**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**VULNERABILIDADE DO CARSTE NAS CABECEIRAS DOS RIOS DAS
ALMAS, SÃO JOSÉ DE GUAPIARA (BACIA DO RIO PARANAPANEMA)
E DO RIO PILÕES (BACIA DO RIO RIBEIRA DE IGUAPE) NA REGIÃO
DO PARQUE ESTADUAL INVERVALES (PEI), ESTADO DE SÃO
PAULO**

Bruno Daniel Lenhare

Orientador: Prof. Dr. William Sallun Filho

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Programa de Pós-Graduação em Geoquímica e Geotectônica

**SÃO PAULO
2014**

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**VULNERABILIDADE DO CARSTE NAS CABECEIRAS DOS RIOS DAS
ALMAS, SÃO JOSÉ DE GUAPIARA (BACIA DO RIO PARANAPANEMA)
E DO RIO PILÕES (BACIA DO RIO RIBEIRA DE IGUAPE) NA REGIÃO
DO PARQUE ESTADUAL INVERVALES (PEI), ESTADO DE SÃO
PAULO**

Bruno Daniel Lenhare

Orientador: Prof. Dr. William Sallun Filho

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Programa de Pós-Graduação em Geoquímica e Geotectônica

**SÃO PAULO
2014**

Ficha catalográfica preparada pelo Serviço de Biblioteca e Documentação do
Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo

Lenhare, Bruno Daniel

Vulnerabilidade do carste nas cabeceiras dos
rios das Almas, São José de Guapiara (Bacia do Rio
Paranapanema) e do rio Pilões (Bacia do Rio Ribeira
de Iguape) na região do Parque Estadual Intervales
(PEI), estado de São Paulo / Bruno Daniel Lenhare.

- São Paulo, 2014

99 p.: il.

Dissertação (Mestrado): IGc/USP

Orient.: Sallun Filho, William

1. Parque Estadual Intervales 2. Carste 3.
Vulnerabilidade 4. Geomorfologia cárstica I. Título

*À meus pais, Maria e Eloy,
Ao meu irmão, André.*

AGRADECIMENTOS

Deixo aqui expresso os meus agradecimentos a estas pessoas relacionadas abaixo, sem as quais esta dissertação não teria sido concretizada.

Ao meu orientador, Prof. Dr. William Sallun Filho, que desde o início, com muita paciência e dedicação, acreditou e incentivou este aluno na realização de um objetivo.

À FAPESP pelo financiamento das pesquisas através da bolsa de mestrado (proc. nº 2012/01424-6) e do Auxílio à Pesquisa (proc. nº 2012/05632-2) concedido em nome de William Sallun Filho.

Ao Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo pela formação acadêmica recebida ao longo destes anos e aos seus professores pelas orientações oportunas em muitas disciplinas. Minha gratidão especial aos Profs. Drs. Ivo Karmann, Paulo Cesar Boggiani, Ginaldo Ademar Campanha, Teodoro Isnard Ribeira de Almeida e Marcelo Monteiro da Rocha, que contribuíram de forma significativa para a execução desta dissertação.

Ao Grupo Pierre Martin de Espeleologia (GPME) em sua honrosa e prestativa participação na elaboração dos mapas de algumas cavernas e na disponibilização de tantos outros que sem os quais esta dissertação não seria possível. Deixo registrado aqui meu muito obrigado aos integrantes do grupo: Ericson Igual, Caê Martins, Gilson, Irene e todos que de alguma forma participaram desta jornada.

À Fundação Florestal e à administração do Parque Estadual Intervales, pela autorização da pesquisa e apoio durante o desenvolvimento deste trabalho. Aos gestores do PEI Paulo Camarero e Thiago Conforti. Aos funcionários e monitores ambientais também sou especialmente grato, principalmente: Zé Flóido, Elizeu, Faustino, Luis, Dito, Betinho, profundos conhecedores da região e sem os quais algumas cavernas jamais seriam localizadas novamente. Também sou grato à Zarife, Mara, André, Sérgio, Janice e Nina, que sempre com muito bom humor colaboraram com nossos trabalhos no PEI.

À Bruna Cordeiro, pelas discussões e acompanhamento em campo. À Bruno Consentino na colaboração durante os mapeamentos espeleológicos. Ao geólogo Luis Henrique Almeida, pela colaboração durante trabalhos de campo. À Estela (biblioteca do IGc-USP) e ao geólogo Ricardo Angelim Rodrigues pelos préstimos na obtenção de mapas, considerados perdidos. Ao Laércio do Bairro Boa Vista na ajuda da localização de cavernas inéditas. À Tati Freitas e Jairo Ferreira da Lanchonete da Boa Vista.

Aos amigos: geólogo Flávio Rogério da Silva e sua esposa Cátia Lima, Eduardo Reina Valensia e sua esposa Andrea Palaoro, pela amizade de sempre e acolhida durante o período das aulas. Ao amigo Engº. Agrônomo Eduardo Cunha Montesi por todo incentivo e ajuda nas discussões sobre legislação ambiental e geoprocessamento. À Nicolás Misailidis Strikis e Lucas Padoan de Sá Godinho, pela amizade, confiança e incentivo.

Aos meus pais, Maria e Eloy, pela força, apoio e carinho sempre.

Finalmente, para não cometer o injusto ato do esquecimento, agradeço a todos que de alguma maneira contribuíram para que esta etapa fosse concluída.

*"Experiência não é aquilo que acontece conosco,
mas o que fazemos com o que nos aconteceu."
(Aldous Huxley)*

RESUMO

Entre o Planalto de Guapiara e a Serra de Paranapiacaba ocorrem sistemas cársticos que estão sob constante pressão do avanço antrópico das mais variadas naturezas, como mineração de rochas carbonáticas, silviculturas, agriculturas e a própria ocupação humana. Este estudo apresenta primeiramente um levantamento detalhado de aspectos geológicos e geomorfológicos do carste da região, baseado em fotointerpretação, geoprocessamento e trabalhos de campo. Os sistemas cársticos se desenvolvem de forma distinta em ambos os compartimentos geomorfológicos. No Planalto de Guapiara o carste é pouco expressivo com feições cársticas dispersas e raras em todos os corpos carbonáticos abordados. O relevo mais suavizado, com gradientes hidráulicos relativamente baixos e o pouco tempo de exposição das rochas carbonáticas não permitiram o desenvolvimento de um sistema cárstico pleno no planalto. Na Serra de Paranapiacaba, o relevo mais acidentado, associado a altos gradientes hidráulicos, carbonatos mais puros, e maior tempo de exposição das rochas carbonáticas, permite que as feições sejam mais concentradas e apresentem maior desenvolvimento em relação ao planalto. A partir da determinação da configuração do carste foi possível se determinar a vulnerabilidade e a delimitação de um zoneamento ambiental do sistema cárstico com a utilização de dois métodos: EPIK e KDI. Na região do Planalto de Guapiara a vulnerabilidade do carste é baixa e a ocupação humana é mais expressiva, com poucos riscos ao sistema e à população que ali se estabeleceu. Na região da Serra de Paranapiacaba a presença de feições cársticas mais constantes e mais concentradas indica vulnerabilidade muito alta, porém a presença de Unidades de Conservação garante a preservação deste tipo de sistema e a baixa ocupação e interferência humana. Espera-se que este estudo venha a contribuir para políticas públicas de ordenamento territorial futuro, minimizando os eventuais impactos no carste da região.

Palavras-chave: carste, vulnerabilidade cárstica, geomorfologia cárstica, Planalto de Guapiara, Serra de Paranapiacaba.

ABSTRACT

Between the Guapiara Plateau and the Paranapiacaba Range there are karst systems that are under constant pressure from anthropic advancement of various natures, such as mining of carbonate rocks, forestry, agriculture and human settlement itself. This study presents a detailed survey of geologic and geomorphologic aspects based on photo interpretation, GIS and fieldwork observations. Karst systems develop differently in both geomorphological compartments. At the Guapiara Plateau is not very expressive with scattered and rare karst features in all carbonate bodies covered by this study. The most cushioned relief, with relatively low hydraulic gradients and the short time of exposure of the carbonate rocks did not allow the full development of a karst system at the plateau. At Paranapiacaba Range, the most rugged relief, associated with high hydraulic gradients, purer carbonates and longer exposure of the carbonate rocks, allows karst features to be more concentrated and greater development in relation to the plateau. From the determination of the karst setting was possible to determine the vulnerability and delimitation of an environmental zoning of karst system using two methods: EPIK and KDI. At the Guapiara Plateau the karst vulnerability is low and human settlement is more expressive, with little risk to the system and the people who settled there. At Paranapiacaba Range the presence of karst features is more constant and more concentrated so the vulnerability is very high, but the presence of protected areas to guarantee the preservation of this type of system and the low occupancy and human interference . It is hoped that this study will contribute to public policies for future land use, minimizing any impacts on the karst region.

Keywords: karst, karst vulnerability, karst geomorphology, Guapiara Plateau, Paranapiacaba Range

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 ÁREA DE ESTUDO	3
1.2 SELEÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	4
1.3 OBJETIVOS	6
1.4 FORMA DE APRESENTAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	7
2. CONTEXTO REGIONAL	7
2.1 GEOMORFOLOGIA	7
2.1.1 <i>Planalto de Guapiara</i>	9
2.1.2 <i>Serra de Paranapiacaba</i>	9
2.1.3 <i>A Província Espeleológica do Vale do Ribeira</i>	10
2.2 ASPECTOS HIDROLÓGICOS: BACIAS DOS RIOS PARANAPANEMA E RIBEIRA DE IGUAPE	11
2.2.1 <i>Bacia do Rio Paranapanema</i>	12
2.2.2 <i>Bacia do Rio Ribeira de Iguaçu</i>	13
2.3 CONTEXTO GEOLÓGICO	13
2.3.1 <i>Domínio Apiaí</i>	14
2.3.2 <i>Supergrupo Açungui</i>	15
2.3.3 <i>Subgrupo Lageado</i>	17
2.3.4 <i>Formação Bairro da Serra</i>	17
2.3.5 <i>Formação Água Clara</i>	18
2.3.6 <i>Magmatismo mesozoico</i>	20
2.4 CARSTE E AMBIENTES CÁRSTICOS	21
3. MATERIAIS E MÉTODOS	23
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA GEOMORFOLOGIA CÁRSTICA	23
3.2 CARACTERIZAÇÃO ESPELEOLÓGICA	23
3.3 AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE CÁRSTICA	24
3.3.1 <i>Métodos de avaliação da vulnerabilidade cárstica</i>	24
3.3.2 <i>A escolha do método</i>	29
3.3.3 <i>Os métodos de avaliação utilizados: EPIK e KDI</i>	36
4. GEOMORFOLOGIA CÁRSTICA	37
4.1. INTRODUÇÃO	38
4.2 CONTEXTO REGIONAL	40
4.3 MATERIAIS E MÉTODOS	42
4.4 CARACTERIZAÇÃO DO CARSTE	44
4.4.1 <i>Planalto de Guapiara</i>	45
4.4.2 <i>Serra de Paranapiacaba</i>	51
4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	55
4.6 AGRADECIMENTOS	57
4.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57
5. VULNERABILIDADE CÁRSTICA	61
5.1 A AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE PELO MÉTODO EPIK	64
5.2 A AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE PELO MÉTODO KDI	74
6. DISCUSSÃO	80
6.1 GEOMORFOLOGIA CÁRSTICA	80
6.2 VULNERABILIDADE DO CARSTE	84
6.3 ZONEAMENTO DE PROTEÇÃO DAS ÁREAS CÁRSTICAS	87
7. CONCLUSÕES	89
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Localização da área de estudo em relação aos municípios que a compõem e das rochas carbonáticas consideradas na caracterização do carste.....	3
Figura 1.2 – Localização da área de estudo em relação às unidades de conservação que compõem o <i>continuum</i> ecológico de Paranapiacaba. <i>PETAR</i> : Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira; <i>PEI</i> : Parque Estadual Intervalos; <i>E.E. Xituê</i> : Estação Ecológica Xituê; <i>PENAP</i> : Parque Estadual Nascentes do Paranapanema.	4
Figura 2.1 – Mapa geomorfológico regional simplificado mostrando as principais unidades abrangidas pela área de estudo. Fonte: adaptado de Ponçano et al. (1981), Ross e Moroz (1997).	8
Figura 2.2 – Distribuição das rochas carbonáticas da chamada Província Espeleológica do Vale do ribeira (Karmann e Sanchez 1979).	10
Figura 2.3 – Localização regional dos carbonatos estudados em relação às sub-bacias dos rios das Almas (I) e São José de Guapiara (II) (bacia do Rio Paranapanema) e o Rio Pilões (III) (bacia do Rio Ribeira de Iguape). 1 – Rio das Almas; 2 – Rio São José de Guapiara; 3 – Rio Pilões; 4 – Rio Bocaina-Lageado.	12
Figura 2.4 – Unidades principais do Cinturão Ribeira, com localização do Domínio Apiaí e da	15
Figura 2.5 – Colunas estratigráficas e tentativas de correlação lateral no Supergrupo Açungui. (1) Formação Bairro da Estiva (Abapã); (2) Formação Água Nova; (3) Formação Serra dos Macacos; (4) Formação Bairro dos Campos; (5) embasamento gnáissico – migmatítico; (6) quartzitos e xistos; (7) sequência calciossilicática; (8) sequência calcária; (9) sequência de meta-arenitos (Formação Córrego dos Marques); (10) Formação Betari; (11) Formação Bairro da Serra; (12) Formação Água Suja; (13) Formação Mina de Furnas; (14) Formação Serra da Boa Vista; (15) Formação Passa – Vinte; (16) Formação Gorutuba; (16A) Gabro de Apiaí; (17) embasamento gnáissico – migmatítico; (18) Formação Perau, membro quartzítico; (19) Formação Perau, membro calciossilicático (mineralizado); (20) sequência vulcanossedimentar (pelágico – turbidítica); (21) Formação Iporanga; (22) embasamento gnáissico – migmatítico; (23) sequência Morro Grande (= Turvo-Areado?); (24) Sequência Rio Branco (= Capela do Cedro?); (25) sequência Juruqui (= Cajati?). Adaptado de Campanha e Sadowski, 1999.	16
Figura 2.6 – Exemplo de carbonato da Formação Bairro da Serra (Coordenadas UTM Zona 22J; 760174 x 7311675).	18
Figura 2.7 – Exemplo de rocha carbonática da Formação Água Clara (Coordenadas UTM Zona 22J; 767083 x 7328333)	20
Figura 2.8 – Exemplo de dique de diabásio (Coordenadas UTM: Zona 22J; 768185 x 7320782)	21
Figura 2.9 – Distribuição global das rochas carbonáticas aflorantes em superfície. Adaptado de Gunn e Lowe (2000) e Ford e Williams (2007).	22
Figura 4.1 -Localização da área de estudo em relação às rochas carbonáticas e principais bacias hidrográficas.....	40
Figura 4.2 – a: contexto geológico regional simplificado da área de estudo com destaque para as rochas metacarbonáticas (adaptado de Campanha 2002); b: mapa	

geomorfológico regional mostrando as principais unidades abrangidas pela área de estudo (adaptado de Ponçano et al. 1981).....	41
Figura 4.3 – Localização e denominação dos corpos carbonáticos estudados em cada compartimento geomorfológico.	44
Figura 4.4 – Fotografias aéreas oblíquas da região. A- O relevo mais suavizado e com menor grau de entalhamento na região do Planalto de Guapiara; B- O relevo mais entalhado na região da Serra de Paranapiacaba, com gradientes mais elevados.....	45
Figura 4.5 – Localização e distribuição das feições cársticas reconhecidas e analisadas no compartimento do Planalto de Guapiara.	45
Figura 4.6 – Perfis topográficos com localização dos corpos carbonáticos no contexto geomorfológico no divisor entre o Planalto de Guapiara e a Serra de Paranapiacaba. Nos perfis: (1) Rio das Almas; (2) Ribeirão das Bateias; (3) Rio Pinheiro dos Nunes; (4) Rio São José de Guapiara e (5) Rio Bocaina-Lageado.....	48
Figura 4.7 – Perfis longitudinais dos principais rios abrangidos pelos carbonatos estudados.....	48
Figura 4.8 – Localização das feições cársticas descritas no Corpo Central Sul. A densidade e quantidade de feições descritas neste setor é maior em relação ao Planalto de Guapiara.....	51
Figura 4.9 – Perfil longitudinal de detalhe do Rio Bocaina- Lageado. Este rio recebe o nome de Bocaina na serra homônima, assumindo trechos em superfície e subterrâneos, interceptando sistemas de cavernas, até a ressurgência na Gruta dos Paiva, onde a partir de então recebe o nome de Rio Lageado.....	54
Figura 5.1 – Corpos carbonáticos consideradas neste estudo. 1 - Corpo Oeste; 2 - Corpo Central Norte; 3 - Corpo Central Sul; 4 - Corpo Leste Norte; 5 – Corpo Leste Sul.	63
Figura 5.2 – Classificação da vulnerabilidade do carste segundo o parâmetro de desenvolvimento do epicarste (E). O local mais vulnerável foi o do Corpo Central, setor ao sul do divisor, onde ocorrem uma ampla depressão cárstica com sumidouros, ressurgências e cavernas.....	71
Figura 5.3 – Vulnerabilidade do carste segundo o parâmetro Proteção do Solo (P). As áreas mais vulneráveis são representadas pela ausência de solo ou vegetação, compreendida pelo estabelecimento de atividades minerárias.	71
Figura 5.4 – Situação da Infiltração de Água (I) no sistema cárstico. As áreas de maior vulnerabilidade são as de ocorrência de pontos de infiltração de água no carste.....	72
Figura 5.5 – Desenvolvimento da rede cárstica (K). Destaque para o setor da corpo Central Sul onde há a presença de cavernas com desenvolvimento superando a ordem de quilômetros. Nas áreas em amarelo, onde a vulnerabilidade foi considerada mediana, existem cavernas, mas suas dimensões indicam um processo de carstificação incipiente ou cessado. As áreas de vulnerabilidade baixa são representadas por afloramentos de rochas carbonáticas, mas sem desenvolvimento de processos de carstificação significativos.	72
Figura 5.6 – Fator de proteção F, resultante da sobreposição de todos os parâmetros abordados pelo método EPIK. Os setores mais vulneráveis estão localizados no Corpo Central Sul, na porção mais setentrional do Corpo Central Norte e pontualmente no Corpo Oeste e Corpo Leste Sul. Estas áreas apresentam vulnerabilidade mais alta para	

o Fator F, dada as características do carste como desenvolvimento de cavernas importantes regionalmente e presença de sumidouros.	74
Figura 5.7 – Imagem obtida a partir de imagens LANDSAT 5 (RGB 4/3/5) e classificada para obtenção das classes de uso e ocupação do solo.	75
Figura 5.8 – Grau de impacto do carste segundo o método KDI (van Beynen e Townsend 2005). As áreas de impacto moderado ocorrem onde a presença humana (agricultura, mineração e povoamento) exerce pressão neste tipo de sistema.	79
Figura 6.1 – Gráfico da relação do desnível e desenvolvimento das cavernas com a sua distância em relação ao divisor Serra/Planalto.	83
Figura 6.2 – Zoneamento do carste da região do divisor entre a Serra de Paranapiacaba e Planalto de Guapiara. As áreas mais vulneráveis estão configuradas por apresentarem maiores concentrações de sumidouros e feições cársticas relacionadas.	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Vantagens e desvantagens de alguns métodos de avaliação da vulnerabilidade cárstica	30
Tabela 3.2 – Parâmetros abrangidos por cada método que auxiliaram na decisão da escolha do método mais adequado para a análise da vulnerabilidade.	31
Tabela 3.3 – Parâmetros de avaliação da vulnerabilidade do método EPIK, adaptado de Doerfliger e Zwahlen (1998).	32
Tabela 3.4 – Valores de ponderação dos parâmetros do EPIK. Adptado de Doerfliger e Zwahlen (1998).....	32
Tabela 3.5 – Valores do Fator de Proteção (F), grau de vulnerabilidade e determinação da zona de proteção da área de captação. Adaptado de Doerfliger e Zwahlen (1998).	33
Tabela 3.6 – Zonas de proteção obtidas através do cálculo do fator de proteção através de adaptação do método EPIK (Doerfliger e Zwahlen 1998)	33
Tabela 3.7 – Parâmetros de avaliação da vulnerabilidade cárstica adaptados do método EPIK (Doerfliger e Zwahlen 1998)	33
Tabela 3.8 – Parâmetros considerados para avaliação do grau de impacto do carste (adaptado de van Beynen e Townsend 2005).	35
Tabela 3.9 – Classificação do Grau de Impacto pelo método KDI	35
Tabela 3.10 – Classificação dos setores a serem utilizado para o zoneamento das áreas cársticas (adaptados do método EPIK Doerfliger e Zwahlen (1998).	36
Tabela 4.1 – Características geomorfológicas do carste e das cavernas em cada corpo carbonático estudado. Abrangência dos dados a partir do divisor Serra/Planalto a norte 10 km e a sul 4 km	53
Tabela 4.2 – Valores de razão fundo-altura de vale fundo de vale (Vf), altitude e amplitude e litologia principal, em seções aleatórias selecionadas nos rios São José de Guapiara, das Almas e Pilões, e afluentes.	54

1. INTRODUÇÃO

Áreas cársticas constituem sistemas com características geomorfológicas e hídricas muito particulares em relação ao tipo de paisagem e condições nas quais elas se desenvolvem. Estes sistemas abrigam recursos naturais não renováveis, como a água e outros bens minerais (como calcário p. ex.), além de desenvolver cavernas, que podem constituir patrimônios naturais e aquíferos cársticos que abastecem as populações estabelecidas nas imediações (Williams 1993).

De modo geral, as áreas cársticas apresentam dinâmica única e com equilíbrio muito frágil, necessitando de especial atenção no que tange à sua conservação, preservação e principalmente a ocupação e seu uso (van Beynen e Townsend 2005, Doerfliger e Zwahlen 1998).

A grande dificuldade de se avaliar os riscos e impactos ambientais no carste consiste em se entender a dinâmica do sistema que se comporta como um aquífero de condutos, exigindo assim especial atenção (Smith 1993).

A preservação e conservação de aquíferos cársticos é tema recorrente na literatura mundial, mas principalmente na europeia, uma vez que os terrenos carbonáticos perfazem cerca de 35% da área daquele continente e as águas provenientes destes aquíferos contribuem com 50% do abastecimento de água potável, sendo muitas vezes a única fonte de água doce (COST 65 1995, Goldscheider 2002).

A importância do aquífero cárstico é inegável, porém este tipo de ambiente também é muito relevante no tocante aos aspectos econômicos (mineração de calcário principalmente, além de zinco, chumbo etc.), riqueza do solo para cultivo, além da importância científica (aspectos biológicos, geológicos e geomorfológicos), cultural e turística (principalmente relativo às cavernas). E, a partir deste ponto de vista, mesmo em escala global, existem poucos métodos de avaliação da vulnerabilidade do carste em um contexto mais amplo, frente a impactos ambientais e antrópicos, (como a presença de mineração, agricultura, estabelecimento ocupacional etc.).

No Brasil, as áreas cársticas compreendem cerca 5% de todo o território nacional, e, apesar de algumas delas estarem localizadas em unidades de conservação, em boa parte delas não existem estudos voltados à vulnerabilidade tanto do carste em si, quanto ao do próprio aquífero cárstico (Karmann 1994, Auler et al. 2001, van Beynen e Townsend 2005).

Na região sudeste do estado de São Paulo, entre o divisor de águas entre o Planalto de Guapiara, abrangido pela Bacia do Rio Paranapanema e a Serra de Paranapiacaba, na Bacia do Rio Ribeira de Iguape, ocorrem feições cársticas desenvolvidas em corpos carbonáticos neoproterozoicos do Subgrupo Lageado inseridos no Grupo Votuverava e Formação Água Clara, pertencentes ao Supergrupo Açungui (Campanha 1991, Campanha e Sadowski 1999). A região configura uma referência para estudos espeleológicos, inserida na Província Espeleológica do Vale do Ribeira (Karmann e Sanchez 1979), sendo alvo de estudos desta natureza desde o início do século XX, com os pioneiros levantamentos espeleológicos, paleontológicos e arqueológicos realizados por Krone (1950).

A geologia da região é muito bem conhecida por se tratar de uma área de grande interesse econômico pela ocorrência de minérios, como calcário, dolomito, chumbo, zinco, ouro entre outros, porém existem poucos estudos específicos voltados para a caracterização do carste e, com exceção do Plano de Manejo do Parque Estadual Intervales (Furlan e Leite 2008), e não existem estudos aprofundados sobre a situação e vulnerabilidade do carste.

Apesar de alguns corpos carbonáticos estarem localizados em unidades de conservação e a constituição federal e legislação específica garantirem a proteção de cavernas, estes ambientes estão sob constante pressão do avanço antrópico, e não existem políticas de planejamento de expansão de forma adequada que atenda as necessidades e particularidades do ambiente cárstico.

O reconhecimento e mapeamento das feições cársticas presentes na área em questão, associado às informações espeleológicas levantadas durante trabalhos de campo, visando a caracterização e a evolução cárstica neste setor, foram fundamentais para determinação da situação do carste e avaliação da vulnerabilidade cárstica na região.

Um zoneamento ambiental foi elaborado através da utilização dos métodos EPIK (Doerfliger e Zwahlen 1998) e KDI (van Beynen e Townsend 2005), adaptados para a região em questão. O primeiro se trata de uma metodologia multiparamétrica, cujos valores são ponderados de acordo com classificações estabelecidas para avaliação da vulnerabilidade cárstica, que varia de baixa a muito alta, através de valores definidos por aqueles autores. O método KDI, além de multiparamétrico, faz uma análise qualitativa prévia de indicadores ambientais e antrópicos para em seguida quantificar o

grau de impacto no sistema cárstico de acordo com valores pré-estabelecidos, variando de intacto a muito impactado.

A compilação dos dados obtidos através da aplicação dos dois métodos associados aos dados de campo resultou em um zoneamento definido pela vulnerabilidade e situação atual do carste do divisor da Serra de Paranapiacaba e Planalto de Guapiara.

1.1 Área de Estudo

O carste das cabeceiras dos rios das Almas e São José de Guapiara (bacia do Rio Paranapanema) e do Rio Pilões (bacia do Rio Ribeira de Iguape) está localizado entre os municípios de Capão Bonito, Guapiara, Iporanga e Ribeirão Grande, no sudeste do estado de São Paulo, e está desenvolvido em rochas carbonáticas neoproterozóicas do Supergrupo Açungui (Campanha e Sadowski 1999), entre o divisor do Planalto de Guapiara e Serra de Paranapiacaba (Figura 1.1).

Figura 1.1 – Localização da área de estudo em relação aos municípios que a compõem e das rochas carbonáticas consideradas na caracterização do carste.

Parte área de estudo situa-se entre o Parque Estadual Intervalles (PEI) e Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (PETAR) que juntamente com outras unidades de conservação (Parque Estadual Nascentes do Paranapanema – PENAP, Estação Ecológica Xituê, Parque Estadual Carlos Botelho, além da APA da Serra do Mar), configuram um extenso corredor de áreas de proteção ambiental, o *continuum* ecológico da Serra de Paranapiacaba (Figura 1.2).

