadas em amarelo, percebe-se que apenas as áreas em solo exposto em tons mais avermelhados foram identificadas como área construída, o restante do processamento apresentou boa correspondência com áreas asfaltadas e edificações, excluindo as coberturas vegetais e árvores.

A Figura 5.8 corresponde à área central do Plano Piloto de Brasília, com o estádio Mané Garrincha em destaque.

5.2. PROPOSTA METODOLÓGICA: GEOTECNOLOGIAS APLICADAS AO PLANEJAMENTO URBANO

A Tabela 5.1 apresenta um resumo das fases, respectivos dados utilizados e resultados obtidos.

Tabela 5.1 – Tabela resumo das fases, dados utilizados e resultados.

TABELA RESUMO DA METODOLOGIA							
FASE	LOCALIDADE	ESCALA	OBJETIVO e PROCEDIMENTOS	DADOS UTILIZADOS	SOFTWARES	PIXEL	RESULTADOS
Preliminar	SHTq Etapas I e II	1/25.000	Inventario biótico, físico e antrópico	IMAGENS: CBERS-4 (24 de julho e 14 de setembro de 2016), Landsat 8 (21 de julho de 2016), Sentinel 2A (09 de março de 2017), RapidEye (11 de agosto de 2013), ALOS (agosto de 2009).	Spring, QGIS, Excel, GEE, Google Earth Pro	30 m para o Landsat; 10m, 20m e 60m para o Sentinel 2A; 5 ~ 80m para o CBERS-4 e 5 m para o Rapideye	Cartas resultantes dos processos de MNT, PDI e cartas temáticas do meio físico do DF e rotinas computacionais para apoio ao planejamento urbano (GEE)
				Base Cartográfica do DF - escala 1:10.000 com projeção UTM (Zona 23S) e Datum SIRGAS 2000			
				MDE/SRTM/DF - MDE resultante da Missão SRTM, resolução horizontal de 30m, Datum WGS84.			
				Mapas Temáticos de características físicas do DF: Geologia (Freitas-Silva & Campos, 1998), Geomorfologia (GDF, 2012) e Solos (Embrapa, 1978). ESCALA 1:100.000			
				USGS Landsat 8 Collection 1 Tier 1 and Real-Time data TOA Reflectance e Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-2A			
Fase I - GERAL	SHTq Etapa II	1/25.000	Avaliação de suscetibilidade aos processos erosivos	Grade de Declividade e dados de Solo (fase preliminar)	Spring, QGIS		Carta de Suscetibilidade à Erosão e Carta de Perda de Solo por Erosão (adaptada de ZEE) e rotina computacional no LEGAL
				Mapas do ZEE-DF versões 2012 e 2019 (GDF, 2012; 2019), em PDF: Risco de Contaminação do Subsolo no DF; Risco de Perda de Recarga de Aquífero no DF; Risco de perda de Áreas Remanescentes de Cerrado Nativo no DF; Risco de Perda de Solo por Erosão no DF.			planos de informação resultantes da vetorização
				Diretrizes Urbanísticas SEGETH-DF – imagens de mapas e cartas disponíveis no documento DIUR 05/2013 (SEDHAB, 2013).			
Fase II - INTERMEDIÁRIA	SHTq Etapa II e área específica (ARINE) entre os córregos Palha e Jerivá	1/25.000 e 1/10.000	Gerar Carta de Aptidão à Urbanização	Grade de Declividade, dados de solo e mapa de distancias das áreas de proteção permanente (buffer da APP)	Spring		Carta de Aptidão à Urbanização e rotina computacional no LEGAL
			Aerolevantamento da área da ARINE com RPA		Elaboração de planos de voo - Software PVL, Agisoft Photoscan - processamento dos dados obtidos, PoeCoordExif e GNSS solutions	7x7 cm e 9,5x9,5	MDE e ortofotomosaico
Fase III - DETALHE	Área de APP e ARINE entre os córregos Palha e Jerivá	1:5.000 e 1:2.500	Zoneamento de áreas de risco	Grade de declividade em graus, parametros de solo	RiskLab, Spring, Google Earth Pro	15x15m e 5x5m	Cartas de Ameaça de Escorregamentos

5.3. RESULTADOS DA FASE PRELIMINAR

Fase destinada ao inventário dos meios físico, biótico e antrópico da área que abrange as Etapas I e II do Setor Habitacional Taquari (SHTq).

- **Carta de Localização (escala 1:25.000)**

Inicialmente apresenta-se a Carta de Localização da área de estudo (Figura 5.9). Contornada em vermelho, a área tem como limites a DF-005 a Sudoeste, a DF-003 a Noroeste, a DF-001 a Nordeste e a DF-015 ao Sul.

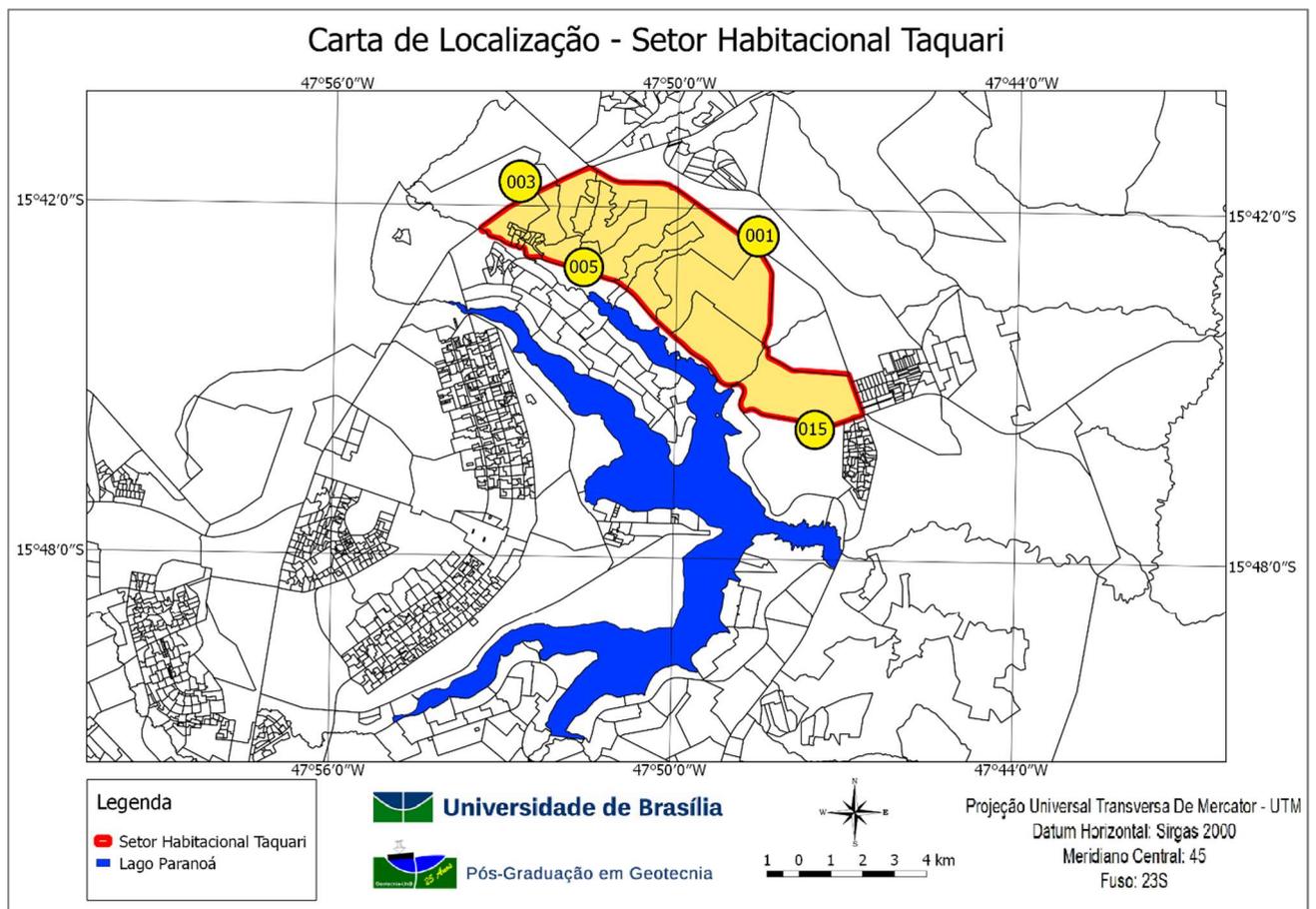


Figura 5.9 – Carta de Localização da área de estudo.

- **Carta de Hipsometria (escala 1:25.000)**

A Figura 5.10 mostra a Carta Hipsométrica da área de estudo com cotas variando entre 1019 e 1200 m elaborada com dados obtidos do SRTM e a Figura 5.11, por sua vez, apresenta a Hipsometria elaborada com dados da Base Cartográfica Digital com intervalo de classes a cada 5 m.

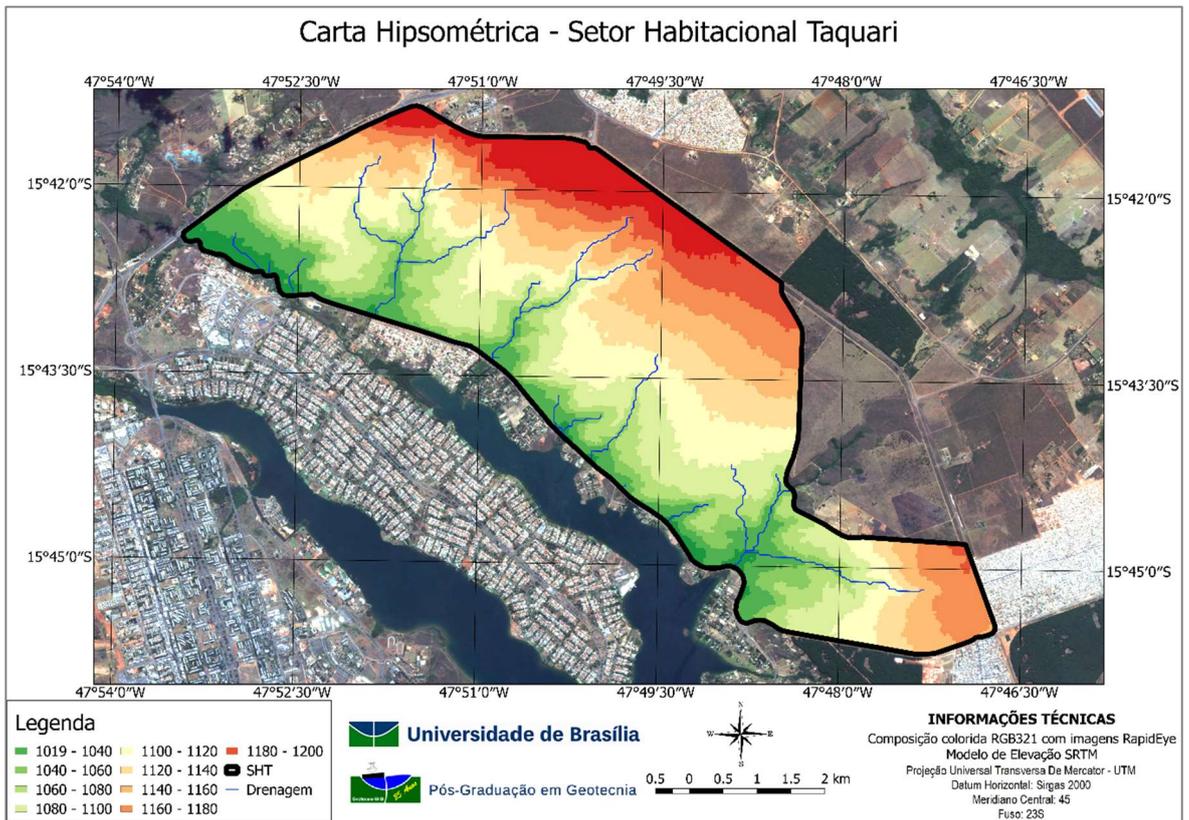


Figura 5.10 – Carta de Hipsometria (dados do SRTM).

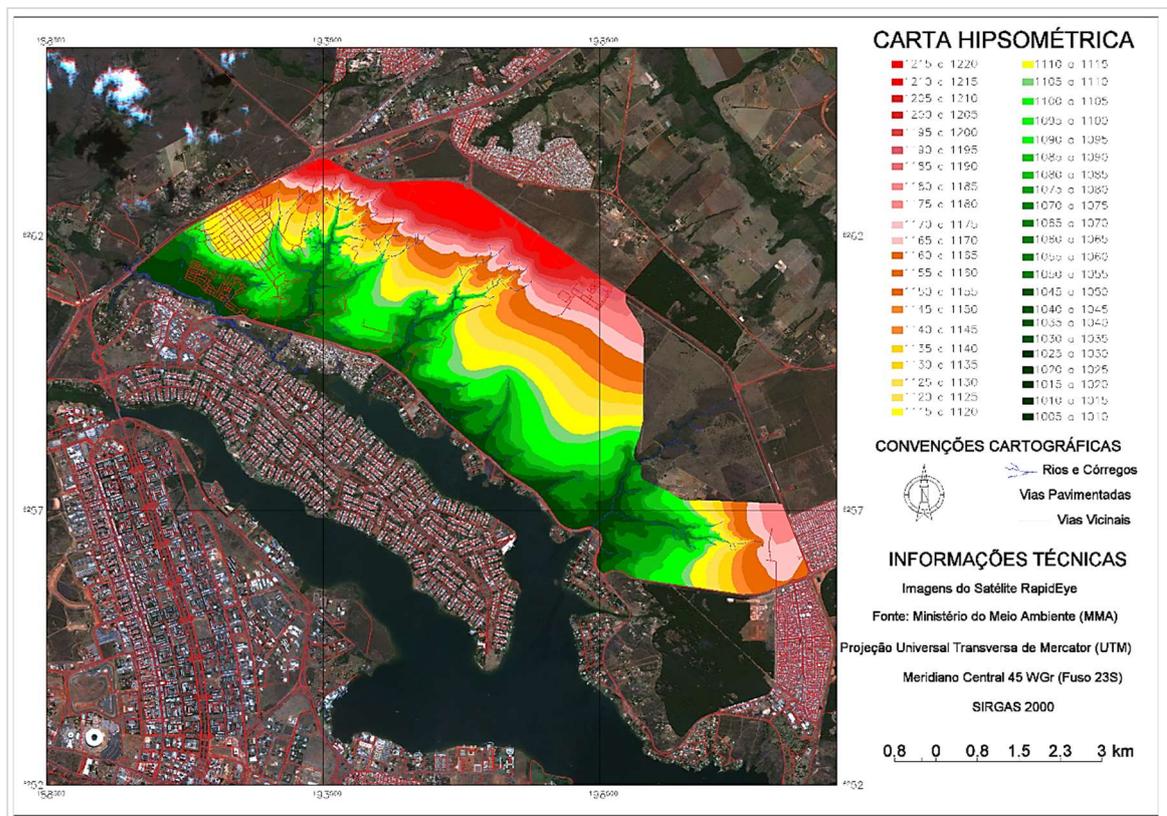


Figura 5.11 – Carta de Hipsometria (dados do Base Cartográfica Digital).

De acordo com a Tabela 5.2, as cotas da hipsometria da área predominam entre as classes 1085 e 1140 m.

Tabela 5.2 – Medidas de classes temáticas: Carta de Hipsometria (dados da Base Cartográfica)

Altitude (m)	Área em km ²	Altitude (m)	Área em km ²
1005 a 1010	0,20	1115 a 1120	1,38
1010 a 1015	0,53	1120 a 1125	1,26
1015 a 1020	0,48	1125 a 1130	1,15
1020 a 1025	0,52	1130 a 1135	1,10
1025 a 1030	0,57	1135 a 1140	1,04
1030 a 1035	0,61	1140 a 1145	0,95
1035 a 1040	0,62	1145 a 1150	0,87
1040 a 1045	0,59	1150 a 1155	0,85
1045 a 1050	0,58	1155 a 1160	0,82
1050 a 1055	0,57	1160 a 1165	0,84
1055 a 1060	0,60	1165 a 1170	0,88
1060 a 1065	0,67	1170 a 1175	0,81
1065 a 1070	0,83	1175 a 1180	0,76
1070 a 1075	0,80	1180 a 1185	0,57
1075 a 1080	0,92	1185 a 1190	0,52
1080 a 1085	1,00	1190 a 1195	0,45
1085 a 1090	1,16	1195 a 1200	0,42
1090 a 1095	1,30	1200 a 1205	0,47
1095 a 1100	1,38	1205 a 1210	0,52
1100 a 1105	1,39	1210 a 1215	1,38
1105 a 1110	1,39	1215 a 1220	0,22
1110 a 1115	1,42		

A Figura 5.12 apresenta uma curva hipsométrica criada com os dados apresentados na Tabela 5.2. No eixo das abscissas encontram-se dados da área em km² e no eixo das ordenadas as cotas em m. Dessa forma, tem-se aproximadamente 30 km² de área acima da cota 1.100 m, ao passo que se tem toda a área da análise acima da cota 1.005 m, por exemplo.

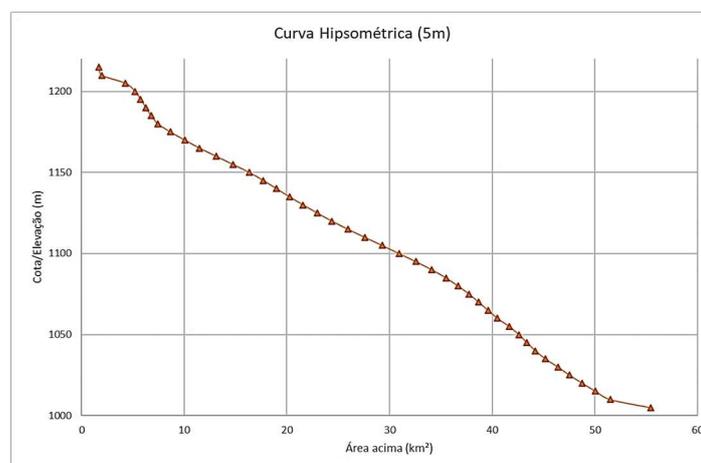


Figura 5.12 – Curva Hipsométrica da área.

A Figura 5.13 mostra um Perfil topográfico traçado de Sudoeste (1020 m) para Nordeste (1210 m), apresentando a mudança de terreno de chapada para o rebordo, mostrando ainda os patamares de perda de material e deposição, ou seja, entre as cotas de 1120 e 1200 m a rampa de transição está em processo erosivo, no entanto, na cota de 1120 m é possível perceber um leve aplainamento, onde ocorre uma deposição sedimentar.

Abaixo da cota 1080 m (área com cambissolos) o processo erosivo se torna mais acentuado, pois a declividade aumenta, visto haver a proximidade de um afluente do rio Paranoá - é perceptível no bioma cerrado os vales mais jovens terem vertentes mais íngremes.

- **Perfil topográfico (SW-NE)** – elaborado com dados da Base Cartográfica (Terracap/DF).

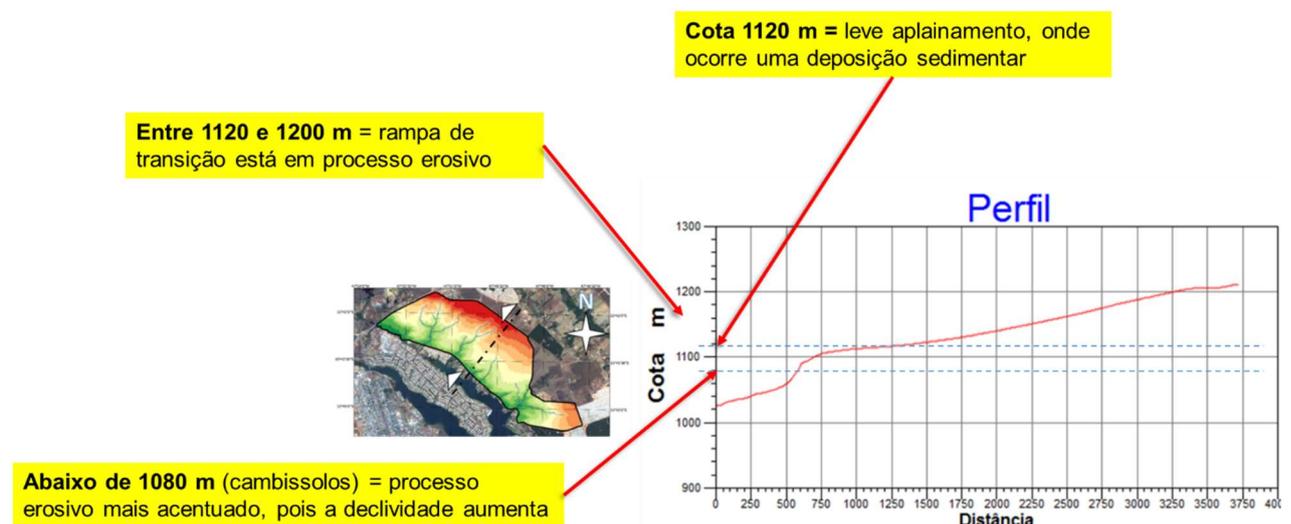


Figura 5.13 – Perfil Topográfico SW-NE.

- **Carta de Declividade (escala 1:25.000)**

A Figura 5.14 apresenta uma Carta de Declividade elaborada para a área de estudo, em escala 1:25.000, com base nas curvas de nível importadas da Base Cartográfica digital do DF.

O PI de declividade foi fatiado em sete classes, definidas com base nos critérios a seguir (Giboshi, 1999; Ramalho Filho & Beek, 1995):

- 0 a 3%: áreas sujeitas a acúmulo de água e passíveis de inundação e alagamentos, caso estejam sobre influência de corpos d'água;
- 3 a 8%: áreas sujeitas a inundação e alagamentos caso estejam sobre influência de corpos de água e onde são registrados processos deposicionais;
- 8 a 13%: a partir dessa faixa, os processos erosivos começam a ficar significativos;

- 13 a 20%: a partir dessa faixa os movimentos de massa começam a ficar significativos;
- 20 a 45%: essa faixa inclui a inclinação máxima prevista pela Lei nº 6766/1979 para ocupação de encostas (30% ou 15°).
- > 45%: restrição legal definida pelo Código Florestal como APP (Brasil, 2012b). São áreas mais propensas à ocorrência de movimentos de massa (CPRM, 2018).

De forma geral, os declives mais elevados podem contribuir para deflagração de processos erosivos e movimentos gravitacionais de massa e, em locais próximos aos cursos d'água, pode colaborar para ocorrência de enxurradas e inundações.

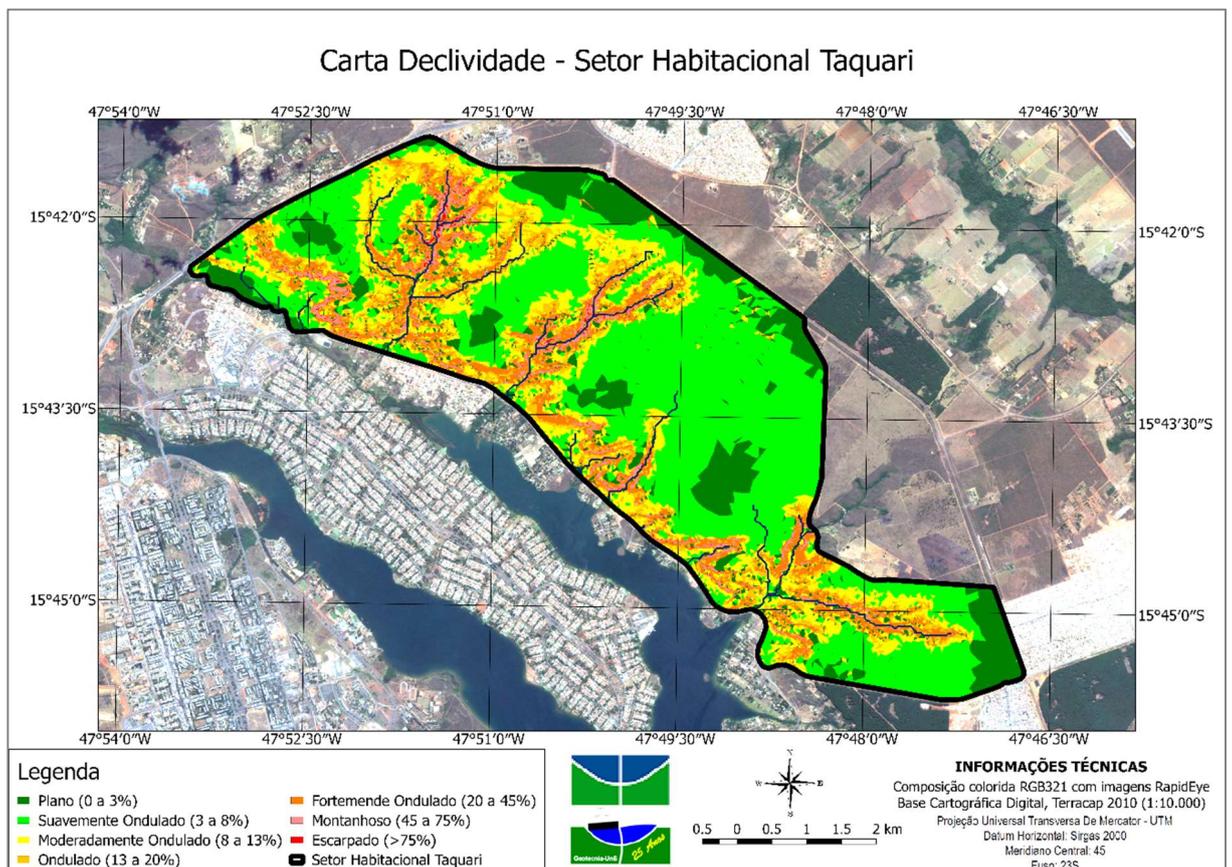


Figura 5.14 – Carta de Declividade (dados da Base Cartográfica Digital).

Na Tabela 5.3 observa-se que predominam as áreas com declividades nas classes: Suavemente ondulado (3 - 8%) e Moderadamente ondulado (8 - 13%).

Tabela 5.3 - Medidas de classes temáticas: Carta de Declividade.

Declividade (%)	Área em km ²
Plano 0-3%	5,53
Suavemente ondulado 3-8%	15,86
Moderadamente ondulado 8-13%	5,65
Ondulado 13-20%	3,43
Fortemente ondulado 20-45%	3,90
Montanhoso 45-75%	0,96
Escarpado >75%	0,11

A Figura 5.15 apresenta uma Carta de Declividade elaborada com dados obtidos pelo SRTM com as mesmas classes temáticas adotadas na Carta de Declividade elaborada com os dados da base cartográfica.

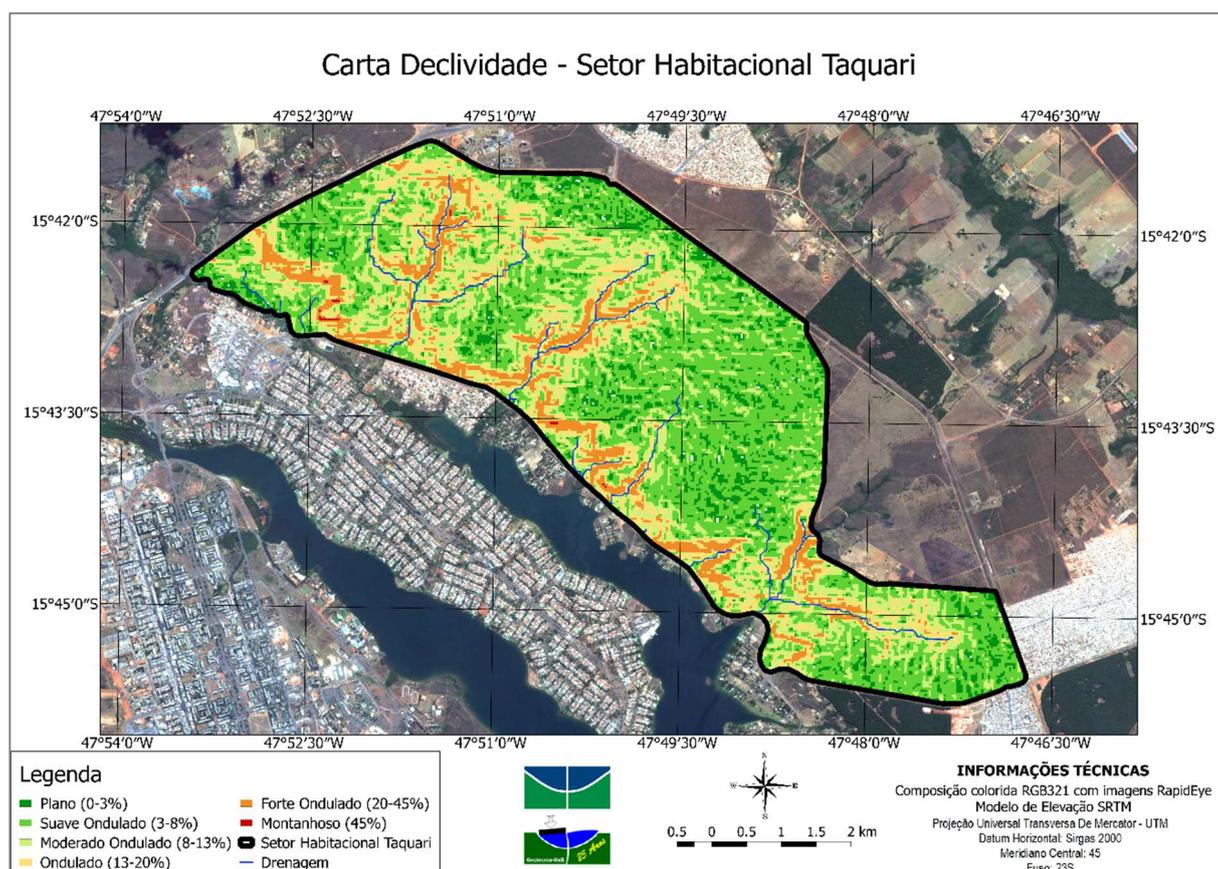


Figura 5.15 – Carta de Declividade (dados do SRTM).

- **Carta de Orientação de Vertentes ou Exposição (escala 1:25.000)**

As Figuras 5.16 e 5.17 correspondem às Cartas de Orientação de Vertentes. A primeira foi elaborada com dados do SRTM e a segunda com dados da Base Cartográfica Digital.

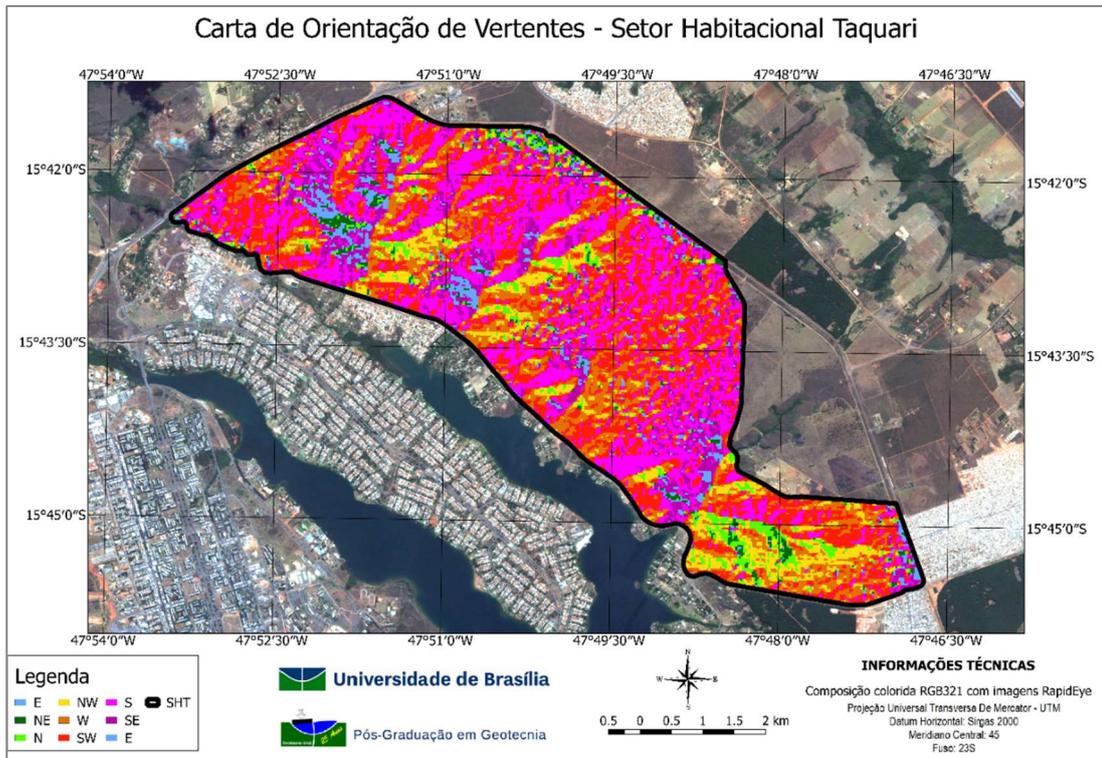


Figura 5.16 – Carta de Orientação de Vertentes (dados do SRTM).

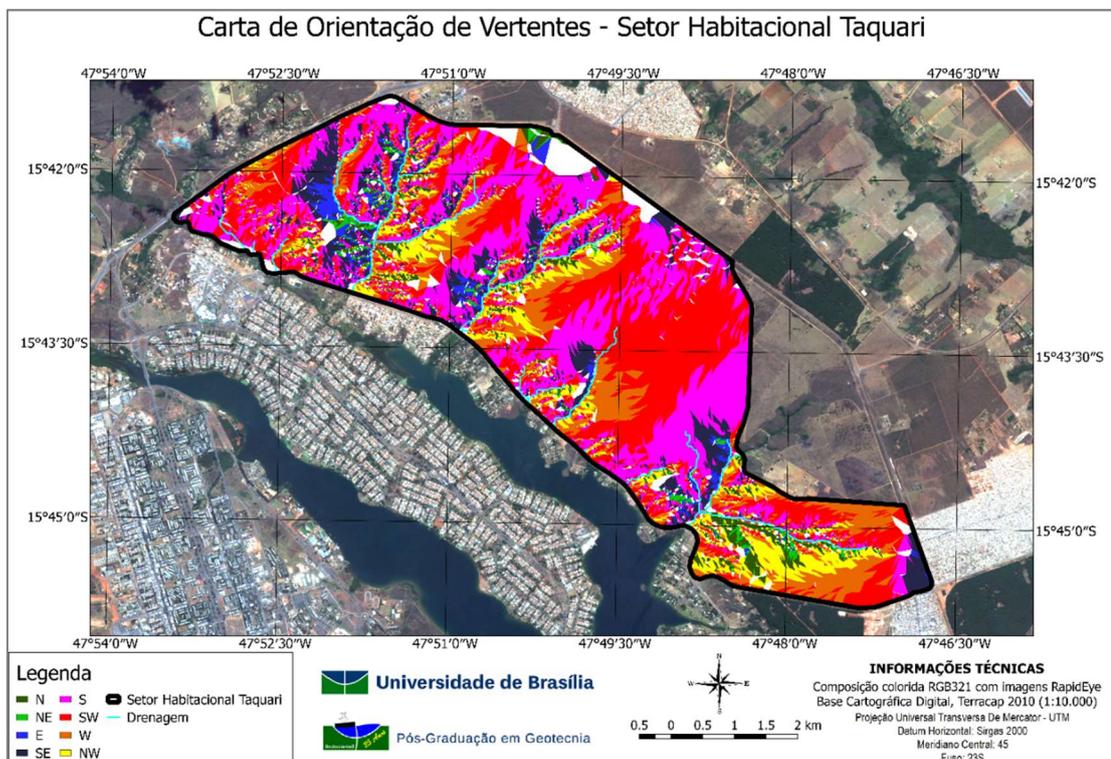


Figura 5.17 – Carta de Orientação de Vertentes (dados da Base Cartográfica Digital).

Observa-se, na Tabela 5.4, que predominam as vertentes orientadas para o Sul (S) e Sudoeste (SW) com base nos dados da base cartográfica digital.

Tabela 5.4 - Medidas de classes temáticas: Carta de Orientação de Vertentes

Orientação de vertentes	Área em km ²
N	2,10
NE	3,18
E	2,23
SE	4,27
S	11,98
SW	13,40
W	8,16
NW	3,80

A depender da época do ano, essas vertentes têm pouca incidência solar, segundo consta na Carta Solar de Brasília - Latitude 15,47° Sul, Zona Bioclimática 4 (Figura 5.18).

