

Dissertação de Mestrado

**CARTA GEOTÉCNICA DE APTIDÃO À
URBANIZAÇÃO EM AMBIENTE CÁRSTICO.
LAPÃO - BA.**



NUGEO

Autor: Ivan Bispo de Oliveira Filho

ESCOLA DE MINAS / UFOP

Orientador: Prof. Dr. Frederico Garcia Sobreira

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA DA UFOP

OURO PRETO - MARÇO DE 2015

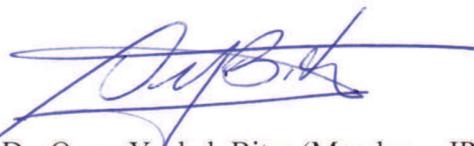
CARTA GEOTÉCNICA DE APTIDÃO À URBANIZAÇÃO EM AMBIENTE CÁRSTICO. LAPÃO - BA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia do Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de **Mestre em Geotecnia**.

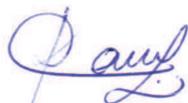
Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 07 de abril de 2015, pela Banca Examinadora composta pelos membros:



Prof. Dr. Frederico Garcia Sobreira (Orientador / UFOP)



Prof. Dr. Omar Yazbek Bitar (Membro – IPT/SP)



Profa. Dra. Kátia Canil (Membro – UFABC)

O48c Oliveira Filho, Ivan Bispo.
Carta geotécnica de aptidão à urbanização em ambiente cárstico - Lapão - BA
[manuscrito] / Ivan Bispo Oliveira Filho. - 2015.
118f.: il.: color; tabs; mapas.

Orientador: Prof. Dr. Frederico Garcia Sobreira.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de
Nutrição. Núcleo de Geotecnia (NUGEO). Geotecnia.
Área de Concentração: Geologia de Engenharia.

1. Mecânica do solo. 2. Geologia de engenharia. 3. Urbanização. I. Sobreira,
Frederico Garcia. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 624.131.1:551

À Jovana, minha esposa
Pedro, meu filho
e aos meus pais,
Ivan (*in memoriam*) e Dalila.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a minha amada esposa Jovana pelo constante apoio, incentivo e compreensão. Ao meu filho Pedro, pelos inúmeros dias forçadamente em casa vendo o pai escrever um monte de coisas incompreensíveis.

A minha querida mãe Dalila, que me incentivou desde criança a reconhecer a importância do estudo, e ao meu querido e finado Pai, que infelizmente não pode estar presente nesse momento tão marcante; embora eu tenha certeza que, esteja onde estiver *Ele* estará vibrante e orgulhoso.

Ao meu orientador Dr. Frederico Garcia Sobreira, Geólogo, pela efetiva participação nas etapas de campo, correção dos textos e orientação no desenvolvimento de todo o trabalho.

Ao Serviço Geológico do Brasil - CPRM, por permitir, custear e disponibilizar toda a sua estrutura para que realização deste trabalho fosse possível.

Ao Dr. Cássio Roberto, Chefe do Departamento de Gestão Territorial – CPRM, que desde o início me apoiou e atendeu todas as minhas solicitações.

Aos colegas, amigos e excelentes técnicos da CPRM, Jorge Pimentel, Regina Gimenez, Carlos Eduardo Osório, Pedro Pfaltzgraff e Edgar Shinzato, por sempre se mostrarem disponíveis em ajudar.

Aos colegas de CPRM, Angeval Alves de Brito, Carlos Eduardo Santos Oliveira e Roberto Gusmão (geofísicos); e Francisco Inácio Negrão e Amilton de Castro Cardoso (hidrogeólogos) por disponibilizarem dados e informações importantes para o estudo.

Aos amigos Christ, Leonardo e Rodrigo.

O município de Lapão, inteiramente inserido nos terrenos carbonáticos da Formação Salitre, região central do estado da Bahia, é um exemplo de cidade em área cárstica que sofre com problemas geotécnicos relacionados à instabilidade de seus terrenos. Nos últimos anos são muitos os casos de imóveis, arruamentos e espaços públicos que vem apresentando danos estruturais provocados pelas constantes subsidências e acomodações do substrato rochoso.

Com intuito de contribuir com a administração municipal fornecendo informações técnicas a respeito das características do meio físico, este trabalho tem como objetivo elaborar zoneamento das unidades de aptidão no entorno da área urbana do município de acordo com suas suscetibilidades frente aos afundamentos cársticos e suas características geotécnicas, as englobando em três classes principais: Alta Aptidão à Urbanização, Média Aptidão à Urbanização e Baixa Aptidão à Urbanização. Para se chegar a este zoneamento foram realizados procedimentos de fotointerpretação, investigações geofísicas - com método de eletrorresistividade, além dos levantamentos de campo e da integração das cartas temáticas disponíveis.

O zoneamento das unidades de aptidão permitiu a elaboração da Carta Geotécnica de Aptidão à Urbanização do Município de Lapão, uma importante ferramenta de ordenamento e gestão territorial, que pode ser utilizada pela administração municipal no direcionamento dos seus vetores de crescimento para áreas mais estáveis, minimizando as chances de ocorrência de desastres. Contudo, por se tratar de um ambiente extremamente complexo, sempre serão necessários estudos complementares que incluam sondagens diretas e outras investigações geotécnicas antes de sua ocupação.

Palavras-chave: Carta geotécnica, ambiente cárstico, suscetibilidade.

The municipality of Lapão, all within lands of carbonate Salitre Formation, in the central region of Bahia, is an example of a city in a karst area that suffers from geotechnical problems related to the instability of the land. In recent years there are numerous cases of buildings, streets and public spaces that have been showing structural damage caused by the constant subsidence and accommodation of bedrock.

To contribute to the municipal administration providing technical information with respect to the characteristics of the physical environment, this paper carried out the zoning of suitable units surrounding the urban area of the city according to their susceptibility to karstic sags and its geotechnical characteristics, encompassing three main classes: High suitability for Urbanization, Average suitability for Urbanization and Low suitability for Urbanization. To achieve this zoning, Photo interpretation procedure were performed, geophysical investigations - with an electro resistivity method, in addition to field surveys and the integration of available thematic maps.

The zoning of suitable units allowed the establishment of a Geotechnical Suitability Charter for the urbanization of the municipality of Lapão, an important planning and territorial management tool, which can be used by the municipal administration for the direction of its growth vectors for more stable areas, minimizing the chances of disaster occurrence. However, because this is an extremely complex environment, there will always be a need for further studies that include direct surveys and other geotechnical investigations prior to occupation.

Keywords: geotechnical charter, karstic environment, susceptibility.

CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Figura 2.1: Tipos de Cartas Geotécnicas.....6
Figura 2.2: Esquema do processo de dissolução das rochas carbonáticas.....11
Figura 2.3: Estrutura de lapiaz, cidade de Lapão.....14
Figura 2.4: Representação de Dolinas e Uvalas.....15
Figura 2.5: Representação esquemática de um Poljés.....15
Figura 2.6: Extensas cavernas (A) e espeleotemas (B). Gruta Lapa Doce - BA.....16
Figura 2.7: Regiões cársticas do Brasil.....21
Figura 2.8: Modelo de Afundamentos Cársticos.....23
Figura 2.9: Modelo interpretativo dos fenômenos ocorridos em Cajamar.....24
Figura 2.10: (A) Colapso de solo em Cajamar - SP (1986). (B) Afundamento de rua em Teresina - PI.....25
Figura 2.11: (A) Afundamentos em Lapão. (B) Dolina circular em Matozinhos.....25

CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA

Figura 3.1: Fluxograma representativo das principais etapas da pesquisa.....28
Figura 3.2: Sistemática para reconhecimento preliminar da área de estudo.....29
Figura 3.3: Distribuição das áreas para parcelamentos de solo no entorno do núcleo urbano da cidade de Lapão e Limite área de estudos.....30
Figura 3.4: Localização dos caminhamentos geoeletricos dentro da área de estudo.....37

CAPÍTULO 4 - CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Figura 4.1: Mapa de localização da área de estudo.....40
Figura 4.2: Distribuição das chuvas na região de Irecê nos últimos 10 anos.....42
Figura 4.3: Distribuição das chuvas na região de Irecê ano de 2013.....42
Figura 4.4: Média das temperaturas anuais máximas e mínimas na região de Irecê.....43
Figura 4.5: Média das temperaturas mensais máximas e mínimas na região de Irecê....43
Figura 4.6: Localização das bacias de Irecê, São Francisco, Una e Una - Utinga no Cráton do São Francisco.....45

Figura 4.7: Mapa e perfil geológicos simplificados da Bacia de Irecê e adjacências.....	46
Figura 4.8: Estratigrafia do Supergrupo Espinhaço na Chapada Diamantina.....	47
Figura 4.9: Esquema de um mar epicontinental, onde foi depositada a Salitre.....	49
Figura 4.10: Coluna estratigráfica da Formação Salitre.....	50
Figura 4.11: Mapa Geológico simplificado da Área de Estudos - Lapão - BA.....	51
Figura 4.12: Calcilutitos Laminados - Lapão.....	52
Figura 4.13: Dolarenitos cinza claro - Lapão.....	52
Figura 4.14: Calcarenitos intercalados com calcissiltitos Laminados - Lapão.....	53
Figura 4.15: Calcilutitos sem estruturas - Lapão.....	54
Figura 4.16: Estágios de evolução do Cráton do São Francisco.....	55
Figura 4.17: Intersecção de par conjugado de fraturas de direções NW e NE - Lapão...56	
Figura 4.18: Síntese da evolução estrutural do Grupo Una.....	57
Figura 4.19. Visão em planta do ambiente tectônico transcorrente.....	57
Figura 4.20: Diagrama de rosas representativo de fraturas do município de Lapão.....	58
Figura 4.21: (A) Relevo aplainado. (B) Colinas isoladas de baixa amplitude.....	59
Figura 4.22: Curvas de m x m da área de estudos com localização do núcleo urbano..60	
Figura 4.23: Dolinas ao longo da bacia do rio Juá.....	60
Figura 4.24: Bacia Hidrogeológica dos Rios Verde e Jacaré, BA.....	61
Figura 4.25: Perfis mostrando os diferentes estágios evolutivos do aquífero do planalto cárstico e da região de Irecê.....	63
Figura 4.26: Desenvolvimento da carstificação em zona de charneira de dobra.....	64
Figura 4.27: Limites da sub-bacia do Rio Juá.....	65
Figura 4.28: (A) Gruta do Lapão há anos atrás. (B) Gruta do Lapão hoje.....	66

CAPÍTULO 5 - DISCUSSÕES E APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Figura 5.1: Limites do núcleo urbano há 40 anos atrás.....	68
Figura 5.2: Setores de risco muito alto em Lapão.....	69
Figura 5.3: (A) Trincas na rua. (B) Rachaduras quadra de esportes.....	70
Figura 5.4: Localização dos caminhamentos elétricos no eixo central da cidade de Lapão nas proximidades da fonte do Lapão (setor de risco 1).....	70
Figura 5.5: Seção Geoelétrica 1 com interpretação geológica localizada na Rua Augusto Galvão e na Praça da Fonte.....	71

Figura 5.6: Seção Geométrica (Perfil) 2 localizada com interpretação geológica localizada na Rua José Marcelino.....	72
Figura 5.7: Seção Geométrica (Perfil) 3 com interpretação geológica localizada na Travessa Sócrates de Menezes.....	72
Figura 5.8: Localização dos caminhamentos elétricos no eixo central da cidade de Lapão nas proximidades da fonte do Lapão (setor de risco 2).....	73
Figura 5.9: Trincas nos muros das residências (A e B). Conjunto de casas populares...	74
Figura 5.10: Localização dos caminhamentos elétricos 4 e 5 no setor de risco 3.....	75
Figura 5.11: Dolina (A) com trincas das bordas aterradas (B).....	75
Figura 5.12: Seção Geométrica (Perfil) 4 localizada no Bairro Ida Cardoso.....	76
Figura 5.13: Seção Geométrica (Perfil) 5 localizada no Bairro Ida Cardoso.....	76
Figura 5.14: Localização das áreas para futura expansão urbana em que foram efetuados levantamos geométricos.....	77
Figura 5.15: Fotos A e B: visão panorâmica em ângulos diferentes do terreno reservado para a construção do Conjunto Habitacional na Área 1 - ZEP.....	78
Figura 5.16: Composição tridimensional das pseudo-seções levantadas na Área 1.....	78
Figura 5.17: Interpretação geológica tridimensional das pseudo-seções calculadas levantadas na Área 1.....	79
Figura 5.18: Seção Geométrica (Perfil) 6 localizada na Área 2 na Rua do Cemitério.....	80
Figura 5.19: Seção Geométrica (Perfil) 7 localizada na Área 2 na nova Av. Perimetral.....	80
Figura 5.20: Fotografias da Área 3, onde a superfície é composta por solos de alteração (A) e lajedos de rochas calcárias (B).....	81
Figura 5.21: Seção Geométrica (Perfil) 8 localizada na Área 3.....	82
Figura 5.22: Seção Geométrica (Perfil) 9 localizada na Área 3.....	82
Figura 5.23: Seção Geométrica (Perfil) 10 localizada na Área 3.....	83
Figura 5.24: Seção Geométrica (Perfil) 11 localizada na Área 4.....	84
Figura 5.25: Seção Geométrica (Perfil) 12 localizada na Área 4.....	84
Figura 5.26: Trincas de tração em solo (A) e rocha (B) em borda de dolina na fazenda Gildásio.....	85
Figura 5.27: Seção Geométrica 13 localizada na fazenda Gildásio.....	85

Figura 5.28: Seção Geométrica 14 localizada na fazenda Gildásio.....	86
Figura 5.29: Seção Geométrica 15 localizada na fazenda Gildásio.....	86
Figura 5.30: Seção Geométrica 16 localizada na fazenda Gildásio.....	87
Figura 5.31: Seção Geométrica 17 localizada na fazenda Gildásio.....	87
Figura 5.32: Seção Geométrica 18 localizada na fazenda Gildásio.....	88
Figura 5.33: Seção Geométrica 19 localizada na fazenda Gildásio.....	88
Figura 5.34: Seção Geométrica 20 localizada na fazenda Gildásio.....	89
Figura 5.35: Composição tridimensional das seções levantadas na Fazenda Gildásio...	90
Figura 5.36: Localização do caminhamento elétrico 21 na rodovia BA-432.....	91
Figura 5.37: Seção Geométrica 21 localizada nas margens da rodovia BA-432.....	92
Figura 5.38: Subunidades geotécnicas na área de estudo. Transparência de 45% sobre relevo sombreado.....	94
Figura 5.39: Áreas de alta suscetibilidade a afundamentos sobre as Subunidades geotécnicas. Transparência de 45% sobre relevo sombreado.....	95
Figura 5.40: Argila preenchendo descontinuidades de par conjugado de fraturas NE e NW.....	96
Figura 5.41: (A) Bolsões verticais de argila em descontinuidades abertas aproximadamente E-W. Notar pequena falha normal na fotografia (B).....	96
Figura 5.42: Cavidades próximas a superfície. (B) Detalhe.....	96
Figura 5.43: (A) Dolina sobre a calha do Rio Juá. (B) Estrutura de lapiaz, cidade de Lapão.....	99
Figura 5.44: (A) Trincas parede. (B) Trincas piso.....	99
Figura 5.45: Mapa simplificado de suscetibilidade a afundamentos cársticos da área de estudo. Escala 1:10000.....	101
Figura 5.46: Áreas altas (A) e/ou com solos espessos (B).....	102
Figura 5.47: Área com solo pouco espesso (A) e lajedos rochosos (B).....	103
Figura 5.48: Dolina circular (A); e alongada (B) de direção N-S.....	104
Figura 5.49: Afundamentos da superfície sobre o Rio Juá. Fotografias de fora (A) e dentro da calha (B).....	105
Figura 5.50: Construções danificadas construídas sobre dolina. Centro (A); Casas Populares (B).....	105

CAPÍTULO 4 – CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS

Tabela 4.1: Dados climatológicos dos últimos dez anos região de Irecê.....41

Tabela 4.2: Poços cadastrados na sub-bacia do Rio Juá.....65

LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES

CODEVASF - Companhia de Desenvolvimento do Vale do São Francisco.

CPRM - Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia.

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo.

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

PDPL - Plano Diretor Participativo de Lapão.

SRH - BA - Superintendência de Recursos Hídricos da Bahia.

ICMbio - Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade.

UNESP- Universidade Estadual Paulista.

ZEP - Zona de Expansão Prioritária

ZUP - Zona de Urbanização Prioritária

ZDE - Zona de Desenvolvimento Econômico

ZCS - Zona de Comércio e Serviços

ZEIS - Zona Especial de Interesse Social

ZRC - Zona Residencial Central

ZPR - Zona de Proteção Rigorosa

ZPA - Zona de Proteção Ambiental

LISTA DE ANEXOS

Anexo I – Carta Geotécnica de Aptidão à Urbanização do Município de Lapão - BA.

CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.2.1 Objetivo Geral.....	3
1.2.2 Objetivos Específicos.....	3
CAPÍTULO 2 - BASES CONCEITUAIS.....	5
2.1 CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA.....	5
2.1.1 Tipos de Cartografia Geotécnica.....	6
2.1.1.1 Carta Geotécnica de Aptidão à Urbanização.....	7
2.2 CARSTE.....	9
2.2.1 Processos de Carstificação.....	10
2.2.2 Paisagens e Feições Cársticas.....	13
2.2.3 Aquíferos Cársticos.....	16
2.3 SUSCETIBILIDADES E PROBLEMAS GEOTÉCNICOS ASSOCIADOS AOS AMBIENTES CÁRSTICOS.....	19
CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA.....	27
3.1 ETAPAS PRÉ-CAMPO.....	29
3.1.1 Modelo Inicial Orientador.....	29
3.1.2 Definição dos Limites da Área de Estudos.....	29
3.1.3 Inventário e Geração de Dados Básicos.....	32
3.1.4 Organização das Informações em Ambiente SIG.....	33
3.1.5 Interpretação dos Dados e Geração dos Produtos Cartográficos.....	34
3.2 ETAPAS DE CAMPO.....	34
3.2.1 Mapeamento das Dolinas e Outras Feições de Afundamento.....	35
3.2.2 Reconhecimento Geológico e Mapeamento Geológico-geotécnico.....	35
3.2.3 Sondagens Geofísicas.....	36
3.2.4 Atualização da Setorização das Áreas de Risco Muito Alto.....	37

3.3 ETAPAS PÓS-CAMPO.....	38
3.3.1 Elaboração do Mapa de Feições Cársticas.....	38
3.3.2 Interpretação das Investigações Geofísicas.....	38
3.3.3 Integração dos Dados e Diagnósticos.....	38
3.3.4 Definição das Classes de Aptidão.....	39
3.3.5 Carta Geotécnica de Aptidão à Urbanização.....	39
CAPÍTULO 4 - CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS.....	40
4.1 LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO.....	40
4.2 ASPECTOS CLIMÁTICOS.....	41
4.3 SOLOS.....	43
4.4 VEGETAÇÃO E USO DO SOLO.....	44
4.5 GEOLOGIA.....	44
4.5.1 Supergrupo Espinhaço.....	46
4.5.2 Supergrupo São Francisco.....	48
4.5.3 Evolução Tectônica.....	54
4.6 GEOMORFOLOGIA.....	58
4.6.1 Chapada de Irecê.....	59
4.7 HIDROGEOLOGIA.....	61
4.7.1 Aquífero Cárstico Regional.....	62
4.7.2 Aquífero Cárstico de Lapão.....	64
CAPÍTULO 5 - DISCUSSÕES E APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	67
5.1 RISCO GEOLÓGICO.....	67
5.2 INVESTIGAÇÃO GEOFÍSICA NAS ÁREAS DE EXPANSÃO.....	77
5.3 SUSCETIBILIDADE E UNIDADES GEOTÉCNICAS.....	93
5.4 CARTA GEOTÉCNICA DE APTIDÃO À URBANIZAÇÃO.....	101
5.5.1 Alta Aptidão à Urbanização.....	102
5.5.2 Média Aptidão à Urbanização.....	102
5.5.3 Baixa Aptidão à Urbanização.....	104

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	107
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	109

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O processo de ocupação do solo nas cidades brasileiras, influenciado pelo crescimento da população urbana, vem se caracterizando por não obedecer a qualquer critério de planejamento em relação ao meio físico, suas restrições geológico-geotécnicas e ao interesse maior de bem-estar da coletividade. Essa ocupação tem levado em conta interesses financeiros e imediatistas e raramente considera a qualidade de vida que a população deve desfrutar e os riscos a que esta pode estar exposta. Desse modo, a ocupação do solo tem se processado de maneira desordenada, levando muitas vezes a usos inadequados. Estes, por sua vez, são responsáveis pela instalação de processos de alteração do meio físico, que podem culminar com a deflagração de acidentes geológicos nas áreas urbanas, trazendo enormes prejuízos à população e ao poder público, além do risco da perda de vidas humanas.

Para que a expansão urbana ocorra de maneira ordenada e segura é necessário que se tenha o conhecimento das características do meio físico a ser ocupado. A utilização das informações básicas, geológicas e geotécnicas, voltadas à caracterização do meio físico, bem como o entendimento das relações entre ocupação desordenada do solo e os riscos associados, tornam-se fundamentais para subsidiar ações de planejamento e administração pública. Isso porque fornecem as indicações necessárias para se racionalizar o crescimento das áreas urbanizadas, dando o suporte à definição da adequabilidade dos terrenos para os diferentes fins, minimizando os riscos da deflagração dos acidentes geológicos.

Atualmente, a Lei 12.608, de 10 de abril de 2012, que instituiu a Política, o Sistema e o Conselho Nacionais de Proteção e Defesa Civil e autoriza a criação de sistema de informações e monitoramento de desastres, trata os desastres de forma ampla e organizada, abrangendo a identificação e análise de riscos, as medidas estruturais e não estruturais para mitigação e/ou solução de problemas, os sistemas de contingência, a

capacitação e treinamento dos agentes de proteção e defesa civil, e a obrigação da informação pública. A Lei determina a atuação articulada entre União, Estados e Municípios; a abordagem sistêmica; a prioridade às ações preventivas; a adoção da bacia hidrográfica como unidade de análise; o planejamento com base em pesquisas e estudos e a participação da sociedade civil. Ainda segundo a lei, os Estados e Municípios deverão identificar e mapear áreas de risco e realizar estudos de identificação de ameaças, suscetibilidades e vulnerabilidades. Assim, passou a ser obrigatório aos municípios com histórico de ocorrências, a elaboração de carta geotécnica de aptidão à urbanização, voltada para a segurança de novos parcelamentos do solo e para o aproveitamento de agregados minerais, e que será peça fundamental quando houver a expansão do perímetro urbano, devendo ser incorporadas aos Planos Diretores municipais.

A cidade de Lapão, na região central da Bahia, localizada sobre os terrenos cársticos da Formação Salitre é exemplo de cidade em que a cartografia geotécnica de aptidão à urbanização funcionaria como uma importante ferramenta de gestão territorial, no que tange à orientação dos vetores de crescimento urbano, indicando áreas mais ou menos suscetíveis a ocorrência de afundamentos cársticos, e as áreas onde já ocorreram afundamentos, como as dolinas por exemplo. A disponibilização destas áreas para ocupação poderá expor à população ao risco, uma vez que a constante acomodação do substrato rochoso pode provocar grandes danos às estruturas das edificações, podendo até mesmo levá-las ao desmoronamento.

Em fevereiro de 2013, após acomodações do substrato rochoso provocarem danos nas edificações localizadas na região central do núcleo urbano do município, a Prefeitura de Lapão solicitou a CPRM que técnicos fossem enviados à cidade para estudar estes processos e fornecer informações que pudessem eliminar ou minimizar a condição de risco existente no local. Na ocasião, geofísicos, hidrogeólogos e geotécnicos realizaram campanhas geofísicas, coletaram dados hidrológicos e realizaram a setorização das áreas de risco muito alto presentes na cidade. Para que não ocorra o aumento da ocupação em áreas geotecnicamente instáveis é necessário que os estudos geotécnicos

específicos sejam realizados no entorno da cidade, principalmente nas previstas no plano diretor municipal como áreas de expansão urbana.

A cartografia geotécnica de aptidão à urbanização proposta por este trabalho constituirá uma importante ferramenta de gestão territorial. As informações geradas têm por propósito o fornecimento de subsídios para que o Plano Diretor Municipal de Lapão - BA e os novos projetos de parcelamento do solo incorporem diretrizes voltadas para a prevenção dos desastres naturais e outros problemas geotécnicos decorrentes da ocupação de terrenos inadequados.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Elaborar a Carta Geotécnica de Aptidão à Urbanização do Município de Lapão frente à ocorrência de afundamentos cársticos, em escala 1:10.000, de modo a auxiliar a administração municipal no planejamento e expansão urbana da cidade.

1.2.2 Objetivos Específicos

Obter por meio das sondagens geofísicas (eletrorresistividade) informações quanto a localização, forma e dimensões das cavidades subterrâneas; além de características geotécnicas do substrato que auxiliem no zoneamento das áreas suscetíveis à ocorrência de afundamentos.

Georreferenciar as dolinas, colapsos e outras feições de afundamentos cárstico na zona urbana e periurbana e atualizar a setorização das áreas de risco muito alto na zona urbana da cidade de Lapão pela CPRM.

Encontrar fatores predisponentes, como variação faciológica, textura, fraturamentos e preenchimentos nas Unidades Litológicas que podem favorecer o processo de dissolução, e por consequência, o surgimento de feições cársticas.

Elaborar o mapa de suscetibilidade a afundamentos cársticos na área de estudo.

Compreender o papel da água no sistema e sua contribuição nos processos de afundamento.

2.1 CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA

A cartografia geotécnica, segundo Diniz (1998), pode ser considerada genericamente como a técnica de integração, síntese e representação de informações temáticas da área de geologia de engenharia voltada para o planejamento e gestão ambiental urbana e territorial; e permite a formulação de modelos de previsibilidade do comportamento dos terrenos e o estudo de soluções para problemas decorrentes da intervenção antrópica sobre o meio físico. Freitas (2000) considera “a carta geotécnica como produto resultante da necessidade de caracterização dos terrenos, comprometido com uma intervenção ou solução para uso e ocupação do solo”, levando em conta atributos ou parâmetros de seus componentes físicos, os quais induzem ou condicionam o desenvolvimento de processos e fenômenos responsáveis pela dinâmica da crosta terrestre.

Cerri (1990) classifica as cartas geotécnicas como cartas geotécnicas clássicas, cartas de suscetibilidade e cartas de risco. Bitar *et al.* (1992) defendem que os tipos mais praticados de cartografia se subdividem em cartas geotécnicas dirigidas, cartas geotécnicas convencionais, cartas de suscetibilidade e cartas de risco geológico. Prandini *et al.* (1995) e Zaine (2000) classificam as cartas geotécnicas em cartas geotécnicas (propriamente ditas), cartas de riscos geológicos, cartas de suscetibilidade e cartas de atributos ou parâmetros. Por outro lado, segundo Zaine (2000), “embora haja uma diversidade de termos empregados para denominar os diferentes tipos de cartas e/ou mapas geotécnicos, parece haver certa similaridade entre os tipos de documentos produzidos”.

Para Freitas (2000), a carta geotécnica é um instrumento voltado a aplicações nas diferentes solicitações do homem na ocupação do ambiente e deve estar sempre comprometida com uma intervenção ou solução, buscando-se permanentemente um

sentido para sua elaboração, calcado em sua aplicação, ou seja, “mudam-se os objetivos; pode-se, então, mudar o método de abordagem para sua elaboração”.

2.1.1 Tipos de Cartografia Geotécnica

Segundo sua finalidade, as cartas geotécnicas podem ser classificadas em três tipos gerais segundo a sua aplicação em ordenamento territorial, em avaliação de processos do meio físico, em estudos de implantação de empreendimentos. As primeiras seriam cartas de aptidão à urbanização; as segundas as cartas de suscetibilidade, perigo e riscos geológicos (*hazard*) a processos do meio físico; e as terceiras as cartas geológico-geotécnicas para estudos de viabilidade, projetos básicos e projetos executivos de implantação de empreendimentos de infraestrutura, que seriam compostos por processos tecnológicos, (DINIZ, 1998) (Figura 2.1).

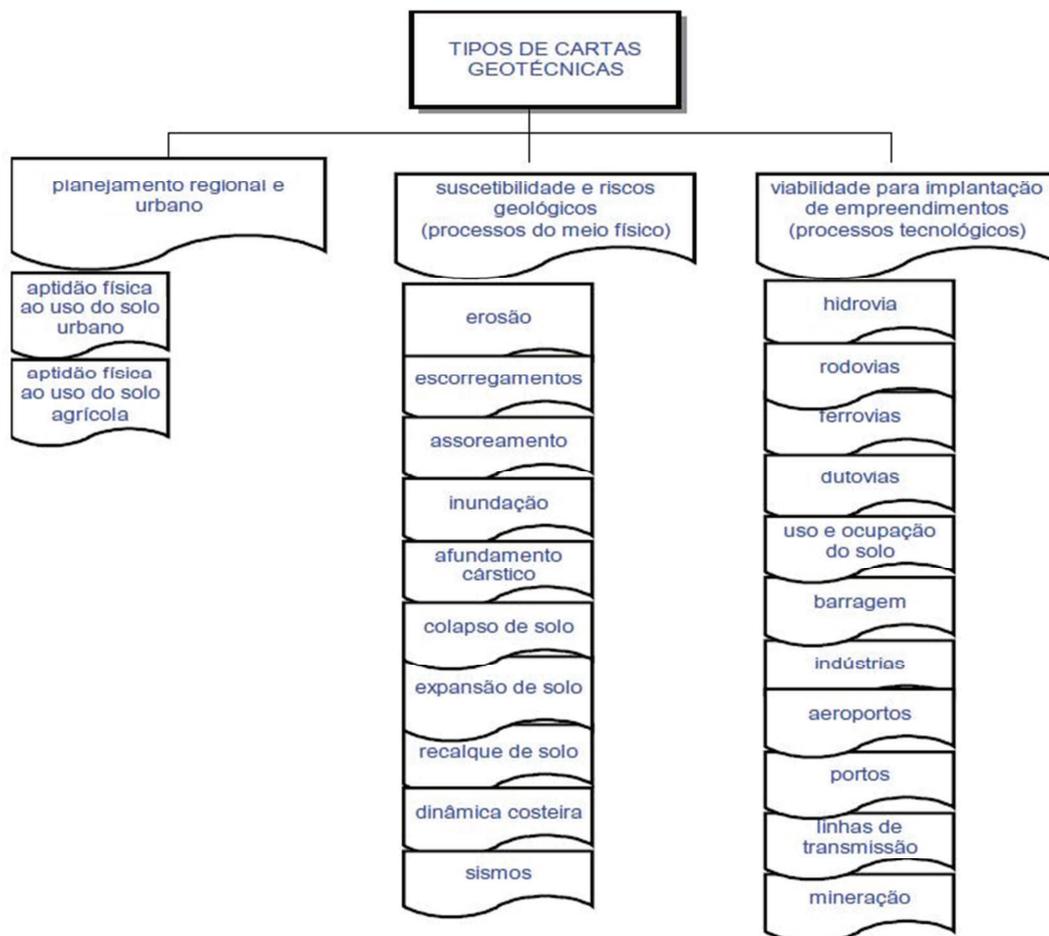


Figura 2.1: Tipos de Cartas Geotécnicas. Fonte: Diniz (1998).

2.1.1.1 Cartas Geotécnicas de Aptidão à Urbanização

A Carta Geotécnica de Aptidão Urbanística frente aos Desastres Naturais para Parcelamento do Solo é um instrumento básico que igualmente cumpre determinações da Lei no. 12.608/12, de estimular o desenvolvimento urbano, combatendo a ocupação de áreas ambientalmente vulneráveis e de risco, com iniciativas que resultem na destinação de moradia em local seguro. Com a perspectiva de estabelecer normas de ocupação, trata-se de cartografia geotécnica em escala 1:10.000 ou maior, detalhada com quantificação de parâmetros específicos que permitam estabelecer diretrizes voltadas à concepção de obras civis relacionadas com a fase de projetos básicos ou empreendimentos (manutenção e monitoramento, desativação e continuidade de uso). Abordam-se, também, orientações segundo critérios de suscetibilidade a processos causadores de perigo, agora com detalhamentos para expansão urbana, tais como: licenciamento e parcelamento de novos loteamentos, regularização urbanística de assentamentos já existentes, sistema viário, além de indicar a necessidade de outros estudos ainda mais detalhados, em escala 1:5.000 ou maior. Para as áreas não apropriadas para ocupação, apontadas em escala regional na carta geotécnica para o planejamento municipal, a carta de aptidão urbanística pode, eventualmente, propor e detalhar a execução de obras civis, como contenção e drenagem, que reduzam a possibilidade de problemas.

Segundo Sobreira e Souza (2012), a produção de uma carta nessa escala envolve intensos trabalhos de campo, que podem ser precedidos de modelagem, dependendo das bases de informação disponíveis. A seguir estão listadas, ainda segundo os autores, algumas informações temáticas básicas consideradas necessárias no processo de produção destas cartas.

- Base topográfica ou cadastral (1:5.000 ou maior) em escala que permita a representação precisa das feições e aspectos observados em campo (mapeamento) e a geração de cartas geomorfológicas de caráter quantitativo (declividade, curvatura, escoamento superficial, etc.) que possam ser integradas em análises futuras,

- Fotografias aéreas, ortofotos e imagens orbitais com resolução compatível com as escalas de trabalho,
- Mapa geológico estrutural para identificação dos principais lineamentos e estruturas que podem condicionar fluxos superficiais e corridas de detritos e solo e, quando for o caso, as principais famílias de descontinuidade visando a geração de modelos de estabilidade,
- Mapa de materiais inconsolidados (solos residuais e transportados) gerados na mesma escala a partir de trabalhos de fotointerpretação e de campo, delimitando os depósitos superficiais (solos, aluviões, tálus, colúvios e depósitos antrópicos), em escala compatível,
- Representação das bacias de contribuição, que são as unidades de análise do sistema de drenagem, de forma a permitir avaliar como a configuração do espaço ocupado influencia as condições de drenagem pluvial,
- Identificação dos agentes/feições potencializadores de risco geológico: encostas com inclinação acentuada, cortes verticais e/ou subverticais em solo e em rocha, sistema de famílias de descontinuidades (falhas, superfícies de estratificação e foliação, diaclases, clivagem de fratura, xistosidade), lançamentos concentrados e contínuos de água e/ou esgoto, acúmulos de lixo e/ou entulho, aterros lançados, bananeiras e/ou espécies inadequadas, minas d'água, cisternas, fossas etc.,
- Identificação de indícios de movimentação do terreno: cicatrizes de escorregamento, feições erosivas lineares (ravinas e voçorocas), feições erosivas e de escavação nas margens dos cursos d'água, trincas no terreno e/ou nas edificações, degraus de abatimento, estruturas de contenções inclinadas e/ou deformadas, inclinação anormal de árvores, postes, cercas e outras estruturas,
- Análise dos eventos destrutivos potenciais: escorregamentos (de solo residual e transportados, de aterro e de lixo), erosão, solapamento, queda /rolamento de blocos rochosos, inundação/enchente/alagamento etc.,
- Identificação das faixas de inundação dos canais (revestidos ou em leito natural), pois estes representam a existência de condições de funcionamento e eficiência, em termos de coleta, transporte e lançamento adequados das águas pluviais, considerando os períodos de recorrência de interesse para o planejamento,

- Dados de sondagem ou a elaboração de perfis esquemáticos em campo que permitam a definição das espessuras das camadas, a caracterização dos perfis de solo/aterro e o nível de águas subterrâneas (modelo hidrogeológico). Em alguns casos os ensaios de caracterização dos materiais são necessários para avaliação do comportamento mecânico e hidráulico dos materiais,
- Identificação das redes de drenagem (pontos de captação, condução e lançamento de fluxo de drenagem) e avaliação do sistema viário, pois este desempenha a função de elemento de drenagem determinante no comportamento hidráulico da área,
- Estudo das redes de esgotamento sanitário para avaliação do grau de comprometimento das condições de salubridade da área ocupada, bem como da interferência do lançamento destas diretamente nas encostas, quando da inexistência ou inadequação do sistema de esgoto sanitário.

A análise de informações geotécnicas quantitativas, como dados de sondagens, ensaios de laboratório, geofísica, etc. antes do início dos trabalhos de campo possibilita uma visão prévia do comportamento dos terrenos, principalmente em profundidade (resistência, nível de água, etc.) e facilita os trabalhos de mapeamento e delimitação das unidades geotécnicas.

2.2 CARSTE

O que identifica um carste é um conjunto de formas de relevo distintas, estudados cientificamente pela primeira vez na região de Kras, nos limites da Eslovênia com a Itália, onde tal relevo é denominado carso. A palavra eslovena kras, deu origem nas línguas germânicas a palavra karst, nome pelo qual é conhecida a região, e nome que acabou definindo o tipo de relevo mundialmente (SWEETING, 1973). A predominância do termo germânico sobre o termo de origem eslava ou italiana se explica pelo fato histórico de que, quando dos primeiros estudos científicos da região, esta se encontrava sob o domínio do Império Austro-Húngaro. Como resultado, as pesquisas iniciais foram publicadas em língua germânica, e por esta razão, o nome germânico predominou e é utilizado até hoje.

Para se chegar a entender o que é o carste, é preciso ter em mente que o conceito de carste está em franca evolução, tendo mudado diversas vezes nas últimas décadas. Uma das mais recentes, proposta por Klimchouk e Ford (2000), fala não mais em “relevo cárstico”, mas em “sistema cárstico”, com uma organização peculiar. Os autores citados definem carste como sendo um sistema de transferência de massa integrado, em rochas solúveis, com permeabilidade estrutural dominada por condutos estabelecidos pela dissolução do material rochoso e organizado para facilitar a circulação de fluidos.

Esta definição não inclui o tipo de rocha, demonstra a importância da dissolução de rocha (qualquer que seja), e da hidrologia característica de um sistema cárstico. Foca-se menos nas formas e mais nos processos, embora estes processos vão, em maior ou menor grau, originar o relevo cárstico. Portanto, o carste pode originar-se em rochas consideradas pouco solúveis, desde que o intemperismo químico condicione o surgimento da morfologia (ou seja, embora talvez não seja o processo preponderante, a solubilidade da rocha determina a existência da forma cárstica) e a formação de condutos, organizando uma rede de drenagem ao menos parcialmente subterrânea.

2.2.1 Processos de Carstificação

Segundo Santos (2014), as feições de dissolução cárstica podem ter origem hipogênica, quando as dissoluções são promovidas por águas interiores hidrotermais ácidas ascendentes, ou epigênica, quando as dissoluções são promovidas por águas meteóricas ácidas que se dirigem para um determinado nível hidrológico de base regional. Não são raros carstes de origem hipogênica retrabalhados por processos epigênicos. As rochas calcárias são rochas carbonáticas, em que predominam os carbonatos de cálcio (CaCO_3) e magnésio (MgCO_3), que as compõem em diferentes proporções, formando então os calcários calcíferos (mais ricos em carbonato de cálcio) e os calcários dolomíticos (mais ricos em carbonato de magnésio). No âmbito dos processos epigênicos as águas de chuva (H_2O) interagem com o gás carbônico (CO_2) do ar produzindo um ácido fraco, o ácido carbônico (H_2CO_3). Essas águas assim levemente acidificadas, ao encontrar um maciço calcário fraturado, penetram por essas discontinuidades e vão lentamente, através do tempo geológico, dissolvendo a rocha e produzindo vazios que podem

evoluir para grandes fendas, cavernas e canais por onde fluem as águas interiores (Figura 2.2).

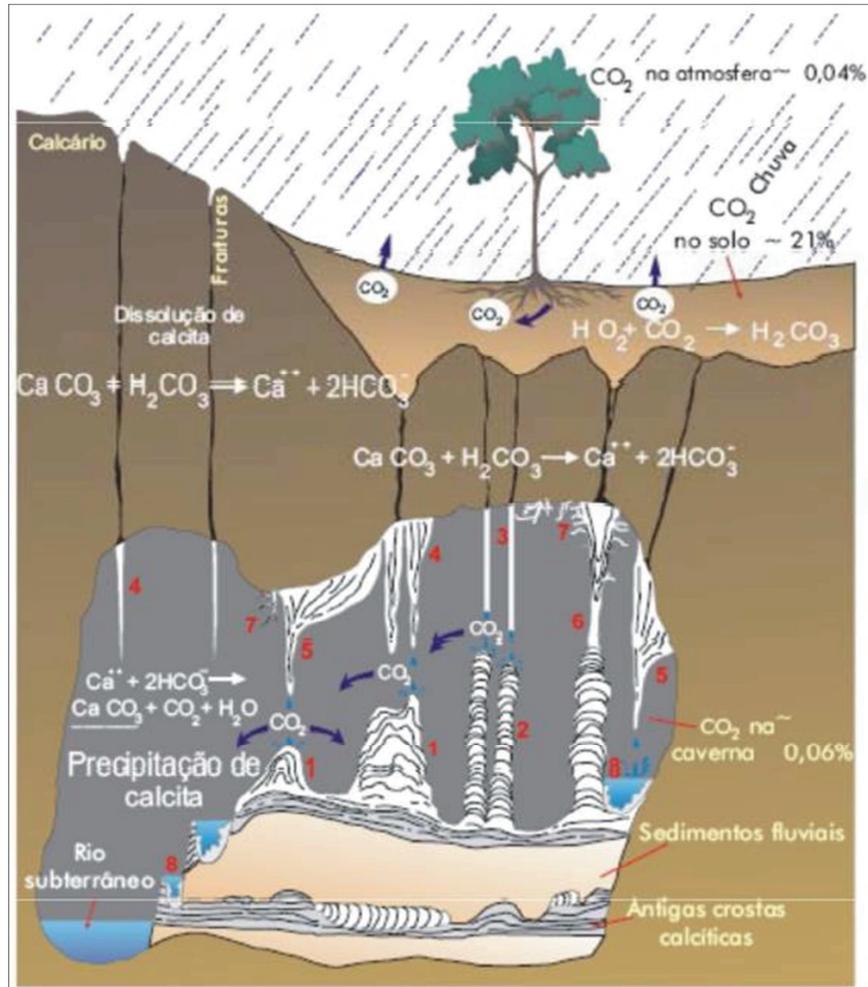


Figura 2.2: Esquema do processo de dissolução e reação química em rochas carbonáticas. Fonte: Karmann (2000).