Figura 1.2 – Localização da área de estudo em relação às unidades de conservação que compõem o *continuum* ecológico de Paranapiacaba. *PETAR*: Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira; *PEI*: Parque Estadual Intervalles; *E.E. Xituê*: Estação Ecológica Xituê; *PENAP*: Parque Estadual Nascentes do Paranapanema.

1.2 Seleção da área de estudo

A área de estudo está localizada em uma região dita pioneira de estudos cársticos, espeleológicos e de potencial econômico mineral, no território brasileiro. Os

primeiros levantamentos espeleológicos e descrição do relevo cárstico foram realizados por Krone (1950), cujo objetivo foi a localização de sítios arqueológicos e paleontológicos na região do Vale do Ribeira, onde foram encontrados vestígios de megafauna pleistocênica (Karmann 1994).

Os relatos de Krone atraíram o interesse de grupos espeleológicos que começaram a explorar a região desde a década de 1960 até o presente, onde já estão registradas, segundo o acervo do Cadastro Nacional de Cavernas da Sociedade Brasileira de Espeleologia (CNC-SBE), mais de 730 cavernas (SBE, 2014), em toda a área abrangida pela Província Espeleológica do Vale do Ribeira (Karmann e Sanchez 1979). Ainda segundo os dados do CNC-SBE associados com outros levantados por este estudo, somente na região abordada estão desenvolvidos mais de 18.500 m de condutos em quase uma centena de cavernas identificadas.

Outro fator que justificou a escolha desta área para estudo é que ela está localizada entre duas unidades de conservação (Parque Estadual Intervales – PEI; Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira – PETAR) e áreas com presença significativa de antropismo (silvicultura, mineração, ocupação, agricultura, pastagens etc.). Este fator possibilita a comparação da vulnerabilidade do carste em setores onde o mesmo está protegido e setores onde a situação original foi modificada. Além disso, a área de estudo abrange duas unidades geomorfológicas distintas, onde a comparação da evolução e situação do carste foi identificada e avaliada.

Apesar do grande volume de pesquisas já realizados no Vale do Ribeira, a área carbonática a norte da Bacia do Rio Ribeira e do Rio Paranapanema ainda foi pouco estudada do ponto de vista geológico, geomorfológico e geoespeleológico. Os trabalhos de geologia compreendem mapeamentos geológicos em escala 1:50.000 e 1:100.000, não sendo realizado nenhum estudo específico sobre as rochas carbonáticas. Da mesma forma a geomorfologia, que abrange em grande parte o relevo cárstico, ainda não foi estudada. Há escassez de estudos das cavernas e sua geologia, bem como poucas explorações foram realizadas. O fato de a região possuir poucas cavernas e de pequeno desenvolvimento, não incentivou a exploração de cavernas na área, concentrando seus esforços na Caverna do Diabo.

Além disso, as áreas cársticas apresentam grande importância para a economia mineral e para a sociedade que dela vive. A área de estudo é tradicionalmente uma região de exploração de calcário para a fabricação de cimento e cal. O sistema cárstico é naturalmente mais vulnerável e seu equilíbrio é facilmente afetado quando alguma

atividade ali é realizada, como a mineração e o turismo. A escassez de estudos apropriados voltados a este tipo de ambiente, somada a necessidade de preservação de um ambiente susceptível a impactos naturais e antrópicos como o carste e as cavidades naturais subterrâneas, justificam a proposição elaboração do tema deste projeto.

1.3 Objetivos

O objetivo proposto para este trabalho é a caracterização geomorfológica do carste da região entre a Serra de Paranapiacaba e o Planalto de Guapiara para a determinação da vulnerabilidade do sistema cárstico e elaboração de um zoneamento ambiental, para promover a proteção e conservação deste tipo de sistema.

Para o desenvolvimento deste estudo foi procurado alcançar os seguintes objetivos:

- Compilação e revisão da geologia da região para entendimento da situação do carste;
- Análise geoespeleológica das cavernas mais significativas para o sistema cárstico;
- Estudo das redes de drenagem e das formas do relevo cárstico, incluindo análises morfométricas e localização em campo das principais feições cársticas;
- Análise da evolução cárstica na região;
- Reconhecimento e análise de impactos ambientais e antrópicos no carste e nas cavidades naturais subterrâneas da região;
- Elaboração de base de dados integrada em SIG;
- Escolha e utilização dos métodos mais adequados à avaliação da vulnerabilidade cárstica da região;
- Estabelecimento do zoneamento do carste da região identificando as áreas mais vulneráveis e aquelas mais impactadas.

1.4 Forma de apresentação da dissertação

Os resultados apresentados nesta dissertação foram organizados em dois capítulos principais.

O primeiro capítulo aborda a caracterização da geomorfologia cárstica da área de estudos e está apresentado na forma de artigo, submetido à Revista de Geociências da Unesp.

O segundo capítulo aborda a avaliação da vulnerabilidade cárstica e está apresentado na forma de um capítulo tradicional.

Além destes dois capítulos, são apresentados capítulos de Introdução, Contexto Regional, Materiais e Métodos, Discussão e Conclusões.

2. CONTEXTO REGIONAL

Este capítulo visa apresentar uma revisão do conhecimento da região do carste das cabeceiras dos rios das Almas e São José de Guapiara (bacia do Rio Paranapanema) e do Rio Pilões (bacia do Rio Ribeira de Iguape). A bibliografia acerca da geologia e geomorfologia é bastante extensa na literatura, portanto o que se apresenta nesta seção é uma compilação de trabalhos consagrados sobre o tema.

2.1 Geomorfologia

A área de estudo está localizada, geomorfologicamente, no contexto de transição entre o Planalto de Guapiara e a Serra de Paranapiacaba, na região sudeste do estado de São Paulo (Figura 2.1).

As unidades que compõem a área de estudo, cuja dinâmica evolutiva é bastante distinta uma em relação à outra, foram acometidas por intensos processos tectônicos durante o ciclo brasileiro, no estabelecimento do Cinturão Ribeira, caracterizados por metamorfismo regional, incluindo dobramentos, magmatismos sintectônicos, por volta de 650 a 540 Ma (Almeida 1964, Campanha 2002). Posteriormente a este período de intenso tectonismo, após o qual a região passa a incorporar o supercontinente Gondwana, registra-se um período de relativa estabilidade tectônica, onde houve o início da deposição dos sedimentos da Bacia do Paraná (Formação Furnas, Ponta Grossa e Subgrupo Itararé) (Campanha e Sadowski 1999, Campanha 2002).

Figura 2.1 – Mapa geomorfológico regional simplificado mostrando as principais unidades abrangidas pela área de estudo. Fonte: adaptado de Ponçano et al. (1981), Ross e Moroz (1997).

Entre o Permiano Superior e o Triássico Médio, a Bacia do Paraná passou por expressivos processos tectônicos e erosivos causando um levantamento generalizado relacionado com a ruptura do Gondwana e a abertura do Oceano Atlântico Sul (Almeida 1980, Riccomini 1995). Este processo de soerguimento da região se deu por conta da instalação do enxame de diques do Arco de Ponta Grossa e do Alinhamento

de Guapiara, associado a grandes corpos de rochas ígneas alcalinas. A atividade tectônica mesozóica relacionada ao Arco de Ponta Grossa e seus alinhamentos magmáticos, entre os quais o de Guapiara, ocorreu entre 134 e 130 Ma (Turner et al. 1994, Riccomini 1995). Durante o Cenozóico (do Paleógeno ao Mioceno) a evolução geomorfológica da região é resultado de uma associação de erosão diferencial regressiva da Serra de Paranapiacaba (em direção ao Planalto de Guapiara) e ao controle tectônico da separação dos continentes sul-americano e africano e à evolução da margem continental brasileira, (Almeida 1964, Almeida e Carneiro 1998, Ross 2002, Cherem 2012).

2.1.1. Planalto de Guapiara

No estado de São Paulo, o Planalto de Guapiara está limitado pela Depressão Periférica Paulista em sua porção norte, pelo Planalto do Ribeira/Turvo a leste e pela Serra de Paranapiacaba a sudeste, ocupando uma área elevada no alto da Serra de Paranapiacaba (Ross e Moroz, 1997). O relevo desta unidade é composto por morros baixos com topos convexos, cujas altitudes variam entre 700 e 1.000 m com declividade mediana (20 a 30%).

2.1.2 Serra de Paranapiacaba

A Serra de Paranapiacaba está desenvolvida na Unidade Morfoescultural do Baixo Ribeira (Ross e Moroz, 1997), apresentando relevo montanhoso, escarpas retilíneas e perfis íngremes, com baixo grau de dissecação e com desníveis entre 700 e 1.000 m entre fundos de vales e topos de cristas (Karmann 1994). As escarpas desta serra são limitadas em sua porção SE pela baixada litorânea na sua base, e a norte e noroeste, pelo Planalto de Guapiara. As escarpas desta serra foram moldadas por reativações tectônicas de grande expressão, controlando também a evolução dos grábens de Sete Barras e Ribeira de Iguape durante o Quaternário, o que explica a baixa dissecação desta unidade (Riccomini et al. 2004, Riccomini e Coimbra 1992).

2.1.3 A Província Espeleológica do Vale do Ribeira

Karmann e Sanchez (1979, 1986) definiram província espeleológica como uma região de mesma formação (continuidade) geológica, com ocorrência de rochas carbonáticas ou não, passível de carstificação, com formação de grupamentos de cavernas. Este conceito relaciona ainda a razão da quantidade de cavernas em uma determinada área de ocorrência.

A Província Espeleológica do Vale do Ribeira (Karmann e Sanchez 1979) está localizada entre o sudeste do estado de São Paulo e o nordeste do estado do Paraná, cuja litologia inclui as rochas carbonáticas do Supergrupo Açungui (Campanha e Sadowski 1999).

As rochas carbonáticas desta província ocorrem dispostas em três faixas (noroeste, central e sudeste) dispostas lateralmente segundo a direção SW-NE (Figura 2.2).

Figura 2.2 – Distribuição das rochas carbonáticas da chamada Província Espeleológica do Vale do Ribeira (Karmann e Sanchez 1979).

A faixa noroeste segue de Itaiacoca a Itapeva, aflorando irregularmente sob os sedimentos da Bacia do Paraná.

A faixa central, aflorante descontinuamente desde o norte da cidade de Campo Largo (PR), entre os rios Açungui e Conceição, é constituída por dolomitos da Formação Capiçu, que mais a NE, transicionam para uma faixa dolomítica expressiva da Formação Água Clara (entre os rios Tacanica e Santa Ana), nas proximidades de Cerro Azul (PR).

Já no estado de São Paulo, na margem esquerda do Rio Ribeira de Iguape, ocorrem extensos corpos de rochas carbonáticas pertencentes ao Grupo Votuverava e Formação Água Clara (*sensu* Campanha e Sadowski 1999), estendendo-se pelos municípios de Apiaí, Iporanga, Itaoca, Eldorado, Guapiara e Capão Bonito, onde se localiza a área objeto deste estudo.

Entre a margem direita do Rio Ribeira de Iguape e o Rio Batatal, na região da Serra do André Lopes, ocorrem corpos de rochas carbonáticas com presença de cavernas, onde a Gruta da Tapagem (ou caverna do Diabo) é a mais conhecida.

2.2 Aspectos Hidrológicos: Bacias dos rios Paranapanema e Ribeira de Iguape

A área estudada está abrangida pelas bacias dos rios Paranapanema e Ribeira de Iguape, que estão desenvolvidas em contextos distintos, sendo que a primeira está localizada na região do Planalto de Guapiara e a segunda em contexto de escarpa da Serra do Mar e a planície litorânea (Figura 2.3).

Figura 2.3 – Localização regional dos carbonatos estudados em relação às sub-bacias dos rios das Almas (I) e São José de Guapiara (II) (bacia do Rio Paranapanema) e o Rio Pilões (III) (bacia do Rio Ribeira de Iguape). 1 – Rio das Almas; 2 – Rio São José de Guapiara; 3 – Rio Pilões; 4 – Rio Bocaina-Lageado.

2.2.1 Bacia do Rio Paranapanema

Na região de estudo a área abrangida por esta bacia corresponde às cabeceiras e porções superiores das sub-bacias da vertente do Paranapanema, cujas bacias principais são as dos rios das Almas e São José do Guapiara. De acordo com Furlan e Leite (2008) essa unidade hidro-geomorfológica é caracterizada pelo padrão de drenagem dendrítico, que se adapta às direções estruturais associadas a granitos e filitos. Os vales apresentam-se geralmente bastante entalhados e a densidade de drenagem varia de média a alta. De acordo com Ross e Moroz (1997), as formas de relevo constituem-se basicamente por morros de topos convexos, com vales de entalhamento moderado variando entre 20 a 40 m, dimensão interfluvial entre 250 a 750 m e declividades entre 20 e 30%. Essa unidade é caracterizada por apresentar diversidade de formas fluviais internas, intercaladas aos vales fluviais com declives moderados, com poucas corredeiras e presença de trechos de remansos (Furlan e Leite 2008).

No Planalto de Guapiara, na região de domínio dos corpos carbonáticos, o padrão de drenagem é anômalo, com densidade que varia de média a alta e os vales possuem

entalhamento moderados, com feições tipicamente fluviocársticas, onde as drenagens possuem trechos em superfície e em subsuperfície (Rodrigues e Adami 2005, SMA 1988)

O pouco desenvolvimento de cavernas, sumidouros, ressurgências e demais feições cársticas são justificados pela pouca amplitude topográfica entre os fluxos subterrâneos, o que distingue a região do Planalto de Guapiara das demais formações cársticas do Vale do Ribeira (Rodrigues e Adami 2005).

2.2.2 Bacia do Rio Ribeira de Iguape

A Serra de Paranapiacaba apresenta, além da diversidade geomorfológica e litológica, diversidade hidromorfodinâmica com alta densidade de drenagem e associadas a granitos e filitos, com vales entalhados e morros altos, com topos convexos ou picos cônicos e perfis longitudinais dos rios superiores aos encontrados na região do Planalto de Guapiara (SMA 1988).

Próximo a nascentes e rios de menores ordens é observado um padrão dendrítico-pinado, de alta densidade, associado também a vales em “V” bastante encaixados, cujo grau de entalhamento varia de 80 a mais de 150 m, intercalados por interflúvios estreitos e alongados. À jusante os vales abrem-se em amplas planícies fluviais meandantes de fundos planos (Rodrigues e Adami 2005). A grande amplitude topográfica entre os canais subterrâneos favorece um grande desenvolvimento de cavernas e ressurgências, cujo padrão de drenagem é anômalo (SMA 1988).

2.3 Contexto geológico

O carste da região abordada neste estudo está desenvolvido em rochas carbonáticas neoproterozóicas do Subgrupo Lageado do Grupo Votuverava e Formação Água Clara, pertencentes ao Supergrupo Açungui (Campanha 1991, Campanha e Sadowski 1999), da Faixa Móvel Ribeira (Almeida et al. 1973), na Província Mantiqueira (Almeida et al. 1977, 1985) (Figura 2.4).

2.3.1 Domínio Apiaí

O Domínio (ou Terreno) Apiaí, segundo Faleiros et al. (2010), é limitado a sul pela Falha da Lacinha, representa uma sequência de rochas supracrustais metamorfizadas entre médio e baixo grau. O embasamento do Terreno Apiaí é constituído por rochas arqueanas e paleoproterozoicas de carácter gnáissico-migmatíticas, com intercalações variadas de metassedimentos, e núcleos charnockíticos maiores (Campanha 2002).

Neste domínio os compartimentos tectónicos maiores estão justapostos por forte cisalhamento, incluindo falhas transcorrentes e de empurrão, colocando em contato rochas de idades que variam desde o Arqueano até o Neoproterozoico (Campanha 1991; Campanha e Sadowski 1999; Siga Jr. et al. 2009; Siga Jr. et al. 2011).

Figura 2.4 – Unidades principais do Cinturão Ribeira, com localização do Domínio Apiaí e da

2.3.2 Supergrupo Açungui

O Supergrupo Açungui (Campanha et al., 1987, Campanha, 1991, Campanha e Sadowski, 1999), refere-se a rochas supracrustais metamorizadas em baixo a médio grau, no intuito de diferenciá-las do embasamento gnaiss-migmático e das unidades "molassóides" associadas com as pequenas e tardias bacias *pull-apart*. Esta unidade foi subdividida por aqueles autores em três domínios: Norte (depósitos de plataforma

rasa), Central (litofácies de águas profundas) e Sul (formações de plataforma rasa associadas à porções do embasamento).

De acordo com Campanha (2002) esta unidade é composta por uma sequência de cinturões dispostos longitudinalmente segundo a direção NE, cujos contatos são em geral tectônicos, dados pelo sistema de cisalhamento transcorrente. As subdivisões do Supergrupo Açungui com empilhamento e colunas estratigráficas internas a cada uma dessas unidades forma reconhecidas por Campanha e Sadowski (1999). Contudo, dado este panorama é interpretado que a correlação entre elas é essencialmente lateral e não vertical (Campanha 2002): Grupo Itaiacoca (Domínio Norte), Grupo Votuverava e Formação Água Clara (Domínio Central) e Formação Capiu e Grupo Setuva (Domínio Sul) (Figura 2.5).

Figura 2.5 – Colunas estratigráficas e tentativas de correlação lateral no Supergrupo Açungui. (1) Formação Bairro da Estiva (Abapã); (2) Formação Água Nova; (3) Formação Serra dos Macacos; (4) Formação Bairro dos Campos; (5) embasamento gnáissico – migmatítico; (6) quartzitos e xistos; (7) sequência calciossilicática; (8) sequência calcária; (9) sequência de meta-arenitos (Formação Córrego dos Marques); (10) Formação Betari; (11) Formação Bairro da Serra; (12) Formação Água Suja; (13) Formação Mina de Furnas; (14) Formação Serra da Boa Vista; (15) Formação Passa – Vinte; (16) Formação Gorutuba; (16A) Gabro de Apiaí; (17) embasamento gnáissico – migmatítico; (18) Formação Perau, membro quartzítico; (19) Formação Perau, membro calciossilicático (mineralizado); (20) sequência vulcanossedimentar (pelágico – turbidítica); (21) Formação Iporanga; (22) embasamento gnáissico – migmatítico; (23) sequência Morro Grande (= Turvo-Areado?); (24) Sequência Rio Branco (= Capela do Cedro?); (25) Sequência Juruqui (= Cajati?). Adaptado de Campanha e Sadowski, 1999.

2.3.3 Subgrupo Lageado

O Subgrupo Lageado (Campanha et al. 1985, 1986), pertencente ao grupo Votuverava (Campanha e Sadowski 1999), representa uma sequência de sedimentos siliciclásticos e carbonáticos depositados em plataforma de mar aberto, cuja porção norte é introduzida pelo Gabro de Apiaí (Daitx et al. 1990, Campanha e Sadowski 1999). Esta unidade, segundo Faleiros (2012), foi metamorfizada em fácies xisto verde-inferior (zona da clorita), com metapelitos ricos em porfiroblastos milimétricos de cloritoide.

O Subgrupo Lageado, em sua porção central, apresenta padrão estrutural aparentemente simples, dominado por uma série de anticlinais e sinclinais, os maiores com comprimentos de onda da ordem de centenas de metros a poucos quilômetros, com planos axiais empinados, com mergulho forte para NW, eixos subhorizontais e uma clivagem ardosiana em posição plano-axial, e com vergência estrutural para SE (Campanha e Sadowski 1999 e Campanha 2002).

O Subgrupo Lageado, no entendimento de Campanha e Sadowski (1999) foi subdividido nas seguintes unidades (da base para o topo): Formação Betari; Formação Bairro da Serra; Formação Água Suja; Formação Mina de Furnas; Formação Serra da Boa Vista; Formação Passa – Vinte; Formação Gorutuba. Contudo, na área estudada as rochas carbonáticas pertencem à Formação Bairro da Serra e Água Clara.

2.3.4 Formação Bairro da Serra

A Formação Bairro da Serra é constituída, predominantemente, por metacalcarenito com camadas de metacalcilutito subordinadas (Figura 2.6). Destaca-se por hospedar mineralizações sulfetadas polimetálicas de Pb-Zn-Ag do tipo Panelas (Fleischer 1976, Faleiros 2012). Estruturas sedimentares primárias estão normalmente bem preservadas. Pires (1990) e Faleiros (2000) interpretam a Formação Bairro da Serra como uma sequência progradacional. Faleiros (2000) reconhece sete associações de fácies distintas para Formação Bairro da Serra. A associação BS-1 corresponde a alternâncias entre metacalcilutito e metacalcarenito, sugerindo ambiente com correntes de turbidez associadas. A associação BS-2 apresenta níveis de metacalcarenito finos com estratificação plano paralela que transiciona para níveis com climbings. A associação BS-3 exibe camadas de metacalcirrudito sobrepostas por camadas de metacalcarenito grosso, compostas por sequências Ta-e completas de Bouma (1962).

A associação BS-4 é composta por metacalcilutito cinza-escuro maciço, com intercalações decimétricas de, ou gradam internamente para, níveis mais grossos com estratificação plano-paralela. A associação BS-5 é formada por metacalcarenito que indicam ambiente de mar raso. A associação BS-6 é constituída por alternâncias entre camadas de metassiltito e metacalcário. A associação BS-7 compreende camadas metacalcarenito com estratificação de ondas truncadas, com comprimento de onda submétricos (hummockies).

Figura 2.6 – Exemplo de carbonato da Formação Bairro da Serra (Coordenadas UTM Zona 22J; 760174 x 7311675).

2.3.5 Formação Água Clara

A Formação Água Clara, descrita inicialmente por Marini et al. (1967), é composta por carbonatos impuros com dominância de rochas calcissilicáticas bandadas, metapelitos e metacalcários de coloração cinza, além de anfibolitos metamorfizados em grau um pouco mais elevado que as unidades citadas até o momento (Frasca 1990,

Campanha e Sadowski 1999). Recentemente, Faleiros (2012) subdividiu a Formação Água Clara em *unidade de xisto* e *unidade carbonática*.

A *unidade de xisto* é composta por intercalações entre camadas de micaxisto, quartzo-micaxisto e xistos carbonáticos, além de intercalações subordinadas de camadas de xisto grafitoso, granada-biotita-xisto e quartzito com alternâncias entre camadas de metamarga bandada, filito, quartzito, quartzo-filito, gondito e formações ferríferas bandadas, que hospedam mineralizações singenéticas e epigenéticas de ouro. Os micaxistos são finos a médios, formados, basicamente, por muscovita, biotita e, por vezes, granada. Os xistos carbonáticos mostram granulação média a grossa, muscovita e carbonato compondo a matriz, de granulação média, sendo a muscovita a responsável pela foliação xistosa.

A *unidade carbonática*, que juntamente a Formação Bairro da Serra, perfazem as rochas carbonáticas alvo deste estudo, compreende rochas calcissilicáticas e mármore, com intercalações subordinadas de biotita-quartzo xisto, quartzito e metabasitos. As rochas calcissilicáticas são bandadas e formadas por diopsídio, plagioclásio, quartzo, biotita e olivina. Ocorrem corpos de mármore calcítico puro e impuro, geralmente bandados, com acamamento sedimentar preservado, geralmente com dobras intrafoliais. Também ocorrem intercalações de quartzo-epidoto-actinolita-xisto. Segundo Faleiros (2002), a Formação Água Clara está possivelmente relacionada a um ambiente de sedimentação de águas normalmente rasas, associado a uma plataforma continental, com vulcanismo básico e raramente ácido (Figura 2.7).

Figura 2.7 – Exemplo de rocha carbonática da Formação Água Clara (Coordenadas UTM Zona 22J; 767083 x 7328333)

2.3.6 Magmatismo mesozoico

O magmatismo mesozoico na região estudada é caracterizado por diques de diabásio, diabásio porfíritico e lamprófiro, com destaque para o enxame de diques de Guapiara (Algarte 1972; Ferreira et al. 1981). Os diques ocorrem sob a forma de corpos tabulares, com espessuras que variam de poucos centímetros a algumas dezenas de metros, mas geralmente métricas. Dominam orientações NW e NNW e para NE e ENE, com mergulhos subverticais, interceptando discordantemente quase todos os litotipos (Figura 2.8). Faleiros (2002) descreve para a região a ocorrência de stocks de rochas gábricas alcalinas (olivina-gabro), com dimensões menores que 2 km de diâmetro.

Figura 2.8 – Exemplo de dique de diabásio (Coordenadas UTM: Zona 22J; 768185 x 7320782).

2.4 Carste e ambientes cársticos

Carste é a tradução direta do termo alemão *karst*, com origem da palavra *kras*, denominação de uma paisagem das atuais Croácia e Eslovênia, marcada por rios subterrâneos, cavernas e superfície acidentada dominada por depressões com paredões rochosos e torres de pedra (Ford e Williams 1989; Karmann 1994). O carste, então, é um tipo de paisagem, onde o intemperismo químico, através da dissolução da rocha encaixante, determina as formas de relevo. Os primeiros estudos científicos sobre o carste se deram na região supracitada, fazendo com que o termo carste fosse adotado para paisagens semelhantes ao redor do globo (Williams 1993).

O sistema cárstico pode ser entendido como sendo composto pela integração de dois subsistemas (geoquímico e hidrológico) operando em rochas solúveis (Williams 1993, Ford e Williams 1989). As características do carste acima e abaixo da superfície são produtos da interação de processos nestes subsistemas vinculados.

Os sistemas cársticos são formados por pela dissolução de certos tipos de rochas pelas águas subterrâneas e meteóricas (Ford e Williams, 1989). Uma rocha é considerada solúvel quando, após sofrer intemperismo químico, produz pouco resíduo sólido (Karmann 2009). As rochas carbonáticas, como calcários, dolomitos e mármore, são as mais solúveis, entre as rochas carstificáveis, pois o seu principal mineral, a calcita (CaCO_3) (e/ou dolomita – Mg, CaCO_3), dissocia-se nos íons Ca^{2+} e/ou Mg^{2+} e CO_3^{2-} pela ação da água.

No estudo da dinâmica de áreas cársticas é importante saber de onde vem a água e sua carga transportada (Ford e Williams 1989). Um sistema autogênico é composto inteiramente por rochas carstificáveis onde as águas recebidas neste são

somente aquelas oriundas da precipitação nestas rochas, enquanto que um sistema alogênico, as águas recebidas neste advém inteiramente de uma área de captação vizinha não cárstica (Williams 1993).

Muito variadas, as rochas carbonáticas são difíceis de classificar. Os tipos completamente detríticos praticamente não existem devido à solubilidade do calcário (Karmann 2009). O calcário dito puro compõe-se de 92% de carbonatos, de dois tipos, que correspondem basicamente a dois minerais, carbonato de cálcio (calcita e suas variedades) e carbonato de magnésio (dolomita). O calcário chamado impuro, no qual o carbonato de cálcio é associado a outros corpos menos solúveis (matéria orgânica, óxido de ferro, argila, sílica livre etc.) compõem os 8% restantes (Karmann e Sánchez, 1979).