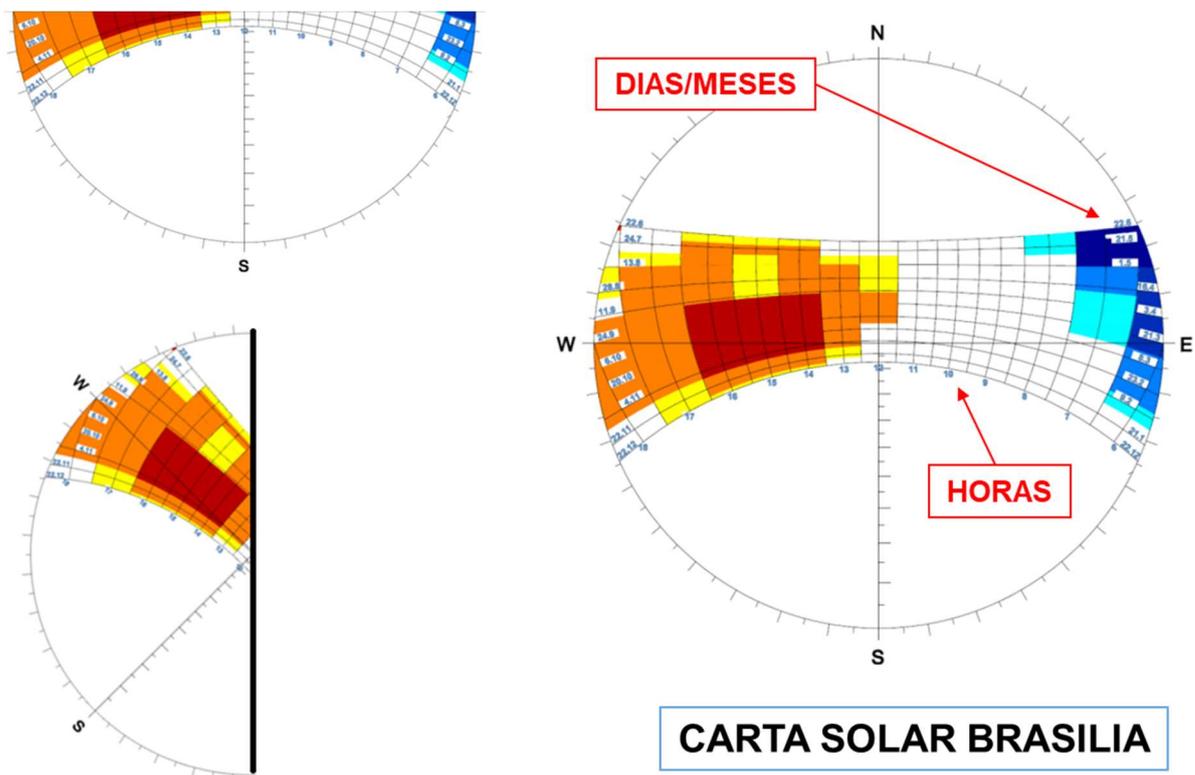


Figura 5.18 – Carta Solar de Brasília (modificado de <http://projeteec.mma.gov.br/>).

Em relação à orientação S, o sol incide nos meses da primavera e verão dos hemisférios Sul (Outubro, Novembro, Dezembro, Janeiro e Fevereiro, predominantemente).

Na orientação SW observa-se que o sol incide nos períodos vespertinos dos meses maio, junho e julho (a partir das 14h30min) e a partir das 12h nos equinócios. Nos meses de Novembro, Dezembro, Janeiro e parte de Fevereiro o sol incide desde às 11h30min, aproximadamente.

- **Carta de Relevo Sombreado (escala 1:25.000)**

O SPRING permite a visualização 3D dos dados de MNT, com possibilidade de alteração dos parâmetros de exagero vertical e aplicação de texturas no modelo. Figura 5.19 apresenta a possibilidade de visualização do MNT em 3D com aplicação de textura de imagem RGB (Figura 5.19-a) e plano temático de declividade (Figura 5.19-b).

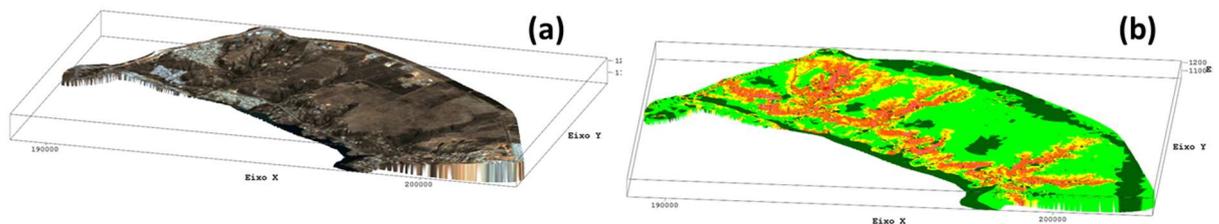


Figura 5.19 – Visualização 3D: dados de MNT com aplicação de texturas.

A Figura 5.20 corresponde à Carta de Relevo Sombreado, elaborada segundo parâmetros de imagem detalhados no subitem 4.2.1.2, criada com os dados da Base Cartográfica Digital.

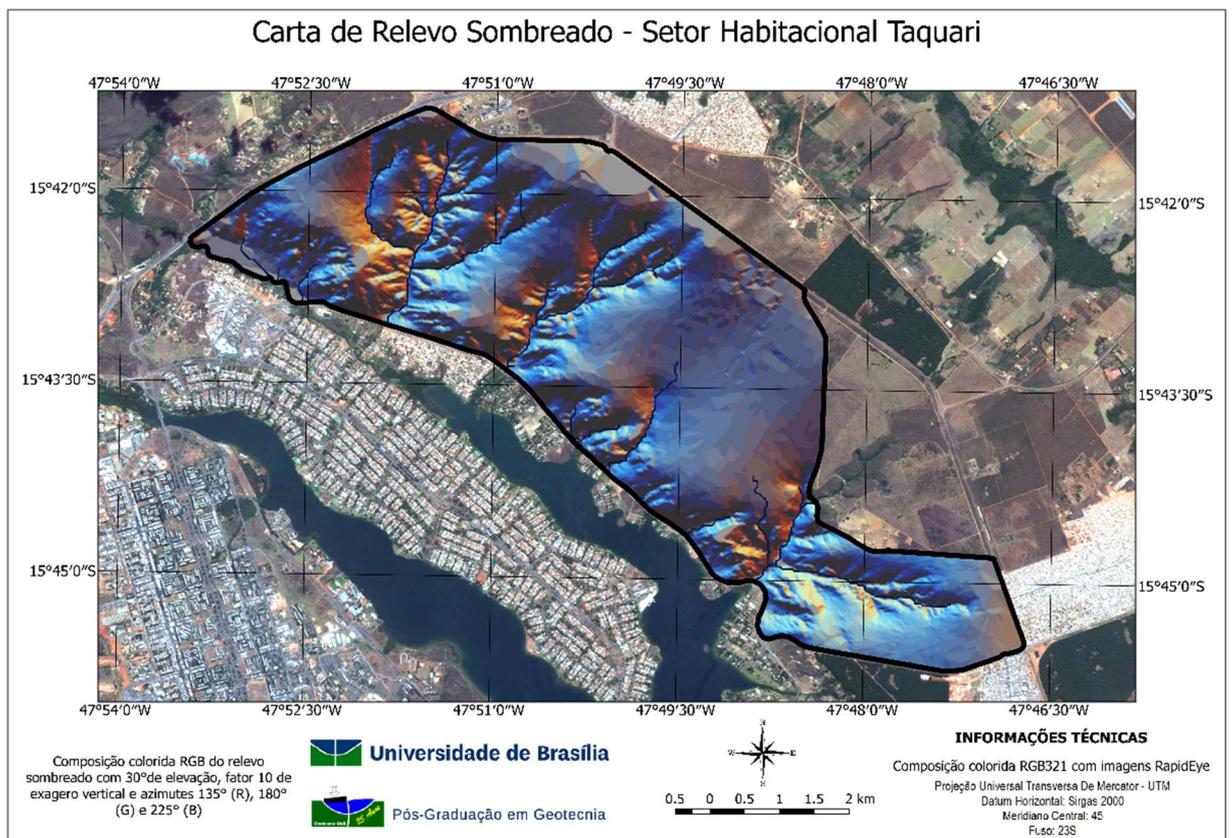


Figura 5.20 – Carta de Relevo Sombreado (dados da Base Cartográfica Digital).

- **Carta de Curvatura de Terreno (escala 1:25.000)**

A Figura 5.21 apresenta as Cartas de Curvatura de Terreno, elaboradas segundo Zevenbergen & Thorne (1987). A Figura 5.21 (a) representa as curvaturas planas e a Figura 5.21 (b) as curvaturas de perfil.

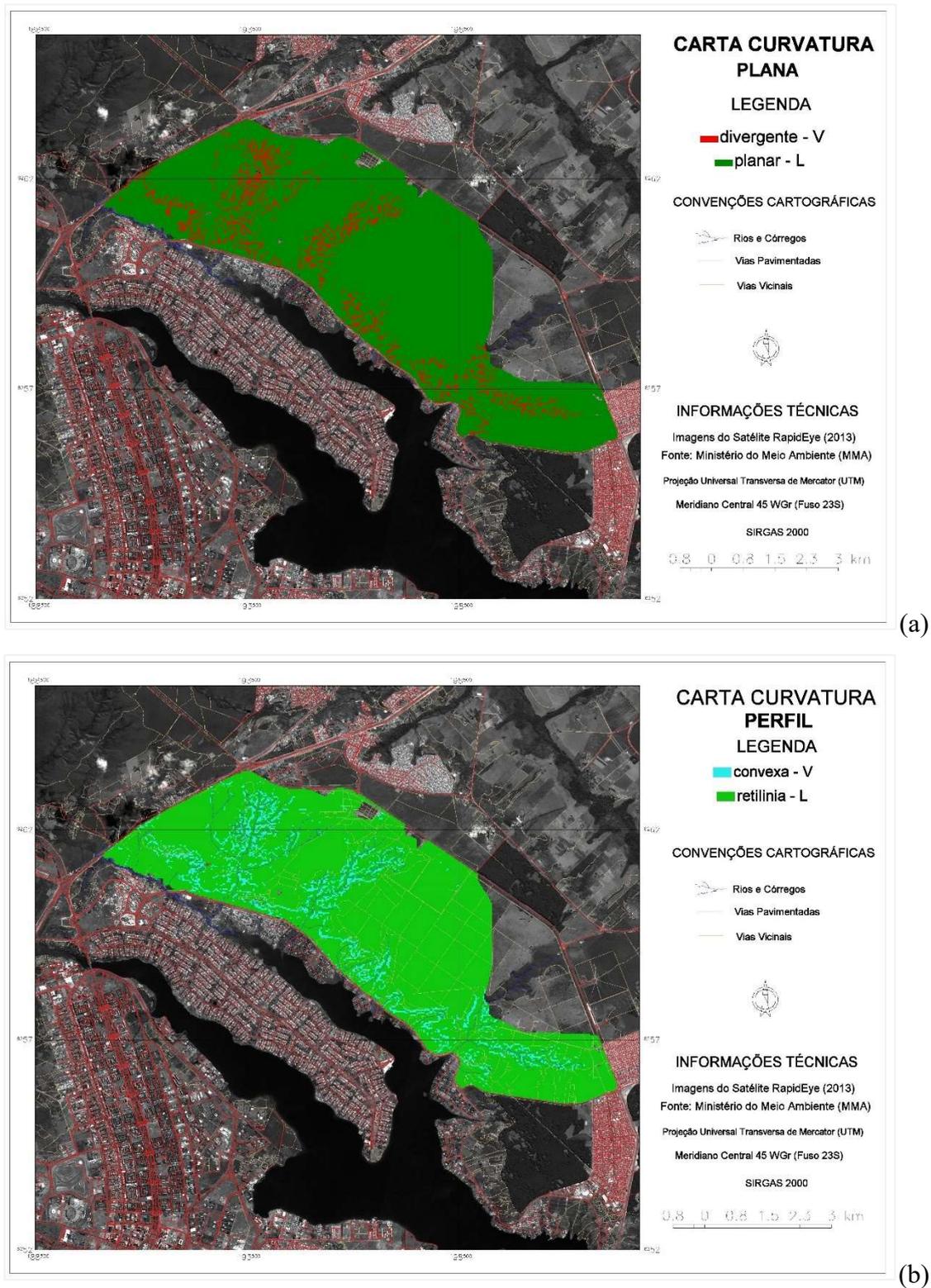


Figura 5.21 – Curvatura de Terreno (Plana e Perfil).

- **Carta de Geologia (escala original 1:100.000)**

Em relação às características geológicas da área, a Figura 5.22 apresenta apenas três classes, de acordo com dados elaborados por Freitas-Silva & Campos (1988).

Predomina a classe MNPr3 – Metarritmito Arenoso, em azul na legenda da Figura 5.22.

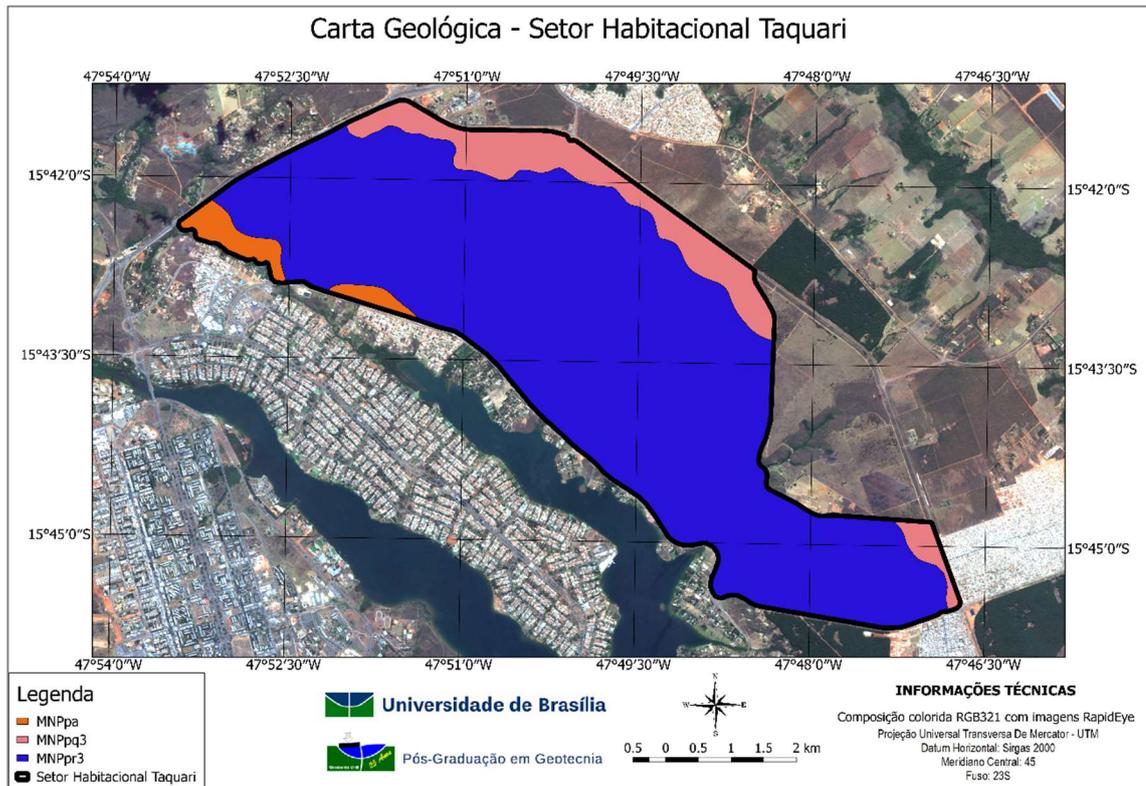


Figura 5.22 – Carta de Geologia (Freitas-Silva & Campos, 1998).

- **Carta de Geomorfologia (escala original 1:100.000)**

A Figura 5.23 apresenta a Carta de Geomorfologia elaborada com dados disponíveis em GDF (2012), com uma faixa de plano elevado (chapada), rebordo e um pequeno trecho de plano intermediário.

Nas chapadas predominam os Latossolos e declividades inferiores a 10%, e nos rebordos os Cambissolos com declividades entre 10 e 20%.

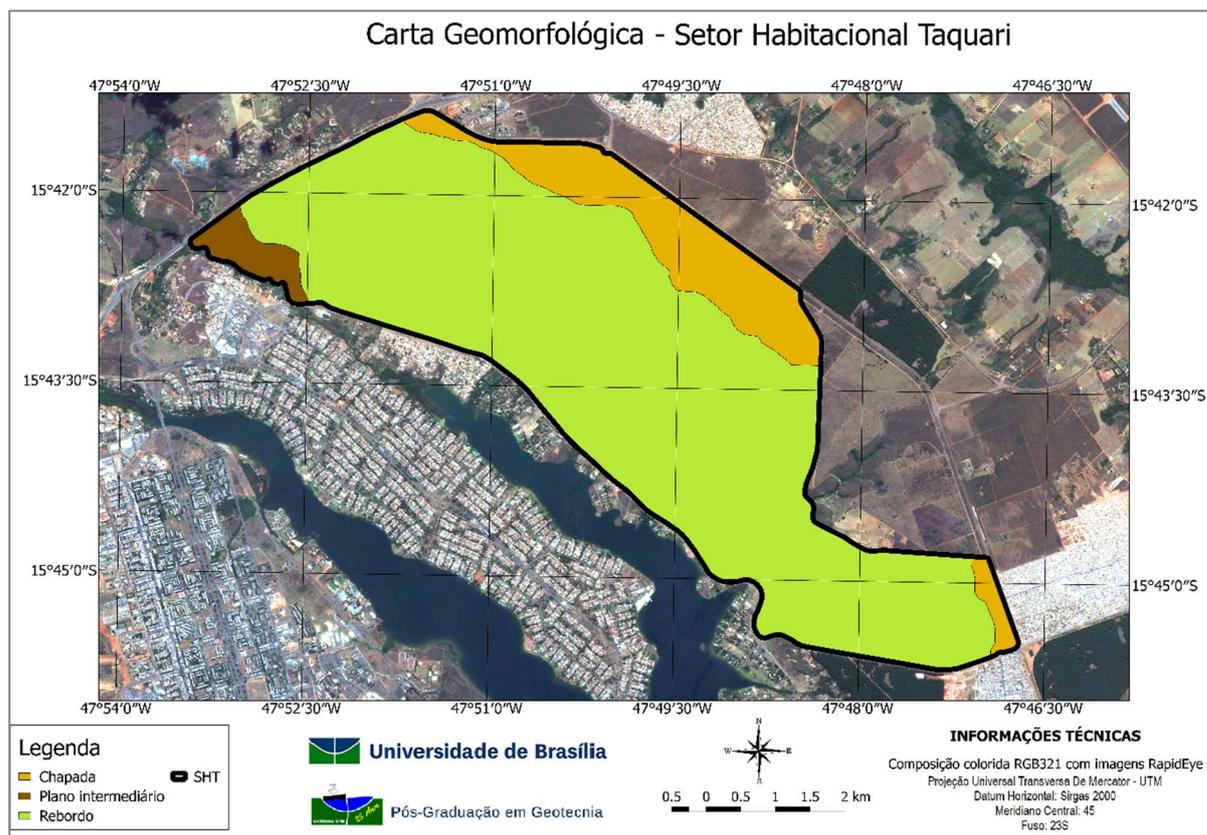


Figura 5.23 – Carta de Geomorfologia (GDF, 2012).

- **Carta de Solos (escala original 1:100.000)**

Conforme apresentado na Figura 5.24, a área de estudo tem sua superfície recoberta predominantemente, por latossolos vermelhos, latossolos vermelho-amarelos e cambissolos.

Os Latossolos, segundo o ZEE-DF (GDF, 2012), apresentam alta permeabilidade de água e, por consequência, uma maior resistência à erosão desses solos, permitindo o uso urbano e rural com edificações de pequeno e médio porte, construção de subsolos e instalação de sistemas de saneamento.

Os Cambissolos têm sua permeabilidade dificultada em função das características de cobertura vegetal de campo limpo e alto teor de silte do horizonte A. Além disso, as altas declividades dos locais de ocorrência desses solos contribuem para torná-los mais susceptíveis à erosão (GDF, 2012).

Cabe ressaltar que as ARINES do SHTq ocorrem, predominantemente, nas áreas de Cambissolo, o que agrava ainda mais a situação de vulnerabilidade das edificações.

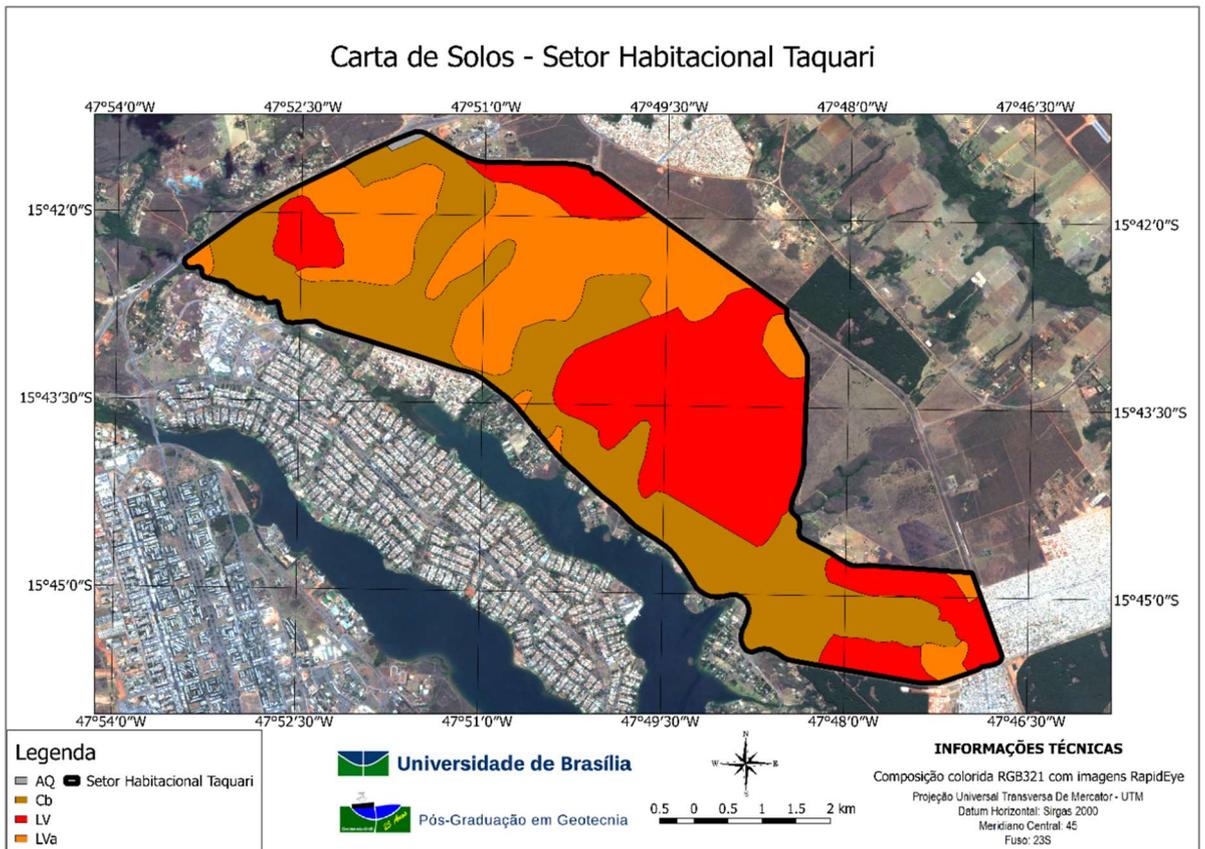


Figura 5.24 – Carta de Solos (Embrapa, 1978).

- **Carta Imagem (escala 1:25.000)**

Foram criadas Cartas Imagem com os dados dos satélites citados no subitem 4.1.2. Imagens de Sensoriamento Remoto: Landsat 8 (Figura 5.25-a), Sentinel 2A (Figura 5.25-b), CBERS 4 (Figura 5.25-c) e *RapidEye* (Figura 5.25-d).

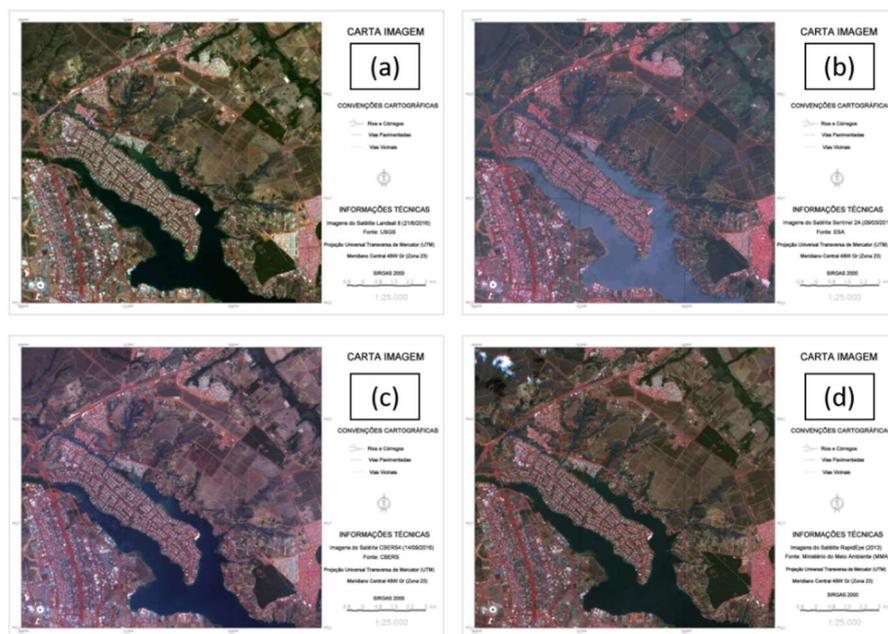


Figura 5.25 – Cartas Imagem – satélites diversos.

A Carta Imagem elaborada com os dados do *RapidEye* apresentou melhor resultado em função da resolução espacial de 5 m (Figura 5.26).

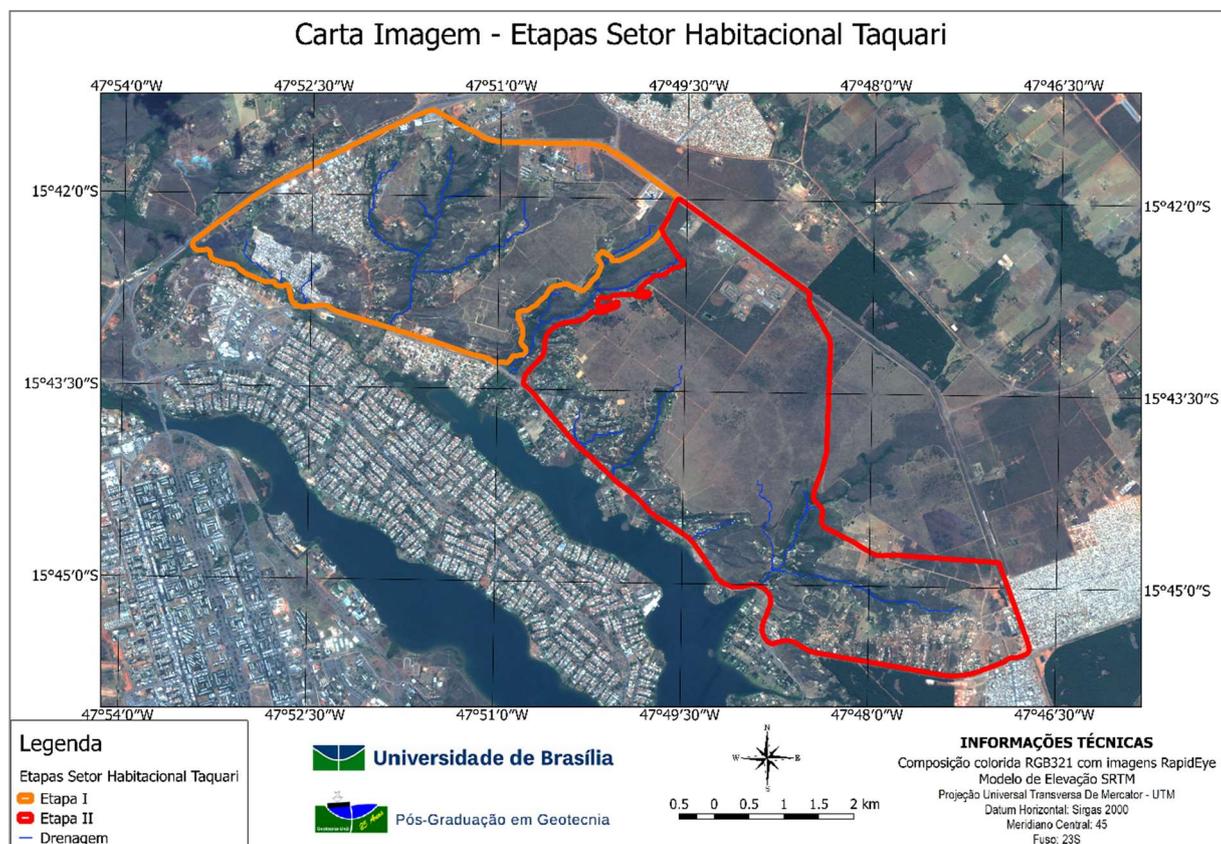


Figura 5.26 – Carta Imagem – Etapas do SHTq.

- **Carta de Uso e Cobertura do Solo (2016) - escala 1:25.000**

Elaborou-se duas cartas de uso e cobertura do solo da área de estudo, utilizando dados das imagens do satélite *RapidEye* (agosto de 2013) e visitas a campo, durante o ano 2016, para auxiliar no processo de treinamento e classificação das imagens.

Foram identificadas 5 classes, descritas na Tabela 5.5:

Tabela 5.5 – Relação de classes temáticas utilizadas nas classificações de uso e cobertura

Item	Cor	Classe
1	Red	Área Urbana
2	Brown	Solo Exposto
3	Dark Green	Mata Galeria
4	Light Green	Campo Limpo
5	Green	Cerrado

Na Figura 5.27 utilizou-se o algoritmo classificador por regiões *Battacharya*: um classificador que utiliza as amostras do treinamento prévio e uma imagem segmentada para gerar a imagem classificada.

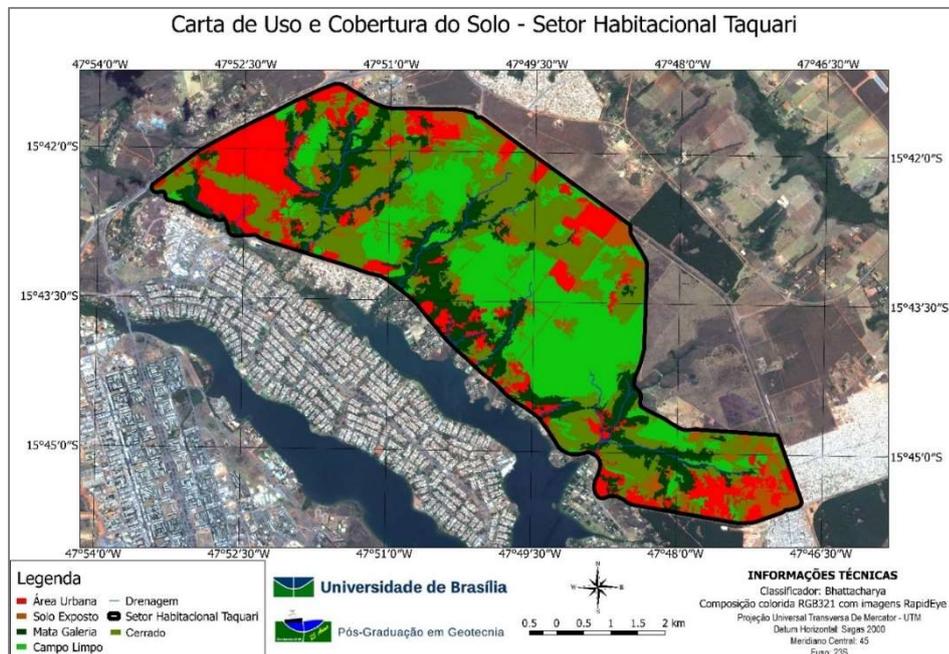


Figura 5.27 – Carta de Uso e Cobertura do Solo – 2016 (Classificador *Bhattacharya*).

Na Figura 5.28 utilizou-se o algoritmo classificador pixel-a-pixel máxima verossimilhança (Maxver), um método de classificação que considera a ponderação das distâncias entre médias dos níveis digitais das classes, utilizando parâmetros estatísticos.

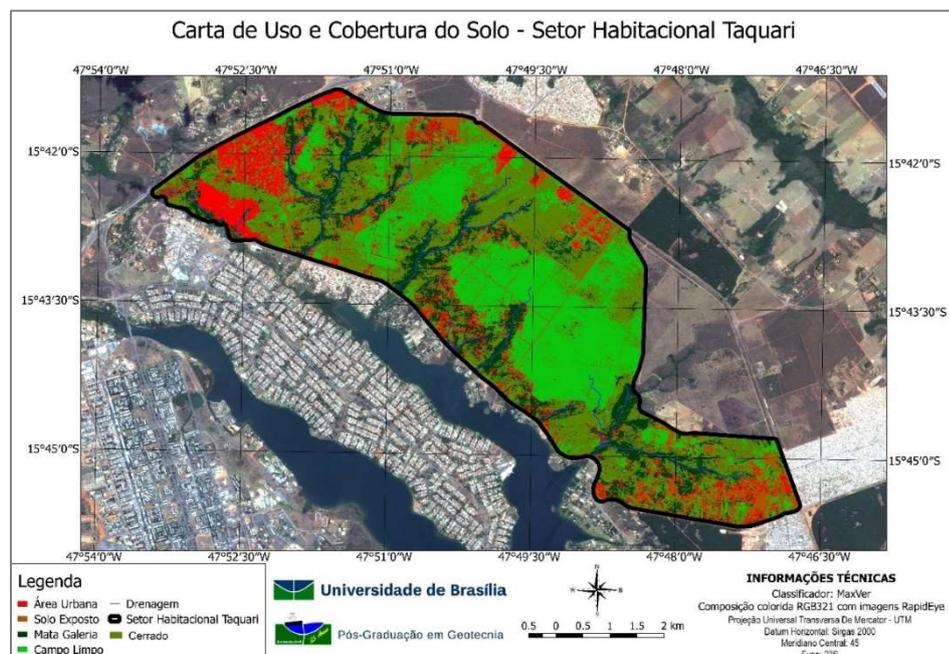


Figura 5.28 – Carta de Uso e Cobertura do Solo - 2016 (Classificador Maxver).

- **Carta de Temperatura de Brilho de Superfície (escala 1:25.000)**

Utilizando-se imagens termais do sensor TIRS do Landsat 8 e a metodologia apresentada no subitem 4.2.1.3. Processamento Digital de Imagem, elaborou-se a Carta de Temperatura de Brilho de Superfície mostrada na Figura 5.29.

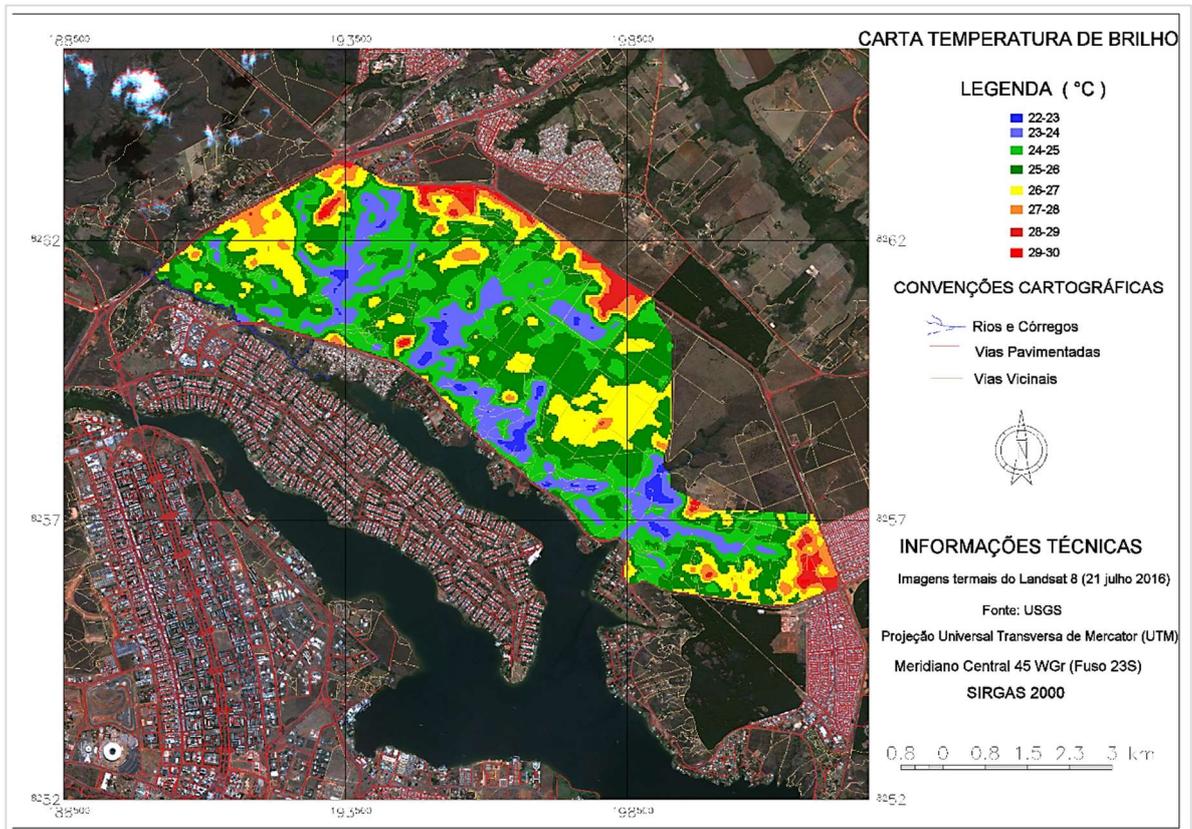


Figura 5.29 – Carta de Temperatura de Brilho de Superfície.

As menores temperaturas (classes em tons de azul) estão nas proximidades das drenagens e vegetação de mata galeria, enquanto as maiores temperaturas (classes em tons de vermelho) estão nas áreas de solo exposto, aglomerações urbanas e nas proximidades das rodovias.

A Tabela 5.6 contém os dados de medidas de classes temáticas da temperatura de brilho com predomínio das temperaturas entre 24 e 26° C.

Tabela 5.6 - Medidas de classes temáticas: Carta de Temperatura de Brilho de Superfície.

