



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA

Fernanda Cristina Rodrigues de Souza

**ANÁLISE MULTIESCALAR DO CONTEXTO DAS CAVERNAS NAS BACIAS
HIDROGRÁFICAS DOS RIOS TOCANTINS/ ARAGUAIA, PARANÁ E SÃO
VICENTE**

Belo Horizonte

2020

Fernanda Cristina Rodrigues de Souza

**ANÁLISE MULTIESCALAR DO CONTEXTO DAS CAVERNAS NAS BACIAS
HIDROGRÁFICAS DOS RIOS TOCANTINS/ ARAGUAIA, PARANÁ E SÃO
VICENTE**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Geografia da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial à obtenção do título de Doutora em Geografia.

Área de Concentração: Análise Ambiental

Linha de Pesquisa: Geomorfologia e Meio Ambiente

Orientadora: Profa. Dra. Vilma Lúcia Macagnan Carvalho

Belo Horizonte

2020

S729a
2020

Souza, Fernanda Cristina Rodrigues de.

Análise multiescalar do contexto das cavernas nas bacias hidrográficas dos rios Tocantins/Araguaia, Paranã e São Vicente [manuscrito] / Fernanda Cristina Rodrigues de Souza. – 2020.

188 f., enc. il. (principalmente color.)

Orientadora: Vilma Lúcia Macagnan Carvalho.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Geografia, 2020.

Área de concentração: Análise Ambiental.

Linha de pesquisa: Geomorfologia e Meio Ambiente.

Bibliografia: f. 177-188.

1. Geomorfologia – Teses. 2. Espeleologia – Teses. 3. Relevo – Teses. 4. Carste – Teses. 5. Tocantins, Rio, Bacia – Teses. 6. Araguaia, Rio, Bacia - Teses. I. Carvalho, Vilma Lúcia Macagnan. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Departamento de Geografia. III. Título.

CDU: 551.4



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
COLEGIADO DO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

FOLHA DE APROVAÇÃO

**ANÁLISE MULTIESCALAR DO CONTEXTO DAS CAVERNAS NAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS RIOS
TOCANTINS/ ARAGUAIA, PARANÁ E SÃO VICENTE**

FERNANDA CRISTINA RODRIGUES DE SOUZA

Tese submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOGRAFIA, como requisito para obtenção do grau de Doutor em GEOGRAFIA, área de concentração ANÁLISE AMBIENTAL.

Aprovada em 04 de setembro de 2020, pela banca constituída pelos membros:

Prof(a). Vilma Lucia Macagnan Carvalho - Orientadora (IGC/UFMG)

Prof(a). Fábio Soares de Oliveira (IGC/UFMG)

Prof(a). Allaoua Saadi (IGC/UFMG)

Prof(a). Leonardo Cristian Rocha (UFSJ)

Prof(a). Luiz Eduardo Panisset Travassos (PUC Minas)

Prof(a). Luis Felipe Soares Cherem (UFG)

Belo Horizonte, 04 de setembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Luis Felipe Soares Cherem, Usuário Externo**, em 27/10/2020, às 16:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luiz Eduardo Panisset Travassos, Usuário Externo**, em 20/11/2020, às 20:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Fabio Soares de Oliveira, Professor do Magistério Superior**, em 01/12/2020, às 11:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Vilma Lucia Macagnan Carvalho, Professora do Magistério Superior**, em 11/12/2020, às 18:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Allaoua Saadi, Membro de comissão**, em 13/12/2020, às 10:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Leonardo Cristian Rocha, Usuário Externo**, em 05/01/2021, às 16:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0337642** e o código CRC **A60E318E**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço:

- Todos os cidadãos brasileiros, que com os seus impostos visam garantir os direitos públicos a educação, saúde, segurança, esporte e lazer;
- Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES);
- Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq);
- Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG);
- Instituto de Geociências (IGC/UFMG);
- Programa de Pós-Graduação em Geografia (IGC/UFMG);
- Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Geografia (IGC/UFMG);
- Profa. Dra. Vilma Lúcia Macagnan Carvalho;
- Prof. Dr. Luis Felipe Soares Cherem;
- Professores do IGC/UFMG;
- Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio);
- Grupo Bambuí de Pesquisas Espeleológicas (GBPE);
- Grupo Espeleológico Goiano (GREGO);
- Espeleo Grupo de Brasília (EGB);
- Minha família.

“O ensino será ministrado com base nos seguintes princípios:
liberdade de aprender, ensinar, pesquisar e divulgar o pensamento, a arte e o saber”

(BRASIL, 1988, Art. 206, II)

RESUMO

O estudo multiescalar na análise das áreas de influência das cavernas tem sido discutido e foram estabelecidos critérios de investigação em níveis locais e regionais para fins de licenciamento ambiental. Verifica-se a importância de análises aprofundadas sobre o alcance da área influenciada pelas cavernas, principalmente para fins científicos. Por isso, este trabalho tem como objetivo analisar em domínio multiescalar o contexto litoestrutural e geomorfológico associado às cavernas desenvolvidas em rochas carbonáticas nas bacias hidrográficas dos rios Tocantins/ Araguaia, Paranã e São Vicente. Os procedimentos metodológicos utilizados consistiram nas seguintes etapas: a) revisão bibliográfica; b) estudo das características fisiográficas e sua relação com a distribuição das cavernas na bacia hidrográfica do rio Tocantins/ Araguaia; c) interpretação dos principais fatores associados ao desenvolvimento do relevo cárstico na bacia hidrográfica do rio Paranã; d) levantamento das características e fatores de desenvolvimento da Lapa São Vicente I e; e) interpretação das escalas espaciais no estudo geomorfológico das bacias hidrográficas estudadas. Verifica-se que na bacia hidrográfica do rio Tocantins/Araguaia as cavernas desenvolvidas em rochas carbonáticas estão associadas às litologias pertencentes ao Grupo Bambuí e Grupo Xambioá ou ao contato entre rochas do Grupo Bambuí e Grupo Paranoá. Nessa escala de estudo constata-se que as cavernas se desenvolvem em áreas com falhas, dobras e fraturas. A maioria das cavernas se desenvolve em áreas dos Patamares do São Francisco, Planalto Central e Planalto dos Guimarães. A bacia hidrográfica do rio Paranã possui conjuntos de cavernas vinculados às rochas carbonáticas do Grupo Bambuí, Formação Lagoa do Jacaré. As áreas de patamares, caracterizadas por declividades entre 8 e 45%, e a sua posição geográfica próxima ao *front* de cuesta favorecem o desenvolvimento das cavernas. Nessa escala de estudo, as cavernas se desenvolvem em áreas fraturadas, mas não é possível realizar considerações sobre as contribuições estruturais na determinação do padrão planimétrico espeleológico. Na bacia hidrográfica do rio São Vicente é possível identificar diferentes fases de evolução do relevo cárstico: 1) relevo cárstico composto por maciços, sumidouros, ressurgência, lapíás e cavernas, onde há predomínio de dissolução e erosão remontante; 2) relevo plano a suave ondulado, intercalado por mogotes e drenagem superficial; 3) relevo plano, contendo planícies, solos profundos, drenagem superficial e com predomínio de processos deposicionais. Nessa área, a maioria das cavernas localiza-se na Serra do Calcário, que é composta por conjuntos de maciços de calcários, dolomitos, margas e brechas da Formação Sete Lagoas, Grupo Bambuí. Os acamamentos litológicos são os principais tipos de estruturas que favorecem a infiltração da água e a formação da Lapa São Vicente I. A morfologia planimétrica da Lapa São Vicente I mostra que o seu desenvolvimento resulta, principalmente, da atividade geoquímica exercida pela atuação do rio São Vicente nas rochas carbonáticas friáveis e porosas que formam a Serra do Calcário. Verifica-se que a escala espacial analisada é proporcional ao nível de detalhamento das informações geomorfológicas obtidas. Nas bacias hidrográficas dos rios São Vicente e Paranã se observa que as cavernas estão diretamente associadas ao desenvolvimento do relevo do seu entorno, especialmente porque as cavernas, sumidouros e maciços carbonáticos funcionam como níveis de base que controlam os processos de expansão dessas bacias. A bacia hidrográfica do rio Tocantins/Araguaia, por sua vez, recebe influências indiretas das cavernas, uma vez que eventos geotectônicos exercem controles predominantes na dinâmica do relevo dessa área. Contudo, a expansão da bacia hidrográfica do rio Tocantins/Araguaia na sua parte sudeste está associada à estruturação do *front* de Cuesta de Goiás, Tocantins e Bahia (Serra Geral de Goiás e Tocantins), desenvolvimento das cavernas e do relevo cárstico. Sugere-se que estudos multiescalares em áreas cársticas contemplem: unidade geomorfológica, unidade espeleológica e unidades hidrográficas.

Palavras-chave: Geomorfologia; Escala; Espeleologia; Grupo Bambuí; Relevo Cárstico.