Para Moore e Sullivan (1997), esses processos de dissolução podem continuar por milhares de anos. Somente duas coisas podem interrompê-los: um abaixamento do nível de base hídrico, ou a exposição do sistema de cavernas ao ar atmosférico devido à erosão de superfície. O abaixamento do nível de base da água subterrânea seca a caverna, o que significa que a dissolução cessa ou continua em nível menos intenso. A abertura de uma entrada, ou de outras passagens, normalmente marca o fim do processo de formação das cavernas, pois a entrada permite que a ventilação comece, e a pressão parcial de gás carbônico já não pode mais ser mantida nas cavidades sobre o nível de

base. O gás carbônico em excesso é dissipado, a água é rapidamente saturada de calcita e a dissolução dá lugar à deposição de material.

Uma sequência evolutiva de um relevo carste foi descrita por Dreybrodt (1988), segundo a qual um bloco de calcário está a princípio situado entre duas camadas impermeáveis e insolúveis, onde um sistema fluvial drena a superfície da área. A carstificação começa quando, em algum lugar desta área, o calcário é exposto à superfície, ocorrendo o contato direto da água superficial com a rocha calcária. Assim, água penetra pelas fissuras do calcário, podendo circular por espaços fissurais muito estreitos (da ordem de 10 μ). Ao contrário das camadas insolúveis, as rochas carbonáticas são dissolvidas por água contendo dióxido de carbono e, com um gradual alargamento das fissuras primárias aumenta a quantidade de água transportada através do calcário, o que, por sua vez, aumenta a quantidade de carbonato removido por dissolução. Este processo promove a ampliação progressiva das aberturas resultando num complexo aquífero em rocha carbonática. Grandes quantidades de água podem ser armazenadas nas fissuras e espaços vazios.

Um complexo sistema tridimensional de condutos de dissolução, que alimentam e drenam o aquífero, começa a se formar e este processo altera as formas do relevo. Com o desenvolvimento efetivo dos condutos de drenagem, sumidouros são formados na superfície levando a água superficial para o aquífero. A erosão da cobertura impermeável prossegue até que a camada carbonática é exposta à superfície ficando em contato direto com a água superficial e meteórica que, por percolação, circula pelo aquífero estabelecendo novas rotas para o fluxo subterrâneo.

Durante este processo, de aumento da permeabilidade do pacote carbonático, ocorre o rebaixamento do nível da água subterrânea até este alcançar o nível de base. Ao mesmo tempo a rocha calcária é dissecada pela circulação ao longo do complicado sistema de dutos e canais. Quando finalmente o nível de base é atingido, um sistema fluvial se instala em tal nível e morros residuais de calcário são isolados.

"É obvio que diferentes condições limite exercem significativa influência na evolução do relevo, tais como: o clima; a composição e espessura do pacote carbonático; a

presença de níveis insolúveis e solúveis; e o sistema de estruturas geradas por tectonismo. Estes são os principais fatores que influenciam a evolução do relevo cárstico" (DIAS 2009).

2.2.2 Paisagens e Feições Cársticas

Nos relevos desenvolvidos sobre rochas carbonáticas, devido à interação das mesmas com os fatores climáticos, geográficos e geotectônicos, de acordo com Silva (2008), são identificados basicamente três grupos de formas cársticas: (1) formas de absorção epigênicas - que correspondem aos locais por onde ocorre a infiltração das águas no carste que irão esculpir a morfologia cárstica; (2) formas de condução hipogênicas – que estão relacionadas aos locais por onde irão circular as águas no subsolo através das cavernas e outros condutos subterrâneos; (3) e as formas de emissão – que é por onde as circulações hipogênicas retornam as formas epigênicas normal através de surgências. Estes três tipos de formas cársticas sempre estão presentes em qualquer tipo de sistema cárstico, e são elas as responsáveis pelas formações dos modelos hidrogeológicos com as áreas de recarga, circulação e de descarga.

A dissolução química da rocha cria diversos tipos de formações, testemunhos da ação da água. Algumas dessas formações são visíveis no exterior, chamadas de exocarste. Outras são subterrâneas, representadas principalmente pelas cavernas, e são chamadas de endocarste.

No domínio das formas exocársticas estão as seguintes feições:

a) Lapiaz – Segundo Guerra e Cunha (2001), as estruturas de lapiaz “são caneluras ou regos de espessura milimétrica a centimétrica, que sulcam a superfície da rocha carbonática, através de variados padrões, podendo atingir uma dezena de metro de comprimento" (Figura 2.3).



Figura 2.3 - Estrutura de lapiaz, cidade de Lapão. UTM: 190803E / 8740803S.(bússola = escala). (Foto do autor)

b) Dolinas – O vocábulo dolina, é de origem servo-croata sendo usado para se referir a depressões fechadas com contornos circulares ou ovais, com bordo geralmente apresentando declividades acentuadas e afloramento de rocha, e o fundo pode estar recoberto por uma camada de argila (terra rossa). Sua origem está associada à dissolução de rochas calcárias pela percolação de água contendo CO₂ e ácidos húmicos em solução. As dolinas também podem ter origem a partir do colapso (desabamento) do teto de cavernas. No primeiro caso, são mais ou menos circulares ou ovaladas e no segundo, forma depressões mais ou menos afuniladas. De acordo com Christofolletti (1980), as dolinas podem ser consideradas como a forma fundamental do relevo cárstico, e são de tamanho e morfologia variável. Em relação ao tamanho, variam de um a mais de 1000 metros de largura, e de poucos centímetros a mais de 300 metros de profundidade (Figura 2.4).

c) Uvalas – Christofolletti (1980) define essas estruturas como sendo “o desenvolvimento das dolinas que pode levar ao estreitamento das divisas entre elas e promover a coalescência de várias delas. Originam, dessa maneira, uma depressão com contornos sinuosos, de maior amplitude” (Figura 2.4).

A figura abaixo mostra uma feição tipo uvala que se forma a partir da coalescência de duas ou mais dolinas.

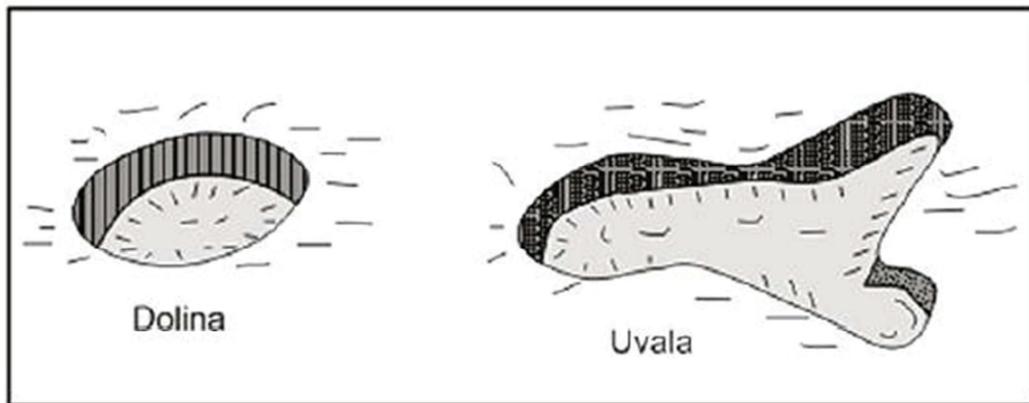


Figura 2.4: Representação de Dolinas e Uvalas. Fonte: Bigarella *et al.*(1994).

d) Poljes – White (1988), afirma que correspondem a largas depressões fechadas que podem chegar a dezenas de quilômetros de extensão, com o fundo rochoso ou recoberto e paredes abruptas (Figura 2.5).

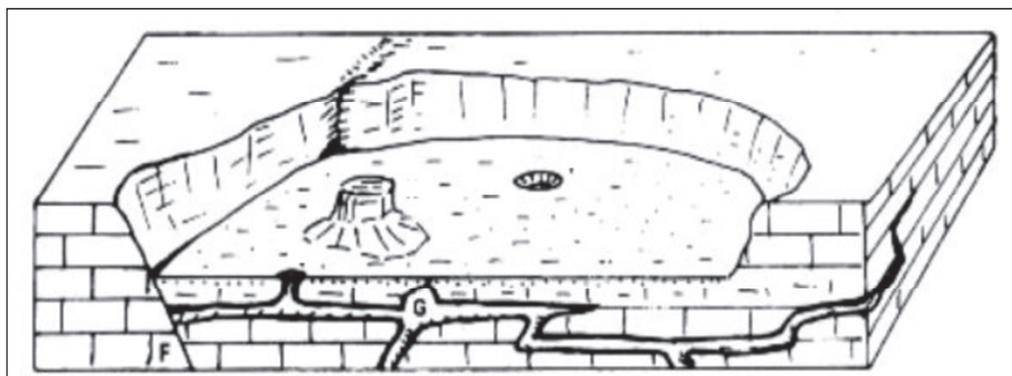


Figura 2.5: Representação esquemática de um polje. Fonte: Galopim de Carvalho (1996).

e) Simas – Estruturas definidas por Silva (2008) como “formas cársticas abertas de absorção originadas de desabamentos de rochas em profundidade. São normalmente circulares e com paredes verticais a subverticais. Podem ser originados da evolução da carstificação de uma dolina”.

f) Sumidouros – Definidos por Lladó (1970) como “áreas abruptas em superfície que permitem a rápida infiltração da água precipitada para o subsolo”

No domínio das formas endocársticas prevalecem os condutos ou cavernas que podem ser decoradas por exuberantes espeleotemas, tais como colunas, cortinas, estalactites, estalagmites, etc. (Figuras 2.6).



Figura 2.6: Extensas cavernas (A) e espeleotemas (B). Gruta Lapa Doce. Chapada Diamantina - BA. (Fotos do autor).

2.2.3 Aquíferos Cársticos

Formações rochosas que, economicamente, armazenam, transmitem e produzem quantidades significantes de água são conhecidas como aquíferos. Os aquíferos cársticos, assim como outros, podem ser confinados, não confinados e suspensos (FORD e WILLIAMS, 1989).

Entende-se por aquífero confinado aquele que tem, em seu limite superior, uma camada de rocha impermeável. Os suspensos são aquíferos com a base em uma camada de rocha impermeável, que o mantém acima do nível de base local. Já os não confinados não possuem acima, rochas impermeáveis para confiná-los, e o embasamento impermeável permite que este esteja no nível de base local.

Uma das características mais marcantes do carste é a alteração de permeabilidade com o tempo. Quando da formação da rocha, o sedimento carbonático se deposita e adquire uma porosidade primária, que é praticamente eliminada durante a compactação ou a cimentação diagenética. A preservação da porosidade primária, nesses casos, é uma

exceção, e não a regra. No entanto, processos químicos diagenéticos posteriores, como a dolomitização e fraturamento pela tectônica, resultam no aparecimento de porosidade secundária, que é ampliada consideravelmente pela dissolução cárstica ao longo das fissuras penetráveis pela circulação da água subterrânea. "Os vazios podem continuar a se alargar enquanto persistir a circulação da água subterrânea" (FORD e WILLIAMS, 1989). Klimchouk e Ford (2000) definem uma escala hierárquica de estruturas direcionadoras de fluxo aquático, que podem ser reconhecidas em rochas cársticas. Em uma primeira escala são:

- Poros na rocha matriz – pequenos vazios intergranulares ou entre cristais.
- Fissuras – descontinuidades, como planos de acamamento, juntas e falhas nas quais as aberturas (largura) são insignificantes em relação ao comprimento.
- Conduitos – aberturas alongadas planares ou tubulares onde as larguras são proporcionalmente significantes em relação ao comprimento.
- Cavernas, que são vazios aparentemente isolados, de forma irregular e diâmetro de conduto em diversas ordens de magnitude.

Em um segundo grau de grandeza, os diversos vazios se combinam em proporções diversas para formar corpos subterrâneos de águas, chamados de aquíferos, que são separados em categorias, de acordo com o tipo predominante de vazio, sendo chamados de aquífero poroso, aquífero fissural, aquífero em matriz de fissuras e aquíferos canalículo-fissural.

Ainda segundo Klimchouk e Ford (2000), a terceira escala de importância hidrogeológica refere-se ao modo como os aquíferos elementares estão arranjados em relação ao acamamento sedimentar, ou seja, podem ser estratiformes, intraestratal ou inter estratal. Estão distribuídos através de sequências de rochas, sem qualquer alinhamento com planos de acamamento ou qualquer outro tipo de camada. Estão no interior de rochas não estratificadas.

Os estudos sobre fluxo de água em meio subterrâneo costumam se basear na lei de Darcy. Henri Darcy formulou as bases para descrever o fluxo subterrâneo em meio poroso (num primeiro momento, referindo-se ao fluxo subterrâneo nos interstícios granulares de um aquífero arenoso). A lei foi estendida e a fórmula modificada para incluir o fluxo de fluidos, baseado na assertiva de que o fluxo é laminar e a inércia pode ser ignorada. É atualmente expressa como: $V=p(h/l)$, onde:

V é a velocidade,

h é a altura piezométrica,

l é o comprimento do fluxo entre dois pontos dados e

p é o coeficiente de permeabilidade do aquífero.

Portanto, a lei, atualmente, descreve a taxa de fluxo de fluido homogêneo através de meio poroso isotrópico, como sendo proporcional e em sentido da força diretiva (WHITTOW, 2000).

É fácil observar que, pela própria definição, essa lei não é plenamente aplicável ao carste, pois a porosidade secundária (fissural), ou ainda, a porosidade de condutos (terciária) torna a porosidade do meio anisotrópica. Assim, o estudo da hidrologia cárstica é regido por características próprias, diferenciando-se dos aquíferos em meios homogêneos.

Essas características são, basicamente, uma mescla em maior ou menor grau, de fluxo difuso; sujeito, portanto às leis de Darcy; e fluxos fissurais e de condutos, não sujeito a essas leis. O carste apresenta, portanto, uma estrutura heterogênea e hierarquizada, resultando na necessidade de uma aproximação mais complexa (GILLI *et al.*, 2004). Isso provoca uma grande dificuldade quando se tenta elaborar um modelo único. As tentativas para se estabelecer tal modelo resultam numa aplicabilidade localizada. Assim, para elaboração de um modelo que será aplicado a um dado sistema (que não necessariamente se aplicará a outros), é preciso medir o comportamento do fluxo subterrâneo no sistema, avaliar as dimensões dos condutos e suas interconexões, como se dá a recarga do sistema, a porosidade da rocha encaixante, entre outros fatores.

Segundo White (1988), há três componentes nos sistemas hidrológicos cársticos:

1. O aquífero.
2. Os caminhos da bacia de superfície.
3. Os caminhos da bacia subterrânea.

O mesmo autor afirma que as bacias subterrâneas são definidas pela relação entre os sumidouros e os pontos de ressurgência. A bacia subterrânea está relacionada com a bacia de superfície, porque os caminhos apresentados pelo sistema de condutos são rotas alternativas ao fluxo do sistema de canais de superfície. Em alguns casos, os limites das bacias de superfície e de subsuperfície são idênticos, com os condutos subterrâneos servindo meramente como rota alternativa. Em geral, no entanto, bacias subterrâneas não são precisamente congruentes com as bacias de superfície (WHITE, 1988).

2.3 SUSCETIBILIDADES E PROBLEMAS GEOTÉCNICOS ASSOCIADOS AOS AMBIENTES CÁRSTICOS

Entende-se por suscetibilidade a potencialidade de processos geológicos (movimentos gravitacionais de massa, inundações/enchentes/alagamentos, corridas, erosões, assoreamento, subsidências e colapsos, processos costeiros, sismos induzidos, etc.) causarem transformações do meio físico, independentemente de suas consequências para as atividades humanas. Neste caso, a possibilidade de ocorrência de processos geodinâmicos está condicionada pela predisponência natural do meio físico ao seu desenvolvimento, podendo em alguns casos ter como um elemento adicional as práticas de uso e ocupação (SOBREIRA e SOUZA, 2012).

Tominaga (1998 apud PFALTZGRAFF, 2007, p. 13) avalia a suscetibilidade natural com base nas características do substrato geológico, na geomorfologia, nos condicionantes climáticos e na cobertura vegetal. Na avaliação da suscetibilidade induzida, a referida autora utiliza a classificação das unidades e elementos contidos no mapa de uso e ocupação do solo.

O estudo das suscetibilidades a afundamentos e colapsos de solo e rocha em ambientes cársticos, deve ser abordado de maneira distinta aos aplicados em ambientes de encostas e planícies. No caso dos ambientes cársticos torna-se imprescindível compreender o modelo de evolução do carste e a realização sondagens, para obtenção de dados sobre a localização, profundidade e forma dos vazios internos (cavidades), níveis freáticos e zonas de circulação de água, além da análise qualitativa do substrato calcário.

Calcula-se que no mundo cerca de 12,5% das áreas continentais (expostas) sejam ocupadas por rochas carbonáticas, que podem formar terrenos cársticos. No Brasil este percentual é menor, com cerca de 3% do território nacional (KARMANN e SAULLUN FILHO, 2007).

No Brasil, o ambiente cárstico pode ser encontrado principalmente nos estados de Minas Gerais, São Paulo, Paraná, Mato Grosso do Sul, Bahia, Ceará e outros (LLADÓ, 1970) (Figura 2.7).

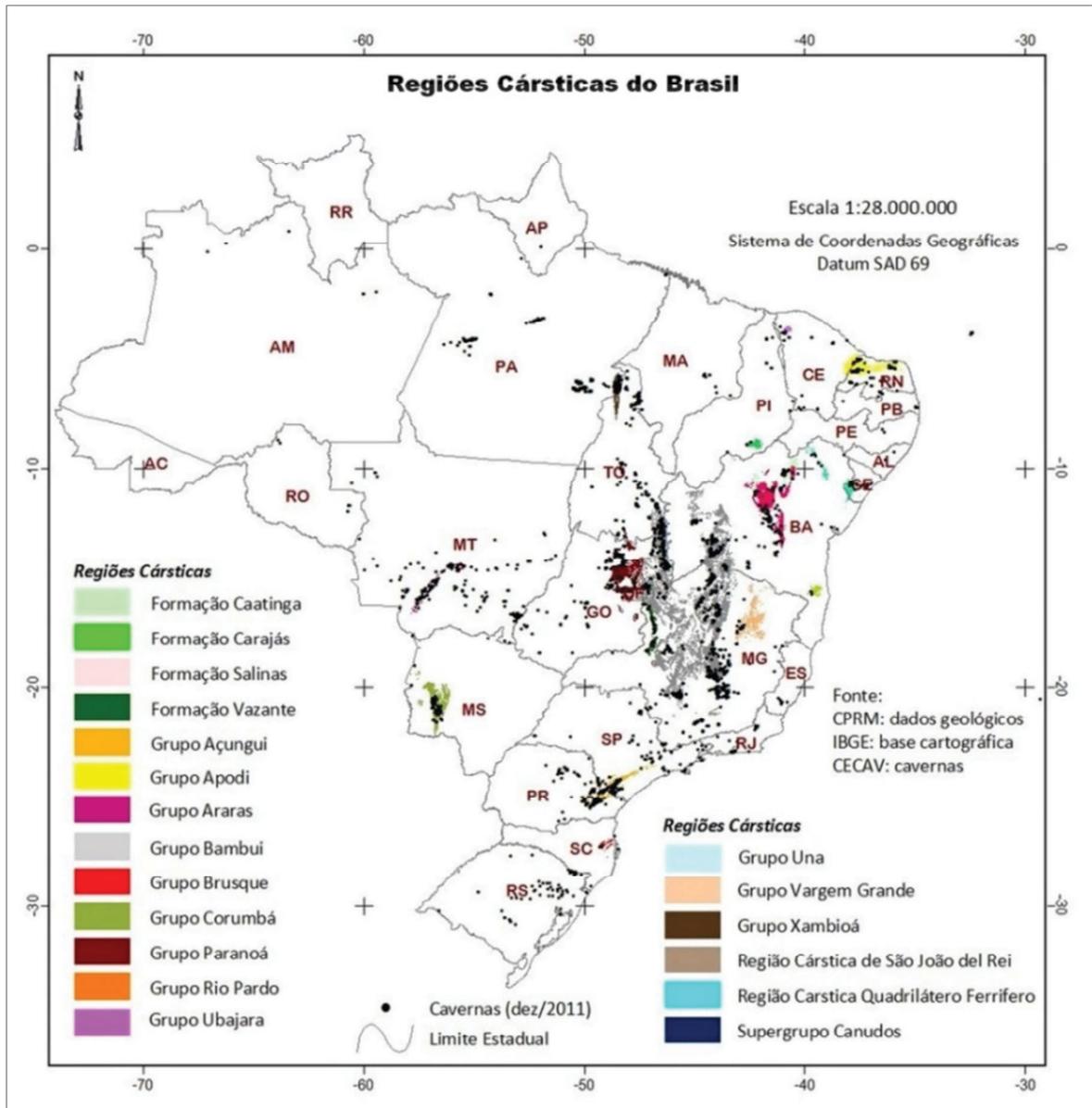


Figura 2.7: Regiões cársticas do Brasil. Fonte: ICMBio. Disponível em: <http://www.icmbio.gov.br/cecaav/projetos-e-atividades/provincias-espeleologicas.html>. Acesso em: 22/10/2014.

Além do fato das áreas cársticas no Brasil ocuparem pequena parcela do território, elas geralmente representam áreas pouco ocupadas pela população, correspondendo a áreas naturais ou rurais. Por exemplo, as extensas áreas de carste pouco ocupadas nos estados da Bahia e no Vale do Ribeira, em São Paulo. Isto reduz, em parte, o risco de desastres com subsidência e colapso devido à ocupação. Porém, a expansão da ocupação por

áreas urbanas nas últimas décadas tem mudado este cenário, especialmente em algumas regiões do país (TOMINAGA *et al.*, 2009).

O principal fenômeno cárstico de interesse da engenharia é o abatimento, brusco ou lento, de terrenos. Esses abatimentos, que podem destruir por completo edificações de superfície, colocando em risco patrimônios e vidas humanas, podem ser decorrentes do colapso de um teto de caverna de contínua migração do solo de cobertura para o interior de vazios na interface solo/rocha ou na própria rocha calcária. Tão mais prováveis serão os abatimentos quanto mais próximos da superfície estejam os vazios do maciço rochoso ou os vazios da zona de interface solo/rocha e do próprio horizonte de solos sobreposto à rocha sã.

A subsidência e o colapso de solo ocorrem em todas as áreas cársticas no Brasil, porém em apenas algumas delas isto afetou a ocupação humana. Pode-se dizer que toda intervenção e ocupação humana em áreas cársticas são sujeita ao risco de subsidência e colapso, se não forem tomadas as medidas necessárias para se evitar a ocorrência destes processos. Dentre algumas medidas de contenção destes processos estão: o conhecimento da localização, formas e profundidades das cavidades subterrâneas; o não rebaixamento do lençol freático, que segundo Prandini *et al.* (1987) é um dos fatores mais importantes para que não ocorra a subsidência; injeção de produtos estruturantes, como caudas de cimentos, resinas expansivas e outros; evitar um carregamento excessivo (sobrecarga de peso) no substrato rochoso sobre zonas de ocorrência de cavidades e etc.

Os colapsos de solo e rocha são movimentos bruscos, circulares em forma de cratera, com seção lateral de tronco invertido, sua ocorrência se processa mesmo sem sinais prévios denunciadores sendo os principais causadores de acidentes graves em áreas de carste; enquanto que as subsidências são processos de adensamento ou rebaixamento do solo, movimentos lentos e causadores de trincas, rachaduras e desabamentos de pequenas proporções (Figura 2.8).

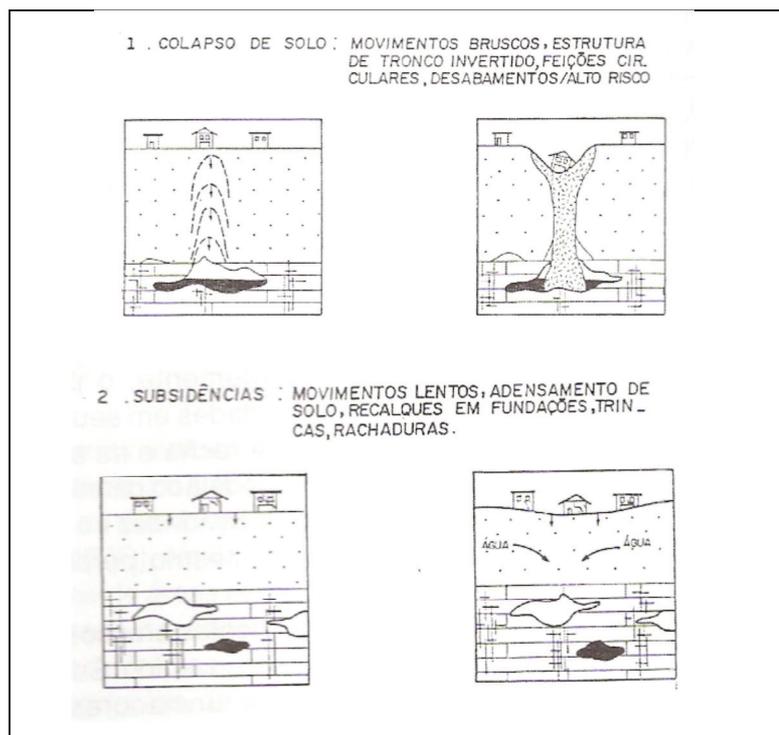


Figura 2.8 - Modelo de Afundamentos Cársticos. Fonte: Oliveira (1997).

Em boa parte do território brasileiro, por decorrência de seu clima tropical úmido, as rochas calcárias cársticas estão cobertas por uma camada de solos de espessura variada, são os chamados carstes cobertos, o que torna muito comum o abatimento decorrente de vazios residuais na camada de solos ou vazios resultantes da migração de solo para o interior de vazios subterrâneos. Carstes exumados, ou seja, calcários cársticos em superfície ou muito próximos à superfície, são mais comuns em climas áridos, onde as condições ambientais inibem a ação do intemperismo químico produtor de solos (SANTOS 2014).

Os problemas de afundamentos em áreas cársticas podem ocorrer tanto sob condições naturais no processo de evolução morfológica, como podem ser acelerados por atividades antrópicas, ou seja, induzidos (Figura 2.9). Nesse sentido, é importante salientar que a diferença entre as causas naturais e as induzidas é a velocidade na deflagração dos efeitos resultantes dos processos de dissolução (ALBRECHT, 1996).

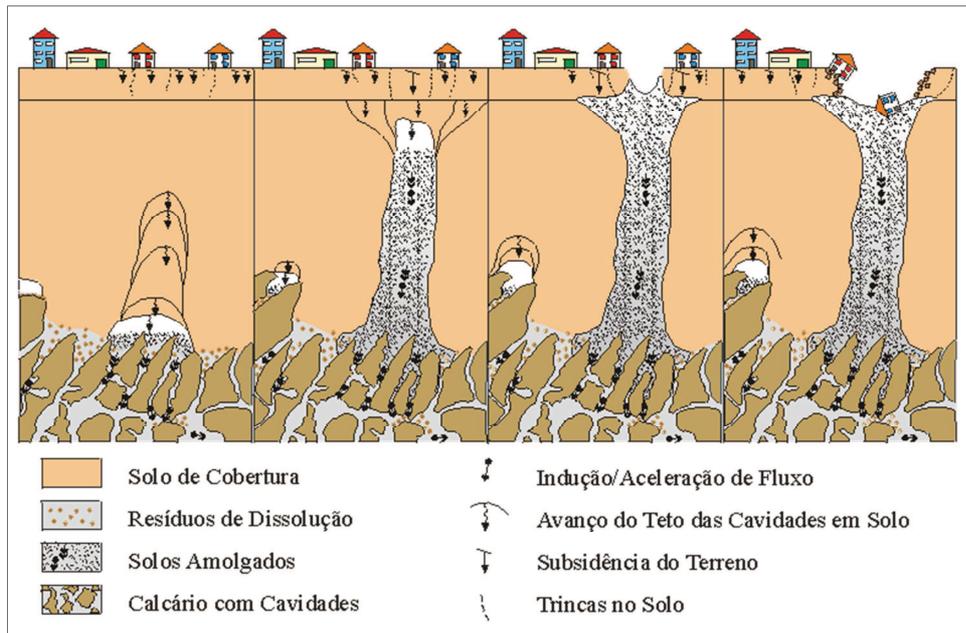


Figura 2.9: Modelo interpretativo dos fenômenos ocorridos em Cajamar (modificada de Infanti Jr e Fornasari Filho, 1998).

A alteração no nível d'água subterrânea é um dos fatores mais frequentes na aceleração da subsidência. Este rebaixamento pode ser uma consequência direta do bombeamento em poços ou nascentes para utilização da água, ou pode ser causado intencionalmente pelo bombeamento para realizar atividades que envolvam escavação, como obras, túneis, mineração, etc. O rebaixamento do nível d'água ocasiona a diminuição da sustentação dos condutos e a alteração do regime de fluxo da água subterrânea, podendo provocar erosão de condutos preenchidos por sedimentos, gerando subsidência em ambos os casos. A elevação do nível d'água também pode ocasionar subsidência, como no caso de reservatórios e barragens, pela alteração dos regimes de fluxo da água subterrânea.

Nas áreas urbanas as atividades de construção civil (obras de engenharia), são intensas, contribuindo no desencadeamento dos fenômenos cársticos, seja pela implantação de elevação de estruturas, serviço de terraplanagem, estradas, fundações, barragens, desvio de cursos de água, coletores de água pluviais, as implantações de rodovias, ferrovias, pedreiras, atividades industriais, vibrações no terreno, elevações estruturais, produção de lixo e esgotos, impermeabilização, entre outras, atuam modificando as condições físicas das áreas de carste, alterações estas que influem no nível do lençol freático,

escoamento e infiltração das águas superficiais, que podem acelerar a ocorrência dos acidentes geotécnicos, destaca Albrecht (1996).

A atividade minerária, comum em áreas cársticas, pode desencadear subsidência, pelo rebaixamento do nível d'água e devido ao desmonte de rochas com a utilização de explosivos.

Além da cidade de Lapão (BA), cidades como Cajamar (SP), Sete Lagoas (MG), Almirante Tamandaré (PR), Teresina (PI), Colombo (PR), Matozinhos (MG), entre outras, são exemplos de áreas cársticas ocupadas que tem sofrido, constantemente, com problemas geotécnicos (Figuras 2.10, e 2.11).



Figura 2.10: (A) Colapso de solo em Cajamar - SP (1986). Disponível em: www.rc.unesp.br/igce/aplicada/ead/interacao/inter12.html. Acesso em 21/10/2014. (B) Afundamento de rua em Teresina - PI. Disponível em: www.portalaz.com.br/noticia/Grande_dirceu/136239. Acesso em 21/10/2014.



Figura 2.11: (A) Afundamentos em Lapão (Foto do autor). Rachaduras na Quadra de Esportes. UTM: 190765 E / 8740153 S. (B) Figura 2.14: Dolina circular em Matozinhos - MG. Fonte: Resende Costa (2013).

A identificação dessas feições, pelo levantamento do histórico regional e por exame superficial dos terrenos é um procedimento fácil para a geologia. Como também são conhecidas e eficientes as técnicas geológicas diretas (sondagens mecânicas) e indiretas (sondagens geofísicas elétricas) para o mapeamento das condições subterrâneas dos horizontes de solos superiores e dos maciços calcários, identificando a existência ou não de vazios, sua distribuição, seu comportamento hidrogeológico etc. No entanto, falta ainda que esses procedimentos sejam definitivamente incorporados como uma providência normal e rotineira aos estudos preliminares de obras de engenharia em terrenos calcários, como também aos planos de gestão urbana (Planos Diretores e Cartas Geotécnicas) de cidades já instaladas sobre esse tipo de terreno. Contudo, nesse último caso, esses planos de gestão devem incorporar ações de monitoramento permanente e de cuidados preventivos (por exemplo, a proibição da exploração da água subterrânea, ou ao menos sua exploração em condições controladas e limitadas), assim como planos contingenciais de Defesa Civil.

Para a elaboração da Carta Geotécnica de Aptidão à Urbanização foi necessário realizar o levantamento das áreas suscetíveis a afundamentos cársticos e o levantamento das características geotécnicas presentes nos terrenos que integram a área de estudo. Para tanto, foram realizados diversos procedimentos, que serão descritos adiante, que combinados e interpretados forneceram elementos importantes para a construção de um modelo de análise que permitisse chegar aos objetivos propostos por este trabalho.

A pesquisa inicial, realizada na fase de inventário de dados, não encontrou propostas metodológicas específicas para classificação do grau de suscetibilidade aos afundamentos em terrenos carbonáticos. Em uma escala menor, talvez possamos admitir que todo terreno cárstico possui alta suscetibilidade à ocorrência de afundamentos. Contudo, quando partimos para uma escala de maior detalhe, as áreas com maior suscetibilidade à ocorrência de afundamentos são aquelas que efetivamente estão sobre vazios/cavidades subterrâneas, e o seu grau de suscetibilidade talvez possa ser classificado de acordo com a sua proximidade.

No ambiente cárstico da área de estudo, a interação das características geomorfológicas, geológicas e hidrogeológicas, condicionam somente a possibilidade de ocorrência de afundamentos cársticos, comumente representados por dolinas e pequenos colapsos de rocha, sendo inexistente a possibilidade de ocorrência de movimentos de massa e inundações, uma vez que o relevo é predominantemente plano, as drenagens são subterrâneas e não existe a presença de Poljes, que em ambientes cársticos podem favorecer a ocorrência de inundações/alagamentos.

A metodologia utilizada neste trabalho se calçou, principalmente, nos resultados obtidos por meio das investigações geofísicas (eletrorresistividade). Os resultados permitiram realizar o zoneamento das áreas que poderiam estar sob influência de processos de subsidência ou vulneráveis a ele.

A utilização do método de eletrorresistividade na localização de áreas suscetíveis à ocorrência de afundamentos, somada a um sistemático levantamento de campo e fotointerpretação da área de estudo, constituíram-se como principais elementos na condução desta pesquisa.

Os dados referentes às áreas de risco no município de Lapão foram obtidos anteriormente a esta pesquisa, em atividade desenvolvida pela CPRM. Nesta oportunidade, observamos que os danos causados nas edificações da superfície foram provocados por pequenos afundamentos (acomodação do substrato rochoso) em áreas geotecnicamente instáveis.

O fluxograma abaixo (Figura 3.1) apresenta cada etapa do processo e sua participação na construção da metodologia aplicada:

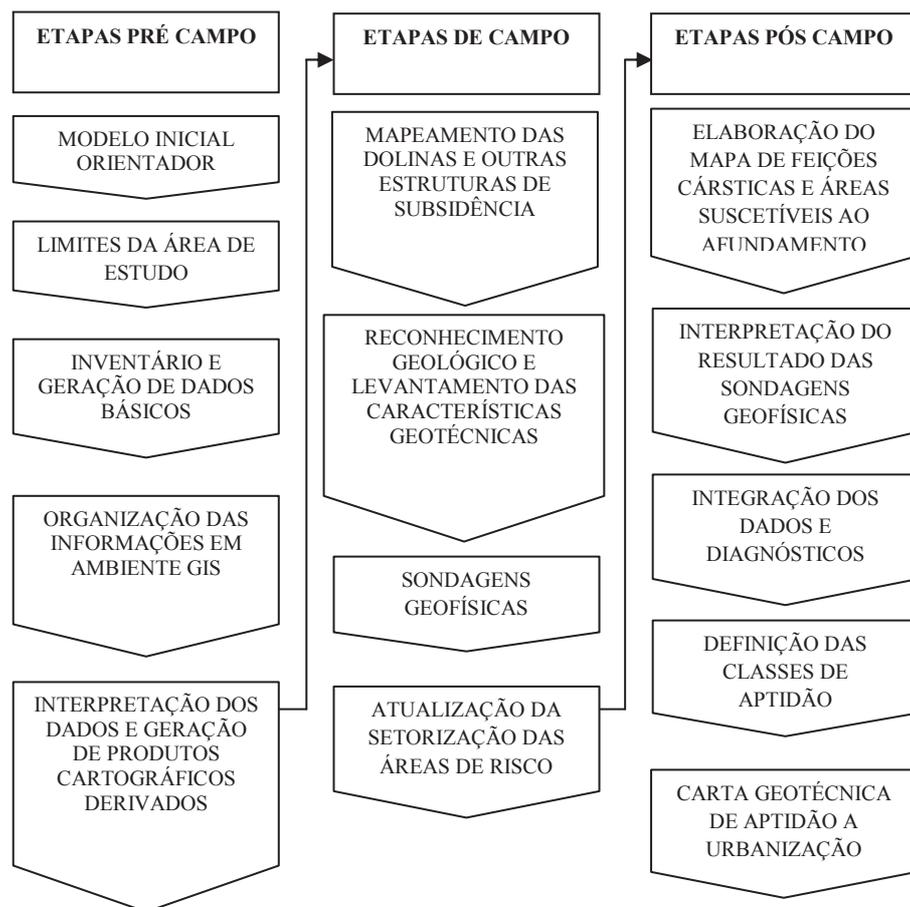


Figura 3.1: Fluxograma representativo das principais etapas da pesquisa.

3.1 ETAPAS PRÉ-CAMPO

3.1.1 Modelo Orientador Inicial

Para a construção de um modelo inicial orientador do estudo (Figura 3.2), importante na obtenção de um produto confiável e compatível com a realidade, foi realizada uma etapa preliminar de reconhecimento da área de estudos, a fim de subsidiar tanto a logística das etapas posteriores, quanto à definição dos processos geodinâmicos a serem estudados/cartografados e suas respectivas metodologias de abordagem.

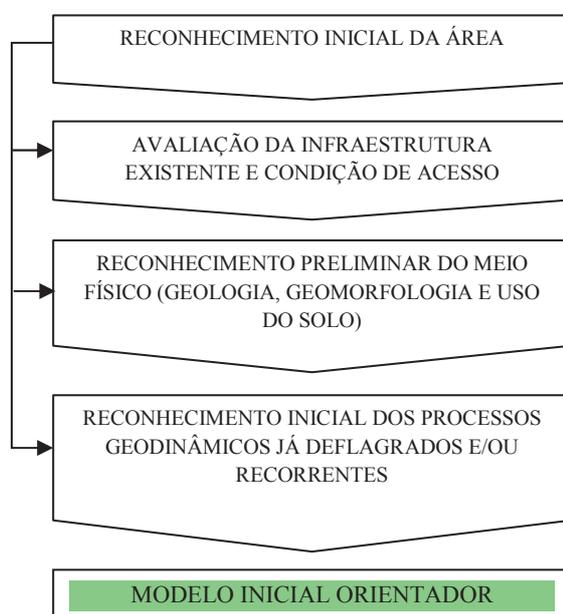


Figura 3.2 – Sistemática para reconhecimento preliminar da área de estudo.

3.1.2 Limites da Área de Estudo

Os limites da área de estudo excederam um pouco as áreas contidas no Plano Diretor Participativo do Município de Lapão - BA para novos parcelamentos de solo, somando um total de 16 km² (Figura 3.3).