Temperatura (° C)	Área em km ²
22-23	0,65
23-24	4,84
24-25	9,55
25-26	11,50
26-27	5,85
27-28	1,90
28-29	1,03
29-30	0,10

- **Carta de APP (Distância das drenagens) - escala 1:25.000**

Com base nas drenagens intermitentes e perenes, disponíveis na Base Cartográfica digital do DF, elaborou-se uma Carta de APP – distância das drenagens (Figura 5.30) com classes de 0 a 30 m e 30 a 50 m.

O plano de informação das distâncias de drenagens foi utilizado na elaboração da Carta de Aptidão à Urbanização: a classe de 0 a 30 m foi considerada como aptidão nula de acordo com o Código Florestal Brasileiro (Brasil, 2012b).

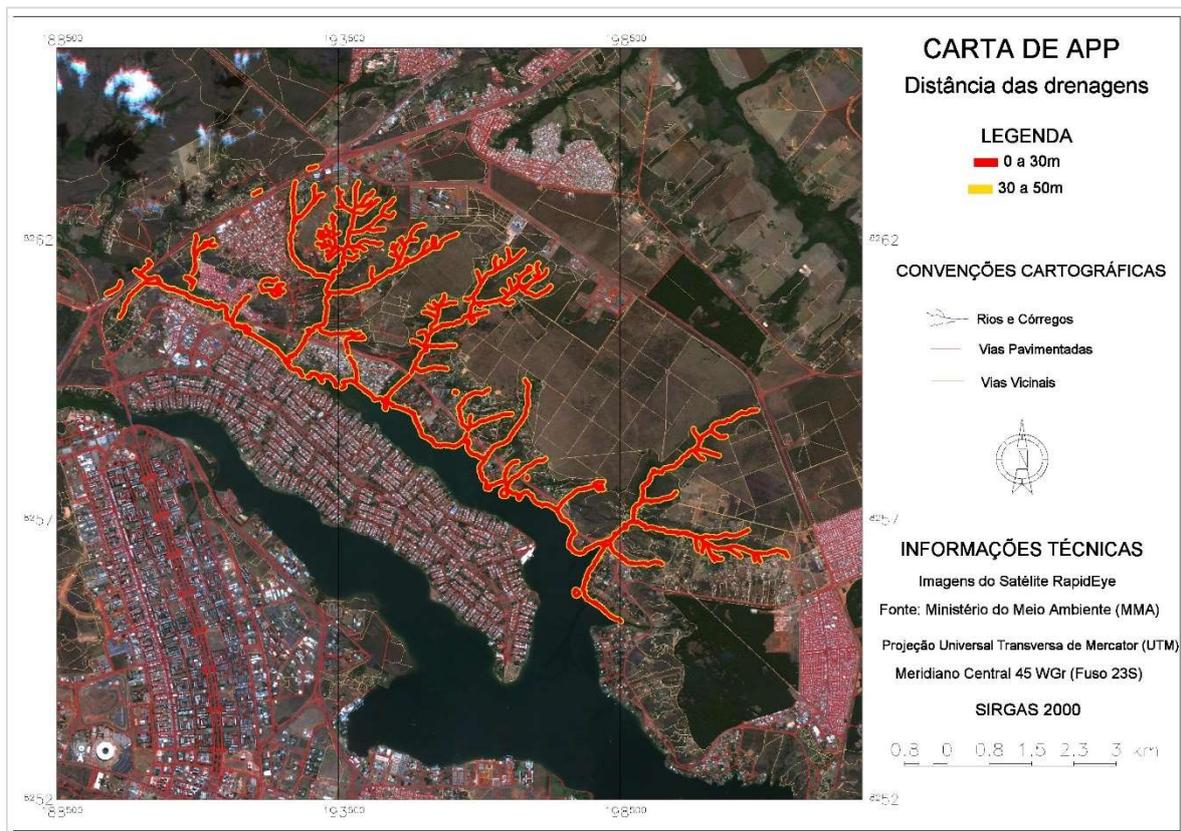


Figura 5.30 – Carta de APP (Distância das drenagens).

- **Índices de vegetação, umidade e áreas construídas elaborados no GEE**

Para alcançar os resultados apresentados neste tópico, utilizaram-se imagens da coleção Landsat 8 disponíveis no GEE (*USGS Landsat 8 Collection 1 Tier 1 and Real-Time data TOA Reflectance*).

Utilizou-se a Equação 2.2 para o cálculo do NDVI na área do SHTq, considerando-se o período entre 01 de janeiro de 2014 e 01 de junho de 2019 (*script* disponível no Apêndice C para conferência).

A Figura 5.31 apresenta o resultado do NDVI e os parâmetros de visualização (paleta de cores e valores mínimos e máximos). As matas galeria e demais áreas vegetadas estão representadas em tons de verde e as áreas urbanas em tons de vermelho e laranja.

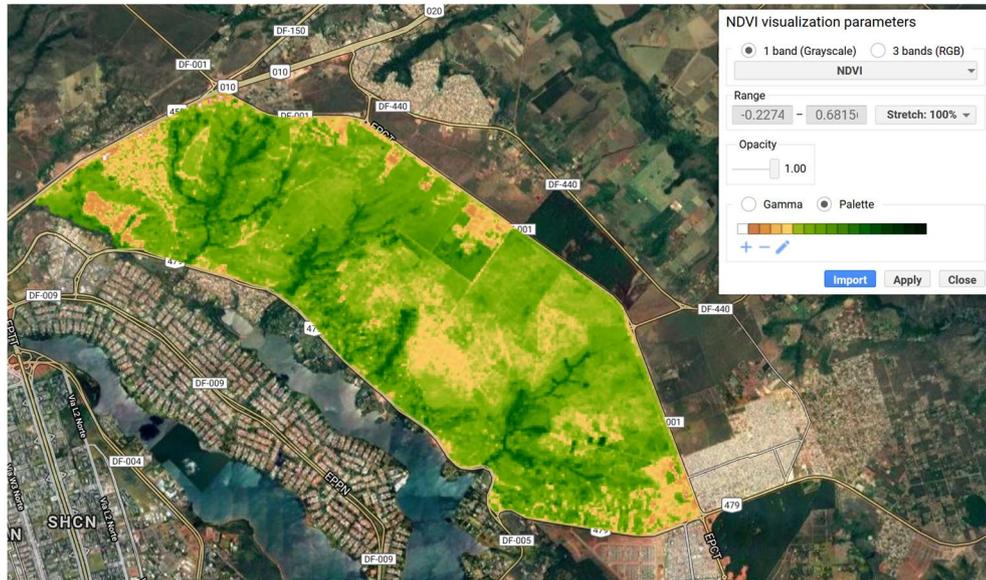


Figura 5.31 – NDVI calculado para o SHTq (modificado de GEE).

Para o NDMI, utilizou-se a Equação 2.3 e o resultado pode ser visto na Figura 5.32, com os respectivos parâmetros de visualização adotados. As áreas em azul representam os locais com conteúdo de umidade interno à vegetação maior ou solos mais úmidos.

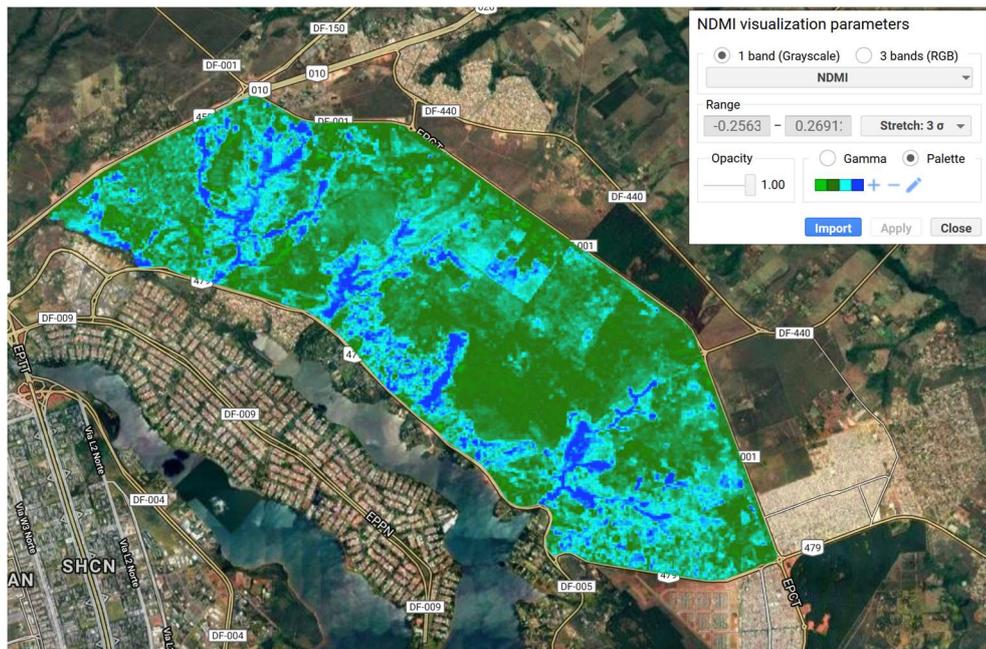


Figura 5.32 - NDMI calculado para o SHTq (modificado de GEE).

O cálculo do SAVI, apresentado na Figura 5.33, foi realizado com base na Equação 2.4. de acordo com a paleta de cores utilizada, observa-se que as áreas com cobertura vegetal mais densa estão marcadas em verde, enquanto os solos expostos, a vegetação herbácea e as áreas urbanizadas estão em tons de laranja e vermelho.

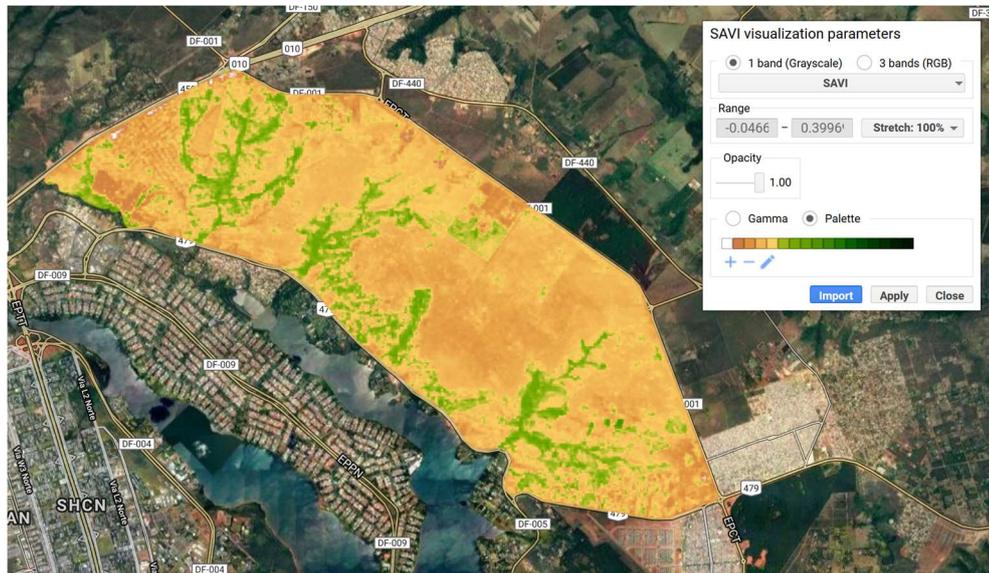


Figura 5.33 - SAVI calculado para o SHTq (modificado de GEE).

Outro índice de vegetação calculado no GEE foi o EVI (*Enhanced Vegetation Index*, traduzido para o português como Índice de Realce da Vegetação). Trata-se de uma variação do NDVI, aprimorado em relação à redução de influências atmosféricas e do solo. Da mesma forma, as áreas com maior biomassa estão representadas em tons de verde e as áreas urbanas ou solos expostos em tons de vermelho e laranja (Figura 5.34).

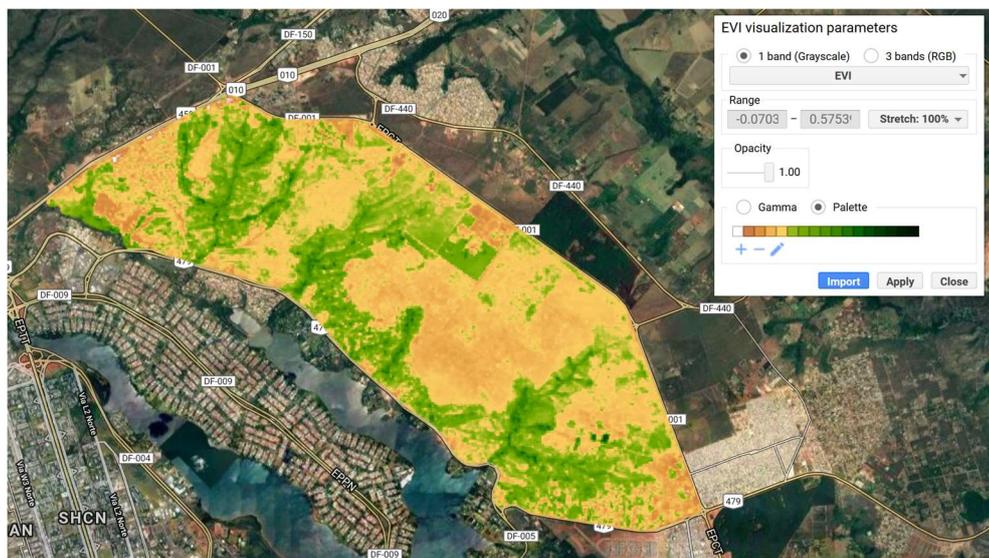


Figura 5.34 - EVI calculado para o SHTq (modificado de GEE).

Por fim, o NDBI e o B_u foram calculados utilizando-se as Equações 2.5 e 2.6 e os resultados alcançados estão apresentados na Figura 5.35, com as áreas urbanizadas representadas em vermelho (mais intenso) e a vegetação em tons de verde.

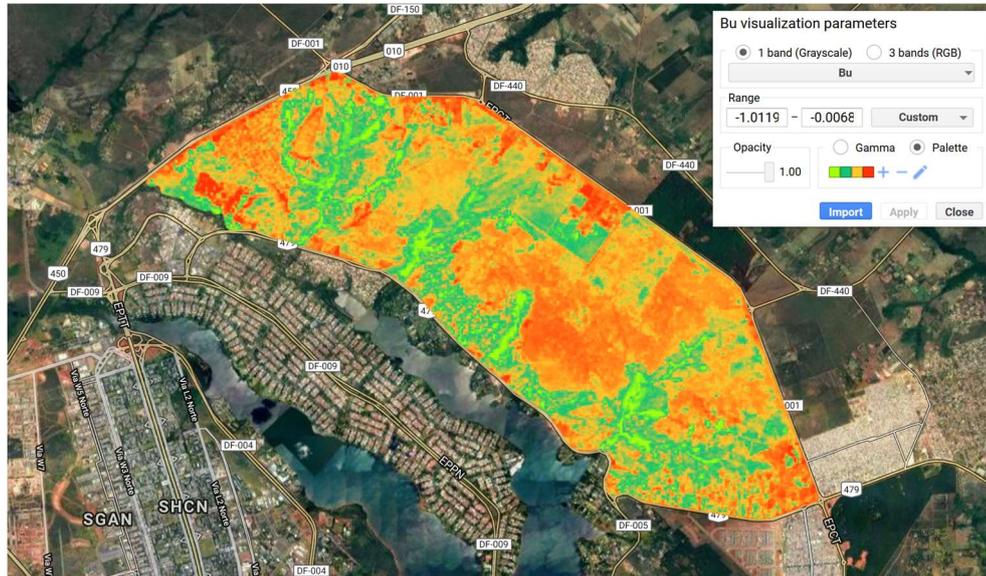


Figura 5.35 – B_u calculado para o SHTq (modificado de GEE).

Conforme citado anteriormente, o GEE possibilita a plotagem de gráficos da série dos índices calculados, conforme observa-se na Figura 5.36. O ponto vermelho representa o local clicado no mapa, cujos valores foram representados no gráfico. Nas abscissas encontram-se as datas do período definido no *script* e, nas ordenadas, encontram-se os valores resultantes dos índices.

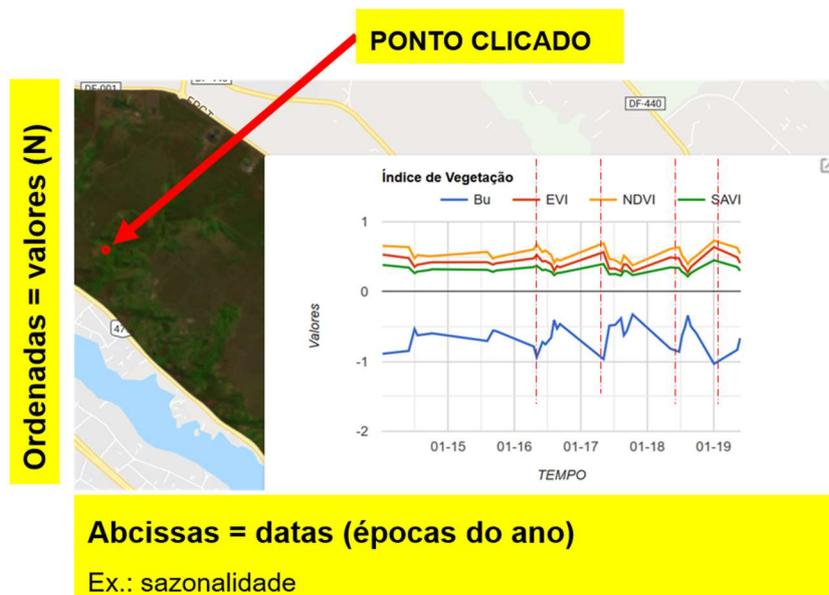


Figura 5.36 – Gráfico da evolução temporal dos índices calculados.

Ainda como resultados gerados no *script* que foi desenvolvido na pesquisa, apresentam-se na Figura 5.37, duas possibilidades de visualização de imagens de satélite:

1. Composição colorida RGB432 (cor natural), pixel de 30 m (Figura 5.37)
2. Imagem monocromática da banda pancromática (Banda 8), pixel de 15 m, conforme observa-se na Figura 5.38.

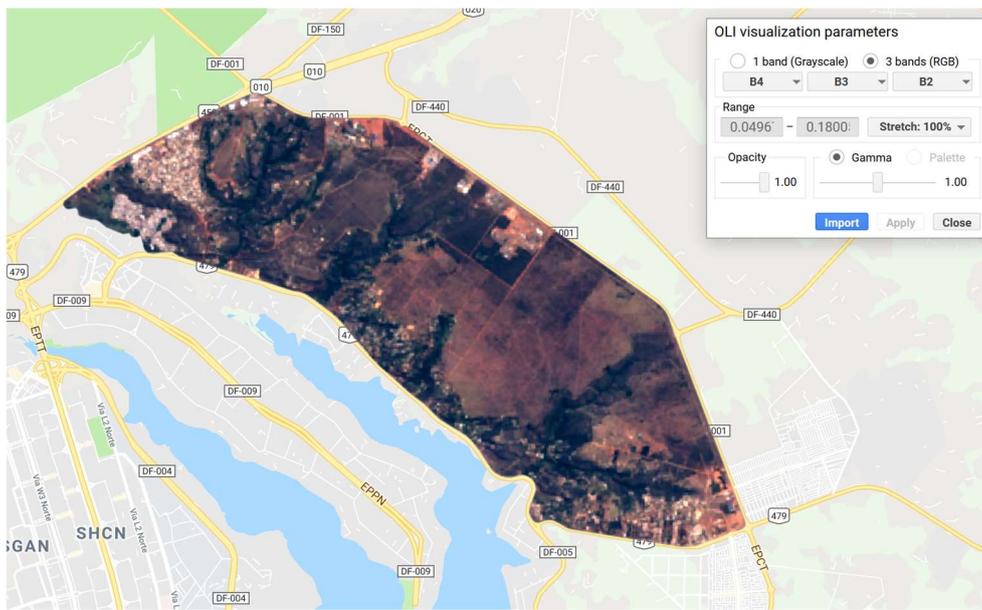


Figura 5.37 – Composição colorida RGB432 – Landsat 8 (modificado de GEE).

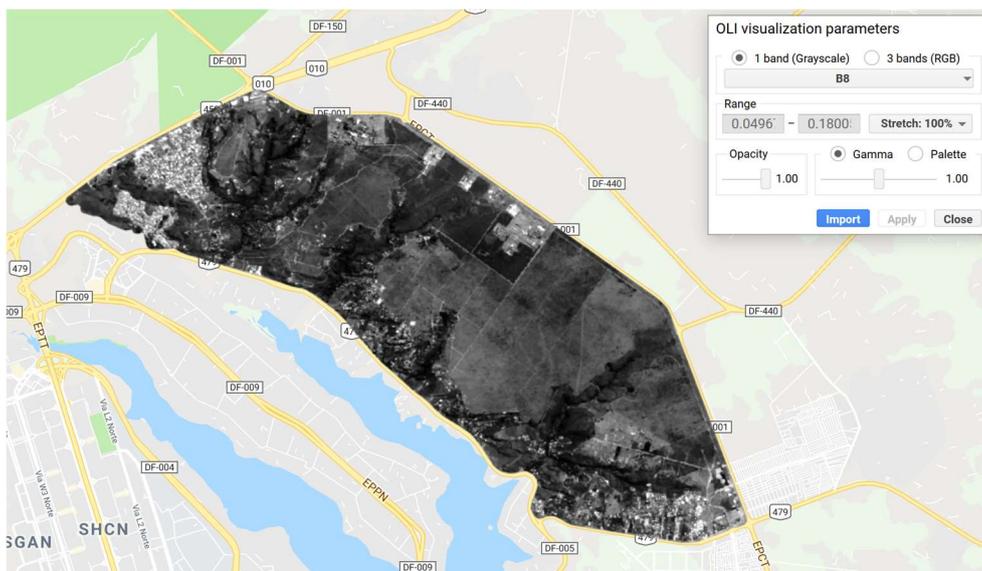


Figura 5.38 – Imagem pancromática – Landsat 8 (modificado de GEE).

Na parte final do *script* encontra-se a função que permite a exportação dos dados gerados para a utilização em outros softwares SIG (*Export.image.toDrive*).

5.4. RESULTADOS DA FASE I - GERAL

Fase destinada aos critérios de suscetibilidade aos processos naturais ou induzidos associados às condições geomorfológicas e geotécnicas dos sítios. Os produtos cartográficos gerados nessa fase apresentam escala 1:25.000 e abrangem a área do SHTq Etapa II.

Duas cartas resultantes nessa fase:

- **Carta de Suscetibilidade à Erosão (escala 1:25.000)**

A Figura 5.39 apresenta a Carta de Suscetibilidade à Erosão elaborada segundo a metodologia descrita no subitem 4.2.2.1.

Em resumo, com base nas Cartas de Pedologia e de Declividade da área de estudo procedeu-se com a elaboração de uma carta de suscetibilidade utilizando operações de álgebra de mapas, por intermédio da ferramenta LEGAL.

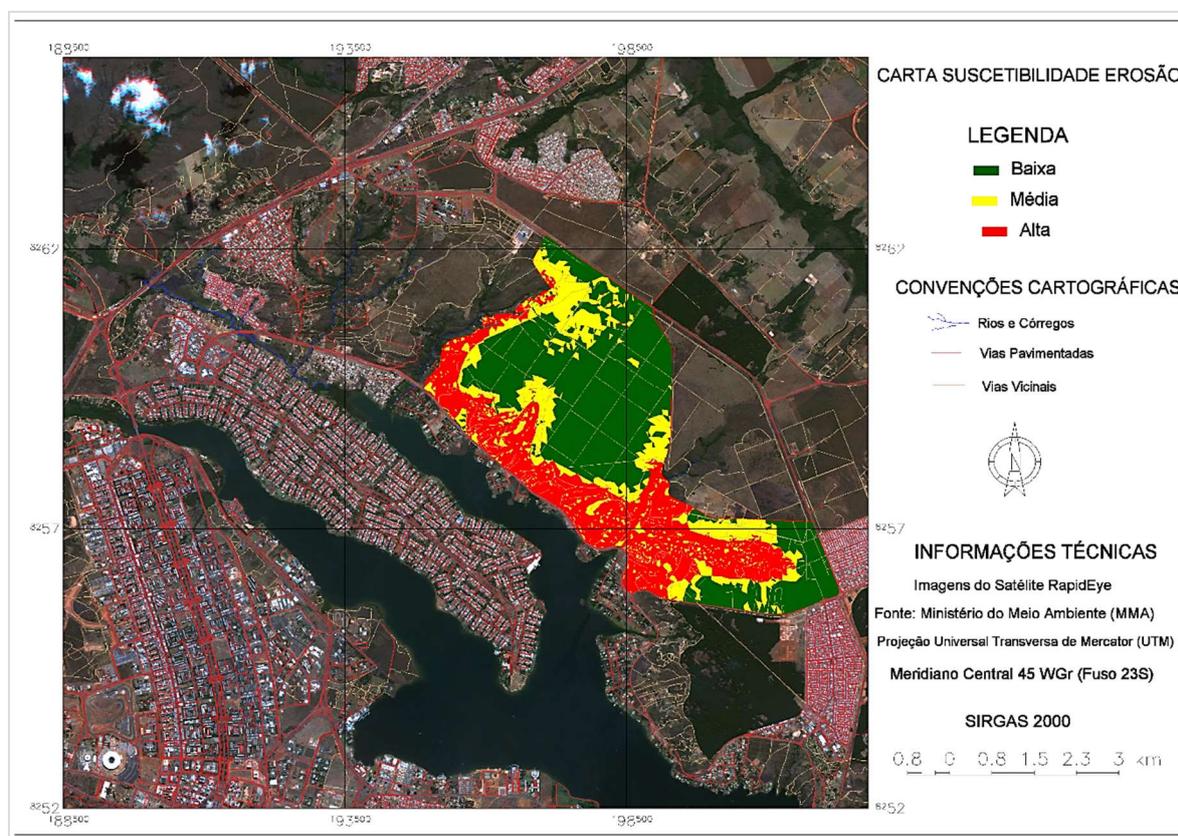


Figura 5.39 – Carta de Suscetibilidade à Erosão

Observa-se, na Tabela 5.7, que predominam as áreas de baixa suscetibilidade classificadas em verde na Figura 5.39.

Tabela 5.7 - Medidas de classes temáticas: Carta de Perda de Suscetibilidade à Erosão

Suscetibilidade à Erosão	Área em km ²
Alta	6,06
Média	4,30
Baixa	9,57

- **Carta de Perda de Solo por Erosão (escala original 1:100.000)**

Além da carta anterior (Figura 5.39), elaborou-se outra carta relacionada com a perda de solo por erosão, adaptada das cartas e mapas existentes no ZEE-DF (GDF, 2019), após a vetorização desses dados.

O objetivo principal dessa carta (Figura 5.40) foi compará-la com os resultados gerados pela metodologia proposta na tese e avaliar sua aplicabilidade no planejamento urbano e regional. Ressalta-se que a legenda denominada “risco” foi trazida do dado original, elaborado no ZEE/DF de 2019.

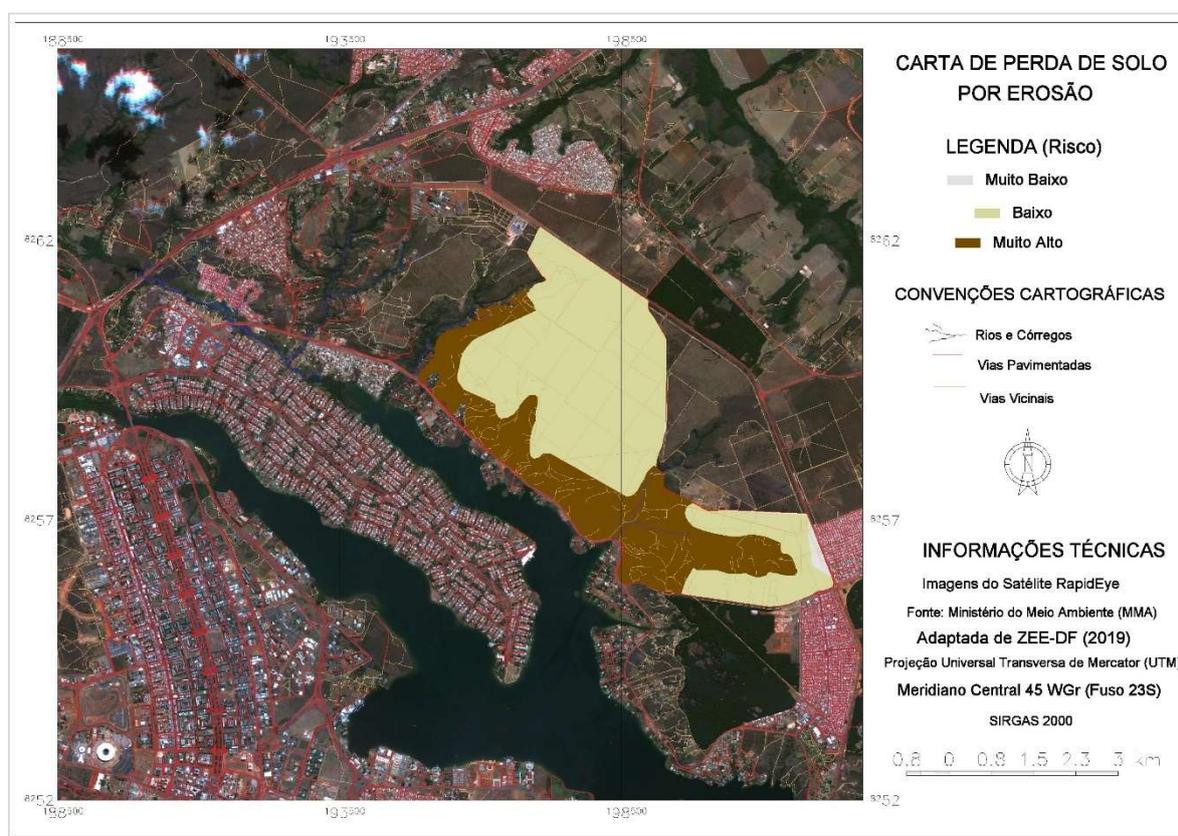


Figura 5.40 – Carta de Perda de Solo por Erosão (adaptada de GDF, 2019).

A Tabela 5.8 contém os dados de medidas de classes temáticas da Carta de Perda de Solo por Erosão com predomínio para a classe Baixo risco de perda.

Tabela 5.8 – Medidas de classes temáticas: Carta de Perda de Solo por Erosão.

Risco de perda de solo por erosão	Área em km ²
Muito Baixo	0,17
Baixo	12,63
Muito Alto	7,00

Ao comparar as áreas classificadas nas cartas citadas (Figuras 5.39 e 5.40) observa-se que a metodologia de geração de cartas de suscetibilidade à erosão desenvolvida nesta pesquisa apresenta boa correspondência em relação aos dados apresentados no ZEE-DF - Lei Distrital nº 6.269/2019, conforme a Figura 5.41.

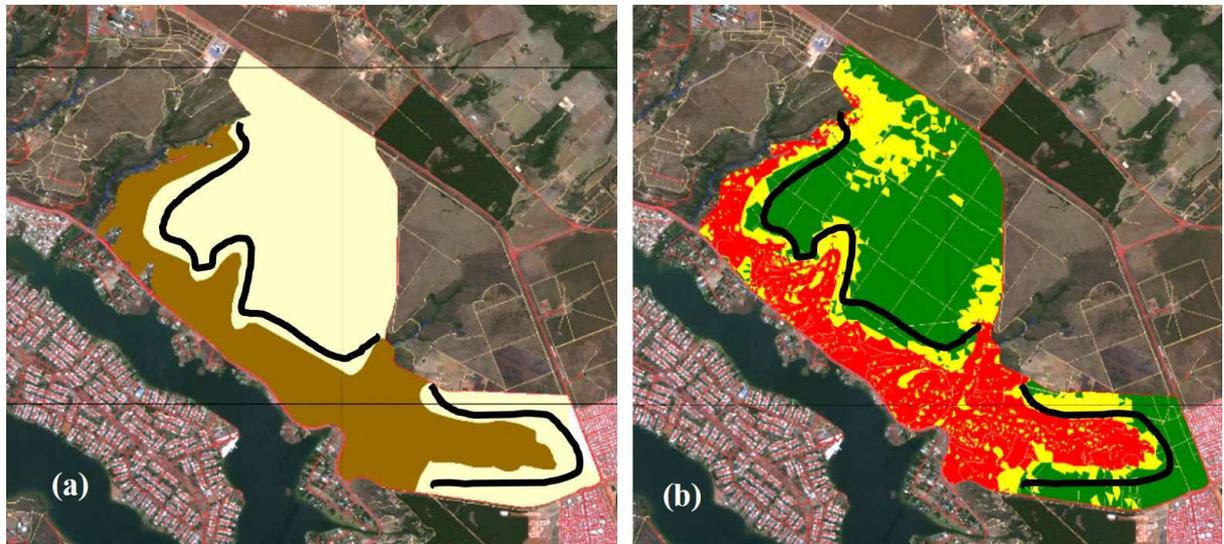


Figura 5.41 – Comparação dos resultados de suscetibilidade à erosão: (a) ZEE-DF e (b) proposta da tese

A carta resultante no ZEE-DF (em escala 1:100.000) leva em consideração características de erodibilidade dos solos, tolerância dos solos à erosão e declividade das vertentes, conforme detalhado no subitem 2.4.2. Leis Aplicadas ao Planejamento e Ocupação do Solo. A metodologia e a fórmula utilizada para a elaboração dessa carta (Figura 5.41-a) são mais complexas do que a metodologia e formulação propostas nesta tese (Figura 5.41-b), pois necessita de maior número de dados e processamentos.

Dessa forma, acredita-se que utilizando apenas dados de declividade e pedologia, processados em ambiente SIG (*software* SPRING), obtêm-se resultados simplificados, porém satisfatórios e confiáveis, que podem ser utilizados no planejamento urbano para definição de áreas suscetíveis a processos erosivos.

Observa-se ainda que os resultados alcançados na Figura 5.41-b apresentam três classes temáticas na área de estudo (alta, média e baixa), ampliando a possibilidade de avaliação dos terrenos.

5.5. RESULTADOS DA FASE II - INTERMEDIÁRIA

Fase destinada aos critérios de aptidão à urbanização. Os produtos cartográficos gerados nessa fase apresentam escala 1:25.000, abrangendo a área do SHTq Etapa II.

A Figura 5.42 apresenta a Carta de Aptidão à Urbanização elaborada para o SHTq Etapa II, segundo critérios e metodologia descrita no subitem 4.2.3.1.

Em resumo, seguindo o mesmo raciocínio da Carta de Suscetibilidade à Erosão, adaptou-se o código de programa LEGAL aproveitando os dados de pedologia e declividade e incluindo o conceito de APP para definição de áreas aptas ou inaptas à urbanização.

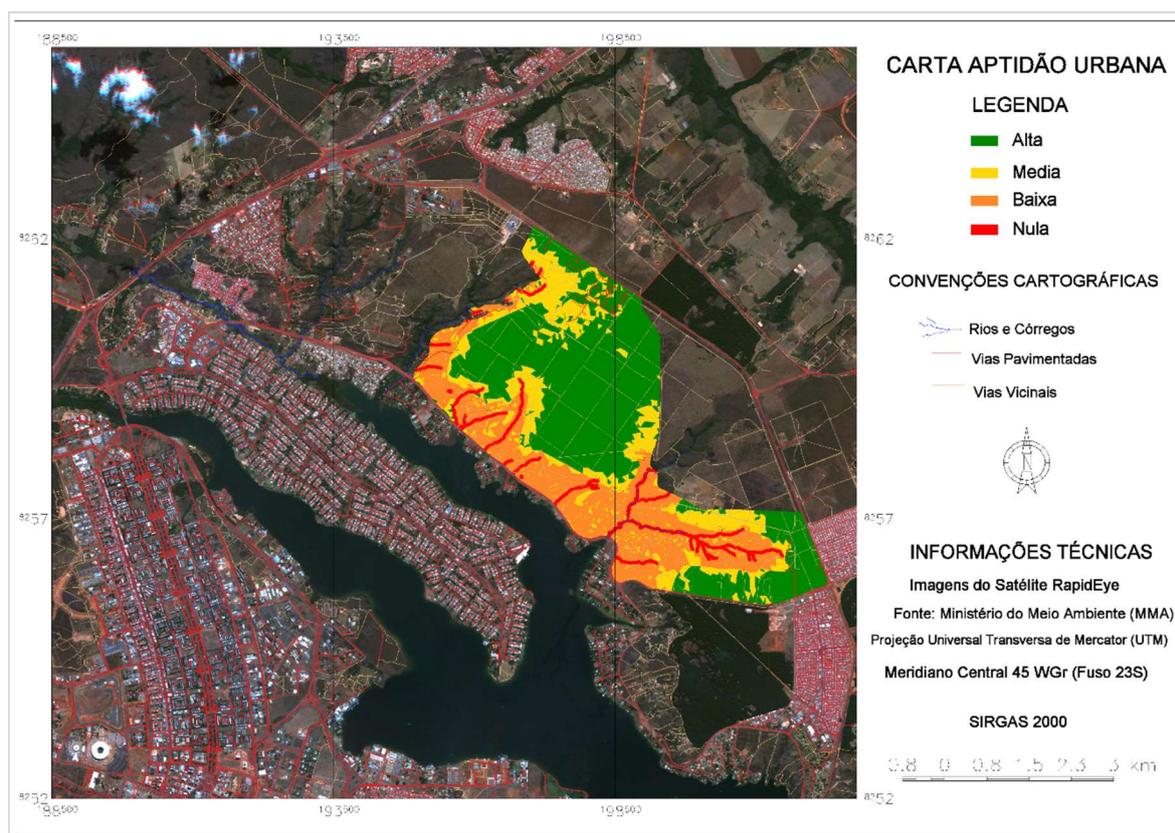


Figura 5.42 – Carta de Aptidão à Urbanização.