Segundo Gunn e Lowe (2000) e Ford e Williams (2007), globalmente, as áreas cársticas desenvolvidas em rochas carbonáticas ocorrem em grandes extensões, enquanto que no Brasil, este relevo ocupa cerca de 5 a 7% do território nacional (Figura 2.9).

Figura 2.9 – Distribuição global das rochas carbonáticas aflorantes em superfície. Adaptado de Gunn e Lowe (2000) e Ford e Williams (2007).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A avaliação da vulnerabilidade do carste da região das cabeceiras dos rios das Almas, São José de Guapiara e Pilões demandou, além de trabalhos de gabinete, nove campanha de campo, que totalizaram 36 dias efetivos de campo. Como a avaliação do carste dependeu do reconhecimento da geomorfologia e do levantamento espeleológico, a compilação destes dados se deu nas seguintes etapas: caracterização da geomorfologia cárstica; levantamento de dados espeleológicos, a avaliação da vulnerabilidade do carste em si e a elaboração de um zoneamento ambiental.

3.1 Caracterização da geomorfologia cárstica

A caracterização geomorfológica do carste na área de estudo envolveu trabalhos em gabinete, onde foram levantadas informações sobre o carste e cavernas, além de mapas geológicos, geomorfológicos, bases topográficas e interpretação de fotografias aéreas. Os dados levantados em gabinete foram sempre concatenados com os de campo. A partir da fotointerpretação que delimitou as depressões, foi feita uma comparação com curvas de nível geradas pelo software Global Mapper 15®, a partir de dados do SRTM. Após uma primeira seleção, foi realizada checagem em campo de todas as depressões para confirmação de sua existência.

Os trabalhos de campo foram desenvolvidos segundo os métodos usuais, com a localização e descrição das feições cársticas. Após as etapas de campo e pesquisa prévia em bibliografia relacionada, todos os dados coletados foram compilados em uma base completa desenvolvida em ambiente SIG e utilizando-se de técnicas de geoprocessamento. O produto desta compilação contém informações a respeito da geologia, geomorfologia, uso e ocupação do solo e localização das principais feições cársticas observadas. Apenas ao final da integração dos dados foi definida a área de estudos, com base nas bacias hidrográficas.

Este tópico encontra-se exposto de forma mais detalhada no Item 4.3.

3.2 Caracterização espeleológica

A caracterização espeleológica na área de estudo teve início em gabinete com o levantamento de mapas espeleológicos disponíveis nos acervos do Instituto de

Geociências da Universidade de São Paulo, do Grupo Espeleológico da Geologia da USP (GGEO), do Grupo Pierre Martin de Espeleologia (GPME) entre outros. Em seguida foi consultado o Cadastro Nacional de Cavernas (CNC – SBE) para inventário de quais cavernas já estão identificadas na região escolhida.

Após este levantamento em gabinete, que contou com o auxílio de projetos de alunos de Iniciação Científica, a etapa seguinte foi a localização das cavernas em campanhas de campo, com o uso de GPS e mapas topográficos em diversas escalas. A maior parte das cavernas presentes neste levantamento em gabinete foi localizada em campo, e todas elas tiveram sua posição espacial retificada, com a utilização de equipamentos mais modernos que conferem maior precisão na obtenção dos dados.

3.3 Avaliação da vulnerabilidade cárstica

A interação homem-carste permeia o seguinte panorama: as sociedades podem ameaçar ou serem ameaçadas por ambientes cársticos. O gerenciamento criterioso de locais de ocupação, plantios, disposição de resíduos, implantação de minerações e até mesmo áreas de proteção é um meio de se administrar e até mesmo minimizar riscos de subsidência, contaminação da água subterrânea e destruição de cavidades naturais, devido à fragilidade natural deste sistema (Williams 1993, van Beynen et al. 2012).

Uma vez que o sistema cárstico é um ambiente muito frágil e muitas pessoas dele dependem, muitos métodos de avaliação da vulnerabilidade foram desenvolvidos para se tentar minimizar os impactos ambientais ou humanos neste tipo de sistema (Civita et al. 1990, Williams 1993, Doefliger e Zwahlen 1998, Goldscheider et al. 2000, van Beynen e Townsend 2005). Porém, muitos deles focam somente um parâmetro de avaliação, por exemplo a vulnerabilidade da água subterrânea somente, não levando em conta fatores mais abrangentes como a situação do carste e sua fragilidade frente a potenciais impactos de ordem ambiental e antrópica (van Beynen e Townsend 2005, 2007, van Beynen et al. 2012)

3.3.1 Métodos de avaliação da vulnerabilidade cárstica

Dentre os muitos métodos existentes para avaliação da vulnerabilidade de um sistema cárstico, a maioria leva em consideração, como fator crucial, a injeção de água no sistema através de sumidouros, para determinação da suscetibilidade do aquífero

cárstico deixando com um peso menor outros parâmetros importantes para a determinação da fragilidade de um ambiente tão particular (Goldscheider et al. 2002, van Beynen e Townsend 2005).

Vários métodos de mapeamento de vulnerabilidade da água subterrânea já foram desenvolvidos e aplicados ao redor do mundo. Civita (1993), Vrba e Zaporozec (1994), COST65 (1995), Gogu (2000) e Gogu e Dassargues (2000) apresentaram revisões e discussões a respeito do tema. Magiera (2000) descreveu e avaliou 69 métodos do mapeamento da vulnerabilidade do carste.

Muitos destes métodos foram desenvolvidos para regiões específicas da Europa (França, Itália, Suíça, Eslovênia entre outros) ou dos Estados Unidos, restringindo sua aplicação em detrimento ao carste de outros países, como o de regiões tropicais, como é o caso do carste abordado neste estudo. Além disso, o fator escala também é restritivo, uma vez muitos destes métodos são direcionados para áreas pequenas, concentrando esforços em somente uma área de captação (Doefliger e Zwahlen 1998, van Beynen et al. 2012). Abaixo estão relacionados alguns métodos sumarizados por Vlaicu e Munteanu (2008) além de outros mais recentes acerca do tema.

AF (Rao et al. 1985) - apresenta o fator de atenuação de impacto dos poluentes e é conceitualmente similar ao método **AVI** (van Stempvoort et al. 1992) e ao método **EKv** (Auge 1995), que serão descritos posteriormente

$\Delta hT'$ (Auge 1986) - é aplicado para aquíferos semiconfinados, onde **Δh** é o potencial hidráulico e **T'** é a transmissividade vertical. Como resultado é gerado três categorias de vulnerabilidade (baixa, média e alta).

DRASTIC (Aller et al. 1987) - usado para avaliação quantitativa da incidência de poluentes como pesticidas e fertilizantes na água subterrânea (índices de avaliação variam de 1-10). Os parâmetros utilizados são os seguintes: **D** é a profundidade do aquífero; **R** a taxa de recarga; **A** a litologia do aquífero; **S** o tipo de solo; **T** a topografia; **I** o impacto na zona insaturada; **C** a condutividade hidráulica do aquífero. A relevância quanto ao significado para a vulnerabilidade total, os valores resultantes são ponderados com coeficientes, selecionado a partir de uma a cinco. Após a multiplicação e adição de todos os dados, o índice de vulnerabilidade é gerado (variando de 23 a 230), e assim pode-se inferir definindo seu grau (muito, baixo, alto) e intra-favorecimento ou comparações inter-regionais. Método bastante complexo de aquisição e interpretação dos dados.

GOD (Foster 1987) - Este método utiliza três parâmetros: **G** é a ocorrência de água subterrânea (tipo de aquífero), **O** a classe geral do aquífero (litologia da cobertura de proteção) e **D** a profundidade do aquífero. Os índices selecionados a partir do intervalo 0-1 serão atribuídos aos valores resultantes, e o processamento gráfico dos três mapas resultantes permite a avaliação da vulnerabilidade, entre o grau mínimo e o máximo.

SINTACS (Civita et al. 1990) – avalia sete parâmetros: **S** é a profundidade do aquífero, **I** é a Infiltração, **N** as características da zona insaturada, como granulometria, textura e carstificação, **T** a tipologia da cobertura, **A** as características hidrológicas do aquífero, **C** a condutibilidade hidráulica do aquífero e **S** é a superfície topográfica. Apresenta uma estrutura complexa e dados devem ser processados através de um software, dada quantidade de informações geradas.

DSWAP (Blodgett 1993) – Avaliação e Proteção de fontes de água potável. Leva em conta a atividade de contaminantes em potencial, a efetividade de barreiras naturais para eventos de poluição e o tempo de viagem de compostos químicos ou microorganismos.

EKv (Auge 1995) – Leva em consideração dois fatores: **E** (profundidade do aquífero não confinado) e **Kv** (permeabilidade vertical da zona insaturada). A estes valores são atribuídos índices variando entre 1-5, dependendo da sua importância para o grau de vulnerabilidade da água subterrânea. Depois que os dados forem calculados, o índice final define as seguintes classes: baixa (pontuação entre 2-4), média (pontuação entre 5-7) e alta (pontuação entre 8-10).

GLA (Geologisches Landsamt, Hölting et al. 1995) – desenvolvido para investigação da zona de proteção de regiões cársticas, explicando a relação entre a atenuação de processos naturais e o tempo de viagem de contaminantes.

EPIK (Doerfliger e Zwahlen 1998) – utilizado para planejamento de uso e ocupação, especialmente para proteção de áreas de captação, dado por um índice de proteção final, classificado em zonas **S1**, **S2** e **S3** (S1 é o zoneamento que deve ser mais protegido). São utilizados 4 parâmetros: **E** (epicarste), **P** (cobertura protetora de solo), **I** (condições de infiltração de água no sistema) e **K** (desenvolvimento da rede cárstica). Cada um dos parâmetros é ainda subdividido e ponderado para ajudar na classificação de cada índice. O índice de proteção é dado pela equação $F =$

$3 \cdot E + P + 3 \cdot I + 2 \cdot K$, onde são geradas 4 classes de vulnerabilidade que variam de baixa a muito alta.

SI (INAG 1998) – focado no Índice de **S**uscetibilidade, foi adotado pela Equipe de Projeto do Plano Nacional da Água de Portugal, como um método de avaliação de vulnerabilidade das águas subterrâneas.

GSI – Serviço Geológico da Irlanda (Daly e Drew 1998) – Integra um mapa de aquíferos com a importância dos recursos hídricos, características hidrogeológicas e mapa de vulnerabilidade, destacando a espessura de solos e condutividade hidráulica, zonas de proteção internas e externas da área de captação e o uso do solo.

CALVUL (Troiano et al. 1999) – Desenvolvido na Califórnia, trata-se de um método confiável em pequenas e médias escalas. Utiliza análise geoestatística dos seguintes parâmetros: profundidade do aquífero versus taxa de recarga, cobertura de proteção versus permeabilidade. Como resultado uma representação gráfica da distribuição dos poluentes na rede de drenagem é gerada com identificação de fatores ambientais, porém é um método de difícil aplicação para áreas cársticas devido ao rápido transporte dos contaminantes.

REKS (Malísk e Svasta 1999) – Similar ao EPIK, porém aplicado para o carste de uma região específica da Eslováquia.

PI (Goldscheider et al. 2000) – Descreve o Índice de **P**roteção seguindo os mesmos princípios do EPIK.

VULK (Jeannin et al. 2001) – modelo matemático para descrever Vulnerabilidade e Carste. Desenvolvido para avaliação específica do carste da União Europeia.

FAVA (Baker et al. 2002) – Avaliação da Vulnerabilidade de Aquíferos da Flórida, modelo construído em plataforma GIS para o carste da Flórida exclusivamente.

KDI (van Beynen e Townsend 2005) – Índice de Perturbação do Carste. Método bastante abrangente de avaliação de impactos no carste, levando em consideração fatores ambientais (biota, vegetação e solo), antrópicos, econômicos e sociais. Estes fatores são subdivididos em trinta e um parâmetros que ponderados de zero a três (onde zero é considerado um ambiente intacto, ou seja, sem perturbação e três um panorama catastrófico). O resultado são índices que variam entre zero e um, onde os valores mais próximos de um são os ambientes mais perturbados, ou seja, com maior

grau de impacto. Método bastante útil para escalas regionais e locais e de fácil aquisição de dados e interpretação dos mesmos.

Riske e Riske 2 (Pételet-Giraud et al. 2000; Pranville et al. 2008) - O modelo Riske utiliza cinco parâmetros ambientais (Rocha de meios aquíferos, Infiltração, Solo, Karst, e Epikarst) para caracterizar a configuração hidro-geológico e avaliar a vulnerabilidade do aquífero. As definições dos critérios podem ser resumidas como: **R** para o tipo de Rocha: litologia (proporção de minerais de argila, espessura da cama) e grau de fraturamento das rochas afloramento do aquífero são os principais parâmetros deste critério; **I** para Infiltração: basicamente definida por parâmetros morfológicos e espeleológicos, a fim de distinguir entre a infiltração concentrado e difuso. A presença do solo **S** ou a existência de um epicarste **E** tem o mesmo efeito de armazenamento temporário de água próxima da superfície, e a mesma função de proteção do aquífero subjacente para a infiltração. A sobreposição de mapas **S** e **E** permite a definição do critério P, mantendo o mais protetor dos dois índices de **P**. **K** para carstificação: caracterizado por o grau de desenvolvimento do sistema de drenagem cárstica na escala do sistema.

KarstALEA (Schmassmann et al. 2010) – Este método combina conceitos básicos de carste, conhecimentos da distribuição de processos espeleogenéticos (presente e passado) e considerações hidrogeológicas. A combinação destes parâmetros leva aos seguintes resultados: (1) Distribuição espacial de ocorrência de carste (densidade de condutos cársticos) e (2) Distribuição espacial e características de riscos relacionados ao carste (tamanho e geometria dos condutos, descarga, pressão de água nos condutos, quantidade e características dos sedimentos). Embora este método não permita prever a real geometria e posição dos condutos, melhora o prognóstico de sua distribuição e caracterização dos condutos.

PaPRIKa (Kavouri et al. 2011) - Método de mapeamento de vulnerabilidade intrínseca para a proteção dos aquíferos cársticos com base em quatro critérios: proteção, reservatório, infiltração e carstificação. Baseado no método EPIK (Dörfliger e Zwahlen 1998) e na atualização dos métodos Riske e Riske 2 (Pételet- Giraud et al. 2000; Pranville et al. 2008). A proteção dos aquíferos (**Pa**) é baseada num modelo cárstico conceitual considerando o funcionamento de estruturas e hidrologia de um aquífero cárstico. Dois grupos de fatores são considerados: (1) o grupo de estrutura com proteção (**P**) e tipo de rocha (**R**) fatores; (2) o funcionamento do grupo com infiltração (**I**) e (**Ka**) carstificação.

3.3.2 A escolha do método

A avaliação do impacto no carste é muito difícil e subjetiva, e um destes obstáculos é a variação entre sistemas cársticos, tal qual sazonalidade, temporalidade, gênese espeleológica etc. (van Beynen e Townsend 2005). Embora a avaliação de impactos no carste demande interpretação, muito da subjetividade pode ser excluída através dos valores de um conjunto de variáveis e o uso de uma pontuação predefinida.

Diante deste extenso rol de estudos voltados à vulnerabilidade e da realidade do carste na região das cabeceiras dos rios das Almas, São José de Guapiara e Pilões, foi necessária uma precisa escolha do método a ser aplicação para a avaliação da área em questão. Portanto, uma criteriosa análise de alguns dos métodos foi realizada para se escolher o mais apropriado para este estudo. Para tanto foram escolhidos primeiramente aqueles métodos que levam em consideração o fator carste como parâmetro de avaliação e suas vantagens e desvantagens (Tabela 3.1).

A escolha do método também levou em consideração, além da avaliação dos aspectos vantajosos e desvantajosos, o atendimento a determinados fatores julgados importantes para a análise da vulnerabilidade do carste (Tabela 3.2).

A partir da realidade do carste da área de estudo, associado aos dados coletados em campo e aqueles disponíveis na literatura e, levando em consideração a dificuldade de obtenção de alguns parâmetros por conta da extensão da área e falta de informação disponível, julgamos que os métodos mais adequados são o EPIK (Doerfliger e Zwahlen 1998) e KDI (van Beynen e Townsend 2005), pois são os que abrangem a maior quantidade de parâmetros para avaliação da vulnerabilidade cárstica.

Tabela 3.1 – Vantagens e desvantagens de alguns métodos de avaliação da vulnerabilidade cárstica

Método	Utilização	Vantagens	Desvantagens
DRASTIC (Aller et al. 1987)	Avaliação quantitativa de incidência de poluentes	Avaliação quantitativa mais acurada	Muitos parâmetros a serem analisados e dados hidrológicos são necessários, e leva em conta o tipo de contaminante.
GOD (Foster 1987)	Avaliação do perigo de poluição do aquífero com o propósito de criar prioridades, determina a vulnerabilidade intrínseca	Poucos parâmetros e trabalha com poucos dados	Método de aplicação local e o fator carste não é o principal.
SINTACS (Civita et al. 1990)	Avaliação de vulnerabilidade da água subterrânea.	Avaliação abrangente do sistema cárstico	Muitos parâmetros são utilizados. Estrutura complexa e dados devem ser compilados por um software.
EPIK (Doerfliger e Zwahlen 1998)	utilizado para planejamento de uso e ocupação, especialmente para proteção de áreas de captação, dado por um índice de proteção final, classificado em zonas S1, S2 e S3 (S1 é a zona com mais proteção).	Poucos parâmetros, fácil avaliação e rápido resultado.	Utilizado para escalas locais.
PI (Goldscheider et al. 2000)	Descreve o Índice de Proteção seguindo os mesmos princípios do EPIK.	Poucos parâmetros, fácil avaliação e rápido resultado	Utilizado para escalas locais.
RISKE E RISKE 2 (Pételet-Giraud et al. 2000; Pranville et al. 2008)	Método de avaliação de vulnerabilidade	Poucos parâmetros	Utilizado para se determinar o tempo de permanência de determinado contaminante no aquífero cárstico
KDI (van Beynen e Townsend)	Método de avaliação do sistema cárstico abrangido questões ambientais, naturais, sociais e econômicas	Poucos parâmetros, fácil interpretação e resultados rápidos, com atuação em escala regional. Gera resultado da situação do carste.	-----
COP (Vias et al. 2006)	Método de avaliação de vulnerabilidade	Este método considera características cársticas (fator C) e a sua captação bem como formas de relevo cársticas, como fatores de diminuição da proteção natural proporcionada por camadas sobrepostas (Fator S). O fator P permite a consideração do agente de transporte de contaminação.	Desconsidera fatores ambientais externos, importantes para reconhecimento dos riscos ao qual o carste está sujeito.
KarstALEA (Schmassmann et al. 2010)	Método de avaliação de vulnerabilidade	Este método combina conceitos básicos de carste, conhecimentos da distribuição de processos espeleogenéticos (presente e passado) e considerações hidrogeológicas.	Embora este método não permita prever a real geometria e posição dos condutos, melhora o prognóstico de sua distribuição e caracterização dos condutos.
PaPRIKa (Kavouri et al. 2011)	Método de avaliação de vulnerabilidade	Baseado no método EPIK, RISKE 1 e 2	Considera o fator infiltração como o mais ponderado, excluindo fatores ambientais externos.

Tabela 3.2 – Parâmetros abrangidos por cada método que auxiliaram na decisão da escolha do método mais adequado para a análise da vulnerabilidade.

Método/ Fatores	GOD	DRASTIC	SINTACS	EPIK	PI	KDI	COP	RISKE 1 e 2	KarstALEA	PaPRIKa
Topografia/ declividade		X	X	X	X	X	X		X	
Rede de drenagem		X	X	X	X	X	X	X	X	X
Tipo de solo		X	X	X	X	X	X	X		X
Vegetação						X		X	X	
Zonas de recarga	X	X	X	X	X	X		X	X	
Epicarste				X		X		X		
Prof. Nível d'água	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Caract. Hidrogeol.	X	X	X	X	X	X		X	X	X
Rede cárstica		X	X	X		X		X	X	X
Uso do solo				X	X	X	X			
Fatores econômicos e sociais						X				

• Método EPIK

O EPIK é um método multiparamétrico definido por Doerfliger e Zwahlen (1998) para determinação da vulnerabilidade da água subterrânea na Suíça. O método leva em consideração os seguintes parâmetros: E = Epicarste; P = cobertura de Proteção do solo, I = condições de Infiltração, K = grau do desenvolvimento do Carste. Alguns destes parâmetros foram adaptados do método original para se adequar a área de estudo, conforme a Tabela 3.3.

Após a obtenção dos dados os mesmo são ponderados de acordo com os valores da Tabela 3.4 e em seguida calculados segundo a Equação 3.1. Os valores do Fator de Proteção (F) obtidos são classificados de acordo com a Tabela 3.5 e através destes são estipulados o grau de vulnerabilidade e a zona de proteção. As zonas de proteção da fonte de captação de água subterrânea são classificadas de acordo com a Tabela 3.6.

Para o método EPIK a adaptação foi mais severa, uma vez que este foi desenvolvido para áreas menores (escala local), e apresentar as desvantagens descritas por Goldscheider (2002). Em seguida estão apresentadas as adaptações nos critérios de avaliação para se ajustar à área de estudo (Tabela 3.7).

Tabela 3.3 – Parâmetros de avaliação da vulnerabilidade do método EPIK, adaptado de Doerfliger e Zwahlen (1998).

Parâmetros	Indicadores	Características
E1	Morfologia cárstica observada (relativa ao epicarste)	Cavernas, sumidouros, dolinas, campos de lapíás, relevo ruiforme, cuevas
E2		Zonas intermediárias ao longo de alinhamento de dolinas, uvalas, vales cegos, cânions, poliés.
E3	Morfologia ausente	O resto da captação
P1	Cobertura de proteção ausente (afloramento rochoso)	Afloramento rochoso
P2		20-100 cm de solo e formações com baixa condutividade hidráulica
P3		> 100 cm de solo e formações com baixa condutividade hidráulica
P4	Cobertura de proteção importante	> 8m de formação com baixa condutividade hidráulica ou >6 m de formação com condutividade hidráulica muito baixa com >1 m de solo
I1	Infiltração concentrada (sumidouros)	Sumidouros perenes ou temporários, com rios temporários ou perenes alimentando o sumidouro.
I2		Áreas de captação de água onde a declividade é maior que 10% para áreas de agricultura e maior de 25% para pastagens.
I3		Áreas de captação de água onde a declividade é menor que 10% para áreas de agricultura e menos de 25% para pastagens.
I4	Infiltração difusa	Fora da captação de curso d'água: bases de escarpas e encostas íngremes (maior que 10% para áreas de agricultura e maior de 25% para pastagens). O resto da área de captação.
K1	Rede cárstica bem desenvolvida	Rede bem desenvolvida com condutos decimétricos a métricos, com pouco preenchimento e bem conectados.
K2	Rede pobremente desenvolvida	Rede pobremente desenvolvida, com condutos pouco desenvolvidos, de tamanhos decimétricos ou menores.
K3	Aquífero misto ou fraturado	Descarga em meio poroso com possível proteção de aquífero não cárstico fraturado, mas carbonático.

Tabela 3.4 – Valores de ponderação dos parâmetros do EPIK. Adptado de Doerfliger e Zwahlen (1998).

E1	E2	E3	P1	P2	P3	P4	I1	I2	I3	I4	K1	K2	K3
1	2	3	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3

$$F = 3E_i + 1P_j + 3I_k + 2K_l$$

Equação 3.1 – Cálculo do fator de proteção (F) para determinação da vulnerabilidade do sistema cárstico.

Tabela 3.5 – Valores do Fator de Proteção (F), grau de vulnerabilidade e determinação da zona de proteção da área de captação. Adaptado de Doerfliger e Zwahlen (1998).

Fator de Proteção (F)	Vulnerabilidade	Zona de Proteção
9 a 19	Muito alta	S1
20 a 25	Alta	S2
>25	Moderada	S3
>25, mas com P4 + (I3,4)	Baixa	Resto da área de captação

Tabela 3.6 – Zonas de proteção obtidas através do cálculo do fator de proteção através de adaptação do método EPIK (Doerfliger e Zwahlen 1998)

Zona de Proteção	Classificação
Zona S1	Esta zona deve prevenir danos à captação de água subterrânea ou de recarga bem como prevenir poluição nas cercanias imediatas.
Zona S2	Define uma área adequada à prevenção de contaminação biológica em captação de água. Também deve prevenir o abastecimento de água potável de ser poluído por escavações e trabalhos em subsuperfície, ou que o fluxo de água em direção à fonte seja afetado por trabalhos subterrâneos.
Zona S3	Deve providenciar espaço e tempo suficiente para a remediação quando uma poluição acidental ameaça a fonte de captação.

Tabela 3.7 – Parâmetros de avaliação da vulnerabilidade cárstica adaptados do método EPIK (Doerfliger e Zwahlen 1998)

Parâmetro	Categoria	Variação do Parâmetro	Características
Desenvolvimento do Epicarste	E Alto	Morfologia cárstica observadas	Cavernas, sumidouros, dolinas, campos de lapiás, relevo ruiniforme, cuevas.
	E Médio		Feições de dissolução observadas, com carstificação incipiente.
	E Baixo	Morfologia cárstica ausente	Afloramentos ou áreas com feições de dissolução incipiente e sem carstificação
Proteção do solo	P Alto	Cobertura de proteção ausente	Afloramento rochoso de grande extensão, cavas de mineração (atuais ou abandonadas)
	P Médio	Cobertura de proteção existente	Presença de solo (<1m) de alteração com vegetação rasteira, agricultura ou silvicultura
	P Baixo		Presença de solo (>1m) de alteração com vegetação de grande porte (mata, floresta)
Infiltração de água no sistema cárstico	I Alto	Infiltração concentrada	Áreas com grande concentração de sumidouros e sua área de captação (depressões poligonais)
	I Médio		Áreas carbonáticas com possível infiltração
	I Baixo	Infiltração difusa	Captação difusa em áreas carbonáticas
Desenvolvimento da rede cárstica	K Alto	Rede cárstica bem desenvolvida	Bom desenvolvimento dos condutos (métricos), com pouco preenchimento e bem conectados.
	K Médio	Rede cárstica pobremente desenvolvida	Condutos com baixo desenvolvimento, de tamanhos decimétricos ou menores.
	K Baixo	Sem carstificação no sistema	Não há desenvolvimento de condutos ou processos de carstificação, mas a rocha encaixante é carbonática.

• **Método KDI**

A escolha deste método é complementar ao EPIK, uma vez que ambos levam em consideração o uso e ocupação do solo, que se caracteriza como um índice muito importante na avaliação da vulnerabilidade do carste. Porém a aplicação deste método é mais qualitativa e descritiva que o método de Doerfliger e Zwahlen (1998).

O método KDI (*Karst Disturbance Index*) indica a situação do carste na região e a avaliação deste panorama passa por cinco categorias subdivididas em treze atributos, que por sua vez são novamente subdivididos em trinta e uma categorias (Tabela 3.8). Se o indicador não é aplicável ao sistema então ele é removido da avaliação e é então chamado de LD (falta de dados).