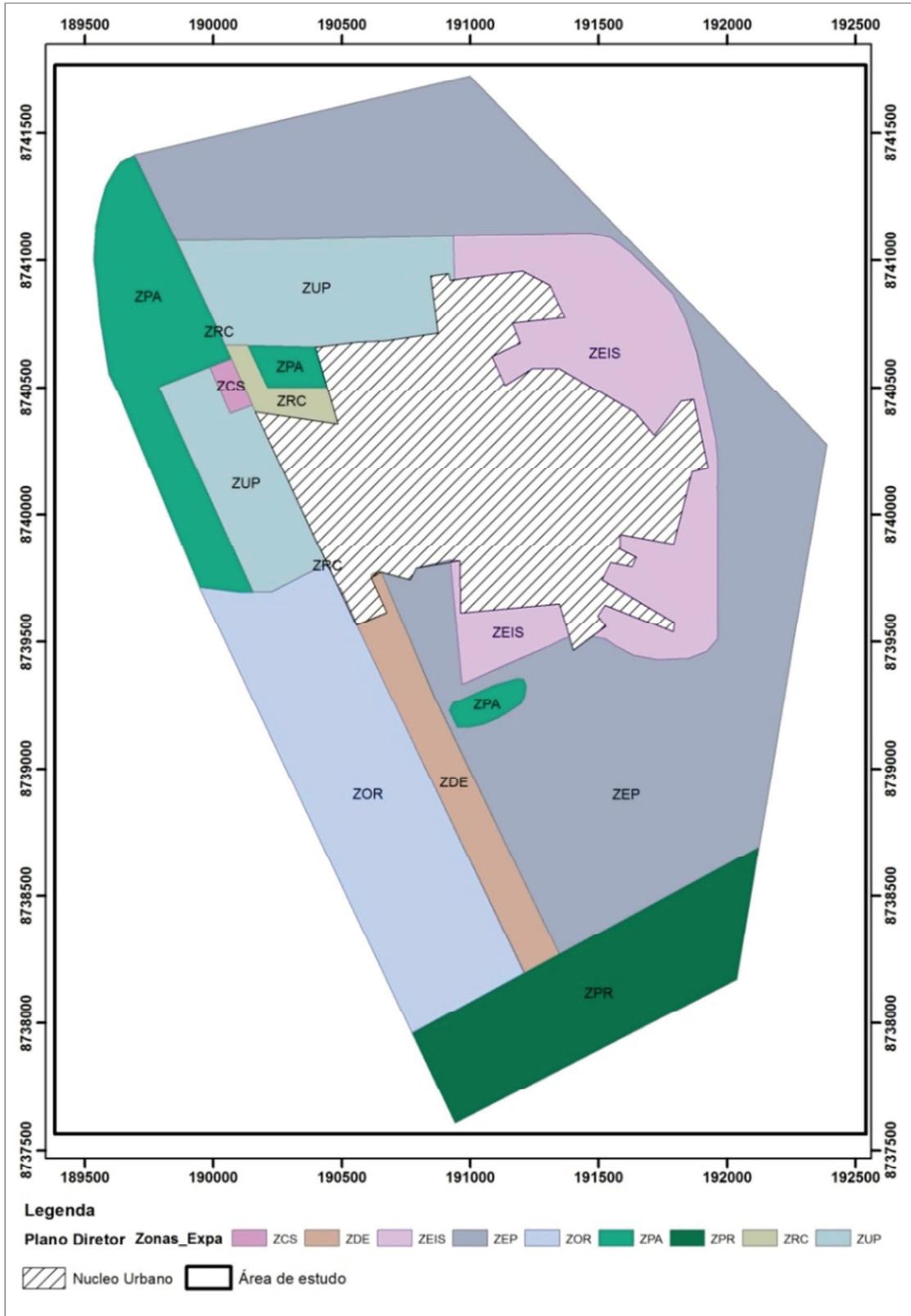


Figura 3.3: Distribuição das áreas para parcelamentos de solo no entorno do núcleo urbano da cidade de Lapão e Limite área de estudos. Fonte: PDPL (2007).

As zonas definidas pelo plano diretor para novos parcelamentos estão descritas a seguir:

ZEP - Zona de Expansão Prioritária - Representada por amplas glebas situadas a leste da cidade com ausência de infraestrutura. São áreas prioritárias para ocupações de caráter residencial, sendo que sua consolidação está condicionada à implantação de equipamentos públicos.

ZUP - Zona de Urbanização Prioritária - Estas áreas são representadas por ocupações ainda não consolidadas, adequados ao adensamento urbano, sendo que sua consolidação está condicionada à implantação prioritária de redes de infraestrutura.

ZDE - Zona de Desenvolvimento Econômico - Situada ao longo da BA-330 pelo lado leste, numa extensão de 2 km e 200 m de largura, destinada à implantação de empreendimentos agroindustriais e industriais não poluentes.

ZCS - Zona de Comércio e Serviços - Situada no bairro central da cidade, esta zona abrange a área da Avenida ACM até a Avenida Nove de Maio à altura da antiga sede da prefeitura, bem como as áreas laterais e transversais

ZEIS - Zona Especial de Interesse Social - Caracterizada por áreas de ocupação consolidada, que apresentam alta vulnerabilidade socioambiental, devido principalmente à carência de infraestrutura de saneamento básico (esgotamento sanitário, drenagem urbana) e de sistema viário, além da presença de afloramentos rochosos o que dificultam a implantação e ampliação das redes de infraestrutura e de melhorias habitacionais.

ZRC - Zona Residencial Central - Caracterizada por áreas de ocupação consolidada, localizadas no entorno do centro da cidade, onde a infraestrutura e os imóveis apresentam melhor qualidade e os terrenos são adequados à ocupação urbana. Mesmo assim, há problemas de drenagem pluvial, principalmente nas proximidades das Ruas Wildon Vilela e José Vieira.

ZPR - Zona de Proteção Rigorosa - Área conhecida como Morro Pelado, caracterizada pelo limite sul do perímetro urbano e representado pelo acidente geográfico mais acentuado do entorno da cidade, possuidora de relevante revestimento florístico com indicações de preservação rigorosa da fauna e flora.

ZPA - Zona de Proteção Ambiental - O Plano Diretor não especifica as zonas de proteção ambiental.

3.1.3 Inventário e Geração de Dados Básicos

Nesta fase, foi realizado o levantamento das informações disponíveis, tanto bibliográficas, como cartográficas da área. Em função da escala de trabalho proposta por este estudo, algumas informações temáticas (geologia, geomorfologia, topografia e etc.) disponíveis em escalas menores fossem adaptadas a escala de trabalho. Estas adaptações posteriormente foram validadas durante as etapas de campo.

Como informações básicas de entrada foram utilizadas e/ou geradas os seguintes dados/mapas:

- BASE TOPOGRÁFICA (Curvas de 1m)

Obtido a partir dos modelos digitais de elevação, Topodata (INPE) e Aster GDEM, (<http://www.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/E/4.html>), além dos pontos coletados em campo por GPS.

Para a geração das isolinhas, foi utilizado o método do vizinho mais próximo, que se apresentou um método eficiente, permitindo a extrapolação, porém apenas para análise visual e interpretação das feições geomorfológicas em campo. Utilizando-se o software Global Mapper 16.0 (Blue Marble Geographics) foi criado um mapa de contorno de isovalores com curvas variando de uma unidade métrica.

Esta base foi validada após etapa de reconhecimento de campo.

- MAPA GEOLÓGICO

As informações geológicas foram obtidas tendo como base na caracterização geológica do Projeto Jacobina (SAMPAIO *et al.*, 2001), em escala 1:250.000; com posteriores ajustes realizados em campo.

- MAPA HIDROGEOLÓGICO

As informações hidrogeológicas foram obtidas dos trabalhos de Silva (2005), em escala 1:100.000).

- MAPA BASE (FUSÃO DO MDE E ORTOFOTO)

Para a geração do mapa base foi feito o download de 60 cenas do google, download da imagem Rapideye, mosaico das cenas, georreferenciamento utilizando o Rapideye como fonte, tratamento da imagem no programa Envi utilizando realce, histogramas e filtros passa alta, montagem no ArcGis e exportação das figuras.

- FOTOS AÉREAS

Fotografias aéreas monocromáticas da Companhia de Desenvolvimento do Vale São Francisco (CODEVASF), em escala 1:40.000, feitas na década de 70.

3.1.4 Organização das Informações em Ambiente SIG

Após aquisição e geração de todas as informações pertinentes ao desenvolvimento do estudo, foi realizado a estruturação do sistema de informação que deu sustentação ao projeto. Muitos dos materiais obtidos possuíam escalas e/ou sistemas de projeções distintas. Nesta fase da pesquisa todos os materiais foram equalizados em escala e projeção (PROJEÇÃO TRANSVERSA MERCATOR - UTM, DATUM -WGS 84, ZONA 24 S).

Todo o trabalho desenvolvido durante esta fase de organização foi feito no ARCGIS 10.2, desde a digitalização das vias de acesso principais e secundárias, mancha urbana,

o georreferenciamento imagens pdf e tif, a clipagem de todas as shapes obtidas, até a confecção do mapa de campo.

3.1.5 Interpretação dos Dados e Geração de Produtos Cartográficos Derivados

A partir das bases topográficas e imagens inventariadas foram geradas outras informações cartográficas importantes para as análises/diagnósticos, a saber:

A geração da carta topográfica com curvas de nível de metro em metro permitiu uma delimitação preliminar das feições de afundamentos, indicando áreas alvos para serem analisadas durante as etapas de campo.

A informação geológica gerada na etapa anterior foi importante na identificação dos litotipos carbonáticos e dos principais lineamentos e estruturas. No caso de ambientes cársticos, onde a porosidade primária é quase inexistente, estas estruturas irão condicionar o fluxo de água, favorecendo a dissolução das rochas calcárias e o desenvolvimento do carste.

As informações hidrogeológicas possibilitaram a compreensão do sistema hídrico na área de estudo, importantes para a caracterização do aquífero e entendimento da evolução dos processos de carstificação.

A interpretação das fotografias aéreas permitiu identificar/delimitar alguns dos afundamentos cársticos pré-existentes as ocupações, observar o crescimento espacial da zona urbana da cidade ao longo dos últimos 40 anos e constatar que as ocupações urbanas na época restringiam-se às áreas mais elevadas, ou seja, áreas que não estavam sob influência de processos de subsidência.

3.2 ETAPAS DE CAMPO

Durante o desenvolvimento deste trabalho foram realizadas 2 etapas de campo. A primeira foi realizada para auxiliar o modelo inicial orientador, em maio de 2014; já a segunda etapa, realizada em julho de 2014, foi efetivamente para o levantamento dos dados de campo e validação de todos os ajustes realizados nas cartas temáticas

adquiridas e geradas nas fases anteriores. Também nesta segunda etapa foi feito o contato com a Prefeitura Municipal de Lapão para a obtenção de outras informações e notificação sobre a execução do estudo.

Os dados sobre risco geológico na cidade de Lapão apresentados neste trabalho foram obtidos após a realização de atividade de campo pela CPRM, no mês de fevereiro de 2013, e foram atualizados durante este trabalho.

3.2.1 Mapeamento das Dolinas e Outras Feições de Afundamentos

Apesar de a maioria das feições de afundamentos presentes na cidade terem sido cartografadas previamente por meio de fotointerpretação e carta topográfica, durante a etapa de campo todas as feições de afundamentos foram georreferenciadas com uso de GPS. Este trabalho, além de validar a cartografia prévia dos afundamentos, permitiu delimitar as feições, que muitas vezes apresentam trincas em suas bordas, resultantes da ruptura por tração provocada pelos afundamentos.

3.2.2 Reconhecimento Geológico e Levantamentos das Características Geológico-Geotécnicas

Foi realizado reconhecimento geológico na área de trabalho para ajustes da escala do mapa geológico base elaborado por Sampaio *et al.* (2001), durante o Projeto da Folha Jacobina. Escala (1:250.000).

O levantamento das características geotécnicas foi importante na identificação de estruturas presentes no substrato rochoso que podem provocar instabilidades na superfície, além de fornecer informações sobre características que podem ou não favorecer a ocupação.

Para realização dos ajustes geológicos e levantamento das características geotécnicas foram levantados dados em 42 pontos na área de estudo.

3.2.3 Sondagens Geofísicas

Com objetivo de detectar zonas carstificadas tem-se realizado muitos levantamentos geofísicos por métodos elétricos. Os dispositivos aplicados são normalmente o da sondagem elétrica vertical (SEV) com arranjo Schlumberger e os caminhamentos elétricos ou perfis elétricos com Schlumberger, dipolo-dipolo.

Nos trabalhos de aquisição de dados na área de estudo, foi levantado um total de 36 seções dipolo-dipolo, totalizando 7445 metros investigados (Figura 3.4). Em algumas seções o caminhamento foi repetido com valores de espaçamentos dos eletrodos variáveis com a finalidade de comparação dos resultados.

Os levantamentos foram realizados na área urbana e no entorno da cidade ainda em fase de avanço da urbanização. Em ambos os casos, as operações foram facilitadas pela existência de um solo bastante condutivo, resultando, na maioria das vezes em uma baixa resistência de contato sem que houvesse necessidade de umedecer o solo onde os eletrodos foram fixados.

Para a parametrização do levantamento, optou-se pela utilização de diversos espaçamentos no arranjo dipolo-dipolo na expectativa de identificação de cavernas e rachaduras. Foram testados 25, 20, 10 e 5 metros de espaçamento entre os eletrodos.

O maior caminhamento elétrico realizado com espaçamento de 25 m entre os eletrodos teve caráter de investigação mais regional. Esta seção, localizada ao longo da rodovia BA-432 de acesso a cidade, passa próximo da área de beneficiamento de uma pedreira e da entrada de Lapão. Ela finaliza na saída sul da cidade totalizando 700 m de extensão.



Figura 3.4: Localização dos caminhamentos geolétricos dentro da área de estudo.

3.2.4 Atualização da Setorização das Áreas de Risco Muito Alto

Para compreensão dos problemas urbanos decorrentes da ocupação de áreas suscetíveis a afundamentos e acomodações do substrato rochoso, foi feito a atualização da setorização das áreas de risco muito alto no município realizado pela CPRM. A atualização foi necessária, pois havia em fevereiro de 2013, duas áreas de risco na

cidade, e durante as etapas de campo desta pesquisa constatou-se o surgimento de uma terceira área de risco.

A compreensão dos problemas decorrentes das subsidências e seu reflexo direto nas ocupações são importantes para a proposição de melhor uso e ocupação do solo.

3.3 ETAPAS PÓS-CAMPO

3.3.1 Interpretação do resultado das Sondagens Geofísicas

A interpretação dos perfis geofísicos permitiu confirmar as feições cartografadas, bem como forneceu informações importantes sobre os vazios internos, suas formas e profundidades em que se desenvolvem.

3.3.2 Elaboração do Mapa de Feições Cársticas e Áreas Suscetíveis ao Afundamento.

Após sobreposição das curvas topográficas, fotointerpretação, perfis de geofísica e levantamentos de campo foi possível gerar o mapa de feições cársticas, que compreendem dolinas e outros afundamentos. Também foi possível delimitar áreas onde ainda não havia ocorrido o afundamento, mas que apresentavam cavidades subterrâneas próximas à superfície. Esta cartografia permitiu elaborar o mapa de suscetibilidade a afundamentos e acomodações do substrato rochoso.

3.3.3 Integração dos Dados e Diagnósticos

Após a integração de todas as cartas temáticas e dos levantamentos de campo foi realizado a integração dos dados. Esta integração permitiu gerar informações que subsidiasse a realização do zoneamento das unidades de aptidão da área de estudo em função de suas características geotécnicas e suscetibilidades.

3.3.4 Definição das Classes de Aptidão

Para a definição das classes de aptidão à urbanização este trabalho considerou as áreas com maior suscetibilidade a afundamentos e acomodações do substrato rochoso (dolinas), e áreas com características geotécnicas que podem ou não favorecer sua ocupação.

Após a realização de todas as etapas citadas anteriormente, o trabalho considerou 3 classes de aptidão, são elas: Alta Aptidão à Urbanização, Média Aptidão à Urbanização, Baixa ou Inexistente Aptidão à Urbanização.

3.3.5 Carta Geotécnica de Aptidão à Urbanização

O trabalho optou pela elaboração de uma carta geotécnica de fácil compreensão e aplicação voltada, principalmente, para uso da administração municipal.

As classes contidas na Carta Geotécnica de Aptidão à Urbanização estão representadas por 3 cores, verde, amarelo e vermelho, com transparência sobre a imagem (Fusão do MDE e Ortofoto). Na carta estão descritas as características das áreas frente à ocorrência de afundamentos cársticos, frente as características geotécnicas e recomendações de uso.

4.1 LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO

A área de estudo compreende a zona urbana e periurbana da cidade de Lapão-BA, tendo como coordenada de referência central da área UTM 190696 E / 8740217 S (Figura 4.1). Está situada a uma altitude média de 770m e inserida nas bacias hidrogeológicas do Rio Verde e do Rio Jacaré, que juntas drenam e dão forma ao aquífero cárstico da região. O acesso à área a partir de Salvador é realizado pela BR-324 até a cidade de Feira de Santana e logo após seguindo pela rodovia estadual BA-052 (Rodovia do Feijão) até o município de Irecê. A partir desta cidade, mais 10 km na direção sul até a cidade de Lapão via BA-148 e BA-432.

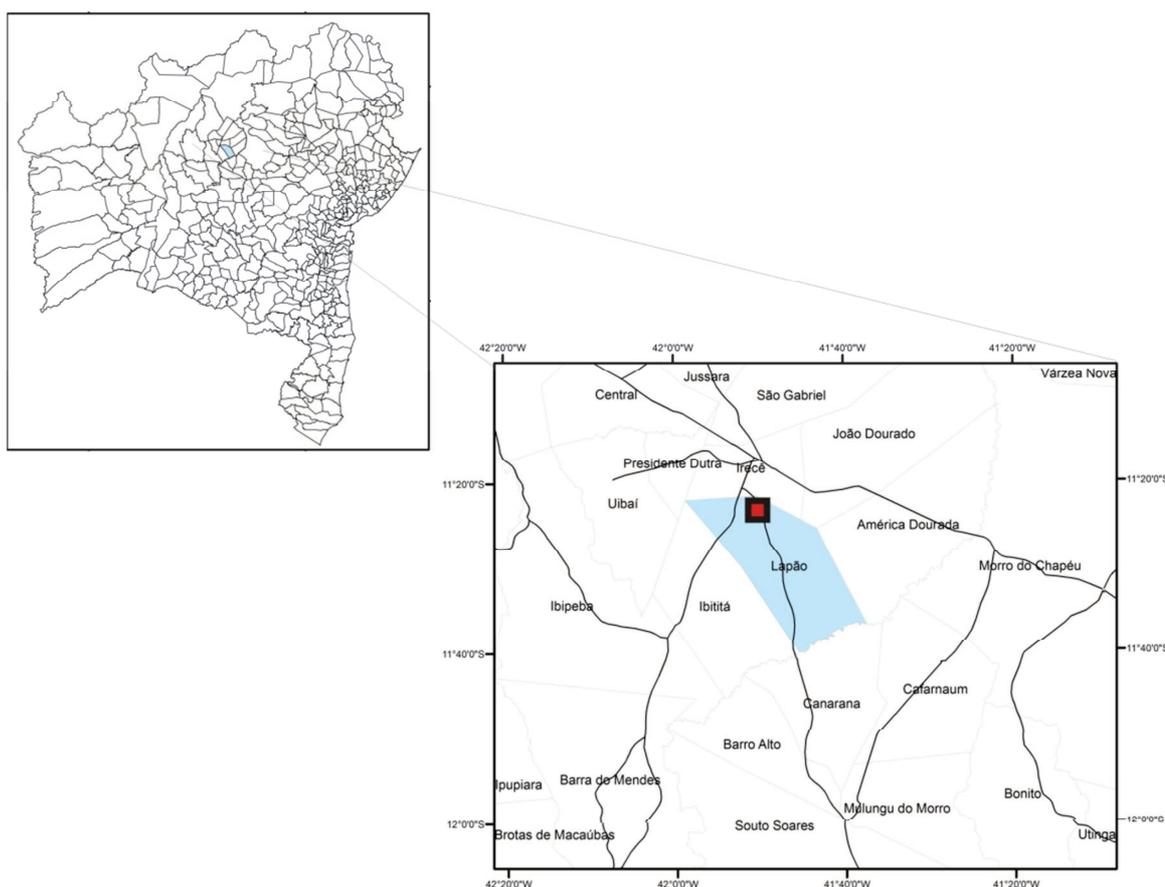


Figura 4.1: Localização da área de estudo (vermelho) no norte do município de Lapão, interior do estado da Bahia.

4.2 ASPECTOS CLIMÁTICOS

O clima desempenha um papel muito importante na região, pois tem participação direta nos processos de infiltração, circulação e armazenamento de água, evolução e desenvolvimento e do carste.

A região de Lapão está inserida no chamado de Polígono das Secas, região central do estado da Bahia que apresenta grande variação espacial e temporal das chuvas. Dados de monitoramento da estação meteorológica nº 83182 (INMET) na cidade de Irecê, a menos de 20 km da área de estudo, mostram que a maior pluviosidade nos últimos 10 anos na região foi de 748,8mm, no ano de 2005; enquanto que a menor foi de 312,1mm, em 2012 (Tabela 1). O gráfico abaixo mostra a distribuição das chuvas nos últimos dez anos na região (Figura 4.2).

Tabela 4.1: Dados climatológicos dos últimos dez anos região de Irecê. Fonte: INMET. Acesso em 21 de agosto de 2014.

ANO	DIAS DE PRECIPITAÇÃO	PRECIPITAÇÃO TOTAL (mm)	TEMP. MAX. MÉDIA °C	TEMP. MIN. MÉDIA °C
2004	34	530,70	30,03	16,17
2005	47	748,80	30,00	17,17
2006	52	741,90	30,00	17,35
2007	40	389,60	30,45	16,11
2008	49	540,70	30,67	16,12
2009	60	692,91	30,87	16,11
2010	63	741,50	30,96	17,96
2011	49	464,00	30,56	17,81
2012	31	312,10	31,54	17,74
2013	42	566,70	31,24	15,22

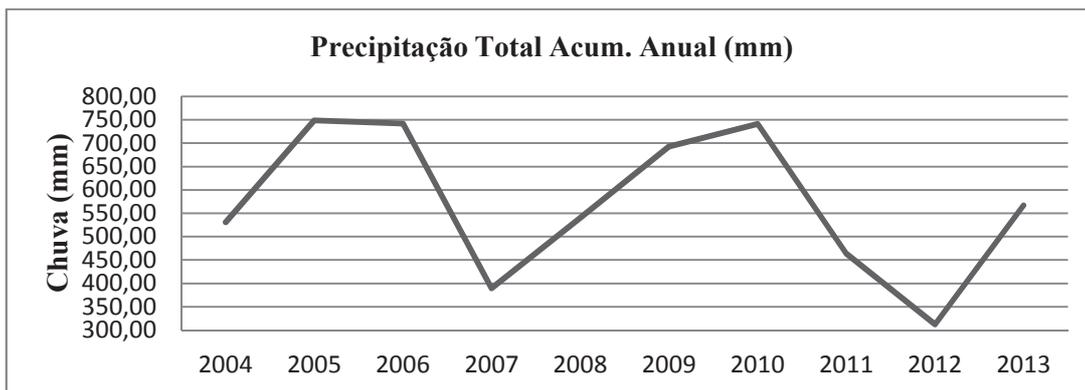


Figura 4.2: Distribuição das chuvas na região de Irecê nos últimos 10 anos. Fonte: INMET. Acesso em 21 de agosto de 2014.

Os dados do INMET para o ano de 2013 mostram grande irregularidade na distribuição das chuvas ao longo do ano, sendo seu período de maior intensidade nos meses de novembro, dezembro e janeiro (Figura 4.3).

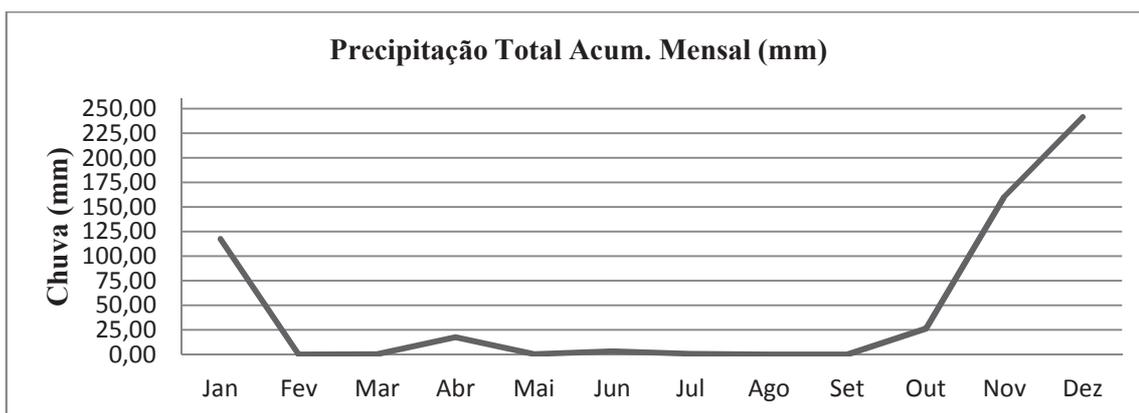


Figura 4.3: Distribuição das chuvas na região de Irecê ano de 2013. Fonte: INMET. Acesso em 21/09/2014.

A baixa pluviosidade histórica e a escassez de recursos hídricos superficiais são um grande problema na região, pois dificultam a recarga do aquífero local, que tem seu nível estático cada vez mais profundo em função do uso indiscriminado das águas subterrâneas, principalmente, nas atividades agrícolas.

As figuras 4.4 e 4.5 apresentam, respectivamente, uma constante nos valores médios das temperaturas máximas e mínimas na região ao longo dos últimos dez anos e no ano de 2013.

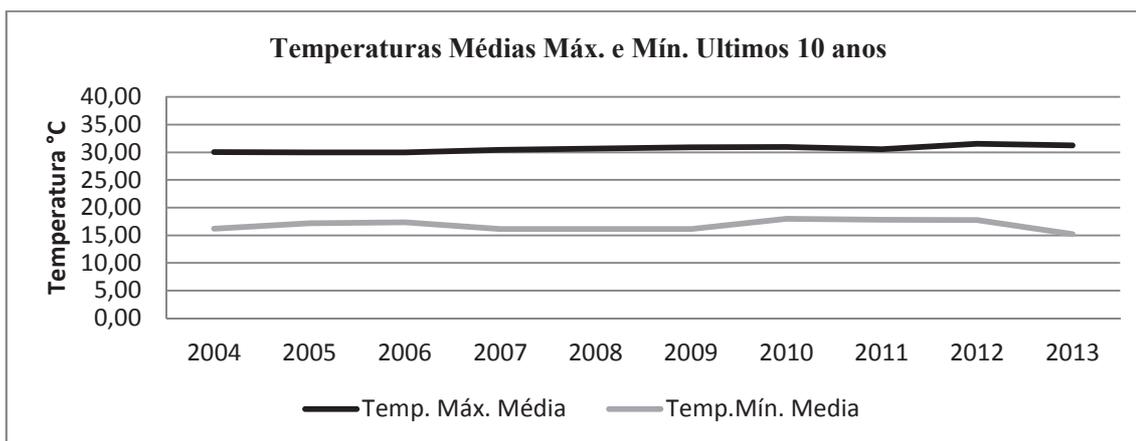


Figura 4.4: Média das temperaturas anuais máximas e mínimas na região de Irecê. Fonte: INMET. Acesso em 21/09/2014.

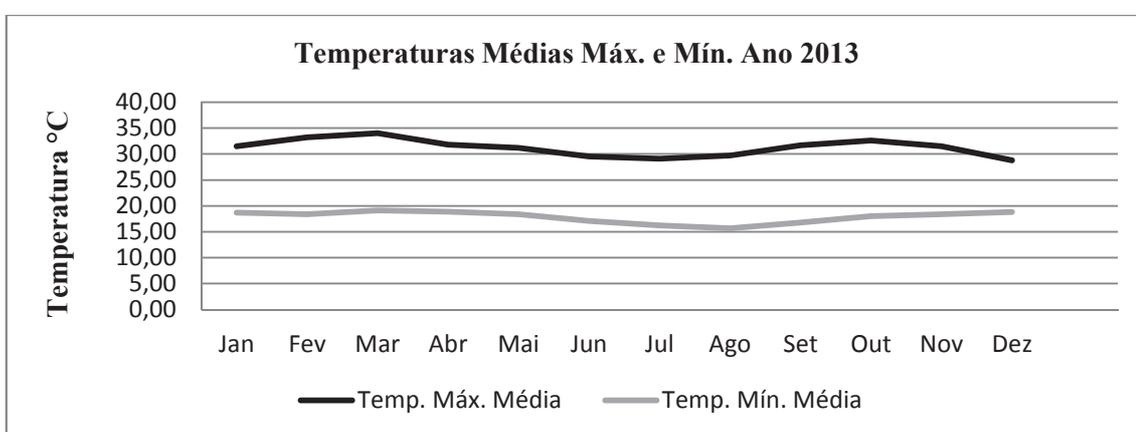


Figura 4.5: Média das temperaturas mensais máximas e mínimas na região de Irecê. Fonte: INMET. Acesso em 21/09/2014.

4.3 SOLOS

Na área de estudo predominam os solos denominados de Cambissolos Eutróficos, originados de rochas calcárias (CAVENDON, 1986; RESENDE *et al.*, 1988), que possuem um matiz avermelhado, textura argilosa ou muito argilosa, muito rasos a moderadamente profundos e bem a moderadamente drenados.

Estes solos, em termos de utilização são os mais importantes da região de Irecê, por apresentarem alta fertilidade natural e um relevo que favorece o uso de máquinas agrícolas. São os solos mais cultivados da área, onde se destacam as culturas de feijão, cenoura, tomate, beterraba e cebola (SRH-PDRH, 1995).

Coutinho (2000) analisou os impactos da agricultura intensiva irrigada nas propriedades físicas e químicas de solos da região de Irecê e concluiu que ocorreram mudanças significativas nas propriedades dos solos. As propriedades físicas mais afetadas foram: a porosidade, densidade do solo, condutividade hidráulica, taxa de infiltração e capacidade de retenção de água. As propriedades químicas que apresentaram alterações mais significativas foram matéria orgânica, magnésio, sódio, fósforo, condutividade elétrica e percentual de sódio trocável. Além disso, o autor observou mudanças na espessura e estrutura dos horizontes superficiais.

4.4 VEGETAÇÃO E USO DO SOLO

A vegetação original existente na área é classificada como “caatinga hipoxerófila” (PDPL, *op. cit.*, 2007). Essa vegetação é caracterizada por apresentar folhas pequenas com espinhos, com a perda de folhas no período de estiagem. Em alguns locais sem interferência antrópica, observa-se a caatinga arbustiva, formada por vegetação natural remanescente mais densa e de médio porte.

As classes de uso do solo na região de estudo se subdividem da seguinte maneira: Agropecuária; Cobertura Vegetal Nativa; Áreas Urbanas; Áreas de Mineração e Lixões. As atividades agropecuárias predominam em toda a área, sobretudo as atividades agrícolas, que são as grandes responsáveis pela receita dos municípios de Irecê e Lapão.

4.5 GEOLOGIA

Geologicamente a cidade de Lapão está inserida nos terrenos calcários da Formação Salitre, pertencente ao Grupo Una, na Bacia de Irecê, porção norte do Cráton do São Francisco, setor oriental do Aulacógeno Paramirim (CRUZ e ALKMIM, 2006) (Figura 4.6).

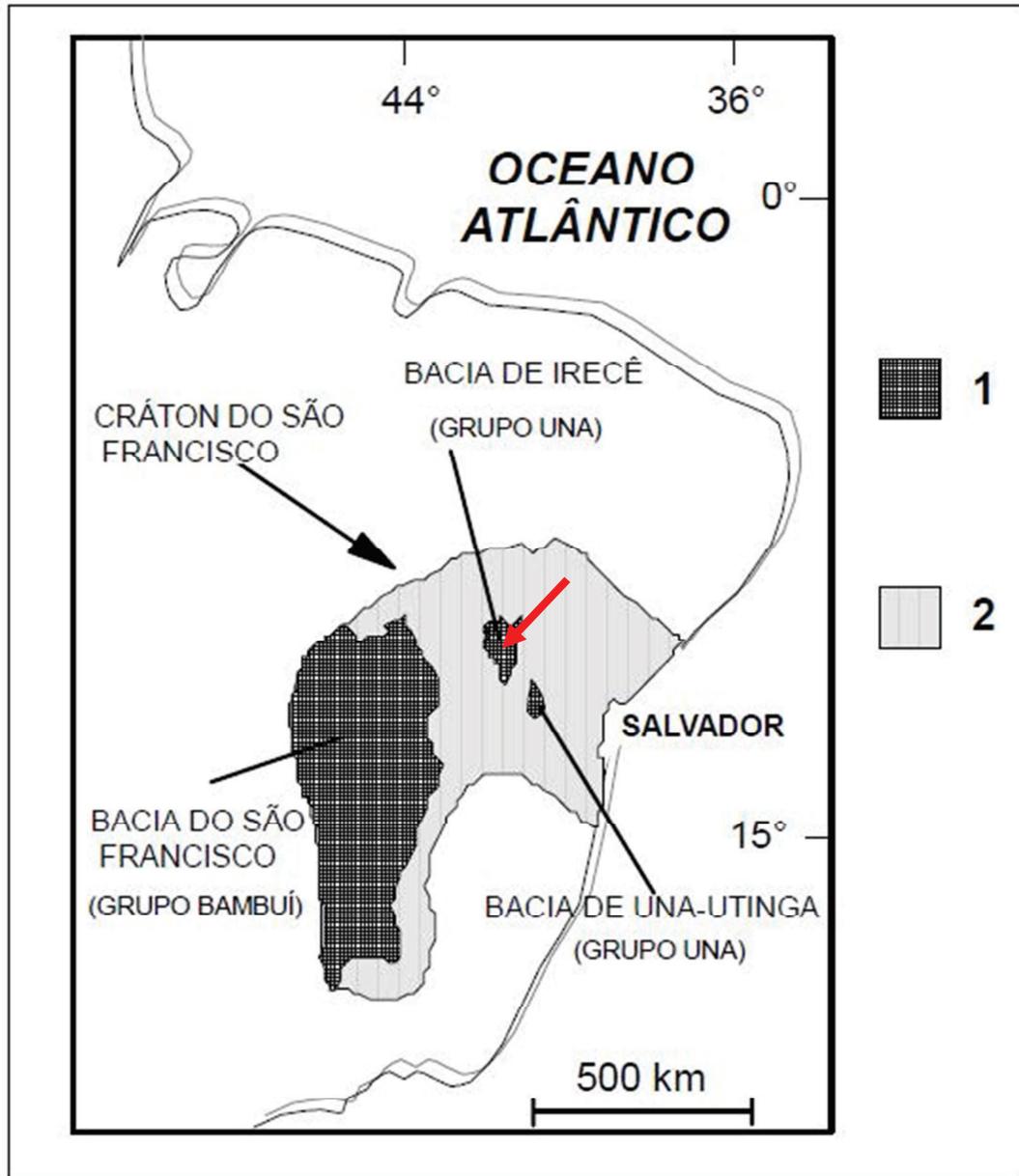


Figura 4.6: Localização das bacias de Irecê, São Francisco, Una e Una - Utinga no Cráton do São Francisco. **1** = Plataformas carbonáticas do Neoproterozoico; **2** = Embasamento (modificado de Misi e Kyle, 1994b). A seta vermelha indica a localização da cidade de Lapão na Bacia de Irecê.

Nessa região, os sedimentos pré-cambrianos do Supergrupo São Francisco assentam-se discordantemente sobre o embasamento arqueano/paleoproterozoico, cujas principais exposições são restritas às porções noroeste e sudoeste da região (Figura 4.7).

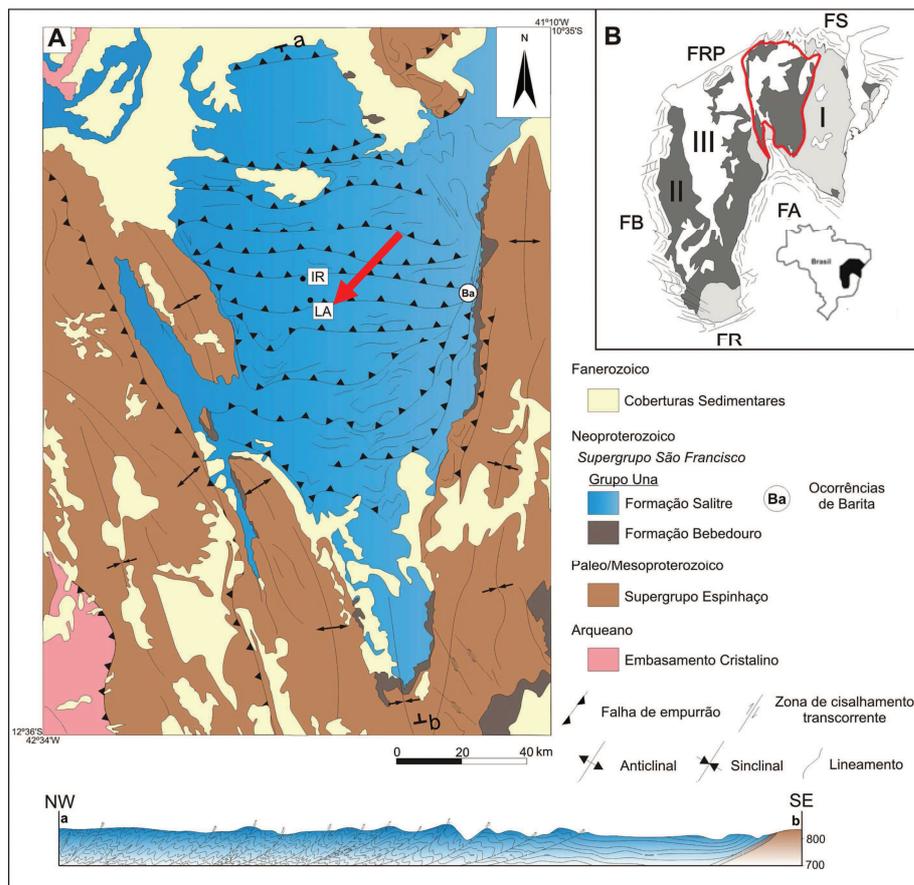


Figura 4.7: (A) Mapa e perfil geológicos simplificados da Bacia de Irecê e adjacências. Modificado de Kuchenbecker *et al.* (2011), Dalton de Souza *et al.* (2003), Lagoeiro (1990) e Danderfer Filho (1990). (B) Cráton do São Francisco e faixas marginais (ALKMIM, 2004). A seta vermelha indica a localização da cidade de Lapão.

4.5.1 Supergrupo Espinhaço

Na Bahia este Supergrupo é compartimentado em dois grandes domínios fisiográficos: **(i) domínio do Espinhaço Setentrional**, a oeste, e **(ii) domínio da Chapada Diamantina**, a leste, separados fisicamente pelo vale do Rio Paramirim.

No domínio fisiográfico da Chapada Diamantina, o Supergrupo Espinhaço é subdividido, da base para o topo, nos grupos Rio dos Remédios, Paraguaçu e Chapada Diamantina (Figura 4.8). Dominguez (1993) reuniu os grupos Paraguaçu e Rio dos Remédios em uma mega-sequência deposicional denominada de mega-sequência Paraguaçu-Rio dos Remédios e reconheceu duas sequências deposicionais no Grupo

Chapada Diamantina, a sequência deposicional Tombador-Caboclo e a sequência deposicional Morro do Chapéu.

GRUPO	FORMAÇÃO	MEMBRO
Chapada	Morro do Chapéu	
	Caboclo	
Diamantina	Tombador	Lavras
Paraguaçu	Guiné	
	Mangabeira	
	Ouricuri do Ouro	
Rio dos Remédios		

Figura 4.8: Estratigrafia do Supergrupo Espinhaço no centro-leste da Chapada Diamantina. Fonte: Pedreira (1988).

Grupo Rio dos Remédios

O Grupo Rio dos Remédios compreende rochas vulcânicas ácidas e metassedimentos. As rochas vulcânicas são representadas por riolitos, dacitos, traquitos, tufitos, aglomerados e brechas vulcânicas. Em certos locais elas têm intercalações de quartzitos, quartzitos-sericíticos, conglomerados constituídos por seixos de quartzo e xistos com alumínio-silicatos.

Grupo Paraguaçu

Segundo Pedreira (1988), essas rochas sedimentares foram depositadas dentro de um *graben* e constituem três sistemas deposicionais principais: fluvial, desértico e deltáico. Este autor considera o Grupo Paraguaçu como representando uma sequência deposicional, que começa sob condições continentais subaéreas e/ou litorâneas, passa para ambiente marinho raso e culmina com um assoreamento final representado pela progradação de um sistema deltáico.

Grupo Chapa Diamantina

O Grupo Chapada Diamantina é dividido, da base para o topo, nas Formações Tombador, Caboclo e Morro do Chapéu (BRITO NEVES, 1967), sendo estas formações

constituídas de arenitos, argilitos, conglomerados e subordinadamente carbonatos, encontrados nas partes superiores e inferiores da Formação Caboclo.

Segundo Otero *et al.* (1989), as rochas arenosas com estratificação cruzada tabular, estratificação cruzada acanalada e estratificação plano-paralela que constituem a Formação Tombador foram depositadas por rios temporários e retrabalhadas pelo vento, produzindo um mar de areia (*erg*). Estas rochas arenosas passam gradacionalmente, no sentido do topo, para os pelitos e arenitos finos interestratificados com níveis subordinados de carbonatos da Formação Caboclo, depositada em uma plataforma marinha rasa dominada por tempestades (SILVEIRA, 1991).

A Formação Morro do Chapéu, segundo Dominguez (1993), corresponde a outra sequência deposicional, começando com conglomerados e arenitos conglomeráticos de origem fluvial, passando gradacionalmente no sentido do topo para arenitos bem selecionados e pelitos, interpretados como depositados em um ambiente estuarino.

4.5.2 Supergrupo São Francisco

O Supergrupo São Francisco compreende um conjunto de rochas predominantemente carbonáticas, depositadas em ambiente marinho. Na região oeste da Bahia, o Supergrupo é constituído pelo o Grupo Bambuí e pelo Grupo Una (GUIMARÃES *et al.*, 2008 e LOUREIRO *et al.*, 2009), aflorantes nas bacias de Irecê e Una - Utinga.

Grupo Una

Historicamente o Grupo Una tem sido dividido em duas formações: Formação Bebedouro, composta por diamictitos glacio-marinhos na porção basal e Formação Salitre, constituída por sequências carbonáticas.

- ***Formação Bebedouro***

A Formação Bebedouro na sub-bacia de Irecê está disposta em quase toda sua borda e

possui uma espessura bastante variável (MISI e SILVA, 1996), tendo sido verificada desde poucos metros a cerca de setenta metros.