ABSTRACT

Multiscale research on the cave's areas of influence has been discussed and investigation criteria established, at local and regional levels, for the purposes of environmental licensing. The importance of in-depth analyses on the reach of the areas influenced by the caves is stated, mainly for scientific purposes. Therefore, this work aims to analyze, in a multiscale way, the lithostructural and geomorphological context associated with caves developed from carbonate rocks in the hydrographic basins of the Tocantins/Araguaia, Paranã and São Vicente rivers. The methodological procedures used consisted of the following steps: a) a bibliographic review; b) a study of physiographic characteristics and their relationship with cave distribution in the Tocantins/Araguaia River hydrographic basin; c) interpretation of the main factors linked to the development of karst relief in the Paranã River hydrographic basin; d) research on the characteristics and development factors of the São Vicente I grotto; e) interpretation of spatial scales in the geomorphological research on the studied hydrographic basins. It has been observed that the caves developed in carbonate rocks in the Tocantins/Araguaia river basin are associated with lithologies belonging to the Bambuí Group and the Xambioá Group or to the contact between rocks of the Bambuí Group and the Paranoá Group. In this study's scale, the caves appear to develop in areas with faults, folds and fractures. Most of the caves develop in areas such as São Francisco, Planalto Central and Planalto dos Guimarães plateaus. The Paranã River hydrographic basin has sets of caves linked to the carbonate rocks of the Bambuí Group, Lagoa do Jacaré Formation. The plateau areas, characterized by declivities of between 8% and 45%, and their geographical position close to the cuesta front, lend themselves to the development of the caves. In this study's scale, the caves develop in fractured areas, but it is not possible to make assumptions about the structural contributions in determining the speleological planimetric pattern. In the São Vicente River hydrographic basin, different phases of evolution of the karst relief can be identified: 1) karst relief composed of massifs, sinkhole, resurgence, lapies and caves, where there is a predominance of dissolution and upwards erosion; 2) flat to smooth wave relief, interspersed with mogotes and surface drainage; 3) flat relief with plains, deep soils, superficial drainage and predominance of depositional processes. In this area, most of the caves are located in the Serra do Calcário, which is made up of clusters of limestone, dolomites, marls and breaches in the Sete Lagoas Formation, Bambuí Group. The lithological beddings are the main types of structures that allow water infiltration and the formation of the São Vicente I grotto. The planimetric morphology of São Vicente I grotto shows that its development comes mainly from the geochemical activity exerted by the action of the São Vicente river upon the friable and porous carbonate rocks that form Serra do Calcário. The analyzed spatial scale is proportional to the level of detail of the geomorphological information obtained. In the hydrographic basins of the São Vicente and Paranã rivers, it has been observed that the caves are directly associated with the development of the surrounding relief, especially because the caves, sinkholes and carbonate massifs function as base levels that control the expansion processes of these basins. The hydrographic basin of the Tocantins/Araguaia river, in turn, is indirectly influenced from the caves, since geotectonic events exercise the predominant controls over the dynamics of the relief in this area. However, the expansion of the Tocantins/Araguaia river hydrographic basin, in the southeastern part, is associated with the structuring of the front cuesta of Goiás, Tocantins and Bahia (Serra Geral de Goiás and Tocantins), the development of the caves and the karst relief. It is therefore suggested that multiscale studies in karst areas include: a geomorphological unit, a speleological unit and hydrographic units.

Keywords: Geomorphology; Scale; Speleology; Bambuí Group; Karst Relief.

RESUMEN

El estudio multiescala en el análisis de las áreas de influencia de las cavernas es discutido hace tiempo, y fueron definidos criterios de investigación a nivel local y regional para fines de licencia ambiental. Se ha verificado la importancia de los análisis en profundidad sobre el alcance del área influenciada por las cavernas, principalmente con fines científicos. Por lo tanto, este trabajo tiene como objetivo analizar en un dominio multiescala el contexto litoestructural y geomorfológico asociado a las cavernas desarrolladas en rocas carbonatadas en las cuencas de los ríos Tocantins/Araguaia, Paranã y São Vicente. Los procedimientos metodológicos utilizados consistieron en las etapas a continuación: a) revisión de la literatura; b) estudio de las características fisiográficas y su relación con la distribución de cavernas en la cuenca del río Tocantins/Araguaia; c) interpretación de los principales factores asociados al desarrollo del relieve kárstico en la cuenca del río Paranã; d) análisis de las características y factores de desarrollo de la gruta Lapa São Vicente I; e) interpretación de escalas espaciales en el estudio geomorfológico de las cuencas hidrográficas estudiadas. Fue verificado que, en la cuenca del río Tocantins/Araguaia, las cavernas desarrolladas en rocas carbonatadas están asociadas a las litologías pertenecientes a los grupos Bambuí y Xambioá o al contacto entre rocas de los grupos Bambuí y Paranoá. En esta escala de estudio, fue constatado que las cavernas se desarrollan en áreas con fallas, pliegues y fracturas. La mayoría de las cavernas se desarrollan en áreas de los plateaus de los Patamares del río São Francisco, del Planalto Central y del Planalto de Guimarães. La cuenca del río Paranã tiene conjuntos de cavernas vinculados a las rocas carbonatadas del grupo Bambuí, de la formación de Lagoa do Jacaré. Las zonas de plateaus, caracterizadas por pendientes entre 8% y 45%, y su posición geográfica cercana al frente de la cuesta favorecen el desarrollo de cavernas. En esta escala de estudio, las cavernas se desarrollan en áreas fracturadas, pero no es posible hacer consideraciones sobre las contribuciones estructurales en la determinación del patrón planimétrico espeleológico. En la cuenca del río São Vicente es posible identificar diferentes fases de evolución del relieve kárstico: 1) relieve kárstico compuesto por macizos, sumideros, resurgimiento, grutas y cavernas, donde hay predominio de disolución y erosión regresiva; 2) relieve ondulado plano a liso, intercalado por mogotes y drenaje superficial; 3) relieve plano, conteniendo llanuras, suelos profundos, drenaje superficial y con predominio de procesos de deposición. En esta área, la mayoría de las cavernas están presentes en Serra do Calcário, formada por conjuntos de macizos calcáreos, dolomitas, margas y brechas de la formación Sete Lagoas, grupo Bambuí. Los asentamientos litológicos son los principales tipos de estructuras que favorecen la infiltración de agua y la formación de la gruta Lapa São Vicente I. La morfología planimétrica de Lapa São Vicente I muestra que su desarrollo resulta principalmente de la actividad geoquímica ejercida por el río São Vicente en las rocas carbonatadas friables y porosas que forman Serra do Calcário. Fue verificado que la escala espacial analizada es proporcional al nivel de detallado de la información geomorfológica obtenida. En las cuencas hidrográficas de los ríos São Vicente y Paranã, fue observado que las cavernas están directamente asociadas al desarrollo del relieve de su entorno, especialmente porque las cavernas, sumideros y macizos de carbonatos funcionan como niveles de base que controlan los procesos de expansión de estas cuencas. La cuenca del río Tocantins/Araguaia, a su vez, recibe influencias indirectas de las cavernas, ya que los eventos geotectónicos ejercen control predominante en la dinámica del relieve de esta área. Pero la expansión de la cuenca del río Tocantins/Araguaia en su parte sureste está relacionada a la estructuración del frente de la Cuesta de Goiás, Tocantins y Bahía (Serra Geral de Goiás y Tocantins), el desarrollo de cavernas y el relieve kárstico. Es sugerible que los estudios multiescala en áreas kársticas incluyan: unidad geomorfológica, unidad espeleológica y unidades hidrográficas.

Palabras clave: Geomorfología; Escala; Espeleología; Grupo Bambuí; Relieve Kárstico.

LISTA DE FIGURAS

Figura 0.1: Localização das bacias hidrográficas dos rios Tocantins/ Araguaia, Paranã e São Vicente	24
Figura 1.1: Histograma do procedimento metodológico utilizado para obter dados de lineamentos estruturais na bacia hidrográfica do Paranã	33
Figura 1.2: Histograma do procedimento metodológico do estudo hidrográfico na bacia hidrográfica do Paranã e sua relação com a geomorfologia cárstica	36
Figura 2.1: Representação dos planos de abordagem espacial e temporal	41
Figura 2.2. Unidades taxonômicas de classificação do relevo	44
Figura 2.3: Elementos de análise fluvial conforme as escalas espaciais e temporais	45
Figura 2.4: Chave de classificação do grau de relevância de cavernas	48
Figura 2.5: Modelo de uma paisagem cárstica com ênfase no exocarste, epicarste e endocarste	50
Figura 2.6: Karren na região de Monjolos (MG)	51
Figura 2.7: Tipos de dolinas conforme os processos envolvidos na sua gênese	53
Figura 2.8: Processo de desenvolvimento do relevo exocárstico	54
Figura 2.9: Modelo de paisagem fluviocárstica	55
Figura 2.10: Características essenciais do processo cárstico e variáveis independentes que guiam o desenvolvimento das paisagens cársticas	59
Figura 2.11: Evolução espeleológica paragenética	65
Figura 2.12: Padrão planimétrico das cavernas	68
Figura 2.13: Relação entre os tipos de recarga, os tipos de porosidades dominantes e os padrões planimétricos das cavernas	69
Figura 3.1: Localização da bacia hidrográfica do rio Tocantins/Araguaia no contexto nacional	71
Figura 3.2: Distribuição das cavernas desenvolvidas em rochas carbonáticas na bacia hidrográfica do rio Tocantins/Araguaia e suas sub-bacias	73
Figura 3.3: Densidade das cavernas desenvolvidas em rochas carbonáticas na bacia hidrográfica do rio Tocantins/Araguaia e suas sub-bacias	74
Figura 3.4: Províncias estruturais na bacia hidrográfica do Tocantins/ Araguaia	76
Figura 3.5: Contexto litológico da bacia hidrográfica do rio Tocantins/ Araguaia	78
Figura 3.6: Distribuição das cavernas desenvolvidas em rochas carbonáticas na bacia hidrográfica do rio Tocantins/Araguaia	81
Figura 3.7: Regiões cársticas na bacia hidrográfica do rio Tocantins/Araguaia	82