Para a análise e obtenção dos parâmetros do KDI foi utilizada a imagem LANDSAT 5 - TM, cena 220/77 de 04/02/2010, com composição de bandas RGB 4/3/5 realizada através do *software* ENVI 4.7. Estas informações foram posteriormente vetorizadas e quantificadas através do *software* ArcGIS 10.1.

O cálculo do grau de impacto é realizado a partir da avaliação de cada indicador em uma escala de zero a três, onde 0 = zero impacto no carste; 1 = impacto localizado e não severo; 2 = impacto severo e disseminado; 3 = impacto catastrófico. Em seguida cada nota atribuída para os indicadores são somadas, ao que chamaremos de A. Se o indicador não é aplicável ao sistema ele é removido da avaliação e é então chamado de LD (falta de dados). Na existência de LD's então para estes é aplicada uma soma simples e dividido por todos os atributos considerados. Se o valor for $< 0,1$ então os dados são confiáveis, se for $> 0,4$ então é sugerido mais pesquisa na área. Na área de estudo este valor de LD foi menor que 0,1, então os dados puderam ser retirados do cálculo final sem afetar a credibilidade do modelo.

Em seguida soma-se também a pontuação total possível de todos os indicadores, o que será designado de B. O nível de impacto será obtido através da razão de A por B e o resultado será balizado pelos valores expostos na Tabela 3.9.

Tabela 3.8 – Parâmetros considerados para avaliação do grau de impacto do carste (adaptado de van Beynen e Townsend 2005).

Categoria	Atributo	Indicador
Geomorfologia	Formas de relevo	Pedreira/mineração
		Mudança hidrológica induzida (antrópico)
		Águas pluvias drenando para sumidouros
		Entupimento de dolinas
		Dolinas usadas como "lixão"
	Solo	Erosão do solo Compactação do solo
Carste	Carste em subsuperfície	Inundação do epicarste
		Vandalismo/remoção de espeleotemas
		Remoção de minerais e sedimentos
		Compactação de sedimentos do piso
Atmosfera	Qualidade do ar	Dessecação
		Corrosão por condensação
Hidrologia	Qualidade da água superficial	Uso de pesticida e herbicida
		Derramamento de contaminantes
	Qualidade das águas de nascentes	Vazamento de tanques de combustível enterrados
		Concentração de compostos químicos perigosos em nascentes
	Quantidade de água	Mudanças no nível do lençol freático Mudança no gotejamento de cavernas
Biota	Impacto na vegetação	Remoção da vegetação
	Fauna subterrânea	Riqueza da fauna cavernícola
		Densidade da fauna cavernícola
	Fauna subaquática (cavernas)	Riqueza da fauna subaquática (cavernas)
		Densidade da fauna subaquática (cavernas)
Cultural	Artefatos humanos	Destruição de artefatos históricos
	Manejo de áreas cársticas	Proteção regulamentada
		Cumprimento da legislação
		Educação da população
	Infraestrutura construída	Construção de estradas
		Construção sobre feições cársticas Construção dentro de cavernas

Tabela 3.9 – Classificação do Grau de Impacto pelo método KDI

Pontuação total (A) / total possível (B)	Grau de impacto
0.8 a 1.0	Muito impactado
0.6 a 0.79	Moderadamente impactado
0.4 a 0.59	Impactado
0.2 a 0.39	Pouco impactado
0 a 0.19	Intacto

O fator biota, para o método KDI não pôde ser considerado para a análise, uma vez que são necessários estudos mais específicos para toda a região, que é bastante extensa. O reconhecimento da fauna cavernícola e sua abrangência e situação existe para alguns pontos isolados, mas estes ainda estão em fase de estudo, o que resultaria em imprecisão no método e, portanto não foram incluídos. Porém, esta falta de informação é aceita pelo método, para que o mesmo funcione perfeitamente, como previsto por van Beynen e Townsend (2005). Assim os dados de fauna/flora foram considerados como LD's.

3.3.3 Os métodos de avaliação utilizados: EPIK e KDI

Apesar de serem considerados os mais aptos à avaliação da vulnerabilidade do carste foi constatado que ambos apresentaram algumas limitações de aplicação dada a dificuldade de obtenção de algumas informações durante o período de coleta de dados. Ambos os métodos foram adaptados à realidade e situação do carste estudado, uma vez que estas ferramentas foram desenvolvidas para áreas distintas da situação de estudo, mas que consideramos que sejam as mais adequadas para esta avaliação, por conta dos parâmetros utilizados e do objetivo deste estudo.

O cálculo do Fator de Proteção (F) foi mantido, porém para este estudo está sendo considerado como mais um parâmetro de avaliação para o estabelecimento do zoneamento das áreas cársticas. Os critérios de caracterização do zoneamento das áreas cársticas também foram adaptados do método EPIK, como mostrado na Tabela 3.10.

Tabela 3.10 – Classificação dos setores a serem utilizado para o zoneamento das áreas cársticas (adaptados do método EPIK Doerfliger e Zwahlen (1998).

Setor de Proteção	Classificação
Setor S1	Este setor deve garantir a proteção das áreas com sumidouros, não permitindo em hipótese alguma a instalação de empreendimentos, agricultura ou qualquer outra atividade que possa perturbar a integridade do aquífero subterrâneo ou de quaisquer feições cársticas ali inseridas.
Setor S2	Define uma área de atenção em relação a impactos em potencial, qualquer atividade passível de contaminação do solo ou destruição de feições cársticas.
Setor S3	Deve providenciar espaço e tempo suficiente para a remediação quando uma poluição ou atividade impactante acidental ameaça o aquífero subterrâneo ou qualquer outra feição cárstica.

4. GEOMORFOLOGIA CÁRSTICA

Artigo submetido para a Revista Geociências da Universidade Estadual Paulista

O CARSTE NAS CABECEIRAS DOS RIOS DAS ALMAS, SÃO JOSÉ DE GUAPIARA (BACIA DO RIO PARANAPANEMA) E DO RIO PILÕES (BACIA DO RIO RIBEIRA DE IGUAPE), SP

Bruno Daniel Lenhare ¹, William Sallun Filho ²

(1) Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. Rua do Lago, 562, Butantã, CEP 05508-080, São Paulo, SP. Endereço eletrônico: brunolenhare@gmail.com.

(2) Instituto Geológico, Secretária de Meio Ambiente do Estado de São Paulo. Avenida Miguel Stéfano, 3.900, CEP 04301-903, São Paulo SP. Endereço eletrônico: wsallun@gmail.com

RESUMO – Na região das cabeceiras dos rios das Almas, São José de Guapiara (Planalto de Guapiara) e Rio Pilões (Serra de Paranapiacaba) ocorrem corpos carbonáticos neoproterozoicos (Supergrupo Açungui) onde se desenvolve um sistema cárstico e feições associadas. Informações levantadas em trabalhos de campo permitem observar que o carste se desenvolve de maneira distinta em ambos os compartimentos geomorfológicos. Na região do Planalto de Guapiara, as feições cársticas ocorrem com mais frequência nas proximidades com o divisor de águas entre o planalto e a serra. O relevo mais suavizado, o baixo gradiente hidráulico, a distância do nível de base (Rio Paranapanema) e o regime predominantemente fluvial, associados à composição química e ao pouco tempo de exposição das rochas carbonáticas não permitiram o desenvolvimento de um sistema cárstico expressivo. Na Serra de Paranapiacaba, ambiente onde predomina o relevo mais acidentado, altos gradientes hidráulicos, proximidade com o nível de base (Rio Ribeira de Iguaçu) e maior tempo de exposição das rochas carbonáticas, permitiram o desenvolvimento de um sistema cárstico mais expressivo com presença de rede de condutos e feições associadas.

Palavras-chave: carste, geomorfologia cárstica, Planalto de Guapiara, Serra de Paranapiacaba.

ABSTRACT – *B.D. Lenhare, W. Sallun Filho – Karst at the headwaters of Rio das Almas, São José de Guapiara rivers (Paranapanema River Basin) and Pilões River (Ribeira de Iguape River Basin), SP.* In the region of the Almas, São José de Guapiara rivers (Guapiara Plateau) and Pilões River (Paranapiacaba Range) there are Neoproterozoic carbonate bodies (Açungui Supergroup) that develops karst system and associated features. Information gathered in fieldwork allowed observing that the karst develops differently in both geomorphological compartments. In the Guapiara Plateau region, the karst system occurs more frequently nearby with the water divider between the plateau and the range. The most cushioned relief, low hydraulic gradient, the distance from the base level (Paranapanema River) and predominantly fluvial regime associated with the chemical composition and the short exposure time of the carbonate rocks did not allow the development of a significant karst system. In the Paranapiacaba Range, environment where prevails the most rugged, high hydraulic gradients, proximity to the base level (Ribeira de Iguape River) and longer exposure of the carbonate rocks, enabled the development of a karst system with more expressive presence of ductwork and associated features.

Keywords: karst, karst geomorphology, Guapiara Plateau, Paranapiacaba Range

4.1. Introdução

Importantes áreas cársticas ocorrem entre as áreas de cabeceiras dos rios Paranapanema e Ribeira de Iguape. Parte desta área situa-se nas unidades de conservação do Parque Estadual Intervales (PEI) e Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (PETAR) que juntamente com outras unidades (Parque Estadual Nascentes do Paranapanema – PENAP, Estação Ecológica Xituê, Parque Estadual Carlos Botelho, além da APA da Serra do Mar), compõem o *continuum* ecológico da Serra de Paranapiacaba, que configura um extenso corredor de áreas de proteção ambiental.

O carste é um tipo de paisagem contendo cavernas e extensos sistemas de água subterrânea desenvolvido em rochas solúveis, como calcário, mármore e gesso (Ford e Williams 2007).

A região compreende corpos carbonáticos do Subgrupo Lajeado (Neoproterozoico), que geomorfologicamente se localizam entre Planalto de Guapiara e a Província Costeira (Ponçano et al. 1981). A área de estudo situa-se dos rios das

Almas, São José de Guapiara (Bacia do Rio Paranapanema) e Pilões (Bacia do Rio Ribeira de Iguape), entre os municípios de Capão Bonito, Guapiara, Iporanga e Ribeirão Grande, no sudeste do Estado de São Paulo (Figura 4.1). Está inserida no contexto da "Província Espeleológica do Vale do Ribeira", caracterizada por apresentar feições cársticas típicas, como cavernas, paredões rochosos, dolinas, sumidouros, depressões poligonais, cones e torres cársticas (Karmann e Sanchez, 1979, 1986).

Os corpos carbonáticos da região estudada apresentam relevos bastante irregulares e estão mais rebaixados em relação às unidades subjacentes, acarretando sistemas cársticos de recarga mista e injeção alóctone (Karmann e Sanchez 1979, 1986, Karmann e Ferrari 2002).

A geologia da região é muito bem conhecida por se tratar de uma área de interesse econômico pela ocorrência de minérios, como calcário, dolomito, chumbo, ouro entre outros. Contudo, o carste neste setor não foi objeto de estudos específicos, e a carência de material relacionada ao tema perfaz dificuldade para o entendimento da situação e evolução do mesmo. Assim, este trabalho visa o reconhecimento e mapeamento das feições cársticas presentes na área em questão, associado às informações espeleológicas levantadas durante trabalhos de campo, visando a caracterização e a evolução do carste neste setor.

Figura 4.1 -Localização da área de estudo em relação às rochas carbonáticas e principais bacias hidrográficas.

4.2 Contexto regional

As rochas carbonáticas onde atualmente se desenvolve o carste estudado pertencem ao Supergrupo Açungui que é composto por unidades litoestratigráficas que refletem ambientes sedimentares e vulcânicos, dispostas em faixas dispostas lateralmente com direção predominante NE (Figura 4.2a).

Os carbonatos estudados pertencem ao Subgrupo Lajeado, depositado em ambiente plataformar de mar aberto composto por uma alternância de rochas clásticas e carbonáticas (Campanha e Sadowski 1999). Esta unidade é subdividida em sete outras, sendo que as de interesse para este estudo são as formações Bairro da Serra (metacalcarenitos e metacalcilutitos impuros calcíticos e dolomíticos), Mina de Furnas (metacalcarenitos e calcilutitos laminados) e Passa Vinte (metacalcarenitos dolomíticos) (Campanha et al. 1987, Campanha 2002).

Figura 4.2 – a: contexto geológico regional simplificado da área de estudo com destaque para as rochas metacarbonáticas (adaptado de Campanha 2002); b: mapa geomorfológico regional mostrando as principais unidades abrangidas pela área de estudo (adaptado de Ponçano et al. 1981).

O contexto geomorfológico que se insere a área deste estudo é a transição do Planalto Atlântico (Planalto de Guapiara) para a Província Costeira (Serra de Paranapiacaba e Serrania do Ribeira), além de uma pequena porção de ocorrência da Depressão Periférica (Depressão do Paranapanema) (Figura 4.2b) (Ponçano et al. 1981).

A Serra de Paranapiacaba está desenvolvida na Unidade Morfoescultural do Baixo Ribeira (Ross e Moroz, 1997), apresentando relevo montanhoso, escarpas retilíneas e perfis íngremes, com baixo grau de dissecação e com desníveis entre 700 e 900 m entre fundos de vales e topos de cristas (Karmann, 1994). As escarpas desta serra são limitadas em sua porção SE pela baixada litorânea na sua base, e a norte e noroeste, pelo Planalto de Guapiara. As escarpas desta serra foram moldadas por reativações tectônicas de grande expressão, controlando também a evolução dos grábens de Sete Barras e Ribeira de Iguape durante o Quaternário, o que explica a baixa dissecação desta unidade (Riccomini e Coimbra 1992, Riccomini et al. 2004).

No estado de São Paulo, o Planalto de Guapiara está limitado pela Depressão Periférica Paulista em sua porção norte, pelo Planalto do Ribeira/Turvo a leste e pela Serra de Paranapiacaba a sudeste (Ross e Moroz 1997), ocupando uma área elevada no alto da Serra de Paranapiacaba. O relevo desta unidade é composto por morros baixos com topos convexos, cujas altitudes variam entre 700 e 1.000 m com declividade mediana (20 a 30%).

As unidades que compõem a área de estudo foram acometidas por intensos processos tectônicos durante o ciclo brasileiro, no estabelecimento do Cinturão Ribeira, caracterizados por metamorfismo regional, incluindo dobramento, magmatismo sintectônico, por volta de 650 a 540 Ma (Almeida 1964, Campanha 2002). Posteriormente a este período de intenso tectonismo, após o qual a região passa a incorporar o supercontinente Gondwana, registra-se um período de relativa estabilidade tectônica, onde houve o início da deposição dos sedimentos da Bacia do Paraná (Formação Furnas, Ponta Grossa e Subgrupo Itararé) (Campanha e Sadowski 1999, Campanha 2002).

Entre o Permiano Superior e o Triássico Médio, a Bacia do Paraná passou por expressivos processos tectônicos e erosivos causando um levantamento generalizado relacionado com a ruptura do Gondwana e a abertura do Oceano Atlântico Sul (Almeida 1980, Riccomini 1995). Este processo de soerguimento da região se deu por conta da instalação do enxame de diques do Arco de Ponta Grossa e do Alinhamento de Guapiara, associado a grandes corpos de rochas ígneas alcalinas. A atividade tectônica mesozoica relacionada ao Arco de Ponta Grossa e seus alinhamentos magmáticos, entre os quais o de Guapiara, ocorreu entre 134 e 130 Ma (Turner et al. 1994, Riccomini 1995). Durante o Cenozóico (do Paleógeno ao Mioceno) a evolução geomorfológica da região é resultado de uma associação de erosão diferencial regressiva da Serra de Paranapiacaba (em direção ao Planalto de Guapiara) e ao controle tectônico da separação dos continentes sul-americano e africano e à evolução da margem continental brasileira, (Almeida 1964, Almeida e Carneiro 1998, Ross 2002).

4.3 Materiais e métodos

A caracterização geomorfológica do carste na área de estudo envolveu trabalhos em gabinete e em campo, onde foram levantadas informações sobre o carste e

cavernas, além de mapas geológicos, geomorfológicos, bases topográficas e interpretação de fotografias aéreas. Os dados levantados em gabinete foram sempre concatenados com os de campo para elucidar a situação atual e real do carste.

Dada a grande extensão da área de estudo, os trabalhos de gabinete envolveram fotointerpretação e processamento de imagens para o reconhecimento de feições cársticas que por vezes não são facilmente reconhecidas em campo, como depressões ou mesmo cones cársticos. A partir da fotointerpretação que delimitou as depressões, foi feita uma comparação da morfometria com curvas de nível geradas pelo software Global Mapper 15®, a partir de dados do SRTM. Além disso, foram analisadas e demarcadas depressões e sumidouros na base topográfica 1:10.000 do ano de 1957 do DAEE. Após uma primeira seleção, foi realizada checagem em campo de todas as depressões para confirmação de sua existência.

Os corpos carbonáticos foram extraídos de Campanha (2002) em escala 1:250.000. Desta forma, existe uma limitação de escala e existem muitos corpos menores não representados. Os trabalhos de campo foram desenvolvidos segundo os métodos usuais, com a localização e descrição das feições cársticas em toda a área abordada. Foram localizadas e mapeadas cavernas, cuja localização e mapa ainda não existiam ou não possuíam boa precisão. A associação dos mapas das cavernas com a topografia de superfície é fundamental e, assim, se buscou uma localização mais acurada das mesmas com o uso de GPS.

Dois parâmetros utilizados para diferenciação do relevo foram o gradiente de rios e a razão fundo-altura de vale (V_f), que utiliza os parâmetros largura do vale (V_{fw}), altitude da margem esquerda (Eld), altitude da margem direita (Erd) e altitude do fundo do vale (Esc), através da Equação $V_f = 2V_{fw}/((Eld-Esc)+(Erd-Esc))$ (Keller e Pinter 1996). Além desses parâmetros, foram elaborados perfis topográficos baseados no SRTM para se obter uma visão geral da posição dos corpos carbonáticos no relevo e perfis dos rios principais.

Após as etapas de campo e pesquisa prévia em bibliografia relacionada, todos os dados coletados foram compilados em uma base completa desenvolvida em ambiente SIG. O produto desta compilação contém informações a respeito da geologia, geomorfologia e localização das principais feições cársticas observadas.

4.4 Caracterização do carste

As feições cársticas da região estudada foram descritas de forma individualizada nos corpos Corpo Oeste; Norte A, B, C e D; e Corpo Central (subdividido em Norte e Sul) (Figura 4.3). Contudo, desde o início dos estudos e em trabalhos anteriores (Sallun Filho et al. 2010) foi observado que há uma grande diferença entre o carste dos dois compartimentos geomorfológicos principais, o Planalto de Guapiara e a Serra de Paranaipiacaba (Figura 4.4). A descrição e interpretação das feições cársticas, portanto, foram agrupadas segundo o contexto destes dois compartimentos, cujas similaridades e diferenças relativas à presença e distribuição destas ficaram mais evidentes através da elaboração de perfis topográficos, perfis longitudinais de rios e análise espacial dos dados levantados.

Figura 4.3 – Localização e denominação dos corpos carbonáticos estudados em cada compartimento geomorfológico.

Figura 4.4 – Fotografias aéreas oblíquas da região. A- O relevo mais suavizado e com menor grau de entalhamento na região do Planalto de Guapiara; B- O relevo mais entalhado na região da Serra de Paranapiacaba, com gradientes mais elevados.

4.4.1 Planalto de Guapiara

Os corpos carbonáticos abrangidos por este estudo estão localizados predominantemente na região do Planalto de Guapiara, região que carece de estudos voltados ao carste. Neste compartimento foram descritos os corpos Oeste (Bacia do Rio São José de Guapiara), Central Norte, Norte A, B, C e D (Bacia do Rio das Almas) (Figura 4.5).

Figura 4.5 – Localização e distribuição das feições cársticas reconhecidas e analisadas no compartimento do Planalto de Guapiara.

Corpos Norte A, B, C e D

Os corpos Norte A, B, C e D apresentam dimensões menores em relação aos outros corpos descritos e estão dispostos paralelamente entre si, segundo a direção NE-SW. O Corpo A apresenta a maior área deste setor, com 5,9 km², comprimento de 8,7 km e largura de 1,7 km. As altitudes variam entre 703,2 e 952,3 m acima do nível do mar, com média em 832,5 m e com declividade média de 15,8° (Tabela 4.1). Neste corpo ocorrem poucos afloramentos *in situ* de rochas carbonáticas e nenhuma feição cárstica expressiva, a não ser pela presença de poucas canceluras de dissolução de dimensões centimétricas isoladas nestas exposições. A composição dos carbonatos varia entre dolomítico e calcítico, com composição média de CaO<42%; MgO<1% (Gonzalez et al. 1972), enquanto que para Chilingar (1957) os carbonatos deste setor são classificados como calcário levemente dolomítico. Analisando a razão média de CaO/MgO dos carbonatos do Corpo A, esta confere 64,1 de teor, o que justifica sua exploração do calcário como cimento.

O Corpo B apresenta área de 2,8 km², comprimento de 6,9 km e largura de 0,7 km. As altitudes variam entre 659,7 a 863,8 m, com média em 751,2 m, com declividade média de 15,8° (Tabela 4.1). Assim com no Corpo B foram observados poucos afloramentos de rochas carbonáticas e nenhuma feição de carstificação. A geoquímica deste corpo é desconhecida, uma vez que este não foi abrangido por Gonzalez et al. (1972).

O Corpo C possui área de 1,1 km², comprimento de 2,6 km, largura de 0,5 km, altitudes entre 637,7 a 881,4 m, com média em 756,4 m e com declividade média de 19,8° (Tabela 4.1). Apesar de ser o mais discreto em dimensões deste setor apresenta feições cársticas com desenvolvimento de um epicarste e destaque para a presença de uma mineração de metacalcário em atividade. Neste empreendimento foi observado que o pacote de rocha carbonática é bastante espesso (mais de 100 m) e está deformado em uma sinclinal. Foram observadas neste corpo fendas de dissolução e lapiás. Durante a pesquisa bibliográfica foi encontrado o registro em mapa da Gruta do Sumidouro (SP-132), com mais de 510 m de desenvolvimento linear e 12 m de desnível, contudo esta já não existe mais, pois foi suprimida para exploração do metacalcário. A geoquímica deste corpo é desconhecida, uma vez que esta não foi abrangida por Gonzalez et al. (1972).

O Corpo D, que se localiza na porção leste deste setor, apresenta área de 5,8 km², comprimento de 11,8 km e largura de 11,8 km; altitudes entre 718,1 a 973,8 m, com média em 801,8 m, e declividade média de 18,9° (Tabela 4.1). Deste setor é o corpo que mais apresenta feições cársticas, em relação às outras. Foram observados afloramentos contínuos *in situ*, dolinas de pequenas dimensões (até 4 m de diâmetro), sumidouros e ressurgências ativos (Gruta da Passagem – SP-451, Gruta do Assentamento – SP-724 e Gruta do Cheirol – SP-464), nascentes além de 11 cavernas, das quais três delas descobertas durante os trabalhos de campo, conferindo uma densidade de 1,88 caverna/km². Estas cavernas apresentam desenvolvimento linear máximo de 150 m (Gruta do Cheirol – SP-464) e mínimo de 8 m (Toca do Felício e Fenda do Córrego, ambas sem cadastro), com média em 68,50 m. O desnível máximo das cavernas deste corpo é de 9 m (Gruta do Jairo – SP-723) e o mínimo é de 0,50 m (Toca do Felício), com média em 4,75 m. Para Gonzalez et al. (1972), as características geoquímicas refletem uma rocha com teor levemente mais magnesiano (composição dolomítica, CaO<19%; MgO<22%) com a razão média de CaO/MgO em 24,25. Chilingar (1957) classifica este corpo como calcário dolomítico.

Os corpos A, B, C e D são topograficamente mais rebaixados em relação às rochas adjacentes, como observado através dos perfis A-A' e B-B' da Figura 4.6. Além disso, nota-se que Rio das Almas, importante curso regional, nota-se através destes perfis topográficos, que este rio chega a entalhar bem o relevo interceptando os corpos D e B sem que o mesmo seja infiltrado no sistema cárstico, somente desenvolvendo um vale fluvial típico.

A Bacia do Rio das Almas neste setor apresenta padrão de drenagem dendrítico, com densidade média, sem vales de entalhamento expressivos, cujos rios apresentam perfis longitudinais típicos de regiões com relevos suaves, podendo apresentar trechos meandantes e com gradientes hidráulicos baixos, como é o caso do Rio das Almas (GH: 0,0046) (Figura 4.7). A Bacia do Rio das Almas apresenta vales fluviais amplos, que superam a ordem de 2 km e amplitudes que variam entre 239 e 92 m (Tabela 4.2).

Figura 4.6 – Perfis topográficos com localização dos corpos carbonáticos no contexto geomorfológico no divisor entre o Planalto de Guapiara e a Serra de Paranapiacaba. Nos perfis: (1) Rio das Almas; (2) Ribeirão das Bateias; (3) Rio Pinheiro dos Nunes; (4) Rio São José de Guapiara e (5) Rio Bocaina-Lageado.

Figura 4.7 – Perfis longitudinais dos principais rios abrangidos pelos carbonatos estudados.

Corpo Oeste

O Corpo Oeste está inserido integralmente na Bacia do Rio São José de Guapiara, que apresenta escoamento para norte, no Rio Paranapanema. Este corpo

está localizado na porção oeste da área de estudo, conferindo uma área de 14,8 km², com comprimento médio de 10,8 km e largura média de 4,1 km. As altitudes variam entre 730,6 e 985,5 m, com declividade média de 16,7° (Tabela 4.1). Foram observadas feições cársticas em menor densidade se comparados os tamanhos da área deste setor com o setor dos Corpos do Norte. Também foram descritas três depressões poligonais (leste, centro e norte) de grandes dimensões, todas com mais de 250 m de amplitude e duas cavernas. A depressão do leste abriga o sumidouro da Gruta dos Pianos (SP-322), com mais de 770 m de amplitude. A depressão do centro apresenta mais de 370 m de amplitude com aproximadamente 32 m de profundidade, e durante o levantamento de campo foi constatado que não havia água no fundo ou sumidouro. A depressão do norte é a menor (320 m no eixo maior) com aproximadamente 16 m de profundidade e assim como a anterior, sem acúmulo de água no fundo ou presença de sumidouro. Além destas feições foram observadas boas exposições de rochas carbonáticas em pedreiras já desativadas e em atividades, onde se constatou que estas ocorrem com pouca ou nenhuma feição de dissolução. Nas minerações observou-se que o corpo carbonático é espessa (ultrapassando os 100 m), bastante fraturado e deformado, com mergulhos fortes e por vezes é possível distinguir a forma da sinclinal.