Litologicamente a Formação Bebedouro compreende: (i) diamictitos com matriz grauváquica, arcósiana e quartzo-arenítica, na qual flutuam grânulos, seixos e matações de composições variadas; (ii) arenitos (grauvacas, arcóseos e quartzo-arenitos), com ou sem clastos associados e;(iii) pelitos com ou sem clastos associados (GUIMARÃES e DOMINGUEZ 1995), enquanto a Formação Salitre é constituída quase inteiramente de carbonatos e cujo a sequência estratigráfica se inicia com um nível dolomítico.

- **Formação Salitre**

A Formação Salitre representa um pacote de rochas essencialmente carbonática. Segundo Dominguez (1993), a Formação Salitre é constituída por várias litofácies carbonáticas, tendo sido depositada em uma bacia formada no contexto de um mar epicontinental (Figura 4.9).

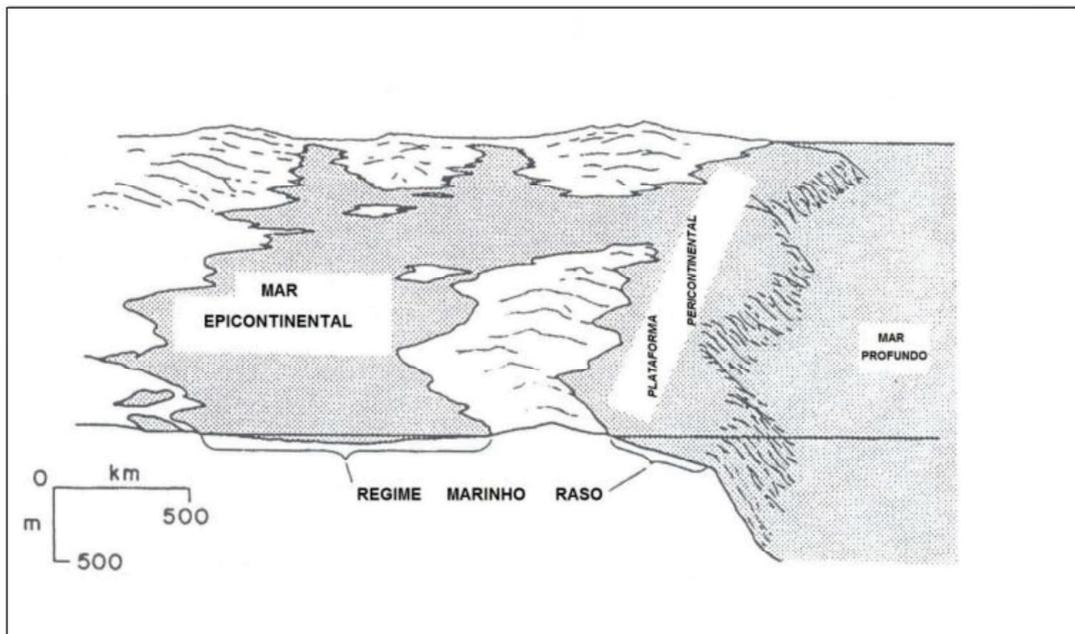


Figura 4.9: Esquema de um mar epicontinental, onde foi depositada a Formação Salitre. Fonte: Heckel (1972).

A figura 4.11 mostra o mapa geológico da área de estudo. Na área ocorrem todas as unidades descritas por Bomfim *et al.* (1985), exceto Unidade Gabriel. A seguir serão descritas as Unidades da Formação Salitre que integram a área de estudo.

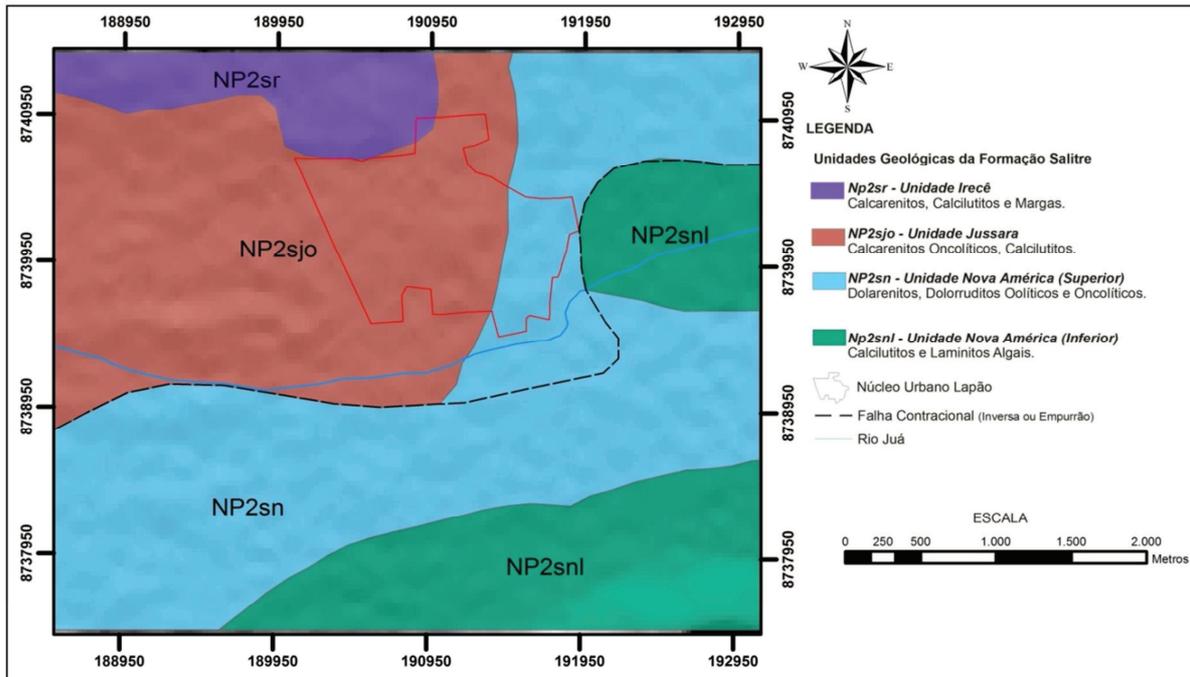


Figura 4.11: Mapa Geológico simplificado da Área de Estudos sobreposto a imagem de relevo sombreado - Lapão - BA. Modificado Mapa Geológico Folha SC. 24-Y-C Jacobina. Fonte: GEOBANK. Mapas Geológicos Estaduais (pós 2003). Folha SC. 24-Y-C Jacobina. Disponível em: <http://geobank.sa.cprm.br>. Acesso em 29/06/2013.

Unidade Nova América

A unidade Nova América, associada ao ciclo regressivo, foi dividida em duas subunidades por apresentarem características de sedimentação associados a ambientes de supramaré e intermaré.

Subunidade Nova América Inferior (Supramaré)

Essa Unidade ocorre em cerca de 20% da área de estudo, localizando-se em grande parte nas áreas E-NE e S-SE; sendo constituída fundamentalmente por dois tipos litológicos: calcissiltitos com laminações plano-paralelas (Figura 4.12) e laminitos

algais francamente ondulados. Estruturas do tipo "tepee" associadas aos laminitos algais são encontradas nesta unidade, sendo indicativas de exposição subaérea periódica.



Figura 4.12: Calcilutitos Laminados - Lapão. UTM (190868 E / 8738119 S).

Subunidade Nova América Superior (Intermaré)

Essa Unidade ocorre em cerca de 40% da área de estudo, localizando-se em grande parte das áreas, E-SE, SW e NW; sendo constituída fundamentalmente por: dolarenitos cinza claro (Figura 4.13), dolorruditos oolíticos e oncolíticos. Nesta unidade também estão associados ocorrências de fosfato.



Figura 4.13: - Dolarenito cinza claro - Lapão. UTM (190603 E / 8738471 S). Bússola de escala.

Unidade Jussara (Submaré)

Essa Unidade localiza-se, sobretudo, nos setores centro-oeste e norte da área, representando cerca de 30% da área de estudo. Esta unidade é constituída fundamentalmente por: calcarenitos finos, médios e grossos oolíticos e oncolíticos de granulometria grossa. Por vezes ocorrem intercalados com calcilutitos (Figura 4.14) e com níveis de estromatólitos.



Figura 4.14: Calcarenitos intercalados com calcilutitos Laminados - Lapão. UTM (190603 E / 8738471 S).

Unidade Irecê (Talude)

Essa Unidade aflora em cerca de 10% da área, interdigitada com a Unidade Jussara na região N-NW da área de estudos. Constitui-se fundamentalmente por uma alternância de níveis carbonáticos e terrígenos. Os níveis carbonáticos são calcarenitos finos a calcilutitos (Figura 4.15) e os terrígenos são margas, siltitos, arenitos e sílex. A Ausência de estruturas sugere uma deposição abaixo do nível das ondas.

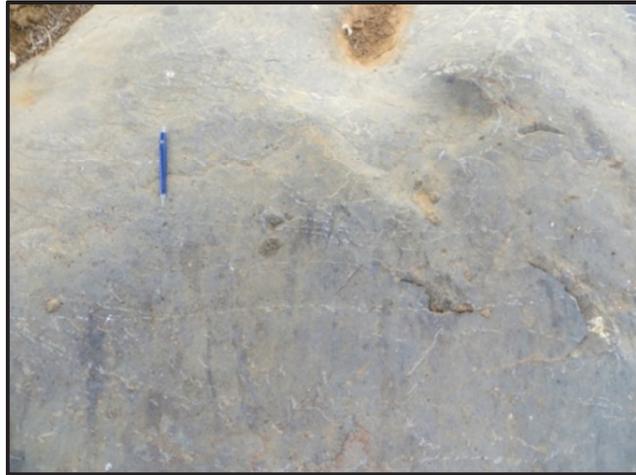


Figura 4.15: Calcilutitos sem estruturas - Lapão. UTM (190603 E / 8738471 S). Lapiseira de escala.

4.5.3 Evolução Tectônica

Barbosa e Dominguez (1996) acreditam que os Supergrupos Espinhaço e São Francisco nas suas áreas de ocorrência no Estado da Bahia, se acumularam em uma bacia de caráter extensional, cuja origem provavelmente está relacionada com a evolução poli-histórica de um rift abortado.

Dominguez (1993) propôs um modelo evolutivo para glaciação Bebedouro-Macaúbas que afetou extensivamente o paleocontinente São Franciscano, e resultou na deposição de diamictitos glaciais da Formação Bebedouro do Supergrupo São Francisco. Com o fim da glaciação, ocorreu uma subida do nível do mar, que resultou na inundação do Cráton do São Francisco, aliado a expansão das margens passivas, terminando com a implantação de plataformas carbonáticas que deram origem a Formação Salitre. Neste período ocorreram importantes episódios fosfatogênicos na bacia, que resultaram na mineralização em fosfato. Por fim, no final do neoproterozoico, eventos compressivos nas bordas do Cráton do São Francisco resultaram no desenvolvimento de faixas de dobramentos que bordejam o Cráton e eventos compressivos nas bacias (Figura 4.16).

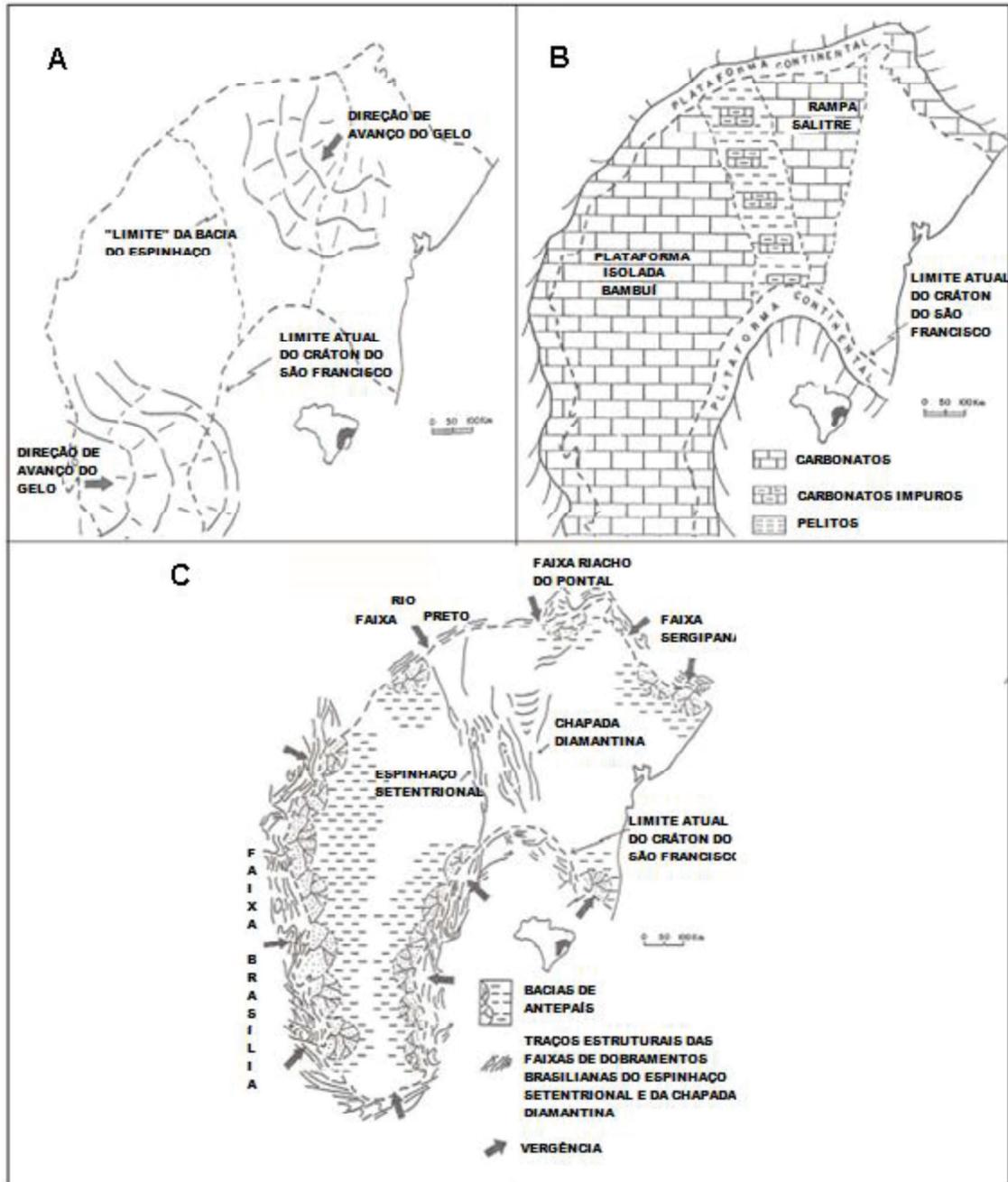


Figura 4.16: Estágios de evolução do Cráton do São Francisco propostos por Dominguez (1993): **A)** A glaciação Bebedouro-Macaúbas envolveu grande parte do Cráton; **B)** Ao final da glaciação ocorreu subida do nível eustático do mar que inundou o Cráton, juntamente com uma expansão da subsidência das bordas para o interior do Cráton, relacionada à evolução das margens passivas, resultou na implantação de importantes plataformas carbonáticas; **C)** Colisões nas margens do Cráton com geração de cinturões de dobras e empurrões ao final do Proterozoico Superior, resultando na colocação de cargas sobre a litosfera do Cráton.

As coberturas pré-cambrianas ao longo de toda a Chapada Diamantina encontram-se envolvidas em dois sistemas deformacionais distintos (DANDEFER FILHO, 1990;

DANDEFER FILHO *et al.*, 1993; LAGOEIRO, 1990). O primeiro compõe um cinturão de dobramentos e empurrões regionais de caráter embrionário, com orientação preferencial NNW-SSE e vergência para ENE. O segundo é representado por um conjunto de dobras e falhas de caráter epidérmico que envolve, predominantemente, os carbonatos do Grupo Una ao longo do setor norte da Chapada Diamantina. Tais estruturas exibem traços superficiais orientados em torno da direção E-W e vergência para sul.

Conforme diversos autores (DANDEFER FILHO, 1990; LAGOEIRO, 1990; DANDEFER FILHO *et al.*, 1993; ALKMIM, 2004) estes dois sistemas correspondem a expressão intracratônica das sucessivas orogenias que afetaram as margens do Cráton São Francisco ao fim da era Neoproterozoica.

O sistema conjugado de fraturas observados na região de Lapão (Figura 4.17) é consequência dos efeitos de uma compressão regional (*far-field stress*) orientada segundo a direção N-S (COSTA, 1989) (Figura 4.18), no qual o esforço principal, sigma 1 no elipsóide de tensão, encontra-se na bissetriz do ângulo agudo e, na bissetriz do ângulo obtuso encontra-se sigma 3. O sigma 2 é ortogonal a ambos e posicionado na intersecção das demais fraturas (Figura 4.19).

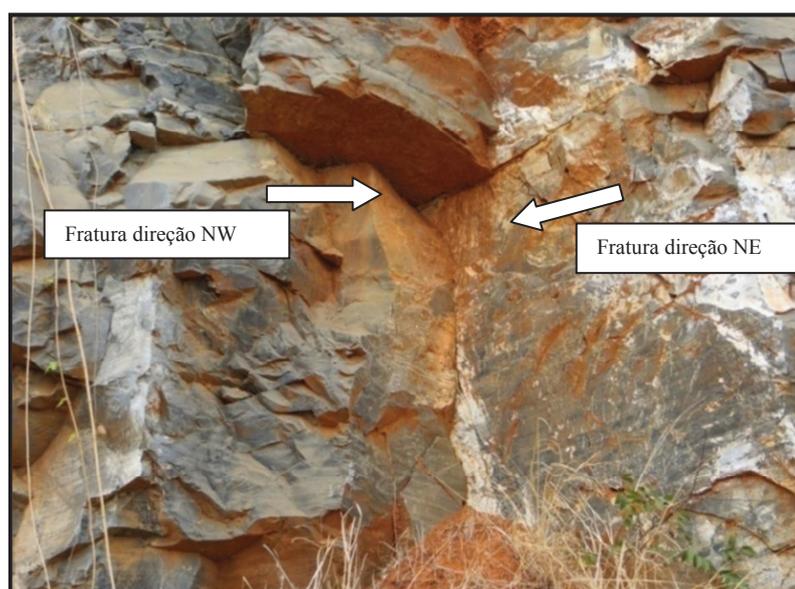


Figura 4.17: Intersecção de par conjugado de fraturas de direções NW e NE. Lapão - BA. UTM 190067E / 8740858 S

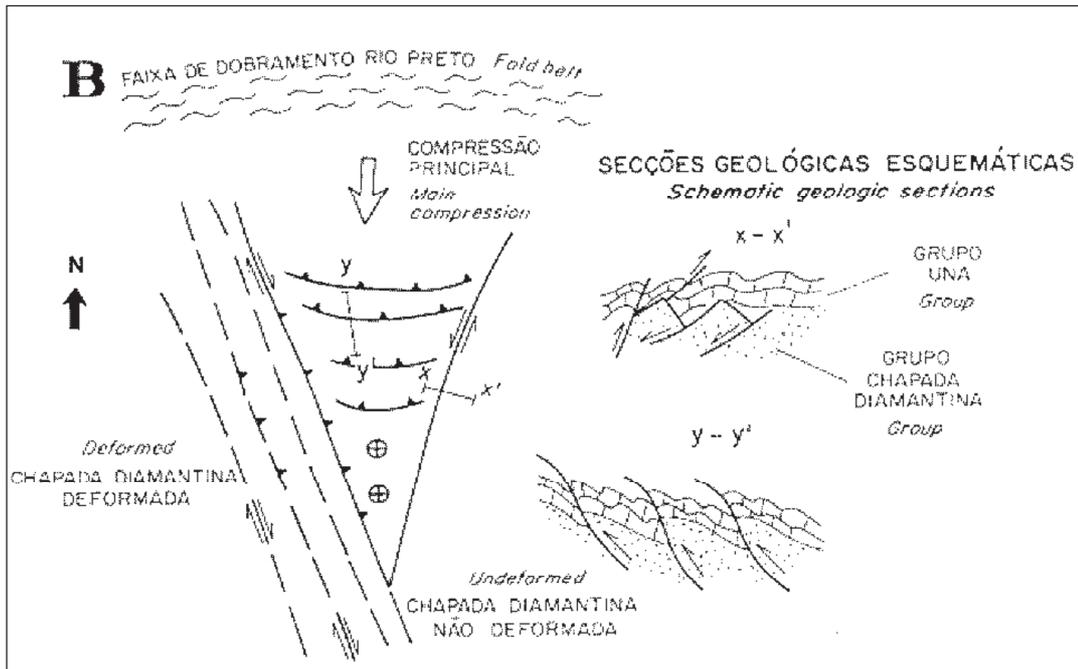


Figura 4.18: Síntese da evolução estrutural do Grupo Una. Fonte: Costa (1989).

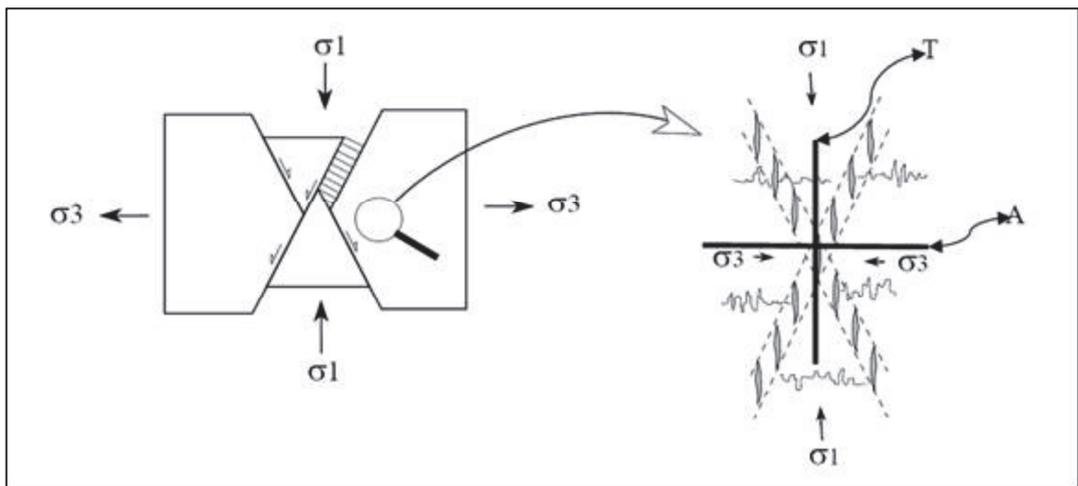


Figura 4.19: Visão em planta do ambiente tectônico transcorrente. Para orientação dos tensores principais, considerar sigma 1 e sigma 3 horizontais e sigma 2 vertical, e as fraturas abertas (T e A). Fonte: Maia *et al.* (2010).

Em trabalho realizado por Nossa *et al.* (2009) em Lapão para determinação da influência do sistema de fraturamentos no regime de fluxo do aquífero, os autores construíram o diagrama de rosetas dos principais sistemas de fraturas presentes na área (Figura 4.20). Observa-se no diagrama que o sistema predominante das estruturas

rúpteis é E-W. Segundo Maia *et al.* (2010), a este sistema se associam as fraturas abertas do tipo "A" (Figura 13).

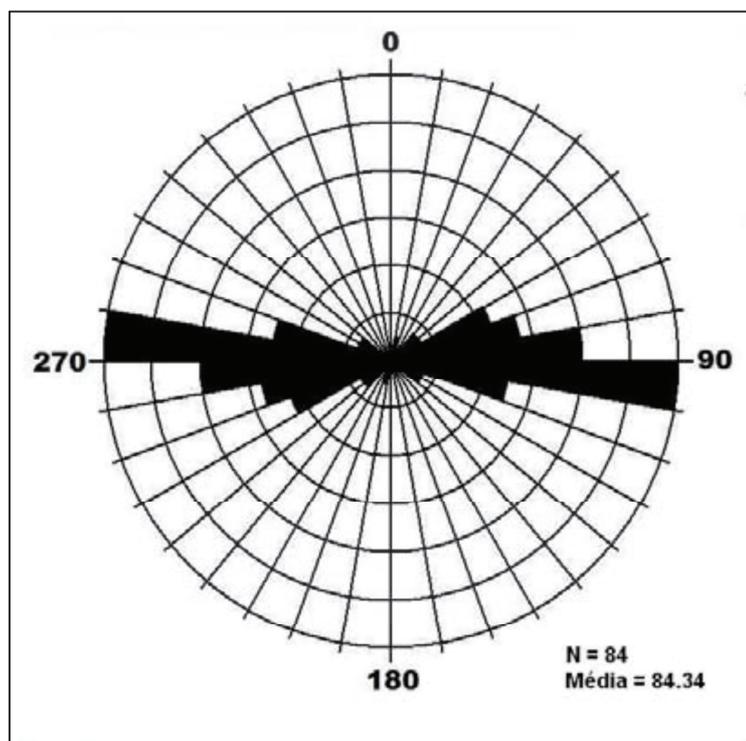


Figura 4.20: Diagrama de rosas representativo de fraturas do município de Lapão. Fonte: Nossa *et al.* (2009).

4.6 GEOMORFOLOGIA

De acordo com Bastos Leal e Silva (2004), a geomorfologia do Planalto Cárstico de Irecê apresenta um modelado compreendido por uma região serrana, com altitude de até 1.200m e um platô ou pediplano com topografia variando de 400m a 800m. A parte mais elevada, ao sul, possui um caimento geral em patamares para Norte e Nordeste, em direção ao rio São Francisco, resultando em cinco regiões com características morfológicas diferentes, a Área Central Deprimida, Chapada de Irecê, Baixadas do Médio Curso do Rio Verde, Campos da Margem Direita do Sobradinho e Áreas Elevadas do Planalto da Chapada Diamantina (bordas da Bacia). A área de estudo está localizada na porção compreendida pela Chapada de Irecê, descrita a seguir:

4.6.1 Chapada de Irecê

A região da Chapada de Irecê possui altimetria que varia de 600m a 800m, com declividades pouco acentuadas, predominantes de 2% a 8%, coincidentes com as áreas de afloramentos dos calcários da Formação Salitre, pertencente ao Grupo Una.

Caracteriza-se por uma topografia plana a suavemente ondulada, com elevações suaves e sem a formação de escarpas, apesar de localmente apresentar amplitudes consideráveis de variação altimétrica entre o topo e a base.

Na da área de estudo o relevo exibe o mesmo padrão dominante de relevo da Chapada de Irecê, predominantemente aplainado com algumas colinas isoladas (Figura 4.21). As cotas de altitude na área variam em apenas 22 m, de 764 m (depressões) a 786 m (colinas isoladas).

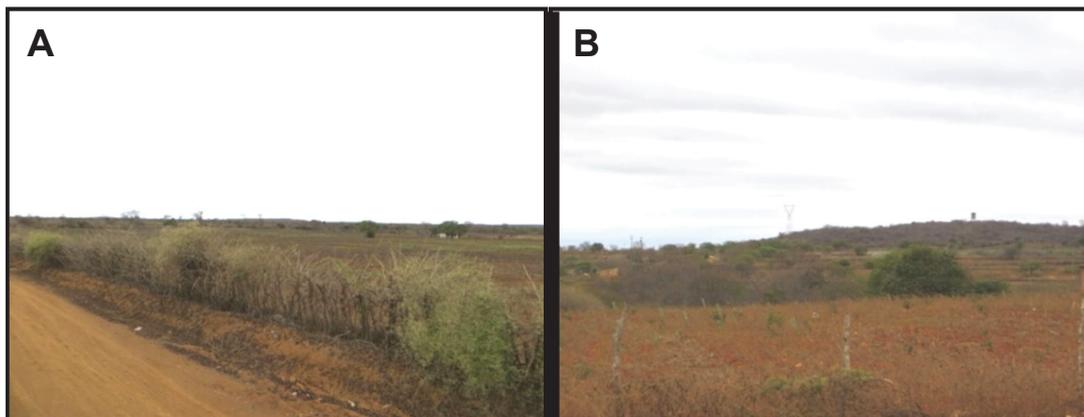


Figura 4.21: (A) Relevo aplainado. UTM: 190796 E / 8738423 S. (B) Colinas isoladas de baixa amplitude UTM: 190943 E/ 8737823 S.

A figura 4.22 (recorte da área de estudo) mostra a topografia com curvas de nível de metro em metro. É possível observar na figura como as feições de elevação e de afundamentos (dolinas e colapsos) são representadas na maioria das vezes sob formas curvas circulares a ovaladas concêntricas.

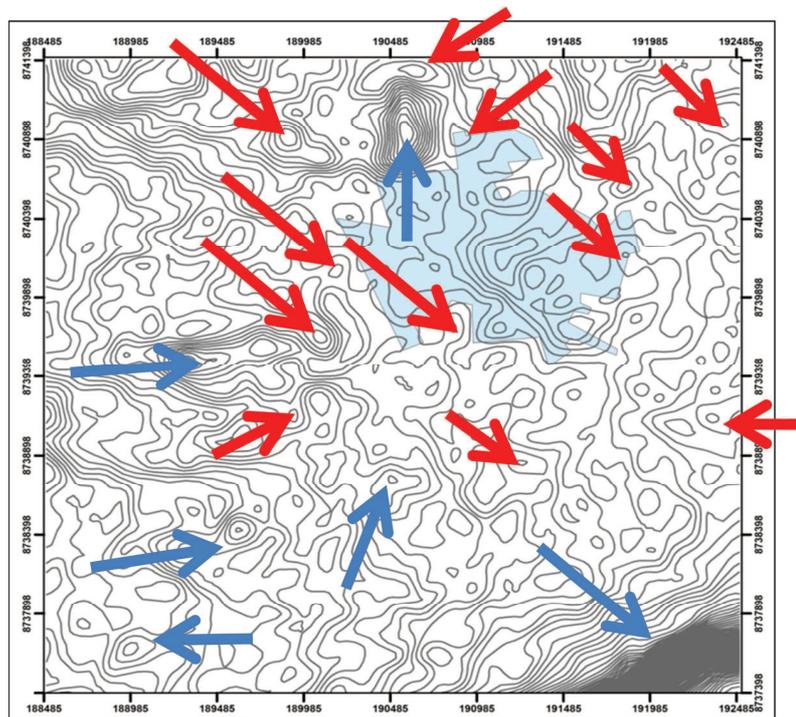


Figura 4.22: Curvas de nível 1m x 1m da área de estudo com localização do núcleo urbano (em azul). As setas azuis indicam áreas elevadas, as setas vermelhas indicam os afundamentos.

A evolução do sistema cárstico reflete diretamente na configuração relevo local. Em diversos pontos dolinas e colapsos podem ser observados. Estas feições se desenvolvem em zonas fraturadas, principalmente, ao longo da bacia do rio Juá (Figura 4.23).



Figura 4.23: Dolinas (em azul) ao longo da bacia do rio Juá. Fonte: CPRM (2013).

4.7 HIDROGEOLOGIA

A área de estudo está totalmente inserida na bacia do rio Juá, um importante afluente da bacia do Rio Verde. A leste da bacia do Rio Verde está a bacia do Rio Jacaré e juntas as bacias possuem uma área aproximada de 32.236 km², englobando os municípios de América Dourada, Barra do Mendes, Barro Alto, Cafarnaum, Canarana, Central, Ibipecta, Ibititá, Irecê, Itaguaçu da Bahia, João Dourado, Jussara, Lapão, Presidente Dutra, São Gabriel, Souto Soares e Uibaí e, parcialmente, os municípios de Bonito, Brotas de Macaúbas, Gentio do Ouro, Ibitiara, Ipupiara, Iraquara, Morro do Chapéu, Mucugê, Mulungu do Morro, Palmeiras, Seabra, Sento Sé, Umburanas e Xique-Xique (Figura 4.24).

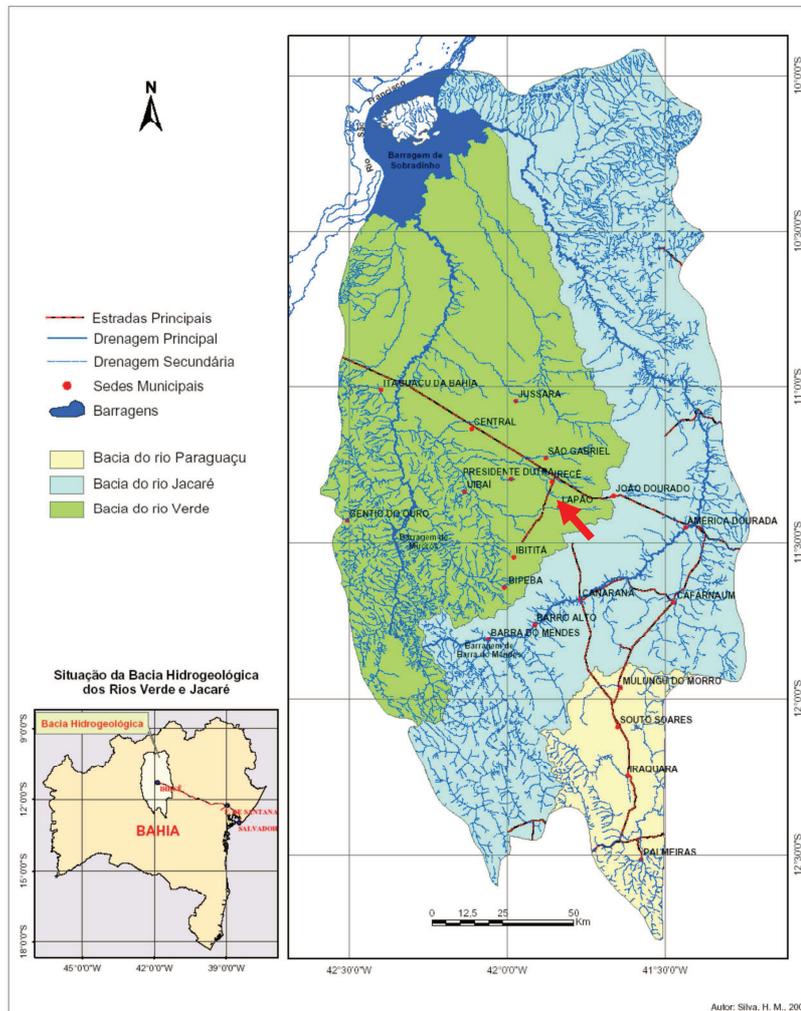


Figura 4.24: Bacia Hidrogeológica dos Rios Verde e Jacaré, BA. A seta vermelha indica o local da área de estudo. Adaptado das Cartas Plani-Altímetricas do Estado da Bahia IBGE/SEI, escala 1:100.000, 2003. Fonte: Silva (2005).

As bacias hidrogeológicas dos Rios Verde e do Rio Jacaré estão, em sua maior parte, inseridas nos domínios do aquífero cárstico da bacia de Irecê, região central do planalto cárstico, e apresentam alta vulnerabilidade aos impactos das frequentes secas na região. Considerando a irregularidade das chuvas e o baixo índice pluviométrico, em torno de 600 mm/ano (INMET), a disponibilidade hídrica apresenta-se como um recurso cada vez mais escasso na região, sendo o abastecimento da população feito por meio de captação de águas superficiais do Rio Verde e da captação das águas subterrâneas através poços tubulares, esta última utilizada em larga escala na agricultura.

Estima-se que hoje existam 3.066 poços cadastrados na região, segundo levantamento da Secretaria de Recursos Hídricos-BA (2004), que utilizam cerca de 25 milhões de m³/ano, e estão concentrados especialmente (60%) na área de quatro municípios (Irecê, João Dourado, América Dourada e Lapão). Segundo informações locais, existem na realidade aproximadamente cerca de 10.000 poços, a maioria instalados sem critérios de outorga, sem estudo de raio e interferência entre poços, cadastro ou autorização pelo órgão gestor (Secretaria de Recursos Hídricos - BA), com todos os riscos de conflitos e comprometimento da qualidade da água.

No contexto da influência das atividades antrópicas na qualidade das águas da região, a agricultura é tida como a principal consumidora e uma das principais poluidoras dos recursos hídricos, sendo a salinidade e a contaminação por nitrato os principais indicadores de poluição das águas (ONGLEY, 2001; BROWN *et al.*, 2000).

Fatores climáticos, geológicos e antrópicos influenciam na renovação das reservas hídricas e na variação da qualidade das águas. Existem na região diversos tipos de sistemas de produção em operação, entretanto, a maioria de baixa eficiência de aplicação da água de irrigação.

4.7.1 Aquífero Cárstico Regional

O aquífero cárstico do platô de Irecê é um aquífero livre associado às rochas carbonáticas neoproterozoicas do Grupo Una, cuja morfologia foi esculpida por

sucessivos ciclos de aplainamentos, resultando em um platô dissecado com altitude média em torno de 800m (RAMOS *et al.*,2007).

Segundo Guerra (1986), devido à interação dos fatores climatológicos, litológicos e elementos estruturais (fraturas e falhas), o sistema aquífero apresenta diferentes estágios evolutivos. As porções norte e central exibem um estágio juvenil com presença de dolinas rasas e de pequeno porte, poucos sumidouros e a rocha apresenta um comportamento parecido com o de rochas fissuradas, onde as formas de absorção mais comuns são planos de estratificações, falhas e fraturas, constituindo um aquífero de natureza cárstico-fissural. Já indo em direção ao sul e, sobretudo, próximo ao contato (bordas leste e oeste) com as litologias do Grupo Chapada Diamantina, o carste apresenta-se bem desenvolvido (dolinas de grande porte e profundas, sumidouros, vales cegos, estruturas de desabamento, etc.) devido à maior disponibilidade de água proveniente das precipitações e da circulação subterrânea (fornecida pelos quartzitos do Grupo Chapada Diamantina), associada a fatores estruturais, principalmente, os fraturamentos e falhamentos de contato (Figura 4.25).

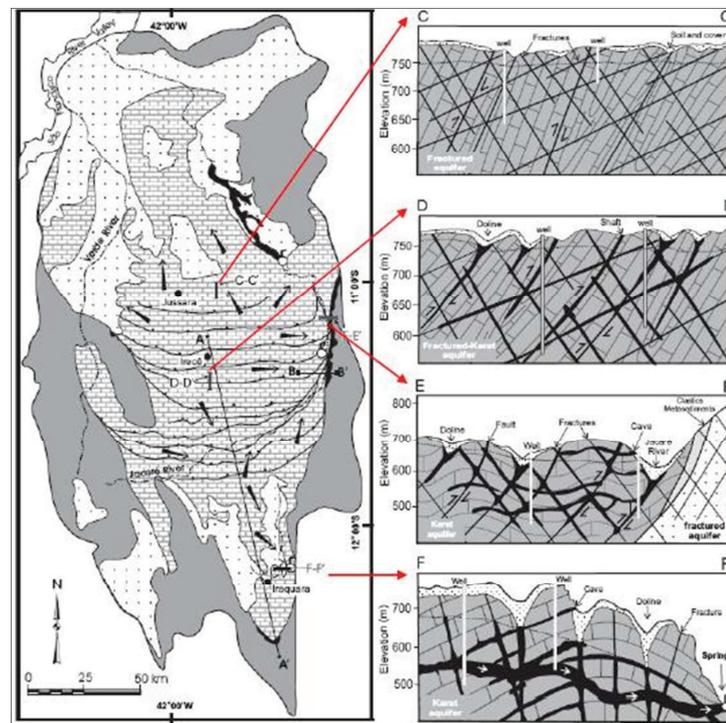


Figura 4.25: Perfis mostrando os diferentes estágios evolutivos do aquífero do planalto cárstico e da região de Irecê. Fonte: Guerra (1986).

De acordo com Bastos Leal e Negrão (2003), a carstificação na região de Irecê também se desenvolve em zonas de charneiras de dobras (Figura 4.26). Segundo os autores, nestas zonas, onde os processos de carstificação são mais intensos, ocorre a convergência do fluxo subterrâneo e a maior disponibilidade de água.

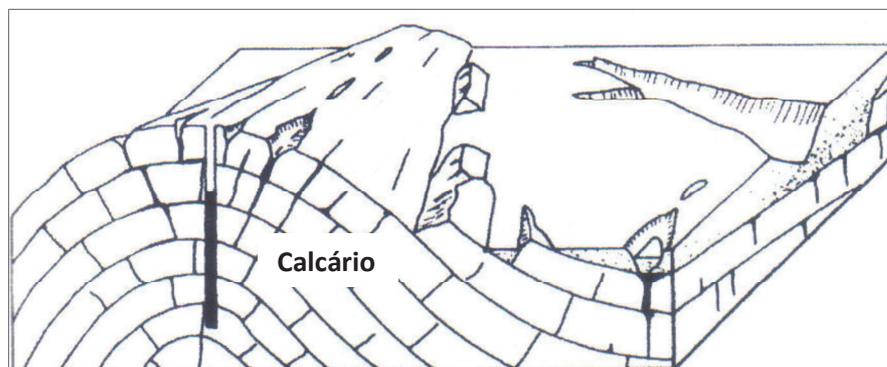


Figura 4.26: Desenvolvimento da carstificação em zona de charneira de dobra. Fonte: Bastos Leal e Negrão (2003).

4.7.2 Aquífero Cárstico de Lapão

O aquífero de Lapão segue o mesmo modelo evolutivo descrito anteriormente para o aquífero do platô de Irecê, entretanto, na área de estudo, este aquífero está condicionado a sub-bacia do rio Juá, encaixado nas rochas carbonáticas da Formação Salitre que afloram na região de Lapão.

O rio Juá nasce na localidade da Gameleira, a leste da cidade de Lapão, e segue sentido oeste até desembocar no rio Verde, já no município de Uibaí. A sub-bacia do Juá possui área de 149,9 Km² e corresponde a 0,5% do total das bacias hidrogeológicas dos rios Verde e Jacaré (Figura 4.27).