Observa-se, na Tabela 5.9, que predominam as áreas de Alta aptidão classificadas em verde na Figura 5.42. As áreas classificadas como Baixa aptidão correspondem às ARINES do SHTq (cambissolos com declividades acentuadas).

Tabela 5.9 - Medidas de classes temáticas: Carta de Perda de Aptidão a Urbanização

Aptidão à Urbanização	Área em km ²
Nula	1,03
Baixa	5,25
Média	4,10
Alta	9,55

Foram feitas tabulações cruzadas entre os PI's vetorizados das diretrizes urbanísticas, PDOT e ZEE/DF (ver Apêndice B). Entretanto, a tabulação cruzada realizada entre os dados temáticos da Carta de Aptidão à Urbanização e da Carta de Uso e Cobertura do Solo apresentou resultados mais significativos, que foram utilizados para definição da área de interesse adotada na Fase III.

A Tabela 5.10 apresenta o cruzamento dos dados temáticos de aptidão (colunas) e uso e cobertura (linhas). Nela observa-se que existem ocupações urbanas (1,01 km²) nas áreas definidas como baixa aptidão à urbanização.

Tabela 5.10 - Tabulação cruzada entre Aptidão e Uso e cobertura (km²).

APTIDÃO →	Nula (5%)	Baixa (26%)	Média (21%)	Alta (48%)
USO E COB. ↓				
Mata Galeria	0,9	1,2	0,18	0,12
Cerrado	0,03	0,91	1,03	2,95
Campo Limpo	0	1,8	1,06	4,11
Área Urbana	0	1,01 (5%)	0,91	1,64
Solo Exposto	0,1	0,33	0,92	0,73

De acordo com a tabulação cruzada, 48% da área foi classificada como Alta aptidão, 21% como Média aptidão, 26% como Baixa aptidão e 5% como Nula. Dos 26% da área classificada como Baixa aptidão, 5% estão definidas como Área Urbana.

Observa-se, ainda, que nas áreas definidas como Baixa aptidão à urbanização predominam as Matas galerias, que por sua vez são coberturas vegetais próprias das margens das drenagens em condições de declividade mais acentuadas.

Portanto, verifica-se que existem edificações em áreas definidas como baixa aptidão à urbanização, configurando situação de risco geotécnico que deve ser analisada.

5.5.1. GEORREFERENCIAMENTO DOS ALVOS

A Tabela 5.11 apresenta os dados das coordenadas corrigidas com a base do IBGE, dos 19 alvos (GCP) rastreados, conforme descrito no subitem 4.2.3.2 – Georreferenciamento dos Alvos. Essas coordenadas foram utilizadas no processamento das imagens obtidas no aerolevante com RPA, na fase da geração da nuvem densa de pontos (*Agisoft Photoscan*).

Tabela 5.11 - Tabela com as coordenadas dos GCP corrigidas com a base do IBGE.

Nome	Descrição	Long	Lat	Altura da elipse
1	TAQUARI	47° 50' 52.06546''W	15° 43' 07.56272''S	1.063.897
2	TAQUARI	47° 50' 49.65896''W	15° 42' 58.87367''S	1.061.138
3	TAQUARI	47° 50' 46.79001''W	15° 43' 27.40874''S	1.018.861
4	TAQUARI	47° 50' 40.49524''W	15° 43' 17.75592''S	1.033.170
5	TAQUARI	47° 50' 27.80437''W	15° 43' 11.94776''S	1.076.071
6	TAQUARI	47° 50' 20.80888''W	15° 43' 05.54735''S	1.086.524
7	TAQUARI	47° 50' 35.60360''W	15° 43' 39.86090''S	1.013.413
8	TAQUARI	47° 50' 26.13433''W	15° 43' 21.37514''S	1.084.279
9	TAQUARI	47° 50' 19.63865''W	15° 43' 16.66121''S	1.090.514
10	TAQUARI	47° 50' 18.69711''W	15° 43' 22.18399''S	1.093.144
11	TAQUARI	47° 50' 21.84723''W	15° 43' 55.13779''S	1.004.449
13	TAQUARI	47° 50' 08.53745''W	15° 43' 29.60124''S	1.093.354
14	TAQUARI	47° 50' 03.18652''W	15° 43' 22.63278''S	1.100.172
15	TAQUARI	47° 49' 49.27384''W	15° 43' 37.19804''S	1.079.552
16	TAQUARI	47° 50' 02.37755''W	15° 43' 41.83593''S	1.078.257
17	TAQUARI	47° 50' 13.89536''W	15° 44' 02.10686''S	1.000.807
18	TAQUARI	47° 50' 01.29650''W	15° 43' 58.87825''S	1.055.073
19	TAQUARI	47° 49' 59.26567''W	15° 44' 14.61320''S	1.009.352
21	TAQUARI	47° 49' 53.40627''W	15° 44' 18.91873''S	1.009.538
BRAZ		47° 52' 40.32834''W	15° 56' 50.91123''S	1.106.020

5.5.2. AEROLEVANTAMENTOS REALIZADOS

Os aerolevantamentos foram executados segundo a metodologia descrita no subitem 4.2.3.3 - Aerolevantamento com RPA Asa-fixa e Multirotor.

Cabe registrar que a base de apoio da execução dos sobrevoos do aerolevantamento com RPA asa-fixa, ou seja, o local onde a estação de solo fica localizada e os pousos e decolagens são feitos, mudou de lugar conforme observa-se nas figuras seguintes, relacionadas aos voos previstos e realizados.

Com o RPA asa-fixa foram realizados 9 (nove) voos no dia 17 de maio de 2017, conforme previsto:

- a. 4 (quatro) no sentido longitudinal.
- b. 5 (cinco) no sentido transversal.

Em relação ao RPA multirotor, apenas 4 (quatro) voos foram necessários para o levantamento da área prevista. O aerolevantamento foi realizado no dia 09 de julho de 2019, com início às 8h23 e término às 10h. Ao todo foram obtidas 395 imagens e cada voo teve duração média de 20 min.

5.5.2.1. VOOS PREVISTOS E VOOS REALIZADOS – RPA ASA-FIXA

Os planos de voo previstos e realizados apresentaram boa correspondência, conforme percebe-se nas imagens a seguir.

- Voo 1 - longitudinal: voo inicial, com duração de 20 min e 417 fotos obtidas (Tabela 5.12 e Figura 5.43).

Tabela 5.12 - Dados do voo 1 realizado em 17 de maio de 2017

Número do Plano de Voo:	225 - 1.1
Horário de execução do voo:	10h56 às 11h16
Total de fotos:	417
Intervalo das fotos (n°):	2869 – 3285



Figura 5.43 - Voo 01: previsto e realizado (modificado de Google Earth Pro).

- Voo 2 - longitudinal: duração de 24 min e 496 fotos obtidas (Tabela 5.13 e Figura 5.44).

Tabela 5.13 - Dados do voo 2 realizado em 17 de maio de 2017.

Número do Plano de Voo:	226 - 1.2
Horário de execução do voo:	11h24 às 11h48
Total de fotos:	496
Intervalo das fotos (n°):	3286 – 3781



Figura 5.44 - Voo 02: previsto e realizado (modificado de Google Earth Pro).

- Voo 3 - longitudinal: duração de 26 min e 545 fotos obtidas (Tabela 5.14 e Figura 5.45).

Tabela 5.14 - Dados do voo 3 realizado em 17 de maio de 2017.

Número do Plano de Voo:	227 - 1.3
Horário de execução do voo:	12h24 às 12h50
Total de fotos:	545
Intervalo das fotos (n°):	3782 – 4326



Figura 5.45 - Voo 03: previsto e realizado (modificado de Google Earth Pro).

- Voo 4 - longitudinal: duração de 22 min e 398 fotos obtidas (Tabela 5.15 e Figura 5.46).

Tabela 5.15 - Dados do voo 4 realizado em 17 de maio de 2017.

Número do Plano de Voo:	228 - 1.4
Horário de execução do voo:	12h58 às 13h20
Total de fotos:	398
Intervalo das fotos (n°):	4327 – 4724



Figura 5.46 - Voo 04: previsto e realizado (modificado de Google Earth Pro)

- Voo 5 - transversal: duração de 20 min e 388 fotos obtidas (Tabela 5.16 e Figura 5.47).

Tabela 5.16 - Dados do voo 5 realizado em 17 de maio de 2017.

Número do Plano de Voo:	229 - T1
Horário de execução do voo:	14h06 às 14h26
Total de fotos:	388
Intervalo das fotos (nº):	4725 - 5112



Figura 5.47 - Voo 05: previsto e realizado (modificado de Google Earth Pro).

- Voo 6 - transversal: duração de 23 min e 397 fotos obtidas (Tabela 5.17 e Figura 5.48).

Tabela 5.17 - Dados do voo 6 realizado em 17 de maio de 2017.

Número do Plano de Voo:	230 - T2
Horário de execução do voo:	14h35 às 14h58
Total de fotos:	397
Intervalo das fotos (nº):	5113 – 5509



Figura 5.48 - Voo 06: previsto e realizado (modificado de Google Earth Pro).

- Voo 7 - transversal: duração de 19 min e 290 fotos obtidas (Tabela 5.18 e Figura 5.49).

Tabela 5.18 - Dados do voo 7 realizado em 17 de maio de 2017.

Número do Plano de Voo:	231 - T3
Horário de execução do voo:	15h22 às 15h41
Total de fotos:	290
Intervalo das fotos (n°):	5510 – 5799



Figura 5.49 - Voo 07: previsto e realizado (modificado de Google Earth Pro).

- Voo 8- transversal: duração de 22 min e 415 fotos obtidas (Tabela 5.19 e Figura 5.50).

Tabela 5.19 - Dados do voo 8 realizado em 17 de maio de 2017.

Número do Plano de Voo:	232 - T4
Horário de execução do voo:	15h46 às 16h08
Total de fotos:	415
Intervalo das fotos (n°):	5800 – 6214



Figura 5.50 - Voo 08: previsto e realizado (modificado de Google Earth Pro).

- Voo 9 - transversal: duração de 10 min e 146 fotos obtidas (Tabela 5.20 e Figura 5.51).

Tabela 5.20 - Dados do voo 9 realizado em 17 de maio de 2017.

Número do Plano de Voo:	233 - T5
Horário de execução do voo:	16h15 às 16h25
Total de fotos:	146
Intervalo das fotos (nº):	6215 - 6360



Figura 5.51 - Voo 09: previsto e realizado (modificado de Google Earth Pro).

5.5.2.2. PROCESSAMENTO DOS DADOS NO AGISOFT PHOTOSCAN

Os resultados da metodologia apresentada nos subitens 4.2 – Metodologia Aplicada e 4.2.3.3 - Aerolevantamento com RPA Asa-fixa e Multirotor, estão descritos e analisados neste tópico.

Para os dados obtidos com o RPA asa-fixa foram realizadas 3 (três) tentativas de processamento no *software Agisoft Photoscan*:

1. Processamento com dados dos voos transversais (qualidade *high*).
 2. Processamento com dados dos voos transversais (qualidade *ultra high*).
 3. Processamento com dados dos voos longitudinais.
- Tentativa 1 - Voos transversais.

Processado em 19 de fevereiro de 2019, utilizando as imagens tomadas nos voos transversais (1486 fotos). O processamento durou cerca de 70 h e apresentou erro de 153 pixels (resolução espacial 8,44 cm/pixel), conforme dados apresentados no Relatório gerado ao final do processamento (ver Apêndice A).

Observa-se que os resultados apresentados na Figura 5.52 apresentaram distorções e descontinuidades que inviabilizaram a utilização dos produtos gerados.

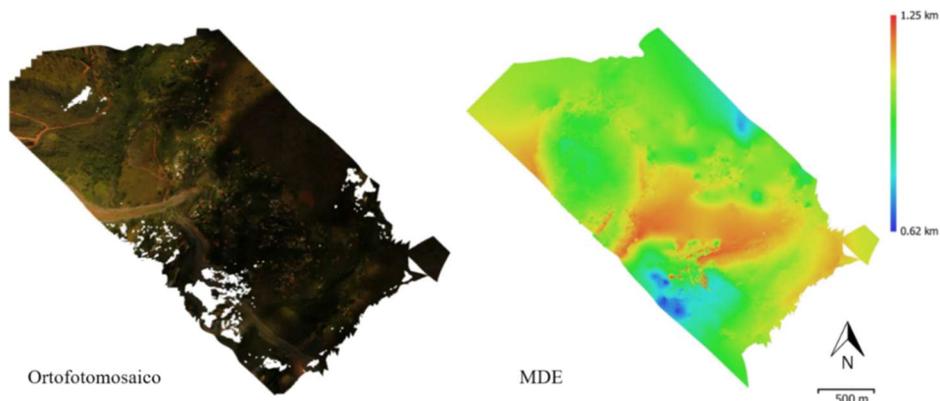


Figura 5.52 – Processamento dos voos transversais – resultados da tentativa 1.

Dessa forma, realizou-se uma segunda tentativa alterando os parâmetros de qualidade de alta (*high*) para super alta (*ultra high*) na fase de construção da nuvem densa de pontos. Essa alteração demandou mais tempo de processamento e consequente capacidade computacional. Na tentativa 1, a fase de geração de nuvem densa de pontos durou cerca de 27 h, enquanto na tentativa 2, a mesma fase durou 105 h, ou seja, aproximadamente 4 vezes mais.

- Tentativa 2 - Voos transversais.

Processado em 26 de fevereiro de 2019, utilizando as mesmas 1486 imagens utilizadas na tentativa 1. O processamento durou cerca de 146 h e apresentou um erro menor que o anterior, da ordem de 45 pixels (resolução espacial 8,48 cm/pixel).

Da mesma forma, os resultados apresentados na Figura 5.53 apresentaram distorções e descontinuidades que inviabilizaram a utilização do ortofotomosaico e do MDE.

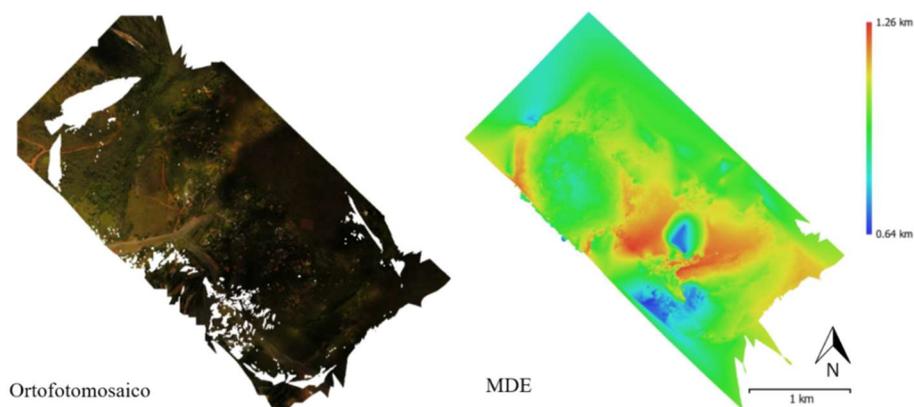


Figura 5.53 - Processamento dos voos transversais – resultados da tentativa 2.

Optou-se por realizar um novo processamento, desta vez utilizando as imagens obtidas nos voos longitudinais (voos de 1 até 4).

- Tentativa 3 - Voos longitudinais

Processado em 26 de março de 2019, utilizando as 1768 fotos obtidas nos voos longitudinais. O processamento durou cerca de 124 h e apresentou erro muito menor que os anteriores, aceitável conforme Grahan & Koh (2002), da ordem de 4 pixels (resolução espacial 7,25 cm/pixel) e os resultados estão apresentados na Figura 5.54.

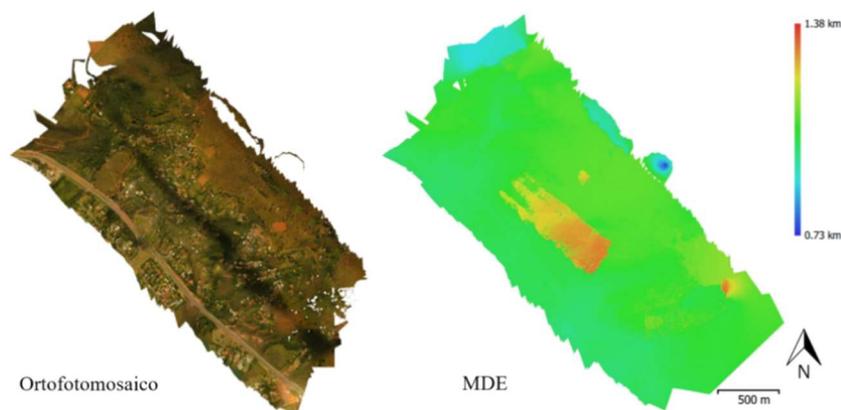


Figura 5.54 – Processamento dos voos longitudinais – resultados da tentativa 1.

Em resumo, os dados básicos e avaliação dos resultados gerados pelos 3 processamentos realizados estão apresentados na Tabela 5.21, com os dados da Tentativa 3 destacados.

Tabela 5.21 – Processamentos dos dados no *Agisoft Photoscan*.

	Tentativa 1 Voos transversais	Tentativa 2 Voos transversais	Tentativa 3 Voos longitudinais
Data	19/02/2019	26/02/2019	29/03/2019
Número de imagens	1486	1486	1768
Resolução do pixel	8,44 cm/pixel	8,48 cm/pixel	7,25 cm/pixel
Erro de reprojeção <i>(reprojection error)</i>	153 pixels	54,1 pixels	4,35 pixels
Área de cobertura	5,31 km ²	6,18 km ²	4,84 km²
Acurácia do alinhamento das imagens	<i>Highest</i>	<i>Highest</i>	<i>Highest</i>
Qualidade da nuvem densa de pontos	<i>High</i>	<i>Ultra High</i>	<i>High</i>
Tempo total de processamento (aproximado)	70 h	146 h	124 h
Qualidade dos resultados	inutilizável	inutilizável	satisfatório e utilizável

Portanto, o resultado alcançado na Tentativa 3 – Voos longitudinais, pôde ser aproveitado para as ações posteriores no *software* SPRING.

De qualquer forma, outro aerolevantamento foi realizado no dia 9 de julho de 2019, utilizando-se um RPA multirrotor modelo *Phantom 4*, marca DJI, com câmera de 12.4 Mp (Projeto μ VANT-UnB). Ao todo foram realizados 4 sobrevoos, com altura de voo 240 m, $f/2.8$, ISO 100, resultando em 395 fotos.

- Aerolevantamento com RPA multirrotor

O processamento dos dados foi executado da mesma forma que os anteriores, na data 15 de julho de 2019, com os seguintes parâmetros:

- a. Qualidade *high*;
- b. Duração aproximada de 8h50 min;
- c. **Erro de 0,99 pixel** (resolução espacial 9,5 cm/pixel).

Os resultados do processamento (ortofotomosaico e MDE) podem ser observados na Figura 5.55.

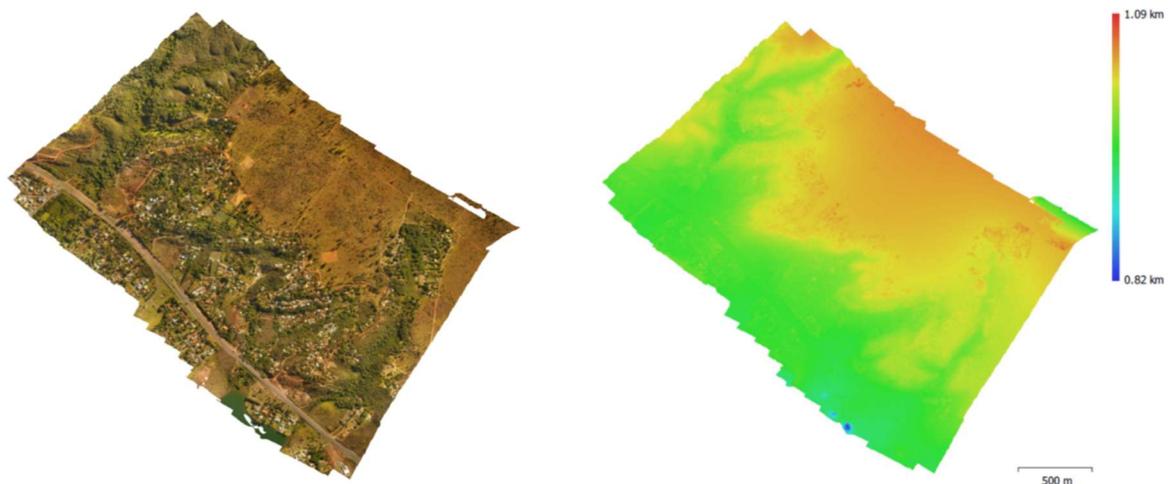


Figura 5.55 – Processamento dos voos realizados com RPA multirrotor – resultados.

A partir dos resultados obtidos procedeu-se o PDI do ortofotomosaico para a elaboração de uma Carta Imagem (escala 1:10.000), apresentada na Figura 5.56, e Carta de Uso e Cobertura do solo (escala 1:10.000), apresentada na Figura 5.57.

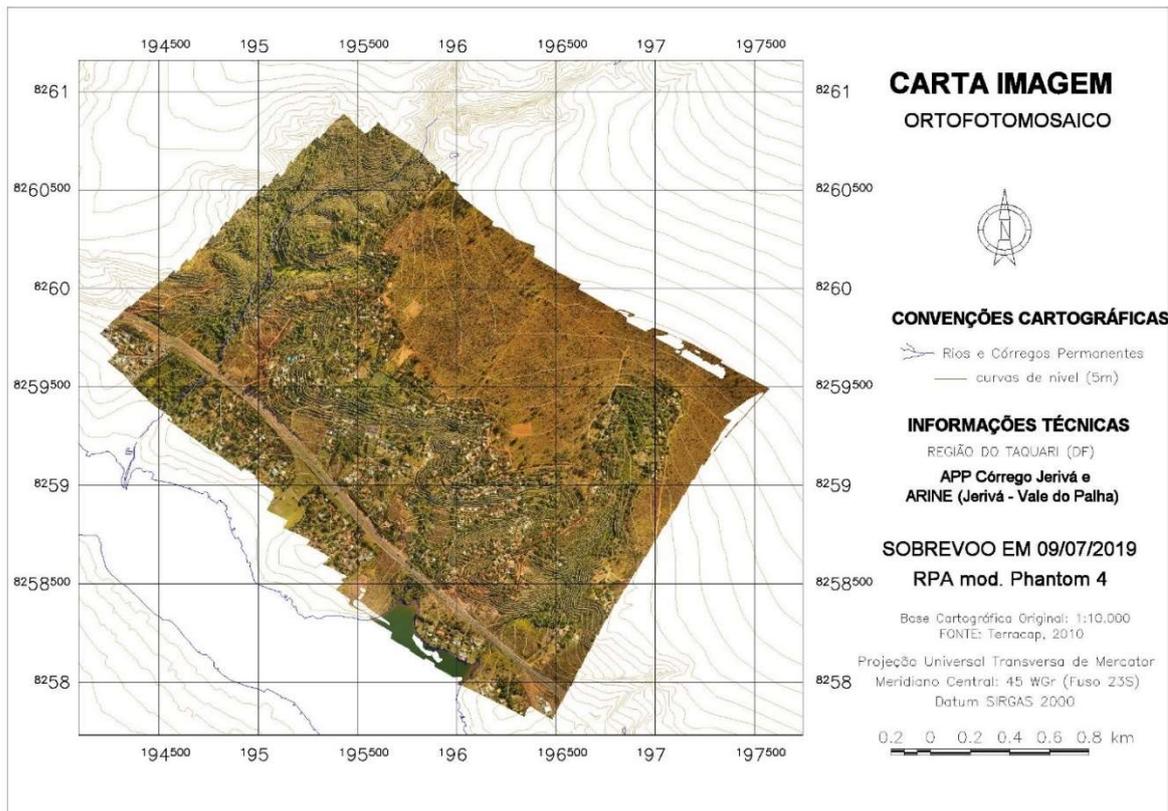


Figura 5.56 – Carta Imagem – Ortofotomosaico resultante do sobrevoos com RPA multirotor.

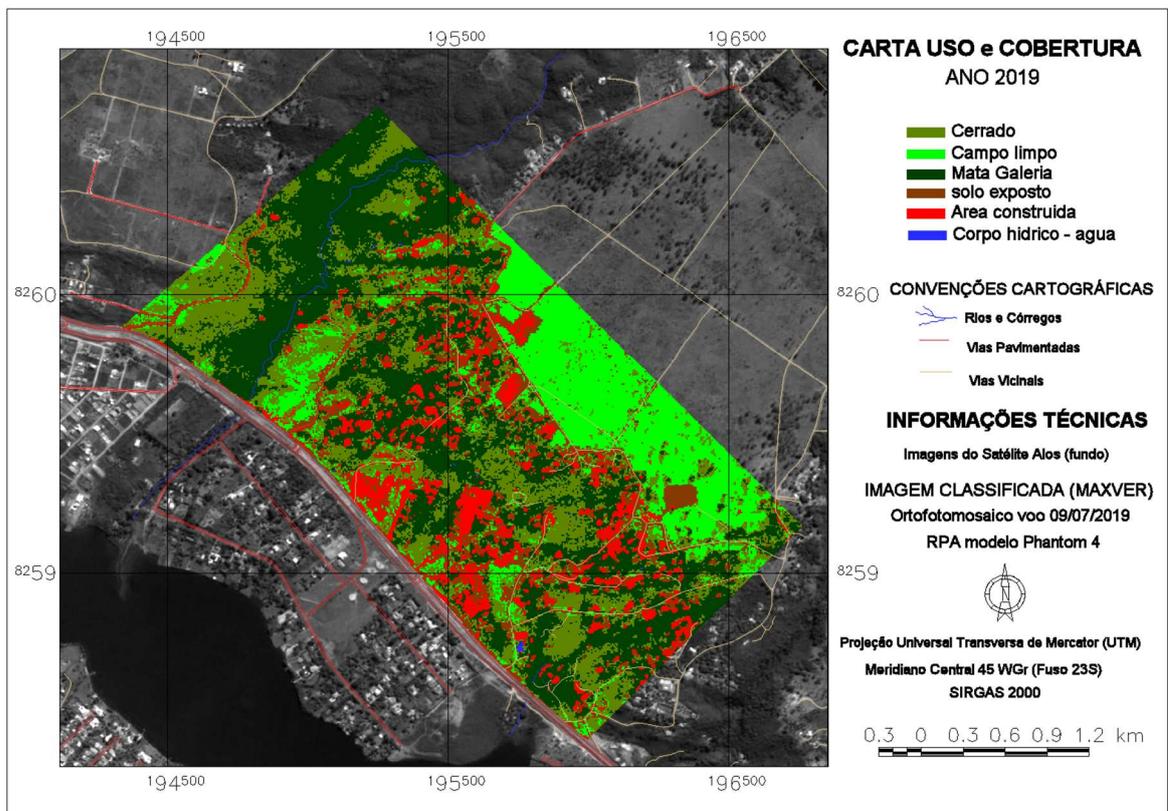


Figura 5.57 – Carta Uso e Cobertura – Ortofotomosaico classificado (algoritmo Maxver).

5.6. RESULTADOS DA FASE III – DETALHE

Em relação à Fase III - Detalhe, realizou-se um teste inicial no *RiskLab* em uma área piloto com os dados de MNT obtidos a partir da Base Cartográfica do DF e os resultados foram publicados no COBRAMSEG 2016 e 15º CNG/8º CLBG (Silva Junior *et al.*, 2016a; 2016b).

A área escolhida tem 1,3 km² e localiza-se em uma região de maiores declividades e solo desfavorável à ocupação urbana, ou seja, baixa aptidão à urbanização, nas proximidades da APP do Córrego Palha (Figura 5.58).



Figura 5.58 - Área piloto utilizada para cálculo da PR (Silva Junior *et al.*, 2016a; 2016b).

O cálculo da PR resultou na Carta de Zoneamento de Ameaça de Escorregamentos apresentada na Figura 5.59 (escala 1:2.500), cujos valores alcançaram o máximo de 37% (áreas em laranja) com pixel de 15 m (matrizes de 15x15m) e utilização de ortofotomosaico obtido por RPA.

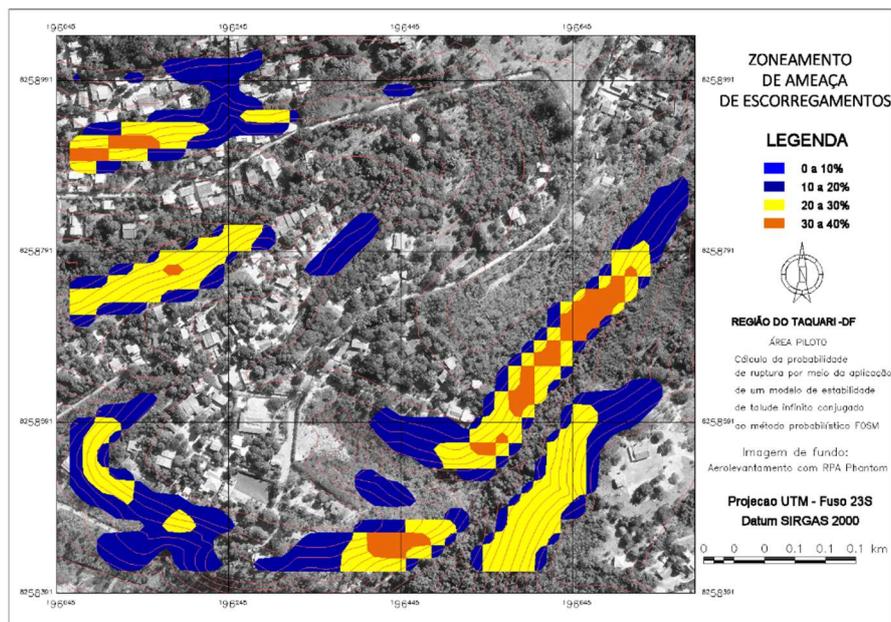


Figura 5.59 – Carta de Ameaça de Escorregamentos: área piloto (adaptado de Silva Junior *et al.*, 2016a; 2016b).

Ao exportar os limites das classes de PR obtidas para a visualização no *Google Earth Pro*, observa-se que existem edificações nas áreas das classes entre 20 a 40%, ou seja, com PR próximas ao valor máximo atingido no cálculo (37%) (Figura 5.60).

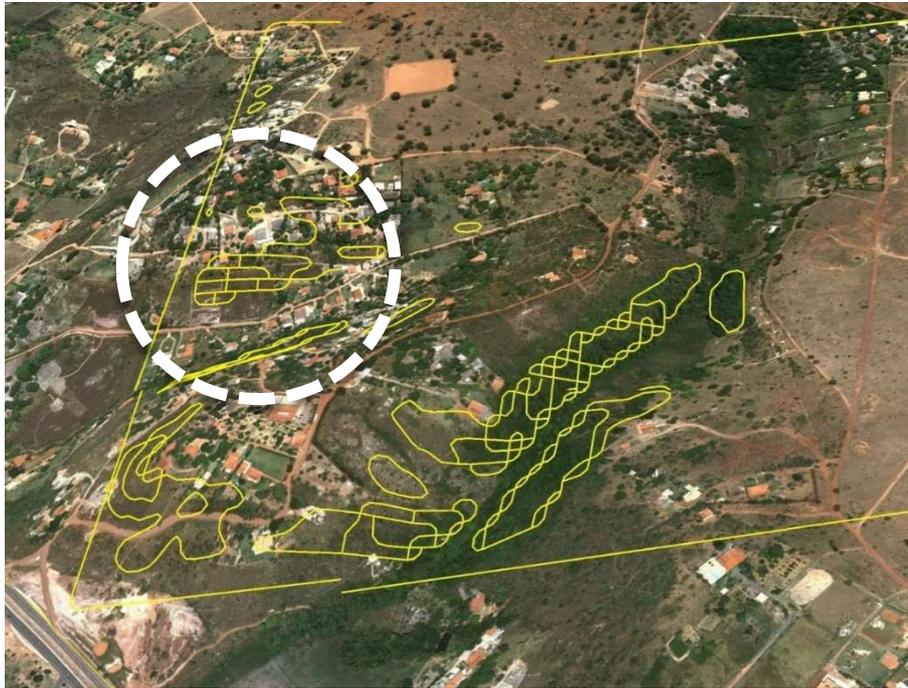


Figura 5.60 - Verificação de edificações nas áreas com PR entre 20 e 40% (Silva Junior *et al.*, 2016a; 2016b).

As edificações encontradas nos polígonos dos limites de PR estão localizadas em áreas de declividade acentuada e cambissolos.

Prosseguindo na análise da ameaça de escorregamentos e definição de áreas de risco, optou-se por melhorar a resolução espacial das matrizes e ampliar a área de abrangência dos cálculos de PR.

Foram geradas matrizes numéricas dos dados de solo e declividade com 5x5m para o limite do SHTq (Etapas I e II). Os dados dos passos de chuva foram os mesmos utilizados em Silva Junior *et al.* (2016a; 2016b), conforme detalhado no subitem 4.2.4.1, e também convertidos em matrizes com 5x5m:

- 12,3 mm no dia 15/12/2014;
- 20,5 mm no dia 16/12/2014;
- 84,5 mm no dia 17/12/2014;
- 43,1 mm no dia 18/12/2014, e;
- 12,2 mm no dia 19/12/2014.

Os resultados gerados no *RiskLab* (matrizes de PR) foram exportados e, na sequência, importados para o SPRING, onde foram fatiados para um PI temático e classificadas de acordo com as faixas de porcentagem de PR das encostas. Cada passo de chuva resultou em um plano de informação (temático) de PR, conforme observa-se na Figura 5.61.

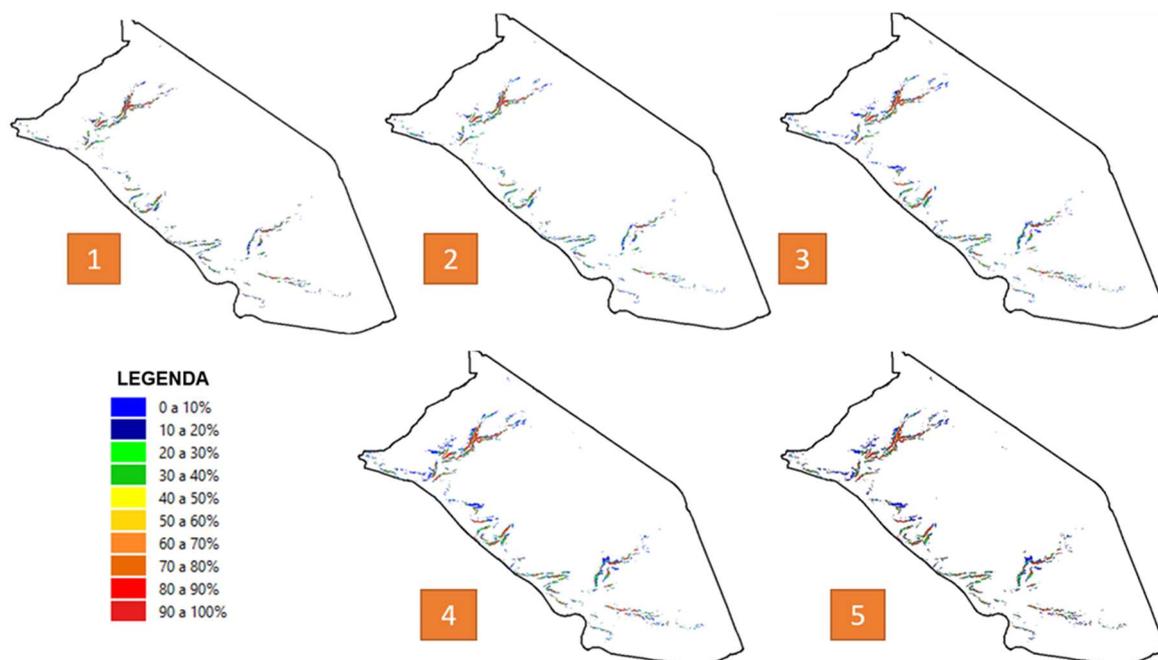


Figura 5.61 – Matrizes temáticas de PR geradas para cada passo de chuva no *RiskLab* (cenários).

Ao analisar as medidas de classes obtidas em cada um dos PIs temáticos percebe-se que, a cada cenário calculado, as probabilidades de ruptura aumentam em decorrência dos efeitos do acúmulo de chuva no solo. A Tabela 5.22 apresenta um comparativo entre as medidas de classes dos passos inicial e final.

Tabela 5.22 – Comparativo de PR nos cenários 1 e 5 do cálculo.

Cenário 1 (passo inicial)		Cenário 5 (passo final)	
PR (%)	Área em km ²	PR (%)	Área em km ²
0 a 10%	29.59	0 a 10%	29.27
10 a 20%	0.10	10 a 20%	0.17
20 a 30%	0.05	20 a 30%	0.08
30 a 40%	0.04	30 a 40%	0.06
40 a 50%	0.03	40 a 50%	0.06
50 a 60%	0.03	50 a 60%	0.04
60 a 70%	0.03	60 a 70%	0.04
70 a 80%	0.02	70 a 80%	0.04
80 a 90%	0.03	80 a 90%	0.05
90 a 100%	0.08	90 a 100%	0.18

Com exceção da classe entre 0 a 10% de PR, todas as demais apresentaram aumento na área de abrangência, especialmente a classe entre 10 e 20%, que aumentou a área de 0,10 para 0,17 km² e a classe entre 90 e 100%, cuja área aumentou de 0,08 para 0,18 km².

Importante ressaltar que o modelo de estabilidade de taludes infinitos utilizado para o cálculo das probabilidades de ruptura é simplificado e, por isso, apresenta algumas restrições, pois não considera alguns fatores associados a resistência do solo, como por exemplo, a sucção. Dessa forma, algumas áreas apresentam valores de PR majorados, próximos de 100%.