Os trabalhos de campo revelaram a presença de duas cavidades neste corpo, sendo a Gruta dos Pianos – SP-322 e a Gruta Sabará (sem cadastro). A Gruta dos Pianos foi mapeada pelos autores, e apresenta desenvolvimento linear de 192 m e desnível de 62 m sendo uma das maiores cavernas de toda a região. Maiores detalhes desta caverna serão discutidos mais a frente. A geoquímica deste corpo revelou uma composição mais calcítica que dolomítica (CaO>42%; MgO<4%), com a razão média de CaO/MgO em 103,89 (Gonzalez et al. 1972), conduzido para Chilingar (1957) este corpo recebe a classificação de calcário levemente dolomítico (Tabela 4.1).

O relevo no Corpo Oeste de maneira geral se apresenta mais suave em relação aos corpos do Norte, com menores amplitudes (Figura 4.6). O Rio São José de Guapiara que, entre os rios principais das bacias analisadas é o que apresenta o menor gradiente hidráulico (GH: 0,0042) não chega a interceptar este corpo carbonático (Figura 4.7). Contudo, o Rio Pinheiro dos Nunes, afluente do Rio São José de Guapiara pela margem direita, intercepta o Corpo Central Norte (onde ele nasce) e o Corpo Oeste, também sem infiltrar no sistema cárstico. Este rio assim como o São

José de Guapiara apresentam vales fluviais amplos, que superam a ordem de 1.000 m (Tabela 4.2).

Corpo Central Norte

O Corpo Central é contínuo entre os dois compartimentos analisados, portanto ele foi subdividido em Norte (região do planalto) e Sul (região da serra). Este corpo está inserido nas bacias dos rios das Almas e São José de Guapiara. As drenagens da porção Norte tem seu escoamento preferencialmente para a direção norte desaguardando no Rio Paranapanema, tendo os rios das Almas e São José de Guapiara como principais rios.

Este corpo apresenta área de 24,6km², comprimento máximo de 7,2 km e 5,7 km de largura máxima, com altitudes variando entre 817,8 e 1.018,6 m e declividade média de 14,6° (Tabela 4.1). As feições cársticas neste setor já ocorrem com maior frequência em relação aos outros já descritos, compreendendo sumidouros, dolinas e cavernas, além de afloramentos de rochas carbonáticas com feições de dissolução (caneluras e fendas de dissolução, além de blocos lapiesados). Foram encontradas 3 depressões de pequeno porte e duas destas com acúmulo de água no fundo. Ao todo foram descritas 24 cavernas cujas dimensões podem ser consideradas expressivas para toda a área de estudo. Essas cavernas apresentam desenvolvimento linear máximo de 100 m (Gruta Abismo da Chuva – SP-234) e mínimo de 12m (Gruta da Serrinha – SP-721), com média em 55,2 m e desnível máximo de 25 m (Gruta Abismo da Chuva – SP-234) e mínimo de 2 m (Toca Kifexo – SP-255), com média em 7,1. A geoquímica deste corpo reflete composições predominantemente calcíticas (composição média CaO>=42%; MgO<=4%), com a razão média de CaO/MgO em 18,77 (Gonzalez et al., 1972), enquanto que para Chilingar (1957) este corpo recebe a classificação de calcário dolomítico (Tabela 4.1).

O Corpo Central apresenta uma topografia elevada, mas mais suave e com declividade menor em relação aos outros corpos carbonáticos (perfis C-C' e D-D', Figura 4.6). Os principais cursos d'água deste corpo, como os rios Bateias e Pinheiro dos Nunes, que apesar de pertencerem à bacias diferentes apresentam gradientes hidráulicos muito parecidos (0,0136 e 0,0135, respectivamente), denotando rios com perfis longitudinais suaves, típicos de regiões planas (Figura 4.7). O Rio Bateia apresenta vales fluviais amplos, porém menores que o Rio das Almas, enquanto que o

Rio Pinheiro dos Nunes chega a ter vales fluviais mais amplos que o Rio São José de Guapiara (Tabela 4.2).

4.4.2 Serra de Paranapiacaba

As feições cársticas descritas no compartimento da Serra de Paranapiacaba ocorrem com maior densidade e quantidade em relação ao Planalto de Guapiara. O Corpo Central Sul, localizado integralmente na bacia do Rio Pilões, apresenta drenagens com escoamento preferencialmente para sul, em direção ao Rio Ribeira de Iguape (Figura 4.8).

Figura 4.8 – Localização das feições cársticas descritas no Corpo Central Sul. A densidade e quantidade de feições descritas neste setor é maior em relação ao Planalto de Guapiara.

O relevo deste setor é mais acidentado com altitudes variando entre 678,2 e 1.108,5 m, com média em 892m e declividade média 18,7° e dimensões de 10,21 km², comprimento de 2,9 km e 4,7 km de largura (Tabela 4.1). Nesta porção foram descritas muitas feições cársticas como dolinas, sumidouros, ressurgências, nascentes,

depressões, feições de dissolução, além de cavernas e depósitos de tufa calcárea. As cavernas neste setor são as mais expressivas em termos de quantidade e dimensões em toda a área estudada. Foram identificadas 40 cavernas, sendo que destas seis foram descobertas durante a execução dos trabalhos de campo. As cavernas apresentam desenvolvimento máximo de 3.808 m (Gruta dos Paiva – SP-042) e mínimo de 5 m (Gruta da Cabeça de Bagre, sem cadastro), com média 342 m, e desnível máximo de 51 m (Gruta dos Paiva) e mínimo de 1 metro (Gruta de Cabeça de Bagre), com média em 12,82 m. Segundo Gonzalez et al. (1972), a geoquímica desta porção sul reflete composição calcítica para a maior parte da área amostrada, sendo que a razão média de CaO/MgO é de 46,39, enquanto que para Chilingar (1957), a composição é dolomítica (Tabela 4.1).

A diferença da topografia da região da serra quando comparada com o Planalto de Guapiara fica clara quando se observa o perfil E-E' (Figura 4.6). Nota-se que o divisor de água entre estes dois compartimentos é a região mais elevada e que a região da serra é mais íngreme e escarpada. Esta característica é evidenciada pelos perfis longitudinais dos rios Pilões e seu afluentes, o Rio Bocaina-Lageado (formador do Rio Pilões) e o Córrego da Campina (margem esquerda), cujos gradientes hidráulicos são elevados (Figura 4.7).

Trata-se de uma bacia onde os vales são amplos porém mais encaixados, cujas margens podem ultrapassar os 900 m de altitude (Tabela 4.2).

Na região das cabeceiras desta bacia, na área de estudo, destaca-se o Rio Bocaina-Lajeado, que representa um dos principais agentes de desenvolvimento das cavidades mais expressivas da área de estudo que são as grutas do Sistema Fendão-Fendãozinho, Sistema Bocão-Paiva e finalmente a Gruta da Água Luminosa e Arcão. Contudo, este rio não adentra ao sistema cárstico em profundidade, agindo como agente de recarga de pouca expressão no aquífero (Figura 4.9).

Tabela 4.1 – Características geomorfológicas do carste e das cavernas em cada corpo carbonático estudado. Abrangência dos dados a partir do divisor Serra/Planalto a norte 10 km e a sul 4 km

Parâmetros		Planalto					Serra	
		A	B	C	D	Oeste	Norte	Sul
Geoquímica								
Razão média de CaO/MgO*		64,1	-	-	24,3	103,9	18,8	46,4
Tipo de calcário**		CLD**	-	-	CD**	CLD**	CD**	CD**
Teor médio de sílica (%)*		4,8	-	-	0,3	0,0	2,3	3,5
Geomorfologia								
Altitude*** (m)	máxima	952,3	863,8	881,4	973,8	985,5	1018,6	1108,5
	mínima	703,2	659,7	637,7	718,1	730,6	817,8	678,2
	média	832,5	751,2	756,4	801,8	841,3	888,2	892
Amplitude*** (m)	média	249,1	204,1	243,7	255,7	254,9	200,8	430,3
	máxima	44,5	43,6	64,8	43,9	54,1	47,8	58,2
Declividade*** (graus)	média	15,8	15,8	19,8	18,9	16,7	14,6	18,7
	máxima	44,5	43,6	64,8	43,9	54,1	47,8	58,2
Área da lente de calcário**** (km ²)		5,9	2,8	1,1	5,8	14,8	24,6	10,2
Comprimento da lente de calcário**** (km)		8,7	6,9	2,6	11,8	10,8	7,2	2,9
Largura da lente de calcário (km)****		1,7	0,7	0,5	1,2	4,1	5,7	4,7
Feições								
Nº de dolinas		0,0	0,0	1,0	4,0	8,0	6,0	5,0
Densidade de dolinas (nº/km ²)		0,0	0,0	1,0	0,7	0,5	0,2	0,5
Nº de sumidouros		0,0	0,0	0,0	3,0	2,0	1,0	4,0
Densidade de sumidouros (nº/km ²)		0,0	0,0	0,0	0,5	0,1	0,0	0,4
Nº de depressões poligonais		0,0	0,0	0,0	3,0	2,0	1,0	4,0
Densidade de dep. poligonais (nº/km ²)		0,0	0,0	0,0	0,5	0,1	0,0	0,4
Cavernas								
Nº de cavernas		0,0	0,0	1,0	11,0	2,0	24,0	40,0
Densidade de cavernas (nº/km ²)		0,0	0,0	1,0	1,9	0,1	1,0	3,9
Desenvolvimento (m)	máximo	0,0	0,0	510,0	150,0	192,0	100,0	3808,0
	mínimo	0,0	0,0	510,0	8,0	192,0	12,0	5,0
	médio	0,0	0,0	510,0	68,5	192,0	55,3	342,9
Desnível (m)	máximo	0,0	0,0	12,0	9,0	62,0	25,0	51,0
	mínimo	0,0	0,0	12,0	0,5	62,0	2,0	1,0
	médio	0,0	0,0	12,0	4,8	62,0	7,1	12,8

*Gonzalez et al. (1972); **** CLD: calcário levemente dolomítico, CD: calcário dolomítico (Chilingar, 1957); *** baseada em SRTM; **** Campanha (2002).

Tabela 4.2 – Valores de razão fundo-altura de vale fundo de vale (Vf), altitude e amplitude e litologia principal, em seções aleatórias selecionadas nos rios São José de Guapiara, das Almas e Pilões, e afluentes.

Rio	Vfw	Eld	Erd	Esc	Vf	Altitude máxima	Altitude mínima	Amplitude máxima	Amplitude mínima	Litologia
Rio São José de Guapiara										
SJG	1130	1035	974	916	13	1035	974	119	58	Outra
	1518	870	925	771	12	925	870	154	99	Outra
	2169	700	755	693	63	755	700	62	7	Outra
	1049	700	712	666	26	712	700	46	34	Outra
PN	2996	910	907	799	27	910	907	111	108	Carbonato
	1111	874	826	766	13	874	826	108	60	Outra
Rio das Almas										
AL	1002	935	886	764	7	935	886	171	122	Outra
	2518	854	815	723	23	854	815	131	92	Carbonato
	2697	813	915	676	14	915	813	239	137	Misto
	2630	705	735	642	34	735	705	93	63	Outra
BT	671	900	910	834	9	910	900	76	66	Carbonato
	1468	868	865	753	13	868	865	115	112	Outra
Rio dos Pilões										
PI	2866	855	795	440	7	855	795	415	355	Outra
	2594	645	656	226	6	656	645	430	419	Outra
	3236	427	478	125	10	478	427	353	302	Outra
BC	3075	978	1070	823	15	1070	978	247	155	Misto
CP	1661	857	875	822	38	875	857	53	35	Carbonato
	2010	624	628	412	9	628	624	216	212	Carbonato

Vf: razão fundo-altura de vale; Vfw: largura do vale; Eld: altitude da margem esquerda; Erd: altitude da margem direita; Esc: altitude do fundo do vale. SJG: Rio São José de Guapiara; PN: Rio Pinheiro Nunes; AL: Rio das Almas; BT: Rio Bateias; PI: Rio Pilões; BC: Rio Bocaina; CP: Rio Córrego da Campina. Todos os valores em metros (m).

Figura 4.9 – Perfil longitudinal de detalhe do Rio Bocaina- Lageado. Este rio recebe o nome de Bocaina na serra homônima, assumindo trechos em superfície e subterrâneos, interceptando sistemas de cavernas, até a ressurgência na Gruta dos Paiva, onde a partir de então recebe o nome de Rio Lageado.

4.5 Considerações finais

Os processos tectônicos mesozoicos que acometeram a região entre o Permiano Superior e o Triássico Médio, que resultaram na abertura do Oceano Atlântico Sul e soerguimento da Serra do Mar, ajudaram a definir a compartimentação geomorfológica no Planalto de Guapiara e na Serra de Paranapiacaba (Almeida, 1980, Riccomini, 1995, Hiruma 2010, Cherem 2012). Os dados e observações coletados durante os trabalhos de campo apontam para uma clara diferença das feições geomorfológicas e cársticas entre estes dois compartimentos.

Na região do Planalto de Guapiara o relevo é mais suave em relação aos domínios da Serra de Paranapiacaba, onde se observa uma topografia mais acidentada (Figura 4.6). Esta característica do relevo também é refletida na análise dos perfis longitudinais dos rios da região (Figura 4.7). Os rios das Almas e São José de Guapiara e seus respectivos afluentes, que se caracterizam como sendo de planalto, apresentam uma declividade praticamente bem suave próxima às suas cabeceiras, que aumenta sutil e gradativamente até chegar próximo à foz onde se torna suave novamente (Tabela 4.2). Para o Rio dos Pilões e seus afluentes, nota-se que a declividade tem seus valores praticamente dobrados em relação aos rios do Planalto de Guapiara, situação que reflete o relevo escarpado da Serra de Paranapiacaba (Tabela 4.2).

O Corpo Oeste, apesar de ser o segundo maior em área, é o que apresenta a menor densidade e ocorrência de feições cársticas entre os estudados (Tabela 4.1). Neste corpo o regime fluvial típico é predominante, e a topografia mais suavizada e a química levemente dolomítica dos carbonatos, associados aos baixos gradientes hidráulicos não permitiram o pleno desenvolvimento de uma rede cárstica. Contudo, foram descritas depressões poligonais reconhecidas através de imagens de satélite e confirmadas em campo, e foi realizado o levantamento topográfico da Gruta dos Planos, que configurou a maior caverna do compartimento do planalto, com 192 m de desenvolvimento. A posição geográfica deste corpo, associada ao processo de denudação das rochas que superpõem os carbonatos pode indicar que se trata de um carste mais jovem, cujas feições ainda estão em desenvolvimento.

Os corpos do norte são os mais delgados e os menores em área e apresentam poucas feições cársticas expressivas, à exceção do Corpo D, cuja densidade de feições reconhecidas é a maior entre todos os corpos estudados, além de ser o único

deste setor onde foram reconhecidas 11 cavernas (Tabela 4.1). No Corpo C existe uma mineração e o corpo carbonático pode ser analisado em profundidade, contudo nenhuma feição cárstica foi observada. A Gruta do Sumidouro, que foi destruída pelo avanço desta mineração constituía a maior caverna da região, com mais de 510 m de desenvolvimento, se localizava no Corpo C. Assim como no Corpo Oeste, predomina nos corpos do Norte um regime predominantemente fluvial e, o relevo típico de planalto, associado ao baixo gradiente hidráulico dos rios, e à pouca área de exposição dos carbonatos não permitiu o pleno desenvolvimento do carste.

O Corpo Central é o maior entre os estudados, sendo contínuo na região do Planalto e da Serra o que permitiu a comparação da ocorrência das feições em ambos os compartimentos, o que justifica a sua subdivisão em Corpo Norte e Sul. O Corpo Central Norte, o maior em área entre os corpos analisados, registra poucas feições cársticas em relação ao Corpo Central Sul (Tabela 4.1). As drenagens neste setor são superficiais, predominando um regime fluvial, enquanto que ao sul, existem rios que possuem trechos subterrâneos e superficiais, como é o caso do Rio Bocaina-Lageado (Figura 4.9).

O Corpo Central Sul, apesar das poucas dimensões em relação ao norte é o que apresentou maiores densidades de feições cársticas (Tabela 4.1). O relevo mais acidentado (situação de escarpa), associado aos rios com maiores gradientes hidráulicos, à química dos carbonatos, e o maior tempo de exposição das rochas carbonáticas permitiram o desenvolvimento de feições cársticas mais expressivas em relação aos corpos ao norte do divisor.

De todo o exposto fica claro que a posição geomorfológica do carste, sua geoquímica e dimensões dos corpos carbonáticos influenciam diretamente no seu desenvolvimento. Os corpos posicionados ao norte do divisor de água e mais distantes deste, apresentam um carste pouco desenvolvido, dado o baixo gradiente hidráulico, geoquímica mais dolomítica e pouca área de exposição, o que dificulta a ação da água na dissolução destas rochas e formação de um sistema cárstico mais expressivo.

A dissecação do relevo da porção sul da área estudada que compreende o início das escarpas da Serra de Paranapiacaba associada aos corpos de carbonatos mais puros favorecem o desenvolvimento de um carste mais expressivo, como é o caso do PETAR, localizado a sul da área de estudo, onde as cavernas apresentam dimensões e desníveis muito maiores que na região deste estudo.

4.6 Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPESP pelo suporte através de Auxílio à Pesquisa (proc. 12/05632-2) e bolsa (proc. 12/01424-6). Ao Grupo Pierre Martin de Espeleologia (GPME) pela contribuição no mapeamento e topografia das cavernas, além da disponibilização de mapas espeleológicos já existentes. A Fundação Florestal e à administração e monitores ambientais do Parque Estadual Intervales, pela autorização da pesquisa e constante apoio em campo.

4.7 Referências bibliográficas

- ALMEIDA, F. F. M. de - Os Fundamentos Geológicos do Relevo Paulista. Rio de Janeiro, DNPM/DGM, *Boletim* 41, 1964.
- ALMEIDA F.F.M de. Tectônica da Bacia do Paraná no Brasil. São Paulo. *Inst. Pesq. Tecnol. Est. S. Paulo (IPT)*. (Rel. 14.091). 187 p, 1980.
- ALMEIDA F.F.M. de; CARNEIRO, C.D.R. Botucatu: o grande deserto brasileiro. *Ciência Hoje*, v. 24, n. 143, p. 36-43, 1998
- AULER, A.; RUBBIOLI, E.; BRANDI, R. 2001. *As grandes cavernas do Brasil. Grupo Bambuí de Pesquisas Espeleológicas*. Belo Horizonte. 228p.
- CAMPANHA, G. A. da C *O papel do sistema de zonas de cisalhamento transcorrentes na configuração da porção meridional da Faixa Ribeira*. 2002. 105 f. Tese (Livre-Docência) - Instituto de Geociências Universidade de São Paulo. São Paulo. 2002.
- CAMPANHA, G. A. da C.; BISTRICHI, C.A.; ALMEIDA, M.A. de. Considerações sobre a organização litoestratigráfica e evolução tectônica da faixa de dobramentos Apiaí. In: SIMPÓSIO SUL-BRASILEIRO de GEOLOGIA, 3, Curitiba, 1987. *Atas*. Curitiba, SBG, v. 2, p. 725-742.
- CAMPANHA, G. A. da C.; SADOWSKI, G. R. Tectonics of the Southern Portion of the Ribeira Belt (Apiaí Domain). *Precambrian Research*, v.98, p.31-51, 1999.

- CHEREM, L.F.S.; VARAJÃO, C.A.C.; BRAUCHER, R.; BOURLÉS, D.; SALGADO, A.A.R.; VARAJÃO, A.C. Long-term evolution of denudational escarpments in southeastern Brazil. *Geomorphology*, v. 173-4, p. 18-27, 2012.
- CHILINGAR, G. Classification of limestones and dolomites on basis of Ca/Mg ratio. *Journal of Sedimentary Research*, n.27, p.187-189, 1957.
- CPRM - CIA. DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. 2006. *Geologia e Recursos Minerais do Estado de São Paulo: Sistemas de Informações Geográficas (SIG)*. Programa Geologia do Brasil: Integração, Atualização e Difusão de Dados da Geologia do Brasil, Mapas Geológicos Estaduais escala 1:750000. MME, Brasília, CD-ROM.
- FORD D.C.; WILLIAMS P.W. - *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. Chichester. Wiley. 2007. 561 p.
- GONZALEZ, L.A.; CAVALCANTE, J.; PAIVA, I.; FRANCISCONI, Ó.; PINTO, G.G.; DRUMOND, J.B.V. *Projeto Calcário para Cimento*. São Paulo: DNPM/CPRM, v. 1 e 2, 151 p., 1972.
- HIRUMA, S.T. Denudation history of the Bocaina Plateau, Serra do Mar, shoutheastern Brazil: relationships to Gondwana breakup and passive margin development. *Gondwana Research*, v. 18, p. 674-87, 2010.
- IPT-INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS- *Mapa Geológico do Estado de São Paulo* escala 1:500.000 – São Paulo, 1981.
- KARMANN, I. *Evolução e dinâmica atual do sistema cárstico do alto Vale do Rio Ribeira de Iguape, sudeste do estado de São Paulo*. 1994. 241 f. Tese (Doutorado). Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo.
- KARMANN, I.; SANCHEZ, L.E. Distribuição das rochas carbonáticas e províncias espeleológicas do Brasil. *Espeleo-Tema*, p. 105-167, 1979.
- KARMANN, I.; SANCHEZ, L.E. Speleological Provinces in Brazil. IX *Congreso Internacional de Espeleologia*, Barcelona, v. 1, p. 151-153, 1986.
- KARMANN, I. & FERRARI, J.A. Carste e cavernas do Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (PETAR), SP. In: SCHOBENHAUS, C.; CAMPOS, D.A.; QUEIROZ, E.T.;

- WINGE, M.; BERBERT-BORN, M.L.C. *Sítios geológicos e paleontológicos do Brasil* (eds.) p. 401-413. 2002
- KELLER, E.A.; PINTER, N. *Active tectonics – Earthquakes, Uplift, and Landscape*. New Jersey, USA, Prentice Hall. 338 p., 1996.
- MARINI, O.J.; TREIN, E.; FUCK, R.A. O Grupo Açungui no estado do Paraná. In: BIGARELLA, J.J.; SALAMUNI, R.; PINTO, V.M. Geologia do Pré-Devoniano e Intrusivas Subseqüentes da porção oriental do estado do Paraná. *Boletim Paranaense de Geociências*, v. 23, n. 25, p. 43-104, 1967
- PONÇANO, W.L.; CARNEIRO, C.D.R.; BISTRICHI, C.A.; ALMEIDA, F.F.M.; PRANDINI, F.L. *Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo*. 1981. São Paulo, IPT, v. 1, n. 1183.
- RICCOMINI, C.; COIMBRA, A.M. Geologia da bacia sedimentar. In: NEGRO JR, A.; FERREIRA, A.A.; ALONSO, U.R.; LUZ, P.A.C., eds., *Fotos da Cidade de São Paulo*. São Paulo, p. 37-94, 1992.
- RICCOMINI C.; SANT'ANNA L.G.; FERRARI A.L. 2004. Evolução geológica do rift continental do Sudeste do Brasil. In: MANTESSO-NETO V.; BARTORELLI A.; CARNEIRO C.D.R.; BRITO-NEVES B.B. ORGS. 2004. *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo: Ed. Beca. p. 383-405.
- ROSS, J. L. S. *A morfogênese da bacia do Ribeira do Iguape e os sistemas ambientais*. Espaço e Tempo. 2002. São Paulo. n. 12. 16p.
- ROSS, J. L. S.; MOROZ, I. C. - *Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo*. FFLCH-USP-IPT-FAPESP. São Paulo. 1997. Escala 1:500.000.
- SALLUN FILHO, W.; FERRARI, J. A.; HIRUMA, S. T.; SALLUN, A. E. M.; KARMANN, I. O carste no plano de manejo do Parque Estadual Intervales e zona de amortecimento, Estado de São Paulo, Brasil. *REM. Revista Escola de Minas*, v. 63, p. 441-448, 2010.

- TURNER, S.; REGELOUS, M.; KELLEY, S.; HAWKESWORTH, C.; MANTOVANI, M.
Magmatism and continental break-up in the South Atlantic: high precision
 ^{40}Ar - ^{39}Ar geochronology. *Earth Planet. Sc. Lett.*, v. 121, p 333-348, 1994.
- WILLIAMS, P.W. The role of the epikarst in karst and cave hydrogeology: a review.
International Journal of Speleology. Bologna (Italy), v. 37, n. 1. p.1-10, 2008.

5. VULNERABILIDADE CÁRSTICA

O conceito de *vulnerabilidade* foi introduzido por Margat (1968) e é baseado na premissa de que o ambiente em si fornece alguma proteção natural contra impactos naturais e antrópicos (Vrba e Zaporocec 1994). Este conceito é espacial e comparativo, onde determinadas áreas podem ser mais vulneráveis que outras. O objetivo final é o mapa de vulnerabilidade gerado, produto deste tipo de estudo, com a subdivisão de uma região em diversas unidades mostrando os diferentes graus de vulnerabilidade (Vrba e Zaporocec 1994, Goldscheider 2000, Goldscheider 2002).

Porém, apesar dos esforços despendidos para se entender a vulnerabilidade de um determinado local, ainda não existe um consenso sólido deste termo entre os estudiosos do tema (Goldscheider 2002, van Beynen e Townsend 2005). O programa COST Action 65 (1995) apresenta uma revisão de várias definições propostas por diferentes autores, contudo muitas delas são similares, o que não esclarece o conceito completamente. Já a proposta do programa COST Action 620 (2001), associada às observações de Daly et al. (2002) sobre a "vulnerabilidade e mapeamento de risco de aquíferos carbonáticos e sistemas cársticos" sugere que a vulnerabilidade seja diferenciada como intrínseca e específica:

- *Vulnerabilidade intrínseca*: o termo é usado para definir a vulnerabilidade do carste aos possíveis impactos, levando em conta características geológicas, hidrológicas, hidrogeológicas e geomorfológicas.
- *Vulnerabilidade específica*: termo utilizado para definir a qual tipo de ameaça o carste está sujeito (mineração, agricultura, possíveis contaminantes da água subterrânea) e suas relações com os vários aspectos da vulnerabilidade intrínseca de determinada região.

Os métodos de avaliação da vulnerabilidade do carste, muitas vezes são somente quantitativos, limitando uma aproximação da situação real do ambiente cárstico a somente números (Goldscheider 2002, van Beynen e Townsend 2005, van Beynen et al. 2007). Dessa forma, a complexidade do sistema cárstico nem sempre é abrangida em sua totalidade (van Beynen e Townsend 2005). Além disso, a avaliação de somente um fator de risco principal (por exemplo, a vulnerabilidade do aquífero cárstico) pode mascarar outros quesitos, como perda de solo, instabilidade do terreno, destruição de tipos espeleológicos que podem ser frutos da ocupação desordenada da região (van Beynen et al. 2007, van Beynen et al. 2012).

Em complementação aos métodos quantitativos, as avaliações qualitativas dos tipos de impactos podem auxiliar as políticas públicas no ordenamento ocupacional, além de promover um maior entendimento dos riscos e caracterização do sistema cárstico abordado em seu panorama mais realístico (Goldscheider 2002, van Beynen e Townsend 2005).