Figura 3.8: Principais estruturas geológicas na bacia hidrográfica do Tocantins/Araguaia	84
Figura 3.9: Compartimentação geomorfológica da bacia hidrográfica do rio Tocantins/Araguaia	87
Figura 3.10: Distribuição das cavernas nos compartimentos geomorfológicos da bacia hidrográfica do rio Tocantins/Araguaia	90
Figura 3.11: Perfis topográficos na bacia hidrográfica do rio Tocantins/Araguaia ...	93
Figura 3.12: Altimetria e declividade na bacia hidrográfica do rio Tocantins/Araguaia	94
Figura 4.1: Contexto litológico na bacia hidrográfica do rio Paranã e localização das cavernas desenvolvidas em rochas carbonáticas	99
Figura 4.2: Localização das cavernas na bacia hidrográfica do Paranã, conforme as unidades litológicas associadas ao seu desenvolvimento	100
Figura 4.3: Grupo Bambuí no vale do rio Paranã	102
Figura 4.4: Contexto estrutural na bacia hidrográfica do rio Paranã e localização das cavernas desenvolvidas em rochas carbonáticas	105
Figura 4.5: Diagrama de rosetas dos lineamentos estruturais na bacia hidrográfica do rio Paranã	106
Figura 4.6: Rede de drenagem na bacia hidrográfica do rio Paranã e localização das cavernas desenvolvidas em rochas carbonáticas	109
Figura 4.7: Rede de drenagem na bacia hidrográfica do rio Paranã obtidas com diferentes métodos	110
Figura 4.8: Drenagens associadas aos litotipos e declividade na bacia hidrográfica do rio Paranã	113
Figura 4.9: Densidade de cavernas e de drenagens na bacia hidrográfica do rio Paranã	114
Figura 4.10: Principais feições geomorfológicas na bacia hidrográfica do rio Paranã	116
Figura 4.11: Altimetria e declividade na bacia hidrográfica do rio Paranã	117
Figura 4.12: Compartimentos geomorfológicos na bacia hidrográfica do rio Paranã	119
Figura 4.13: Compartimentos geomorfológicos na bacia hidrográfica do rio Paranã – depressões e patamares	121
Figura 4.14: Rio Paranã a jusante da Chapada dos Veadeiros	122

Figura 4.15: Compartimentos geomorfológicos na bacia hidrográfica do rio Paranã – planaltos e depressões	123
Figura 4.16: Cavernas desenvolvidas em rochas carbonáticas e sua distribuição nos compartimentos geomorfológicos na bacia hidrográfica do rio Paranã	124
Figura 4.17: Orientações de perfis topográficos com a elevação do terreno na bacia hidrográfica do rio Paranã	126
Figura 4.18: Perfis topográficos na bacia hidrográfica do rio Paranã	128
Figura 4.19: Principais etapas evolutivas no relevo da bacia hidrográfica do rio Paranã	130
Figura 5.1: Contexto hidrográfico de localização da Lapa São Vicente I	133
Figura 5.2: Bacia hidrográfica do rio São Vicente	134
Figura 5.3: Características dos calcários do Grupo Bambuí na região estudada	135
Figura 5.4: Características de acamamento das rochas do Grupo Bambuí na região estudada	136
Figura 5.5: Planta baixa da Lapa São Vicente I	137
Figura 5.6: Cortes transversais da Lapa São Vicente I	138
Figura 5.7: Características morfológicas da Lapa São Vicente I	140
Figura 5.8: Contexto litológico de localização da Lapa São Vicente I	141
Figura 5.9: Contexto litológico e rugosidade na bacia hidrográfica do rio São Vicente	142
Figura 5.10: Evolução da paisagem e formação de mogotes em áreas cársticas	143
Figura 5.11: Estruturas geológicas na bacia hidrográfica do rio São Vicente	145
Figura 5.12: Declividade na bacia hidrográfica do rio São Vicente	147
Figura 5.13: Altitude na bacia hidrográfica do rio São Vicente	148
Figura 5.14: Elevação topográfica na bacia hidrográfica do rio São Vicente	149
Figura 5.15: Perfis topográficos na bacia hidrográfica do rio São Vicente	151
Figura 5.16: Relação Declividade-Extensão (RDE) total na bacia hidrográfica do rio São Vicente	152
Figura 5.17: Corredeiras e quedas d'água na Lapa São Vicente I	153
Figura 5.18: Fácies da Formação Sete Lagoas	155
Figura 6.1: Relação comparativa das escalas de análises litológicas no estudo das cavernas	159
Figura 6.2: Relação comparativa das escalas de dados de estruturas geológicas no estudo das cavernas	161

Figura 6.3: Relação comparativa das escalas de dados de declividade no estudo das cavernas	163
Figura 6.4: Perfis litoestratigráfico da região do Vão do Paranã e entorno	164
Figura 6.5: Modelo de desenvolvimento do relevo na bacia hidrográfica do rio São Vicente	166
Figura 6.6: Superfície geomorfológica na bacia hidrográfica do rio São Vicente	167
Figura 6.7: Processo de mudança na área da bacia hidrográfica do rio Tocantins/Araguaia	172

LISTA DE QUADROS

Quadro 0.1: As cavernas da bacia hidrográfica do rio Paranã situadas entre as maiores cavernas do Brasil	26
Quadro 0.2: As cavernas da bacia hidrográfica do rio Paranã situadas entre as mais profundas do Brasil	26
Quadro 1.1: Metodologia do estudo conforme a escala de análise	39
Quadro 2.1: Exemplo de escalas indicadas para tipos de informações em Geociências	40
Quadro 2.2: Escalas de análises geomorfológicas	42
Quadro 2.3: Uso de diferentes escalas em estudos geomorfológicos	44
Quadro 2.4: Hierarquia e dependência de variáveis do sistema fluvial em condições naturais com a escala temporal	46
Quadro 3.1: Elementos geológicos e geomorfológicos preferenciais para distribuição das cavernas desenvolvidas em rochas carbonáticas na bacia hidrográfica do rio Tocantins/Araguaia	95
Quadro 4.1: Elementos geológicos e geomorfológicos preferenciais para distribuição das cavernas desenvolvidas em rochas carbonáticas na bacia hidrográfica do rio Paranã	131
Quadro 5.1: Elementos geológicos e geomorfológicos preferenciais para distribuição das cavernas desenvolvidas em rochas carbonáticas na bacia hidrográfica do rio São Vicente	154
Quadro 6.1: Principais dados espeleométricos nas bacias hidrográficas dos rios Tocantins/Araguaia, Paranã e São Vicente	157
Quadro 6.2: Relação entre informações litológicas e interpretação da distribuição das cavernas	158
Quadro 6.3: Relação entre estruturas geológicas e interpretação da distribuição das cavernas	160
Quadro 6.4: Relação entre geomorfologia e interpretação da distribuição das cavernas	162
Quadro 6.5: Relações entre espaço, tempo, processos predominantes e contribuições das cavernas no relevo do entorno	168
Quadro 6.6: Etapas de processos morfogenéticos na região central do Brasil	169

LISTA DE GRÁFICOS E TABELAS

Gráfico 2.1: Variação da solubilidade de calcita e dolomita com a temperatura	62
Gráfico 2.2: Variação da solubilidade de calcita e dolomita com a temperatura e CO ₂	62
Gráfico 3.1: Quantidade de cavernas associadas aos tipos litológicos	72
Gráfico 3.2: Quantidade de cavernas desenvolvidas em rochas carbonáticas nas unidades hidrográficas	74
Gráfico 3.3: Distribuição das cavernas nas regiões cársticas	80
Gráfico 3.4: Direção preferencial de estruturas geológicas na bacia hidrográfica do rio Tocantins/Araguaia	85
Gráfico 3.5: Distribuição das cavernas desenvolvidas em rochas carbonáticas nas unidades de relevo da bacia hidrográfica do rio Tocantins/Araguaia	89
Gráfico 4.1: Percentual de cavernas desenvolvidas em rochas carbonáticas e siliciclásticas na bacia hidrográfica do rio Paranã	97
Gráfico 4.2: Quantidade de cavernas na bacia hidrográfica do rio Paranã	103
Gráfico 4.3: Quantidade drenagens associadas às cavernas em diferentes contextos litológicos	111
Tabela 4.1: Quantidade de cavernas na bacia hidrográfica do Paranã, associadas às unidades litológicas	103
Tabela 4.2: Fator de Assimetria da bacia hidrográfica do rio Paranã	107

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1.1: Cálculo de densidade de cavernas na bacia hidrográfica do rio Paraná	31
Equação 1.2: Fator de assimetria de bacia hidrográfica	34
Equação 2.1: Formação do Ácido Carbônico	56
Equação 2.2: Reação da calcita com o ácido carbônico	57
Equação 2.3: Dissolução do calcário	57
Equação 2.4: Precipitação do bicarbonato de cálcio	57

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANA	Agência Nacional de Águas
CaCO ₃	Calcita
Ca (HCO ₃) ₂	Bicarbonato de cálcio
CAP	Clube Alpino Paulista
CANIE	Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas
CECAV	Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
CO ₂	Dióxido de carbono
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
E	Leste
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ESA	<i>European Space Agency</i>
FABD	Fator de assimetria de bacia hidrográfica
GBPE	Grupo Bambuí de Pesquisas Espeleológicas
GO	Goiás
GREGO	Grupo Espeleológico Goiano
GSBM	<i>Groupe Spéléo Bagnols Marcoule</i>
H ₂ CO ₃	Ácido carbônico
H ₂ O	Água
H ₂ S	Sulfeto de hidrogênio
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICMBio	Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade
INDE	Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais
M	Metros
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MG	Minas Gerais
Mm	Milímetros
N	Norte
NE	Nordeste
NW	Noroeste
O ₂	Oxigênio

pH	Potencial Hidrogeniônico
PH	Projeção Horizontal
RDE	Relação Declividade-Extensão
S	Sul
SBE	Sociedade Brasileira de Espeleologia
SGB	Serviço Geológico do Brasil
SIEG	Sistema Estadual de Estatística e Informações Geográficas de Goiás
SE	Sudeste
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
SW	Sudoeste
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
W	Oeste

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	22
Hipóteses	25
Objetivos	25
<i>Objetivo Geral</i>	25
<i>Objetivos Específicos</i>	25
Justificativa	25
Organização do trabalho	27
CAPÍTULO 1: PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	28
1.1. Revisão Bibliográfica	28
1.2. Estudo das características fisiográficas e sua relação com a ocorrência e distribuição das cavernas na bacia hidrográfica do rio Tocantins/ Araguaia	28
1.3. Interpretação os principais fatores associados ao desenvolvimento do relevo cárstico na bacia hidrográfica do rio Paranã	30
1.4. Características e fatores associados ao desenvolvimento da Lapa São Vicente I	37
1.5. Interpretação das escalas espaciais no estudo geomorfológico das bacias hidrográficas dos rios Tocantins/ Araguaia, Paranã e São Vicente ...	39
CAPÍTULO 2: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E BASES CONCEITUAIS	40
2.1. Escalas espaciais nos estudos geomorfológicos	40
2.2. A escala como elemento de análise em Geomorfologia Cárstica e Espeleologia	47
2.3.O relevo cárstico tradicional	49
2.4. Feições exocársticas: principais características e aspectos morfogenéticos	50
2.5.Processo de Formação do Relevo Cárstico	56
2.6.Fatores de Formação do Relevo Cárstico	58
2.7.Espeleogênese: a gênese das cavernas	63
2.8.Padrão Planimétrico das Cavernas	66