No entanto, para o objetivo de zoneamento de áreas com ameaça de escorregamentos e análise do risco associado, o modelo apresentou resultados satisfatórios, pois as áreas definidas nas classes de maior valor de PR estão localizadas nas regiões que haviam sido definidas como alta suscetibilidade à erosão e baixa ou nula aptidão à urbanização.

Os dados resultantes do último passo para o cálculo da PR (cenário 5) foram utilizados na elaboração da Carta de Ameaça de Escorregamentos para a região do Taquari - Etapas I e II, em escala 1:25.000, conforme Figura 5.62.

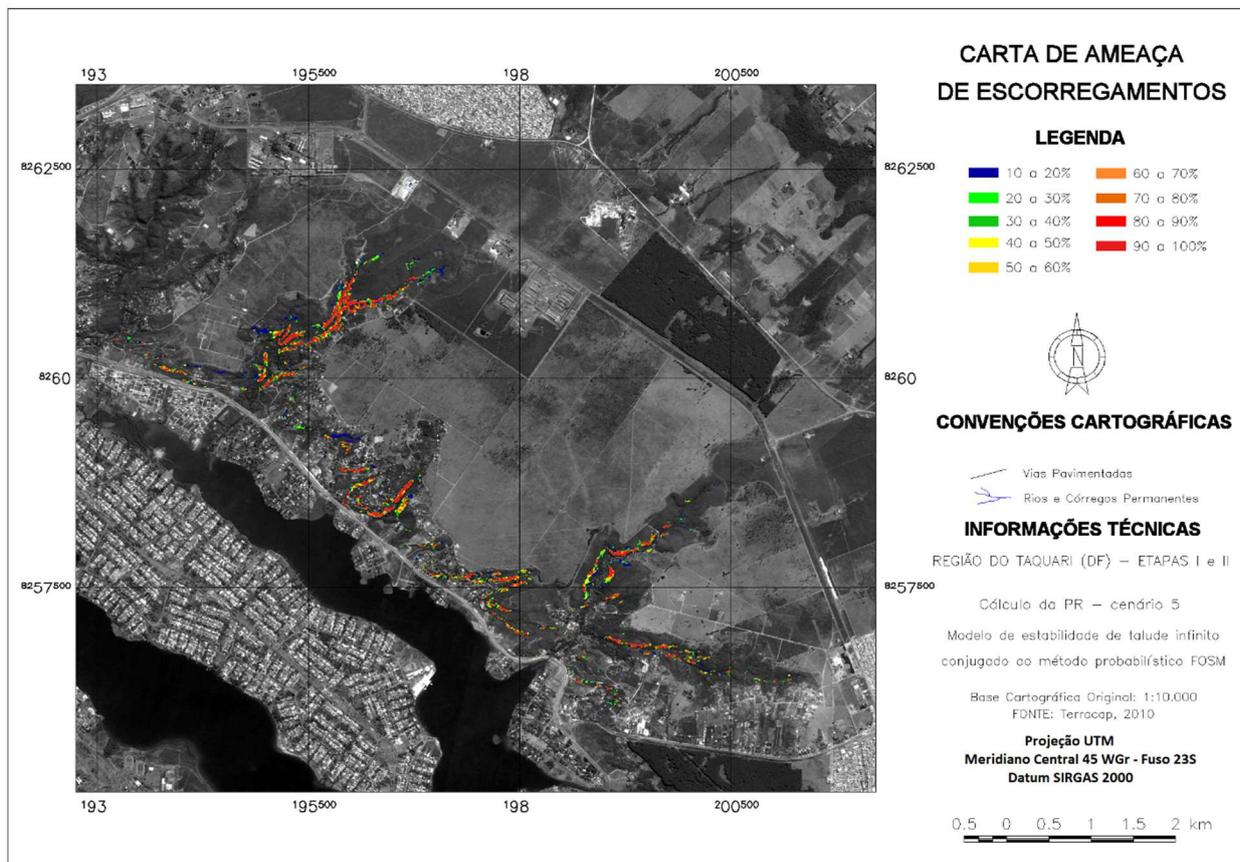


Figura 5.62 – Carta de Ameaça de Escorregamentos: Taquari Etapa I e II.

Percebe-se na Figura 5.62 que as maiores probabilidades de ruptura estão nas áreas de APP e ARINE, justamente nas maiores declividades combinadas aos cambissolos. Essas áreas foram classificadas como Alta Suscetibilidade à Erosão (subitem 5.4 – Resultados da Fase I – Geral) e, conseqüentemente, Baixa Aptidão à Urbanização (subitem 5.5 - Resultados da Fase II – Intermediária).

Os menores valores de PR, definidos na classe entre 0 a 10%, localizam-se nas regiões planas ou com pequenas declividades.

De acordo com as orientações do Detalhamento Progressivo, elegeu-se uma área de interesse para o detalhamento em escala 1:5.000, localizada entre a APP do Córrego Jerivá e a APP do Córrego do Palha, integrando a ARINE que abriga os Núcleos Rurais Córrego Jerivá e Vale do Palha. Os resultados podem ser analisados na Figura 5.63, e observa-se que existem edificações habitadas nas classes de maior PR.

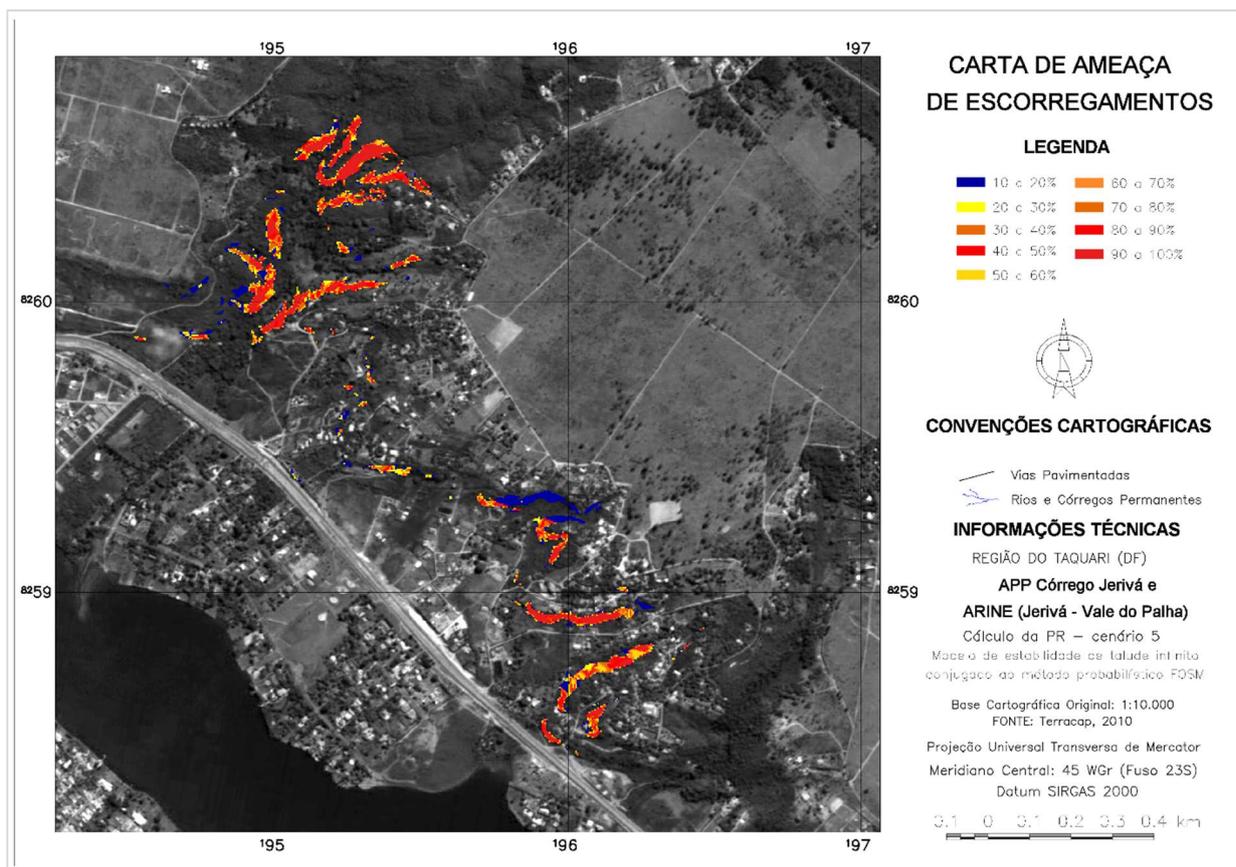


Figura 5.63 - Carta de Ameaça de Escorregamentos: área de interesse para detalhamento.

6. CONCLUSÕES

A metodologia proposta nesta tese permitiu, com a utilização de dados obtidos por aerolevanteamento com RPA e utilização de processamento geoespacial em plataforma baseada em computação em nuvem (GEE), contribuir para a confecção e atualização de cartas geotécnicas voltadas ao planejamento urbano, especialmente na elaboração de diretrizes de uso e ocupação do solo e zoneamento de áreas de risco.

A Fase Preliminar, destinada ao inventário dos meios físico, biótico e antrópico, foi realizada na área do SHTq Etapas I e II e resultou em cartas complementares e analíticas em escala 1:25.000. Foram utilizados dados de imagens de satélite com diferentes resoluções espaciais e espectrais, dados vetoriais e de MNT da Base Cartográfica do DF e dados de MDE resultantes da Missão SRTM para a elaboração de Carta de Localização da Área de Estudo, Carta de Hipsometria, curva hipsométrica, perfil topográfico, Carta de Declividade, Carta de Orientação de Vertentes, Carta de Relevo Sombreado, Cartas de Curvatura de Terreno, Carta de Geologia, Carta de Geomorfologia, Carta de Solos, Carta Imagem, Cartas de Uso e Cobertura do Solo, Carta de Temperatura de Brilho de Superfície, Carta de APP – Distância de drenagens e índices de vegetação (NDVI, SAVI, EVI), umidade (NDMI) e áreas construídas (NDBI, B_u).

A Fase I - Geral, destinada aos critérios de suscetibilidade aos processos naturais ou induzidos associados às condições geomorfológicas e geotécnicas dos sítios, foi realizada na área do SHTq Etapa II e resultou em cartas de suscetibilidade em escala 1:25.000. Foram utilizados dados pedologia e declividade para a elaboração de rotina computacional em LEGAL que resultou na Carta de Suscetibilidade à Erosão (classes baixa, média e alta) e dados vetorizados dos mapas do ZEE-DF para elaboração da Carta de Perda de Solo por Erosão (classes muito baixo, baixo e muito alto). Na sequência, os resultados das cartas foram comparados e concluiu-se que, utilizando apenas dados de declividade e pedologia, processados em ambiente SIG, obtêm-se resultados simplificados, porém satisfatórios, que podem ser utilizados no planejamento urbano para definição de áreas suscetíveis aos processos erosivos.

A Fase II - Intermediária, destinada aos critérios de aptidão à urbanização, foi realizada em duas áreas e com escalas distintas: SHTq - Etapa II, resultando em Carta de Aptidão à Urbanização com escala 1:25.000 e uma área específica dos Núcleos Rurais Córrego do Jerivá e Vale do Palha onde foi realizado o aerolevanteamento com RPA, resultando em MDE e ortofotomosaico que foi utilizado para a elaboração de Carta de Uso e Cobertura do Solo e Carta Imagem em escala 1:10.000. Em relação à Carta de Aptidão à Urbanização, destaca-se

que se adaptou a rotina computacional em LEGAL aproveitando os dados de pedologia e declividade e incluindo o conceito de APP para definição de áreas aptas ou inaptas à urbanização (classes Alta, Média, Baixa e Nula).

A Fase III - Detalhe, destinada à avaliação da suscetibilidade, ameaça e consequências ou situações de risco e impacto a pessoas, edificações ou meio-ambiente, foi realizada em área de interesse do SHTq – Etapa II que apresenta risco geotécnico decorrente de ocupação informal em áreas de ARINE e nas proximidades de APP, ou seja, com baixa aptidão à urbanização verificada na Fase II e presença de edificações habitadas em condições inadequadas oferecendo risco à população local.

Os produtos resultantes da fase de detalhe estão em escalas 1:25:000, 1:5:000 e 1:2.500 e abordam de maneira progressiva o zoneamento de ameaça de escorregamentos, elaborado segundo a utilização de um modelo preditivo para escorregamentos induzidos por chuvas, denominado *SLIDE*, alterado pela aplicação do método probabilístico FOSM na ferramenta computacional *RiskLab*.

O zoneamento das áreas de risco foi realizado com base no cálculo das probabilidades de ruptura (PR) das encostas considerando dados de chuvas ocorridas no DF e, apesar da simplificação do modelo adotado, os resultados alcançados corroboram para a necessidade de avaliação prévia dos terrenos e monitoramento das edificações existentes nas áreas denominadas como ARINE pois, conforme apresentado nos resultados da Fase III, algumas edificações encontram-se em áreas com declividades elevadas e solos rasos, menos permeáveis e suscetíveis aos processos erosivos (cambissolos), configurando condição desfavorável a certos tipos de edificação.

Em relação à utilização das aeronaves remotamente pilotadas (RPA), conclui-se que os avanços alcançados nessa geotecnologia permitem, atualmente, que a aerofotogrametria realizada com essas aeronaves seja utilizada nos levantamentos topográficos e mapeamentos aéreos com confiabilidade e versatilidade, pois existem diversas opções de tipos de aeronaves com diferentes autonomias e complexidade na operação. Por outro lado, os resultados decorrentes desses aerolevantamentos apresentam resoluções espaciais centimétricas e qualidade geométrica e cartográfica que permite a atualização de bases cartográficas com escalas de até 1:1.000.

No que diz respeito ao uso da plataforma *Google Earth Engine* (GEE), ressalta-se que sua aplicação para o monitoramento da urbanização gerou resultados satisfatórios e com possibilidade de desenvolvimento de ferramentas voltadas ao planejamento urbano de forma rápida e gratuita, pois a plataforma dispõe de aproximadamente 40 anos de imagens de satélite, como por exemplo, Landsat e Sentinel, e todo o processamento é realizado por meio do servidor em nuvem, otimizando consideravelmente o tempo de processamento de dados geoespaciais em ambiente SIG.

Outras vantagens na utilização do GEE: compartilhamento em tempo real, possibilita a exportação para visualização e utilização em outros programas SIG e permite a criação e apresentação de gráficos das séries temporais calculadas. Como desvantagens, conclui-se que é necessário ter conhecimento básico de programação em linguagem de JavaScript e a impossibilidade de trabalhar *offline*.

Por fim, ressalta-se que a metodologia proposta nesta tese é replicável e com ênfase na utilização de dados disponíveis gratuitamente nos diversos sites citados ao longo do texto, especialmente das imagens de satélite obtidas nos Projetos Landsat e Sentinel, cujas escalas são adequadas ao planejamento territorial e os períodos de revisita proporcionam imagens atualizadas. Da mesma forma, a plataforma GEE possibilita, de maneira ágil e eficiente, utilizar essas imagens de satélite citadas para o monitoramento de expansão urbana e criação de imagens decorrentes de operações aritméticas entre bandas espectrais (NDVI, SAVI, EVI, NDBI, entre outros).

6.1. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Como sugestões para pesquisas e trabalhos futuros destacam-se, principalmente:

- A possibilidade de utilização da plataforma GEE para ações de classificação supervisionada e não supervisionada e posterior criação de imagens temáticas;
- A adequação das rotinas computacionais geradas no SPRING/LEGAL para o GEE;
- A utilização dos dados de MNT obtidos pelos aerolevantamentos com RPA no sistema *RiskLab*;
- A aplicação da metodologia proposta em outras áreas do DF, especialmente em contextos ambientais distintos como, por exemplo, áreas de veredas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT (1995). NBR 13296: Espaço físico para o uso do solo urbano. ABNT, Rio de Janeiro, RJ, 5 p.

ACKERMANN, F. (1994). Practical Experience with GPS supported Aerial Triangulation. *The Photogrammetric Record*, v. 14, n.84, p. 861-874.

AGÊNCIA DE INFORMAÇÃO EMBRAPA (2014). Tipos de vegetação do bioma cerrado.

Disponível em:

https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/agencia16/ag01/arvore/ag01_23_911200585232.html.

Acesso em: 14 mar. 2018.

AGISOFT (2018). Agisoft PhotoScan User Manual, Professional Edition. Versão 1.4, 124p.

Disponível em: http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_4_en.pdf. Acesso em: 09 fev. 2018.

ALMEIDA, J.R. (Org.) (1993). Planejamento ambiental. Thex Ed., Rio de Janeiro, RJ, 153 p.

ALMEIDA, W.S., SILVA, L.S., CHRISTAKOU, E.D., SILVA JUNIOR, E.E.A., SILVA, C. P.L. (2014). Evaluation of unmanned aerial vehicles (UAV) high spatial resolution data to produce digital terrain model and visible spectral imagery. *South-Eastern European Journal of Earth Observation and Geomatics*, Aristotle University of Thessaloniki, Greece, v. 3, p. 239-243.

ALMEIDA, W.S., SILVA, L.S., CHRISTAKOU, E.D., SILVA JUNIOR, E.E.A., SOUZA, N.M., LIMA, C.H.R. (2015). Avaliação dos Dados de Alta Resolução Espacial Obtido por Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) para Produção de Modelo Digital de Terreno. XVII SBSR: João Pessoa, Brasil.

ALMEIDA, W.S., DINIZ, M.S., SILVA, L.S., SILVA JUNIOR, E.E.A., SOUZA, N.M., FÉRIAS, R.J.C., CARVALHO, J.C. (2017). Vulnerabilidade e modelagem ambiental em bacias hidrográficas. In: SALES, M.M.; DE CARVALHO, J. C.; MASCARENHA, M.M. *et al.* Erosão em Borda de Reservatório. Goiânia: Universidade Federal de Goiás, cap.14, p.287-90.

AMORIM, A.L., SILVA, L.S., CHRISTAKOU, E.D. (2012). Uso de VANTs em documentação arquitetônica. II Seminário Nacional de Documentação do Patrimônio Arquitetônico com o Uso de Tecnologias Digitais-ArqDoc, Universidade Federal do Pará, Belém, PA, 14 p.

ANAC (2017). RBAC-E nº94 - Requisitos Gerais para Aeronaves Não Tripuladas de Uso Civil. Diário Oficial República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 26 p.

ANDERSON, P.S. (1982). Princípios da Cartografia Básica. [S.l.]: [s.n.], v.1, 83 p.

ASP (1980). Manual of Photogrammetry. ASP, Virginia, USA, 1143p.

AZEVEDO, G.F., CARVAJAL, H.E.M., SOUZA, N.M. (2013). Uso do Método FOSM para Quantificação do Perigo Associado a Deslizamentos Deflagrados por Chuvas no Distrito Federal. In: VI Conferência Brasileira de Encostas, 2013, Angra dos Reis. COBRAE 2013 - Volume de Conferências e Artigos. Rio de Janeiro: ABMS, v. 1.

AZEVEDO, G.F. (2015). Sistema de Análise Quantitativa de Risco por Escorregamentos Rasos Deflagrados por Chuvas em Regiões Tropicais. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 399 p.

BELCHER, D.J. (1957). Relatório Técnico sobre a nova capital da República. Imprensa Nacional, Rio de Janeiro, RJ, 291 p.

BITAR, O. Y. (2014). Cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações: 1:25.000 - nota técnica explicativa. CPRM-Serviço Geológico do Brasil, IPT-Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, SP, 42 p.

BITAR, O. Y., FREITAS, C. G. L., MACEDO, E. S. (2015). Guia Cartas geotécnicas: orientações básicas aos municípios. IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, SP, 27 p.

BORGES, M.V., SILVA JUNIOR, E.E.A., SOUZA, N.M. (2015). Relação da Escala de Trabalho do Mapeamento Geotécnico e Área de Influência das Sondagens. Anais do 9º Simpósio Brasileiro de Cartografia Geotécnica e Geoambiental, Instituto Nacional de Pesquisado Pantanal (INPP), Cuiabá, MT, 4 p

BRASIL (1956). Edital para o Concurso Nacional do Plano Piloto da Nova Capital do Brasil. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Rio de Janeiro, 20 de setembro de 1956. Disponível em: <http://www.cronologiadourbanismo.ufba.br>. Acesso em: 20 dez. 2016.

_____ (1979). Lei nº 6.766, de 19 de dezembro de 1979. Dispõe sobre o Parcelamento do Solo Urbano e dá outras Providências. Diário Oficial República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 11 p.

_____ (1988). Constituição da República Federativa do Brasil. Diário Oficial República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 292 p.

_____ (2001). Lei nº 10.257, de 10 de julho de 2001. Regulamenta os arts. 182 e 183 da Constituição Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências. Diário Oficial República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 19 p.

_____ (2012a). Lei nº 12.608, de 10 de abril de 2012. Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil - PNPDEC; dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil - SINPDEC e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil - CONPDEC; autoriza a criação de sistema de informações e monitoramento de desastres. Diário Oficial República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 12 p.

_____ (2012b). Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 11p.

BRESSANI, L. A., COSTA, E. A. (2013). Mapeamento Geotécnico – Suscetibilidade, Perigo, Vulnerabilidade, Risco Instalado e Risco. 14º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, CBGE, Rio de Janeiro, RJ, 10p.

_____ (2015). Cartas Geotécnicas aplicadas ao Planejamento urbano – alguns ajustes no instrumento. Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, 5(1): 9-20.

BRITO, F., SOUZA, J. (2005). Expansão urbana nas grandes metrópoles: o significado das migrações intrametropolitanas e da mobilidade pendular na reprodução da pobreza. São Paulo em perspectiva, São Paulo, SP, v. 19, n. 4, p. 48-63.

CÂMARA (1996). Desenvolvimento de Sistemas de Informação Geográfica no Brasil: Desafios e Oportunidades Gilberto Câmara Divisão de Processamento de Imagens- DPI Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE Palestra proferida na Semana de Geoprocessamento do Rio de Janeiro Outubro de 1996

CÂMARA, G., SOUZA, R.C.M, FREITAS, U.M., GARRIDO J. (1996). SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. Computers & Graphics, 20: (3) 395-403.

CÂMARA, G., DAVIS, C., MONTEIRO, A. M. V. (2001). Introdução à Ciência da Geoinformação. São José dos Campos: Ministério da Ciência e Tecnologia - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 345 p.

CAMPOS, J.E.G., FREITAS-SILVA, F.H. (1998). Meio Físico e Hidrogeologia. Inventário hidrogeológico e dos recursos hídricos superficiais do Distrito Federal, Campos, J.E.G. & Freitas-Silva, F.H. (orgs.), IEMA/SEMATEC/UnB, Brasília, DF, Parte I, p. 01-49.

CARPINTERO, A.C.C. (1998). Brasília: prática e teoria urbanística no Brasil, 1956-1988. Tese de doutorado, FAU, USP, São Paulo, SP, 254 p.

CARVALHO, E. A., ARAÚJO, P. C. (2008). Leituras cartográficas e interpretações estatísticas I: Geografia. EDUFRRN, Natal, RN, 248 p.

CARVALHO, M. V. A., DI MAIO, A. C. (2011). Proposta para a difusão de dados e informações geoespaciais disponíveis gratuitamente na Internet junto aos graduandos e professores da educação básica. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15. (SBSR), Curitiba. Anais... São José dos Campos: INPE, 2011. p. 3351-3358. DVD, On-line. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2011/files/p0612.pdf>. Acesso em 12 set. 2018.

CASACA, J. M., MATOS, J. L.; DIAS, J. M. B. (2011). Topografia Geral. LTC, Rio de Janeiro, RJ, 220 p.

CASTELLS, M. (1983). A questão urbana. Paz e Terra, Rio de Janeiro, RJ, 506 p.

CBERS (c2018). Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres. Disponível em: <http://www.cbbers.inpe.br/sobre/index.php>. Acesso em 06 fev. 2018.

CECCATO, V. A., FORESTI, C., KURKDIJAN, M. L. N. O. (1993). Proposta Metodológica para Avaliação da Qualidade de Vida Urbana a Partir de Dados Convencionais e de Sensoriamento Remoto, Sistema de Informações Geográficas (SIG) e de um Banco de Dados. In: Anais do VII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto-pp.32-39, Curitiba, maio de 1993.

CERRI, L.E.S. (1990). Carta Geotécnica: contribuições para uma concepção voltada às necessidades brasileiras. 6º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, ABGE, Salvador, BA, 1: 309-317.

CERRI, L.E.S.; AKIOSSI, A.; AUGUSTO FILHO, O. & ZAINÉ, J.E. (1996). Cartas e mapas geotécnicos de áreas urbanas: reflexões sobre as escalas de trabalho e proposta de elaboração com o emprego do método de detalhamento progressivo. 8º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, ABGE, Rio de Janeiro, RJ, 2: 537-548.

CIAM IV (1964). Carta de Atenas. Diretório Acadêmico de Arquitetura da UFMG, Belo Horizonte, MG, 110 p.

COLAÇO, D., BAUAB, F. P. (2016). A Geografia e a Cartografia Produzidas na Antiguidade: a contribuição dos clássicos. Geografia (Londrina) v. 25. n. 2. p. 60 – 75, jul/dez, 2016. 60 ISSN 2447-1747

CORBUSIER, L. (1971). Planejamento urbano. Ed. Perspectiva, São Paulo, SP, 200 p.

COSTA, L. (1987). Brasília Revisitada. Brasília 1960 2010: passado, presente e futuro, Leitão F. (org.), Secretaria de Estado de Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente, Brasília, DF, pp. 69-77.

_____ (1991). Relatório do Plano Piloto de Brasília. Codeplan/DEPHA, Brasília, DF, 76 p.

COSTA, M. E., LIMA, A. V. (1985). Brasília 57-85: do plano piloto ao Plano Piloto. Brasília 1960 2010: passado, presente e futuro, Leitão F. (org.), Secretaria de Estado de Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente, Brasília, DF, pp. 45-68.

COSTA, H. S. M. (2001). Processos recentes de expansão metropolitana e implicações socioambientais: a experiência de Belo Horizonte. In: Edésio Fernandes Jr.. (Org.). Direito urbanístico e política urbana no Brasil. Del Rey. Belo Horizonte. p. 387-406, 2001.

CPRM (2018). Manual de Mapeamento de Perigo e Risco a Movimentos Gravitacionais de Massa, CPRM – Serviço Geológico do Brasil, Brasília, DF, 204 p.

CRULS, L. (1894). Relatório da Comissão Exploradora do Planalto Central: Relatório Cruls. H. Lombaerts & Co, Rio de Janeiro, RJ, 1 ed., 365 p.

CULSHAW, M.G., PRICE S.J. (2013). A contribuição da geologia urbana ao desenvolvimento, recuperação e conservação de cidades. ABGE, São Paulo, SP, 138 p.

CUNHA, P. A. (2016). SANT. Legislação e Regulamentação: um potencial de oportunidades. I Seminário Internacional UAV, CICS.NOVA - FCSH, Lisboa, Portugal, 1: 1-14.

DEARMAN, W.R. (1991). Engineering geological mapping. Butterworth Heinemann Ltd., Oxford, Inglaterra, 387 p.

DECEA (2016). Comando da Aeronáutica, Ministério da Defesa. Portaria DECEA nº 282/DGCEA, de 02 de fevereiro de 2017. Aprova a reedição da ICA 100-40, que trata dos “Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas e o Acesso ao Espaço Aéreo Brasileiro”. Disponível em: <https://publicacoes.decea.gov.br/download.cfm?d=4944>. Acesso em: 11 jan. 2019.

DINIZ, N.C. (1998). Automação da cartografia geotécnica: uma ferramenta de estudos e projetos para avaliação ambiental. Tese de Doutorado, Escola Politécnica, USP, São Paulo, SP, 2 vol., 297 p.

_____ (2012). Cartografia geotécnica por classificação de unidades de terreno e avaliação de suscetibilidade e aptidão. Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, 2(2): 29-77.

DINIZ, M.S., NISIYAMA, F.L., BATTAGLINI, N.M.C.L.G., CAMARGO, F.R.T., LACERDA, G.V.C., SILVA, L.S., FLEURY, F.B.C., SILVA JUNIOR, E.E.A., CAVALCANTE, A.L.B. (2019). Estudo da Acurácia Posicional de Dados Geoespaciais Obtidos com RPA mediante Uso da Metodologia Proposta para Verificação do Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC). In: XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Santos. Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Campinas: Galoá, v. 17.

DPI/INPE. (c2006). SPRING: Tutorial de geoprocessamento. Disponível em <http://www.dpi.inpe.br/SPRING/portugues/tutorial/index.html>. Acesso em: 12 set. 2014.

DRONENG. (c2014a). O guia definitivo sobre pontos de apoio. Disponível em <https://droneng.com.br/materiais-educativos/>. Acesso em: 16 jul. de 2018.

_____. (c2014b) Mapeamento Aéreo Urbano: Multirrotor e Asa Fixa. Disponível em <https://droneng.com.br/materiais-educativos/>. Acesso em: 16 jul. de 2018

DIVISÃO DE GERAÇÃO DE IMAGENS (2008). Rapideye. Disponível em: <http://www.dgi.inpe.br/documentacao/satelites/rapideye>. Acesso em: 04 jun. 2018.

EMBRAPA MONITORAMENTO POR SATÉLITE (2013). Satélites de Monitoramento. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2013. Disponível em: <http://www.sat.cnpem.embrapa.br>. Acesso em: 08 fev. 2019.

ESA (c2000) Sentinel Online. Disponível em: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/home>. Acesso em: 05 jun. 2017.

ESRI (2013). Band Combinations for Landsat 8. Disponível em <http://blogs.esri.com/esri/arcgis/2013/07/24/band-combinations-for-landsat-8/>. Acesso em: 06 maio 2018.

_____ (c2019). The ArcGIS Book. Disponível em <https://learn.arcgis.com/en/arcgis-book/>. Acesso em 12 jan. 2019.

ESTEIO (2008). Aerotriangulação Digital.

Disponível em: http://www.esteio.com.br/downloads/2008/aerotriangulacao_digital.pdf.

Acesso em: 26 nov. 2018.

FITZ, P. R. (2008a). Cartografia básica. Oficina de Textos, São Paulo, SP, 144 p.

_____ (2008b). Geoprocessamento sem complicação. Oficina de Textos, São Paulo, SP, 160 p.

FLORENZANO, T. G. (2011) Iniciação em sensoriamento remoto. Oficina de Textos, São Paulo, SP, 128 p.

FELL, R., COROMINAS, J., BONNARD, C., CASCINI, L., LEROI, E., SAVAGE, W.Z. (2008a). Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Engineering Geology*, 102(1): 85-98.

_____ (2008b). Commentary of guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Engineering Geology*, 102(1): 99-111.

FREITAS, C. G. L., CAMPANHA, V. A. (2007). Carta geotécnica e ambiental aplicada em planos diretores municipais. 6º Simpósio Brasileiro de Cartografia Geotécnica e Geoambiental, Uberlândia. ABGE, p. 562-570.

FREITAS-SILVA, F.H., CAMPOS, J.E.G. (1998). Geologia do Distrito Federal. In: Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal. Brasília. IEMA/SEMATEC/UnB. Parte I, p. 86.

GDF (2019). Zoneamento Ecológico - Econômico do Distrito Federal / ZEE-DF. Disponível em <http://www.zee.df.gov.br/>. Acesso em 15 fev. 2019.

_____ (2016). Zoneamento Ecológico – Econômico: Identidade das Zonas e Sunzonas/ ZEE-DF. Apresentação para o Sinduscon DF, Brasília, 19 de julho de 2016. 39 p.

_____ (2012). Zoneamento Ecológico e Econômico do Distrito Federal / ZEE-DF. Disponível em <http://www.zee-df.com.br>. Acesso em 15 jan. 2015.

GEO CATÁLOGO MMA (2017). Catálogo de imagens de satélite RapidEye. Disponível em: <http://geocatalogo.mma.gov.br/>. Acesso em: 07 mar. 2017.

GIBOSHI, M.L. (1999). Desenvolvimento de um sistema especialista para determinar a capacidade de uso da terra. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Agrícola, UNICAMP, Campinas, SP, 77 p.

GROSTEIN, M. D. (2001). MetrÓpole e expansão urbana: a persistência de processos insustentáveis. São Paulo em perspectiva, v. 15, n. 1, p. 13-19.

GOOGLE EARTH SOLIDÁRIO (c2019). Introdução ao Google Earth Engine. Disponível em: https://www.google.com/intl/pt-BR_br/earth/outreach/learn/introduction-to-google-earth-engine/. Acesso em: 04 out. 2018.

GRAHAM, R., KOH, A. (2002). Digital Aerial Survey, Theory and Practice, Whittles Publishing Caithness, CRC Press 247 p.

GRANT, K. (1975). The PUCE Programme for terrain evaluation for engineering purposes: I principles. Division of applied geomechanics technical paper n.15, CSIRO, Austrália, 32 p.

HERREROS, J.L.E. (2015). Los drones y sus aplicaciones a la ingeniería civil. Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid, Madrid, España, 237 p.

HUETE, A.R. (1988) A soil-adjusted vegetation index (SAVI). Remote sensing of environment, v. 25, n. 3, p. 295-309.

IAEG (1976). Engineering Geology maps: a guide to their preparation. Unesco, Paris, França, 79 p.

IBRAM (2014). Mapa Ambiental do Distrito Federal 2014. Disponível em: <http://www.ibram.df.gov.br/mapa-ambiental/>. Acesso em: 6 mai. 2019.

IBGE (1999). Noções básicas de Cartografia. Manuais técnicos em geociências, IBGE, Rio de Janeiro, RJ, vol. 8, 130 p.

_____ (2016). Pesquisa nacional por amostra de domicílios: síntese de indicadores 2015. IBGE - Coordenação de Trabalho e Rendimento, Rio de Janeiro, RJ, 108 p.

_____ (2018). RBMC – Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo do Sistema GNSS, Brasil. Disponível em: <https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/rbmc/rbmc.shtm?c=7>. Acesso em: 24 set. 2018.

INMET (2016). Gráficos - INMET. Disponível em: http://www.inmet.gov.br/sim/gera_graficos.php. Acesso em: 01 fev. 2016.

ISO (c2004). Geographic information / Geomatics — Qualification and certification of personnel. Disponível em <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:tr:19122:ed-1:v1:en> Acesso em: 01 maio 2018.

JAPIASSÚ, L.A.T., LINS, R.D.B. (2014). As diferentes formas de expansão urbana. Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades, v. 2, n. 13, p.

JENSEN, J.R. (2009). Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres. Parêntese Editora, São José dos Campos, SP, 598 p.

JIN, S., SADER, S.A. (2005). Comparison of time series tasseled cap wetness and the normalized difference moisture index in detecting forest disturbances. Remote Sensing of Environment, v. 94, n.3, p.364-372.

KONECNY, G. (1994). Mapping Potential of Remote Sensing Sensors, ISPRS, Com IV, Washington, 9 p.

LAMAS, J.M.R.G. (2004). Morfologia urbana e desenho da cidade. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, Portugal, 590 p.

LEME, M.C.S. (1999). A formação do pensamento urbanístico no Brasil: 1895-1965. *In*: LEME, Maria Cristina da Silva; FERNANDES, Ana; GOMES, Marco Aurelio Filgueiras (org.) Urbanismo no Brasil 1895-1965. São Paulo: Studio Nobel/FAU USP/FUPAM.

LIAO, Z., HONG, Y., WANG, J., FUKUOKA, H., SASSA, K., KARNAWATI, D.E, FATHANI, F. (2010). Prototyping an experimental early warning system for rainfall-induced landslides in Indonesia using satellite remote sensing and geospatial datasets, *Landslides*, SPRINGER, Vol. 7, p. 317-324.

LOCH, C., LAPOLLI, E.M. (1998). Elementos Básicos da Fotogrametria e Sua Utilização Prática. Edufsc, Florianópolis, SC, 104 p.

MARQUES FILHO, O.; VIEIRA NETO, H. (1999). Processamento Digital de Imagens. Rio de Janeiro: Brasport, 307 p.

MARTINELLI, M. (2014). Mapas da Geografia e Cartografia Temática. Editora: Contexto Ed.6 são Paulo SP, 142 p.

MARTINS, E.S.; REATTO, A.; CARVALHO JUNIOR, O.A., GUIMARÃES, R.F. (2004). Evolução geomorfológica do Distrito Federal. Embrapa Cerrados, Planaltina, DF, 57 p.

MASCARÓ, J.L. (1989). Desenho Urbano e Custos de Urbanização. Sagra-Dc Luzzatto, Porto Alegre, RS, 175 p.

_____ (1994). Manual de Loteamentos e Urbanização. Sagra-Dc Luzzatto, Porto Alegre, RS, 237 p.

_____ (2005). Loteamentos Urbanos. Masquatro, Porto Alegre, RS, 208 p.

MATULA, M. (1979). Regional Engineering geological mapping for planning purposes. *Boletim da IAEG* 19: p.18-24.

MAUSBACH, H. (1981). Urbanismo Contemporâneo. Editorial Presença, Lisboa, Portugal, 211 p.

McHARG, I. L. (1969). Design with nature. Garden City, N.Y. 197 p.

MENESES, P. R., ALMEIDA, T. (2012). Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto. CNPq, Brasília, DF, 266 p.

MOURA, A. C. M. (2014). Geoprocessamento na gestão e planejamento urbano. 3ª ed. Rio de Janeiro: Interciência, 312 p.

MUNARETTO, L. (2017). VANT e Drones. Edição do autor. São Paulo, SP, 176 p.

OLIVEIRA, C. (1993). Curso de cartografia moderna -2ª edição. Rio de Janeiro, IBGE.