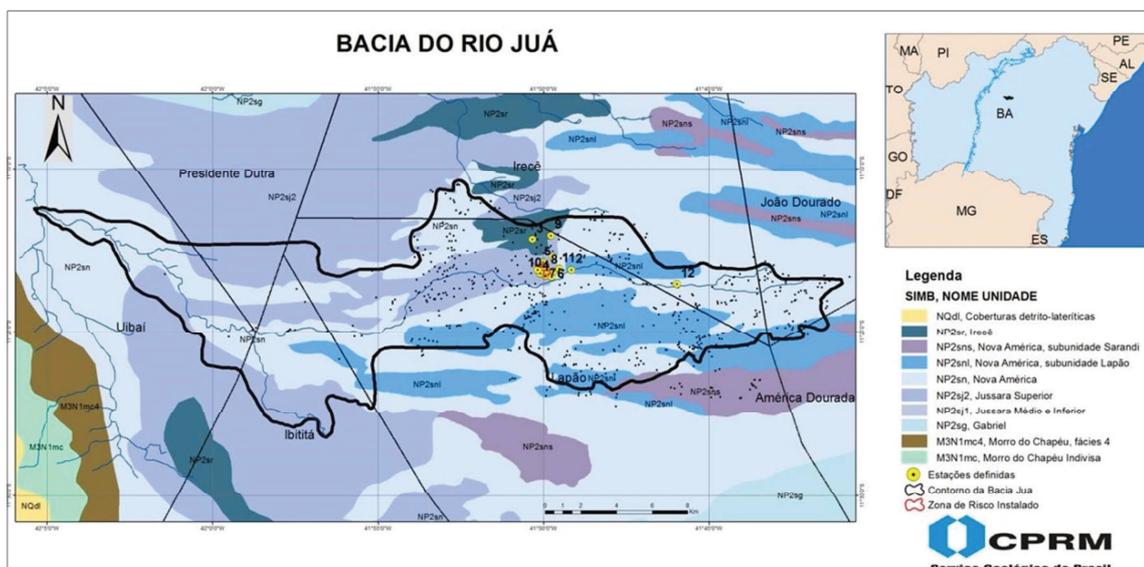


Figura 4.27: Limites da sub-bacia do Rio Juá. Com localização dos poços tubulares cadastrados (pontos pretos) e estações de monitoramento (amarelo) em Lapão. Fonte: CPRM (2013).

Estudos recentes realizados pelo INGA (2009) mostram que nos poços em operação na sub-bacia do Rio Juá são retirados cerca de 35.963,99 m³/dia de água do aquífero (Tabela 1), o que equivale a 4.818 L/h/poço. Em suas conclusões o estudo afirmou que a retirada de água do aquífero é 2,65 vezes maior que a disponibilidade sustentável do aquífero.

Tabela 4.2: Poços cadastrados na sub-bacia do Rio Juá. Fonte: INGA (2009)

	EM USO	DESATIVADOS	SEM INFORMAÇÃO	TOTAL
Nº de Poços	311	263	14	588
Vazão Estimada (m ³ /dia)	35.963,99	-	-	35.963,99

Bastos Leal e Silva (2004) observaram que as variações dos níveis freáticos na região de Lapão apresentam uma significativa correlação com os processos de precipitação e que apenas precipitações acima de 50 mm promovem a subida nos níveis freáticos; além disso, em períodos de precipitações baixas ou nulas ocorre uma queda acentuada dos níveis freáticos dos poços na área.

A relação entre a média anual de precipitação, em torno de apenas 600 mm por ano, e o volume de água retirado indica estar ocorrendo um grande déficit hídrico no aquífero. Isto tem sido observado com o rebaixamento contínuo do nível estático do aquífero.

Segundo informações do coordenador da Defesa Civil Municipal Sr. Rubem Barbosa da Silva, há poucos anos atrás as águas subterrâneas podiam ser obtidas por meio de cacimbas com poucos metros de profundidade, atualmente, os poços para captação de água subterrânea perfurados chegam a atingir uma profundidade 150 m. Durante as décadas de 80 e 90, segundo o Coordenador da Defesa Civil Municipal, o lençol freático aflorava na região. Nas áreas em que já havia ocorrido afundamentos (colapsos e dolinas) formavam-se grandes lagoas, como: Lagoa do Adauto, Lagoa Augusto Leão, Lagoa João Gualberto e a própria Gruta do Lapão. Hoje estas áreas estão secas (Figura 4.28).



Figura 4.28: (A) Gruta do Lapão há anos atrás. Fonte: [/iregiao.blogspot.com.br/2011/07/lapao-bahia.html](http://iregiao.blogspot.com.br/2011/07/lapao-bahia.html) . Acesso: 15/08/2014. (B) Gruta do Lapão hoje. (Foto do autor)

Com o decorrer dos anos e o aumento da produção agrícola na região a construção de poços tubulares para a captação de água, principalmente de uso na agricultura, cresceu em proporções alarmantes, sem que houvesse qualquer estudo de viabilidade do aquífero. Segundo a Defesa Civil Municipal, no período de pico das construções dos poços, existiam mais de 40 perfuratrizes em atividade na região.

Esta exploração não sustentável de água nas últimas décadas alterou a dinâmica do aquífero na região significativamente, e caso não haja uma intervenção imediata do Estado, a situação pode piorar ainda mais, implicando na grande diminuição das reservas hídricas do aquífero e podendo trazer prejuízos à economia da região, que depende das águas subterrâneas, principalmente, para irrigação na agricultura.

5.1 RISCO GEOLÓGICO

A setorização das áreas de risco alto e muito alto da cidade de Lapão foi realizada antes do início deste trabalho de dissertação, em atividade desenvolvida pela CPRM, e foi um dos fatores que motivou a elaboração da carta geotécnica de aptidão à urbanização do município.

Para a realização das setorizações das áreas de risco muito alto, foram utilizadas informações obtidas por meio de fotointerpretação, investigações geofísicas, e trabalhos de campo.

A fotointerpretação permitiu identificar áreas que já apresentavam feições de afundamentos antes de serem ocupadas, como por exemplo, as dolinas, permitiu também fazer a análise espacial do crescimento urbano sobre áreas com alta suscetibilidade a afundamentos nas últimas décadas (Figura 5.1).

As investigações geofísicas permitiram conhecer as características do substrato rochoso a profundidades de até 15 metros em média (a profundidade de investigação varia de acordo com o espaçamento dos eletrodos), como: graus de alteração e saturação do terreno, presença de descontinuidades, vazios ou cavidades subterrâneas, bem como suas formas, profundidades e etc. Estas informações permitiram caracterizar, mesmo que qualitativamente, o grau de risco existente;

O levantamento de campo possibilitou avaliar os danos apresentados pelas edificações em superfície ajudando na delimitação da zona de influência dos afundamentos.

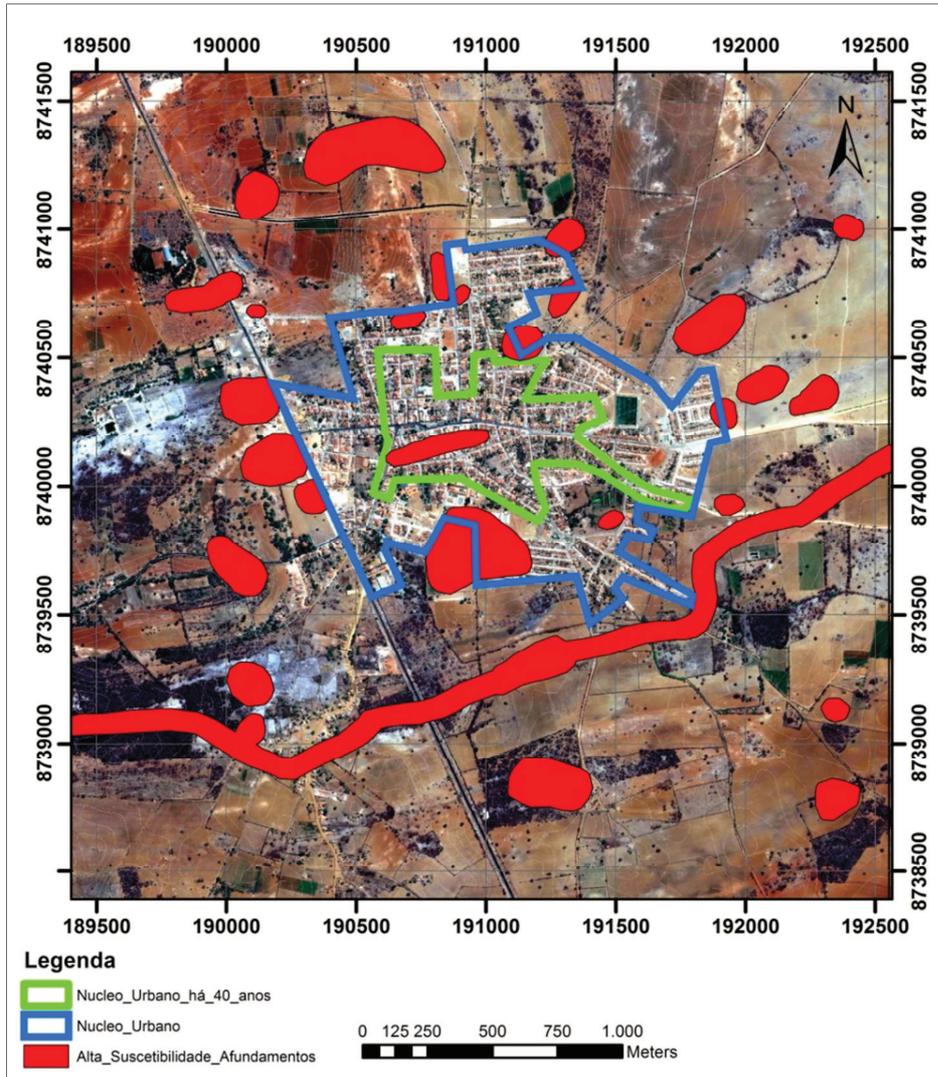


Figura 5.1: Limites do núcleo urbano há 40 anos atrás (Verde) e hoje (Azul). Notar avanço sobre áreas geotecnicamente instáveis.

Diante da integração dos dados obtidos foi possível setorizar três áreas de risco ainda sob influência de processos dos afundamentos: (1) a região da Gruta do Lapão (centro), (2) a região onde foi construído um conjunto habitacional de casas populares (bairro Ida Cardoso), (3) região próxima ao campo de futebol onde foi construído um ginásio (bairro Ida Cardoso) (Figura 5.2).

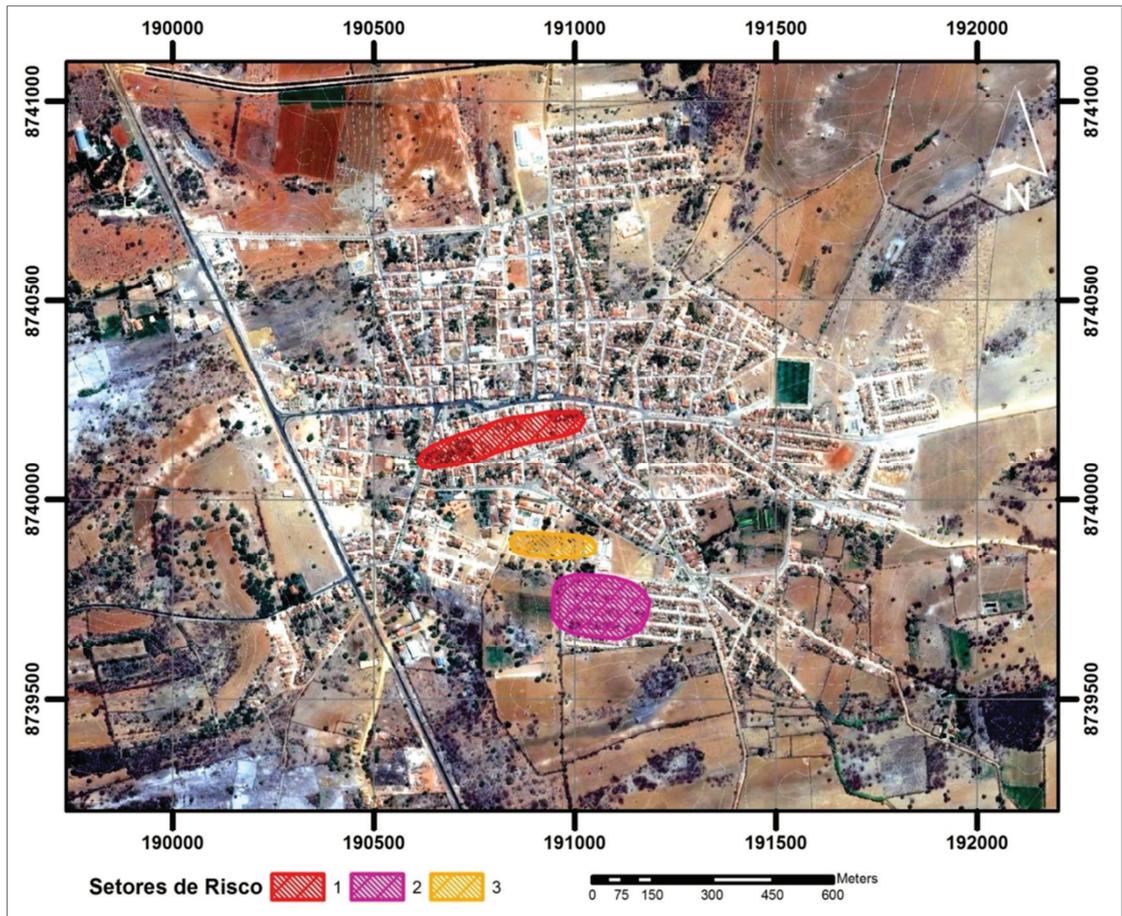


Figura 5.2: Setores de risco muito alto em Lapão. Eixo central (1), Conjunto de casas populares (2) e Área Quadra Esportiva (3).

A seguir serão descritas as principais características das três áreas de risco:

Na região da Gruta do Lapão (setor 1), o processo de subsidência ocorre sob forma alongada, acompanhando estrutura regional de direção próxima a E-W. Esta região é a mais densamente ocupada da cidade, abrigando comércios e residências. As subsidências e pequenos colapsos que ocorreram nesta faixa em 2008 e 2012 provocaram, e ainda podem provocar danos em imóveis e áreas de lazer (Figura 5.3), além de gerar incertezas e certo pânico à população.



Figura 5.3: (A) Trincas na rua. (B) Rachaduras quadra de esportes. (Fotos do autor)

Nesta área foram realizados 3 caminhamentos geolétricos aproximadamente perpendiculares ao eixo de maior comprimento da estrutura (Figuras 5.4). Os resultados indicaram a ocorrência de cavidades e zonas fraturadas e alteradas ao longo de todo o eixo central (Figuras 5.5, 5.6 e 5.7).

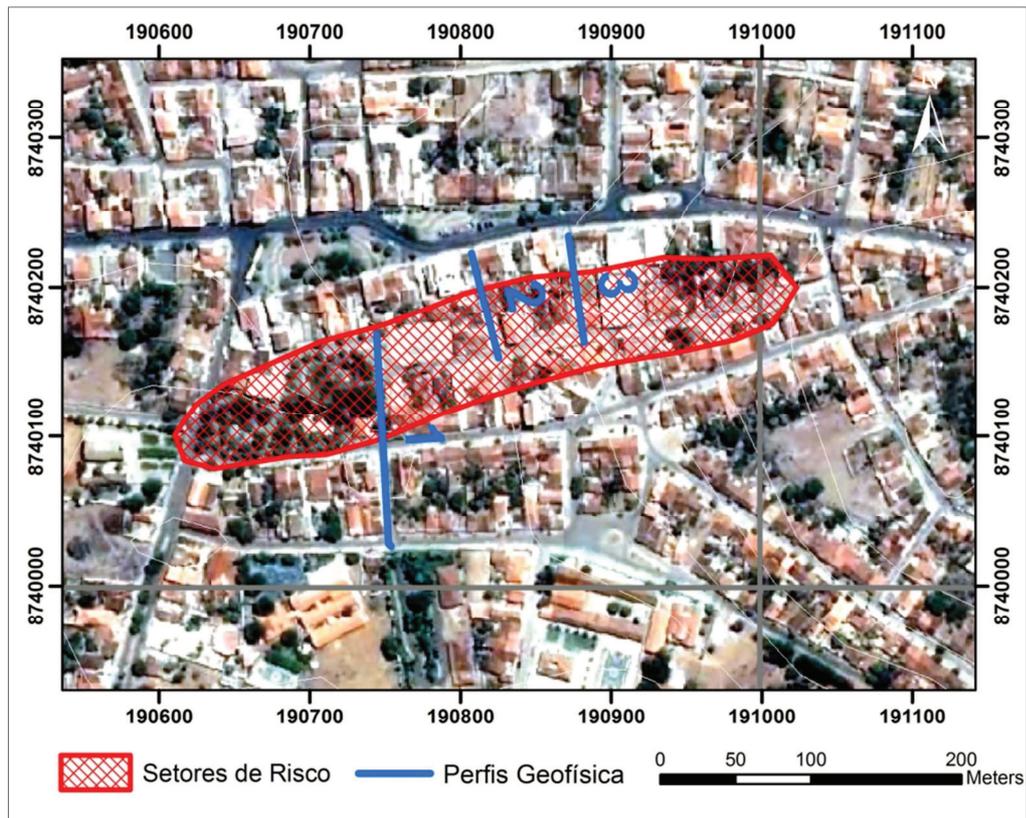


Figura 5.4: Localização dos caminhamentos elétricos no eixo central da cidade de Lapão nas proximidades da fonte do Lapão (setor de risco 1).

No caminhamento geolétrico1 com eletrodos separados de 5 m, mais próximas da fonte (Rua Augusto Galvão e Praça da Fonte) (Figura 5.5), observa-se o arqueamento dos horizontes resistivos que podem ser interpretados com zonas de colapso. Isto ocorre porque as rochas com cavidades, além de deformadas e colapsadas, facilitaram a penetração de água e conseqüentemente o desenvolvimento acelerado do processo de alteração por intemperismo dos calcários, favorecendo a penetração da corrente elétrica. Distinguem-se também pelos menos duas zonas de deformação verticalizadas associadas também com feições alongadas de baixa resistividade. Além dessas feições de baixa resistividade distinguem-se nas seções alguns setores com resistividades médias interpretadas como calcários bem preservados e setores com forma circular de alta resistividade interpretada como cavidade. É possível observar de forma mais adequada, as feições de colapso interpretadas pelo encurvamento dos horizontes resistivos, bem como, as zonas de deformação e as cavidades. A feição circular que ocorre no centro da seção 1 (Figura 5.5) é uma cavidade que possivelmente possui conexão com a dolina da Fonte do Lapão.

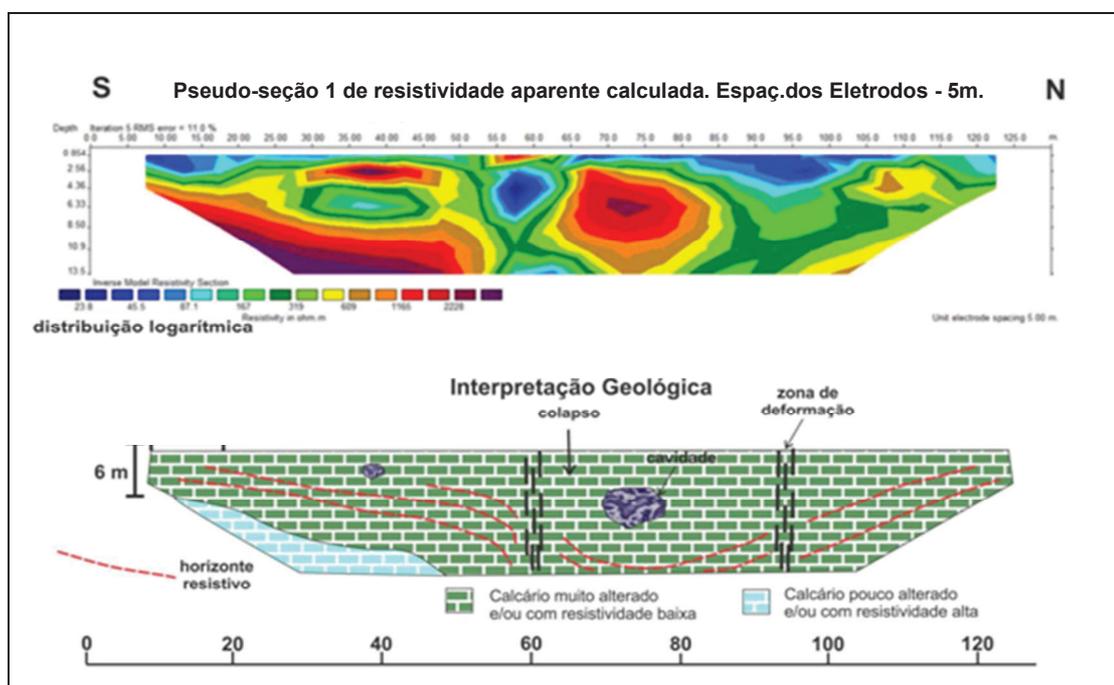


Figura 5.5 – Seção Geolétrica 1 com interpretação geológica localizada na Rua Augusto Galvão e na Praça da Fonte.

Nas seções 2 e 3 (Figuras 5.6 e 5.7), levantadas nas ruas José Marcelino e Sócrates de Menezes, é possível observar as mesmas feições destacadas na seção anterior, ou seja, colapso do terreno, zonas de deformação vertical e cavidades.

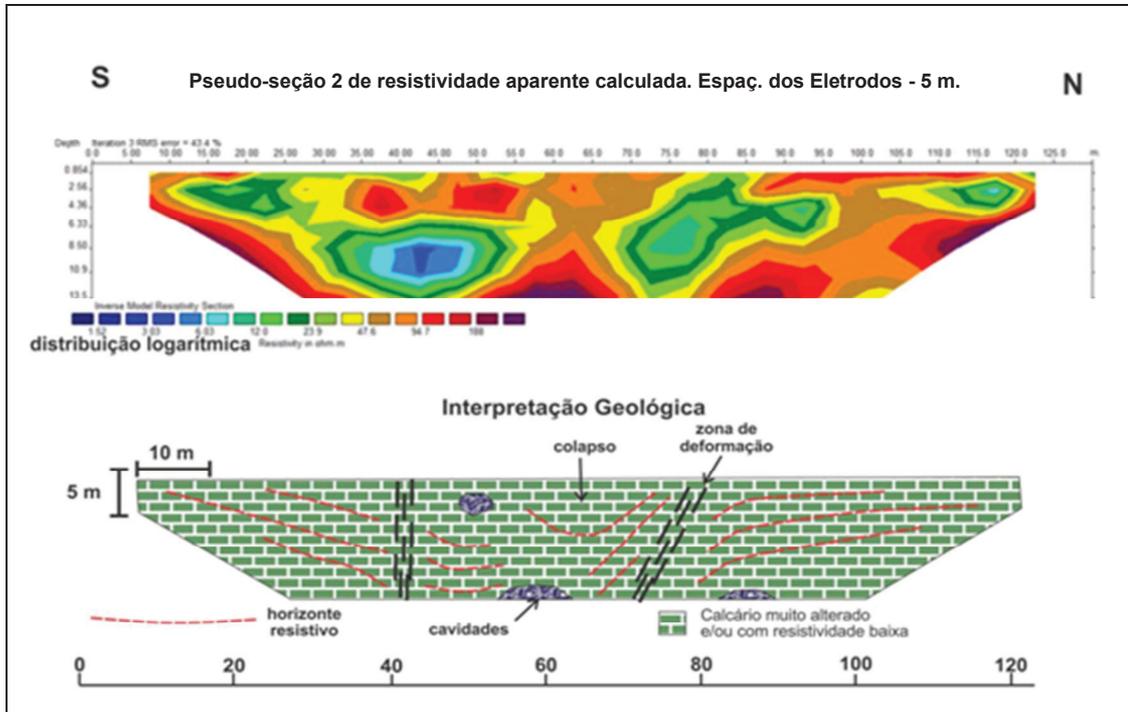


Figura 5.6 – Seção Geoelétrica (Perfil) 2 localizada com interpretação geológica localizada na Rua José Marcelino. Esta seção com eletrodos espaçados de 5m.

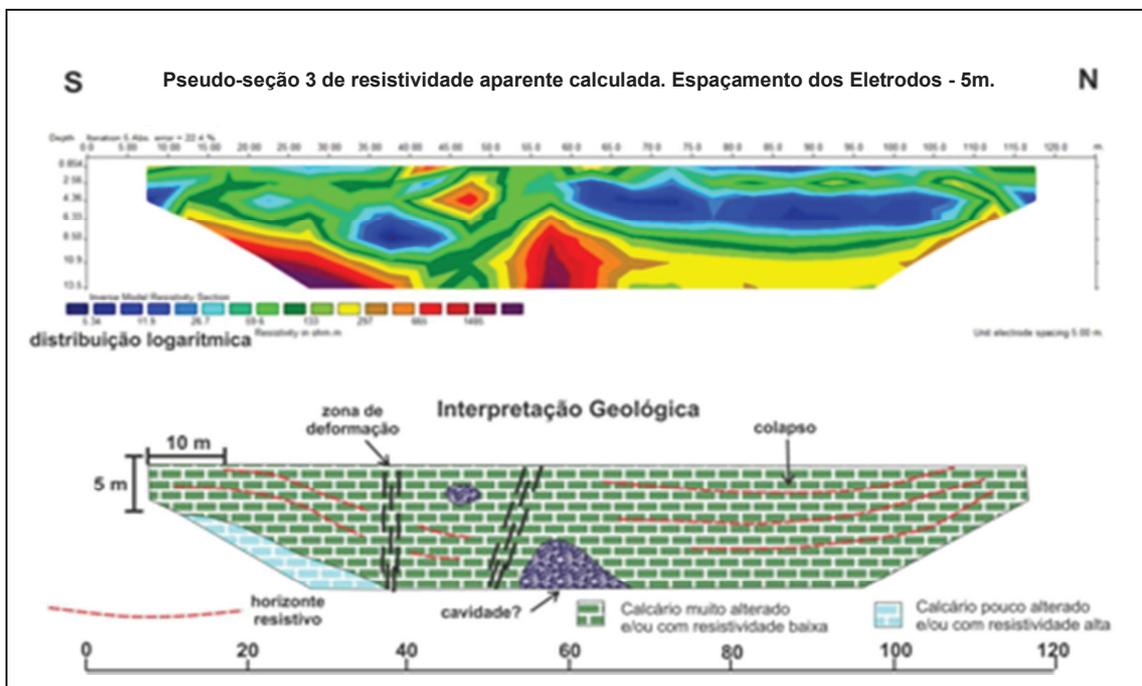


Figura 5.7 – Seção Geoelétrica (Perfil) 3 com interpretação geológica localizada na Travessa Sócrates de Menezes. Esta seção com eletrodos espaçados de 5m.

Na área do conjunto de casas populares do Bairro Ida Cardoso (setor 2) (Figura 5.8), onde também ocorreram subsidências e consequente danos em imóveis (Figura 5.9), é possível observar nas fotografias aéreas uma grande depressão circular (dolina).

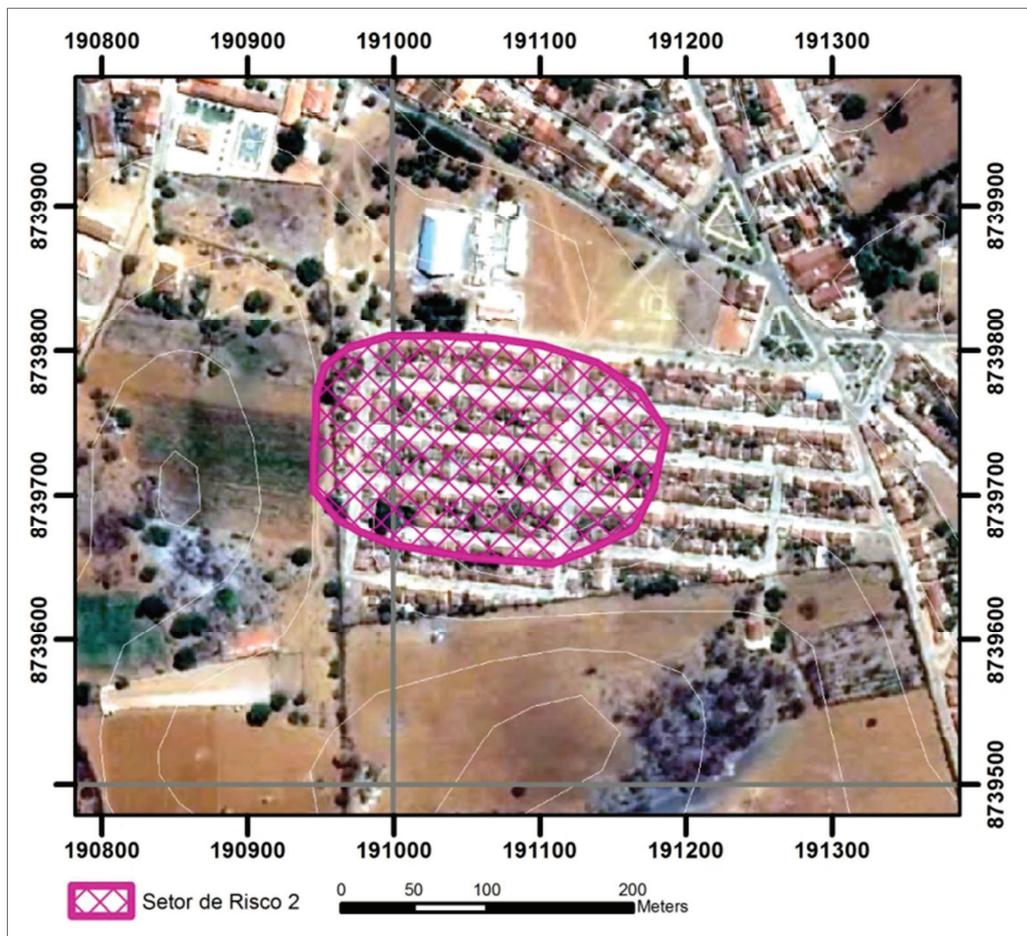


Figura 5.8– Localização dos caminhamentos elétricos no eixo central da cidade de Lapão nas proximidades da fonte do Lapão (setor de risco 2).

Segundo informações obtidas com o coordenador de defesa civil municipal, antes da construção do conjunto de casas populares área funcionava como uma espécie de lixão, onde era despejado todo o lixo da cidade.



Figura 5.9: Trincas nos muros das residências (A e B). Conjunto de casas populares. (Fotos do autor)

Nesta área, moradores locais afirmam que durante obras para melhorias dos imóveis, é possível retirar lixos plásticos do solo durante as escavações para fundação. Áreas de lixão aterradas, por possuírem baixa capacidade de suporte, são extremamente vulneráveis a recalques quando ocupadas.

Na área do ginásio de esportes (setor 3), foram realizados dos caminhamentos elétricos (seções 4 e 5) no mesmo ponto (Figura 5.10), um com espaçamento dos eletrodos de 20 m, e outro com espaçamento dos eletrodos de 10 m. Nesta área é possível observar sinais de instabilidade evidenciados por meio de trincas na superfície e pequenos afundamentos (Figura 5.11).

A observação das seções de resistividade 4 (Figura 5.12) e 5 (Figura 5.13), indica a existência de um nível de calcário com resistividades muito baixas. As condições geológicas e topográficas do local sugerem um substrato rochoso fraco e colapsado.

A presença de um poço tubular no centro do perfil indica que a retirada de água da cavidade abaixo da dolina pode ter contribuído, localmente, com este afundamento. Atualmente o poço, seco, está desativado.

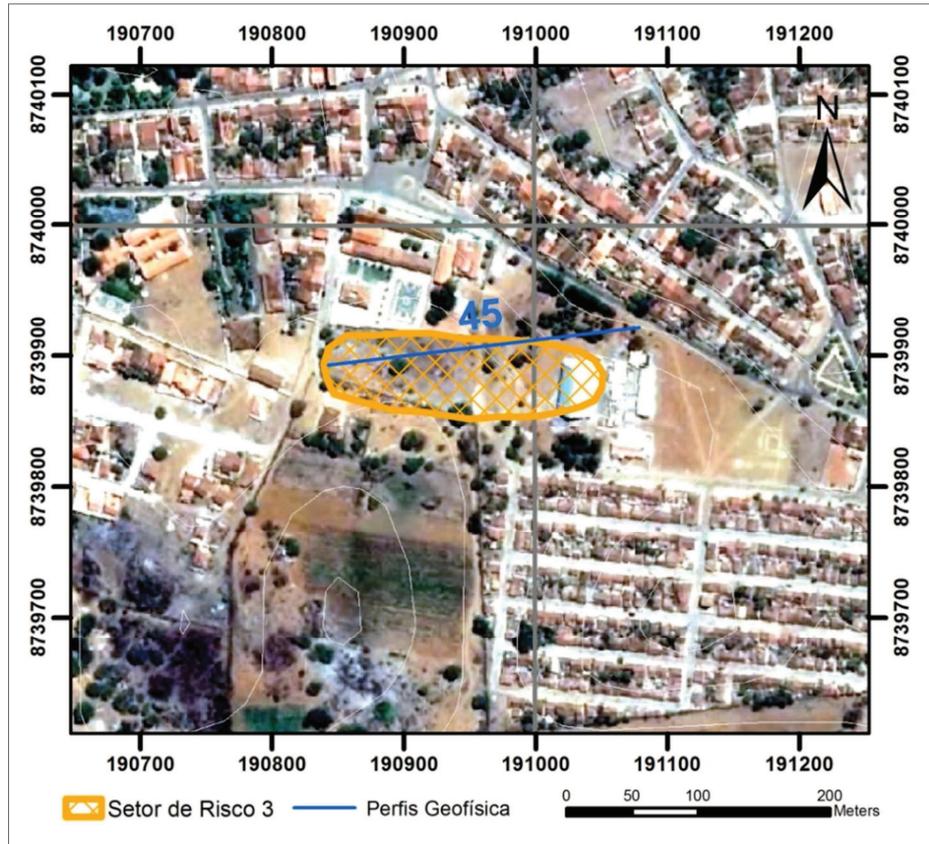


Figura 5.10: Localização dos caminhamentos elétricos 4 e 5 no setor de risco 3.



Figura 5.11: Dolina (A) com trincas das bordas aterradas (B). (Fotos do autor)

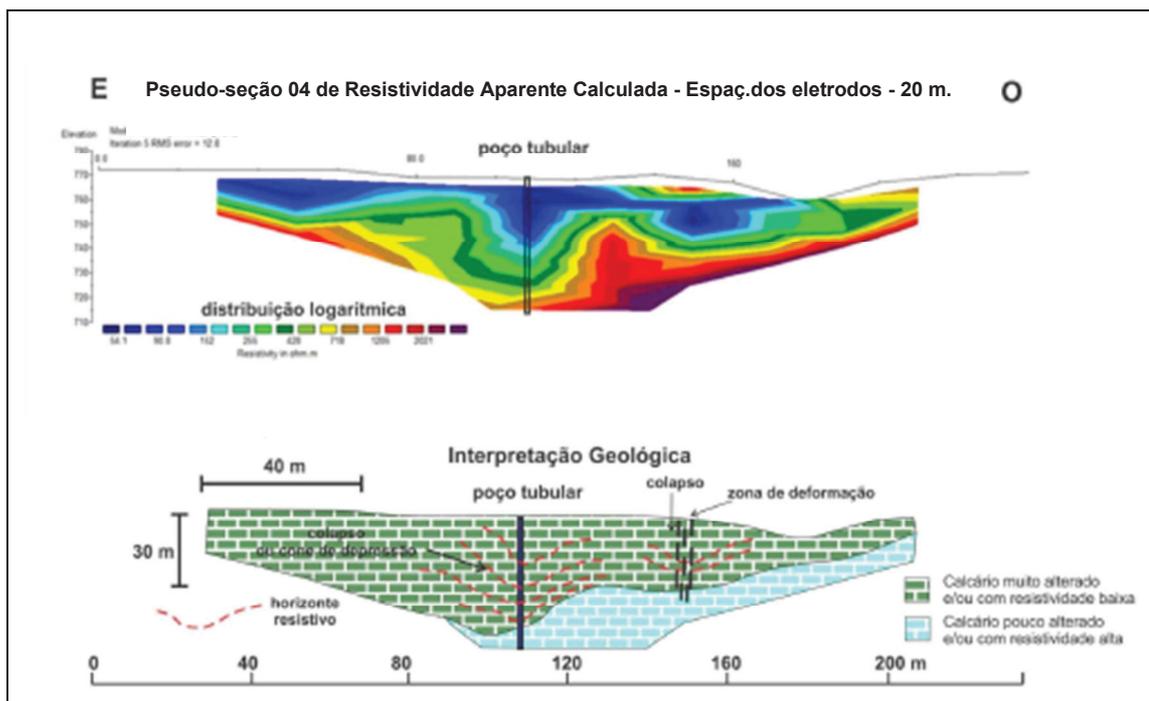


Figura 5.12: Seção Geoelétrica (Perfil) 4 localizada no Bairro Ida Cardoso.

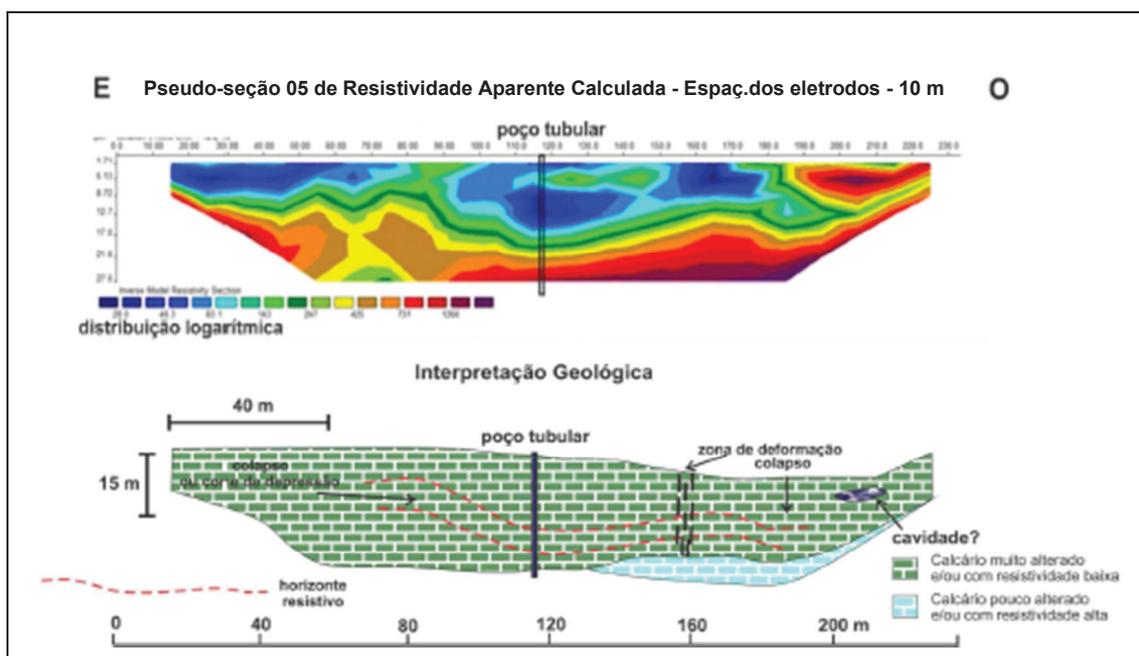


Figura 5.13: Seção Geoelétrica (Perfil) 5 localizada no Bairro Ida Cardoso. A seção com eletrodos espaçados de 10 m representa um detalhamento da metade superior da Seção 1, com eletrodos espaçados de 20 m.

O aspecto interpretativo mais importante resultante da é a evidência de um processo de afundamento fortemente favorecido pelo peso das construções.

Os estudos mostraram que a ocupação de áreas que já sofreram afundamento pode ser tão potencialmente perigosa, quanto à ocupação de áreas sobre vazios/cavidades internas.

Estima-se que existam aproximadamente 160 imóveis nas três áreas de risco.

5.2 INVESTIGAÇÃO GEOFÍSICA NAS ÁREAS DE EXPANSÃO

Levantamentos geofísicos realizados pela CPRM nas áreas onde, segundo o Plano diretor Municipal, estão previstas expansões urbanas (Áreas A1, A2, A3, A4 e A5 e paralelo a Rodovia) (Figura 5.14) mostram a ocorrência de vazios internos (cavidades), deformações e rochas calcárias alteradas bem próximas à superfície.