CAPÍTULO 3: CARACTERÍSTICAS LITOESTRUTURAIS E GEOMORFOLÓGICAS ASSOCIADAS ÀS CAVERNAS DESENVOLVIDAS EM ROCHAS CARBONÁTICAS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO TOCANTINS/ ARAGUAIA	70
3.1. Características geológicas da bacia hidrográfica do rio Tocantins/Araguaia	75
3.2. Características geomorfológicas na bacia hidrográfica do rio Tocantins/Araguaia	85
CAPÍTULO 4: CAVERNAS EM ROCHAS CARBONÁTICAS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARANÃ	97
4.1. Litologia e sua influência nas cavernas desenvolvidas em rochas carbonáticas na bacia hidrográfica do rio Paranã	97
4.2. Estruturas geológicas e suas influências na distribuição de cavernas desenvolvidas em rochas carbonáticas na bacia hidrográfica do rio Paranã	104
4.3. Hidrografia e suas influências nas cavernas desenvolvidas em rochas carbonáticas na bacia hidrográfica do rio Paranã	107
4.4. Contexto geomorfológico na bacia hidrográfica do rio Paranã	115
CAPÍTULO 5: CARACTERÍSTICAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO VICENTE E FATORES ASSOCIADOS AO DESENVOLVIMENTO DA LAPA SÃO VICENTE I	132
CAPÍTULO 6: ESCALAS ESPACIAIS NO ESTUDO GEOMORFOLÓGICO DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS RIOS TOCANTINS/ARAGUAIA, PARANÃ E SÃO VICENTE	157
6.1. A análise multiescalar nas bacias hidrográficas analisadas e o papel dos fatores litoestruturais no desenvolvimento das cavernas	157
6.2. O papel da evolução do relevo nas cavernas e do desenvolvimento das cavernas no relevo: interrelação entre as cavernas e transformações gerais do relevo nas bacias hidrográficas dos rios Tocantins/Araguaia, Paranã e São Vicente	168
CONSIDERAÇÕES FINAIS	174
REFERÊNCIAS	177

INTRODUÇÃO

A Geomorfologia Cárstica investiga um relevo complexo, composto por feições resultantes de processos predominantemente dissolutivos. As áreas cársticas possuem paisagens diversificadas na superfície terrestre¹, em função de variáveis locais e regionais. Os avanços científicos nacionais e internacionais têm permitido ampliar os conhecimentos sobre os ambientes cársticos.

No Brasil, as dimensões territoriais, a diversidade litológica, climática, pedológica e fitofisionômicas contribuíram para a formação de diferentes paisagens cársticas. Essas áreas requerem prospecções, cadastros e mapeamentos de feições endocársticas e exocársticas, bem como realizações de análises e estudos aprofundados sobre os processos e as dinâmicas a elas associadas. Esses procedimentos permitem o reconhecimento da potencialidade espeleológica brasileira, assim como dos processos envolvidos na distribuição e nas características específicas de cada ambiente geomorfológico.

As particularidades fisiográficas de cada localidade podem refletir direta ou indiretamente na geomorfologia cárstica e não cárstica. A caverna se trata de feição que compõe o relevo cárstico, integra o patrimônio espeleológico e é amparada por legislação específica. Assim, este estudo é voltado para a análise do contexto das cavernas desenvolvidas em rochas carbonáticas, cadastradas na base do Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (CECAV) e localizadas nas bacias hidrográficas dos rios Tocantins/ Araguaia, Paranã e São Vicente (Figura 0.1). Com isso, busca-se compreender como as diferentes escalas de análise se interrelacionam para a formação das cavernas nas unidades de estudo selecionadas.

Registra-se que não há consenso científico sobre considerar como cárstico o relevo desenvolvido em litologias não carbonáticas. Assim, neste estudo são apresentadas apenas as informações relativas às cavernas desenvolvidas em rochas carbonáticas. As variáveis associadas ao desenvolvimento das cavernas foram: litoestrutura e geomorfologia.

A importância da análise do contexto de inserção das cavernas em âmbito local e regional tem sido debatido, haja vista que as cavernas interferem em diferentes proporções no meio que as circunda. Em termos práticos, é complexo definir as áreas influenciadas pelas cavernas. Verificam-se esforços dos órgãos ambientais em estabelecer normas legais sobre os

¹ Existem várias classificações do relevo cárstico, conforme as características analisadas. Isso ocorre porque diferentes paisagens cársticas desenvolvidas em rochas carbonáticas são observadas em várias partes do mundo, como, por exemplo, nos Alpes, Pirineus, Porto Rico, assim como na China (*fengcongkarst*), Brasil (carste tradicional), Alemanha (carste alpino), Jamaica (*cockpit karst*) e Eslovênia (carste clássico). Além disso, destaca-se o holocarste, merocarste, fluvio-carste, carste coberto, entre outros relevos (WHITE, 1988).

conceitos de área de influência do patrimônio espeleológico, orientações técnicas e parâmetros morfométricos dos raios de proteção. Entretanto, essa discussão requer amadurecimentos e sistematizações que podem contribuir para a aplicabilidade em atividades de licenciamento ambiental, pesquisas científicas, planos de manejo espeleológicos e estudos espeleológicos em geral. Afinal, as condições naturais das cavernas e do seu entorno, em geral, são dinâmicas e oscilam de acordo com as condições fisiográficas. Assim, refletir sobre as escalas e áreas de influência das cavernas auxilia na compreensão, gestão e conservação do patrimônio espeleológico. Ressalta-se que pesquisas sobre essa temática também orientam os órgãos licenciadores, que avaliam a aplicabilidade de cada caso e fazem as recomendações técnicas e científicas necessárias.

Esta tese defende a perspectiva de multiescalaridade nos estudos espeleológicos e geomorfológicos, uma vez que as cavernas influenciam e são influenciadas em diferentes proporções local e regionalmente. Essas influências, por sua vez, precisam ser esclarecidas e analisadas em diferentes áreas do território brasileiro. Dessa forma, o trabalho envolve a relação das cavernas com o seu entorno em diferentes escalas. O recorte espacial selecionado foi bacia hidrográfica, sendo elas drenadas pelos rios Tocantins/Araguaia, Paranã e São Vicente (Figura 0.1).

A seleção da bacia hidrográfica como unidade de análise está associada aos seguintes fatores: I) a bacia hidrográfica interfere na formação e no desenvolvimento das cavernas, porque o fluxo hidrológico é um dos elementos essenciais para o relevo cárstico e II) as definições de bacias, sub-bacias e as suas interrelações possuem bases consolidadas cientificamente, o que contribui para as reflexões sobre multiescalaridade.

O estudo da escala temporal versa sobre as transformações das feições geomorfológicas ao longo do tempo relativo, em função dos processos que ocorreram. A escala temporal, portanto, é investigada nesta tese de forma qualitativa e abrangente, tendo como base os registros geológicos do contexto regional.

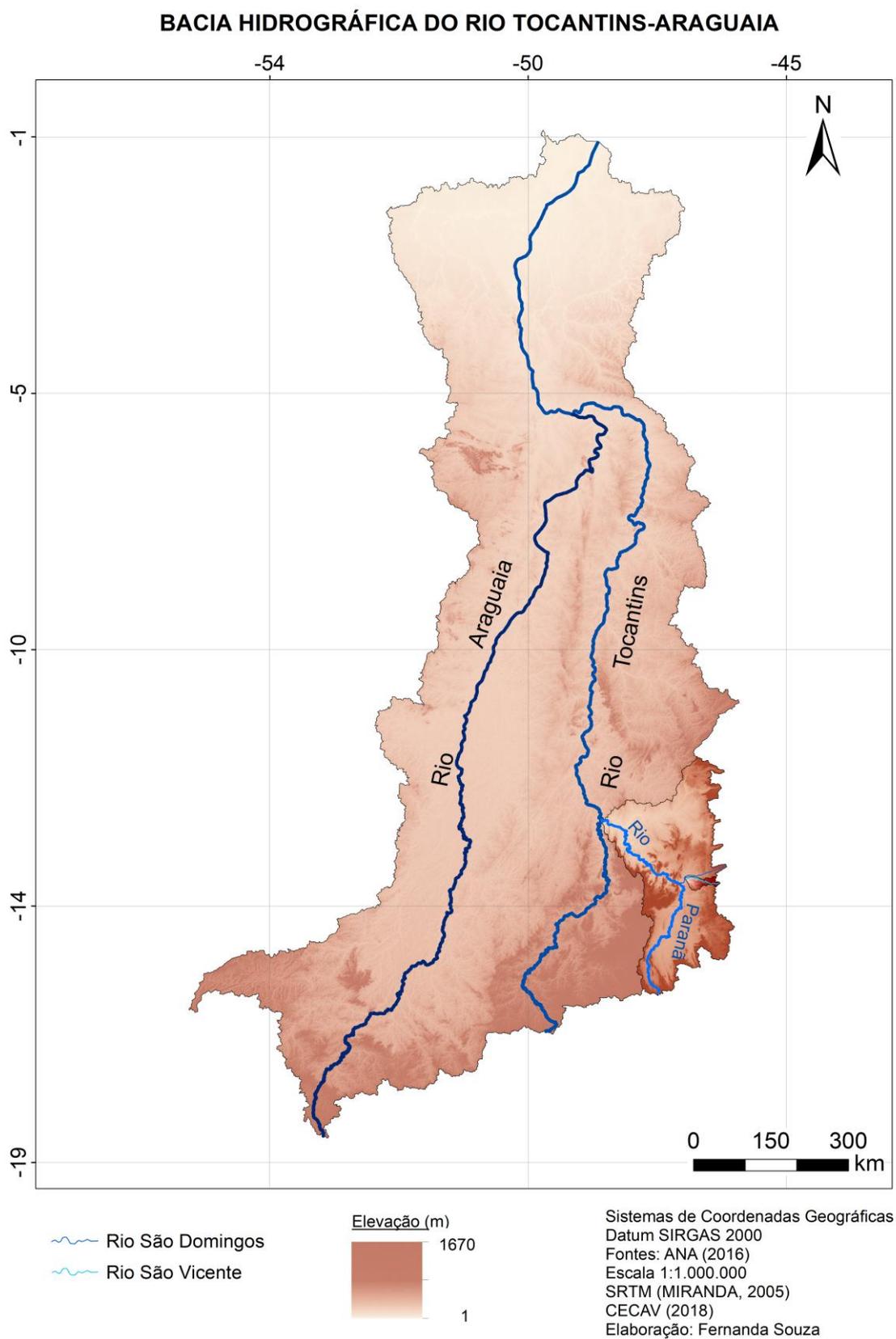


Figura 0.1: Localização das bacias hidrográficas dos rios Tocantins/ Araguaia, Paranã e São Vicente