- OLIVEIRA, B.S. (2016). Satélites e Sensores. INPE/DSR. São José dos Campos, SP. 87p.
- OLIVEIRA, B.R. (2018). Cartografia geotécnica de grande escala: estudo de caso setor habitacional Asa Taquari Distrito Federal. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-305/2018, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 144 p.
- ONU (2018). United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. World Urbanization Prospects: The 2018 Revision, Methodology. Working Paper No. ESA/P/WP.252. New York: United Nation.
- PINTO, M. N. (1987). Superfícies de aplainamento do Distrito Federal. Revista Brasileira de Geografia, 49: 9-27.
- _____ (1993). Caracterização geomorfológica do Distrito Federal. Cerrado: caracterização, ocupação e perspectivas. Pinto, M. N. (org.) Editora UnB, Brasília, DF, 2a. ed., p. 285-344.
- PRANDINI, F.L.; NAKAZAWA, V.A.; FREITAS, C.G.L. & DINIZ, N.C (1995). Cartografia Geotécnica nos planos diretores regionais e municipais. Curso de Geologia Aplicada ao Meio Ambiente, O.Y. Bitar (coord.), ABGE/IPT, São Paulo, SP, pp.187-202.
- RAMALHO FILHO, A.; BEEK, K.J. (1995). Sistema de avaliação da aptidão agrícola das terras. EMBRAPA/CNPS, Rio de Janeiro, RJ, 3. ed., 65 p.
- REATTO, A., MARTINS, E. S., FARIAS, M. F. R., SILVA, A. V., CARVALHO JUNIOR, O. A. (2004). Mapa pedológico digital-SIG atualizado do Distrito Federal escala 1:100.000 e uma síntese do texto explicativo. Embrapa Cerrados, Planaltina, DF, 31 p.
- RIBEIRO, B.A. (1988). Noções de planejamento urbano. O Semeador, São Paulo, SP, 171 p.
- RIBEIRO, J. F., WALTER, B. M. T. (2008). As principais fitofisionomias do Bioma Cerrado, ecologia e flora, Sano, S. M.; Almeida, S. P. & Ribeiro, J. F. (orgs.), EMBRAPA Brasília, DF, p. 152-212.
- ROSA, R. (2011). Geotecnologias na Geografia Aplicada. Revista do Departamento de Geografia, (16) 81-90.
- ROLNIK, R. (1995). O que é cidade. São Paulo: Editora Brasiliense, p. 7- 8.
- SANTOS, A.R. (2014). Manual básico para a elaboração e para o uso da Cartografia Geotécnica. Rudder, São Paulo, SP, 109 p.
- SANTOS, C.N.F. (1988). A cidade como um jogo de cartas. EdUFF, Niterói, RJ, 192 p.
- SANTOS, A. R., PELUZIO, T. M. O., SAITO, N. S. (2010). SPRING 5.1.2 passo a passo: Aplicações práticas. Porto Alegre: CAUFES, 153 p.
- SANTORO, P. F. (2012) Planejar a expansão urbana: dilemas e perspectivas. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SANTOS, R.F. (2004) Planejamento ambiental - teoria e prática. São Paulo: OFICINA DE TEXTOS, 306 p.

SEDHAB (2013). Diretrizes Urbanísticas: Setor Habitacional Taquari Etapa II. GDF, Brasília, DF, 41p.

SEDUMA (2009). Plano Diretor de Ordenamento Territorial: Documento Técnico. GDF, Brasília, DF, 332p.

SILVA, L. S. (2018). Fotogrametria com imagens adquiridas com Drones – do Plano de Voo ao Modelo 3D. ebook. 59 p.

SILVA JUNIOR, E.E.A., SOUZA, N.M. (2015). Comparação da Temperatura de Brilho de Superfície do Período Seco com o Chuvoso no Distrito Federal Calculada a Partir de Imagens do Landsat 8. 15º CBGE: Bento Gonçalves, Brasil.

SILVA JUNIOR, E.E.A.; AZEVEDO, G.F.; WILK, A.; SCHIMIDT, L.C.; SOUSA JUNIOR, R.P., CARVAJAL, H.E.M. (2016a). Planejamento do Uso do Solo e Zoneamento da Ameaça de Escorregamentos Rasos Deflagrados por Chuvas pelo Uso de Métodos Probabilísticos Aplicado ao Setor Taquari (DF). XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica - COBRAMSEG2016, ABMS, Belo Horizonte - MG., 1: 1-8.

_____. (2016b). Zoneamento de Susceptibilidade e Ameaça de Escorregamentos Rasos Deflagrados por Chuvas pelo Uso de Métodos Probabilísticos Aplicado ao Setor Taquari (DF), Brasília, Brasil. 15º CNG, 8º CLBG: Lisboa, Portugal.

SMITH, C. (2016). The Photographer's Guide To Drones. Rocky Nook. USA. 421 p.

SOBREIRA, F.G., SOUZA, L.A. (2012). Cartografia geotécnica aplicada ao planejamento urbano. Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, 2(2): 79-97.

SOUZA, L. A., SOBREIRA, F. G. (2014). Guia para elaboração de cartas geotécnicas de aptidão à urbanização frente aos desastres naturais. Brasília, DF, 68 p.

SOUZA, N. M. (1994). Contribuição à cartografia geotécnica com uso de geoprocessamento: sensoriamento remoto e sistemas de informação geográfica. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, SP, 238p.

SOUZA, N.M., SILVA JUNIOR, E.E.A. (2015). Uso de Imagens do Landsat 8 para o Cálculo da Temperatura de Brilho da Superfície. Anais 9º Simpósio Brasileiro de Cartografia Geotécnica e Geoambiental, INPP, Cuiabá, MT, 5 p.

TOMMASELLI, A.M.G (2009). Fotogrametria básica- Presidente Prudente: UNESP.

TÔSTO, S.G., RODRIGUES C.A.G., BOLFE, E.L., BATISTELLA, M. (2014). Geotecnologias e Geoinformação: o produtor pergunta, a Embrapa responde. Brasília, DF, Embrapa, 248 p.

UNDRR. (2007). “Hyogo Framework for Action 2005-2015: Building the resilience of nations and communities to disasters”.

Disponível em <http://www.unisdr.org/we/inform/publications/1037>. Acesso em: 09 jun. 2014.

- UNESCO (2002). *Vegetação no Distrito Federal – Tempo e Espaço*. 2ª ed. Brasília, DF, 80p.
- USGS (1972). *Landsat Project Description*. Disponível em: <https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat>. Acesso em: 22 julho de 2014.
- VARNES, D. J. (1974). *The logic of geological maps, with reference to their interpretation and use for engineering purposes*. Geological Survey Professional Paper, 837, 48 p.
- VEIGA, A.C.R. (2005). *Mapeamento Urbanístico: a materialidade da dimensão intangível do patrimônio cultural urbano*. Dissertação de mestrado, Escola de Arquitetura e Urbanismo, UFMG, Belo Horizonte, MG, 357 p.
- VILLAÇA, F. (1999) *Uma contribuição para a história do planejamento urbano no Brasil*. São Paulo: EdUSP, p.
- XAVIER, S., PORTELLA, A., BRESSANI, L.A. (2015). *Cartografia Geotécnica e Planejamento Urbano*. 15º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, Outubro 2015.
- Y. ZHA , J. GAO, S. NI (2003). *Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery*, *International Journal of Remote Sensing*, 24:3, 583-594, DOI: 10.1080/01431160304987.
- ZAINE, J.E. (2000). *Mapeamento geológico-geotécnico por meio do método do detalhamento progressivo: ensaio de aplicação na área urbana do município de Rio Claro (SP)*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Rio Claro, SP, 149 p.
- ZEVENBERGEN, L.W., THORNE, C.R. (1987). *Quantitative analysis of land surface topography*. *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol 12, pp. 47-56.
- ZUQUETTE, L.V. (1987). *Análise crítica da cartografia geotécnica e proposta metodológica para condições brasileiras*. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, SP, 219 p.
- ZUQUETTE, L.V., GANDOLFI, N. (2004). *Cartografia geotécnica*. Oficina de Textos, São Paulo, SP, 190 p.
- ZUQUETTE, L.V., NAKAZAWA, V.A. (1998). *Cartas de geologia de engenharia*. *Geologia de Engenharia*, A.M.S. Oliveira & S.N.A. Brito (eds.), ABGE, São Paulo, SP, pp. 283-300.

APÊNDICE A – DADOS DO AEROLEVANTAMENTO COM RPA

A.1 – GEORREFERENCIAMENTO GCP: PONTOS RASTREADOS E DURAÇÃO EM MODO ESTÁTICO

- Dia 3 de março de 2017 (sexta-feira).

Denominação do PONTO	Hora início	Duração em modo estático
P9	8h26	1h01min
P6	9h50	1h04min
P5	11h17	0h58min
P4	12h40	0h50min
P3	13h46	0h51min
P7	14h50	0h40min (interrompido pela chuva)

- Dia 4 de março de 2017 (sábado).

Denominação do PONTO	Hora início	Duração em modo estático
P14	8h39	0h50min
P13	9h47	0h53min
P16	11h10	1h06min
P15	12h56	0h54min
P18	14h23	1h02min
P17	15h44	0h50min
P11	16h50	0h53min
P7	17h57	0h51min (refeito)

- Dia 6 de março de 2017 (segunda-feira).

Denominação do PONTO	Hora início	Duração em modo estático
P19	8h40	1h13min
P21	10h01	0h57min
P08	11h27	0h57min
P10	12h58	0h54min
P3	14h18	1h01min
P1	16h53	0h56min
P2	17h59	0h53min

Visão Geral do Levantamento de Terrenos

GNSS Solutions
 (C) 2012 Trimble Navigation Limited. All rights reserved. Spectra Precision is a Division of Trimble Navigation Limited.
 05/09/2018 18:05:02
www.spectraprecision.com

Nome do Projecto: Dados dia 3
 Sistema de Referência Espacial: WGS 84
 Fuso Horário: (UTC-03:00) Brasília
 Unidades Lineares: Metros

Resumo do Sistema de Coordenadas

Sistema de coordenadas

Nome: WGS 84
 Tipo: Geográfico
 Nome da Unidade: Radianos
 Radianos por unidade: 1
 Datum Vertical: Elipsóide
 Unidade vertical: Metros
 Metros por unidade: 1

Dado

Nome: WGS 84
 Nome da Elipsóide: WGS 84
 Eixo Semi-maior: 6378137.000 m
 Achatamento Inverso: 298.257223563
 DX para WGS84: 0.0000 m
 DY para WGS84: 0.0000 m
 DY para WGS84: 0.0000 m
 RX para WGS84: -0.000000 "
 RY para WGS84: -0.000000 "
 RZ para WGS84: -0.000000 "
 ppm para WGS84: 0.000000000000

Pontos de Controlo

Nome	Componentes	95%		Estado	Erro de Controlo
		Erro			
BRAZ	Long 47° 52' 40.32834"W	0.000		Fixo	
	Lat 15° 56' 50.91123"S	0.000		Fixo	
	Altura da elipse	1106.020	0.000	Fixo	
	Descrição BRAZ				

Pontos Registados

Nome	Componentes	95%		Estado
		Erro		
0003	Long 47° 50' 46.78853"W	0.071		Ajustado
	Lat 15° 43' 27.41140"S	0.112		Ajustado
	Altura da elipse	1019.257	0.133	Ajustado
	Descrição SOLAR			
0004	Long 47° 50' 40.49524"W	0.025		Ajustado
	Lat 15° 43' 17.75592"S	0.039		Ajustado

	Altura da elipse		1033.170	0.073	Ajustado
	Descrição	SOLAR			
0005	Long	47° 50' 27.80437"W		0.029	Ajustado
	Lat	15° 43' 11.94776"S		0.045	Ajustado
	Altura da elipse		1076.071	0.069	Ajustado
	Descrição	SOLAR			
0006	Long	47° 50' 20.80888"W		0.026	Ajustado
	Lat	15° 43' 05.54735"S		0.042	Ajustado
	Altura da elipse		1086.524	0.073	Ajustado
	Descrição	SOLAR			
0007	Long	47° 50' 35.60360"W		0.022	Ajustado
	Lat	15° 43' 39.86090"S		0.038	Ajustado
	Altura da elipse		1013.413	0.072	Ajustado
	Descrição	SOLAR			
0009	Long	47° 50' 19.63865"W		0.029	Ajustado
	Lat	15° 43' 16.66121"S		0.043	Ajustado
	Altura da elipse		1090.514	0.070	Ajustado
	Descrição	SOLAR			

Ficheiros

Nome	Hora de Início	Amostragem	Épocas	Tamanho (Kb)	Tipo
BSTATA17.062	17/03/03 08:26:45	15	246	86	L1 GPS
BSTATB17.062	17/03/03 09:50:00	15	259	92	L1 GPS
BSTATC17.062	17/03/03 11:17:30	15	234	91	L1 GPS
BSTATD17.062	17/03/03 12:40:00	15	203	81	L1 GPS
BSTATE17.062	17/03/03 13:46:15	15	206	80	L1 GPS
BSTATF17.062	17/03/03 14:59:15	15	163	62	L1 GPS
braz0621.17o	17/03/02 21:00:00	15	5760	6617	L1/L2 GPS/GLONASS

Ocupações

Local	Hora de Início	Intervalo de horas	Tipo	Ficheiro
0009	3 março 2017 08:26:45.00	01:01:15.00	Static	BSTATA17.062
0006	3 março 2017 09:50:00.00	01:04:30.00	Static	BSTATB17.062
0005	3 março 2017 11:17:30.00	00:58:15.00	Static	BSTATC17.062
0004	3 março 2017 12:40:00.00	00:50:30.00	Static	BSTATD17.062
0003	3 março 2017 13:46:15.00	00:51:15.00	Static	BSTATE17.062
0007	3 março 2017 14:59:15.00	00:40:30.00	Static	BSTATF17.062
BRAZ	2 março 2017 21:00:00.00	23:59:45.00	Static	braz0621.17o

Processos

Referência	Ficheiro de Referência	Móvel	Ficheiro Móvel	Modo	Núm
BRAZ	braz0621.17o	0007	BSTATF17.062	Static	1
BRAZ	braz0621.17o	0003	BSTATE17.062	Static	2
BRAZ	braz0621.17o	0004	BSTATD17.062	Static	3
BRAZ	braz0621.17o	0005	BSTATC17.062	Static	4
BRAZ	braz0621.17o	0006	BSTATB17.062	Static	5
BRAZ	braz0621.17o	0009	BSTATA17.062	Static	6

Vectores processados

Identificador de Vector	Vector Comprimento	95% Erro	Vector Componentes	95% Erro SV	PDOP	QA	Solução
BRAZ - 0009	25380.546	0.124	X 7677.629	0.050	9	1.6	No Fixo
17/03/03 08:26:45.00			Y -2244.189	0.050			
+01:01:15.00			Z 24087.128	0.050			

BRAZ - 0006	25711.952	0.126	X	7711.355	0.051	9	1.7	No	Fixo
17/03/03 09:50:00.00			Y	-2333.351	0.051				
+01:04:30.00			Z	24417.103	0.051				
BRAZ - 0005	25484.723	0.124	X	7514.404	0.050	10	1.5	No	Fixo
17/03/03 11:17:30.00			Y	-2426.196	0.051				
+00:58:15.00			Z	24230.526	0.050				
BRAZ - 0004	25252.225	0.124	X	7174.073	0.050	10	1.6	No	Fixo
17/03/03 12:40:00.00			Y	-2613.354	0.050				
+00:50:30.00			Z	24070.270	0.050				
BRAZ - 0003	24932.340	0.267	X	6972.176	0.109	10	1.7	No	Flutuar
17/03/03 13:46:15.00			Y	-2669.562	0.109				
+00:51:15.00			Z	23788.311	0.108				
BRAZ - 0007	24601.220	0.121	X	7145.681	0.049	9	2.2	No	Fixo
17/03/03 14:59:15.00			Y	-2364.967	0.049				
+00:40:30.00			Z	23421.490	0.049				

Vectores ajustados

Identificador de Vector	VectorComprimento			Vector		Resid.	Tau	QA
	Comprimento	Resid.		Componentes	Resid.			
BRAZ - 0009	25380.546	0.000	X	7677.629	0.000		No	
17/03/03 08:26:45.00			Y	-2244.189	0.000			
			Z	24087.128	0.000			
BRAZ - 0006	25711.952	0.000	X	7711.355	0.000		No	
17/03/03 09:50:00.00			Y	-2333.351	0.000			
			Z	24417.103	0.000			
BRAZ - 0005	25484.723	0.000	X	7514.404	0.000		No	
17/03/03 11:17:30.00			Y	-2426.196	0.000			
			Z	24230.526	0.000			
BRAZ - 0004	25252.225	0.000	X	7174.073	0.000		No	
17/03/03 12:40:00.00			Y	-2613.354	0.000			
			Z	24070.270	0.000			
BRAZ - 0003	24932.340	0.000	X	6972.176	0.000		No	
17/03/03 13:46:15.00			Y	-2669.562	0.000			
			Z	23788.311	0.000			
BRAZ - 0007	24601.220	0.000	X	7145.681	0.000		No	
17/03/03 14:59:15.00			Y	-2364.967	0.000			
			Z	23421.490	0.000			

Visão Geral do Levantamento de Terrenos

GNSS Solutions
(C) 2012 Trimble Navigation Limited. All rights reserved. Spectra Precision is a Division of Trimble Navigation Limited.
05/09/2018 18:06:20
www.spectraprecision.com

Nome do Projecto: Dados dia 4
Sistema de Referência Espacial: WGS 84
Fuso Horário: (UTC-03:00) Brasília
Unidades Lineares: Metros

Resumo do Sistema de Coordenadas

Sistema de coordenadas

Nome: WGS 84
Tipo: Geográfico
Nome da Unidade: Radianos
Radianos por unidade: 1
Datum Vertical: Elipsóide
Unidade vertical: Metros
Metros por unidade: 1

Dado

Nome: WGS 84
Nome da Elipsóide: WGS 84
Eixo Semi-maior: 6378137.000 m
Achatamento Inverso: 298.257223563
DX para WGS84: 0.0000 m
DY para WGS84: 0.0000 m
DY para WGS84: 0.0000 m
RX para WGS84: -0.000000 "
RY para WGS84: -0.000000 "
RZ para WGS84: -0.000000 "
ppm para WGS84: 0.000000000000

Pontos de Controle

Nome	Componentes	95%		Estado	Erro de Controle
		Erro			
BRAZ	Long	47° 52' 40.32834"W	0.000		Fixo
	Lat	15° 56' 50.91123"S	0.000		Fixo
	Altura da elipse		1106.020	0.000	
	Descrição	BRAZ			

Pontos Registrados

Nome	Componentes	95%		Estado
		Erro		
0007	Long	47° 50' 35.58448"W	0.143	Ajustado
	Lat	15° 43' 39.85876"S	0.105	Ajustado
	Altura da elipse		1012.985	0.062
	Descrição	SOLAR		
0011	Long	47° 50' 21.84723"W	0.127	Ajustado
	Lat	15° 43' 55.13779"S	0.107	Ajustado
	Altura da elipse		1004.449	0.084
	Descrição	SOLAR		
0013	Long	47° 50' 08.53745"W	0.022	Ajustado

	Lat	15° 43' 29.60124"S	0.041	Ajustado
	Altura da elipse	1093.354	0.072	Ajustado
	Descrição	SOLAR		
0014	Long	47° 50' 03.18652"W	0.026	Ajustado
	Lat	15° 43' 22.63278"S	0.040	Ajustado
	Altura da elipse	1100.172	0.073	Ajustado
	Descrição	SOLAR		
0015	Long	47° 49' 49.27384"W	0.024	Ajustado
	Lat	15° 43' 37.19804"S	0.042	Ajustado
	Altura da elipse	1079.552	0.071	Ajustado
	Descrição	SOLAR		
0016	Long	47° 50' 02.37755"W	0.039	Ajustado
	Lat	15° 43' 41.83593"S	0.044	Ajustado
	Altura da elipse	1078.257	0.061	Ajustado
	Descrição	SOLAR		
0017	Long	47° 50' 13.89536"W	0.135	Ajustado
	Lat	15° 44' 02.10686"S	0.104	Ajustado
	Altura da elipse	1000.807	0.075	Ajustado
	Descrição	SOLAR		
0018	Long	47° 50' 01.29650"W	0.021	Ajustado
	Lat	15° 43' 58.87825"S	0.039	Ajustado
	Altura da elipse	1055.073	0.070	Ajustado
	Descrição	SOLAR		

Ficheiros

Nome	Hora de Início	Amostragem	Épocas	Tamanho (Kb)	Tipo
BSTATB17.063	17/03/04 08:39:30	15	204	69	L1 GPS
BSTATC17.063	17/03/04 09:47:30	15	216	77	L1 GPS
BSTATD17.063	17/03/04 11:10:00	15	266	101	L1 GPS
BSTATE17.063	17/03/04 12:56:00	15	218	85	L1 GPS
BSTATF17.063	17/03/04 14:23:00	15	251	98	L1 GPS
BSTATG17.063	17/03/04 15:44:45	15	204	78	L1 GPS
BSTATH17.063	17/03/04 16:50:30	15	214	81	L1 GPS
BSTATI17.063	17/03/04 17:57:00	15	205	86	L1 GPS
braz0631.17o	17/03/03 21:00:00	15	5760	6584	L1/L2 GPS/GLONASS

Ocupações

Local	Hora de Início	Intervalo de horas	Tipo	Ficheiro
0014	4 março 2017 08:39:30.00	00:50:45.00	Static	BSTATB17.063
0013	4 março 2017 09:47:30.00	00:53:45.00	Static	BSTATC17.063
0016	4 março 2017 11:10:00.00	01:06:15.00	Static	BSTATD17.063
0015	4 março 2017 12:56:00.00	00:54:15.00	Static	BSTATE17.063
0018	4 março 2017 14:23:00.00	01:02:30.00	Static	BSTATF17.063
0017	4 março 2017 15:44:45.00	00:50:45.00	Static	BSTATG17.063
0011	4 março 2017 16:50:30.00	00:53:15.00	Static	BSTATH17.063
0007	4 março 2017 17:57:00.00	00:51:00.00	Static	BSTATI17.063
BRAZ	3 março 2017 21:00:00.00	23:59:45.00	Static	braz0631.17o

Processos

Referência	Ficheiro de Referência	Móvel	Ficheiro Móvel	Modo	Núm
BRAZ	braz0631.17o	0013	BSTATC17.063	Static	1
BRAZ	braz0631.17o	0014	BSTATB17.063	Static	2
BRAZ	braz0631.17o	0018	BSTATF17.063	Static	3
BRAZ	braz0631.17o	0017	BSTATG17.063	Static	4
BRAZ	braz0631.17o	0016	BSTATD17.063	Static	5
BRAZ	braz0631.17o	0011	BSTATH17.063	Static	6
BRAZ	braz0631.17o	0015	BSTATE17.063	Static	7
BRAZ	braz0631.17o	0007	BSTATI17.063	Static	8

Vetores processados

Identificador de Vector	Vector	95%		Vector	95%	SV	PDOP	QA	Solução
	Comprimento	Erro		Componentes	Erro				
BRAZ - 0007	24601.372	0.268	X	7145.838	0.110	10	1.9	No	Flutuar
17/03/04 17:57:00.00			Y	-2364.292	0.109				
+00:51:00.00			Z	23421.670	0.107				
BRAZ - 0015	24926.776	0.122	X	8225.877	0.049	10	1.6	No	Fixo
17/03/04 12:56:00.00			Y	-1502.592	0.049				
+00:54:15.00			Z	23482.362	0.049				
BRAZ - 0011	24203.400	0.265	X	7358.071	0.108	9	1.6	No	Flutuar
17/03/04 16:50:30.00			Y	-1989.262	0.108				
+00:53:15.00			Z	22971.857	0.106				
BRAZ - 0016	24710.067	0.120	X	7909.895	0.049	9	1.6	No	Fixo
17/03/04 11:10:00.00			Y	-1734.955	0.049				
+01:06:15.00			Z	23345.469	0.049				
BRAZ - 0017	24034.095	0.265	X	7492.232	0.109	9	1.5	No	Flutuar
17/03/04 15:44:45.00			Y	-1784.673	0.107				
+00:50:45.00			Z	22766.623	0.106				
BRAZ - 0018	24202.162	0.118	X	7823.421	0.048	10	1.7	No	Fixo
17/03/04 14:23:00.00			Y	-1591.522	0.048				
+01:02:30.00			Z	22847.446	0.048				
BRAZ - 0014	25285.474	0.124	X	8013.610	0.050	9	1.6	No	Fixo
17/03/04 08:39:30.00			Y	-1885.359	0.050				
+00:50:45.00			Z	23907.795	0.050				
BRAZ - 0013	25045.742	0.122	X	7852.130	0.050	9	1.7	No	Fixo
17/03/04 09:47:30.00			Y	-1944.419	0.050				
+00:53:45.00			Z	23703.428	0.049				

Vetores ajustados

Identificador de Vector	Vector	Resid.		Vector	Resid.	Tau	QA
	Comprimento			Componentes		Teste	
BRAZ - 0007	24601.372	0.000	X	7145.838	0.000		No
17/03/04 17:57:00.00			Y	-2364.292	0.000		
			Z	23421.670	0.000		
BRAZ - 0015	24926.776	0.000	X	8225.877	0.000		No
17/03/04 12:56:00.00			Y	-1502.592	0.000		
			Z	23482.362	0.000		
BRAZ - 0011	24203.400	0.000	X	7358.071	0.000		No
17/03/04 16:50:30.00			Y	-1989.262	0.000		
			Z	22971.857	0.000		
BRAZ - 0016	24710.067	0.000	X	7909.895	0.000		No
17/03/04 11:10:00.00			Y	-1734.955	0.000		
			Z	23345.469	0.000		
BRAZ - 0017	24034.095	0.000	X	7492.232	0.000		No
17/03/04 15:44:45.00			Y	-1784.673	0.000		
			Z	22766.623	0.000		
BRAZ - 0018	24202.162	0.000	X	7823.421	0.000		No
17/03/04 14:23:00.00			Y	-1591.522	0.000		
			Z	22847.446	0.000		
BRAZ - 0014	25285.474	0.000	X	8013.610	0.000		No
17/03/04 08:39:30.00			Y	-1885.359	0.000		
			Z	23907.795	0.000		
BRAZ - 0013	25045.742	0.000	X	7852.130	0.000		No
17/03/04 09:47:30.00			Y	-1944.419	0.000		
			Z	23703.428	0.000		

Visão Geral do Levantamento de Terrenos

GNSS Solutions

(C) 2012 Trimble Navigation Limited. All rights reserved. Spectra Precision is a Division of Trimble Navigation Limited.

05/09/2018 18:09:55

www.spectraprecision.com

Nome do Projecto: Dados dia 6
Sistema de Referência Espacial: WGS 84
Fuso Horário: (UTC-03:00) Brasília
Unidades Lineares: Metros

Resumo do Sistema de Coordenadas

Sistema de coordenadas

Nome: WGS 84
Tipo: Geográfico
Nome da Unidade: Radianos
Radianos por unidade: 1
Datum Vertical: Elipsóide
Unidade vertical: Metros
Metros por unidade: 1

Dado

Nome: WGS 84
Nome da Elipsóide: WGS 84
Eixo Semi-maior: 6378137.000 m
Achatamento Inverso: 298.257223563
DX para WGS84: 0.0000 m
DY para WGS84: 0.0000 m
DY para WGS84: 0.0000 m
RX para WGS84: -0.000000 "
RY para WGS84: -0.000000 "
RZ para WGS84: -0.000000 "
ppm para WGS84: 0.000000000000

Pontos de Controlo

Nome	Componentes	95%		Estado	Erro de Controlo
		Erro	Erro		
BRAZ	Long	47° 52' 40.32834"W	0.000	Fixo	
	Lat	15° 56' 50.91123"S	0.000	Fixo	
	Altura da elipse	1106.020	0.000	Fixo	
	Descrição	BRAZ			

Pontos Registrados

Nome	Componentes	95%		Estado
		Erro	Erro	
0001	Long	47° 50' 52.06546"W	0.031	Ajustado
	Lat	15° 43' 07.56272"S	0.039	Ajustado
	Altura da elipse	1063.897	0.073	Ajustado
	Descrição	SOLAR		

0002	Long	47° 50' 49.65896"W	0.145	Ajustado
	Lat	15° 42' 58.87367"S	0.108	Ajustado
	Altura da elipse	1061.138	0.065	Ajustado
	Descrição	SOLAR		
0003	Long	47° 50' 46.79001"W	0.024	Ajustado
	Lat	15° 43' 27.40874"S	0.042	Ajustado
	Altura da elipse	1018.861	0.070	Ajustado
	Descrição	SOLAR		
0008	Long	47° 50' 26.13433"W	0.028	Ajustado
	Lat	15° 43' 21.37514"S	0.045	Ajustado
	Altura da elipse	1084.279	0.069	Ajustado
	Descrição	SOLAR		
0010	Long	47° 50' 18.69711"W	0.029	Ajustado
	Lat	15° 43' 22.18399"S	0.051	Ajustado
	Altura da elipse	1093.144	0.063	Ajustado
	Descrição	SOLAR		
0019	Long	47° 49' 59.26567"W	0.021	Ajustado
	Lat	15° 44' 14.61320"S	0.036	Ajustado
	Altura da elipse	1009.352	0.070	Ajustado
	Descrição	SOLAR		
0021	Long	47° 49' 53.40627"W	0.028	Ajustado
	Lat	15° 44' 18.91873"S	0.047	Ajustado
	Altura da elipse	1009.538	0.059	Ajustado
	Descrição	SOLAR		

Ficheiros

Nome	Hora de Início	Amostragem	Epocas	Tamanho (Kb)	Tipo
braz0651.17o	17/03/05 21:00:00	15	5760	6608	L1/L2 GPS/GLONASS
BSTATA17.065	17/03/06 08:40:00	15	293	99	L1 GPS
BSTATB17.065	17/03/06 10:01:45	15	232	84	L1 GPS
BSTATC17.065	17/03/06 11:27:00	15	232	84	L1 GPS
BSTATD17.065	17/03/06 12:58:00	15	220	87	L1 GPS
BSTATE17.065	17/03/06 14:18:00	15	245	95	L1 GPS
BSTATF17.065	17/03/06 16:53:00	15	225	81	L1 GPS
BSTATG17.065	17/03/06 17:59:45	15	204	83	L1 GPS

Ocupações

Local	Hora de Início	Intervalo de horas	Tipo	Ficheiro
BRAZ	5 março 2017 21:00:00.00	23:59:45.00	Static	braz0651.17o
0019	6 março 2017 08:40:00.00	01:13:00.00	Static	BSTATA17.065
0021	6 março 2017 10:01:45.00	00:57:45.00	Static	BSTATB17.065
0008	6 março 2017 11:27:00.00	00:57:45.00	Static	BSTATC17.065
0010	6 março 2017 12:58:00.00	00:54:45.00	Static	BSTATD17.065
0003	6 março 2017 14:18:00.00	01:01:00.00	Static	BSTATE17.065
0001	6 março 2017 16:53:00.00	00:56:00.00	Static	BSTATF17.065
0002	6 março 2017 17:59:45.00	00:50:45.00	Static	BSTATG17.065

Processos

Referência	Ficheiro de Referência	Móvel	Ficheiro Móvel	Modo	Núm
BRAZ	braz0651.17o	0002	BSTATG17.065	Static	1
BRAZ	braz0651.17o	0001	BSTATF17.065	Static	2
BRAZ	braz0651.17o	0003	BSTATE17.065	Static	3
BRAZ	braz0651.17o	0010	BSTATD17.065	Static	4
BRAZ	braz0651.17o	0008	BSTATC17.065	Static	5
BRAZ	braz0651.17o	0021	BSTATB17.065	Static	6
BRAZ	braz0651.17o	0019	BSTATA17.065	Static	7

Vetores processados

Identificador de Vector	Vector	95%		Vector	95%	SV	PDOP	QA	Solução
	Comprimento	Erro		Componentes	Erro				
BRAZ - 0019 17/03/06 08:40:00.00 +01:13:00.00	23740.128	0.116	X	7750.636	0.047	9	1.6	No	Fixo
			Y	-1421.078	0.047				
			Z	22394.237	0.047				
BRAZ - 0021 17/03/06 10:01:45.00 +00:57:45.00	23646.519	0.115	X	7855.964	0.047	9	1.7	No	Fixo
			Y	-1277.483	0.047				
			Z	22266.785	0.046				
BRAZ - 0008 17/03/06 11:27:00.00 +00:57:45.00	25206.260	0.124	X	7503.862	0.050	9	1.6	No	Fixo
			Y	-2340.461	0.050				
			Z	23949.319	0.050				
BRAZ - 0010 17/03/06 12:58:00.00 +00:54:45.00	25217.771	0.123	X	7669.229	0.050	10	1.6	No	Fixo
			Y	-2193.144	0.050				
			Z	23922.980	0.049				
BRAZ - 0003 17/03/06 14:18:00.00 +01:01:00.00	24932.415	0.122	X	6971.902	0.049	10	1.7	No	Fixo
			Y	-2669.325	0.049				
			Z	23788.498	0.049				
BRAZ - 0001 17/03/06 16:53:00.00 +00:56:00.00	25516.722	0.125	X	6995.485	0.051	8	1.7	No	Fixo
			Y	-2929.449	0.051				
			Z	24363.592	0.051				
BRAZ - 0002 17/03/06 17:59:45.00 +00:50:45.00	25790.782	0.273	X	7095.393	0.112	10	1.9	No	Flutuar
			Y	-2933.035	0.111				
			Z	24621.478	0.109				

Vetores ajustados

Identificador de Vector	Vector	Resid.		Vector	Resid.	Tau	QA
	Comprimento			Componentes		Teste	
BRAZ - 0019 17/03/06 08:40:00.00	23740.128	0.000	X	7750.636	0.000		No
			Y	-1421.078	0.000		
			Z	22394.237	0.000		
BRAZ - 0021 17/03/06 10:01:45.00	23646.519	0.000	X	7855.964	0.000		No
			Y	-1277.483	0.000		
			Z	22266.785	0.000		
BRAZ - 0008 17/03/06 11:27:00.00	25206.260	0.000	X	7503.862	0.000		No
			Y	-2340.461	0.000		
			Z	23949.319	0.000		
BRAZ - 0010 17/03/06 12:58:00.00	25217.771	0.000	X	7669.229	0.000		No
			Y	-2193.144	0.000		
			Z	23922.980	0.000		
BRAZ - 0003 17/03/06 14:18:00.00	24932.415	0.000	X	6971.902	0.000		No
			Y	-2669.325	0.000		
			Z	23788.498	0.000		
BRAZ - 0001 17/03/06 16:53:00.00	25516.722	0.000	X	6995.485	0.000		No
			Y	-2929.449	0.000		
			Z	24363.592	0.000		
BRAZ - 0002 17/03/06 17:59:45.00	25790.782	0.000	X	7095.393	0.000		No
			Y	-2933.035	0.000		
			Z	24621.478	0.000		

- Pontos de controle inseridos em arquivo texto (*.txt), inserido no processamento do *Agisoft Photoscan*:

Nome	Descrição	Long	Lat	Altura da elipse
1	TAQUARI	-47,8477959611	-15,7187674222	1063,897
2	TAQUARI	-47,8471274889	-15,7163537972	1061,138
3	TAQUARI	-47,8463305583	-15,7242802056	1018,861
4	TAQUARI	-47,8445820111	-15,7215988667	1033,170
5	TAQUARI	-47,8410567694	-15,7199854889	1076,071
6	TAQUARI	-47,8391135778	-15,7182075972	1086,524
7	TAQUARI	-47,8432232222	-15,7277391389	1013,413
8	TAQUARI	-47,8405928694	-15,7226042056	1084,279
9	TAQUARI	-47,8387885139	-15,7212947806	1090,514
10	TAQUARI	-47,8385269750	-15,7228288861	1093,144
11	TAQUARI	-47,8394020083	-15,7319827194	1004,449
13	TAQUARI	-47,8357048472	-15,7248892333	1093,354
14	TAQUARI	-47,8342184778	-15,7229535500	1100,172
15	TAQUARI	-47,8303538444	-15,7269994556	1079,552
16	TAQUARI	-47,8339937639	-15,7282877583	1078,257
17	TAQUARI	-47,8371931556	-15,7339185722	1000,807
18	TAQUARI	-47,8336934722	-15,7330217361	1055,073
19	TAQUARI	-47,8331293528	-15,7373925556	1009,352
21	TAQUARI	-47,8315017417	-15,7385885361	1009,538

A.3 – AEROLEVANTAMENTO REALIZADO EM LUZIANIA-GO (30 SET. 2016)

- Dados do plano de voo 1.

horário preparação	08h20				
duração preparação	00h43				
horário decolagem	09h03	horário das fotos	09h09 ~ 09h25	tempo subida RPA	6 min
horário pouso	09h31			tempo descida RPA	6 min
duração do voo	00h28				
saldo de bateria	30%				
número de fotos	386				
rendimento fotos/min	13,78571				

- Dados do plano de voo 2.

horário preparação	09h31				
duração preparação	00h09				
horário decolagem	09h40	horário das fotos	09h46 ~ 10h04	tempo subida RPA	6 min
horário pouso	10h09			tempo descida RPA	5 min
duração	00h31				
saldo de bateria	27%				
número de fotos	406				
rendimento fotos/min	13,09				

- Dados do plano de voo 3.

horário preparação	10h09				
duração preparação	00h11				
horário decolagem	10h20	horário das fotos	10h26 ~ 10h45	tempo subida RPA	6 min
horário pouso	10h50			tempo descida RPA	5 min
duração	00h30				
saldo de bateria	33%				
número de fotos	383				
rendimento fotos/min	12,77				

- Dados do plano de voo 4.

horário preparação	10h50				
duração preparação	00h12				
horário decolagem	11h02	horário das fotos	11h10 ~ 11h30	tempo subida RPA	8 min
horário pouso	11h34			tempo descida RPA	4 min
duração	00h32				
saldo de bateria	18%				
número de fotos	365				
rendimento fotos/min	11,41				

- Dados do plano de voo 5.

horário preparação	11h34				
duração preparação	00h12				
horário decolagem	11h46	horário das fotos	11h53 ~ 12h08	tempo subida RPA	7 min
horário pouso	12h10			tempo descida RPA	2 min
duração	00h24				
saldo de bateria	14%				
número de fotos	284				
rendimento fotos/min	11,83				

- Dados do plano de voo 6.1.

horário preparação	12h10				
duração preparação	00h13				
horário decolagem	12h23	horário das fotos	12h31 ~ 12h46	tempo subida RPA	8 min
horário pouso	12h49			tempo descida RPA	5 min
duração	00h26				
saldo de bateria	11%				
número de fotos	250				
rendimento fotos/min	9,62				

- Dados do plano de voo 6.2.

horário preparação	12h49				
duração preparação	00h14				
horário decolagem	13h03	horário das fotos	13h07 ~ 13h21	tempo subida RPA	4 min
horário pouso	13h24			tempo descida RPA	3 min
duração	00h21				
saldo de bateria	37%				
número de fotos	248				
rendimento fotos/min	11,80				

- Dados do plano de voo 7.

horário preparação	13h24				
duração preparação	00h06				
horário decolagem	13h30	horário das fotos	13h34 ~ 13h49	tempo subida RPA	4 min
horário pouso	13h52			tempo descida RPA	3 min
duração	00h22				
saldo de bateria	37%				
número de fotos	246				
rendimento fotos/min	11,18				

A.4 – RELATÓRIOS GERADOS NO PROCESSAMENTO DOS DADOS OBTIDOS PELO RPA

- Tentativa 1 – Voos transversais (RPA asa-fixada)

Voos Transversais - Tentativa 1

Processing Report
19 February 2019



Survey Data

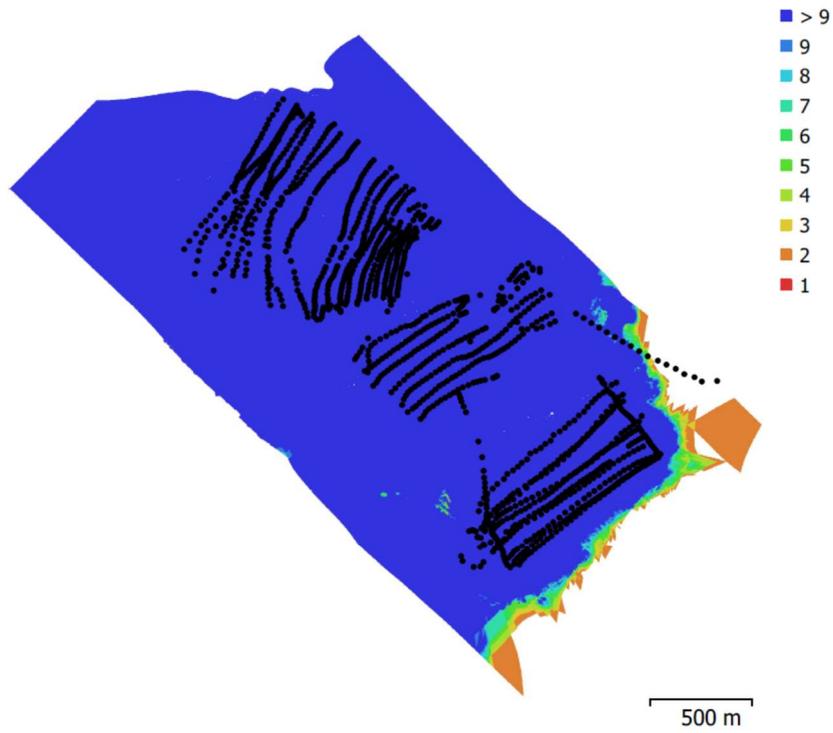


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	1,486	Camera stations:	1,483
Flying altitude:	225 m	Tie points:	1,640,590
Ground resolution:	8.44 cm/pix	Projections:	5,210,706
Coverage area:	5.31 km ²	Reprojection error:	153 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
Canon PowerShot S100 (5.2mm)	4000 x 3000	5.2 mm	1.86 x 1.86 μm	No

Table 1. Cameras.