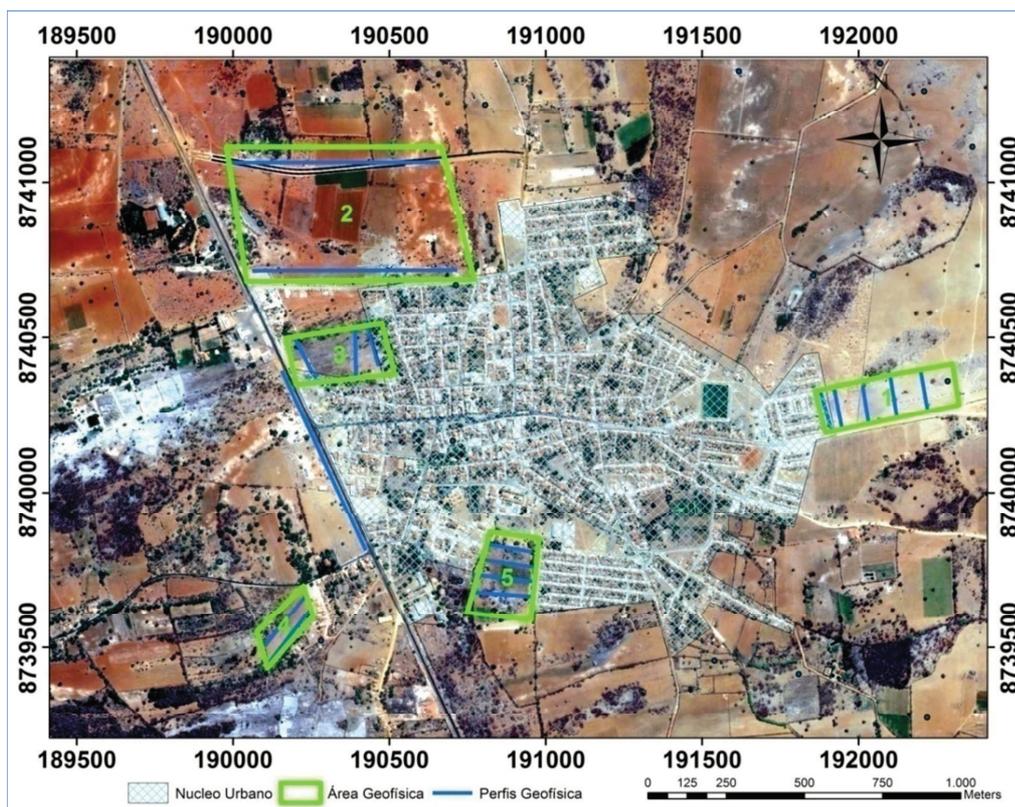


Figura 5.14: Localização das áreas para futura expansão urbana em que foram efetuados levantamentos geofísicos.

Na Área 1, a leste da cidade (Zona de Expansão Prioritária - ZEP), onde está sendo implantado um conjunto habitacional do programa Minha Casa Minha Vida (Figura

5.15), foram efetuados 6 caminhamentos com espaçamento de eletrodos de 10 metros e direção N-S (Perfis 6, 7, 8, 9, 10 e 11, Figura 5.16). As pseudo-seções foram levantadas paralelamente e com espaçamento regular entre elas. Também possuem aproximadamente a mesma extensão. Este tipo de configuração permitiu a interpretação em conjunto de todas as seções em uma visão tridimensional do contexto geológico/geotécnico da área (Figura 5.17).

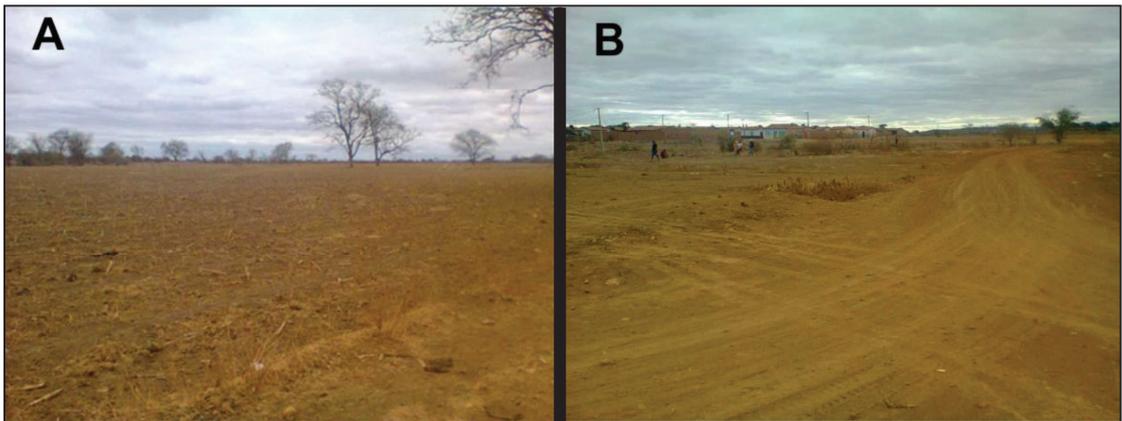


Figura 5.15: Fotos A e B: visão panorâmica em ângulos diferentes do terreno reservado para a construção do Conjunto Habitacional Minha Casa - Minha Vida na Área 1 - ZEP.

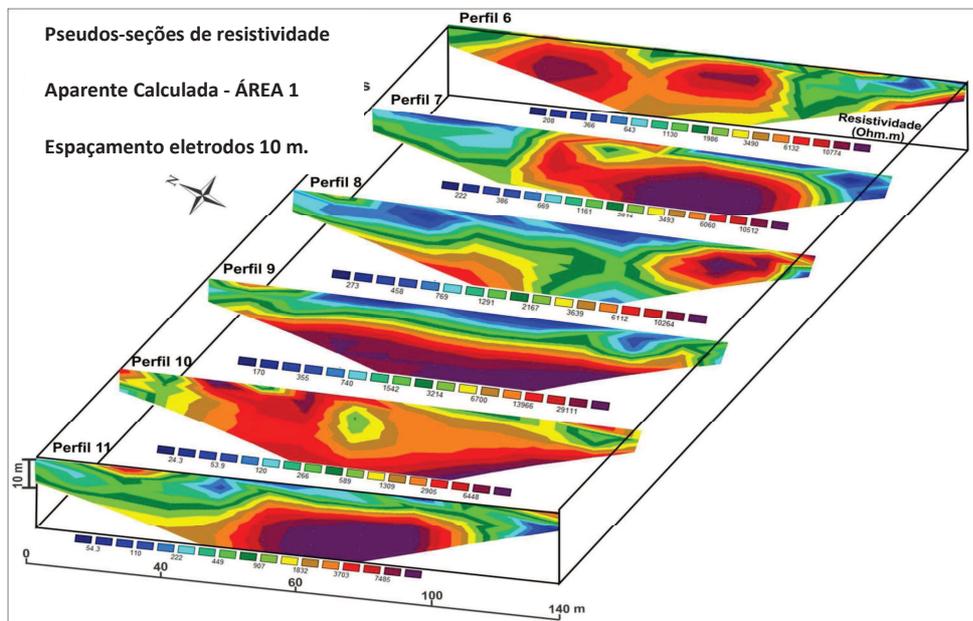


Figura 5.16: Composição tridimensional das pseudo-seções calculadas levantadas na Área 1. As modelagens indicam a existência de feições circulares e de perturbações verticais dos horizontes resistivos.

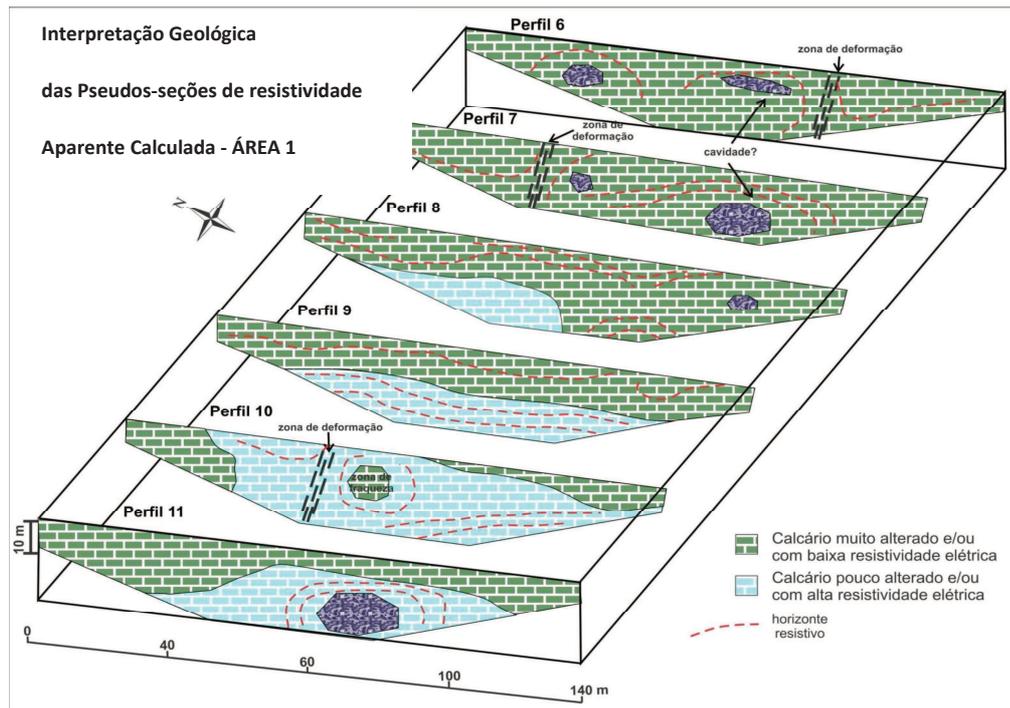


Figura 5.17: Interpretação geológica tridimensional das pseudo-seções calculadas levantadas na Área 1. As feições circulares foram interpretadas como cavidades e as descontinuidades verticais como zonas de falhas. As possíveis cavidades formam um alinhamento na direção ENE-OSO.

Na Área 2, localizada entre a rua do Cemitério e nova avenida Perimetral (Zona de Urbanização Prioritária - ZUP), foram levantados dois caminhamentos dipolo-dipolo com eletrodos espaçados de 10 metros na direção E-O.

A análise dos perfis 6 e 7 (Figuras 5.18 e 5.19) indica a existência de um substrato formado por rochas muito resistentes ou pouco alteradas que afloram em vários pontos do terreno. No restante da área, ocorrem solos com pequena espessura. A forte perturbação dos horizontes resistivos sugere a existência de várias zonas de descontinuidade, possivelmente associadas com falhas na direção N-S.

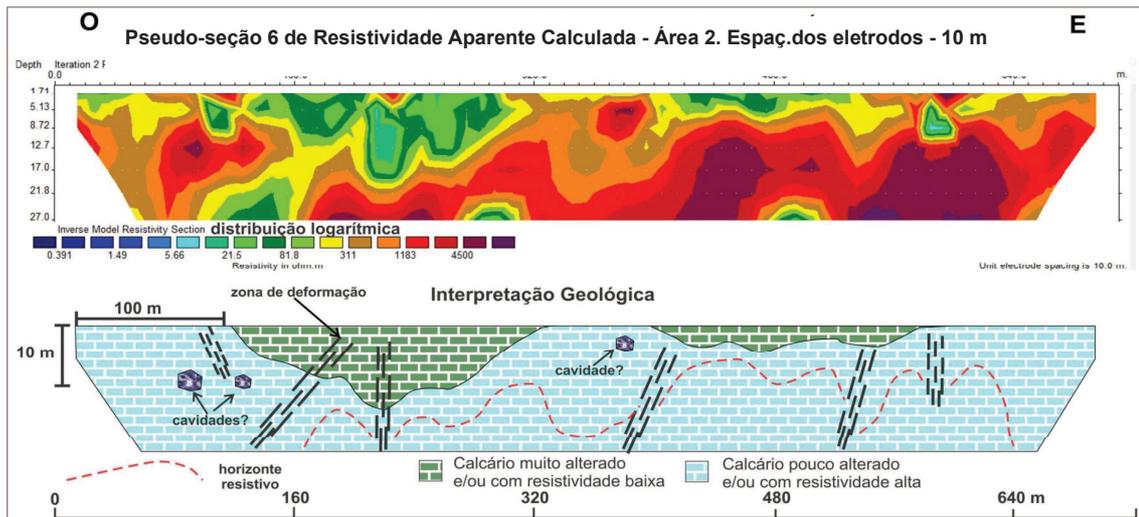


Figura 5.18: Seção Geolétrica (Perfil) 6 localizada na Área 2 na Rua do Cemitério. Observar a forte perturbação dos horizontes resistivos relacionados com discontinuidades litológicas possivelmente produzidas por falhas ou fraturas na direção N-S.

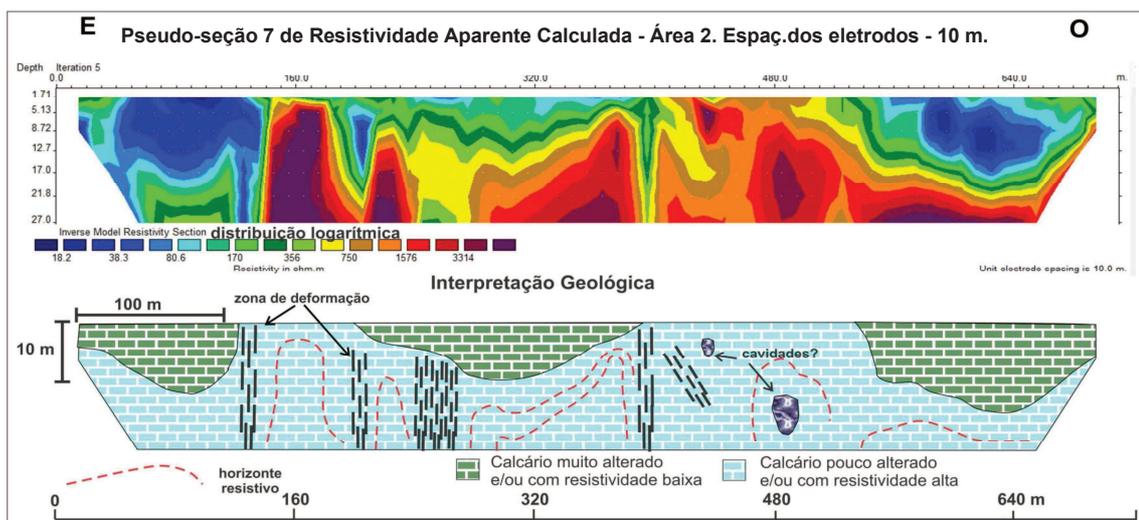


Figura 5.19: Seção Geolétrica (Perfil) 7 localizada na Área 2 na nova Av. Perimetral. Observe a forte perturbação dos horizontes resistivos relacionados com discontinuidades litológicas possivelmente produzidas por falhas ou fraturas na direção N-S.

Na Área 3, entrada da cidade (Zona Residencial Central - ZRC), foram levantados três caminhamentos dipolo-dipolo com eletrodos espaçados de 10 metros na direção aproximada N-S. Nesta área ocorrem afloramentos rochosos e solos de alteração de rochas calcárias (Figura 5.20).



Figura 5.20: Fotografias da Área 3, onde a superfície é composta por solos de alteração (A) e lajedos de rochas calcárias (B). (Fotos do autor)

A análise da distribuição de resistividade das pseudo-seções 8, 9 e 10 (Figuras 5.21, 5.22 e 5.23, respectivamente) indica a existência de um substrato formado pela alternância de rochas muito resistivas com rochas pouco resistivas. A configuração geométrica sugere uma intercalação estratigráfica de calcários com diferentes composições. A perturbação dos horizontes resistivos indica a existência de algumas zonas de descontinuidade, possivelmente associadas com falhas na direção N-S. Os dados geofísicos nesta área, especificamente, não indicam a existência de cavidades ou de processos avançados de carstificação

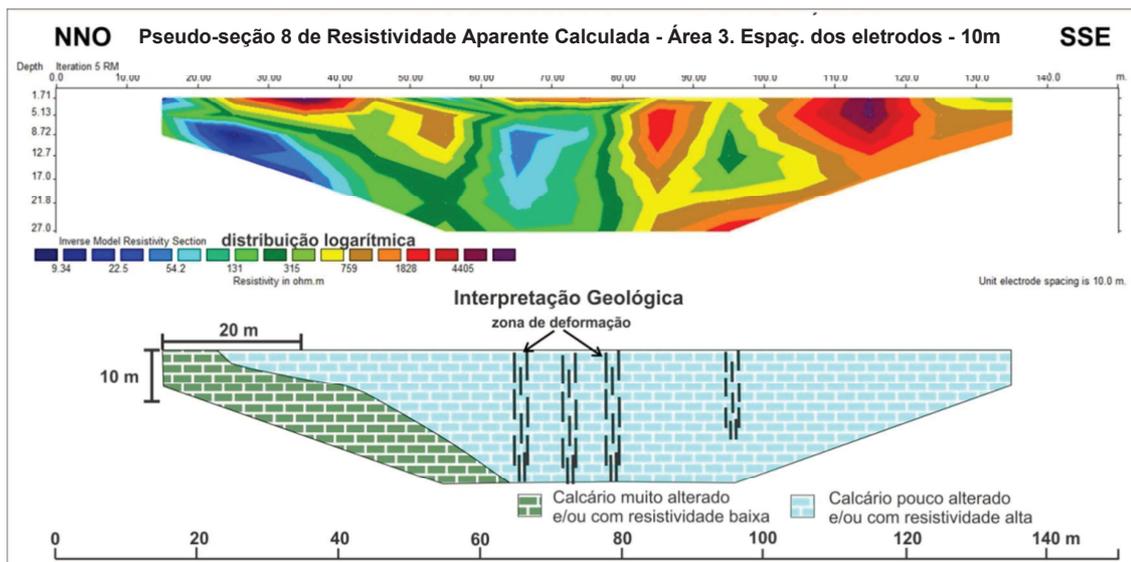


Figura 5.21: Seção Geoelétrica (Perfil) 8 localizada na Área 3. A parte central da seção apresenta perturbações dos horizontes resistivos relacionadas com discontinuidades litológicas possivelmente produzidas por falhas ou fraturas na direção E-O.

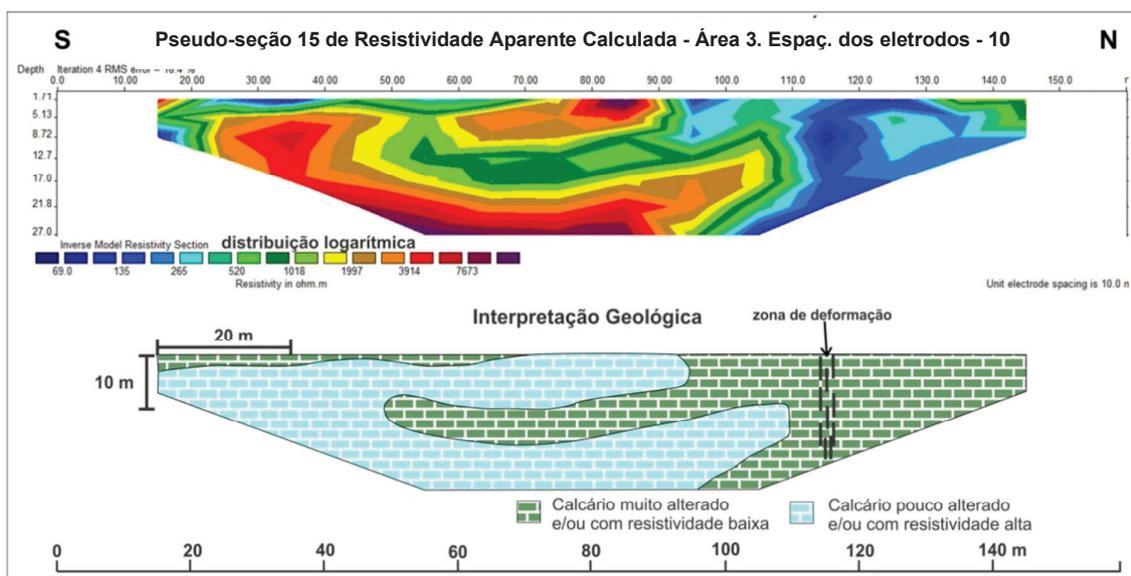


Figura 5.22: Seção Geoelétrica (Perfil) 9 localizada na Área 3. A interpretação dos dados indica uma intercalação de calcários de resistividade alta com calcários de resistividade baixa.

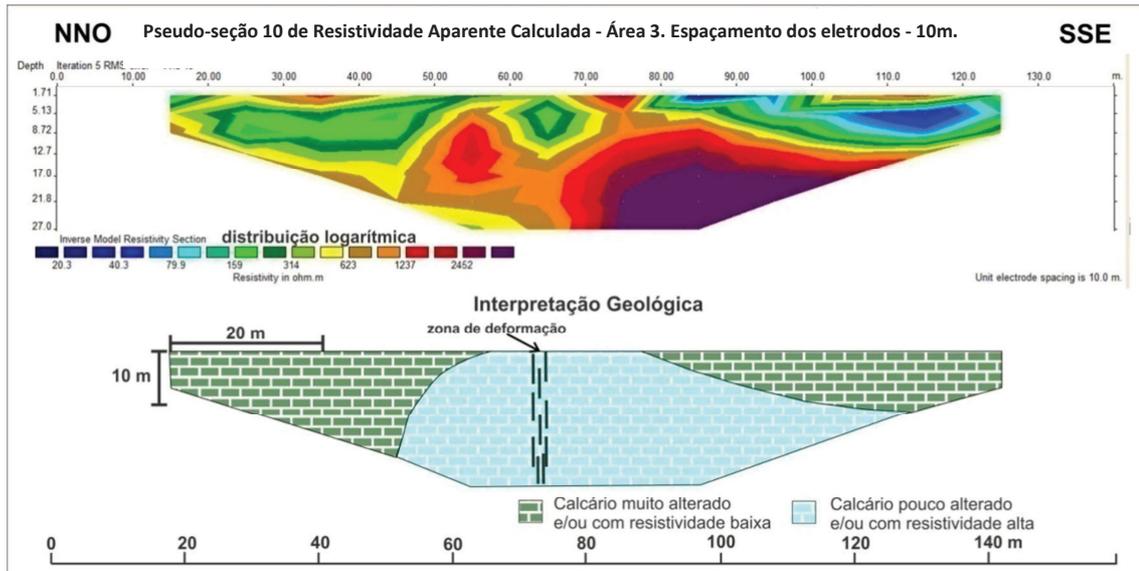


Figura 5.23: Seção Geométrica (Perfil) 10 localizada na Área 3. A parte central da seção apresenta perturbações dos horizontes resistivos relacionadas com discontinuidades litológicas possivelmente produzidas por falhas ou fraturas na direção E-O.

Na Área 4, sudoeste da cidade (Zona de Ocupação Rarefeita - ZOR), foram levantados dois caminhamentos dipolo-dipolo com eletrodos espaçados de 10 metros na direção NE-SO.

A análise da distribuição de resistividade das pseudo-seções 11 e 12 (Figuras 5.24 e 5.25, respectivamente) indica a existência de um substrato formado pela alternância de rochas calcárias muito resistivas com rochas calcárias pouco resistivas. A configuração geométrica sugere uma superposição estratigráfica de calcários com diferentes composições. Os horizontes resistivos são pouco perturbados indicando uma baixa densidade de zonas de discontinuidades associadas com zonas de falhas. Da mesma forma que na Área 3, os dados geofísicos, especificamente, não indicam a existência de cavidades expressivas ou de processos avançados de carstificação.

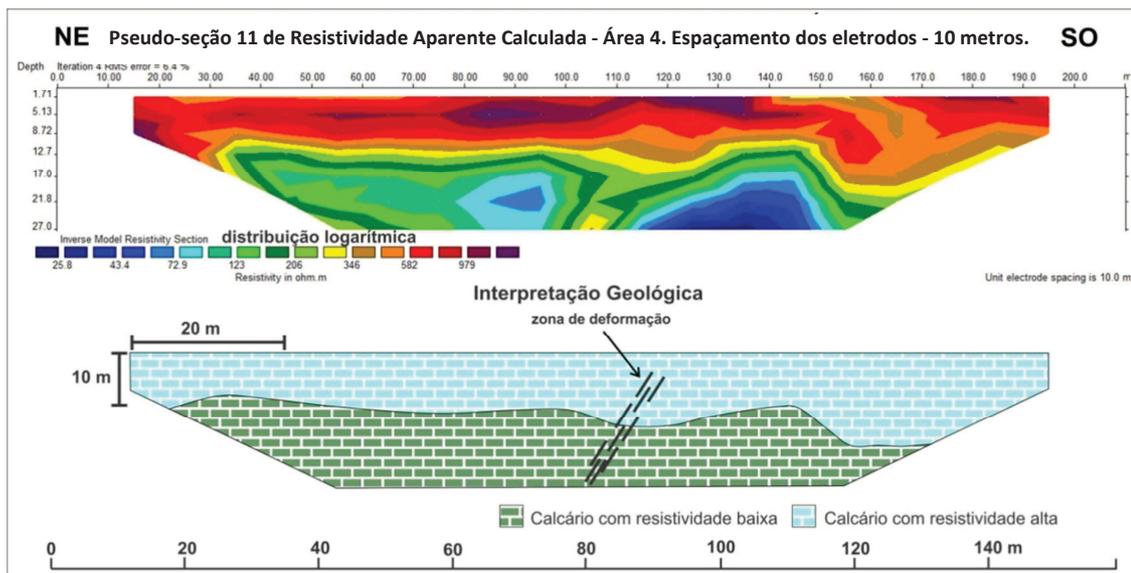


Figura 5.24: Seção Geoelétrica (Perfil) 11 localizada na Área 4. A interpretação dos dados indica uma estratificação entre calcários de resistividade baixa com calcários de resistividade alta.

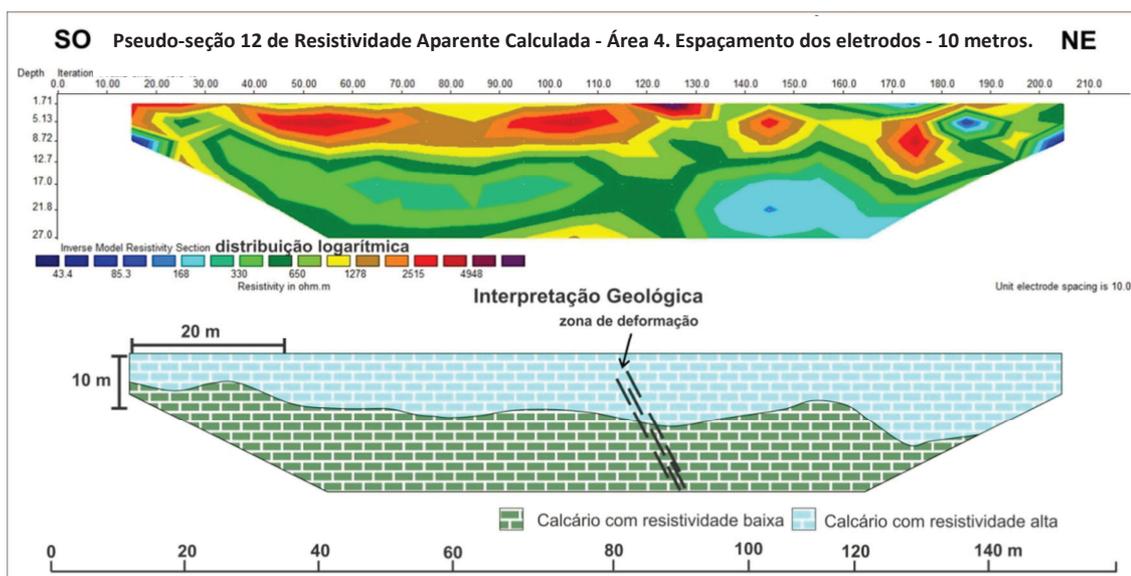


Figura 5.25: Seção Geoelétrica (Perfil) 12 localizada na Área 4. A interpretação dos dados indica uma estratificação entre calcários de resistividade baixa com calcários de resistividade alta.

Na Área 5, conhecida como Fazenda de Gildásio (Zona de Expansão Prioritária - ZEP), ocorreu em 2008 um dos maiores eventos de subsidência na área periurbana de Lapão. Nos limites da subsidência (dolina) observam-se trincas de tração no solo e rochas (Figura 5.26).



Figura 5.26: Trincas de tração em solo (A) e rocha (B) em borda de dolina na fazenda Gildásio. (Fotos do autor)

Nesta área foram levantadas oito seções geofísicas, em quatro linhas de caminhamentos (Figuras 5.27, 5.28, 5.29, 5.30, 5.31, 5.32, 5.33 e 5.34), cada uma com duas seções, com 10 m e com 5 m de espaçamento dos eletrodos.

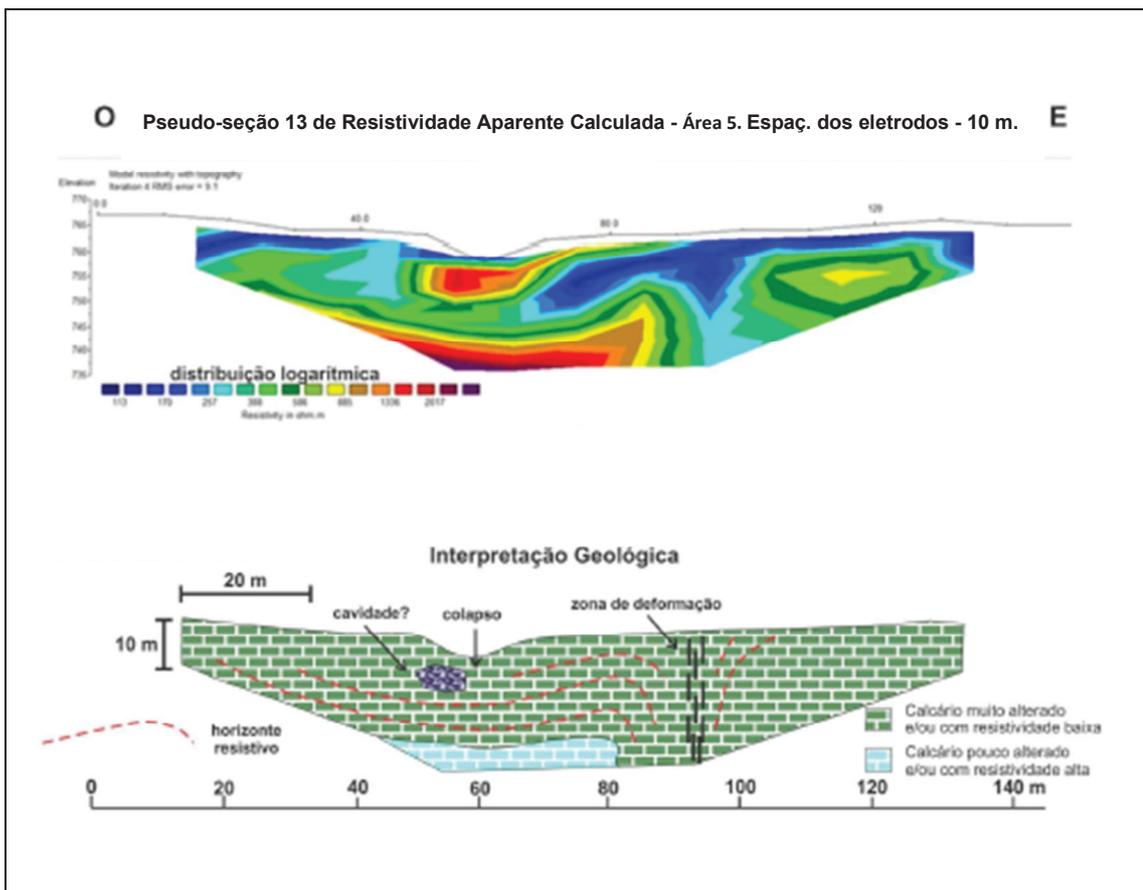


Figura 5.27: Seção Geoelétrica 13 localizada na Fazenda de Gildásio.

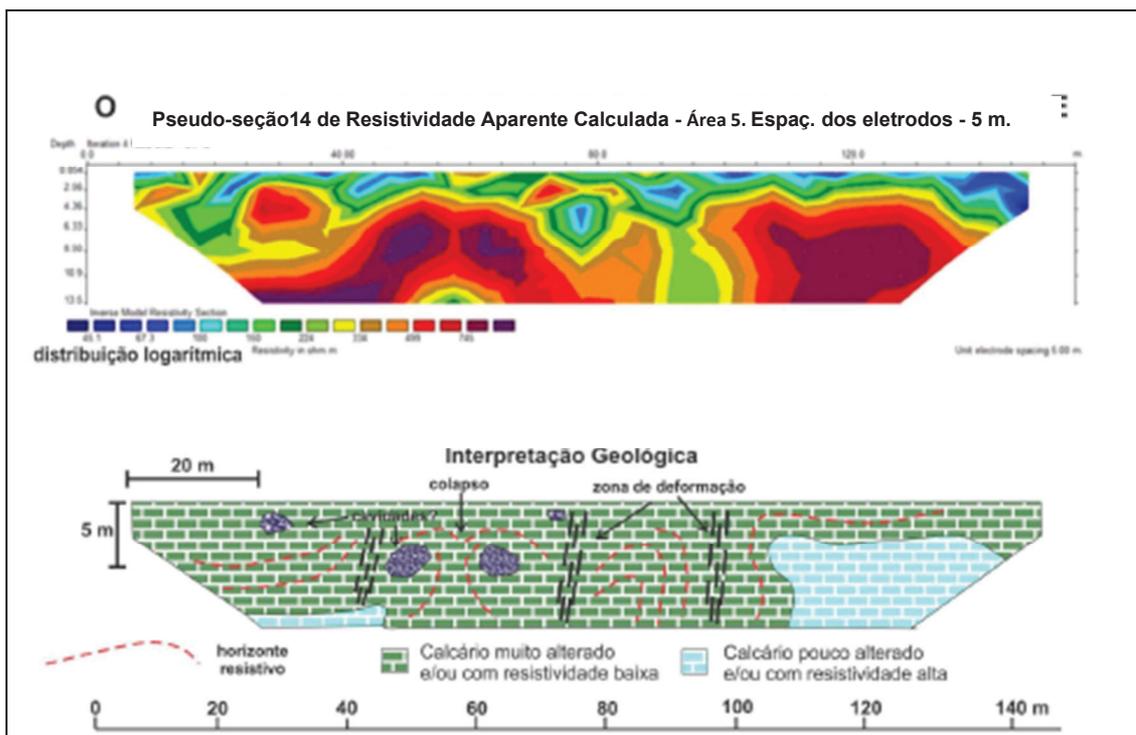


Figura 5.28: Seção Geolétrica (Perfil) 14 localizada na Fazenda de Gildásio. A seção com eletrodos espaçados de 5 m representa um detalhamento da metade superior da Seção 19.

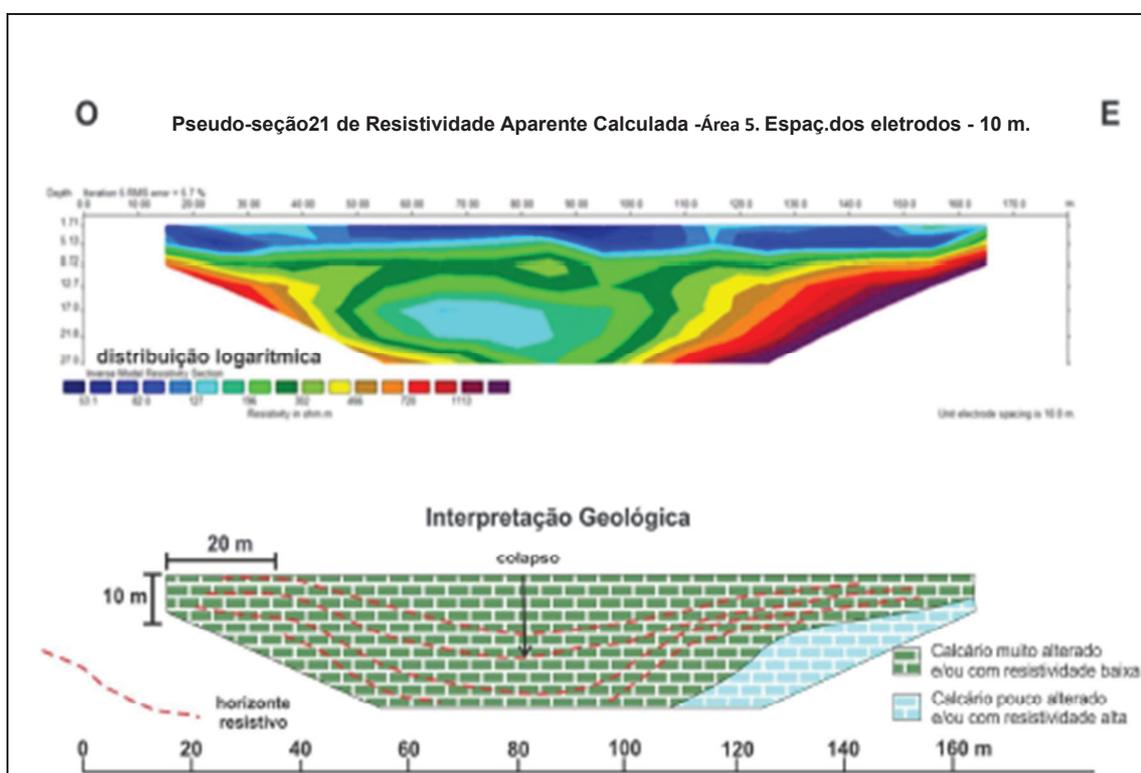


Figura 5.29: Seção Geolétrica (Perfil) 15 localizada na Fazenda de Gildásio.

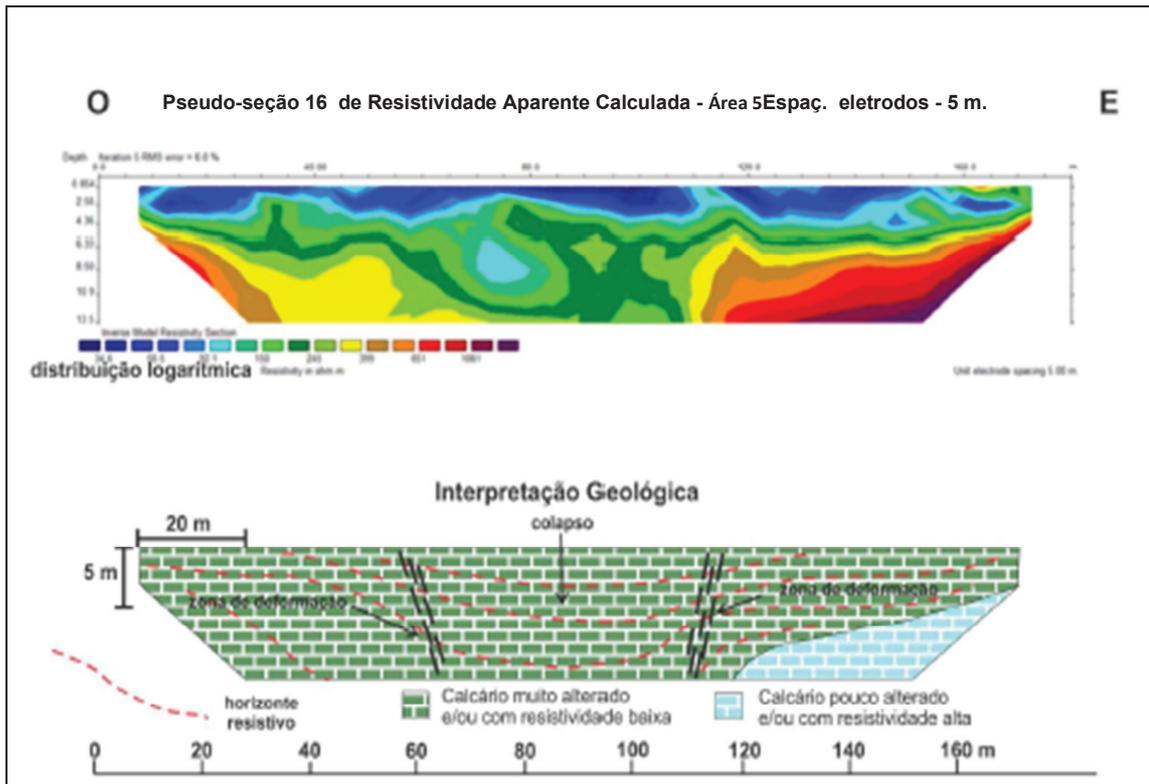


Figura 5.30: Seção Geolétrica (Perfil) 16 localizada na Fazenda de Gildásio. A seção com eletrodos espaçados de 5 m representa um detalhamento da metade superior da Seção 21.