A principal pergunta que norteia este trabalho é: quais são as influências da litoeestrutura e geomorfologia na distribuição das cavernas desenvolvidas em rochas carbonáticas nas bacias hidrográficas dos rios Tocantins/ Araguaia, Paranã e São Vicente?

Hipóteses

As principais hipóteses que norteiam esta pesquisa são complementares:

1. A distribuição de cavernas em rochas carbonáticas na bacia hidrográfica do rio Tocantins/Araguaia está condicionada às características litoestruturais;
2. O desenvolvimento das cavernas em rochas carbonáticas na bacia hidrográfica do rio Paranã recebe influências da sua interação com o relevo regional;
3. O desenvolvimento da Lapa São Vicente I está associado a processos dissolutivos, declividade e dinâmica hidrográfica subsuperficial.

Objetivos

Objetivo Geral

Analisar em domínio multiescalar o contexto litoestrutural e geomorfológico associado às cavernas desenvolvidas em rochas carbonáticas nas bacias hidrográficas dos rios Tocantins/ Araguaia, Paranã e São Vicente.

Objetivos Específicos

- Apresentar as relações entre as características litoestruturais e geomorfológicas, bem como a ocorrência e a distribuição espacial das cavernas na bacia hidrográfica do rio Tocantins/ Araguaia;
- Identificar e interpretar os principais fatores que interferem no desenvolvimento do relevo cárstico na bacia hidrográfica do rio Paranã;
- Explicar as características e fatores associados ao desenvolvimento da Lapa São Vicente I.

Justificativa

O desenvolvimento deste trabalho se justifica, especialmente, pelos seguintes motivos:

1. Aprofundamento de estudo temático na área

A área de estudo possui potencialidade espeleológica² diversificada, sendo muito alta e alta em alguns pontos. Esse fator desperta o interesse de turistas, espeleólogos e cientistas,

² Potencialidade espeleológica corresponde à probabilidade de ocorrência de cavernas e ambientes cársticos (PILO; AULER, 2011; JANSEN, 2011). Piló e Auler (2011) fizeram estimativa do potencial espeleológico

que desenvolveram descrições espeleológicas, espeleométricas, trabalhos fotográficos, filmográficos e excursionistas. Assim, este trabalho amplia os estudos para além do ambiente espeleológico, ao analisar o relevo cárstico e correlacioná-lo com o relevo não carbonático. Visa-se também incentivar o desenvolvimento de estudos em ciências afins à Geografia.

2. Investiga uma das maiores cavernas brasileiras

Os mapas geológicos (SCHOBENHAUS *et al.*, 2004) mostram que na bacia hidrográfica do rio Tocantins/ Araguaia há rochas carbonáticas, areníticas, quartzíticas e ferruginosas, em que cavernas se desenvolvem. Já as cavernas localizadas na bacia hidrográfica do rio Paranã são formadas, majoritariamente, em rochas carbonáticas. Ressalta-se que a bacia hidrográfica do rio Paranã e o seu entorno imediato corresponde a uma das poucas áreas com rochas carbonáticas na bacia hidrográfica do rio Tocantins/ Araguaia. Na bacia hidrográfica do rio Paranã estão algumas das maiores cavernas do Brasil em termos de projeção horizontal e desnível (Quadros 0.1 e 0.2).

Quadro 0.1: As cavernas da bacia hidrográfica do rio Paranã situadas entre as maiores cavernas do Brasil

Colocação	Nome da cavidade	Localidade	PH* (m)
8	Lapa de São Mateus III	São Domingos (GO)	10.828
9	Lapa de São Vicente I	São Domingos (GO)	10.130
11	Gruna da Tarimba	Mambaí (GO)	9.300
18	Lapa da Terra Ronca II – Malhada	São Domingos (GO)	7500
25	Lapa do São Mateus II – Imbira	São Domingos (GO)	5300
31	Lapa de São Vicente II	São Domingos (GO)	4670

Fonte: SBE (2016)

*PH equivale à projeção horizontal

Quadro 0.2: As cavernas da bacia hidrográfica do rio Paranã situadas entre as mais profundas do Brasil

Colocação	Nome da cavidade	Localidade	Desnível (m)
18	Lapa da Terra Ronca II – Malhada	São Domingos (GO)	155
28	Lapa de São Vicente I	São Domingos (GO)	140

Fonte: SBE (2016)

brasileiro, classificando-o conforme as principais litologias (carbonatos, quartzitos, arenitos, minério de ferro e outras litologias). Jansen *et al.* (2012) apresentam mapa de potencialidades espeleológicas no Brasil na escala 1:2.500.000, tendo como base o mapa geológico do Brasil na escala 1:2.500.000 desenvolvido pela CPRM (2003). Jansen *et al.* (2012) definem cinco índices de potencialidade espeleológica: muito alto, alto, médio, baixo e ocorrência improvável.

Entre as cavernas cadastradas, a Lapa de São Vicente I se destaca como uma das maiores e mais profundas cavernas do Brasil (SBE, 2016). Esse fator amplia o significado do trabalho em termos de abrangência no cenário espeleológico brasileiro. Afinal, a Instrução Normativa do Ministério do Meio Ambiente (MMA) nº 02, de 30 de agosto de 2017, que dispõe sobre o grau de relevância das cavernas (BRASIL, 2017), estabelece que as dimensões notáveis de extensão, área ou volume, estão entre os critérios de grau máximo de relevância. Assim, apenas esse critério destaca a Lapa de São Vicente I nacionalmente em termos de importância para a pesquisa e conservação espeleológica. Nesse sentido, a tese amplia o conhecimento sobre as cavernas de destaque nacional.

3. O trabalho contribui para o levantamento de dados em uma das maiores bacias hidrográficas do país

A bacia hidrográfica do rio Tocantins/Araguaia é a segunda maior bacia hidrográfica do país em termos de área e vazão (ANA, 2009). Além disso, essa bacia hidrográfica possui um dos sistemas fluviais mais importantes da América do Sul, pois inclui áreas dos Biomas do Cerrado e Amazônia (LATRUBESSE; STEVAUX, 2006). Assim, trata-se de uma unidade de planejamento importante no cenário nacional e o desenvolvimento da pesquisa contribui para sistematizar dados geográficos que envolvem várias Unidades da Federação.

Organização do trabalho

Este trabalho está organizado em seis capítulos. O primeiro capítulo apresenta os procedimentos metodológicos utilizados na pesquisa. O segundo capítulo contém fundamentações teóricas e bases conceituais sobre o relevo cárstico em rochas carbonáticas e escala espaciais nos estudos geomorfológicos.

Os resultados obtidos estão contidos nos capítulos três, quatro e cinco, que tratam respectivamente das características das bacias hidrográficas dos rios Tocantins/Araguaia, Paranã e São Vicente. Cada capítulo de resultados possui revisão bibliográfica para suporte das temáticas discutidas e de fundamentações conceituais que dialogam com os dados obtidos. O capítulo seis, por sua vez, discute as escalas espaciais nos estudos geomorfológicos e sua importância como elemento de análise nas bacias hidrográficas selecionadas para estudo. Esse capítulo busca integrar os resultados obtidos em diferentes contextos espaciais. Em seguida, apresentam-se as considerações finais e, por fim, listam-se as referências utilizadas no trabalho.

CAPÍTULO 1: PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Os procedimentos metodológicos utilizados correspondem ao conjunto de etapas descritas a seguir e estão voltadas para a análise multiescalar das bacias hidrográficas dos rios Tocantins/ Araguaia, Paranã e São Vicente.

1.1.Revisão Bibliográfica

Para o planejamento geral do trabalho foi realizada revisão bibliográfica e cartográfica a respeito do tema e local de estudo. As principais bases do pensamento cárstico que subsidiam o desenvolvimento deste estudo incluem Cvijic (1918, 1960), Sweeting (1972), Bögli (1980), Dreybrodt (1988), Ford e Williams (2007), Palmer (2009), entre outros. Neste trabalho as variáveis de desenvolvimento do relevo foram avaliadas em concordância com a unidade escalar de investigação. Em seguida, foram definidos os objetivos e planejamentos do trabalho. Os tópicos a seguir demonstram a metodologia utilizada para cada etapa do trabalho.

1.2.Estudo das características fisiográficas e sua relação com a ocorrência e a distribuição das cavernas na bacia hidrográfica do rio Tocantins/ Araguaia

Na bacia hidrográfica do rio Tocantins/ Araguaia, as características geográficas investigadas quanto à sua relação com a ocorrência e distribuição das cavernas foram: a) litologia; b) estruturas geológicas e c) relevo.