O método EPIK (Doerfliger e Zwahlen 1998), bastante quantitativo e pouco qualitativo na sua aplicação e descrição dos parâmetros envolvidos, apresenta algumas limitações na avaliação da vulnerabilidade cárstica, como demonstrado por Goldscheider (2002). Além disso, este método foi desenvolvido para vulnerabilidades pontuais, onde o parâmetro injeção de água no sistema (parâmetro I) recebe uma ponderação mais acentuada em relação aos outros quesitos (Doerfliger e Zwahlen 1998, Goldscheider 2002).

Contudo, quando o método EPIK, com algumas adaptações em sua aplicação, respeitando as observações de Goldscheider (2002), é associado ao método KDI (van Beynen e Townsend 2005), que se trata de uma avaliação mais qualitativa, comporta-se de maneira bastante eficiente e adequada para a avaliação da vulnerabilidade do carste da região abordada nesta dissertação. O método KDI se mostrou bastante eficiente para a descrição da situação do carste de algumas regiões dos Estados Unidos, como naquelas onde o método foi aplicado por van Beynen e Townsend (2005), van Beynen et al. (2007) e van Beynen et al. (2012).

Esta associação de métodos, prevista por alguns autores (Vrba e Zaporocec 1994, COST Action 65 (1995), Doerfliger e Zwahlen 1998, COST Action 620 (2001), van Beynen e Townsend 2005, van Beynen et al. 2007, van Beynen et al. 2012) permitiu uma aproximação da caracterização dos possíveis riscos aos quais o carste está sujeito, podendo-se quantificar estes riscos e assim delimitar uma situação real da situação do carste e a mensuração da vulnerabilidade do sistema cárstico da região.

O carste avaliado neste estudo está desenvolvido em rochas carbonáticas que estão dispostas em forma de corpos isolados sem continuidade aparente em superfície ou subsuperfície. Durante os trabalhos de campo estes corpos foram percorridos e descritos, procurando a identificação e descrição de feições cársticas que ali ocorrem e que podem estar sujeitas à impactos de diversas ordens. Os corpos carbonáticos onde não há feições cársticas descritas foram descartados deste estudo. As feições cársticas foram descritas de acordo com os parâmetros estipulados pelo método EPIK e as

situações de risco e avaliação da vulnerabilidade foram balizadas conforme o método KDI.

Com o intuito de se facilitar a análise dos dados coletados em campo, os corpos carbonáticos foram setorizados em Oeste, Central (subdividida em Central Norte e Central Sul) e Leste (subdividida em Leste Norte e Leste Sul), como mostrado na Figura 5.1. As lentes denominadas de A e B na caracterização do carste (Figura 4.3) não foram avaliadas pois foram considerados como não carstificados.

Figura 5.1 – Corpos carbonáticos considerados neste estudo. 1 - Corpo Oeste; 2 - Corpo Central Norte; 3 - Corpo Central Sul; 4 - Corpo Leste Norte; 5 – Corpo Leste Sul.

Esta setorização permitiu a descrição das feições cársticas de forma individualizada nos corpos, criando um panorama comparativo entre os locais abordados, evidenciando as diferenças e similaridades no desenvolvimento do sistema cárstico em cada corpo carbonático considerado.

A determinação da vulnerabilidade do carste da região foi iniciada com a classificação das feições cársticas segundo os parâmetros do método EPIK (Doerfliger e Zwahlen 1998). A classificação dos parâmetros epicarste (E), proteção do solo (P), infiltração de água no sistema (I) e desenvolvimento do sistema cárstico (K) foi adaptada do método original proposto pelos seus autores para a região. Além disso, no método original, a somatória das ponderações dos parâmetros resulta no fator de proteção do carste (F), ou seja, um produto da aplicação do método. Para este estudo

em especial, o fator de proteção (F), não foi considerado como apenas um produto da avaliação, mas como um parâmetro adicional de avaliação da vulnerabilidade do carste.

Esta adaptação foi necessária devido à algumas limitações do método na integralidade de sua aplicação original, lembrando que o EPIK foi desenvolvido para áreas cársticas da Suíça, onde alguns fatores ambientais como sazonalidade e desenvolvimento cárstico diferem em muito da região deste estudo.

5.1 A avaliação da vulnerabilidade pelo método EPIK

A utilização do método EPIK foi iniciada com o reconhecimento dos parâmetros durante os trabalhos de campo e assim adaptados para este estudo. Para cada ponto coletado em campo foi atribuído um valor para cada parâmetro e o mesmo foi ponderado de acordo com as classificações adaptadas e apresentadas anteriormente.

Parâmetro E – Desenvolvimento do epicarste

O parâmetro E (desenvolvimento do epicarste) foi subdividido em 3 categorias, variando entre locais onde foi observada a presença (E Alto) ou ausência (E Baixo) de morfologia cárstica e a categoria intermediária se refere a locais onde se observou o início de algumas feições de dissolução que ocorrem pontualmente ou de maneira esparsa pela área abrangida pelo corpo carbonático (Figura 5.2).

Na avaliação dos corpos carbonáticos da região, o Corpo Oeste apresentou para este parâmetro predomínio da categoria intermediária, onde foram observados afloramentos de rochas carbonáticas com algumas feições dissolução em estágio inicial, em pontos isolados pela área de ocorrência da rocha carbonática.

A porção central do Corpo Oeste recebeu a classificação de mais vulnerável por conta de grandes depressões observadas e visitadas, apresentando mais de 30 m de profundidade e 200 m de diâmetro, porém sem conexão aparente ou visível com o sistema subterrâneo. Ainda neste setor, o estudo contemplou a Gruta dos Planos, cujo sumidouro e ressurgência foram visitados, além da elaboração de nova topografia e mapa desta caverna, que merece especial atenção dada a sua importância regional devido às suas dimensões, além de um dique de diabásio que corta um de seus condutos transversalmente. Um pequeno setor recebeu a classificação de pouco

vulnerável, uma vez que algumas feições de dissolução, incipientes, foram observadas em alguns blocos de rocha carbonática, porém estes nem sempre ocorrem *in situ*.

O Corpo Central, mais expressivo em área em relação às outras, foi a que apresentou setores com maior vulnerabilidade no quesito desenvolvimento do epicarste. Dado a extensão deste corpo, abrangendo tanto o Planalto de Guapiara e a Serra de Paranapiacaba, a divisão em setor Norte e Sul foi necessária, a título de comparação e diferenciação das características de ocorrência das feições cársticas.

O Setor Sul do Corpo Central se destaca, uma vez que ali foram descritas mais de quarenta cavernas, além de feições típicas relacionadas, como dolinas, ressurgências, sumidouros, paredões etc. (Figura 4.8). As feições cársticas neste setor são mais frequentes e ocorrem com maior expressividade em relação aos outros corpos estudados. A geomorfologia deste setor, associado à composição química das rochas carbonáticas, permitem o desenvolvimento de feições cársticas mais facilmente, quando comparados com o setor ao norte do divisor entre a Serra de Paranapiacaba e o Planalto de Guapiara, como mostrado no capítulo anterior. A vulnerabilidade deste setor é classificada como alta, dada a densidade de feições que ocorrem em todo o setor.

Ainda neste setor foram identificadas grandes depressões que são formadas pelo Rio Bocaina-Lageado que representa um dos principais agentes de desenvolvimento das cavernas mais expressivas da área de estudo que são, de montante à jusante, as grutas do Flóido, Sistema Fendão-Fendãozinho, Sistema Bocão-Paiva e finalmente a Gruta da Água Luminosa e Arcão. As áreas de captação de todas estas depressões são consideradas como de vulnerabilidade alta uma vez que influenciam diretamente os sistemas de cavernas citados. Além destas, também área de captação do Córrego da Caçadinha, que é interceptado pela Gruta do Beija-Flor também recebe a classificação da vulnerabilidade como alta.

O Setor Norte do Corpo Central apresenta uma grande área com vulnerabilidade média, uma vez que foram descritas densidades menores de sumidouros, poucas cavernas, mas uma quantia considerável de afloramentos com presença de processos de dissolução e início de carstificação, além de dolinas e algumas cavernas. No setor mais setentrional do Corpo Central Norte, foram encontradas as cavernas Carioca 1 e Carioca 2, onde inicialmente suspeitava-se da existência de uma depressão poligonal

bem expressiva, porém a análise de fotografias aéreas, além de dados de campo e imagens de satélite excluíram esta possibilidade.

Os corpos do setor leste, também foram subdivididos em Norte e Sul, por apresentam características díspares um em relação a outro, uma vez que a porção sul do Setor Leste apresenta regiões com vulnerabilidade média e alta, no quesito desenvolvimento do epicarste, onde foram descritas cavernas (algumas inéditas e não cadastradas), além de dolinas e outras feições típicas. No restante deste setor não foram anotadas características expressivas de desenvolvimento do epicarste, mas sim início de carstificação. No Corpo Norte, do setor leste, existe em funcionamento um empreendimento minerário que explora as rochas carbonáticas para a fabricação de cal e cimento. Além disso, apesar de a bibliografia indicar que havia uma caverna de grandes proporções, a Gruta do Sumidouro, que foi suprimida pelo avanço da mineração, neste corpo não foram observadas outras feições que pudessem comprometer o desenvolvimento desta atividade, ou seja, características que possa impactar negativamente o carste estudado.

Parâmetro P – Cobertura de proteção do solo

O parâmetro de Cobertura de Proteção do Solo (P) avalia se o carste se encontra aflorante ou coberto, ou seja, se está protegido da ação direta de diversos agentes ambientais ou antrópicos que possam causar quaisquer danos ao sistema, bem como a aceleração ou diminuição dos processos de carstificação. Este parâmetro considera a premissa que todo ambiente possui por si só uma proteção natural que pode ser de diferentes naturezas. É válido lembrar que a proteção do solo é um parâmetro dinâmico, sendo que áreas compreendidas por florestas, por exemplo, podem ser devastadas expondo o carste, e áreas onde existe o afloramento direto podem vir a serem cobertas novamente, por reflorestamento (medidas compensatórias, abando de áreas) ou mesmo aterradas para dar lugar a construções de todos os tipos e níveis. Assim este parâmetro deve ser sempre monitorado quando da avaliação da vulnerabilidade do carste.

A avaliação deste parâmetro foi baseada nas adaptações expostas anteriormente, onde as áreas mais vulneráveis são aquelas onde a cobertura de proteção está ausente, ou seja, as rochas estão expostas e sob influência direta de agentes externos, e a vulnerabilidade mais baixa são aqueles setores onde o solo está bem protegido por

vegetação, como árvores de grande porte e presença de uma camada orgânica mais espessa (maior que 1 metro de espessura).

O resultado da vulnerabilidade para este parâmetro está apresentado na Figura 5.3, onde se observa que as áreas em vermelho são as mais vulneráveis, as em amarelo apresentam vulnerabilidade média e em verde a vulnerabilidade é baixa.

No Corpo Oeste predomina a vulnerabilidade intermediária para o parâmetro proteção do solo (P). Esta classificação se justifica, pois em muitos locais a vegetação original deu lugar a pastagens ou locais de agricultura, diminuindo a espessura das camadas que promovem proteção do solo. Além disso, também foi diagnosticada uma zona central onde a proteção é mais espessa compreendida por reflorestamento (silvicultura) e por fragmentos de matas com o solo recoberto por matéria orgânica compreendida por serrapilheira que promove a proteção das rochas carbonáticas, evitando assim que a velocidade dos processos de carstificação sejam acelerados alterando o seu equilíbrio natural. Um ponto positivo para este parâmetro no setor onde a vulnerabilidade foi indicada como baixa é que ali estão localizadas as grandes depressões identificadas pelas técnicas de geoprocessamento e fotointerpretação e também é onde se situa a Gruta dos Planos, que como dito anteriormente representa uma caverna de grande importância regional, dadas as suas dimensões e características. Ou seja, os pontos de maior interesse com relação aos aspectos cársticos apresentam uma proteção de cobertura atual, prevendo a manutenção dos processos cársticos em seu equilíbrio natural.

A avaliação deste parâmetro para o Corpo Oeste também indicou um setor que a vulnerabilidade é máxima, uma vez que este compreende áreas de mineração, onde a proteção do solo foi totalmente retirada expondo as rochas carbonáticas diretamente ao ambiente externo, estando sujeitas a diversos tipos de impactos. Porém nas áreas de mineração visitadas não foram encontradas feições de carstificação em profundidade, o que quer dizer que, apesar de a cobertura estar totalmente removida, e a vulnerabilidade ser classificada como alta, segundo o método EPIK, não há riscos iminentes ao sistema cárstico atual.

No Corpo Central observa-se que as rochas carbonáticas e por consequência o carste, encontra-se com grau de proteção desejável, com presença ou de solo ou vegetação em estado avançado, uma vez que nas áreas em verde estão inseridas em áreas de conservação ambiental, garantindo ao carste a proteção do solo. As porções

em amarelo, ou seja, vulnerabilidade média, são representadas pela presença de agricultura ou mesmo silvicultura, onde houve a retirada da vegetação original, porém a mesma foi substituída por outro tipo de cobertura, o que, para este quesito, segundo o método EPIK, diminui a vulnerabilidade do carste já que ele não está exposto.

Os corpos carbonáticos do setor Leste também foram subdivididos em Norte e Sul para efeito comparativo da ocorrência e situação do carste daquela região. O corpo Leste Norte apresenta uma grande área onde a vulnerabilidade é dada como alta, devido à presença de um empreendimento minerário que retirou totalmente a cobertura de proteção do solo para exploração da rocha para cimento e cal. Durante os trabalhos de campo foi constatado que apesar de as rochas carbonáticas estarem expostas, não foram registradas feições cársticas que possam comprometer a integridade do sistema cárstico propriamente dito. Não foram assinaladas feições de injeção de água, dolinas com conexão com o meio subterrâneo ou cavernas de grande expressão regional. Assim, como no Corpo Oeste, este setor, apesar de estar exposto, sem cobertura de proteção do solo, apresentando vulnerabilidade alta, o carste não corre risco iminente de ser impactado, a não ser pela destruição das rochas carbonáticas.

Em contrapartida, o Corpo Leste Sul, apresenta-se menos vulnerável dada a presença de cobertura do solo, que não expõe o sistema cárstico diretamente ao ambiente, aumentando as chances de contaminação ou degradação proveniente de várias fontes em potenciais (contaminação por agrotóxicos, mineração, ocupação desordenada etc.).

Parâmetro I – Infiltração de água no sistema cárstico

O parâmetro Infiltração de água no sistema cárstico (I) é um dos mais importantes, na aplicação do método EPIK, e o que apresenta o maior grau de atenção quando da avaliação da vulnerabilidade do carste, já que este quesito lida com a entrada de água no sistema. As águas que são injetadas no sistema cárstico estão sujeitas a conter quaisquer tipos de contaminantes, e afetando rapidamente o aquífero cárstico, uma vez que a velocidade de dispersão no meio é muito rápida, pois se trata de um aquífero de condutos (Ford e Williams 2007). Para este parâmetro outro fator importante de análise é a proteção não só dos pontos de injeção, mas também de toda a área de captação de água (Doerfliger e Zwahlen 1998).

Na área estudada as áreas mais vulneráveis segundo o parâmetro de infiltração foram aquelas em que foram observados sumidouros e suas respectivas bacias de captação entendendo que as mesmas configuram setores de proteção. Estas áreas foram identificadas em todos os corpos abordados, sendo que os mais expressivas foram no Corpo Central Sul dado a densidade de sumidouros ali presentes (Figura 5.4). Contudo, mesmo no setor sul com alta vulnerabilidade a água apesar de ser captada por sumidouros, não chega a ser absorvida completamente pelo sistema, havendo trechos subterrâneos e em superfície.

Neste setor foram identificados sumidouros expressivos como o da Gruta do Flóido e o da Gruta do Bocão, ambos fazendo parte de um sistema maior e mais complexo, representado pelos rios Lajeado e Bocaina. O Rio Bocaina chega a ser interceptado por sumidouro (Gruta do Flóido), mas em seguida ele já ressurge, sem penetrar no sistema. Logo em seguida este rio se associa ao Rio Lajeado que apresenta o mesmo comportamento do Rio Bocaina nas Grutas Fendãozinho-Fendão, Bocão-Paivas, Luminosa-Arcão, até desaguar no Rio Pilões e daí para o Rio Ribeira de Iguape.

Nos outros corpos a vulnerabilidade variou de baixa (locais onde não foram observadas injeções localizadas de água ou locais potenciais para infiltração) a média (onde há potencial para infiltração, caracterizados por áreas de agricultura).

O Corpo Leste Norte, apesar de conter um empreendimento mineiro, não configurou como uma área de vulnerabilidade alta já que não foram identificados pontos de injeção de água no sistema cárstico. Ou seja, a água flui somente superficialmente, sem ser absorvida pelo sistema cárstico.

Parâmetro K – Desenvolvimento da rede cárstica

O parâmetro K analisou o quanto o carste está desenvolvido nos corpos abordados por este estudo e foi um dos parâmetros que apresentou maior variação de vulnerabilidade em todos os setores (Figura 5.5). Para a avaliação deste parâmetro foram consideradas as dimensões e padrão de desenvolvimento de algumas cavernas e sua conectividade com o meio subterrâneo.

De modo geral as cavernas são desenvolvidas próximas à superfície, ou seja, trata-se de uma rede cárstica rasa. O desenvolvimento de algumas cavernas supera a

ordem de quilômetros (Grutas dos Paiva, Gruta do Fendão, Gruta Colorida, no Corpo Central Sul), porém a média chega somente a algumas dezenas de metros. Muitas delas apresentam fluxo de água subterrâneo de pouca vazão (fato constatado durante as campanhas de campo), com presença de sumidouro e ressurgência, porém o tempo de permanência da água é bastante curto, uma vez que a água penetra ao sistema, mas logo o deixa. As cavernas que apresentam sedimentos em seu piso (como é o caso da Gruta dos Planos, no Corpo Oeste), mas não chegam a obstruir o fluxo de água, pelo menos atualmente, uma vez que foram observados sedimentos no teto de algumas cavernas.

No Corpo Oeste os pontos considerados mais frágeis foram os da região da Gruta dos Planos, que configura a maior caverna daquela região, senão a única com a expressividade e importância regional, além de grandes depressões que apesar de não terem sido identificados pontos de conexão com o meio subterrâneo, não se encontravam alagadas.

Assim como no Corpo Central Sul, nos corpos do Leste, os pontos mais suscetíveis foram aqueles configurados por sumidouros, contudo neste setor a quantidade de água disponível provinda de cursos hídricos é menor. No Corpo Central Norte, a vulnerabilidade foi classificada como alta, pelo mesmo motivo que sua correspondente no setor Sul.

As regiões classificadas como vulnerabilidade média foram aqueles que apresentam o desenvolvimento de cavernas, mas muito incipiente e que não exibem uma conexão com o meio subterrâneo. As áreas com vulnerabilidade baixa são aquelas onde foram identificadas rochas carbonáticas, mas sem desenvolvimento de uma rede cárstica.

Figura 5.2 – Classificação da vulnerabilidade do carste segundo o parâmetro de desenvolvimento do epicarste (E). O local mais vulnerável foi o do Corpo Central, setor ao sul do divisor, onde ocorrem uma ampla depressão cárstica com sumidouros, ressurgências e cavernas.

Figura 5.3 – Vulnerabilidade do carste segundo o parâmetro Proteção do Solo (P). As áreas mais vulneráveis são representadas pela ausência de solo ou vegetação, compreendida pelo estabelecimento de atividades minerárias.

Figura 5.4 – Situação da Infiltração de Água (I) no sistema cárstico. As áreas de maior vulnerabilidade são as de ocorrência de pontos de infiltração de água no carste.

Figura 5.5 – Desenvolvimento da rede cárstica (K). Destaque para o setor da corpo Central Sul onde há a presença de cavernas com desenvolvimento superando a ordem de quilômetros. Nas áreas em amarelo, onde a vulnerabilidade foi considerada mediana, existem cavernas, mas suas dimensões indicam um processo de carstificação incipiente ou cessado. As áreas de vulnerabilidade baixa são representadas por afloramentos de rochas carbonáticas, mas sem desenvolvimento de processos de carstificação significativos.

Parâmetro F – Fator de Proteção do carste

O cálculo da vulnerabilidade cárstica segundo a metodologia original proposta por Doerfliger e Zwahlen (1998) é realizado através da equação mostrada anteriormente (Equação 5.1), onde os parâmetros expostos até aqui são somados de acordo com a ponderação atribuída através de sua classificação, para obter o Fator de Proteção (F). Contudo, para o estudo do carste em questão, o Fator de Proteção (F) foi calculado sobrepondo os resultados dos parâmetros *E*, *P*, *I* e *K* obtidos até o momento. Contudo, este fator está sendo utilizado como mais um parâmetro de avaliação da vulnerabilidade cárstica e não como produto final da avaliação (Figura 5.6).

A sobreposição dos índices das vulnerabilidades segundo os parâmetros *E*, *P*, *I* e *K* resultou em uma setorização dos corpos carbonáticos. O Corpo Leste Norte, resultou em um Fator de Proteção baixo, mesmo com a presença de uma mineração em atividade que retirou toda a cobertura de proteção, mas que não foram observados ponto de injeção de água no sistema, presença de cavernas e sem desenvolvimento da rede cárstica.

Algumas feições cársticas (cavernas, sumidouros etc.) foram observadas no corpo Leste Sul, o que elevou o Fator de Proteção deste setor entre Médio e Alto, na sua porção meridional e Fator Baixo em seu setor setentrional. As cavernas ali descritas apresentam desenvolvimento da ordem de dezenas de metros e presença de sumidouros, mas pouco significativo em relação aos outros corpos considerados nesta avaliação.

O Corpo Central Norte apresentou os menores índices, ou seja, Fator de Proteção Médio a Alto, onde foram identificados sumidouros e desenvolvimento de rede cárstica, pois nesta área a Proteção do Solo encontra-se com nível intermediário sendo composto por agricultura e silvicultura. O Corpo Central Sul, ao sul do divisor, é o que apresenta o Fator de Proteção Alto, já que neste setor foram identificadas as maiores concentrações de sumidouros e desenvolvimento da rede cárstica. Para este setor a Proteção do Solo não resultou em alto índice, pois o mesmo é coberto por vegetação de grande porte, configurando uma proteção razoável do sistema cárstico.

O Corpo Oeste configurou uma área de maior atenção na região da Gruta Pianos, onde há presença de sumidouro e desenvolvimento de rede cárstica. Contudo este setor apresenta grandes porções de áreas ocupadas por agricultura, silvicultura e

povoamento, que são agentes potenciais de impacto ao carste, estes não representam riscos iminentes ao sistema cárstico local.

Figura 5.6 – Fator de proteção F, resultante da sobreposição de todos os parâmetros abordados pelo método EPIK. Os setores mais vulneráveis estão localizados no Corpo Central Sul, na porção mais setentrional do Corpo Central Norte e pontualmente no Corpo Oeste e Corpo Leste Sul. Estas áreas apresentam vulnerabilidade mais alta para o Fator F, dada as características do carste como desenvolvimento de cavernas importantes regionalmente e presença de sumidouros.

5.2 A avaliação da vulnerabilidade pelo método KDI

O método KDI analisa a situação do carste como um todo, apresentando um panorama mais qualitativo, em relação ao método EPIK, que é quantitativo. O método KDI envolve parâmetros que avaliam a situação do carste como um todo, promovendo uma visão mais generalizada do carste e de seu ambiente ao entorno, além de abranger o uso deste sistema pelo homem.

A análise do carste através do método KDI teve início com a elaboração de um mapa de uso do solo preliminar, com base em imagens de satélite e técnicas de geoprocessamento de imagens que individualizaram feições de uso e ocupação da região abordada. Este mapa preliminar apresenta a situação de toda a região destacando as áreas silvicultura, agricultura, porções de solo exposto ou mesmo com

construções antrópicas e acúmulos de água presentes em represamentos ou cavas abandonadas de mineração (Figura 5.7).

Figura 5.7 – Imagem obtida a partir de imagens LANDSAT 5 (RGB 4/3/5) e classificada para obtenção das classes de uso e ocupação do solo.

A partir do mapa base (Figura 5.7) e os índices de classificação mostrados na Tabela 3.3 (Capítulo 3), adaptados de van Beynen e Townsend (2005), foi possível avaliar a situação do carste de forma qualitativa.

Sob os aspectos geomorfológicos em todos os corpos carbonáticos estudados não foram notadas grandes modificações, exceto nas regiões onde a mineração está ativa. A abertura de cavas altera profundamente o relevo de uma região e como consequência o regime hídrico do local. No restante dos corpos carbonáticos o relevo permanece intacto ou pouco alterado. Esta alteração se deve à preparação da terra para o cultivo ou mesmo para a própria ocupação humana. Contudo, nas áreas agricultáveis e nos locais onde o terreno foi preparado para a silvicultura não existem alterações que implicam em mudanças bruscas do relevo ou no regime hídrico que possam causar um desequilíbrio na dinâmica do sistema cárstico atual. A disposição do terreno segundo curvas de nível regularização dos meios hídricos, quando feitos de forma adequada, podem evitar grandes desastres, causando a remoção da cobertura de solo ou mesmo o entupimento de possíveis condutos que ali ocorrem. De acordo

com o panorama acima, segundo o método KDI, a avaliação recebe pontuação baixa, indicando um ambiente pouco impactado ou mesmo intacto.

Durante os levantamentos de campo não foram observadas dolinas ou cavernas utilizadas como áreas de descarte de resíduos (os chamados lixões). De um modo geral, as dolinas e cavernas não estão afetadas com objetos frutos de descarte de resíduos. O bom estado de conservação das dolinas e cavernas no quesito de não serem utilizadas como "lixões" possibilita receber uma pontuação baixa (pouco impacto ou intacto).

O relevo de toda a região abordada é bastante irregular e acidentado na área abrangida pela Serra de Paranapiacaba e mais suave no Planalto de Guapiara. Durante os trabalhos de campo, em ambas as situações não foram observadas feições de erosão do solo ou mesmo escorregamento. Através de comunicação verbal com a população local, sabe-se que estes ocorrem, mas de forma isolada e que não chegam a afetar ou comprometer a integridade do sistema cárstico local. De posse destas informações para o quesito "erosão do solo" foi atribuída uma pontuação baixa para todo o setor.

A compactação do solo em toda a região estudada foi observada somente em áreas de ocupação ou onde existem estradas. Estas construções são bastante pontuais e não estão sobre feições cársticas importantes ou não agredem o sistema de forma significativa, o que torna este um parâmetro de baixa pontuação.

O epicarste de toda a região, à exceção das áreas mineradas se encontra em bom estado de conservação. Não foram observadas regiões de inundação ou mesmo vandalismo ou supressão de forma que possa alterar ou denegrir a integralidade do epicarste. Como o epicarste da região está bem conservado e protegido, para este quesito a pontuação recebida também é baixa.

Com relação à integridade das cavernas visitadas foram reconhecidas duas tendências principais com relação à sua conservação: aquelas situadas em unidades de conservação ou de difícil acesso, mesmo foram de unidades de conservação (designadas aqui como Grupo 1) e aquelas localizadas fora de unidades de conservação e que tem fácil acesso fora de unidades de conservação (Grupo 2).