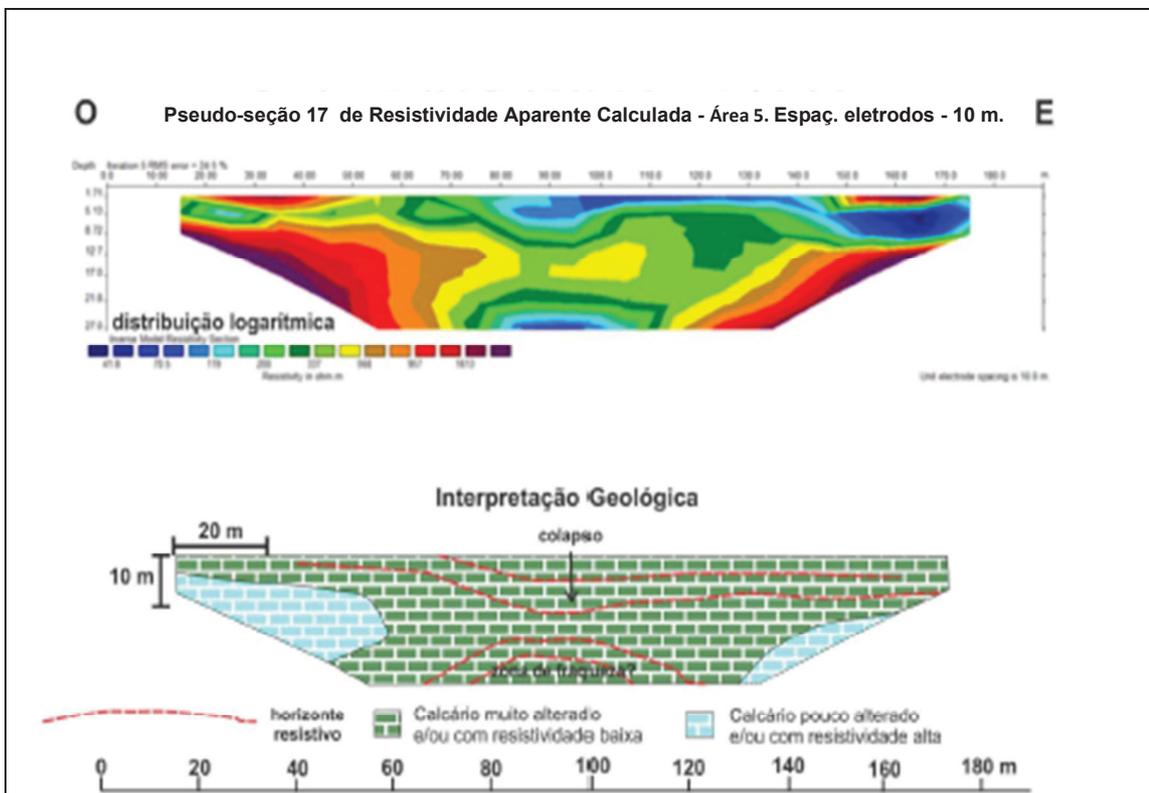


Figura 5.31: Seção Geolétrica (Perfil) 17 localizada na Fazenda de Gildásio.

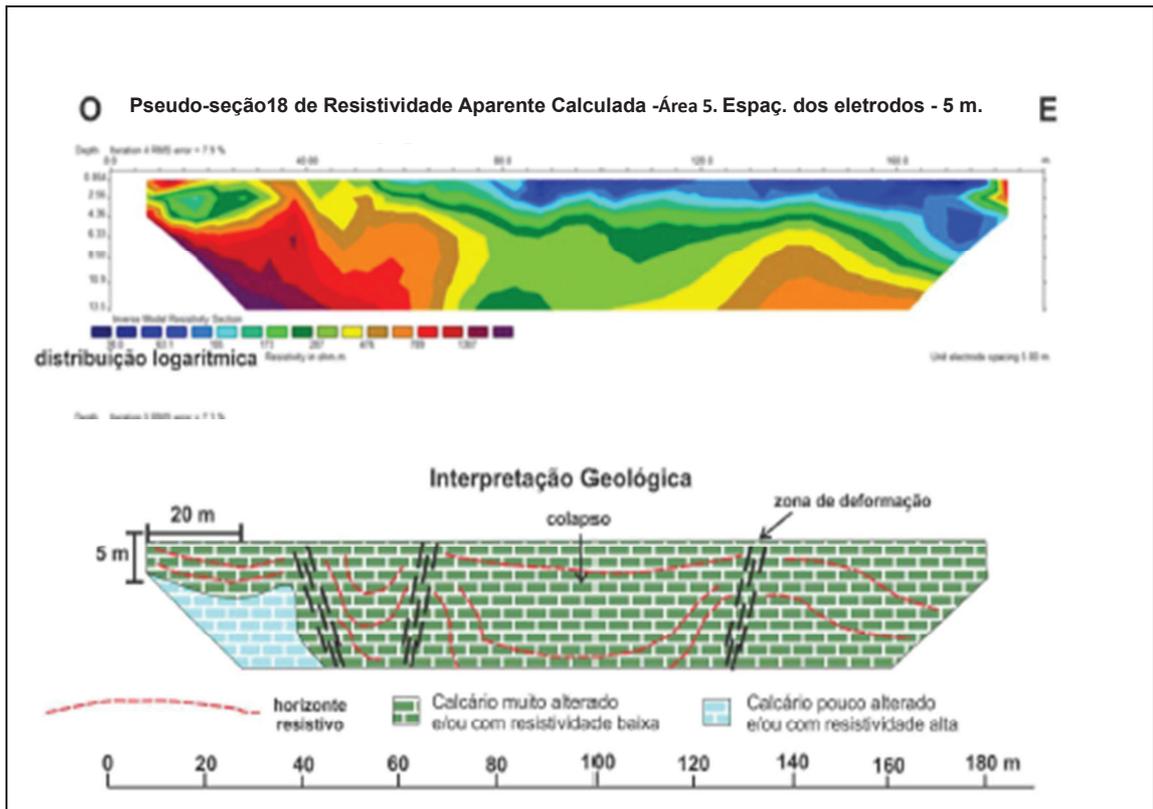


Figura 5.32: Seção Geolétrica (Perfil) 18 localizada na Fazenda de Gildásio. A seção com eletrodos espaçados de 5 m representa um detalhamento da metade superior da Seção 23.

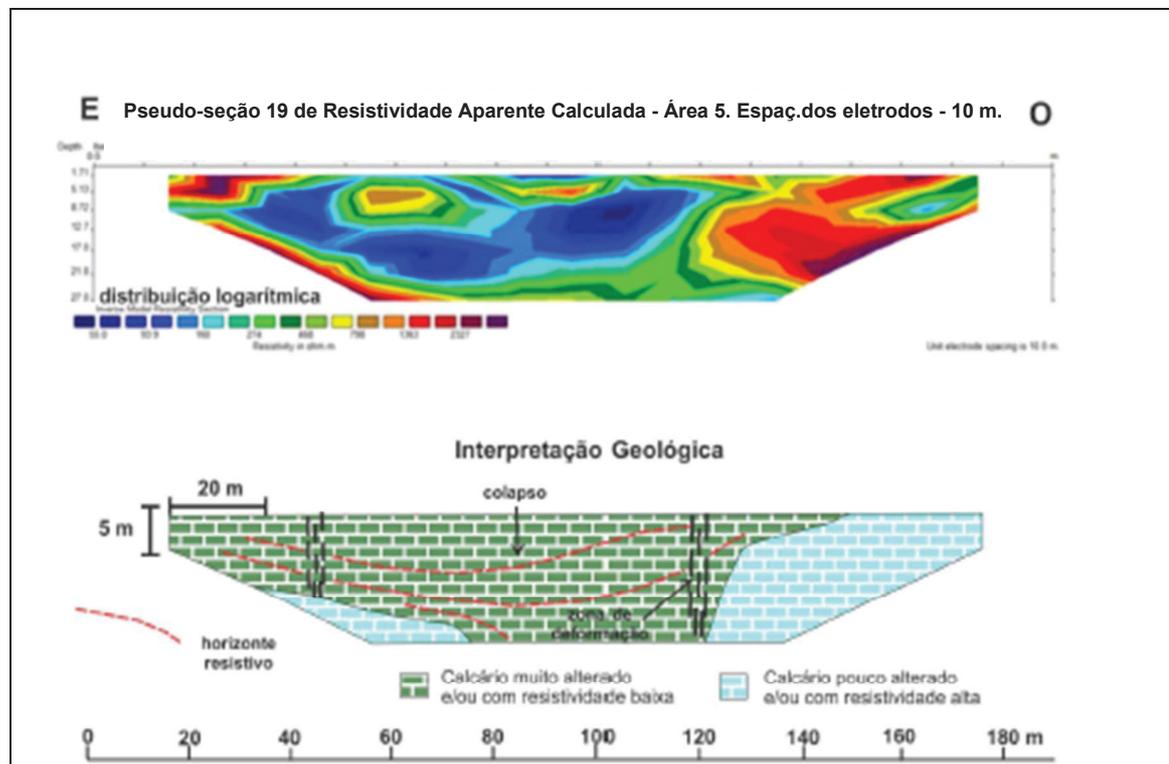


Figura 5.33: Seção Geolétrica (Perfil) 19 localizada na Fazenda de Gildásio.

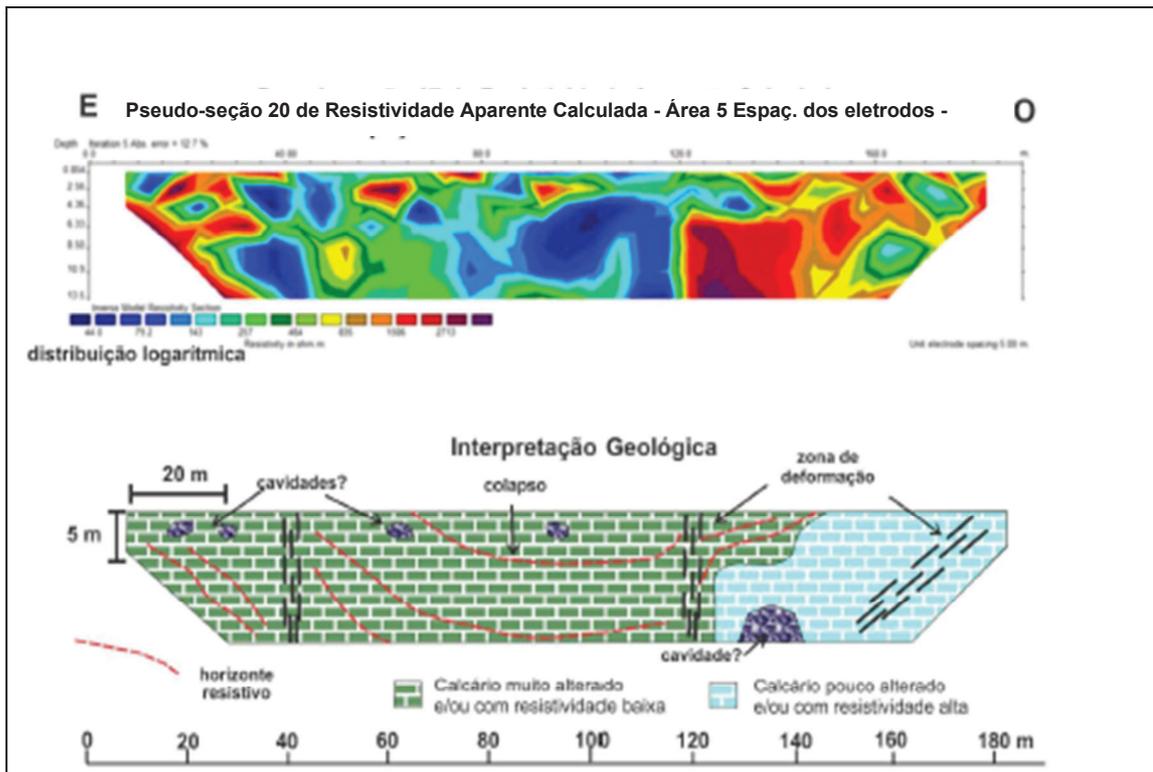


Figura 5.34: Seção Geolétrica (Perfil) 20 localizada na Fazenda de Gildásio. A seção com eletrodos espaçados de 5 m representa um detalhamento da metade superior da Seção 25.

As condições geológicas do local apresentam fortes evidências de colapso do terreno como efeito da existência de um substrato calcário alterado de baixa resistência. Os resultados dos levantamentos geolétricos confirmaram esta previsão. Em todas as seções se observa uma forte inflexão dos horizontes resistivos indicando rupturas nas zonas de deformação e encurvamento para baixo acompanhando o afundamento da superfície topográfica.

A interpretação mais coerente com as observações geológicas é que o nível menos resistivo represente calcários alterados por processos de dissolução e deformação e os níveis mais resistivos representem rochas mais resistentes e menos deformadas. A interação dos vários agentes, quais sejam, dissolução, fraqueza e deformação levaram ao processo atual de colapso e ao avanço na formação futuramente de uma dolina no local. Esta expectativa é reforçada pela existência, em todas as seções, de feições circulares de resistividade alta que foram interpretadas como cavidades. O conjunto das seções pode ser visualizado em forma tridimensional (Figura 5.35) apresentando uma

zona de deformação que permeia o substrato até profundidades maiores do que 20 m. Neste caso, em contraste com os estudos na região da fonte, o efeito da deformação tem forma alongada na direção N-S.

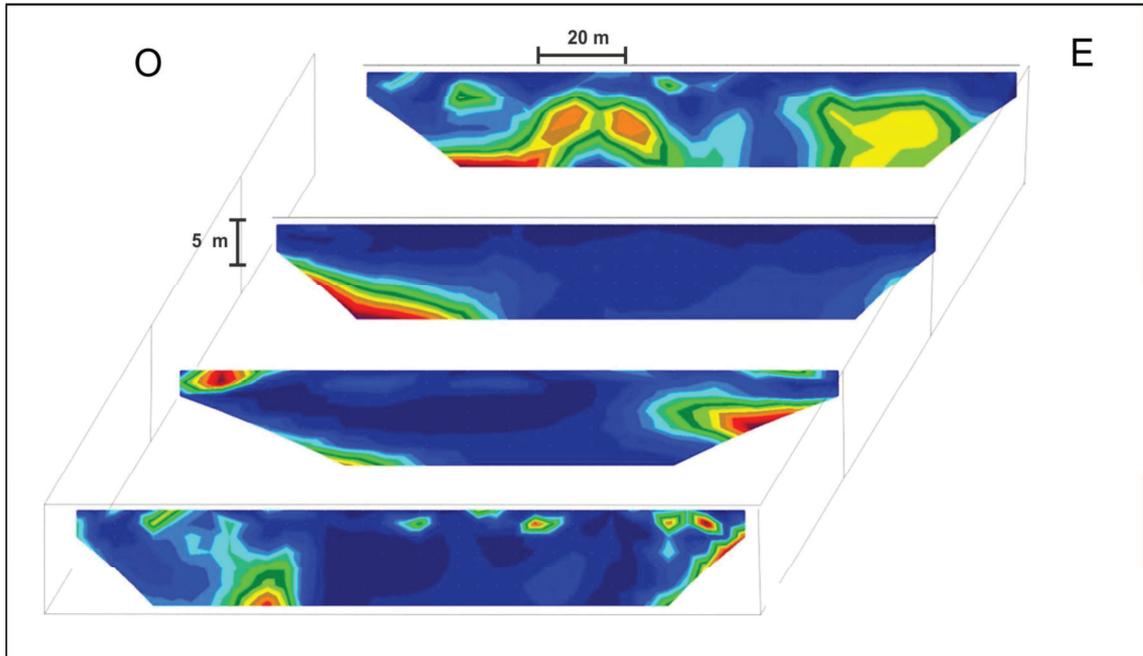


Figura 5.35: Composição tridimensional das seções levantadas na Fazenda de Gildásio. Observa-se que na porção central ocorre uma larga faixa de baixa resistividade elétrica na direção N-S correlacionada com a região topograficamente deprimida. As feições circulares são interpretadas como cavidades.

Na Área da seção geométrica realizada paralelamente a rodovia BA - 432 e transversalmente à direção de deformação E-O que ocorre nas proximidades da Fonte do Lapão, região central da cidade (setor de risco 1), também foram observadas fendas e cavidades internas. Por causa dessa posição estratégica ela foi escolhida como local para uma investigação mais profunda do substrato. Para isso foi levantada a Seção Geométrica 21 (Figura 5.36), com eletrodos espaçados de 25 m e extensão total de 700 m. Este espaçamento de eletrodos permitiu a investigação do substrato até a profundidade de 65 m.

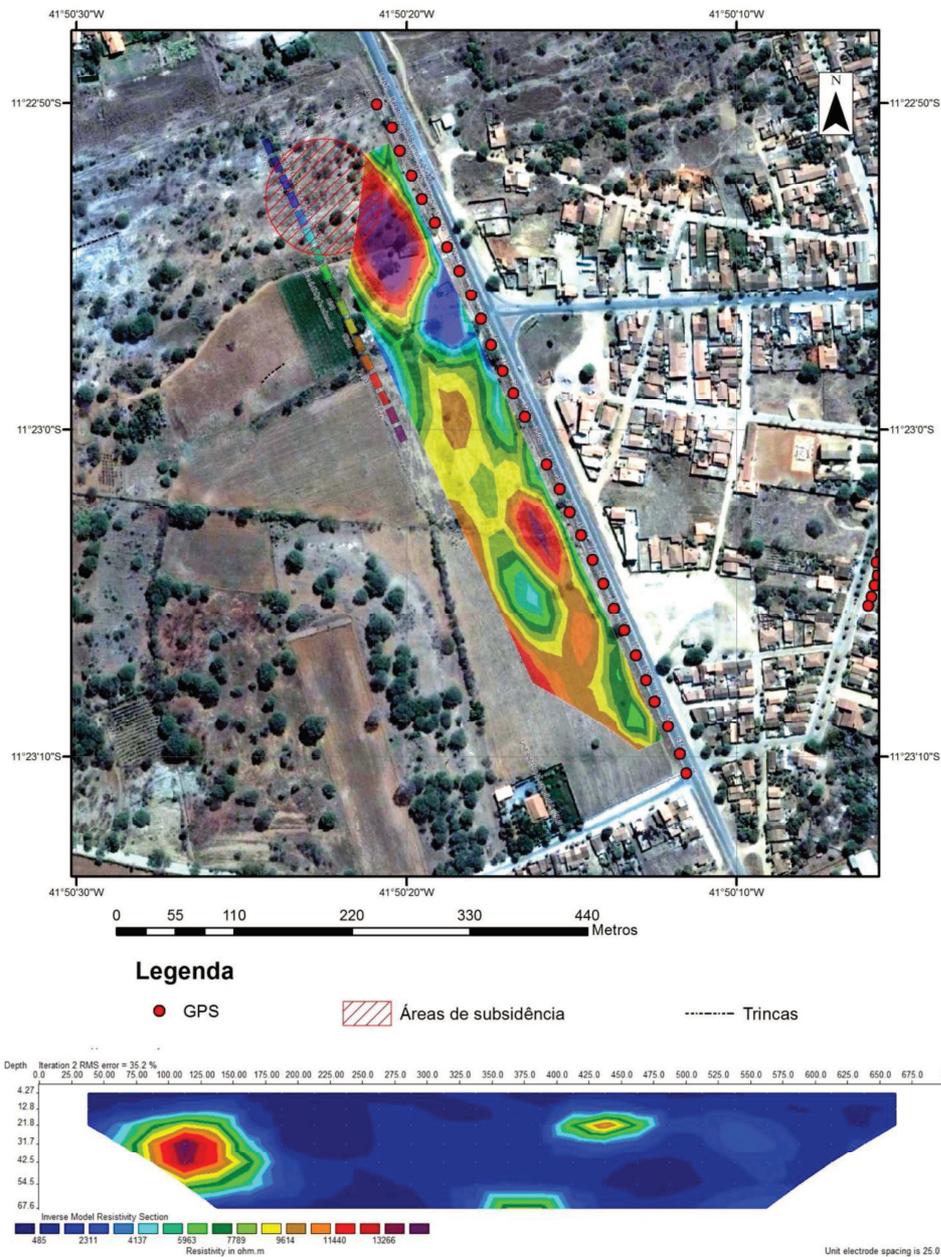


Figura 5.36: Localização do caminhamento elétrico (Perfil) 21 na rodovia BA-432. As seções modeladas estão também apresentadas. Sobreposta na imagem aérea está a seção com distribuição logarítmica da resistividade elétrica rebatida na horizontal. Na parte inferior da figura está a seção com distribuição linear da resistividade elétrica. Também estão indicadas a área de subsidência e as trincas no solo. Note na seção a feição geoelétrica circular possivelmente associada com uma cavidade relativamente grande.

Os resultados da modelagem e interpretação desta seção revelaram a existência de um substrato calcário enfraquecido pela presença de zonas de deformação e evidências da existência de uma cavidade relativamente grande (~ 20 m de diâmetro) com topo na

profundidade de 20 m (Figura 5.37), localizada na extremidade norte da seção. Há uma clara conexão entre esta feição e o terreno colapsado na margem da estrada. Ou seja, este local poderá ser uma dolina no futuro.

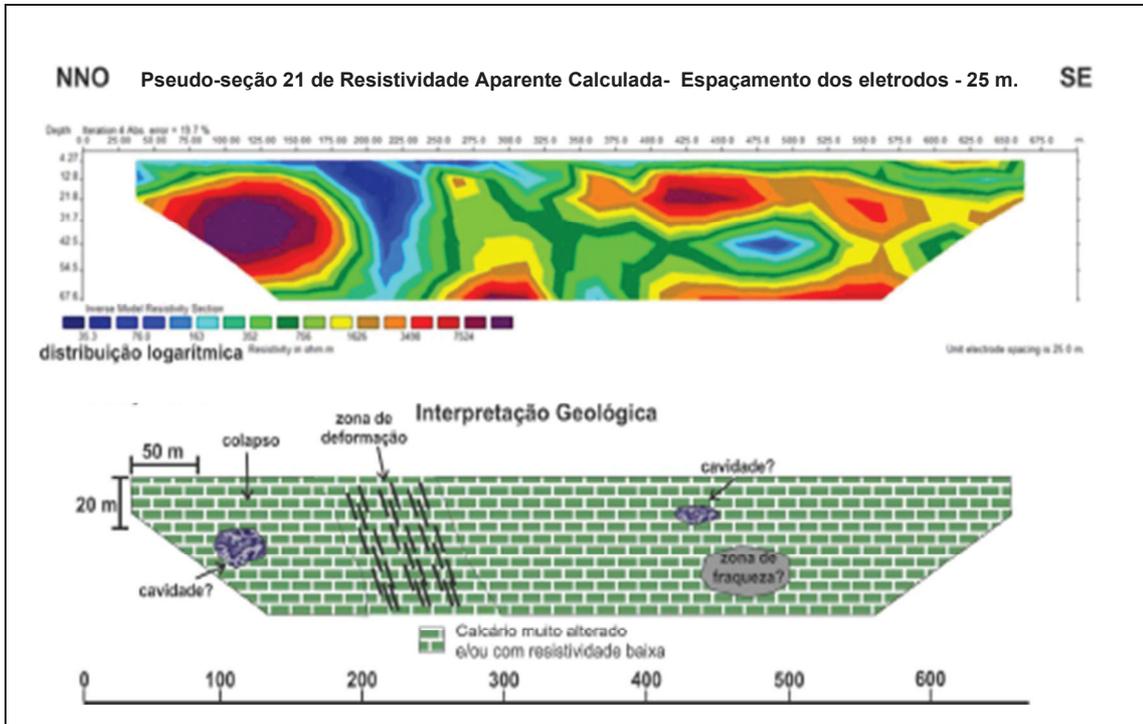


Figura 5.37: Seção Geoelétrica 21 localizada nas margens da rodovia BA-432.

5.3 CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS E SUSCETIBILIDADE NA ÁREA DE ESTUDO.

Em termos de Unidade Geotécnica, podemos dizer que na área de estudo ocorre uma só Unidade, a UG colúvio/residual sobre rochas sedimentares carbonáticas da Formação Salitre. Entretanto, quando analisamos as unidades litológicas que integram a Formação Salitre, podemos observar que elas possuem características distintas entre si. Estas características, importantes sob o ponto de vista de geologia de engenharia, nos permitiram subdividir a Unidade Geotécnica em 4 Subunidades Geotécnicas denominadas pelo mesmo nome das unidades litológicas: Irecê, Nova América Superior, Jussara e Nova América Inferior (Figura 5.38).

As Unidades Irecê e Nova América Inferior, que se restringem as porções NW e SSE da área de estudo, são constituídas por material sedimentar predominantemente argiloso (calcissiltitos, calcilutitos, margas); enquanto que as Unidades Jussara e Nova América Superior, que ocupam quase 70% da área de estudo, são constituídas por sedimentos mais arenosos (calcarenitos e dolarenitos). Além das diferentes características faciológicas outros atributos como relevo, solo e posicionamento das Subunidades na sub-bacia do Rio Juá também influenciaram na subdivisão da Unidade Geotécnica.

Nas Subunidades Irecê e Nova América Inferior, o relevo se apresenta mais ondulado com áreas elevadas, e os solos possuem espessuras maiores. As ocorrências de feições cársticas nestas Subunidades são significativamente menores, se comparada às outras Subunidades (Figura 5.39). Este fato pode ser explicado pelo posicionamento mais distal destas Subunidades na Sub-bacia do Rio Juá.

Nas Subunidades Jussara e Nova América Superior, o relevo é predominantemente plano, e os solos possuem espessuras mínimas, muitas vezes exibindo grandes lajedos rochosos. Nestas Subunidades também há grande concentração de feições cársticas (Figura 5.39) e cavidades subterrâneas. O fato de estas Subunidades estarem "encaixadas" na sub-bacia do Rio Juá, onde há maior quantidade de descontinuidades e maior circulação de água, somado a característica arenosa de suas composições, favorece o desenvolvimento do carste nestas regiões.

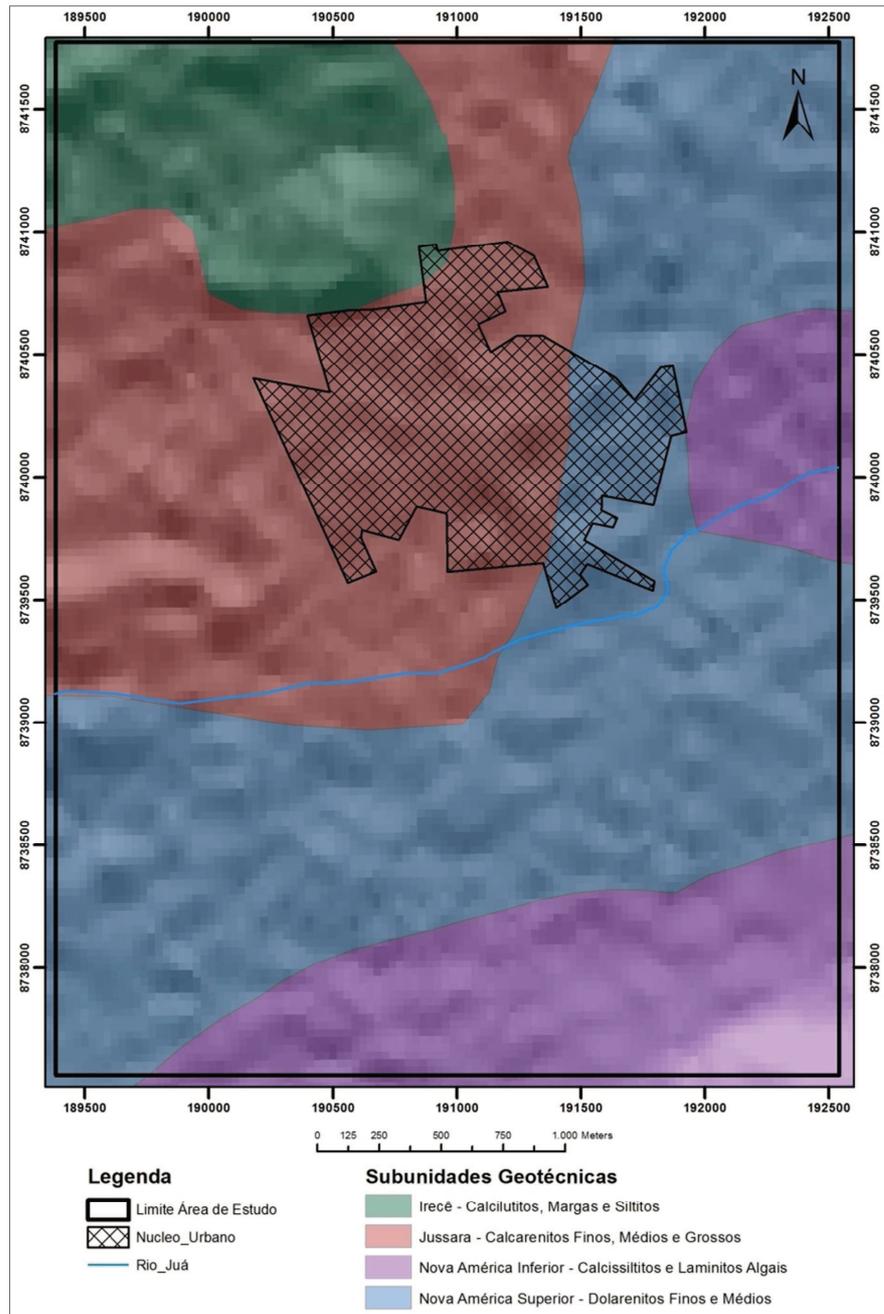


Figura 5.38: Subunidades geotécnicas na área de estudo. Transparência de 45% sobre relevo sombreado.

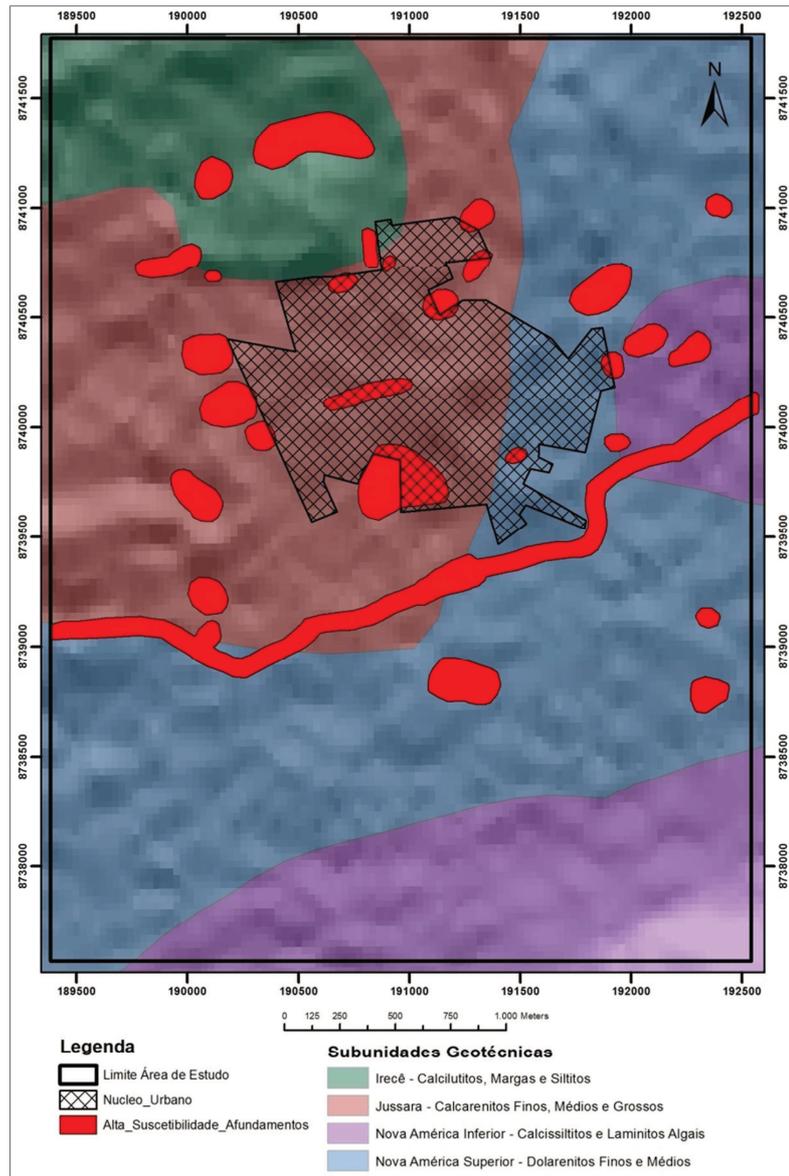


Figura 5.39: Áreas de alta suscetibilidade a afundamentos sobre as Subunidades geotécnicas. Transparência de 45% sobre relevo sombreado.

Uma característica importante observada nas Subunidades Irecê e Nova América Inferior é preenchimento das estruturas rúpteis por material predominantemente argiloso (Figuras 5.40). Nas discontinuidades abertas de direção E-W e N-S, que são as responsáveis por condicionar as maiores feições de afundamentos na região, ocorrem bolsões de material argiloso muito próximo à superfície (Figura 5.41). A proximidade com a superfície favorece a lixiviação deste material das discontinuidades pela água da chuva, formando vazios/cavidades internas (Figura 5.42).

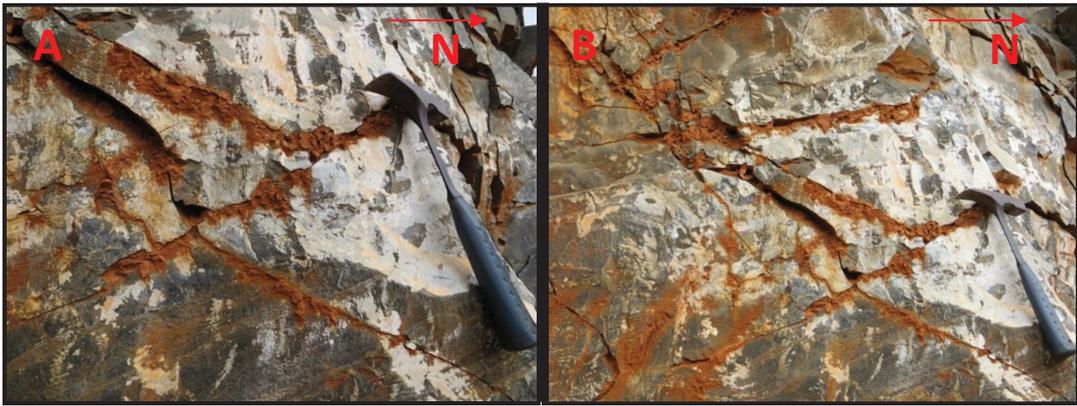


Figura 5.40: Argila preenchendo descontinuidades de par conjugado de fraturas NE e NW. (Fotos do autor)



Figura 5.41: (A) Bolsões verticais de argila em descontinuidades abertas aproximadamente E-W. Notar pequena falha normal na fotografia (B). (Fotos do autor)



Figura 5.42: (A) Cavidades próximas a superfície. (B) Detalhe. (Fotos do autor)

A formação destas cavidades próximas à superfície pode deixar a camada de rocha sobrejacente suscetível ao colapso, quando esta é submetida a um carregamento vertical provocado, por exemplo, pela expansão horizontal e vertical da área urbana da cidade.

O rebaixamento do nível freático também pode estar contribuindo com a ocorrência dos afundamentos cársticos na região. Dados obtidos durante o estudo indicam que o rebaixamento do lençol freático na região atingiu dezenas de metros nas últimas décadas. Esta variação pode ser um dos fatores preponderantes para que ocorra o processo de afundamento, segundo Prandini *et al.* (1987), Infanti Junior e Fornasari Filho (1998). Os autores defendem que na maioria dos casos o rebaixamento do nível d'água é o fator de maior peso na indução de subsidências e colapsos, a partir da evolução de cavidades formadas na porção saturada dos solos ou sedimentos que envolvem o calcário.

Entretanto, estudos realizados na região Maia *et al.* (2010) afirmam que o mais provável é que os afundamentos cársticos que vem ocorrendo em Lapão, estejam associados à evolução cárstica natural do ambiente, porém, acentuada pelo lançamento de esgotos e águas servidas de atividades agrícolas sobre o aquífero. Sendo assim, ainda segundo os autores, o agente indutor dos problemas de subsidências não seria a retirada da água, mas sim o aporte dela acidificada, decorrente de sua utilização em irrigações a montante do local onde ocorreram os eventos.

O somatório das interferências antrópicas no sistema cárstico contribui para acelerar os processos de afundamentos cársticos, e ambos os autores devem ter razões em suas afirmações. A adição de água acidificada no sistema pode acelerar o processo de dissolução da rocha carbonática, alargando ainda mais os condutos e, dependendo da suas dimensões, levar ao arqueamento ou mesmo o colapso da camada de rocha sobrejacente, dando origem as feições cársticas. O rebaixamento do lençol freático por sua vez, retira um componente importante de sustentação geotécnica do sistema.

Na região de Lapão o relevo predominantemente plano e as drenagens subterrâneas tornam inexistente a possibilidade da ocorrência de eventos destrutivos associados a movimentos de massa gravitacionais e de natureza hidrológica. Entretanto, por estar

situado sobre terrenos cársticos, possui regiões com alta suscetibilidade a afundamentos cársticos.

Os terrenos cársticos, em geral, são naturalmente suscetíveis a afundamentos, contudo, quando partimos para uma escala de maior detalhe é possível delimitar áreas em que a possibilidade da ocorrência do processo de afundamento seja mínima, ou até mesmo inexistente.

O conhecimento das características do carste e seu processo de desenvolvimento se tornam essencialmente importante para a proposição de um zoneamento em função de sua suscetibilidade. O grau de desenvolvimento do ambiente vai determinar as feições cársticas expostas, e estas vão condicionar processos que podem ser potencialmente perigoso à população.

O carste desenvolvido no planalto cárstico do Grupo Una possui três estágios de evolução, sendo o mais desenvolvido deles e que expõe as maiores feições localizados na região sul do planalto. Nesta região ocorre uma maior disponibilidade de água, proveniente do contato com as rochas quartzíticas do Grupo Chapada Diamantina.

Na área de estudo o carste está posicionado no centro do planalto cárstico, onde a disponibilidade de água é menor, conseqüentemente, o carste exhibe feições menos desenvolvidas, como pequenas cavidades internas, dolinas rasas, e pequenos colapsos de rocha.

Durante o estudo foi observado que as dolinas, circulares e ovaladas, são as feições cársticas mais comum na região, que também possui belas feições de lapiaz (Figura 5.43).

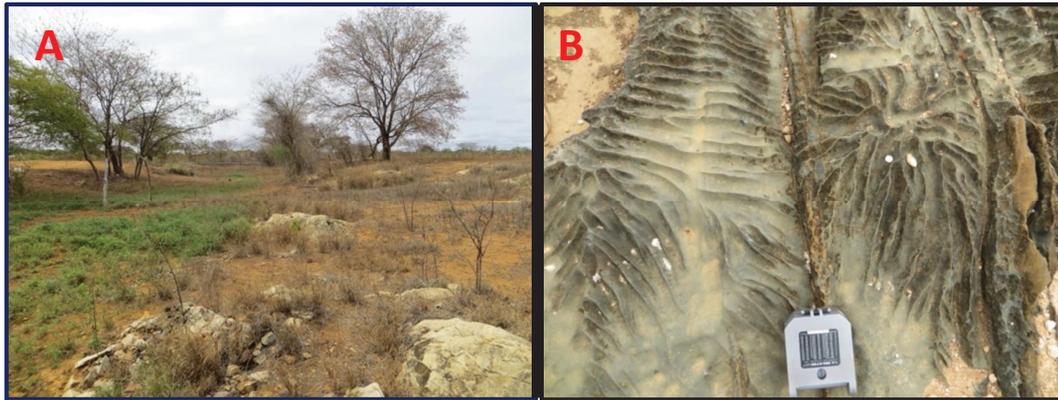


Figura 5.43 - (A) Dolina sobre a calha do Rio Juá. (B) Estrutura de lapiáz, cidade de Lapão. UTM: 190803E / 8740803S. (bússola = escala). (Fotos do autor)

A setorização de risco realizada no município mostrou que a ocupação de áreas como dolinas são perigosas. Diversas edificações que estão em áreas de dolinas têm apresentado problemas estruturais (Figuras 5.44) como trincas em paredes, vigas e pisos.

O surgimento destes problemas pode estar associado ao incremento de peso na superfície proveniente das obras de ampliação dos imóveis, evidenciando que áreas que já sofreram processos de afundamento são suscetíveis a acomodações do substrato rochoso, quando este é submetido a uma variação no carregamento vertical.



Figura 5.44: (A) Trincas parede. (B) Trincas piso. (Fotos do autor)

Outro fator importante levado em consideração na análise da suscetibilidade é a ocorrência de vazios internos/cavidades no substrato rochoso, relativamente, próximos à superfície. Dados obtidos por meio de 7445 metros de investigações geofísicas indicam que estas cavidades podem chegar a ter dezenas de metros de diâmetro e profundidades

inferiores a 15 m. Uma das características destes vazios, facilmente observada nos perfis geoeletricos, é a baixíssima condutividade apresentada na passagem de corrente elétrica, indicando que as cavidades estão secas.

Após a obtenção dos dados das investigações geofísicas e das características das subunidades geotécnicas este trabalho realizou o zoneamento das áreas suscetíveis ao afundamento e acomodações do substrato rochoso, as dividindo em três classes Alta, Média e Baixa.

Foram consideradas como áreas de alta suscetibilidade a afundamentos cársticos e acomodações do substrato rochoso, as áreas que já apresentavam superfícies instáveis (dolinas), e as áreas sobre vazios internos próximos à superfície identificados pela sondagem geofísica.

As áreas consideradas de média suscetibilidade a afundamentos cársticos e acomodações do substrato rochoso, são as áreas que coincidem com as Subunidades Jussara e Nova América Superior. As características geotécnicas destas Subunidades sugerem que elas são mais suscetíveis à ocorrência de afundamento do que as demais Subunidades.

Também foram consideradas de média suscetibilidade a afundamentos cársticos e acomodações do substrato rochoso, áreas que correspondem a um "buffer" de 20 m no entorno dos limites dos polígonos de alta suscetibilidade. Isto se deve ao fato de ter sido muito difícil durante os levantamentos geofísicos e de campo, estabelecer o limite exato da área de influência das estruturas observadas, uma vez que nem sempre ocorrem rupturas de tração (trincas) nas bordas dos afundamentos que possam ser mapeadas em superfície.

As áreas consideradas de baixa suscetibilidade não apresentaram indícios de instabilidade em superfície. Estas áreas são coincidentes as áreas de ocorrência das Subunidades Irecê e Nova América Inferior e suas características geotécnicas sugerem que elas são menos suscetíveis ao desenvolvimento de feições cársticas.

A figura 5.45 mostra as áreas suscetíveis à ocorrência de afundamentos cársticos.