Camera Calibration

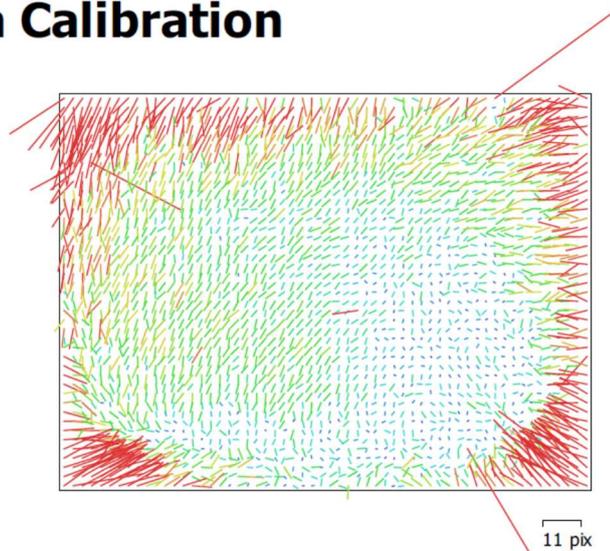


Fig. 2. Image residuals for Canon PowerShot S100 (5.2mm).

Canon PowerShot S100 (5.2mm)

1486 images

Type **Frame** Resolution **4000 x 3000** Focal Length **5.2 mm** Pixel Size **1.86 x 1.86 μ m**

	Value	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	K3	K4	P1	P2
F	2993.08	0.32	1.00	0.26	-0.69	0.16	0.03	-0.01	0.09	-0.09	0.10	0.22	-0.25
Cx	-130.014	0.11		1.00	-0.19	0.17	0.51	0.06	-0.01	0.00	0.00	0.41	-0.09
Cy	-314.326	0.17			1.00	-0.45	0.10	-0.08	-0.01	0.02	-0.03	-0.17	0.52
B1	-50.6326	0.023				1.00	0.06	0.02	-0.02	0.01	-0.00	0.08	0.11
B2	-59.4305	0.024					1.00	-0.02	-0.00	0.01	-0.01	-0.14	0.16
K1	-0.128709	0.00017						1.00	-0.94	0.89	-0.84	0.11	-0.14
K2	0.0909989	0.00087							1.00	-0.99	0.95	-0.00	-0.01
K3	-0.103714	0.0018								1.00	-0.99	-0.00	0.02
K4	0.0369219	0.0012									1.00	0.01	-0.02
P1	-0.00254963	6.2e-06										1.00	-0.21
P2	-0.013593	9.6e-06											1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

Ground Control Points

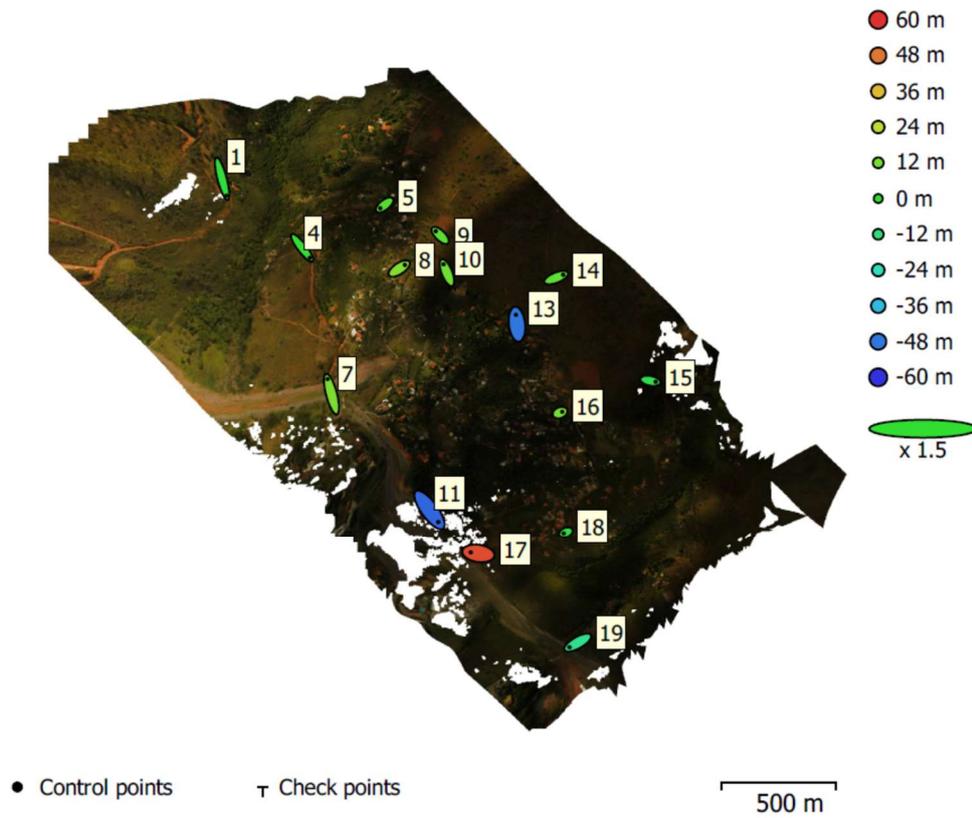


Fig. 3. GCP locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.
 Estimated GCP locations are marked with a dot or crossing.

Count	X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	XY error (m)	Total (m)
15	32.3714	47.6607	24.5951	57.6147	62.6448

Table 3. Control points RMSE.

X - Longitude, Y - Latitude, Z - Altitude.

Label	X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	Total (m)	Image (pix)
1	25.9937	-98.6613	-1.80127	102.044	19.883 (32)
4	45.188	-58.9089	0.981477	74.2508	30.305 (45)
5	-24.7549	-19.5507	6.56209	32.2195	11.991 (28)
7	-23.0964	88.176	13.0631	92.082	35.858 (46)
8	32.6072	21.7154	14.4137	41.7438	16.926 (28)
9	-25.3072	24.9211	7.43183	36.287	230.907 (23)
10	-19.3352	49.3805	10.8533	54.1301	21.589 (26)
11	50.8887	-70.3866	-50.9266	100.685	81.355 (24)
13	-6.09964	55.4117	-47.9698	73.5443	187.186 (28)
14	40.9412	16.5349	8.1776	44.905	90.805 (14)
15	31.1131	-5.97602	-4.53404	32.0046	8.052 (14)
16	13.0146	5.1813	11.7596	18.2897	11.610 (3)
17	-43.5449	6.39258	55.472	70.8107	64.691 (13)
18	-12.5306	-5.60637	-3.29485	14.1175	27.493 (36)
19	-47.7869	-27.3406	-16.3319	57.4267	13.296 (29)
Total	32.3714	47.6607	24.5951	62.6448	83.420

Table 4. Control points.
X - Longitude, Y - Latitude, Z - Altitude.

Digital Elevation Model

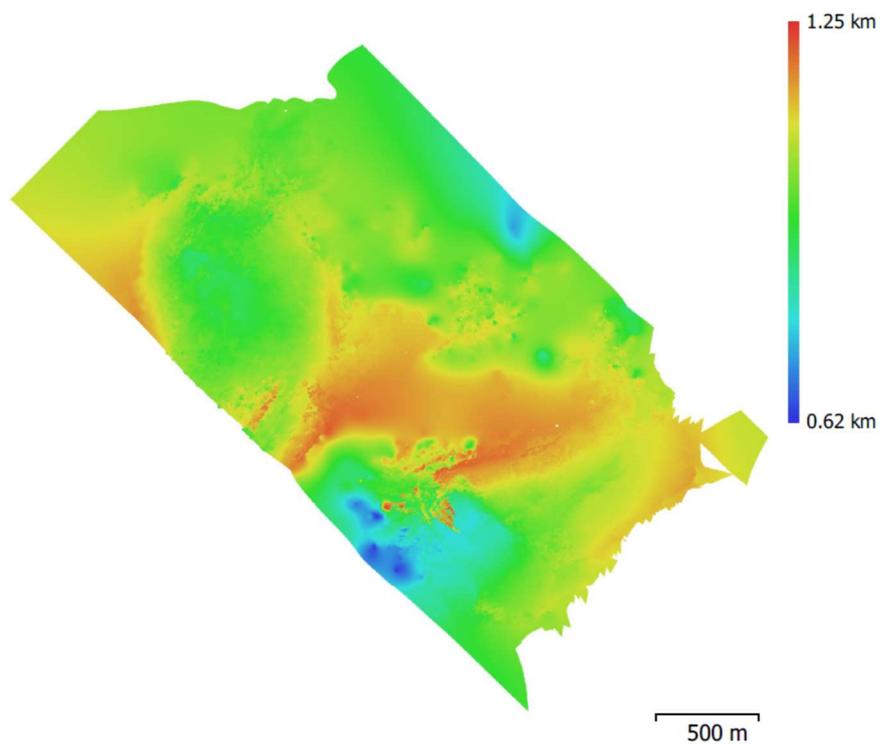


Fig. 4. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 16.9 cm/pix
Point density: 35.1 points/m²

Processing Parameters

General	
Cameras	1486
Aligned cameras	1483
Markers	19
Coordinate system	WGS 84 (EPSG::4326)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll
Point Cloud	
Points	1,640,590 of 1,780,243
Point colors	3 bands, uint8
RMS reprojection error	17.0163 (153.177 pix)
Max reprojection error	18439.9 (314335 pix)
Mean key point size	5.04924 pix
Effective overlap	3.17821
Alignment parameters	
Accuracy	Highest
Generic preselection	No
Reference preselection	Yes
Key point limit	80,000
Tie point limit	4,000
Adaptive camera model fitting	Yes
Matching time	1 days 11 hours
Alignment time	47 minutes 42 seconds
Optimization parameters	
Parameters	f, b1, b2, cx, cy, k1-k3, p1, p2
Adaptive camera model fitting	No
Optimization time	5 minutes 3 seconds
Dense Point Cloud	
Points	85,491,954
Point colors	3 bands, uint8
Reconstruction parameters	
Quality	High
Depth filtering	Aggressive
Depth maps generation time	10 hours 49 minutes
Dense cloud generation time	17 hours 29 minutes
Model	
Faces	17,083,863
Vertices	8,543,608
Vertex colors	3 bands, uint8
Texture	4,096 x 4,096, 4 bands, uint8
Reconstruction parameters	
Surface type	Height field
Source data	Dense
Interpolation	Enabled
Quality	High
Depth filtering	Aggressive
Face count	17,097,762
Processing time	19 minutes 51 seconds
Texturing parameters	
Mapping mode	Orthophoto
Blending mode	Mosaic
Texture size	4,096 x 4,096
Enable hole filling	Yes
Enable ghosting filter	Yes
UV mapping time	4 minutes 16 seconds
Blending time	4 hours 37 minutes
DEM	
Size	23,659 x 23,641
Coordinate system	WGS 84 (EPSG::4326)
Reconstruction parameters	
Source data	Dense cloud
Interpolation	Enabled
Processing time	4 minutes 8 seconds
Orthomosaic	
Size	43,768 x 38,807
Coordinate system	WGS 84 (EPSG::4326)
Colors	3 bands, uint8
Reconstruction parameters	
Blending mode	Mosaic
Surface	DEM
Enable hole filling	Yes
Processing time	1 hours 12 minutes
Software	
Version	1.4.1 build 5925
Platform	Windows 64

- Tentativa 2 – Voos transversais (RPA asa-fixa)

Voos Transversais - Tentativa 2

Processing Report
26 February 2019



Survey Data

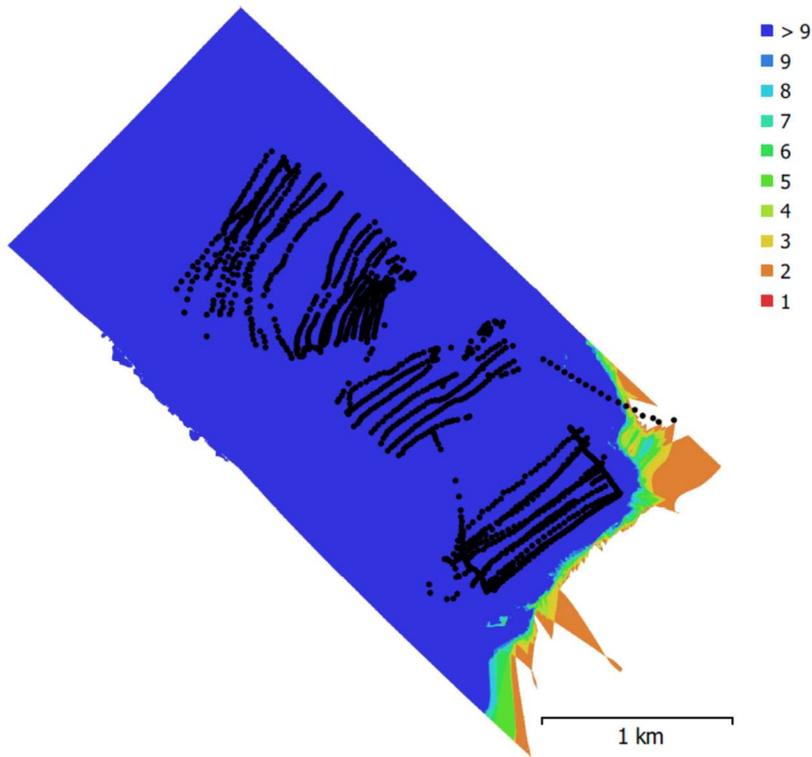


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	1,486	Camera stations:	1,483
Flying altitude:	238 m	Tie points:	1,640,590
Ground resolution:	8.48 cm/pix	Projections:	5,210,706
Coverage area:	6.18 km ²	Reprojection error:	45.1 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
Canon PowerShot S100 (5.2mm)	4000 x 3000	5.2 mm	1.86 x 1.86 μm	No

Table 1. Cameras.

Camera Calibration

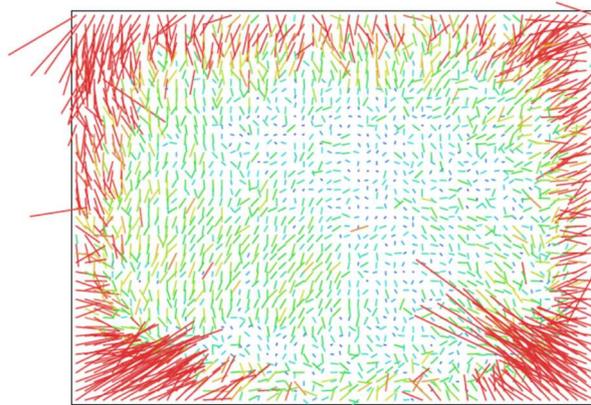


Fig. 2. Image residuals for Canon PowerShot S100 (5.2mm).

Canon PowerShot S100 (5.2mm)

1486 images

Type Resolution Focal Length Pixel Size
Frame 4000 x 3000 5.2 mm 1.86 x 1.86 μ m

	Value	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	K3	K4	P1	P2
F	3109.88	0.32	1.00	0.26	-0.69	0.16	0.03	-0.01	0.09	-0.09	0.10	0.22	-0.25
Cx	-125.593	0.11		1.00	-0.19	0.17	0.51	0.06	-0.01	0.00	0.00	0.41	-0.09
Cy	-403.127	0.17			1.00	-0.45	0.10	-0.08	-0.01	0.02	-0.03	-0.17	0.52
B1	-47.4504	0.023				1.00	0.06	0.02	-0.02	0.01	-0.00	0.08	0.11
B2	-59.1976	0.024					1.00	-0.02	-0.00	0.01	-0.01	-0.14	0.16
K1	-0.145878	0.00017						1.00	-0.94	0.89	-0.84	0.11	-0.14
K2	0.105758	0.00087							1.00	-0.99	0.95	-0.00	-0.01
K3	-0.118951	0.0018								1.00	-0.99	-0.00	0.02
K4	0.0369219	0.0012									1.00	0.01	-0.02
P1	-0.00203546	6.2e-06										1.00	-0.21
P2	-0.0107546	9.6e-06											1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

Ground Control Points

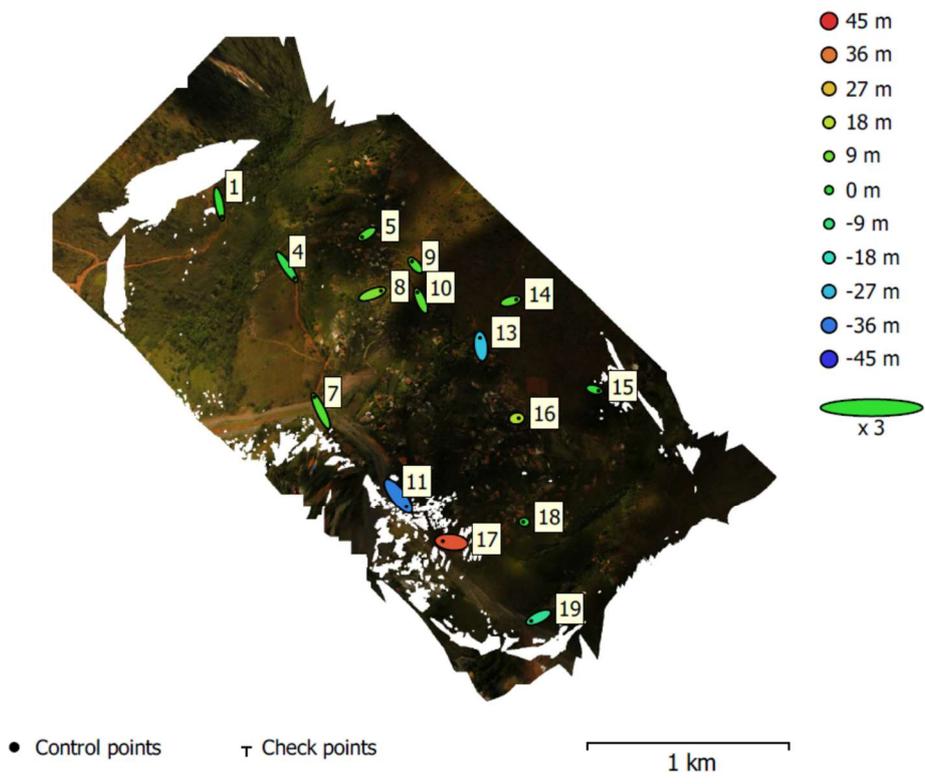


Fig. 3. GCP locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape. Estimated GCP locations are marked with a dot or crossing.

Count	X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	XY error (m)	Total (m)
15	18.6327	23.9964	16.7438	30.3809	34.6894

Table 3. Control points RMSE.

X - Longitude, Y - Latitude, Z - Altitude.

Label	X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	Total (m)	Image (pix)
1	8.5265	-42.1798	-0.0984442	43.0331	19.047 (32)
4	25.0062	-37.2402	-3.36156	44.9827	33.323 (45)
5	-15.8378	-10.3102	4.03146	19.3233	9.806 (28)
7	-21.4572	45.9925	4.24603	50.9288	28.311 (46)
8	28.4344	10.7883	10.0199	32.0203	18.735 (28)
9	-11.1737	13.0848	3.26517	17.5136	203.409 (23)
10	-11.4848	27.6648	5.04848	30.3764	19.078 (26)
11	27.0652	-35.4917	-34.8557	56.6313	52.741 (24)
13	-3.09298	27.3062	-26.0553	37.8692	102.582 (28)
14	18.7324	5.05185	5.56079	20.1828	69.343 (14)
15	13.6344	-3.71602	-0.97451	14.1652	5.764 (14)
16	6.51222	0.984999	16.7897	18.0354	10.443 (3)
17	-28.4178	3.28341	40.5903	49.6581	54.758 (13)
18	-3.2178	0.291119	-1.78212	3.68984	26.345 (36)
19	-24.3699	-11.8497	-12.8407	29.9865	15.466 (29)
Total	18.6327	23.9964	16.7438	34.6894	63.580

Table 4. Control points.
X - Longitude, Y - Latitude, Z - Altitude.

Digital Elevation Model

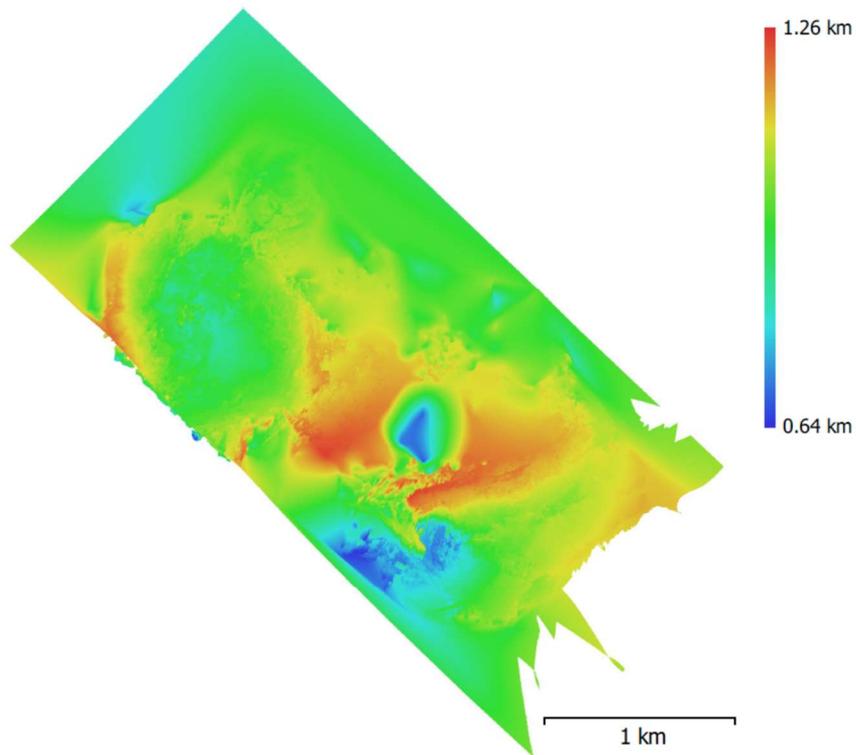


Fig. 4. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 8.48 cm/pix
Point density: 139 points/m²

Processing Parameters

General	
Cameras	1486
Aligned cameras	1483
Markers	19
Coordinate system	WGS 84 (EPSG::4326)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll
Point Cloud	
Points	1,640,590 of 1,780,243
Point colors	3 bands, uint8
RMS reprojection error	12.4377 (45.0766 pix)
Max reprojection error	5593.83 (31206.8 pix)
Mean key point size	5.04924 pix
Effective overlap	3.17821
Alignment parameters	
Accuracy	Highest
Generic preselection	No
Reference preselection	Yes
Key point limit	80,000
Tie point limit	4,000
Adaptive camera model fitting	Yes
Matching time	1 days 11 hours
Alignment time	47 minutes 42 seconds
Optimization parameters	
Parameters	f, b1, b2, cx, cy, k1-k3, p1, p2
Adaptive camera model fitting	No
Optimization time	4 minutes 54 seconds
Dense Point Cloud	
Points	333,314,406
Point colors	3 bands, uint8
Reconstruction parameters	
Quality	Ultra High
Depth filtering	Aggressive
Depth maps generation time	1 days 23 hours
Dense cloud generation time	2 days 10 hours
Model	
Faces	66,639,935
Vertices	33,322,973
Vertex colors	3 bands, uint8
Texture	4,096 x 4,096, 4 bands, uint8
Reconstruction parameters	
Surface type	Height field
Source data	Dense
Interpolation	Enabled
Quality	Ultra High
Depth filtering	Aggressive
Face count	66,661,705
Processing time	2 hours 39 minutes
Texturing parameters	
Mapping mode	Orthophoto
Blending mode	Mosaic
Texture size	4,096 x 4,096
Enable hole filling	Yes
Enable ghosting filter	Yes
UV mapping time	22 minutes 0 seconds
Blending time	23 hours 49 minutes
DEM	
Size	47,974 x 47,684
Coordinate system	WGS 84 (EPSG::4326)
Reconstruction parameters	
Source data	Mesh
Interpolation	Enabled
Processing time	14 minutes 49 seconds
Orthomosaic	
Size	44,349 x 46,942
Coordinate system	WGS 84 (EPSG::4326)
Colors	3 bands, uint8
Reconstruction parameters	
Blending mode	Mosaic
Surface	DEM
Enable hole filling	Yes
Processing time	1 hours 55 minutes
Software	
Version	1.4.1 build 5925
Platform	Windows 64

- Tentativa voos longitudinais (RPA asa-fixa)

Voos Longitudinais

Processing Report
29 March 2019



Survey Data

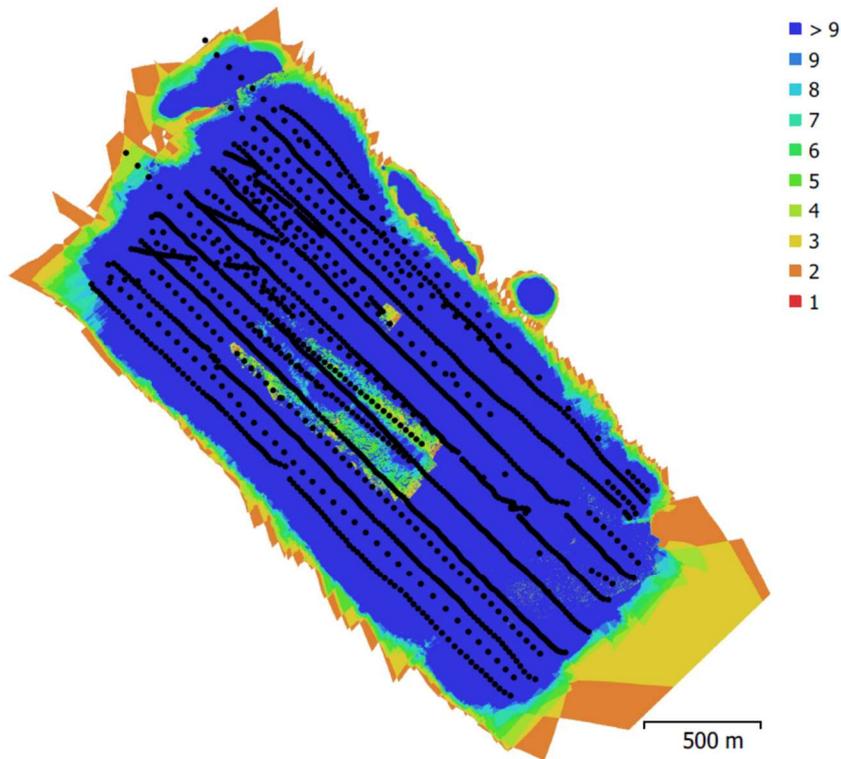


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	1,768	Camera stations:	1,755
Flying altitude:	234 m	Tie points:	1,659,229
Ground resolution:	7.25 cm/pix	Projections:	6,342,022
Coverage area:	4.84 km ²	Reprojection error:	4.35 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
Canon PowerShot S100 (5.2mm)	4000 x 3000	5.2 mm	1.86 x 1.86 μm	No

Table 1. Cameras.

Camera Calibration

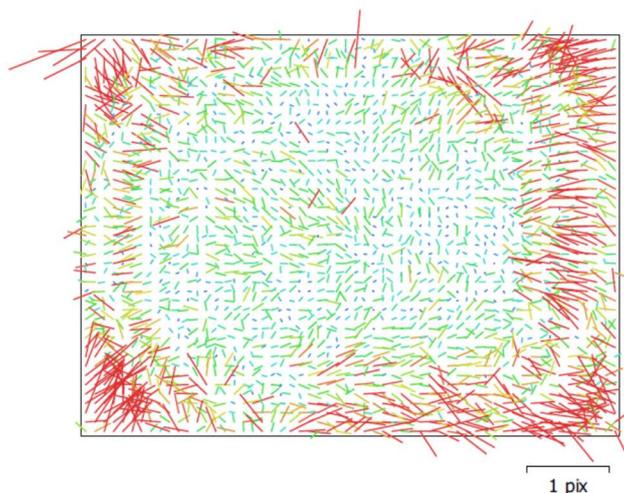


Fig. 2. Image residuals for Canon PowerShot S100 (5.2mm).

Canon PowerShot S100 (5.2mm)

1768 images

Type	Resolution	Focal Length	Pixel Size
Frame	4000 x 3000	5.2 mm	1.86 x 1.86 μm

	Value	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	K3	K4	P1	P2
F	2947.21	0.14	1.00	-0.00	-0.16	-0.05	-0.02	-0.05	0.12	-0.12	0.13	0.01	0.08
Cx	42.5976	0.15		1.00	0.08	0.09	0.42	0.03	-0.05	0.06	-0.08	0.93	0.10
Cy	30.8883	0.17			1.00	-0.37	0.13	-0.00	-0.03	0.04	-0.05	0.09	0.89
B1	-12.2385	0.024				1.00	0.04	0.01	-0.01	0.00	0.00	0.09	-0.24
B2	-18.978	0.026					1.00	0.01	-0.02	0.03	-0.04	0.30	0.14
K1	-0.0495354	7.8e-05						1.00	-0.95	0.89	-0.84	0.04	-0.02
K2	0.0317976	0.00039							1.00	-0.98	0.95	-0.05	-0.02
K3	-0.0585785	0.00077								1.00	-0.99	0.06	0.03
K4	0.0499529	0.00052									1.00	-0.07	-0.04
P1	0.0031038	9.7e-06										1.00	0.11
P2	0.00103245	1e-05											1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

Ground Control Points

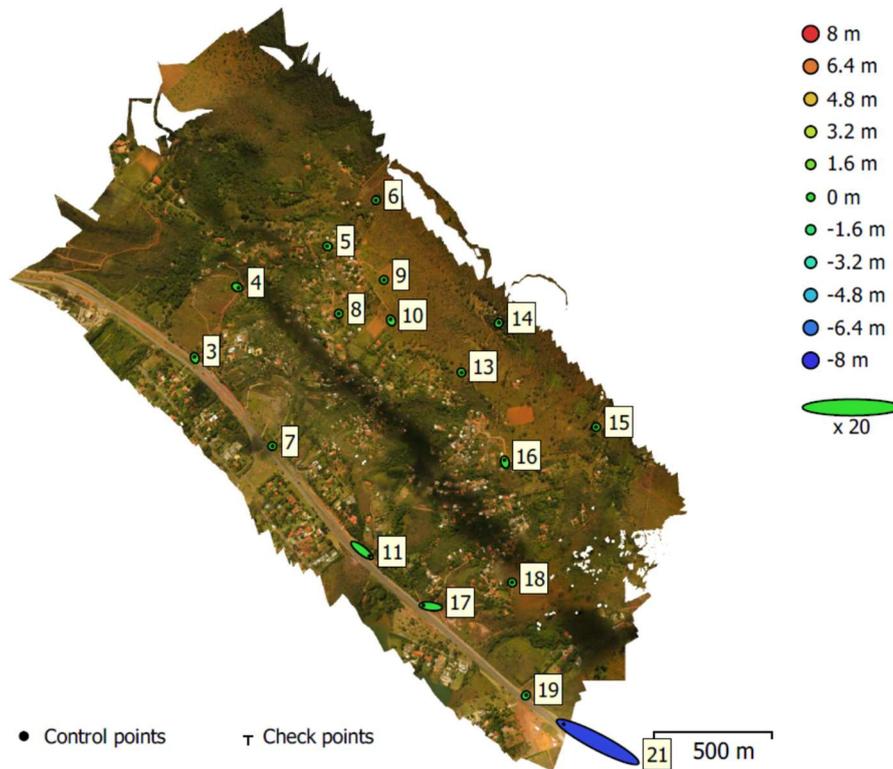


Fig. 3. GCP locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape. Estimated GCP locations are marked with a dot or crossing.

Count	X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	XY error (m)	Total (m)
17	3.6714	1.96461	1.84723	4.164	4.55534

Table 3. Control points RMSE.
X - Longitude, Y - Latitude, Z - Altitude.

Label	X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	Total (m)	Image (pix)
3	-0.179841	0.507011	0.106035	0.548312	3.591 (33)
4	0.566413	-0.275332	-0.00157927	0.629789	14.163 (54)
5	-0.225881	0.0858139	-0.030369	0.243533	0.993 (36)
6	-0.0300353	-0.0583218	0.019146	0.0683383	1.813 (15)
7	0.0832087	0.0146101	-0.0245518	0.0879769	0.141 (4)
8	-0.0265118	0.0171175	-0.158	0.161121	1.759 (4)
9	0.0358082	-0.0119986	-0.103417	0.110096	3.527 (28)
10	-0.234511	0.490936	0.319117	0.630753	1.950 (20)
11	3.14196	-2.45685	-0.229992	3.99511	6.854 (26)
13	0.0512589	-0.107757	0.0296919	0.122966	0.753 (13)
14	0.107788	0.191948	-0.14532	0.26378	0.648 (7)
15	-0.0676104	0.00229691	0.0205457	0.0707005	28.665 (7)
16	-0.207313	0.85294	0.0746337	0.88094	1.236 (19)
17	-3.11197	0.398639	-0.235222	3.14621	3.847 (29)
18	-0.0562944	0.0602411	-0.160141	0.18012	0.629 (38)
19	0.158532	0.16289	0.00429806	0.227341	0.705 (18)
21	-14.4579	7.61763	-7.59577	18.021	0.000 (1)
Total	3.6714	1.96461	1.84723	4.55534	7.394

Table 4. Control points.
X - Longitude, Y - Latitude, Z - Altitude.