Para o estudo na bacia hidrográfica do Tocantins/ Araguaia foram utilizadas as bases vetoriais litológicas da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM, 2004), escala 1:1.000.000; Schobenhau *et al.* (1975; 2004), escala 1:1.000.000; Souza *et al.* (2004), escala 1:1.000.000; Valente *et al.* (2004), escala 1:1.000.000; Vasconcelos *et al.* (2004), escala 1:1.000.000. Os dados litológicos foram interpretados a partir do processamento de informações dos grupos geológicos. Foram utilizados também dados dos Projetos RADAM e RADAMBRASIL, escala 1:1.000.000 (ROSATELLI *et al.*, 1974; SILVA *et al.* 1974; RIOS; OLIVEIRA, 1981; ROSS; SANTOS, 1982), entre outros autores.

Para a análise das estruturas geológicas na bacia hidrográfica do rio Tocantins/ Araguaia foram utilizadas as bases vetoriais da CPRM (2004) (escala 1:1.000.000); Schobenhau *et al.* (1975; 2004) (escala 1:1.000.000); Souza *et al.* (2004) (escala 1:1.000.000); Valente *et al.* (2004) (escala 1:1.000.000) e Vasconcelos *et al.* (2004) (escala 1:1.000.000). A partir dessas informações foram gerados mapas com a relação entre: a) fraturas e cavernas; b) dobras e cavernas e c) principais sistemas de falhas e cavernas. Posteriormente, a partir dos dados vetoriais da CPRM (2004) (escala 1:1.000.000), tabulou-se

e elaborou-se no Excel o gráfico com as principais direções das estruturas geológicas presentes na bacia hidrográfica do rio Tocantins/ Araguaia.

Para a análise da interferência do relevo regional na distribuição das cavernas na bacia hidrográfica do Tocantins/ Araguaia foram utilizadas imagens *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), com resolução espacial de 90m. Os dados SRTM estão disponíveis no *site* da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), no Sistema de Coordenadas Geográficas, Datum WGS84, a partir de projeto coordenado por Miranda (2005). Após o *download* dos dados SRTM, eles foram processados no *software* ArcGIS, sendo produzido o mosaico das imagens. Em seguida, esses dados foram projetados no Datum SIRGAS 2000. Posteriormente, foi realizado o recorte do mosaico de imagens SRTM com os limites territoriais da bacia hidrográfica em análise³. Os dados vetoriais das drenagens da bacia hidrográfica do rio Tocantins/ Araguaia foram obtidos no *site* da ANA (2017), na escala 1:1.000.000.

A partir do mosaico SRTM, se realizou o mapeamento geomorfológico com a delimitação das principais unidades de relevo. Posteriormente, com a utilização dos dados SRTM no *software* ArcGis, elaboraram-se os mapas de altimetria e declividade em porcentagem para a bacia hidrográfica estudada⁴. Os dados obtidos foram classificados conforme a metodologia estabelecida por Santos *et al.* (2015a).

Em seguida, foram elaborados perfis topográficos, executados a partir do mosaico SRTM (MIRANDA, 2005) e processados no *software* Global Mapper. Foram elaborados quatro perfis topográficos no sentido E-W ao longo da bacia hidrográfica⁵. A localização dos perfis topográficos foi estabelecida a partir dos seguintes critérios: a) locais com maior concentração de cavernas cadastradas; b) contempla diferentes grupos geológicos; c) locais com compartimentos geomorfológicos diferentes e d) áreas com presença e ausência de estruturas geológicas na escala 1:1.000.000. Posteriormente, os perfis foram exportados e processados no *software* *Corel Draw*. Para o estudo da contribuição do relevo no

³ Os procedimentos para download de imagens SRTM, análises de metadados do raster, mosaico de imagens SRTM, reprojeção de sistemas de coordenadas foram realizados conforme informações na página do InstrutorGIS, disponíveis em: <https://www.instrutorgis.com.br/arcgispro-topodata-mosaico-de-imagens-srtm/>; <https://www.instrutorgis.com.br/arcgispro-topodata-download-do-mde-com-ajuste-de-datum/>; <https://www.instrutorgis.com.br/arcgispro-topodata-analises-dos-metadados/>. Acesso em 12/11/2017.

⁴ A elaboração de mapas de altimetria e declividade foi realizada conforme procedimentos metodológicos descritos na Apostila de ArcGIS elaborada pelo Laboratório de Topografia e Cartografia da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), disponível em [http://www.geolab.faed.udesc.br/sites_disciplinas/SIG/Apostilas/Apostila-ArcGIS-\(Geodatabase\).pdf](http://www.geolab.faed.udesc.br/sites_disciplinas/SIG/Apostilas/Apostila-ArcGIS-(Geodatabase).pdf). Acesso em: 12/02/2018.

⁵ A elaboração dos perfis topográficos no software Global Mapper foi realizada conforme procedimentos adotados pela EngeSat, disponíveis em: <https://www.youtube.com/watch?v=x4UMuoJC9sw>. Acesso em 15/02/2018.

desenvolvimento das cavernas foram correlacionados: a localização das cavernas desenvolvidas em rochas carbonáticas, mapeamento geomorfológico elaborado, classes altimétricas e declividade.

Em seguida, os dados planimétricos litológicos, estruturais e geomorfológicos foram cruzados no *software* ArcGis com a distribuição espacial das cavernas presentes nessa bacia hidrográfica. A distribuição espacial das cavernas foi obtida através do arquivo vetorial disponível na base de dados do Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas (CANIE⁶, 2018) referente à atualização cadastral de 18/07/2018. Posteriormente, foram realizadas interpretações sobre as relações entre a ocorrência das cavernas e as características gerais da bacia hidrográfica do Tocantins/Araguaia.

1.3. Interpretação dos principais fatores associados ao desenvolvimento do relevo cárstico na bacia hidrográfica do rio Paranã

Na bacia hidrográfica do rio Paranã foram investigadas variáveis associadas ao desenvolvimento do relevo cárstico, sendo elas: a) litologia; b) estruturas geológicas e c) relevo. Registra-se que os procedimentos metodológicos são semelhantes aos realizados na bacia hidrográfica do rio Tocantins/Araguaia, uma vez que a proposta da tese é investigar o relevo cárstico em diferentes escalas. Assim, torna-se necessária a manutenção de variáveis equivalente para bases comparativas.

Nesta etapa do trabalho foram utilizados dados com escalas de mapeamento disponíveis, para compatibilizá-las com as dimensões geográficas da bacia hidrográfica do rio Paranã. Inicialmente, realizou-se o cálculo de densidade de cavernas na bacia hidrográfica do rio Paranã. O cálculo da densidade (D) corresponde à divisão da quantidade de cavernas desenvolvidas em rochas carbonáticas (P) pela área em km² (a) da bacia hidrográfica (Equação 1.1).

⁶ O Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas (CANIE) é uma base de dados gratuita que contém informações do patrimônio espeleológico brasileiro. O CANIE foi instituído pela Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) nº 347/2004 e desenvolvido pelo Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio), com base no modelo conceitual e metodológico da CPRM/Serviço Geológico do Brasil (SGB). O Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (CECAV) é a unidade responsável pelo suporte técnico e a gestão do CANIE.

$D = P/a$

Equação 1.1: Cálculo de densidade de cavernas na bacia hidrográfica do rio Paranã

Fonte: IBGE (1970⁷)

D: densidade

P: população (quantidade de cavernas desenvolvidas em rochas carbonáticas)

a: área da bacia hidrográfica

Para o trabalho na bacia hidrográfica do rio Paranã foram utilizadas as imagens de satélites Landsat8 (NASA, 2015), Sentinel 2 (ESA, 2016); bases vetoriais de litologias CPRM (2004), escala 1:1.000.000, entre outros parâmetros. Os dados litológicos foram interpretados a partir do processamento de informações das formações geológicas. Para isso, gerou-se mapa com a composição litológica dessa bacia hidrográfica e a localização das cavernas. Os dados vetoriais das cavernas se referem aos cadastrados no CANIE de 18/07/2018 (CANIE, 2018⁸), recortados para a unidade de estudo em questão. Essas informações permitiram a observação da distribuição espacial das cavernas e sua relação com as formações geológicas existentes.

Em seguida, realizou-se a classificação das cavernas conforme os tipos de rochas e formações geológicas, com o objetivo de realizar o levantamento de quais unidades litológicas hospedam maior número de cavernas. Essa classificação teve como base a localização das cavernas e a base de dados da CPRM (2004), escala 1:1.000.000. Com isso, obteve-se o mapa de localização das cavernas conforme as unidades litológicas. Posteriormente, foi realizada a tabulação da quantidade e o percentual de cavernas associadas a cada unidade geológica. Esses dados foram representados em tabela e gráfico processados no *software Excel*.

Para o estudo de aspectos geomorfológicos regionais foram utilizados dados SRTM com resolução espacial de 30m, disponibilizados pela *United States Geological Survey* (USGS, 2015). A partir do SRTM (USGS, 2015) foram gerados os mapas de altimetria e declividade. Os dados de declividade foram classificados em porcentagem conforme metodologia e classificação de Santos *et al.* (2015). Os mapas de altimetria e declividade foram obtidos a partir do uso das ferramentas de análise espacial do *software ArcGis*. Realizou-se a compartimentação de unidades geomorfológicas a partir da ferramenta ICR – Unidades Geomorfológicas⁹, desenvolvida pela equipe do grupo Neotectônica da

⁷ Essa fórmula foi elaborada e adaptada conforme os conceitos básicos estatísticos de densidade, população e área definidos pelo IBGE (1970).

⁸ Base de dados disponível em: <http://www.icmbio.gov.br/cecav/downloads/mapas.html>. Acesso em 30/01/2018.

⁹ A ferramenta ICR (Unidades geomorfológicas) está disponível para download em <http://www.neotectonica.ufpr.br/2013/index.php/aplicativos>. Acesso em: 12/06/2019.

Universidade Federal da Paraíba (UFPR), que foi importada e processada no *software* ArcGis. Após interpretação geral, foi realizado o mapeamento geomorfológico primário na bacia hidrográfica do rio Paranã, conforme os procedimentos descritos pelo IBGE (2009).