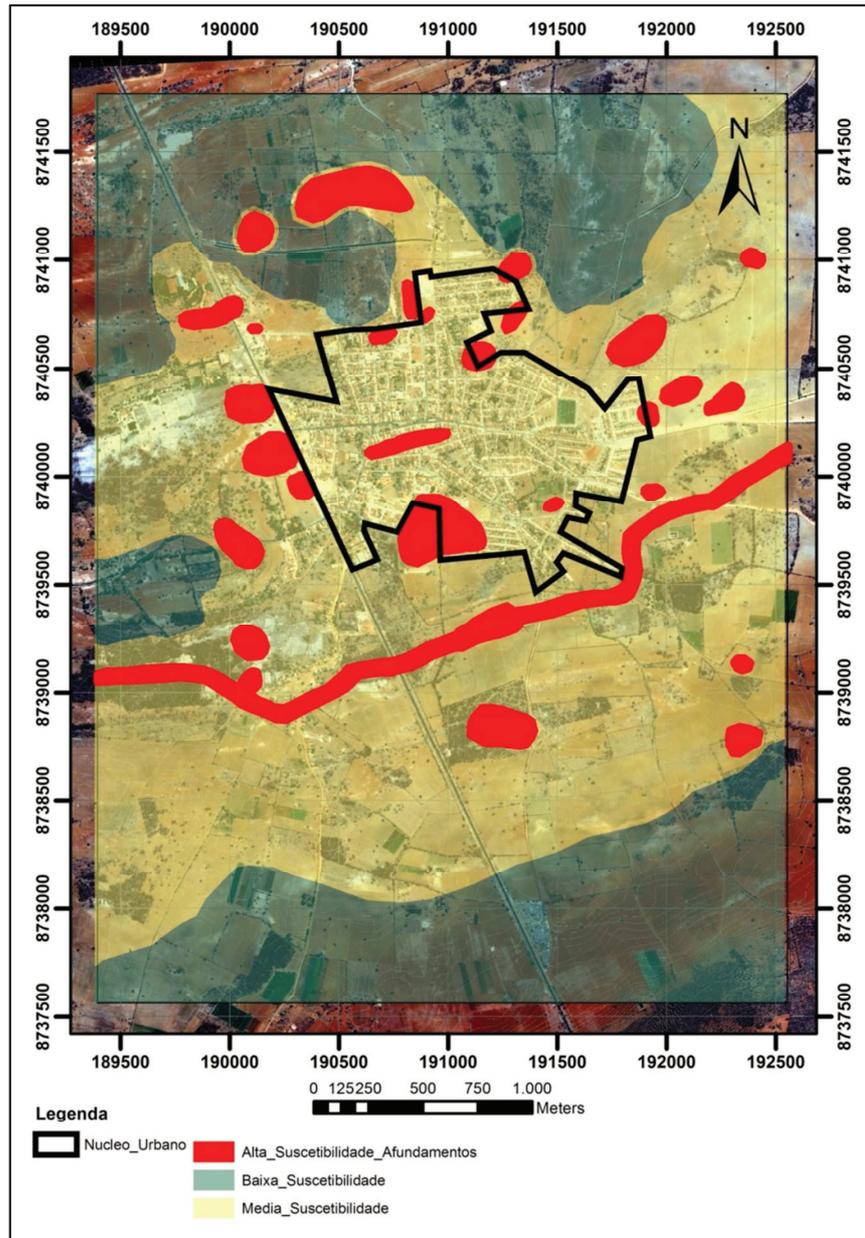


Figura 5.45: Mapa simplificado de suscetibilidade a afundamentos cársticos da área de estudo. Escala 1:10000.

5.5 CARTA GEOTÉCNICA DE APTIDÃO À URBANIZAÇÃO

Após identificação das áreas suscetíveis à ocorrência de afundamentos e conhecimento das características geotécnicas das subunidades presentes na área de estudo, foi realizado o zoneamento das unidades de aptidão em alta, média e baixa (Anexo 1).

5.5.1 Área de Alta Aptidão à Urbanização

Esta unidade se restringe às porções norte e sul da área estudada, representa cerca de 25% do total da área de estudos (Anexo 1). Nesta classe estão áreas elevadas e áreas que não apresentaram indícios de instabilidade, como subsidências ou colapsos de terreno. Possuem relevo mais ondulado e solos com espessuras superiores a 1 metro (Figura 5.46).

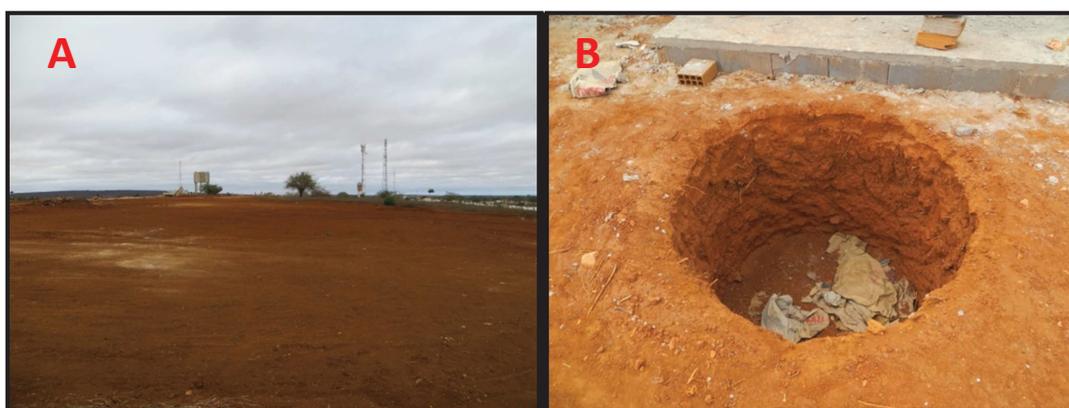


Figura 5.46: Áreas altas (A) e/ou com solos espessos (B). (Fotos do autor)

As áreas classificadas como de alta aptidão à ocupação não apresentam quaisquer restrições geotécnicas, ambientais ou geomorfológicas. Portanto, para sua ocupação por projetos de urbanização, são recomendadas análises prévias usuais em qualquer empreendimento de loteamento, como estudo geotécnico simplificado e sondagens, bem como procedimentos simples voltados à implantação do empreendimento, tais como a execução imediata de calçamento e drenagem pluvial, e a preservação da cobertura vegetal nos lotes enquanto não se iniciam as obras das edificações. Os locais onde já existe ocupação são áreas com pleno potencial para a consolidação urbana.

5.5.2 Média Aptidão à Urbanização

Esta unidade compreende as áreas localizadas sobre as Subunidades Jussara e Nova América Superior, áreas com média suscetibilidade a afundamentos cársticos e representa cerca de 60 % da área estudada (Anexo 1).

É composta por áreas que possuem grandes lajes de afloramentos rochosos, solos pedregulhosos e com espessuras inferiores a 1 metro (Figura 5.47).

As áreas classificadas como de média aptidão à urbanização tiveram como principais restrições a exposição de lajes rochosas e a pouca espessura de solos em outros pontos, aspectos que podem dificultar a sua ocupação, uma vez que a implantação do sistema de infraestrutura, como galerias de esgotos, drenagens pluviais, arruamentos, etc. seria necessário o desmonte do substrato rochoso com uso de explosivos.

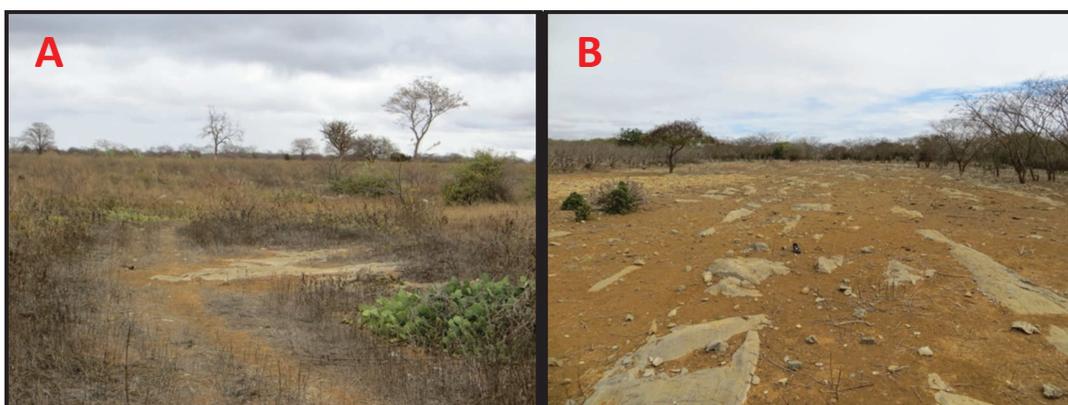


Figura 5.47: Área com solo pouco espesso (A) e lajedos rochosos (B). (Fotos do autor)

Em ambientes cársticos o uso de explosivos no desmonte das rochas para a implantação dos sistemas de infraestrutura pode ser extremamente danoso, visto que a onda de choque provocada pelas detonações pode desencadear uma série de processos de acomodação do substrato ou mesmo provocar o colapso da faixa de rocha localizada entre os vazios internos (cavidades) e a superfície. Caso seja inevitável o uso de explosivos, devem-se desenvolver estudos geotécnicos mais detalhados e direcionados a estes locais, de forma a subsidiar medidas estruturais e não estruturais que garantam a estabilidade para as ocupações.

Estes procedimentos tornam mais onerosa qualquer intervenção de ocupação a ser feita nesta unidade em comparação com a unidade de alta aptidão à urbanização.

5.5.3 Baixa Aptidão à Urbanização

Esta unidade ocorre em cerca 15% do total da área de estudo (Anexo 1). Corresponde às áreas que apresentam alta suscetibilidade à ocorrência de afundamentos e acomodação do substrato rochoso, como as dolinas, superfície sobre o Rio Juá e os terrenos sobre os vazios internos (cavidades).

Preferencialmente, as dolinas estão associadas a estruturas como falhas e fraturas, região onde se concentra maior fluxo de água e maior velocidade de dissolução das rochas carbonáticas, e possuem formas circulares e alongadas (Figuras 5.48).

O Rio Juá, apesar de ser um rio subterrâneo, é o maior corpo hídrico da cidade, no seu entorno foram instalados centenas de poços tubulares que captam volumes expressivos de água. A instabilidade do pacote de rocha sobre o Rio Juá também pode ser observada durante o estudo (Figura 5.49).

As superfícies sobre os vazios internos são as mais suscetíveis às subsidências e colapsos quando submetidas ao carregamento vertical. Apesar de a carstificação na região ser controlada pelas discontinuidades, durante levantamentos de campo e investigações geofísicas, pode ser visto que os vazios internos (cavidades) também ocorrem de formas isoladas, sem aparente relação com as zonas fraturadas.



Figura 5.48: Dolina circular (A); e alongada (B) de direção N-S. (Fotos do autor)

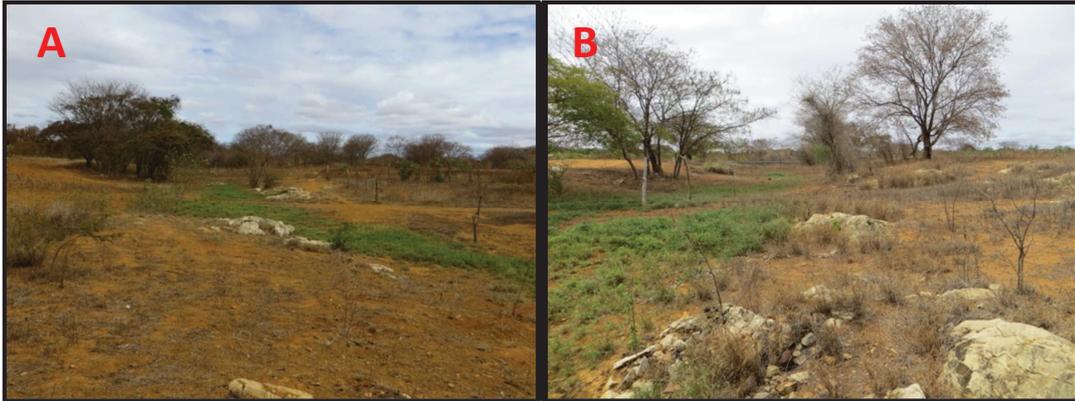


Figura 5.49: Afundamentos da superfície sobre o Rio Juá. Fotografias de fora (A) e dentro da calha (B). (Fotos do autor)

A ocupação de áreas como dolinas mostrou, ao longo do processo de expansão urbana nos últimos 30 anos, a grande vulnerabilidade destes terrenos. Durante a interpretação da área em fotografias aéreas da década de 70, pode ser observado que nestas regiões não havia urbanização. Hoje, após a ocupação destas áreas, é possível observar os danos provocados pela constante acomodação do substrato rochoso em diversos imóveis da cidade (Figura 5.50).



Figura 5.50: Construções danificadas construídas sobre dolina. Centro (A); Casas Populares(B). (Fotos do autor)

Nas áreas classificadas como de baixa aptidão á urbanização, não se deve ocupar sem antes serem executados estudos geotécnicos detalhados, que indiquem medidas preventivas e corretivas antes de qualquer projeto de loteamento. No caso das dolinas e vazios internos devem-se realizar estudos geotécnicos detalhados para determinar se a

ocupação será possível após a injeção de caudas de cimento, resinas ou outros produtos de estruturação.

Nos terrenos já ocupados desta unidade devem ser efetuados estudos detalhados das suscetibilidades e estudos de análise de riscos, uma vez que a análise inicial apontou restrições severas para a ocupação destas áreas. São locais de difícil, senão impossível, consolidação pelos custos e incertezas das medidas corretivas e preventivas.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A Carta Geotécnica de Aptidão à Urbanização elaborada para o município de Lapão constitui uma importante ferramenta de ordenamento e gestão territorial no que tange a orientação dos seus vetores de crescimento, minimizando a possibilidade de exposição da população à ocorrência de processos ou eventos de desastres naturais.

A carta de aptidão gerada por este trabalho é orientativa e, em função da distribuição irregular dos vazios subterrâneos no entorno da cidade, é imprescindível a realização de sondagens diretas (rotativas com recuperação) antes da construção ou mesmo ampliação de qualquer imóvel na cidade.

Um dos aspectos interpretativo mais importante resultante do estudo na cidade de Lapão é a evidência de um processo de afundamento fortemente favorecido pelo peso das construções.

O uso da técnica geofísica de eletrorresistividade se mostrou bastante eficiente na identificação das zonas fraturadas e dos vazios subterrâneos (cavidades).

As ocorrências de feições cársticas, como dolinas, colapsos e sumidouros, correspondem a aproximadamente 15% da superfície da área estudada, sendo mapeadas 27 feições de afundamentos, equivalendo a 2,4 km². A ocupação destas áreas ao longo dos últimos 40 anos tem demonstrado que estas são geotecnicamente instáveis. Os danos ocorrentes nas estruturas das edificações construídas nestes locais evidenciam os perigos de se ocupar estas áreas.

O mapa de suscetibilidade mostrou que as áreas de alta suscetibilidade a afundamentos cárstico ocorrem em todas as zonas previstas para expansão urbana pelo Plano Diretor. Porém há uma concentração maior de feições nas subunidades geotécnicas Jussara e Nova América Inferior.

Recomenda-se a realização de estudos geotécnicos específicos na área, como por exemplo, determinar a resistência ao carregamento da faixa de rocha entre o teto das cavidades e a superfície.

Recomenda-se o estudo em áreas testes de injeção de caudas de cimento, resina expansiva e outros produtos de estruturação.

Recomenda-se a instalação de marcos topográficos de precisão na superfície em diversos pontos da cidade e o seu monitoramento constante por topógrafos e/ou eng. agrimensores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBRECHT, K. J. **Avaliação dos problemas geológico-geotécnicos em terrenos cársticos - base para o mapeamento geotécnico.** 1996. 105p. Dissertação – Universidade de São Paulo, São Paulo. 1996.

ALCKIM F. F. **O que faz de um Cráton um Cráton? O Cráton do São Francisco e as revelações almeidianas ao delimitá-lo.** 2004. In: Mantesso-Neto V., Bartorelli A., Carneiro C. D. R, Brito-Neves B. B. (org.) *Geologia do Continente Sul Americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida.* Beca, p.17-35.

BAHIA, GOVERNO DO ESTADO DA. Superintendência dos Recursos Hídricos (SRH). **Plano Diretor de Recursos Hídricos. Bacias dos Rios Verde e Jacaré. Margem Direita do Lago de Sobradinho,** 1995. 119 p.

BARBOSA, J.S.F.; DOMINGUES, J.M.L. **Geologia da Bahia: texto explicativo parao mapa geológico ao milionésimo.** Salvador: SICM/SGM. 382 p.il. 1996. Convênio SICM/SGM/UFBA/PPPG/FAPEX.

BASTOS LEAL, L.R.; DUTTON, A.R.; LUZ, J.A.G. **Hydrogeology and Sustainability of a fractured-karst aquifer in Precambrian bedrock of Northeast Brazil.** Groundwater em impressão. 2009.

BASTOS LEAL, L.R.; NEGRÃO, I.F.; **Aspectos Geológicos e Hidrogeológicos do Aquífero Cárstico de Irecê.** Roteiro de excursão de campo. 2003.

BASTOS LEAL, L. R.; SILVA, H. P. (Coord.) **Modelização da dinâmica hidrológica e instrumentos para a gestão do sistema aquífero-rio das bacias hidrográficas dos rios Verde e Jacaré – região semiárida do estado da Bahia.** Relatório técnico final do convênio de cooperação técnico-científica celebrado entre a Superintendência de Recursos Hídricos do Estado da Bahia e a Universidade Federal do Estado da Bahia. 2004, 435p.

BIGARELLA, J.J.; BECKER, R.D.; SANTOS, G.F. dos. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais**. Vols. I e II. Florianópolis: Ed. UFSC, 1994.

BITAR, O.Y.; CERRI, L.E.S.; NAKAZAWA, V.A. 1992. **Carta de risco geológico e carta geotécnica: uma diferenciação a partir de casos em áreas urbanas no Brasil**. In: SIMPÓSIO LATINO AMERICANO SOBRE RISCO GEOLÓGICO URBANO, 2., Pereira, 1992. Atas... V. 1, p.35-41.

BONFIM, L.F.C.; ROCH, A.J.D.; PEDREIRA, A.J.; MORAIS, J.C.P.; GUIMARÃES, J.T.; TESCH, N.A. **Projeto Bacia de Irecê**. Salvador: CPRM, 1985. (Relatório Final).

BRITO NEVES, B. B.; **Geologia das folhas de Upamirim e Morro do Chapéu**. CONESP, 1967; Relatório nº 17, 53 p.

BRITO NEVES, B. B.; CORDANI, U. G., TORQUATO, J. R. F. **Evolução Geocronológica do Pré-cambriano no Estado da Bahia**. 1980. In: INDA, H. A. V. e DUARTE, F. B. (Orgs.). **Geologia e Recursos Minerais do Estado da Bahia**. Textos Básicos. Vol3, Salvador, 1980. SME/CPM, p. 1-101.

BROWN, L.; FLAVIN, C.; FRENCH, H. **Estado do mundo 2000**. Tradução H. Mallett. Salvador: UMA Editora, 2000. 288p.

CAVEDON, A. D. **Classificação, Características Morfológicas, Físicas e Químicas dos Principais Solos que Ocorrem no Semiárido Brasileiro**. In: Simpósio Sobre Caatinga e Sua Exploração Racional. Brasília: Embrapa-DDT, 1986. 361p. p.74-91.

CERRI, L.E.S. 1990. **Carta Geotécnica: contribuições para uma concepção voltada às necessidades brasileiras**. In: ABGE Cong. Bras. Geologia de Engenharia, 6, Salvador, Anais p.309-317.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2ª edição. São Paulo: Edgard Blucher, 1980. 188p.

COUTINHO, A. M. R. A. **Avaliação de Impactos da Agricultura Intensiva Irrigada Sobre as Propriedades Físicas e Químicas de Solos da Microrregião de Irecê-Bahia.** 2000. 99p. Dissertação – Universidade Federal da Bahia, Salvador. 2000.

COSTA, J. B. S. **Geologia estrutural.** Salvador: CPRM, 1989. (Apostila de Curso).

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Ação Emergencial na Cidade de Lapão - BA.** Relatório Final Integrado. Relatório Interno. Salvador, 2013.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Folha SC.24-Y-C Jacobina. In: GEOBANK. **Mapas Geológicos Executados pela CPRM (pós 2003).** Disponível em: <http://geobank.sa.cprm.gov.br>. Acesso em 13 out. 2014.

CRUZ, S. C. P.; ALCKIMIM, F. F. **The tectonic interaction between the Paramirim Aulacogen and the Araçuaí belt, São Francisco craton region, Eastern Brazil.** Anais da Academia Brasileira de Ciências, 78(1), 151-173. 2006.

DALTON DE SOUZA, J.; KOSIN, M.; MELO, R. C.; SANTOS, R. A., TEIXEIRA, L. R.; SAMPAIO, A. R.; GUIMARÃES, J. T.; VIEIRA BENTO, R.; BORGES, V. P.; MARTINS, A. A. M.; ARCANJO, J. B.; LOUREIRO, H. S. C.; ANGELIM, L. A. A. **Mapa geológico do Estado da Bahia. Escala 1:1.000.000.** Salvador: CPRM. 2003.

DANDEFER FILHO A. **Análise Estrutural Descritiva e Cinemática do Supergrupo Espinhaço na Região da Chapada Diamantina, Bahia, Brasil.** 1990. 99p. Dissertação – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 1990.

DANDEFER FILHO A.; LAGOEIRO L. E.; ALCKMIM F. F. **O Sistema de dobramentos e empurrões da Chapada Diamantina (BA): Registro da inversão do Aulacógeno do Espinhaço no decorrer do Evento Brasileiro.** In: SBG, II Simpósio sobre o Cráton São Francisco - Evolução Tectônica e Metalogenética, Anais, p. 197-199. 1993.

DIAS, F. S. **Estudo do Aquífero Carbonático da Cidade de Barroso (MG) – Uma contribuição à gestão do manancial subterrâneo.** 2009. Tese - Programa de Pós Graduação em Geologia, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais. 2009.

DIAS, F. P. HERMANN, M. L. P. **Suscetibilidade a Deslizamentos: estudo de Caso no Bairro de Saco Grande, Florianópolis - SC.** Caminhos de Geografia, v.3, n.6, p.57-73. 2002.

DINIZ, N. C. **Automação da cartografia geotécnica: uma ferramenta de estudos e projetos para avaliação ambiental.** 1998. 2v. Tese - Departamento de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 1998.

DOMINGUEZ, J.M.L. **As coberturas do Cráton do São Francisco: uma abordagem do ponto de vista da análise de bacias.** In: Dominguez, J. M. L. & Misi, A., eds, O Cráton do São Francisco, SBG/BAGM/CNPq, Salvador: 1993. P. 137-159.

DREYBRODT, W. **Processes in karst Systems.** Springer-Verlag. Berlin, 1988.

FORD, D.; WILLIAN, P. **Karst Geomorphology and Hydrology,** Unwin Hyman Ltd, London. 1989.

FREITAS, C. G. L. de. **Cartografia geotécnica de planejamento e gestão territorial: proposta teórica e metodológica.** 2000. 238p. Tese - Departamento de Geografia, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2000.

GALOPIM DE CARVALHO, A. M. **Geologia – Morfogênese e Sedimentogênese.** Universidade Aberta. Lisboa, 1996. 189 p.

GILLI, E.; MANGAN, C.; MUDRY, J. **Hidrogeologie – Objects, methods, applications.** Dunod. Paris, 2004.

GUERRA, A. M.: **Processos de Carstificação e Hidrogeologia do Grupo Bambuí na Região de Irecê – Bahia.** 1986. Tese - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 1986.

GUERRA, T.J.A.; CUNHA, B.S. **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. 4ª edição. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2001. 472 p.

GUIMARÃES, J. T.; DOMINGUES, J. M. L. **Caracterização Faciológica da Formação Bebedouro (Proterozoico Superior) no Estado da Bahia**. 1995. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DE MINAS GERAIS. Diamantina. Anais. Diamantina: SBG - Núcleo Minas Gerais, Instituto de Geociências da UFMG, (Boletim, 13) 148p. il. p. 107-108.

GUIMARÃES, J. T.; PEDREIRA, A. J. **Estratigrafia**. In: GUIMARÃES, J.T.; PEDREIRA, A.J., (coords.), **Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil, Folha Utinga, Estado da Bahia**: DNPM/CPRM, 1990, p. 70-82.

GUIMARÃES, J. T.; SANTOS, R. A. M.; CAMPELO, R. de (Org.) **Geologia da Chapada Diamantina Ocidental (Projeto Ibitiara Rio de Contas)**. Salvador: CBPM. 2008. 64 p. il. (Série Arquivos Abertos, 31).

HECKEL, P. H. **Recognition of Ancient Shallow Marine Environments**. In: Rigby., J. K., and Hamblin, W. K., eds., **Recognition of Ancient Sedimentary Environments**, Society Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication, v.16, p. 226-286. 1972.

INFANTI JUNIOR, N.; FORNASARI FILHO, N. **Processos de Dinâmica Superficial**. In: OLIVEIRA, A. M. dos S.; BRITO, S. N. A. de. **Geologia de engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998. p. 131-152.

INGÁ - Instituto de Gestão das Águas e Clima - Secretaria de Meio Ambiente - BA. **Uma análise preliminar das subsidências e fissuras cársticas no município de Lapão –Bahia, através da realização do cadastro de usuários de recursos hídricos**. Relatório Interno. Salvador, 2009.

INMET - **Instituto Nacional de Meteorologia. Banco de Dados Históricos**. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>. Acesso em 21/08/2014.

KARMANN, I. 2000. Ciclo da Água. Água Subterrânea e a Sua Ação Geológica. In: TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. C. M.; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F. (orgs.) 2000. **Decifrando a Terra**. São Paulo: Oficina de Textos.

KARMANN, I.; SAULLUN FILHO, W. 2007. **Paisagens subterrâneas do Brasil**. Ciência Hoje, vol. 40, n. 235, p. 18-5.

KLIMCHOUK, B. A.; FORD, D. C. **Types of Karst and Evolution of Hydrogeologic Settings**. p.45-53. In: KLIMCHOUK, B. A.; FORD, D. C.; PALMER, A. N.; DREYBRODT, W. (editors) Speleogenesis - Evolution of Karst Aquifers. Huntsville (USA), NationalSpeleologicalSociety: 2000.

KUCHENBECKER, M.; REIS, H. L. S.; FRAGOSO, D. G. C. (2011). **Caracterização estrutural e considerações sobre a evolução tectônica da Formação Salitre na porção central da Bacia de Irecê, norte do Cráton do São Francisco (BA)**. Geonomos, 19(2), 42-49.

LAGOEIRO L.E. **Estudo da deformação nas sequências carbonáticas do Grupo Una, na região de Irecê, Bahia**. 105p. 1990. Dissertação - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto. 1990.

LLADÓ, N. L. (1970). **Fundamentos de hidrogeologia cárstica**. EditoraBlume, 271p.

LOUREIRO. **Geologia e Recursos Minerais da Parte Norte do Corredor de Deformação do Paramirim** (Projeto Barra-Oliveira dos Brejinhos. Salvador: CBPM/CPRM, 2009. 122p.:il.; 2 mapas color. – (Série Arquivos Abertos; 33).

MAIA, P. H. P.; DIAS NETO, B.; CORRÊA GOMES, L. C. **Análise Geológica e Estrutural das Fissuras e Subsídências no Carste de Lapão**. Cadernos de Geociências, v. 7, n. 2, 2010.

MISI, A.; KYLE, R. **Positive $\delta^{13}\text{C}$ excursions in the Upper Proterozoic of the Una Group, Brazil, and the genesis of phosphorite deposits: a global phenomenon?** In:

14th International Sedimentological Congress, Recife, PE, Brazil. 1994b. Abstracts Volume, pp. G55-G56.

MISI, A.; SILVA, M.G. **Chapada Diamantina Oriental - Bahia: geologia e depósitos**. Série Roteiros Geológicos - SGM / Salvador. 194 p. 1996.

MOORE, G.W.; SULLIVAN, N. **Speleology: caves and the cave environment**. 3.ed. Missouri: National Speleological Society, 1997.

NOSSA, T. C. B.; SILVA, H. M da; LEAL, L. R. B. **A Influência do Sistema de Fraturamentos no Regime de Fluxo em Aquíferos Cársticos: Um Estudo de Caso nos Municípios de Irecê e Lapão - BA**. In: XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Campo Grande, Mato Grosso: ABRH , 2009.

OLIVEIRA, L. M. A. **Gestão de Riscos Geológicos Urbanos em Áreas de Carste**. Curitiba: 1997. Monografia de Especialista em Gestão Técnica do Meio Urbano (PUC-PR).

ONGLEY, E.D. **Controle da Poluição da Água Pelas Atividades Agrícolas**. Campina Grande: UFPB, 2001. 92p. FAO. Irrigação e Drenagem, 55.

OTERO, E. P.; DOMINGUEZ, J. M. L.; LIMA, C. C. **Sedimentação flúvio-eólica no Proterozoico Médio, Formação Tombador, Grupo Chapada Diamantina, Estado da Bahia**. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA, NÚCLEO MINAS GERAIS, 5/NÚCLEO BRASÍLIA, 1, Belo Horizonte, 1989. Anais. Belo Horizonte, Soc. Bras. Geol., Bol. n. 10, p. 212-217.

PEDREIRA, A. J. **Sequências deposicionais no Pré-cambriano: exemplo da Chapada Diamantina Oriental, Bahia**. In: CONG. BRAS. GEOL., 33, Belém, 1988. Anais... Belém SBG, v. 2, p. 648-659.

PFALTZGRAFF, P. A. S. **Mapa de Suscetibilidade a Deslizamentos na Região Metropolitana do Recife**. 2007. Tese - Programa de Pós Graduação em Geociências. Recife, Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco. 2007.

PIMENTEL, J.; FERREIRA, C. E. O.; SHINZATO, E.; MAIA, M. A. M.; SILVA, S. F.; HOELZEL, M.; FALTZGRAFF, P. A.; MORAES, J. M.; PARISI, G. N.; SILVA, C. N.; OLIVEIRA FILHO, I. B. de; FREGOLENTE, A. **Atuação do Serviço Geológico do Brasil no mapeamento de riscos geológicos para a redução de impactos decorrentes de eventos extremos.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 46., 2012, Santos, SP. Anais... São Paulo: SBG Núcleo São Paulo, 2012. 1 CD-ROM.

PLANO DIRETOR PARTICIPATIVO DE LAPÃO – BA. **Relatório Final - Volume 1,** 2007. 91 p.

PRANDINI, F. L.; NAKAZAWA, V. A.; FREITAS, C. G. L. de; DINIZ, N. C. Cartografia Geotécnica nos Planos Diretores Regionais e Municipais. In: BITAR, O. Y. **Curso de Geologia Aplicada ao Meio Ambiente.** São Paulo: ABGE/ IPT, 1995. p. 187-202.

PRANDINI, F. L.; PONÇANO, W. L.; SANTAS, A. M. **Cajamar - carst e urbanização:** a experiência internacional (síntese bibliográfica). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 5, São Paulo, 1987. São Paulo: ABGE, 1987, v. 2, p. 431-441, 1987.

RAMOS, S.O.; ARAÚJO, H.A.; LEAL, L.R.B.; LUZ, J.A.G. e DUTTON, A.R. **Variação temporal do nível freático do aquífero cárstico de Irecê - Bahia: contribuição para uso e gestão das águas subterrâneas no semi-árido.** Revista Brasileira de Geociências. Salvador: Dezembro de 2007. 37(4 - suplemento): 227-233p.

RESENDE, M.; CURI, N.; SANTANA, D. P. **Pedologia e Fertilidade do Solo - interações e Aplicações.** Brasília: Ministério da Educação; Lavras: ESAL; Piracicaba: POTAFOS, 1988. 81p.

RESENDE COSTA, N. B. O. **Relatório de Vistoria Matozinhos. Sobrevoos Matozinhos.** Relatório Interno – CPRM, 2013.

SANTOS, A. R. **Áreas de Risco Para a Engenharia em Calcários Cársticos: Modelagem Geológica e Soluções Construtivas. O Caso de Cajamar - SP.** Revista Fundações e Obras Geotécnicas. Ano 4 Edição nº 45. 2014.

SILVA, H. M. **Sistema de informações geográficas do aquífero cárstico da microregião de Irecê, Bahia: subsídio para a gestão integrada dos recursos hídricos das bacias dos rios Verde e Jacaré.** 2005. 145p. Dissertação - Universidade Federal da Bahia, Bahia. 2005.

SILVA, A. B. **Hidrogeologia – Conceitos e Aplicações.** Capítulo 3.3 – Hidrogeologia de Meios Cársticos. CPRM. Rio de Janeiro. P 169-171. 2008.

SILVEIRA, J. S. **Dinâmica de sedimentação de um mar raso antigo: Formações Caboclo e Morro do Chapéu (Proterozóico Médio), Grupo Chapada Diamantina - Estado da Bahia.** 1991. Dissertação – Universidade Federal da Bahia, Bahia. 1991.

SRH/UFBA/FAPEX/NEHMA/POSGEMA/DEA, Relatório Técnico Final do Convênio 002/02: Projeto: **Modelização da dinâmica hidrológica e instrumentos para a gestão dos sistema aquífero das bacias hidrográficas dos rios Verde e Jacaré – região semi-árido Estado da Bahia,** 2004. 361 p.

SOBREIRA, F. G.; SOUZA. L. A. 2012. **Cartografia Geotécnica Aplicada ao Planejamento Urbano.** Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, São Paulo, SP, v. 2, n. 1, p. 79-97.

SOUZA S.L.; BRITO P.C.R.; SILVA R.W.S. **Estratigrafia, Sedimentologia e Recursos Minerais da Formação Salitre na Bacia de Irecê, Bahia.** Salvador: CBPM. 1993. Série Arquivos Abertos 2: 36p.

SWEETING, M. M. **Karst Landforms.** Londres: Macmillan. 362 p.: 1973.

TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. **Desastres naturais: conhecer para prevenir.** São Paulo: Instituto Geológico, 2009.

WHITE, B. W. **Geomorphology and Hydrology of Karst Terrains**. Oxford University Press. Oxford, 1988.

WHITTOW, J. **The Penguin dictionary of physical geography**. 2nd Edition. London: Penguin Books, 2000.

ZAINE, J. E. **Mapeamento geológico-geotécnico por meio do método do detalhamento progressivo: ensaio de aplicação na área urbana do município de Rio Claro (SP)**. 2000. 149p. Tese - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro. 2000.

SITES DA WEB

www.cprm.gov.br

www.icmbio.gov.br

www.inmet.gov.br

www.inpe.br

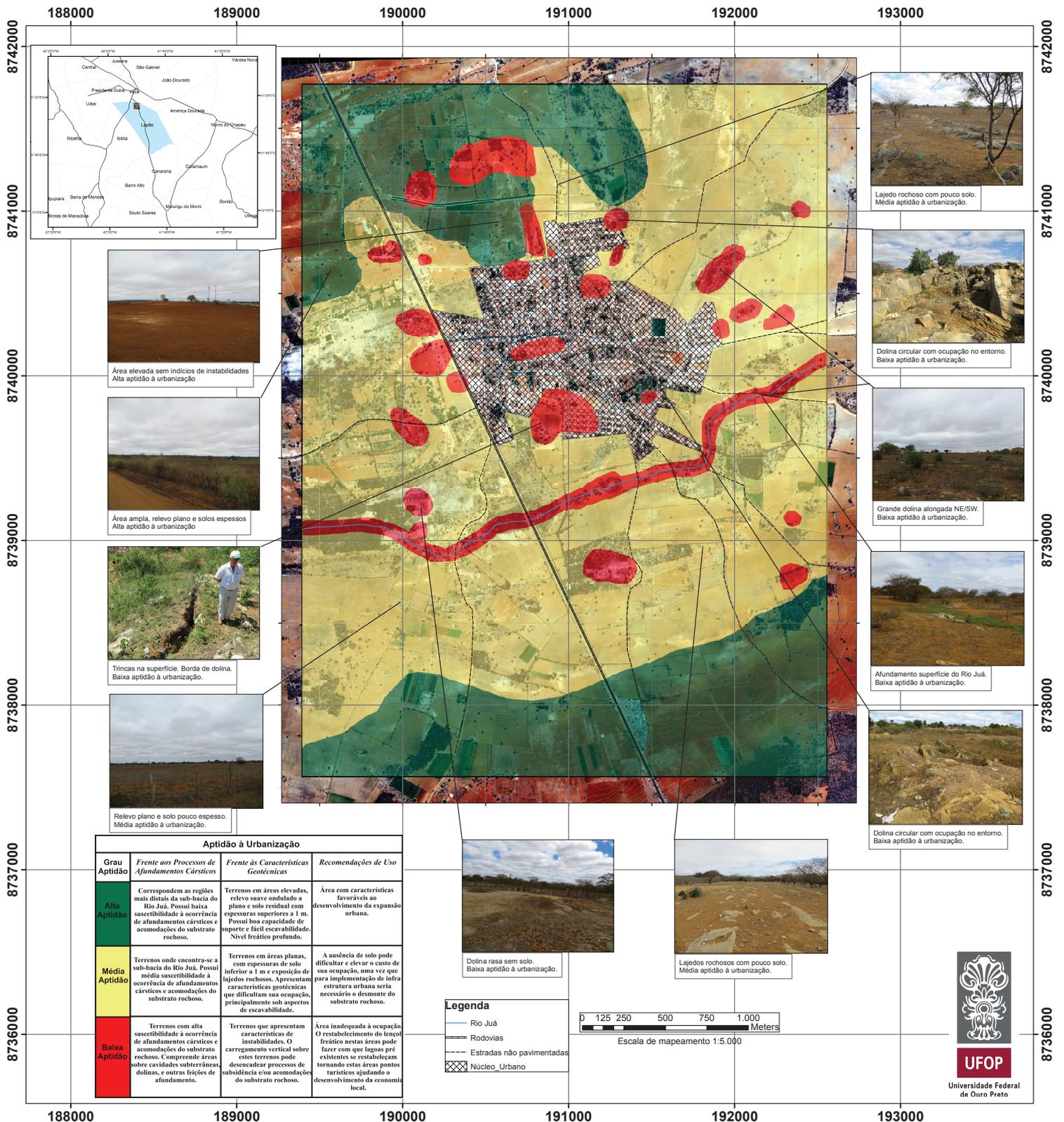
www.iregiaio.blogspot.com.br

www.jspacesystem.or.jp

www.portalaz.com.br

www.unesp.br

CARTA GEOTÉCNICA DE APTIDÃO À URBANIZAÇÃO DE LAPÃO - BA



Área elevada sem indícios de instabilidades. Alta aptidão à urbanização.



Área ampla, relevo plano e solos espessos. Alta aptidão à urbanização.



Trincas na superfície. Borda de dolina. Baixa aptidão à urbanização.



Relevo plano e solo pouco espesso. Média aptidão à urbanização.



Lajeado rochoso com pouco solo. Média aptidão à urbanização.



Dolina circular com ocupação no entorno. Baixa aptidão à urbanização.



Grande dolina alongada NE/SW. Baixa aptidão à urbanização.



Afundamento superficial do Rio Juá. Baixa aptidão à urbanização.



Dolina circular com ocupação no entorno. Baixa aptidão à urbanização.



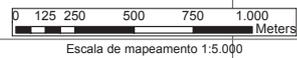
Dolina rasa sem solo. Baixa aptidão à urbanização.



Lajeados rochosos com pouco solo. Média aptidão à urbanização.

Aptidão à Urbanização			
Grau Aptidão	Frete aos Processos de Afundamentos Cársticos	Frete às Características Geotécnicas	Recomendações de Uso
Alta Aptidão	Correspondem as regiões mais distais da sub-bacia do Rio Juá. Possui baixa suscetibilidade à ocorrência de afundamentos cársticos e acomodações do substrato rochoso.	Terrenos em áreas elevadas, relevo suave ondulado a plano e solo residual com espessuras superiores a 1 m. Possui boa capacidade de suporte e fácil escavabilidade. Nível freático profundo.	Área com características favoráveis ao desenvolvimento da expansão urbana.
Média Aptidão	Terrenos onde encontra-se a sub-bacia do Rio Juá. Possui média suscetibilidade à ocorrência de afundamentos cársticos e acomodações do substrato rochoso.	Terrenos em áreas planas, com espessuras de solo inferior a 1 m e exposição de lajedos rochosos. Apresentam características geotécnicas que dificultam sua ocupação, principalmente sob aspectos de escavabilidade.	A ausência de solo pode dificultar e elevar o custo de sua ocupação, uma vez que para implementação de infraestrutura urbana seria necessário o desmote do substrato rochoso.
Baixa Aptidão	Terrenos com alta suscetibilidade à ocorrência de afundamentos cársticos e acomodações do substrato rochoso. Compreende áreas sobre cavidades subterráneas, dolinas, e outras feições de afundamento.	Terrenos que apresentam características de instabilidades. O carregamento vertical sobre estes terrenos pode desencadear processos de subsidência e/ou acomodações do substrato rochoso.	Área inadequada à ocupação. O restabelecimento do lençol freático nestas áreas pode fazer com que lagos pré-existent se restabeleçam tornando estas áreas pontos turísticos ajudando o desenvolvimento da economia local.

- Legenda**
- Rio Juá
 - Rodovias
 - - - Estradas não pavimentadas
 - ▣ Núcleo Urbano



Escala de mapeamento 1:5.000



UFOP
Universidade Federal de Ouro Preto