Digital Elevation Model

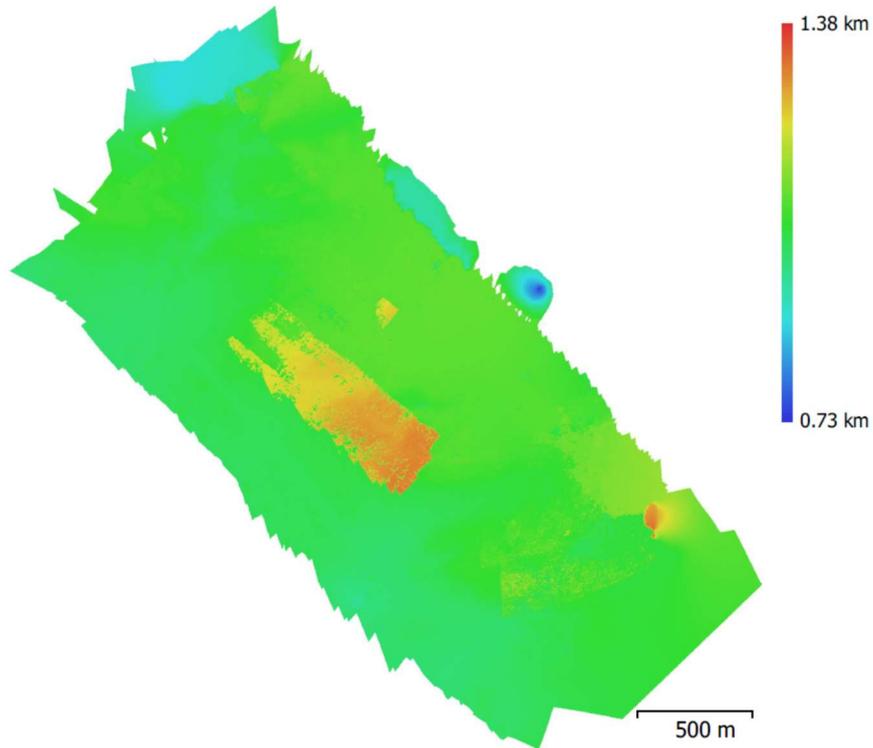


Fig. 4. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 14.5 cm/pix
Point density: 47.5 points/m²

Processing Parameters

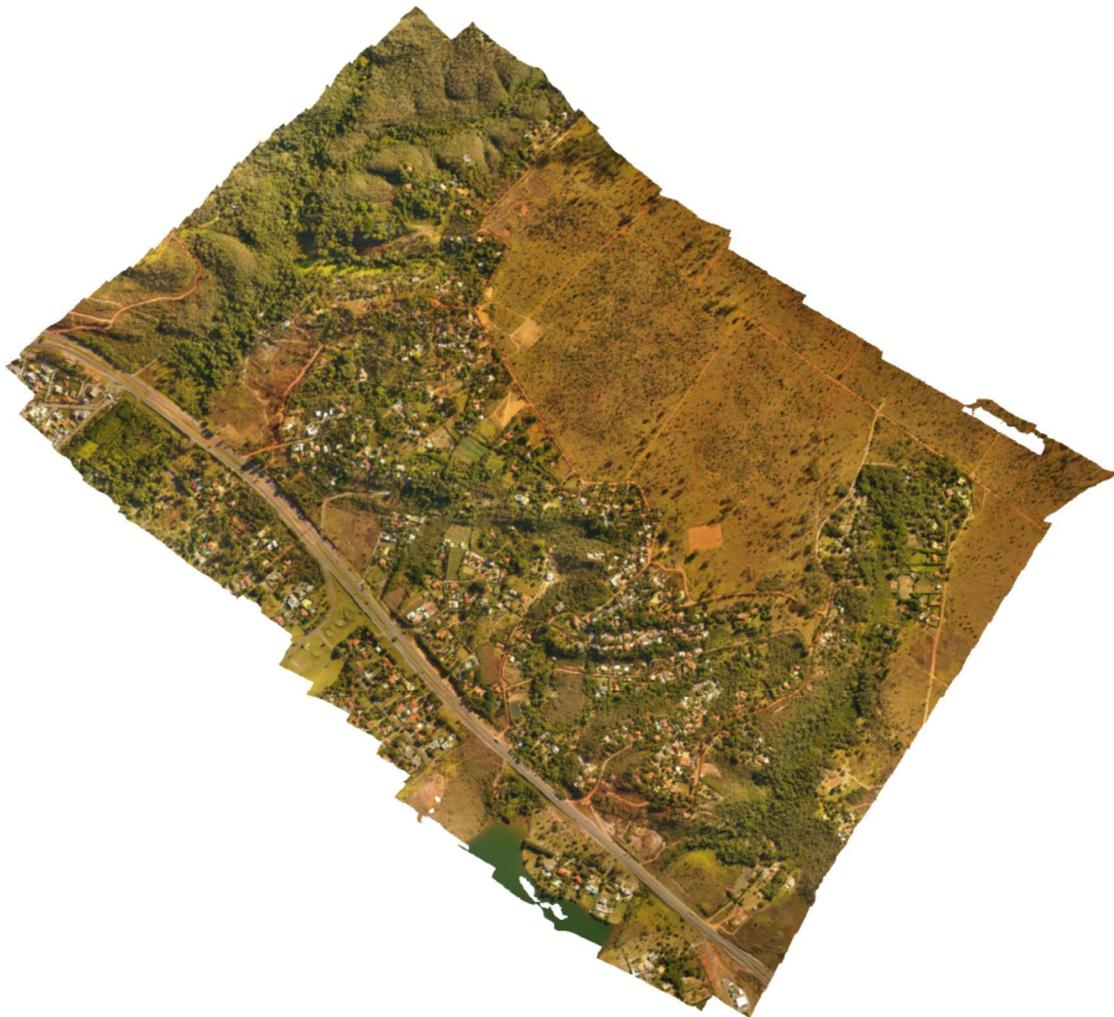
General	
Cameras	1768
Aligned cameras	1755
Markers	19
Coordinate system	WGS 84 (EPSG::4326)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll
Point Cloud	
Points	1,659,229 of 1,807,874
Point colors	3 bands, uint8
RMS reprojection error	1.32462 (4.35235 pix)
Max reprojection error	465.895 (2844.82 pix)
Mean key point size	3.94467 pix
Effective overlap	3.95375
Alignment parameters	
Accuracy	Highest
Generic preselection	No
Reference preselection	Yes
Key point limit	80,000
Tie point limit	4,000
Adaptive camera model fitting	Yes
Matching time	12 hours 44 minutes
Alignment time	1 hours 7 minutes
Optimization parameters	
Parameters	f, b1, b2, cx, cy, k1-k3, p1, p2
Adaptive camera model fitting	No
Optimization time	6 minutes 13 seconds
Dense Point Cloud	
Points	329,854,838
Point colors	3 bands, uint8
Reconstruction parameters	
Quality	High
Depth filtering	Aggressive
Depth maps generation time	23 hours 33 minutes
Dense cloud generation time	3 days 0 hours
Model	
Faces	65,693,385
Vertices	32,863,073
Vertex colors	3 bands, uint8
Texture	4,096 x 4,096, 4 bands, uint8
Reconstruction parameters	
Surface type	Height field
Source data	Dense
Interpolation	Enabled
Quality	High
Depth filtering	Aggressive
Face count	65,970,959
Processing time	22 minutes 47 seconds
Texturing parameters	
Mapping mode	Orthophoto
Blending mode	Mosaic
Texture size	4,096 x 4,096
Enable hole filling	Yes
Enable ghosting filter	Yes
UV mapping time	15 minutes 43 seconds
Blending time	12 hours 17 minutes
DEM	
Size	26,876 x 27,171
Coordinate system	WGS 84 (EPSG::4326)
Reconstruction parameters	
Source data	Dense cloud
Interpolation	Enabled
Processing time	5 minutes 49 seconds
Orthomosaic	
Size	45,416 x 45,254
Coordinate system	WGS 84 (EPSG::4326)
Colors	3 bands, uint8
Reconstruction parameters	
Blending mode	Mosaic
Surface	DEM
Enable hole filling	Yes
Processing time	1 hours 13 minutes
Software	
Version	1.4.1 build 5925
Platform	Windows 64

- Processamento voos realizados com RPA multirotor

Voos RPA multirotor

Processing Report

15 July 2019



Survey Data

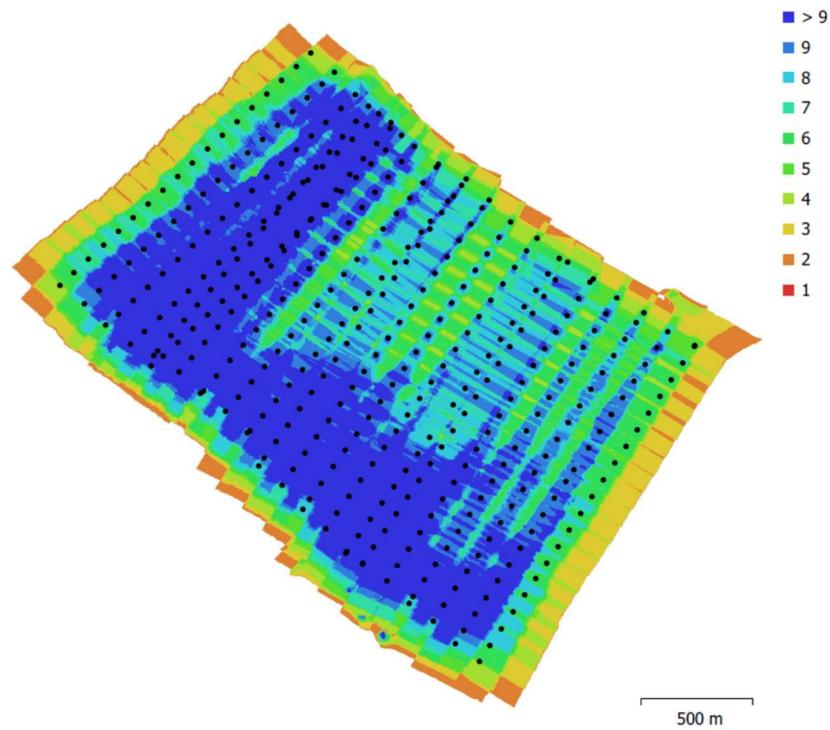


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	395	Camera stations:	395
Flying altitude:	243 m	Tie points:	455,493
Ground resolution:	9.5 cm/pix	Projections:	1,238,158
Coverage area:	5.12 km ²	Reprojection error:	0.991 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
FC330 (3.61mm)	4000 x 3000	3.61 mm	1.56 x 1.56 μm	No

Table 1. Cameras.

Camera Calibration

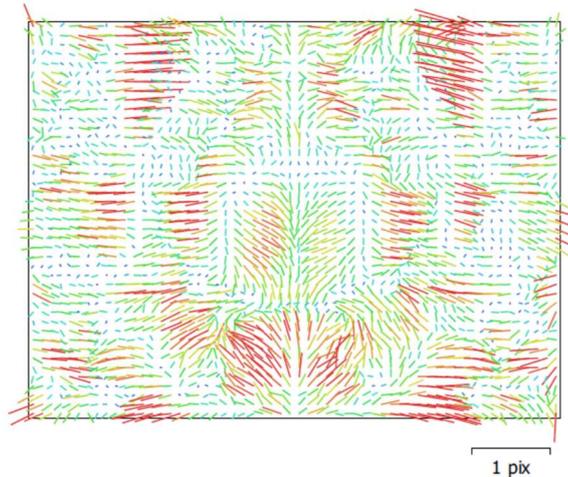


Fig. 2. Image residuals for FC330 (3.61mm).

FC330 (3.61mm)

395 images

Type Resolution Focal Length Pixel Size
Frame 4000 x 3000 3.61 mm 1.56 x 1.56 μ m

	Value	Error	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
F	2199.96	1.4	1.00	-0.41	0.15	0.03	-0.35	0.42	-0.06	0.14
Cx	-10.7215	0.037		1.00	-0.02	-0.02	0.15	-0.18	0.26	-0.07
Cy	-4.17464	0.031			1.00	-0.01	-0.04	0.05	-0.00	0.23
K1	-0.000156259	2.9e-005				1.00	-0.67	0.62	-0.07	0.02
K2	-0.00563906	4e-005					1.00	-0.98	0.03	-0.05
K3	0.0025054	2.2e-005						1.00	-0.04	0.06
P1	-0.000270626	1.7e-006							1.00	-0.05
P2	0.000380096	1.8e-006								1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

Camera Locations

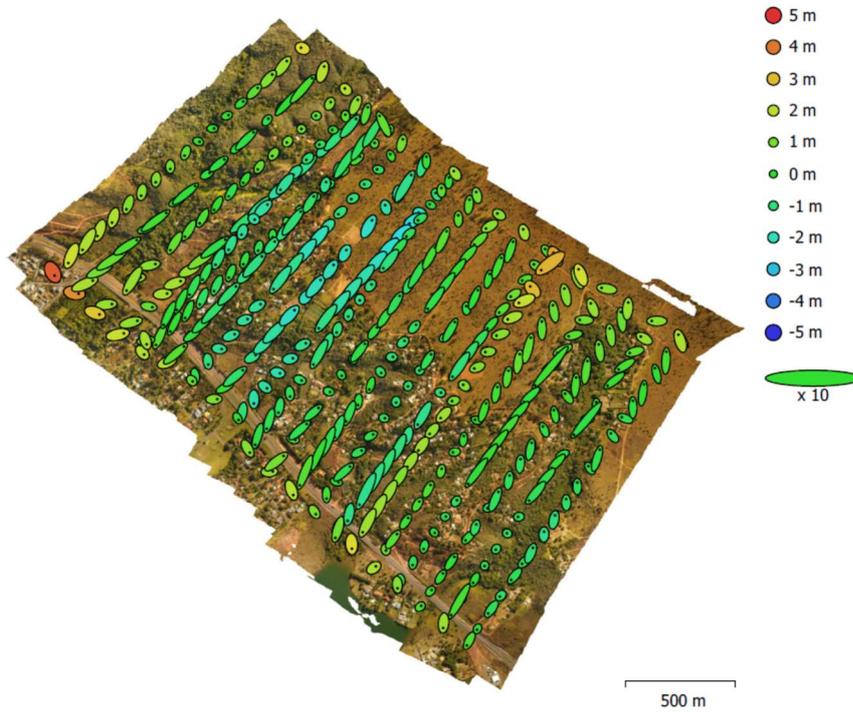


Fig. 3. Camera locations and error estimates.
 Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.
 Estimated camera locations are marked with a black dot.

X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	XY error (m)	Total error (m)
3.67458	4.96124	1.10023	6.17385	6.27112

Table 3. Average camera location error.
 X - Longitude, Y - Latitude, Z - Altitude.

Digital Elevation Model

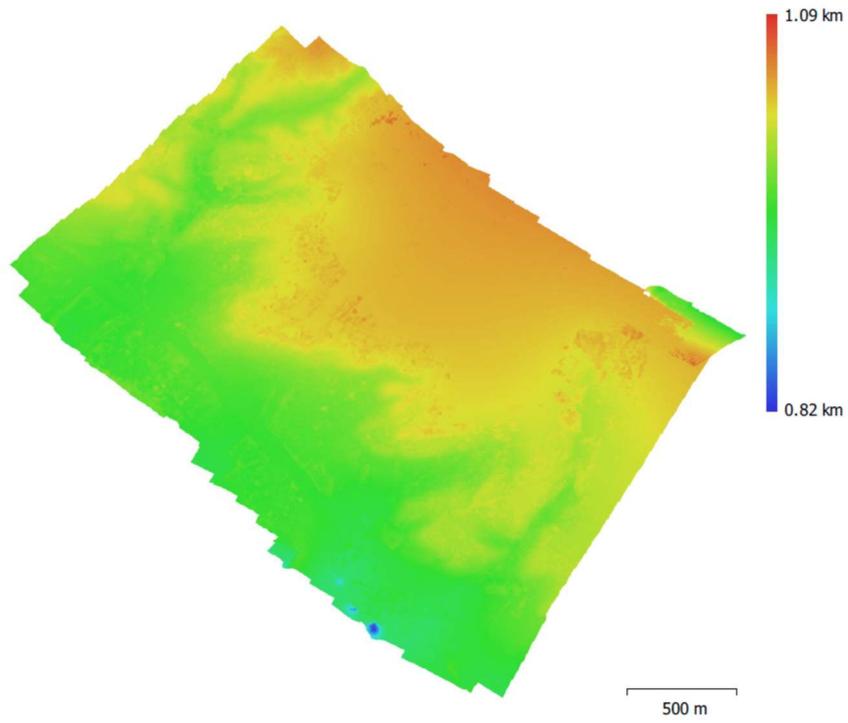


Fig. 4. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 19 cm/pix
Point density: 27.7 points/m²

Processing Parameters

General	
Cameras	395
Aligned cameras	395
Coordinate system	WGS 84 (EPSG::4326)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll
Point Cloud	
Points	455,493 of 491,548
RMS reprojection error	0.17623 (0.990777 pix)
Max reprojection error	0.728082 (37.156 pix)
Mean key point size	4.24595 pix
Point colors	3 bands, uint8
Key points	No
Average tie point multiplicity	2.87526
Alignment parameters	
Accuracy	High
Generic preselection	No
Reference preselection	Yes
Key point limit	40,000
Tie point limit	4,000
Adaptive camera model fitting	No
Matching time	40 minutes 49 seconds
Alignment time	3 minutes 53 seconds
Optimization parameters	
Parameters	f, cx, cy, k1-k3, p1, p2
Adaptive camera model fitting	No
Optimization time	10 seconds
Depth Maps	
Count	395
Reconstruction parameters	
Quality	High
Filtering mode	Aggressive
Processing time	2 hours 44 minutes
Dense Point Cloud	
Points	185,023,169
Point colors	3 bands, uint8
Reconstruction parameters	
Quality	High
Depth filtering	Aggressive
Depth maps generation time	2 hours 44 minutes
Dense cloud generation time	19 minutes 56 seconds
Model	
Faces	36,792,899
Vertices	18,405,271
Vertex colors	3 bands, uint8
Texture	4,096 x 4,096, 4 bands, uint8
Reconstruction parameters	
Surface type	Height field
Source data	Dense
Interpolation	Enabled
Quality	High

General	
Depth filtering	Aggressive
Face count	37,004,633
Processing time	10 minutes 41 seconds
Texturing parameters	
Mapping mode	Orthophoto
Blending mode	Mosaic
Texture size	4,096 x 4,096
Enable hole filling	Yes
Enable ghosting filter	Yes
UV mapping time	6 minutes 36 seconds
Blending time	25 minutes 23 seconds
DEM	
Size	22,452 x 21,438
Coordinate system	WGS 84 (EPSG::4326)
Reconstruction parameters	
Source data	Dense cloud
Interpolation	Enabled
Processing time	2 minutes 5 seconds
Orthomosaic	
Size	35,379 x 32,434
Coordinate system	WGS 84 (EPSG::4326)
Colors	3 bands, uint8
Reconstruction parameters	
Blending mode	Mosaic
Surface	Mesh
Enable hole filling	Yes
Processing time	1 hours 37 minutes
Software	
Version	1.5.0 build 7492
Platform	Windows 64

APÊNDICE B – TABULAÇÕES CRUZADAS

Áreas de Proteção Permanente			
Regiões (km²)	Zona de Vida Silvestre	Zona de Ocupação Especial	
Expansão Itapoã	0	0	
Taquari Etapa 1 Tr3	0,5388	1,5197	
Taquari Etapa 1 Tr2	0,3567	2,2546	
Área do DER	0,0006	0,0052	
Setor Habitacional Região dos Lagos	0	0,0244	
Expansão Paranoá	0	0,3786	
Taquari Etapa2	3,2901	10,1355	
Total	4,1862	14,318	

Zoneamento PDOT			
Regiões (km²)	Região Urbana de Uso Controlado	Região Rural de Uso Controlado	
Expansão Itapoã	0	0,003	
Taquari Etapa 1 Tr3	1,8463	0,2122	
Taquari Etapa 1 Tr2	2,4645	0,1468	
Área do DER	0,0046	0	
Setor Habitacional Região dos Lagos	0,0813	0,0582	
Expansão Paranoá	0,3786	0	
Taquari Etapa2	13,3417	0,1094	
Total	18,117	0,5296	

Risco Erosão de Solos			
Regiões (km²)	Muito Baixo	Baixo	Muito Alto
Expansão Itapoã	0,1052	0,6648	0
Taquari Etapa 1 Tr3	0	1,5275	0,531
Taquari Etapa 1 Tr2	0	2,4543	0,157
Área do DER	0	0,2093	0,0571
Setor Habitacional Região dos Lagos	0	1,9071	0
Expansão Paranoá	0	0,3786	0
Taquari Etapa2	0,1396	10,9107	2,4206
Total	0,2448	18,0523	3,1657

Risco de perda de recarga de aquífero				
Regiões (km²)	Muito Baixo	Baixo	Médio	Alto
Expansão Itapoã	0	0	0	0,7699
Taquari Etapa 1 Tr3	0	0,3551	0,0062	1,1942
Taquari Etapa 1 Tr2	0	0,1397	0	2,4716
Área do DER	0	0	0	0,22
Setor Habitacional Região dos Lagos	0	0	0	1,9071
Expansão Paranoá	0	0	0	0,3786
Taquari Etapa2	0,0979	2,2739	0,0925	11,0066
Total	0,0979	2,7687	0,0987	17,948

Risco de Perda de Remanescente de Cerrado			
Regiões (km²)	▼ Baixo	▼ Médio	▼ Alto
Expansão Itapoã	0	0,0112	0,7586
Taquari Etapa 1 Tr3	0,4801	1,5784	0
Taquari Etapa 1 Tr2	0,0568	2,5545	0
Área do DER	0,699	0,1976	0
Setor Habitacional Região dos Lagos	0,0468	0,7514	1,1083
Expansão Paranoá	0,3786	0	0
Taquari Etapa2	1,4063	12,0587	0,0059
Total	3,0676	17,1518	1,8728

Uso e Cobertura ZEE						
Regiões (km²)	▼ Área Urbana	▼ Formações Florestais	▼ Formações Campestres	▼ Formações Savânicas	▼ Área Agrícola	▼ Reflorestamento
Expansão Itapoã	0,245	0	0,0292	0,471	0,0098	0,0142
Taquari Etapa 1 Tr3	1,2427	0,0396	0,4326	0,0212	0,3224	0
Taquari Etapa 1 Tr2	0,0004	0,0044	0	0,5154	2,0911	0
Área do DER	0,1825	0	0,0839	0	0	0
Setor Habitacional Região dos Lagos	1,0807	0	0,0052	0	0,1032	0,718
Expansão Paranoá	0,3786	0	0	0	0	0
Taquari Etapa2	0,9832	0,3296	1,5477	1,5175	0,4047	8,6828
Total	4,1131	0,3736	2,0986	2,5251	2,9312	9,415

Declividade							
Regiões (km²)	▼ Plano (0-3%)	▼ Suave Ondulado (3-8%)	▼ Moderado Ondulado (8-13%)	▼ Ondulado (13-20%)	▼ Forte Ondulado (20-45%)	▼ Montanhoso (45-75%)	▼ Escarpado (>75%)
Expansão Itapoã	0,5474	0,2219	0,0003	0,0001	0,0001	0	0
Taquari Etapa 1 Tr3	0,6909	0,6762	0,4511	0,173	0,0665	0,0007	0
Taquari Etapa 1 Tr2	0,2967	1,564	0,5568	0,1485	0,0424	0,0027	0,0002
Área do DER	0,2072	0,0523	0,0052	0	0,0004	0	0
Setor Habitacional Região dos Lagos	1,1194	0,7754	0,0076	0,0008	0,0007	0	0
Expansão Paranoá	0,0276	0,3483	0	0	0	0	0
Taquari Etapa2	2,1797	8,9659	1,0252	0,5465	0,6402	0,1047	0,0087
Total	5,0689	12,604	2,0462	0,6689	0,7503	0,1081	0,0089
Área Total	21,4553						
Regiões (%)	▼ Plano (0-3%)	▼ Suave Ondulado (3-8%)	▼ Moderado Ondulado (8-13%)	▼ Ondulado (13-20%)	▼ Forte Ondulado (20-45%)	▼ Montanhoso (45-75%)	▼ Escarpado (>75%)
Expansão Itapoã	2,551350948	1,034243287	0,001398256	0,000466085	0,000466085	0	0
Taquari Etapa 1 Tr3	3,220183358	3,151668818	2,102510802	0,806327574	0,309946726	0,003262597	0
Taquari Etapa 1 Tr2	1,382875094	7,289574138	2,595162967	0,692136675	0,197620168	0,012584303	0,000932171
Área do DER	0,965728748	0,243762613	0,024236436	0	0,001864341	0	0
Setor Habitacional Região dos Lagos	5,217358881	3,614025439	0,035422483	0,003728682	0,003262597	0	0
Expansão Paranoá	0,128639544	1,62337511	0	0	0	0	0
Taquari Etapa2	10,15926135	41,78874218	4,778306526	2,547156181	2,983878109	0,487991312	0,040549421
Total	23,62539792	58,74539158	9,537037469	4,049815197	3,497038028	0,503838212	0,041481592

APÊNDICE C – ROTINAS COMPUTACIONAIS

C.1 – PROGRAMAS EM LEGAL

- Programa para avaliação de suscetibilidade à erosão

```
//Tese de Doutorado - SILVA JUNIOR, E.E.A. (2019)
//Eleudo Esteves de Araujo Silva Junior
//codigo LEGAL para avaliacao de Suscetibilidade Erosao
{Tematico vsolo("Solos"),vsusct("Suscetibilidade_Erosao");
Numerico vdecl("Decli%");
vsolo = Recuperar (Nome="Solos_Simplificado");
vdecl = Recuperar (Nome="Declividade_5");
vsusct = Novo(Nome="Suscetibilidade_Erosao",ResX=5,ResY=5,Escala=25000);
vsusct = Atribua(CategoriaFim="Suscetibilidade_Erosao")
{
"Alta": vdecl > 15,
"Alta": vdecl < 15 && vdecl > 5 && vsolo.Classe == "Cb",
"Média": vdecl < 5 && vsolo.Classe == "Cb",
"Baixa": vdecl < 15 && vdecl > 5 && vsolo.Classe == "HI",
"Média": vdecl < 5 && vsolo.Classe == "HI",
"Média": vdecl < 15 && vdecl > 5 && vsolo.Classe == "LV",
"Média": vdecl < 15 && vdecl > 5 && vsolo.Classe == "LVa",
"Média": vsolo.Classe == "AQ",
"Baixa": vsolo.Classe == "LV" && vdecl < 5,
"Baixa": vsolo.Classe == "LVa" && vdecl < 5};
}
```

- **Programa para cálculo de temperatura de brilho de superfície do solo**

```
// cálculo de temperatura banda 11 OLI
// SILVA JUNIOR, E.E.A., SOUZA, N.M. (2015).
{
Imagem L11 ("landsat8");
Numerico TempK ("CAT_MNT"), TempC ("CAT_MNT");

L11 = Recuperar (Nome="L11-(OP1)");

TempK = Novo(Nome="T_K",ResX=30,ResY=30,Escala=25000,Min=0,Max=290);
TempC = Novo(Nome="T_C",ResX=30,ResY=30,Escala=25000,Min=0,Max=50);

K1 = 480.8883;
K2 = 1201.1442;

TempK = Numerico (K2/(log((K1/L11)+1))) ;
TempC = (TempK - 273) ;
}
```

- **Programa para avaliação da aptidão urbana**

```
//Tese de Doutorado - SILVA JUNIOR, E.E.A. (2019)
//Eleudo Esteves de Araujo Silva Junior
//codigo LEGAL para avaliacao de aptidao urbana
{Tematico vsolo("Pedologico"),vaptidao("Aptidao_urb_drena"), vdrena("Dist_Drena_T_2");
Numerico vdecl("Decli%");
vsolo = Recuperere (Nome="Pedologico_Terracap");
vdecl = Recuperere (Nome="Declividade_5");
vaptidao = Novo(Nome="Aptidao_Urbana_Drena_all",ResX=5,ResY=5,Escala=25000);
vdrena = Recuperere (Nome="Dist_Drena_Cod_Florestal");
vaptidao = Atribua(CategoriaFim="Aptidao_urb_drena")
{
"Nula": vdrena.Classe == "0 - 30m",
"Baixa": vdecl > 15 && vdrena.Classe == "30 - 100m",
"Baixa": vdecl < 15 && vdecl > 5 && vsolo.Classe == "CX" && vdrena.Classe == "30 -
100m",
"Média": vdecl < 5 && vsolo.Classe == "CX" && vdrena.Classe == "100 - 200m",
"Baixa": vdecl < 15 && vdecl > 5 && vsolo.Classe == "GX" && vdrena.Classe == "30 -
100m",
"Média": vdecl < 5 && vsolo.Classe == "GX" && vdrena.Classe == "100 - 200m",
"Média": vdecl < 15 && vdecl > 5 && vsolo.Classe == "LV" && vdrena.Classe == "100 -
200m",
"Média": vdecl < 15 && vdecl > 5 && vsolo.Classe == "LVA" && vdrena.Classe == "100 -
200m",
"Alta": vsolo.Classe == "LV" && vdecl < 5 && vdrena.Classe == ">500m",
"Alta": vsolo.Classe == "LVA" && vdecl < 5 && vdrena.Classe == ">500m"};
}
```

C.2 – PROGRAMAS EM GEE

- Programa para detecção de áreas construídas (NDBI e Bu)

```
//Tese de Doutorado - SILVA JUNIOR, E.E.A. (2019)
//Eleudo Esteves de Araujo Silva Junior
//Built up area com imagens Sentinel-2
//periodo - 2017 até 2019
//Declarando a variável com a geometria da poligonal
var taquari = ee.FeatureCollection('ft:1Hq0H9BVfxARoUorpGk6n4UMVposvKuuhYeP25x8E');
//Função do calculo do NDVI para o Sentinel 2////////////////////////////////////
var addNDVI = function(image) {
var ndvi = image.normalizedDifference(['B8', 'B4']).rename('NDVI');
return image.addBands(ndvi);
}
//Declarando a função de NDBI para o Sentinel-2////////////////////////////////////
var addNDBI = function(image) {
var ndbi = image.normalizedDifference(['B11', 'B8']).rename('NDBI');
return image.addBands(ndbi);
}
//Declarando a função de BU para o Sentinel-2////////////////////////////////////
var addBU = function(image) {
var BU = image.select('NDBI').subtract(image.select('NDVI')).rename('BU');
return image.addBands(BU);
}

//Aplicando máscara de nuvem
// Function to mask clouds using the Sentinel-2 QA band.////////////////////////////////////
function maskS2clouds(image) {
var qa = image.select('QA60')

// Bits 10 and 11 are clouds and cirrus, respectively.////////////////////////////////////
```

```

var cloudBitMask = 1 << 10;
var cirrusBitMask = 1 << 11;

// Both flags should be set to zero, indicating clear conditions.//////////
var mask = qa.bitwiseAnd(cloudBitMask).eq(0).and(
    qa.bitwiseAnd(cirrusBitMask).eq(0))

// Return the masked and scaled data, without the QA bands.//////////
return image.updateMask(mask).divide(10000)
    .select("B.*")
    .copyProperties(image, ["system:time_start"])
}

//Declarando uma coleção de imagens//////////

var sentinel = ee.ImageCollection ('COPERNICUS/S2')
    .filterDate('2017-01-01', '2019-05-24')
    .filterBounds(taquari)
    .filter(ee.Filter.lt('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', 10))
    .map(maskS2clouds)
    .map(addNDBI)
    .map(addNDVI)
    .map(addBU);

//Criando um mascara de selecao e corte de valores//////////
var BU = sentinel.select('BU').median();
var mascara = BU.gte(0);
var Construcao = BU.updateMask(mascara)
print(sentinel);

Map.centerObject(taquari, 13);
Map.addLayer(Construcao, {min: -2, max: 0,

```

```

    palette: ['white', 'red'], opacity:0.8},
    'Construções');

//Função de ações ao clicar no mapa////////////////////////////////////
var panel = ui.Panel();
panel.style().set({
  width: '400px',
  position: 'bottom-right'
});

Map.add(panel);
Map.onClick(function(coords) {
  panel.clear();
  var point = ee.Geometry.Point(coords.lon, coords.lat);

//Plotando Gráfico da série de BU////////////////////////////////////
var chart = ui.Chart.image.series(sentinel.select('BU'), point, ee.Reducer.mean(), 15);
  chart.setOptions({title: 'Evolução Temporal do BU'});
panel.add(chart);

  })

```

- **Programa para cálculo dos índices NDVI, NDBI, Bu, EVI, SAVI, NDMI**

```
//Tese de Doutorado - SILVA JUNIOR, E.E.A. (2019)
```

```
//Eleudo Esteves de Araujo Silva Junior
```

```
//Índices de vegetacao e áreas construídas
```

```
//Setor Habitacional Taquari/DF
```

```
//Imagens Landsat 8
```

```
//período: 2014 até junho de 2019
```

```
//Center the map
```

```
Map.setCenter(-47.83, -15.72, 12);
```

```
var app = function (image)
```

```
{
```

```
//Índices de vegetação
```

```
//Diferença Normalizada (NDVI)
```

```
var ndvi = image.normalizedDifference(['B5', 'B4']);
```

```
image = image.addBands(ndvi.rename('NDVI'));
```

```
//Índice por Diferença Normalizada para Áreas Construídas (NDBI)
```

```
// NDBI = SWIR - NIR / SWIR + NIR. Bu = NDBI - NDVI
```

```
var ndbi = image.expression ('((swir - nir) / (swir + nir)) - ((nir - red) / (nir + red))',
```

```
{
```

```
  red: image.select('B4'),
```

```
  nir: image.select('B5'),
```

```
  swir: image.select('B6')
```

```
});
```

```
image = image.addBands(ndbi.rename('Bu'));
```

```
//Índice de Vegetação Realçado (EVI)
```

```
var evi = image.expression(
```

```
  '2.5 * (nir - red) / (nir + 6 * red - 7.5 * blue + 1)',
```

```

{
  red: image.select('B4'), // 620-670nm, RED
  nir: image.select('B5'), // 841-876nm, NIR
  blue: image.select('B2') // 459-479nm, BLUE
});
image = image.addBands(evi.rename('EVI'));

//Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI)
var savi = image.expression(
  '1.5* (nir - red) / (nir + red + 0.5)',
  {
    red: image.select('B4'), // 620-670nm, RED
    nir: image.select('B5'), // 841-876nm, NIR
  });
image = image.addBands(savi.rename('SAVI'));

//NDMI - Índice de umidade por diferença normalizada
var NDMI = image.expression(
  '(nir - swir) / (nir + swir)',
  {
    swir: image.select('B6'),
    nir: image.select('B5'),
  });
image = image.addBands(NDMI.rename('NDMI'));

return image;
};

//Coleção de imagens
var OLI = ee.ImageCollection ('LANDSAT/LC08/C01/T1_RT_TOA')

```

```

.filterDate('2014-01-01', '2019-06-01')
.filterMetadata('CLOUD_COVER','LESS_THAN', 2)
.filterBounds(geometry)
.map(app);

var median = OLI.median();

//rampa ou paleta de cor
var palette = ['FFFFFF', 'CE7E45', 'DF923D', 'F1B555', 'FCD163', '99B718',
              '74A901', '66A000', '529400', '3E8601', '207401', '056201',
              '004C00', '023B01', '012E01', '011D01', '011301'];

//paleta de cor ndmi melhor ajustada
var palette_a = ['070FFF', '37A314', 'FF8507', '00FFCF', '004EFF'];

var palette_bu = ['#ffffff', '#ff0000']
//Gráficos
var lon = ui.Label();
var lat = ui.Label();

//Registre um retorno no mapa ao clicar

Map.onClick(function(coords)
{
  // Update the lon/lat panel with values from the click event.
  lon.setValue('lon: ' + coords.lon.toFixed(2)),
  lat.setValue('lat: ' + coords.lat.toFixed(2));

  // Add a red dot for the point clicked on.
  var point = ee.Geometry.Point(coords.lon, coords.lat);
  var dot = ui.Map.Layer(point, {color: 'FF0000'});

```

```

Map.layers().set(1, dot);

// Create a Vegetation Index chart.

var chart = ui.Chart.image.series(OLI.select('NDVI','Bu', 'EVI', 'SAVI'), point, ee.Reducer.mean(),
500);

chart.setOptions({
  title: 'Índice de Vegetação',
  vAxis: {title: 'Valores'},
  hAxis: {title: 'TEMPO', format: 'MM-yy', gridlines: {count: 7}},
});

// adicionar grafico ao mapa

chart.style().set({
  position: 'bottom-right',
  width: '500px',
  height: '300px'
});

Map.add(chart);
});

var taquari = ee.FeatureCollection('ft:1Hq0H9BVfxARoUorpGk6n4UMVposvKuuhYeP25x8E');
var clipped = median.clipToCollection(taquari);

// Exibe a imagem de entrada e os indices resultantes

Map.addLayer(clipped, {bands:'B6,B5,B4'}, 'OLI');

Map.addLayer(clipped, {min: 0, max: 1, bands:['NDVI'], palette: palette}, 'NDVI', 0);

Map.addLayer(clipped, {min: -0.5804988756372875, max: -0.22115379746051686, bands:['Bu'],
palette: palette_bu}, 'Bu');

Map.addLayer(clipped, {min: 0, max: 1, bands:['EVI'], palette: palette}, 'EVI', 0);

Map.addLayer(clipped, {min: 0, max: 1, bands:['SAVI'], palette: palette}, 'SAVI', 0);

Map.addLayer(clipped, {min: 0, max: 1, bands:['NDMI'], palette: palette_a}, 'NDMI', 0);

```

```
//Exportar as imagens
```

```
Export.image.toDrive({  
  image: clipped.visualize({bands:['NDVI']}),  
  description:'Landsat_8_NDVI_2019',  
  scale: 30,  
  region: geometry  
});
```

```
Export.image.toDrive({  
  image: clipped.visualize({min: -0.5804988756372875, max: -0.22115379746051686, bands:['Bu']}),  
  description:'Landsat_8_Bu_2019',  
  scale: 30,  
  region: geometry  
});
```