Nas cavernas do Grupo 1, a condição geral delas é de bom estado de preservação e conservação. Em alguns salões ou galerias das cavernas localizadas nestes locais, ainda se observa espeleotemas brancos, intactos e sem marcas de

vandalismo. De certo ocorrem espeleotemas quebrados e/ou caídos, mas esta situação se deu de forma natural.

As visitas controladas dentro dos parques e unidades de conservação permite que a integridade da caverna mantida, com baixo grau de impacto. A ação dos monitores ambientais permite que a visita turística seja concentrada em determinados salões ou galerias menos sensíveis à presença humana, evitando compactação do piso, excesso de visitantes em determinado salão, remoção de espeleotemas e outras ações que possam promover a degradação da caverna.

As cavernas visitadas durante os trabalhos de campo estão inseridas nos limites do Parque Estadual Intervalles que possui plano de manejo, dessa forma o grau de impacto dentro das cavernas e nos arredores é minimizado e também dentro dos limites do Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (no extremo norte do parque), que ainda não apresenta um plano de manejo que regule a visitação turística, mas existem medidas que promovem certa proteção e limites de visitação turística.

Já nas cavernas do Grupo 2 a situação é diferente, uma vez que foram observadas marcas de vandalismo e degradação dentro de algumas cavernas, como remoção de espeleotemas, restos de fogueiras e alimentação, além de resíduos deixados por visitantes. Como estão localizadas fora de unidades de conservação ou tem fácil acesso ao homem, o controle de visitação é praticamente nulo, permitindo a degradação de determinadas cavernas.

De modo geral as cavernas dos dois grupos apresentam bom estado de conservação, mas o fato de algumas não se apresentarem em bom estado de preservação ou conservação, a pontuação foi mais elevada, indicando que estes ambientes podem estar pouco impactados.

A economia da região de estudo é baseada na agricultura em diversas escalas, desde a de subsistência até a industrial. Os principais produtos do plantio são o tomate e o milho, dois insumos que exigem a aplicação de pesticida e herbicida. Durante a fase de pesquisa bibliográfica e as etapas de campo não foram encontrados dados concernentes à poluição de recursos hídricos ou de que estes estejam afetando o meio cárstico. Durante as visitas nas cavernas que possuem curso hídrico corrente não foram observados indícios de que os mesmos poderiam estar impactados ou poluídos por estes produtos. Além disso, também não foram obtidos dados em relação ao derramamento de contaminantes ou vazamento de tanques enterrados. Dessa forma,

pelo método KDI, este parâmetro foi considerado como LD (falta de dados). A falta de dados sobre este quesito é prevista pelos autores dos métodos e não comprometem a avaliação final (van Beynen e Townsend 2005m van Beynen et al. 2012).

Outros fatores considerados como LD's (falta de dados) diz respeito à riqueza e densidade da fauna cavernícola e da fauna aquática cavernícola. O levantamento destes dados existe para determinadas espécies em determinados locais e não para a região toda, e a consideração destes dados na avaliação da vulnerabilidade não satisfaz o panorama da região.

As cavernas e o meio cárstico em toda a região estão protegidos por legislação ambiental estadual e federal, o que garante a preservação e conservação mínima do sistema como um todo. As minerações e as atividades de agricultura e silvicultura obedecem e cumprem a legislação vigente o que permitiu uma pontuação mínima para estes quesitos, onde o impacto é mínimo ou nulo.

De acordo com os parâmetros de avaliação do método KDI foi gerado o mapa da Figura 5.8, que apresenta como resultado a situação do carste, segundo os valores de classificação do grau de impacto listado por van Beynen e Townsend (2005). De maneira geral, segundo os valores obtidos da classificação do grau de impacto, o carste encontra-se protegido e pouco impactado, com exceção das áreas onde a mineração e a ocupação humana são bastante atuantes. O impacto no carste, contudo, foi classificado como moderado, ou seja, não foram registrados índices catastróficos, podendo-se concluir que possa existir algum grau de consciência da importância de preservação deste ambiente frágil.

Figura 5.8 – Grau de impacto do carste segundo o método KDI (van Beynen e Townsend 2005). As áreas de impacto moderado ocorrem onde a presença humana (agricultura, mineração e povoamento) exerce pressão neste tipo de sistema.

6. DISCUSSÃO

6.1 Geomorfologia cárstica

Os dados e observações coletados durante os trabalhos de campo apontam para uma clara diferença das feições geomorfológicas e cársticas entre o Planalto de Guapiara e a Serra de Paranapiacaba. Os processos tectônicos mesozoicos que acometeram a região entre o Permiano Superior e o Triássico Médio, que resultaram na abertura do Oceano Atlântico Sul e soerguimento da Serra do Mar, ajudaram a definir a compartimentação geomorfológica atual da região (Almeida 1980, Riccomini 1995, Hiruma 2010, Cherem 2012).

A reativação tectônica durante a abertura do Oceano Atlântico Sul, contribuiu para que as rochas metavulcanossedimentares neoproterozoicas fossem expostas. A região da Serra de Paranapiacaba foi consideravelmente elevada com a instalação do Arco de Ponta Grossa e do Alinhamento Guapiara (Hiruma 2010, Cherem 2012). Esta elevação aumentou a taxa de denudação da região e com as rochas carbonáticas expostas, associadas ao elevado gradiente hidráulico, o processo de carstificação se iniciou.

A denudação do relevo nesta região se dá a partir da base para o topo da Serra de Paranapiacaba, portanto o carste das cabeceiras do Rio dos Pilões chega a ser mais desenvolvido, porém em menor grau que seu correspondente meridional na região do Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (PETAR), uma vez que mais ao sul estas rochas estariam expostas há mais tempo do que as localizadas mais próximas ao divisor (Cherem 2012).

A taxa de denudação da região do Planalto de Guapiara é bem menor comparativamente à região da Serra de Paranapiacaba, uma vez que o nível de base da primeira, que é o Rio Paranapanema e, por conseguinte o Rio Paraná, se localiza muito distante da área de estudo. Na região da Serra de Paranapiacaba o nível de base é o Rio Ribeira de Iguape, que deságua diretamente no mar, está situado relativamente próximo à área de estudo (Cherem 2012).

De maneira geral, a região do Planalto de Guapiara é mais suavizada e sem quebras abruptas de relevo quando comparada com o da Serra de Paranapiacaba, cuja topografia é mais acidentada. Essa relação pode ser verificada quando observados os perfis topográficos da região do planalto. Apesar de apresentar maiores cotas altimétricas (entre 700 e 1.000 m), o Planalto de Guapiara não apresenta grandes

desníveis ou declividades, característica que não auxilia na formação de um sistema cárstico. Já na Serra de Paranapiacaba a presença de escarpas e maiores declividades garantem um maior gradiente hidráulico na região, o que pode auxiliar na formação de sistemas cársticos com maior expressão.

Os perfis longitudinais dos principais rios da região abordada também auxiliaram na análise do relevo entre estes dois compartimentos geomorfológicos. Os rios das Almas e São José de Guapiara e seus respectivos afluentes, que se caracterizam como sendo de rios típicos de planalto, apresentam uma declividade praticamente bem suave próxima às suas cabeceiras, que aumenta sutil e gradativamente até chegar próximo à foz onde se torna suave novamente. Para o Rio dos Pilões e seus afluentes, nota-se que a declividade tem seus valores praticamente dobrados em relação aos rios do Planalto de Guapiara, situação que reflete o relevo escarpado da Serra de Paranapiacaba.

Da região escolhida para estudo do carste, a região do Planalto de Guapiara é a que apresenta maior área de exposição dos corpos carbonáticos, contudo as feições cársticas ocorrem com maior frequência e densidade na pequena área da Serra de Paranapiacaba.

O Corpo Oeste, apesar de ser o segundo maior em área, é o que apresenta a menor densidade e ocorrência de feições cársticas entre os estudados. Neste corpo o regime fluvial típico é predominante, e a topografia mais suavizada e a química levemente dolomítica dos carbonatos, associados aos baixos gradientes hidráulicos não permitiram o pleno desenvolvimento de uma rede cárstica. Contudo, foram descritas depressões poligonais reconhecidas através de imagens de satélite e confirmadas em campo, e foi realizado o levantamento topográfico da Gruta dos Pianos, que configurou a maior caverna do compartimento do planalto, com 192 m de desenvolvimento. A posição geográfica deste corpo, associada ao processo de denudação das rochas que superpõem os carbonatos pode indicar que se trata de um carste mais jovem, cujas feições ainda estão em desenvolvimento.

Os corpos do norte são os mais delgados e os menores em área e apresentam poucas feições cársticas expressivas, à exceção do Corpo D, cuja densidade de feições reconhecidas é a maior entre todos os corpos estudados, além de ser o único deste setor onde foram reconhecidas 11 cavernas. No Corpo C existe uma mineração e o corpo carbonático pode ser analisado em profundidade, contudo nenhuma feição

cárstica foi observada. A Gruta do Sumidouro, que foi destruída pelo avanço desta mineração constituía a maior caverna da região, com mais de 510 m de desenvolvimento, se localizava no Corpo C. Assim como no Corpo Oeste, predomina nos corpos do Norte um regime predominantemente fluvial e, o relevo típico de planalto, associado ao baixo gradiente hidráulico dos rios, e à pouca área de exposição dos carbonatos não permitiu o pleno desenvolvimento do carste.

O Corpo Central é o maior entre os estudados, sendo contínuo na região do Planalto e da Serra o que permitiu a comparação da ocorrência das feições em ambos os compartimentos, o que justifica a sua subdivisão em Corpo Norte e Sul. O Corpo Central Norte, o maior em área entre os corpos analisados, registra poucas feições cársticas em relação ao Corpo Central Sul. As drenagens neste setor são superficiais, predominando um regime fluvial, enquanto que ao sul, existem rios que possuem trechos subterrâneos e superficiais, como é o caso do Rio Bocaina-Lageado.

O Corpo Central Sul, apesar das poucas dimensões em relação ao norte é o que apresentou maiores densidades de feições cársticas. O relevo mais acidentado (situação de escarpa), associado aos rios com maiores gradientes hidráulicos, à química dos carbonatos, e o maior tempo de exposição das rochas carbonáticas permitiram o desenvolvimento de feições cársticas mais expressivas em relação aos corpos ao norte do divisor.

Outro fator importante para o carste do sul ser mais desenvolvido que o do Planalto de Guapiara é a composição química dos carbonatos, que é mais calcítico (González et al. 1972). A composição mais calcítica favorece o fenômeno de dissolução dos calcários (Ford e Williams 2007).

Em relação ao carste poligonal, este ocorre apenas ao sul do divisor de águas, enquanto que ao norte foram observados somente relevos fluviais típicos, com reconhecimento de feições cársticas isoladas. A inexistência de carste poligonal pode indicar ausência de condutos em profundidade (Ford e William 2007, Williams 2008); e as feições que ocorrem isoladas são relacionadas ao epicarste exclusivamente, inclusive as cavernas.

As cavernas foram registradas em todos os corpos carbonáticos, exceto nos Norte A e B. Além disso, o Corpo Central Sul foi o que apresentou a maior quantidade de cavernas, em comparação ao restante dos corpos carbonáticos ao norte, já no Planalto de Guapiara. Contudo, apesar do grande número de cavernas, suas

dimensões são discretas, com média de desenvolvimento que não superam algumas centenas de metros (à exceção da Gruta dos Paiva, Gruta Colorida e Gruta do Fendão), além de apresentar também um desnível pequeno. Não obstante estas cavernas são rasas, ou seja, ocorrem em pouca profundidade no corpo carbonático. Dos dados levantados foi observado há uma tendência no aumento das dimensões e desníveis das cavernas conforme se ruma para o sul, enquanto que no Planalto de Guapiara os maiores desenvolvimentos e dimensões das cavernas se encontram mais próximos ao divisor de águas entre a serra e o planalto (Figura 6.1).

Figura 6.1 – Gráfico da relação do desnível e desenvolvimento das cavernas com a sua distância em relação ao divisor Serra/Planalto.

A dissecação do relevo da porção sul da área estudada que compreende o início das escarpas da Serra de Paranapiacaba associada aos corpos de carbonatos mais puros favorecem o desenvolvimento de um carste mais expressivo, como é o caso do

PETAR, localizado a sul da área de estudo, onde as cavernas apresentam dimensões e desníveis muito maiores que na região deste estudo.

De todo o exposto fica claro que a posição geomorfológica do carste, sua geoquímica e dimensões dos corpos carbonáticos influenciam diretamente no seu desenvolvimento. Os corpos posicionados ao norte do divisor de água e mais distantes deste, apresentam um carste pouco desenvolvido, dado o baixo gradiente hidráulico, geoquímica mais dolomítica e pouca área de exposição, o que dificulta a ação da água na dissolução destas rochas e formação de um sistema cárstico mais expressivo.

6.2 Vulnerabilidade do carste

A avaliação da vulnerabilidade do carste entre o Planalto de Guapiara e Serra de Paranapiacaba seria inicialmente determinada através da aplicação somente do método EPIK (Doerfliger e Zwahlen 1998). A escolha deste método se justificou por conta de que os parâmetros analisados são de fácil observação e obtenção em campo. Contudo, o parâmetro *I* (infiltração de água no sistema) é o que recebe a maior ponderação, o que denota que sem pontos de injeção de água no sistema cárstico o método pode ser falho.

O método EPIK foi considerado neste estudo como sendo bastante quantitativo, não suprimindo outras características do carste julgadas como de extrema importância na determinação da vulnerabilidade cárstica. Essa deficiência do método foi suprida com algumas adaptações e também com a complementação de outro método, mais qualitativo e descritivo, KDI (van Beynen e Townsend 2005).

Doerfliger e Zwahlen (1998) afirmam que a aplicação do método EPIK simplifica o estabelecimento de zonas de proteção para pontos de injeção de água no sistema cárstico e que o método é bastante adequado para a realidade do carste da Suíça (tipo alpino), porém se usado para outros tipos de carste, alguns ajustes devem ser feitos ao modelo. Na aplicação deste método para a área do estudo aqui apresentado foi verificado que o fator escala também pode ser limitante. Na aplicação do EPIK para as áreas-piloto na Suíça (St. Imier e Blatti Springs), Doerfliger e Zwahlen (1998) analisam a situação de proteção da injeção de água no sistema em áreas entre 70 e 120 km². Para a região aqui abordada a área de captação é no mínimo o triplo e essa

característica aumenta a importância dos outros parâmetros analisados, como previsto por Goldscheider (2002).

O parâmetro de desenvolvimento do epicarste (E) foi obtido exclusivamente através de observações de campo. A análise das feições cársticas e geomorfológicas permitiram concluir que este parâmetro é distinto para o Planalto de Guapiara e Serra de Paranapiacaba. De maneira geral, nos domínios do planalto o epicarste é pouco expressivo, bastante disperso e superficial, com presença rara de lapíás, feições de dissolução, dolinas de pequeno porte (menos de 4 m de diâmetro) e cavernas secas e de pequenas dimensões (desenvolvimento de poucas dezenas de metros) e localizadas bem próximas à superfície. Em algumas cavas de mineração atualmente abandonadas ou ativas, onde foi possível observar grandes cortes no corpo carbonático, não foram notados desenvolvimento do epicarste, concluindo que este parâmetro apresenta uma vulnerabilidade baixa. Na região da Serra de Paranapiacaba, as feições cársticas são mais frequentes e ocorrem com maior expressividade em relação aos outros corpos estudados. A geomorfologia deste setor, associado à composição química das rochas carbonáticas, permitem o desenvolvimento de feições cársticas mais facilmente, quando comparados com o setor ao norte do divisor entre a serra de e o planalto, sendo atribuída vulnerabilidade alta.

O parâmetro cobertura de proteção do solo (P) é bastante dinâmico para a região do planalto, devido à ação antrópica mais pronunciada. A rotatividade de cultura, atividades mineiras e a expansão urbana podem ocasionar a retirada ou aterro de cobertura de solo, desmatamento, entre outros, diminuindo ou aumentando a vulnerabilidade para este parâmetro. Mas de maneira geral foi notado que na região do planalto a cobertura de proteção do solo excede a espessura de 2 m, contribuindo para o que o sistema cárstico esteja bem protegido. Na região de St. Imier (Suíça), uma das áreas consideradas por Doerfliger e Zwahlen (1998) a proteção de cobertura do solo foi considerada como somente depósitos sedimentares recentes, com menos de 1 metro de espessura, e estes autores concluíram que era suficiente para preservar a integridade do sistema.

Na região da Serra de Paranapiacaba, a cobertura de proteção do solo é bastante expressiva. A existência de unidades de conservação garante a preservação de áreas de vegetação e permanência do solo, contribuindo para a proteção de cobertura do carste.

O desenvolvimento da rede cárstica (K) para a região de estudo apresentou resultados mais heterogêneos em ambos os compartimentos geomorfológicos. Este fator leva em consideração a geoquímica dos carbonatos, a situação do relevo, presença de água, entre outros, que contribuem para o desenvolvimento do carste. A vulnerabilidade foi considerada alta onde foram descritos os maiores desenvolvimentos de condutos.

O parâmetro de infiltração de água no sistema cárstico (I) é considerado o mais importante na aplicação do método EPIK segundo Doerfliger e Zwahlen (1998), contudo este foi o mais controverso para a área de estudo. Na região da Serra de Paranapiacaba, a presença de sumidouros fez com que a vulnerabilidade do setor seja considerada com alta. Contudo, através das observações de campo, não foi possível concluir que a água seja injetada substancialmente no sistema cárstico em profundidade. O que foi observado é que a água é captada por sumidouros, percorre um pequeno trecho dentro de cavernas e já volta a ter seu curso em superfície. Na região do planalto foram descritas algumas dolinas com pouca ou nenhuma água no fundo, o que não permite concluir que a água também esteja sendo captada para o sistema cárstico. Mesmo assim foram determinadas as vulnerabilidades dos setores com base em algumas adaptações do método.

A vulnerabilidade do carste em si deve levar em consideração mais fatores, alguns externos ao próprio carste, e que devem ser avaliados e ponderados em conjunto com fatores antrópicos e ambientais (van Beynen e Townsend 2005, 2007, van Beynen et al. 2012). O método KDI veio suprir de forma qualitativa e descritiva as insuficiências do EPIK. Através de observações de campo os parâmetros considerados no método KDI por van Beynen e Townsend (2005) foram ponderados e classificados para se avaliar a vulnerabilidade do carste entre o Planalto de Guapiara e a Serra de Paranapiacaba.

Como já observado, a presença humana no Planalto de Guapiara é predominante e a pressão exercida no sistema cárstico é maior quando comparada com a situação da Serra de Paranapiacaba. Contudo, dos parâmetros analisados na região do planalto e a situação do carste apontam para um panorama otimista em relação à preservação do carste.

Apesar da forte pressão antrópica oriunda das mais variadas atividades econômicas, o carste está bem protegido na região do planalto. Nas minerações

visitadas não foram observadas feições cársticas e, quando ocorrem estão distante da frente de avanço. Nas áreas de agricultura e pastagens foram observadas algumas cavernas (como é o caso das Grutas Carioca 1 e 2, Gruta dos Planos, Gruta do Jairo), porém elas se encontram preservadas com vegetação em volta e, apesar de terem sido encontrados indícios de visitação, de maneira geral elas se encontram bem conservadas. A qualidade da água superficial e subterrânea e do ar não foi considerada neste estudo, pois a mesma deveria ser monitorada durante um determinado espaço de tempo para se notar variações significativas.

Fatores culturais também são considerados pelo método KDI e apesar da presença antrópica na região do Planalto de Guapiara considerada neste estudo, pode-se dizer que o carste se encontra bem preservado e que a população local tem consciência de preservação deste tipo de sistema.

Na região da Serra de Paranapiacaba a presença de unidades de conservação garantem a preservação e conservação do sistema cárstico. Todos os parâmetros previstos pelo método KDI são atendidos de forma positiva, ou seja, a avaliação do grau de impacto é nula. Esta característica ressalta a importância do estabelecimento de unidades de conservação em áreas consideradas ambientalmente frágeis. A existência de unidades de conservação pode garantir certa preservação do sistema cárstico, porém alguns parques da região tem como o turismo sua principal atividade. Assim, a elaboração de planos de manejo é fundamental para se complementar a proteção do sistema cárstico (Furlan e Leite 2008, Sallun Filho et al. 2008). Contudo, deve-se ter consciência que mesmo os planos de manejo já existentes, como é o caso do Parque Estadual Intervales, devem ser revistos e readequados com a atualização de leis ambientais e progresso da ciência.

6.3 Zoneamento de proteção das áreas cársticas

Uma vez analisadas as tendências da situação para cada parâmetro avaliado, o próximo passo foi a compilação de todos estes dados uma base que represente a situação de vulnerabilidade do carste da região da Serra de Paranapiacaba e Planalto de Guapiara. Esta compilação gerou um mapa que indica os setores onde o carste é mais vulnerável e pode servir de base para políticas públicas no tocante ao planejamento de expansão urbana e econômica dos municípios abrangidos por este sistema cárstico.

Os parâmetros avaliados pelos métodos EPIK e KDI foram sobrepostos a fim de se estabelecer um zoneamento do carste (Figura 6.2), e então balizado de acordo com os dados de referência de Doerfliger e Zwahlen (1998) (Tabela 3.6). O parâmetro que mais contribuiu para a elevação da vulnerabilidade do carste foi a de Injeção de Água (I) e, portanto, as áreas onde a presença de sumidouros foi mais constante, devem ser estabelecidas como Zona S1, uma vez que estes pontos de injeção e suas áreas de captação são de extrema importância para a integridade do sistema cárstico e das pessoas que dele necessitam para sobreviver.

As áreas estabelecidas como Zona S2 devem permanecer em estado de atenção quanto ao avanço da ocupação humana, mineração e áreas de agricultura, pois apesar de apresentarem uma vulnerabilidade mais baixa, são suscetíveis a impactos de qualquer natureza. Apesar de o fluxo de água não adentrar ao sistema cárstico, algumas drenagens podem fluir para regiões onde exista algum ponto de injeção ou comunicação com o aquífero subterrâneo. As áreas menos vulneráveis, caracterizadas por apresentarem pouco ou nenhum desenvolvimento de sistema cárstico, geralmente estão protegidas por vegetação e não foram observadas exposição de feições cársticas. Apesar de apresentarem uma classificação como Zona S3, a expansão urbana e econômica, conceitos dinâmicos com o passar do tempo, devem ser planejados para minimizar seus efeitos em sistemas cársticos.

Figura 6.2 – Zoneamento do carste da região do divisor entre a Serra de Paranapiacaba e Planalto de Guapiara. As áreas mais vulneráveis estão configuradas por apresentarem maiores concentrações de sumidouros e feições cársticas relacionadas.

7. CONCLUSÕES

O estudo do carste da região do divisor entre a Serra de Paranapiacaba e o Planalto de Guapiara mostrou que sua evolução é distinta nestes dois compartimentos geomorfológicos e que a vulnerabilidade cárstica é baixa para as áreas do setor norte ao do divisor e, apesar de ao sul esta ser alta, as áreas mais críticas se encontram protegidas. As principais conclusões deste estudo são:

a) Os corpos de rochas carbonáticas presentes entre o divisor Serra de Paranapiacaba e Planalto de Guapiara abrigam um carste com diferentes estágios de desenvolvimento;

b) Ao norte do divisor somente alguns corpos apresentam o desenvolvimento de feições cársticas, que ocorrem dispersas por toda a área destes corpos carbonáticos. As feições cársticas neste setor são mais desenvolvidas quanto mais próximas do divisor e, na medida em que se afastam deste, elas se tornam mais discretas e com pouco desenvolvimento de suas dimensões e grau de dissolução. Apesar de os corpos carbonáticos serem extensos, a pouca área de exposição do carste, associado ao baixo gradiente hidráulico e a composição dolomítica com alto teor de impurezas das rochas carbonáticas contribuem para que o carste seja menos desenvolvido neste setor;

c) Ao sul do divisor, na Serra de Paranapiacaba, é nítida a maior quantidade, densidade e desenvolvimento de feições cársticas, comparando com o setor norte. Neste setor, o panorama geomorfológico, ambiental e químico é o oposto do Planalto de Guapiara. O aumento do gradiente hidráulico, maior área de exposição das rochas carbonáticas, aspectos geoquímicos das rochas carbonáticas (mais calcítica e menor quantidade de impurezas, facilitando o processo de dissolução) favorece o processo de carstificação neste setor;

d) As drenagens no setor norte cortam os corpos de rochas carbonáticas tanto transversalmente quanto longitudinalmente sem haver infiltração no sistema. O curso mais significativo neste setor é o próprio Rio das Almas que cruza dois corpos sem causar qualquer modificação significativa nestes locais. Já no setor sul foram observadas drenagens que são interceptadas por sumidouros, porém estas não são absorvidas pelo sistema cárstico em profundidade, sendo que seu trecho é subterrâneo ao longo de no máximo uma centena de metros, como é o caso da Gruta dos Paiva e da Gruta do Flóido.

e) O carste que se desenvolve na região é predominantemente superficial e raso e as cavernas mapeadas e topografadas mostram isso em seus perfis. Ao norte do divisor as cavernas apresentam dimensões mais discretas enquanto ao sul, são maiores chegando a ordem de quilômetros (Gruta dos Paiva, Gruta Colorida).

f) No norte do divisor a disponibilidade de água, o baixo gradiente hidráulico e composição química dos carbonatos ser mais dolomítica influem para que as cavernas sejam menores em relação ao sul. As escapas da Serra de Paranapiacaba contribuem para um aumento no gradiente hidráulico, que somado à composição calcítica das rochas carbonáticas, assim como a sua maior área de exposição tornam o processo de carstificação mais acentuado no setor sul.

g) A situação ambiental do carste é distinta nos setores ao norte e ao sul do divisor. No Planalto de Guapiara a ocupação antrópica é mais incisiva que na Serra de Paranapiacaba, com presença de empreendimentos minerários em atividade, agriculturas de diversas naturezas, silvicultura e o estabelecimento de comunidades. Contudo, apesar desta forte influência antrópica, foi observado que apenas um dos corpos, segundo o método KDI apresenta a classificação como pouco impactado, dada a instalação de um empreendimento minerário em atividade, que por conta da exploração das rochas carbonáticas acaba por suprimindo as feições cársticas (basicamente feições de dissolução, como lapiesamento, e não foram observadas cavernas ou sumidouros). Ao sul do divisor, a situação do carste configura áreas de proteção ambiental (Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira – PETAR e Parque Estadual Intervales – PEI) e, na região do PEI existe Plano de Manejo (Furlan e Leite 2008), o que confere mais um aspecto de proteção ao ambiente cárstico.

h) A configuração geomorfológica condicionou a ocupação que historicamente tem sido mais intensa no planalto por seus relevos mais suaves.