A localização, morfologia e orientações das estruturas geológicas na bacia hidrográfica do rio Paranã foram obtidas a partir de cinco etapas metodológicas (Figura 1.1). A primeira etapa correspondeu em obter imagens SRTM (USGS, 2015), elaborar e recortar mosaico de imagens SRTM para a área de estudo e obter o Modelo Digital de Terreno (MDT) no *software* ArcGis. Na segunda etapa, realizou-se a extração de sombreamento do relevo em diferentes orientações pela ferramenta *Hillshade* do *software* ArcGis. Esse processamento teve como base o mosaico SRTM e foram processados segundo as orientações 315°, 360°, 90°, 180° e 270°. Na terceira etapa se utilizou o *software* Geomática, que permitiu a extração e espacialização dos lineamentos estruturais na área de estudo. Os resultados obtidos foram importados para o *software* ArcGis, no qual se gerou o mapa de lineamentos estruturais da bacia hidrográfica do rio Paranã.

Na etapa quatro, importou-se a ferramenta *AzimuthFinder*, desenvolvida pela equipe do grupo Neotectônica da UFPR, para o *software* ArcGis. A ferramenta *AzimuthFinder* permitiu calcular os dados azimutais dos lineamentos estruturais. Com isso, obteve-se uma tabela com as direções dos lineamentos estruturais existentes. Em seguida, realizou-se a exportação dos azimutes no formato txt, compatível com a linguagem do *software* StereoNet 7. Esses procedimentos foram realizados conforme a metodologia descrita por Queiroz *et al.* (2014). Na quinta etapa, no *software* StereoNet 7, foram importados os dados azimutais e se gerou o diagrama de rosetas, que demonstra as direções preferenciais dos lineamentos estruturais existentes¹⁰ (Figura 1.1). Os mapas e diagramas obtidos com o processamento dos dados de estruturas geológicas foram cruzados com a localização das cavernas. Com isso, realizou-se a interpretação de como as estruturas geológicas interferem na distribuição das cavernas nessa bacia hidrográfica (Figura 1.1).

A análise das influências hidrográficas no relevo cárstico da bacia hidrográfica do rio Paranã foi realizada com base no levantamento dos seguintes elementos: a) morfologia da bacia; b) fator de assimetria de bacia; c) rede de drenagem; d) levantamento da quantidade de drenagens associadas às cavernas e os contextos litológicos drenados e e) densidade de drenagens e de cavernas. Os dados hidrográficos permitem discutir assuntos interrelacionados à litologia, estruturas geológicas e geomorfologia regional.

¹⁰ Informações metodológicas de uso do *software* StereoNet estão disponíveis em <https://geologiasemrumo.wordpress.com/tag/tutorial-stereonet/>. Acesso em 16/04/2019.

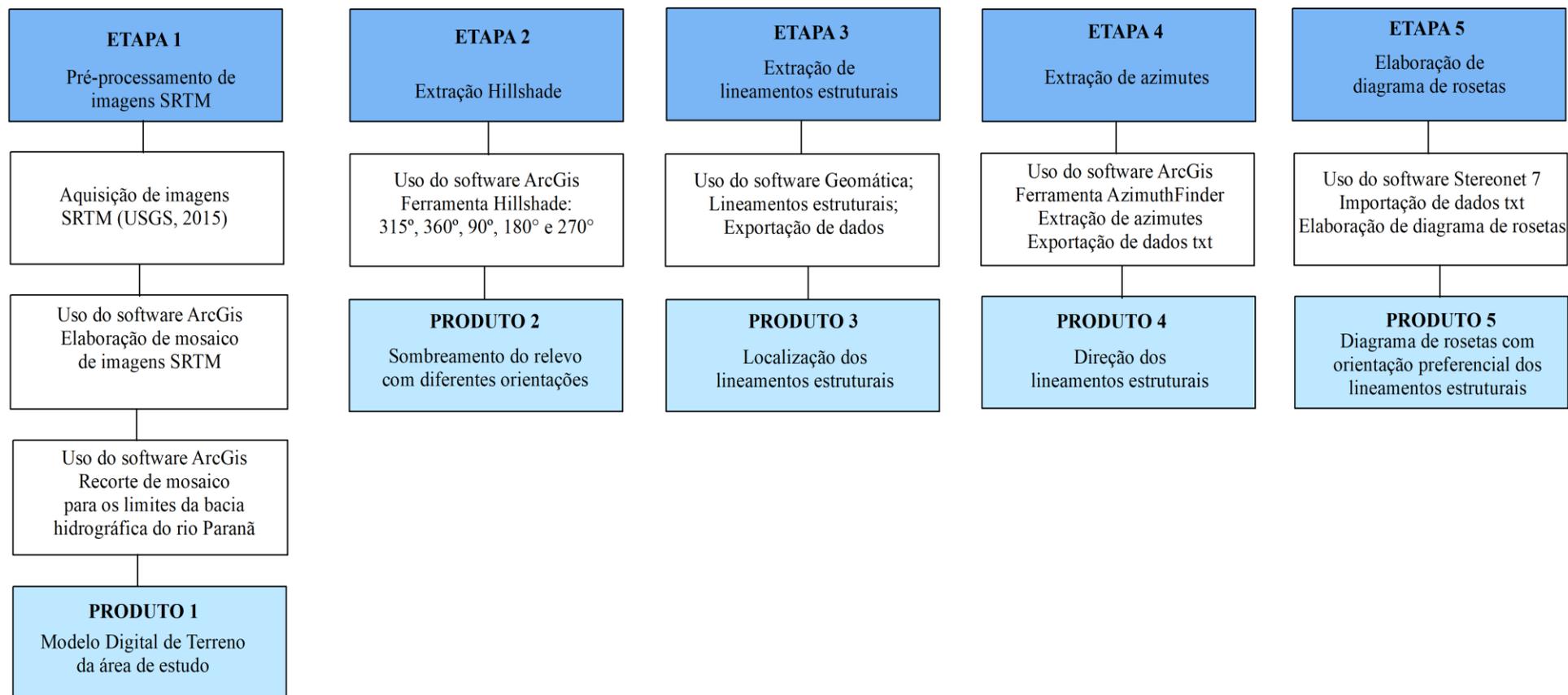


Figura 1.1: Histograma do procedimento metodológico utilizado para obter dados de lineamentos estruturais na bacia hidrográfica do Paraná

Para isso, utilizou-se dados vetoriais obtidos no *site* do Sistema Estadual de Estatística e Informações Geográficas de Goiás (SIEG) (SIC/GOIAS, 2014a; SIC/GOIAS, 2014b) e do IBGE (2014). Esses dados estão associados, especialmente, à rede de drenagem (escala 1:100.000); *ottobacias* hidrográficas (escala 1:250.000); lagos e barragens¹¹ (escala 1:100.000).

Os elementos hidrográficos levantados na bacia hidrográfica do rio Paranã foram estruturados e interpretados em duas etapas. A primeira etapa correspondeu à análise geral da bacia e foi composta pelo estudo da morfologia de bacia, fator de assimetria de bacia e interpretação geomorfológica geral. A segunda etapa correspondeu à análise da rede de drenagem e suas interrelações geomorfológicas.

A interpretação morfológica da bacia hidrográfica do rio Paranã foi realizada a partir de observação planimétrica com base nas definições de Gregory e Walling (1976). O fator de assimetria de bacia hidrográfica foi calculado conforme a Equação 1.2. Esses dados contribuem para a interpretação do fluxo hidrológico superficial e, conseqüentemente, na distribuição das cavernas.

$$\text{FABD} = 100 (\text{Ar}/\text{At})$$

Equação 1.2: Fator de assimetria de bacia hidrográfica

Fonte: Salamuni (1998)

FABD: Fator de assimetria de bacia de drenagem

Ar: Área da margem direita da bacia hidrográfica

At: Área total da bacia hidrográfica

A análise da rede de drenagem e das suas interrelações geomorfológicas foi realizada a partir do cruzamento de um conjunto de informações (Figura 1.2). Elaborou-se mapa com a distribuição da rede de drenagem na bacia hidrográfica do rio Paranã e da localização das cavernas. Esse mapa foi elaborado no *software ArcGis*, utilizou-se os dados vetoriais de rede de drenagem disponível no *site* do SIEG (SIC/GOIAS, 2014a), escala 1:100.000. Além disso, os dados das cavernas (CECAV, 2018) foram recortados para a bacia hidrográfica do rio Paranã e em seguida as informações vetoriais de drenagens e cavernas foram interpoladas e interpretadas.

¹¹ No *site* do SIEG (SIC/GOIAS, 2014b), o termo utilizado para referir-se a lagos e barragens é “massas de água”.

Em seguida, realizou-se observação qualitativa da densidade de rede de drenagem em relação aos afluentes das margens direita e esquerda do rio principal e a distribuição das cavernas na bacia. Esse procedimento foi realizado com técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto, e teve como base o SIC/GOIAS (2014a), escala 1:100.000 e CECAV (2018) (Figura 1.2).

Posteriormente, realizou-se a extração da rede de drenagem através da ferramenta *watershed* do *software* QGis¹². Essa extração teve como base de processamento as imagens SRTM (USGS, 2015), valor mínimo 5000. Com base nos resultados obtidos, realizou-se a comparação qualitativa da rede de drenagem: 1) disponível no *site* do SIEG (SIC/GOIAS, 2014a), escala 1:100.000; 2) obtida por processos de geoprocessamento e 3) observações gerais de campo (Figura 1.2).