i) A vulnerabilidade do carste foi determinada através de adaptações nos métodos EPIK e KDI, que foram considerados os mais adequados à realidade do carste da região. A vulnerabilidade do carste é maior onde há injeção de água para o aquífero cárstico, ou seja, presença de sumidouros. Nos corpos onde há empreendimentos minerários em atividade (porção norte) foi constatado que o carste é pouco vulnerável, uma vez que não foram identificadas feições que elevasse o grau de suscetibilidade a determinados tipos de impactos. Contudo, onde o método acusou uma alta vulnerabilidade o carste encontra-se em grande parte protegido contra possíveis impactos e danos.

j) De uma maneira geral, o carste na região do divisor entre a Serra de Paranapiacaba e o Planalto de Guapiara se encontra protegido e conservado, com exceção das áreas mineradas (porção norte), estando sob a tutela de planos de manejo e de leis ambientais, que nem sempre são efetivas, porém conclui-se que, onde o carste apresenta-se mais vulnerável, este tipo de sistema está bem protegido (realçando a importância de unidades de conservação), por outro lado, onde o carste é menos vulnerável, sua situação também é positiva, pois não foram diagnosticados impactos catastróficos ou irreversíveis.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALGARTE, J. P. A influência dos arqueamentos cratônicos no condicionamento das alcalinas dos Estados de São Paulo e Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 26. 1972. Belém. *Anais...* Belém: SBG, 1972. v. 1, p. 65-69.
- ALLER, L.; BENNET, T.; LEHR, J.; PETTY, R.; HACKETT, G. DRASTIC: A *Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings*. Oklahoma. USEPA 600/2-87-036. 1987. 455 p
- ALMEIDA, F. F. M. de - Os Fundamentos Geológicos do Relevo Paulista. Rio de Janeiro, DNPM/DGM, *Boletim* 41, 1964.
- ALMEIDA, F.F.M. de. O Cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*. São Paulo. v.7, n.4, p.349-364, 1977
- ALMEIDA F.F.M de. Tectônica da Bacia do Paraná no Brasil. São Paulo. *Inst. Pesq. Tecnol. Est. S. Paulo (IPT)*. (Rel. 14.091). 187 p, 1980.
- ALMEIDA F.F.M. de; CARNEIRO, C.D.R. Botucatu: o grande deserto brasileiro. *Ciência Hoje*, v. 24, n. 143, p. 36-43, 1998
- ALMEIDA F.F.M. de; AMARAL G.; CORDANI U.G.; KAWASHITA K. 1973. The Precambrian evolution of the South American cratonic margin, South of Amazonas. In: A.C.M. NAIRN, W.H. KANES, F.G. STEHLI. eds. 1973. *The ocean basins and margins*. New York, Plenum, p. 411-446.
- ALMEIDA, M.A. de. *Síntese dos conhecimentos geológicos no Vale do Ribeira relacionados ao Complexo Setuva e grupos Açungui e Itaiacoca*. São Paulo (Disciplina Seminários Gerais do curso de Pós-Graduação, Instituto de Geociências - USP). 1985.
- AUGE, M. Hydrodynamic behavior of the Puelche Aquifer in Matanza River Basin. *Ground Water*, v.24, n. 5, p.636-642. 1986.
- AUGE, M. *Primer Curso de Posgrado de Hidrogeologia Ambiental*. UBA, Argentina. Buenos Aires. p.1-65,1995.
- AULER, A.; RUBBIOLI, E.; BRANDI, R. 2001. *As grandes cavernas do Brasil. Grupo Bambuí de Pesquisas Espeleológicas*. Belo Horizonte. 228p.
- BAKER, A.E.; CICHON, J.R.; ARTHUR, J.D.; RAINES, G.L. Florida aquifer vulnerability assessment. In: GSA ABSTRACTS WITH PROGRAMS, v.34, p.346-347, 2002.
- BLODGETT, R. Drinking water vulnerability assessment in TEXAS. PROCEEDINGS OF THE ANNUAL CONFERENCE. 1993. San Antonio.
- BOUMA, A. H. *Sedimentology of some flysh deposits*. Amsterdam. Elsevier. 1962.
- BRITO NEVES B.B. de; CAMPOS NETO M.C.; FUCK R.A. 1999. From Rodinia to Western Gondwana: an approach to the Brasiliano- Pan African Cycle and orogenic collage. *Episodes*, v. 22, p. 155-166, 1999.
- CAMPANHA, G. A. da C. *Tectônica Proterozóica no Alto e Médio Vale do Ribeira, Estados de São Paulo e Paraná*. 1991. 296 f. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo. São Paulo.

- CAMPANHA, G. A. da C *O papel do sistema de zonas de cisalhamento transcorrentes na configuração da porção meridional da Faixa Ribeira*. 2002. 105 f. Tese (Livre-Docência) - Instituto de Geociências Universidade de São Paulo. São Paulo. 2002.
- CAMPANHA, G. A. da C.; BISTRICHI, C.A.; ALMEIDA, M.A. de. Considerações sobre a organização litoestratigráfica e evolução tectônica da faixa de dobramentos Apiaí. In: SIMPÓSIO SUL-BRASILEIRO de GEOLOGIA, 3, Curitiba, 1987. *Atas*. Curitiba, SBG, v. 2, p. 725-742.
- CAMPANHA, G.A.C., BRITO NEVES, B.B. Frontal and oblique tectonics in the Brazilian shield. *Episodes*, v. 27, p. 255-259, 2004
- CAMPANHA, G. A. da C.; FALEIROS, F. M. Neoproterozoic terrane collage in the southern and central Ribeira Belt, Brazil. In: INTERNATIONAL GONDWANA SYMPOSIUM, 12. 2005, Mendoza. Gondwana 12 conference: geological and biological heritage of Gondwana... Mendoza: Academia Nacional de Ciencias, v. 1, p. 81, 2005.
- CAMPANHA, G. A. da C.; GIMENEZ FILHO, A.; CAETANO, S.L.V.; PIRES, F.A.; DANTAS, A.S.L.; TEIXEIRA, A.L.; DEHIRA, L.K. 1986. Geologia e estratigrafia da região das folhas Iporanga e Gruta do Diabo, Vale do Ribeira, São Paulo. CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA. 34, Goiânia. 1986. *Anais*. Goiânia, SBG Vol. 2, 1058-1073.
- CAMPANHA, G. A. da C., RICCOMINI, C.; MELO, M.S., HASUI, Y., ALMEIDA, F.F.M., DEHIRA, L.K. 1985. Análise do padrão de fraturamento mesozóico-cenozóico de bacias tafrogênicas continentais do Sudeste do Brasil. In: SIMP. REG. GEOL. 5. São Paulo, 1985. *Atas...* São Paulo, SBG, v. 1, p. 337-350.
- CAMPANHA, G. A. da C.; SADOWSKI, G. R. Tectonics of the Southern Portion of the Ribeira Belt (Apiaí Domain). *Precambrian Research*, v.98, p.31-51, 1999.
- CAMPOS-NETO M.C. Orogenic systems from southwestern Gondwana. In: U.G. CORDANI, E.J. MILANI, A. THOMAZ FILHO, D.A. CAMPOS. eds. *Tectonic evolution of South America*. 2000. Rio de Janeiro, 31st Int. Geol. Congr. p. 335-365.
- CHEREM, L.F.S.; VARAJÃO, C.A.C.; BRAUCHER, R.; BOURLÉS, D.; SALGADO, A.A.R.; VARAJÃO, A.C. Long-term evolution of denudational escarpments in southeastern Brazil. *Geomorphology*, v. 173-4, p. 18-27, 2012.
- CHILINGAR, G. Classification of limestones and dolomites on basis of Ca/Mg ratio. *Journal of Sedimentary Research*, n.27, p.187-189, 1957.
- CIVITA, M.; CHIAPPONE, A.; FALCO, M.; JARRE, P. Preparazione della carta di vulnerabilità per la rilocalizzazione di um impianto pzzi dell'Aquedotto di Torino. *Atti 1° Convegno Nazionale sulla Protezione e Gestione delle Acque Sotterranee: Metodologie, Tecnologie e Obiettivi*, CNR, Marano Sul Parnaro, v. 2, p. 461-462, 1990.
- COST 65. *Hydrogeological aspects of groundwater protection in karstic areas, Final report (COST action 65)*. Brüssel, Luxemburg, 1995. European Comission, Directorat-General XII Science, Research and Development, Report EUR 16547 EN. 446p.

- COST 620. *Guidelines for Hazard Mapping and GIS Techniques*. – Internal Report of COST Action 620. Brüssel, Luxemburg. 2001. Working Group III. 8p.
- CPRM - CIA. DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. 2006. *Geologia e Recursos Minerais do Estado de São Paulo: Sistemas de Informações Geográficas (SIG)*. Programa Geologia do Brasil: Integração, Atualização e Difusão de Dados da Geologia do Brasil, Mapas Geológicos Estaduais escala 1:750000. MME, Brasília, CD-ROM.
- DAITX, E. C.; TEIXEIRA, W.; ZANARDO, A. Geologia e geocronologia do metagabro de Apiaí, Vale do Ribeira, SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO de GEOLOGIA, 36. Natal, 1990. *Boletim de Resumos*. Natal, Sociedade Brasileira de Geologia, p.341.
- DALY, D.; DREW, D. The role of karst and karst vulnerability in the Irish Groundwater Protection Scheme. *Workshop Vulnérabilité et Protection des Eaux Karstiques*, CHYN, Neuchâtel, v. 4, 1998.
- DOERFLIGER, N.; ZWAHLEN, F. *Groundwater Vulnerability Mapping in Karstic Regions (EPIK)*, Practical Guide. Swiss Agency for the Environment. Forests and Landscape (SAEFL). Berne. v. 56, 1998.
- EGYDIO-SILVA, M.; VAUCHEZ, A.; BASCOU, J.; HIPPERTT, J. High-temperature deformation in the Neoproterozoic transpressional Ribeira belt, southeast Brazil. *Tectonophysics*, v. 352, p. 203-224, 2002.
- FALEIROS, F.M. *Estratigrafia e tectônica de parte do Subgrupo Lajeado, Iporanga, SP*. 2000. 41 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
- FALEIROS, F. M.; CAMPANHA, G. A. C.; BELLO, R. M. S.; FUZIKAWA, K. Fault-valve action and vein development during strike-slip faulting: an example from the Ribeira Shear Zone, Southeastern Brazil. *Tectonophysics*, v. 438, p. 1-32, 2007.
- FALEIROS, F. M.; CAMPANHA, G. A. C.; BELLO, R. M. S.; FUZIKAWA, K. Quartz recrystallization regimes, c-axis texture transitions and fluid inclusion reequilibration in a prograde greenschist to amphibolite facies mylonite zone (Ribeira Shear Zone, SE Brazil). *Tectonophysics*, v. 485, p. 193-214, 2010.
- FALEIROS, F. M.; CAMPANHA, G. A. C.; MARTINS, L.; VLACH, S. R. F.; VASCONCELOS, P. M. Ediacaran high-pressure collision metamorphism and tectonics of the southern Ribeira Belt (SE Brazil): evidence for terrane accretion and dispersion during Gondwana assembly. *Precambrian Research*, 2011.
- FALEIROS, F.M. *Geologia e recursos minerais da Folha Apiaí - SG.22-X-B-V, Estados de São Paulo e Paraná*. São Paulo: CPRM, 2012. 107 p.: il. Color + DVD. Escala 1:100.000.
- FERREIRA, F.J.F.; MORAES, R.A.V.; FERRARI, M.P.; VIANNA, R.B. 1981. Contribuição ao Estudo do Alinhamento Estrutural de Guapiara. In: SBG, SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 3, Curitiba, Atas, 1:226-240.
- FLEISCHER, R. A pesquisa de chumbo no Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 29., Ouro Preto, 1976. *Anais...* Ouro Preto: Sociedade Brasileira de Geologia, 1976, v. 1, p. 19- 32.

- FORD, D.; WILLIAMS, P.W., *Karst geomorphology and hydrology*: London, Unwin Hyman 1989. 601 p
- FORD D.C.; WILLIAMS P.W. - *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. Chichester. Wiley. 2007. 561 p.
- FOSTER, S. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution, risk and protection strategy. In: VAN DUIJEVENBODEN, W e VAN WAEGENINGH, H.G. (eds.), *Vulnerability of soil and groundwater pollutants, Proceedings and Information*, TNO-CHR, Delft, v. 38, p. 69-86, 1987.
- FRASCÁ M.H.B.O.; FIGUEIREDO, M.C.H.; ALMEIDA, M.A.; COUTINHO, J.M.V. Petrografia e Geoquímica da Formação Água Clara - região de Araçáiba, SP. *Boletim IG-USP. Série Científica*, v.21, p 73-92. 1990.
- FUCK, R.A.; BRITO NEVES, B.B.; SCHOBENHAUS, C. Rodinia descendants in South América. *Precambrian Research*, v. 160, p. 108-126, 2008
- FURLAN, S.A.; LEITE, S.A. 2008. Plano de manejo do Parque Estadual Intervalles. Acesso em 10 de novembro de 2013 - Disponível em <http://www.ffl.orestal.sp.gov.br/media/uploads/planosmanejo/PEIntervalles/1.%20Volume%20Principal/cad%202_DIAGNOSTICO%20E%20AVALIACAO/pag91_138CARSTE.pdf>
- GOGU, R. C.; *Advances in groundwater protection strategy using vulnerability mapping and hydrogeological GIS databases*. 2000. 153f. Tese (Doutorado) University of Liège. Liège.
- GOGU, R. C.; DASSARGUES, A. 2000: Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overly and index methods. *Environmental Geology*, v. 39, n.6, p. 549-559, 2000.
- GOLDSCHIEDER, N. *Hydrogeology and Vulnerability of Karst Systems* – Examples from the Northern Alps and the Swabian Alb. 2002. 259 f. Tese (Doutorado) – Universität Karlsruhe. Karlsruhe.
- GOLDSCHIEDER, N., KLUTE, M., STURM, S e HÖTZL, H. The PI method - a GIS-based approach to mapping groundwater vulnerability, with special consideration of karstic aquifers. *Zeitschrift für Angewandte Geologie*, v.46, n.3, p. 157-166, 2000.
- GONZALEZ, L.A.; CAVALCANTE, J.; PAIVA, I.; FRANCISCONI, Ó.; PINTO, G.G.; DRUMOND, J.B.V. *Projeto Calcário para Cimento*. São Paulo: DNPM/CPRM, v. 1 e 2, 151 p., 1972.
- GUNN, J.; LOWE, D.J. Speleogenesis on tectonically active carbonate islands, in *Speleogenesis; Evolution of Karst Aquifers* (eds A.V. Klimchouk, D.C. Ford, A. N. Palmer e W. Dreybrodt), *National Speleological Society of America*, Huntsville, AL, p. 238–243, 2000.
- HASUI, Y. Sistema Orogênico Mantiqueira. 2012. In: HASUI, Y., CARNEIRO, C. DEL RÉ, ALMEIDA, F.F.M., BARTORELLI, A. (eds). *Geologia do Brasil*. São Paulo: Beca, 2012. p. 331-373.
- HEILBRON, M.; PEDROSA-SOARES, A.C.; CAMPOS NETO, M.C.; SILVA, L.C.; TROUW, R.A.J.; JANASI, V.A.; 2004. Província Mantiqueira. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C.D.R.; BRITO-NEVES, B.B. (EDS.), *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*, p. 203-234.

- HIRUMA, S.T. Denudation history of the Bocaina Plateau, Serra do Mar, shoutheastern Brazil: relationships to Gondwana breakup and passive margin development. *Gondwana Research*, v. 18, p. 674-87, 2010.
- HÖLTING, B.; HAERTLE, T.; HOHBERGER, K.; NACHTIGALL, K. H.; VILLINGER, E.; WEINZIERL, W.; WROBEL, J.P. Kozept zur ermttliung der schutzfunktion der grundwasserüberdeckung. *Geologisches Jarhbuch*, v. 63, p. 5-24, 1995.
- INAG, *Informação Cartográfica dos Planos de Bacia. Sistematização das Figuras e Cartas a Imprimir em Papel*. EPPNA, Lisboa, 26p, 1998.
- IPT-INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS- *Mapa Geológico do Estado de São Paulo* escala 1:500.000 – São Paulo, 1981.
- JEANNIN, P.-Y.; CORNATON, F.; ZWAHLEN, F.; PERROCHET, P. VULK: a tool for intrinsic vulnerability assessment and validation. Besançon. *Sci. Tech. Envir.*, v.13, p. 185-190, 2001.
- KARMANN, I. *Evolução e dinâmica atual do sistema cárstico do alto Vale do Rio Ribeira de Iguape, sudeste do estado de São Paulo*. 1994. 241 f. Tese (Doutorado). Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo.
- KARMANN, I. Ciclo da Água, Água subterrânea e sua ação geológica. In TEIXEIRA, W, FAIRCHILD, T.R., TOLEDO, M.C.M., TAIOLI, F. *Decifrando a Terra*. 2º Ed São Paulo. Oficina de Textos, 2009. p. 186-209.
- KARMANN, I.; SANCHEZ, L.E. Distribuição das rochas carbonáticas e províncias espeleológicas do Brasil. *Espeleo-Tema*, p. 105-167, 1979.
- KARMANN, I.; SANCHEZ, L.E. Speleological Provinces in Brazil. IX *Congreso Internacional de Espeleologia*, Barcelona, v. 1, p. 151-153, 1986.
- KARMANN, I. & FERRARI, J.A. Carste e cavernas do Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (PETAR), SP. In: SCHOBENHAUS, C.; CAMPOS, D.A.; QUEIROZ, E.T.; WINGE, M.; BERBERT-BORN, M.L.C. *Sítios geológicos e paleontológicos do Brasil* (eds.) p. 401-413. 2002
- KAVOURI K.; PLAGNES V.; DÖRFLIGER N.; TRÉMOULET J.; REJIBA F.; MARCHET P. PaPRIKa: a method for estimating karst resource and source vulnerability? Application to the Ouyse karst system (southwest France). *Hydrogeology Journal*, v. 9, p. 339-353, 2011.
- KELLER, E.A.; PINTER, N. *Active tectonics – Earthquakes, Uplift, and Landscape*. New Jersey, USA, Prentice Hall. 338 p., 1996.
- KRONE, R. *As grutas calcárias do vale do rio Ribeira de Iguape*. (transcrição do vol. VX Arquivos do Museu Nacional, 1909, Rio de Janeiro), v. 8, n. 3, p.248-297. 1950
- MAGIERA, P. Methoden zur Abschätzung der Verschmutzungsempfindlichkeit des Grundwassers. – *Grundwasser*, v. 3, p. 103-114, 2000.
- MALISK, P.; SVASTA, J. REKS, an alternative method of karst groundwater vulnerability estimation. PROCEEDINGS OF THE 29TH CONGRESS OF THE IAH HYDROGEOLOGY AND LAND USE MANEGEMENT. Bratislava. p 79-85. 1999.
- MARGAT, J. Vulnérabilité des nappes d'eau souterraine à la pollution. BRGM Publication 68 SGL 198 HYD; Orléans, 1968.

- MARINI, O.J.; TREIN, E.; FUCK, R.A. O Grupo Açungui no estado do Paraná. In: BIGARELLA, J.J.; SALAMUNI, R.; PINTO, V.M. Geologia do Pré-Devoniano e Intrusivas Subseqüentes da porção oriental do estado do Paraná. *Boletim Paranaense de Geociências*, v. 23, n. 25, p. 43-104, 1967
- PÉTELET G.E.; DÖRFLIGER, N.; CROCHET, P. RISKE: Méthode d'évaluation multicritère de la cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques. Applications aux systèmes des Fontanilles et Cent-Fonts (Hérault, France), *Hydrogéologie*, v. 4, p. 71-88, 2000.
- PIRES, F.A. *Análise paleoambiental e estratigráfica de sequências metassedimentares (Grupo Açungui), na região de Iporanga e Apiaí-SP*. 1990. 181f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- PONÇANO, W.L.; CARNEIRO, C.D.R.; BISTRICHI, C.A.; ALMEIDA, F.F.M.; PRANDINI, F.L. *Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo*. 1981. São Paulo, IPT, v. 1, n. 1183.
- PRANVILLE J, PLAGNES V, REJIBA F, TREMOULET J. Cartographie de la vulnérabilité sur la partie sud du causse de Gramat: application de la méthode RISKE 2, *Revue "Géologues"*, n. 156, p. 44-48, 2008.
- RAO, P.; HORNBY, A.; JESSUP, R. Indices for ranking the potential for pesticide contamination of groundwater. *Soil and Crop Science Society of Florida Proceedings*. v.44. p.1-8. 1985.
- RICCOMINI, C.; COIMBRA, A.M. Geologia da bacia sedimentar. In: NEGRO JR, A.; FERREIRA, A.A.; ALONSO, U.R.; LUZ, P.A.C., eds., *Fotos da Cidade de São Paulo*. São Paulo, p. 37-94, 1992.
- RICCOMINI, C. Padrão de fraturamentos do Maciço Alcalino de Cananéia, Estado de São Paulo: relações com a tectônica mesozóico-cenozóica do sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 25, p. 79-84, 1995.
- RICCOMINI C.; SANT'ANNA L.G.; FERRARI A.L. 2004. Evolução geológica do rift continental do Sudeste do Brasil. In: MANTESSO-NETO V.; BARTORELLI A.; CARNEIRO C.D.R.; BRITO-NEVES B.B. ORGS. 2004. *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo: Ed. Beca. p. 383-405.
- RODRIGUES, C.; ADAMI, S. - Técnicas Fundamentais para o Estudo de Bacias Hidrográficas. In VENTURI, L. A. B. (org) *Praticando Geografia: técnicas de campo e laboratório*. São Paulo Oficina de Textos. 2005. p. 147-166.
- ROSS, J. L. S. *A morfogênese da bacia do Ribeira do Iguape e os sistemas ambientais*. Espaço e Tempo. 2002. São Paulo. n. 12. 16p.
- ROSS, J. L. S.; MOROZ, I. C. - *Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo*. FFLCH-USP-IPT-FAPESP. São Paulo. 1997. Escala 1:500.000.
- SADOWSKI, G. R. A megafalha de Cubatão no Sudeste Brasileiro. *Boletim IG-USP*. Série Científica, v. 22, p. 15-28, 1991.
- SALLUN FILHO, W.; FERRARI, J. A.; HIRUMA, S. T.; SALLUN, A. E. M.; KARMANN, I. O carste no plano de manejo do Parque Estadual Intervales e zona de amortecimento, Estado de São Paulo, Brasil. *REM. Revista Escola de Minas*, v. 63, p. 441-448, 2010.

- SALLUN FILHO, W.; FERRARI, A.J.; SALLUN, A.E.M.; HIRUMA, S.T.; KARMANN, I. 4.1.2. Carste. São Paulo: Fundação Florestal (FF/SMA-SP), 2008. 32 p. In: FURLAN, S.A.; LEITE, S.A. 2008. Plano de manejo do Parque Estadual Intervales. Acesso em 20 de maio 2012 - Disponível em <http://www.fflorestal.sp.gov.br/media/uploads/planosmanej/PEIntervales/1.%20Volume%20Principal/cad%202_DIAGNOSTICO%20E%20AVALIACAO/pag91_138CARSTE.pdf>
- SBE. Cadastro nacional de cavernas do Brasil (CNC). Campinas: SBE, 2014. Disponível em: <<http://www.cavernas.org.br>>. Acesso em: 25 janeiro de 2014.
- SCHMASSMANN, S.; FILLIPONI, M.; JEANNIN, P.Y.; PARRIAUX, A.; MALARD, A.; VOUILAMOZ, J. KarstALEA - a scientifically based method to predict karst-related hazards in underground constructions. *EGU General Assembly*. Vienna, Austria, p.114-159, 2010.
- SIGA JUNIOR, O.; BASEI, M. A. S.; PASSARELLI, C. R.; SATO, K.; CURY, L. F.; MCREATH, I. Lower and Upper Neoproterozoic magmatic records in Itaiacoca Belt (Paraná-Brazil): Zircon ages and lithostratigraphy studies. *Gondwana Research*. v. 15, n. 2, p. 197-208, 2009.
- SIGA JÚNIOR, O.; CURY, L. F.; MCREATH, I.; RIBEIRO, L. M. A. L.; SATO, K.; BASEI, M. A. S.; PASSARELLI, C. R. Geology and geochronology of the Betara region in south-southeastern Brazil: evidence for possible Statherian (1.80-1.75 Ga) and Calymmian (1.50-1.45 Ga) extension events. *Gondwana Research*, v. 19, n. 1, p. 260-274, 2011.
- SMA - Secretaria de Meio Ambiente do Estado de São Paulo. *Plano de Gestão Ambiental*, fase I. Parque Estadual Intervales. São Paulo, 1988.
- SMITH, D. I. The nature of karst aquifers and their susceptibility to pollution. In: WILLIAMS, P. W. (Ed.). *Karst Terrains: Environmental changes and human impact*. Cremlingen-Destedt: Catena-Verlag. p. 41-58, 1993.
- TROIANO, J.; MARADE J.; SPURLOCK, F. Empirical modeling of spatial vulnerability applied to a norflurazon retrospective well study in California. *Journal of Environmental Quality*, v. 28, p. 397-403, 1999.
- TURNER, S.; REGELOUS, M.; KELLEY, S.; HAWKESWORTH, C.; MANTOVANI, M. Magmatism and continental break-up in the South Atlantic: high precision ^{40}Ar - ^{39}Ar geochronology. *Earth Planet. Sc. Lett.*, v. 121, p 333-348, 1994.
- VAN BEYNEN, P.; TOWNSEND, K. A disturbance index for karst environments: *Environmental Management*, v. 36, p. 101-116, 2005.
- VAN BEYNEN, P.; FELICIANO, N.; NORTH, L.; TOWNSEND, K. Application of the karst disturbance index in Hillsborough County, Florida: *Environmental Management*, v. 39, p. 261-277, 2007.
- VAN BEYNEN, P.; BRINKMANN, R.; VAN BEYNEN, K. A sustentability index for karst environments. *Journal of cave and karst studies*, v. 74. n. 2, p. 221-234, 2012.
- VAN STEMPVOORT, D.; EWERT, L.; WASSENAAR, L. AVI: A method for groundwater protection mapping in the Prairie Provinces of Canada. *PPWD Pilot Project*. 1992 Groundwater and Contaminants Project, Environmental Sciences Division, National Hydrology Research Institute.

- VILLELA, S. M.; MATTOS, A. *Hidrologia aplicada*. McGraw-Hill do Brasil, São Paulo, 1975, 245p.
- VLAICU, M.; MUNTEANU, C.M. 2008. Karst groundwaters vulnerability assessment methods. *Travaux de l'institut de spéologie "Émile Racovitza"*, XLVII, p. 107-118.
- VRBA, J.; ZOPOROZEC, A. Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability. *International Contributions to Hydrogeology* (IAH), v 16, 131 p., 1994
- WILLIAMS, P.W. *Karst Terrains: Environmental changes and human impact*. Cremlingen-Destedt. Catena-Verlag, 1993. p. 251-268.
- WILLIAMS, P.W. The role of the epikarst in karst and cave hydrogeology: a review. *International Journal of Speleology*. Bologna (Italy), v. 37, n. 1. p.1-10, 2008.