Posteriormente, realizou-se a observação e interpretação qualitativa de mapa com a localização das cavernas em relação à proximidade com as áreas de nascentes. Em seguida, analisou-se a relação entre cavernas, rede de drenagem e tipologias litológicas. Para isso, elaborou-se e interpretou-se o mapa de unidades geológicas regionais, localização das cavernas e tipologia das drenagens. A tipologia das drenagens vinculadas ao ambiente cárstico foi categorizada em: a) drenagens com nascentes em áreas carbonáticas e b) drenagens com nascentes em áreas não carbonáticas. A classificação das drenagens foi realizada por meio de geoprocessamento, com o uso do *ArcGis* e utilizou a base vetorial de drenagens do SIEG (SIC/GOIAS, 2014a). Posteriormente, elaborou-se gráfico com a quantidade de drenagens vinculadas às áreas com litologias carbonáticas e não carbonáticas. Em seguida, realizou-se a interpretação de como a origem dessas cavernas contribui para o desenvolvimento do relevo cárstico presente na bacia hidrográfica do rio Paranã. As argumentações apresentadas tiveram a fundamentação científica de Palmer (2009) (Figura 1.2).

Subsequentemente, analisou-se a relação entre densidade de cavernas e de drenagens. Para isso, foram utilizadas as bases vetoriais de drenagens (SIC/GOIAS, 2014a) e cavernas CANIE (2018). O mapa da densidade de cavernas e de drenagens foi elaborado com base em técnicas de geoprocessamento no *software* ArcGis¹³. Em seguida, realizou-se a interpretação da relação espacial existente entre a densidade de cavernas e de drenagens na área da pesquisa (Figura 1.2).

¹² Os procedimentos metodológicos para delimitação e extração de rede de drenagens no *software* QGis estão disponíveis em: <https://www.geosaber.com.br/post/2018-03-07-qgis3-delimitacao-bacias/>. Acesso em: 19/06/2019

¹³ A elaboração dos mapas de densidade de cavernas e drenagens seguiu os procedimentos descritos em <http://processamentodigital.com.br/2014/06/01/arcgis-102-criacao-de-um-mapa-de-densidade/>. Acesso em 19/06/2019.

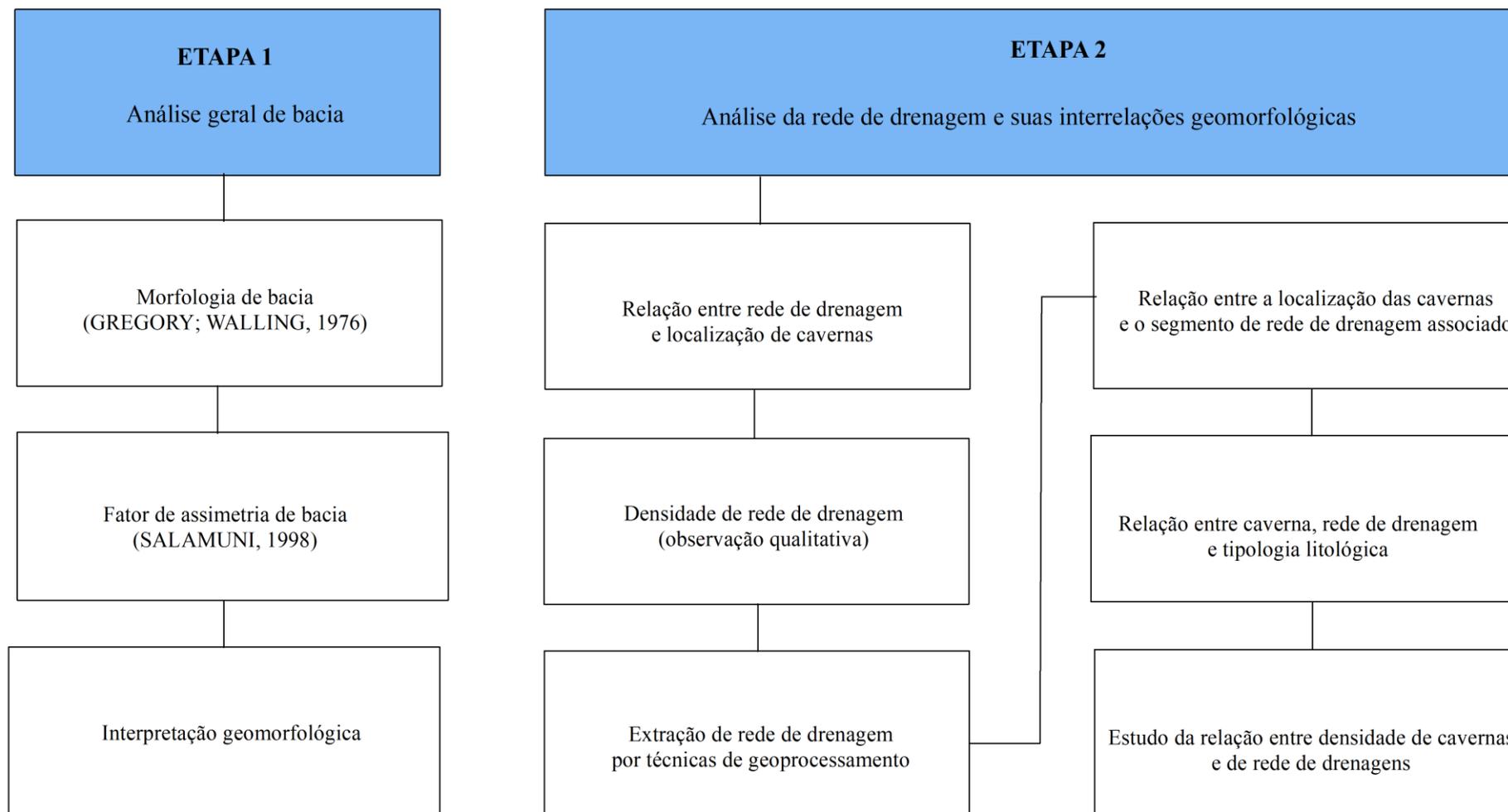


Figura 1.2: Histograma do procedimento metodológico do estudo hidrográfico na bacia hidrográfica do Paranã e a sua relação com a geomorfologia cárstica

Após essa etapa, realizou-se a análise de Lapa São Vicente I e seu contexto local. Para isso, o levantamento de dados bibliográficos, cartográficos e elaboração de dados primários se complementaram.

1.4. Características e fatores associados ao desenvolvimento da Lapa São Vicente I

Na bacia hidrográfica do rio São Vicente se selecionou a Lapa São Vicente I para análise. Essa caverna representa parte da diversidade espeleológica presente na bacia hidrográfica do rio Paranã e suas subbacias. A Lapa São Vicente I se localiza na bacia hidrográfica do rio São Vicente, afluente do rio São Domingos. Essa caverna se situa na parte sudoeste da bacia hidrográfica do rio Paranã.

O mapa topográfico da Lapa São Vicente I foi obtido em Auler *et al.* (2001) e posteriormente editado no *software Corel Draw*. As principais características planimétricas dessa caverna foram interrelacionadas com a classificação de Palmer (2009). Realizou-se trabalho de campo exploratório na área.

Posteriormente, foram realizados levantamentos de informações gerais das cavernas, como inserção na paisagem, litoestruturas, morfologia planimétrica, hidrologia, depósitos secundários, entre outras características. Esse levantamento foi realizado especialmente a partir de técnicas de geoprocessamento. Os principais materiais utilizados nesse levantamento foram: plantas topográficas, cortes transversais das cavernas e imagens de satélites Sentinel 2 (ESA, 2016). A finalidade desse levantamento é interpretar os atributos físicos associados à caverna.

As características litológicas foram obtidas em revisão bibliográfica e observações em campo. A caracterização do contexto estrutural de inserção das cavernas foi realizada por procedimentos que envolveram a análise de: a) direção dos lineamentos estruturais na área superficial e b) morfologia planimétrica da caverna. Para o levantamento de informações estruturais, utilizou-se imagens SRTM (USGS, 2015) e a ferramenta *Hillshade* do software ArcGis. A extração e espacialização dos lineamentos estruturais na bacia hidrográfica do rio São Vicente foram realizadas com o uso do *software* Geomática. Os cálculos de direções dos lineamentos estruturais foram efetuados com a utilização da ferramenta *AzimuthFinder* inserida no *software* ArcGis. Em seguida, dados azimutais foram importados no *software StereoNet 7*, sendo gerados os diagramas de rosetas com as principais direções preferenciais dos lineamentos estruturais existentes.

A análise da direção dos condutos da Lapa São Vicente I foi realizada a partir de interpretação dos mapas topográficos. Dessa forma averiguou-se como a litoestrutura está

associada ao padrão planimétrico das cavernas. Por fim, os dados estruturais foram discutidos com Palmer (1991 e 2009).

Para a análise das características geomorfológicas foram elaborados perfis topográficos na bacia hidrográfica do rio São Vicente. Esses perfis topográficos foram obtidos a partir de processamento de imagens SRTM, com resolução espacial de 30m no *software* ArcGis. Em seguida, as imagens obtidas foram processadas no *Corel Draw*. Assim, a fim de interpretar variáveis sistêmicas associadas ao desenvolvimento das cavernas, a análise envolve duas etapas:

- a) a unidade hidrográfica à montante e no interior da Lapa São Vicente I, bem como as principais consequências para a configuração do relevo local;
- b) as características gerais do relevo e hidrografia à jusante da Lapa São Vicente I.

Posteriormente, realizou-se o mapeamento do índice Relação Declividade-Extensão (RDE) ou índice de Hack, que auxilia a identificação de anomalias na energia fluvial. O cálculo do índice RDE consiste na razão entre a amplitude altimétrica total e o logaritmo da extensão da drenagem (ETCHEBEHERE *et al.*, 2004). Afinal, a energia é proporcional à declividade e volume de água. Esse mapeamento foi realizado com o uso do aplicativo *knickpointfinder* desenvolvido pelo grupo Neotectônica da UFPR. Esse aplicativo foi obtido no *site* do grupo Neotectônica¹⁴ e importado para o *software* ArcGis, em que foram processados os dados referentes à bacia de estudo.

A localização das principais corredeiras da Lapa São Vicente I e os cortes transversais espeleológicos auxiliaram a interpretação hidrográfica no desenvolvimento da caverna. Em seguida, as informações hidrográficas foram correlacionadas com Ford e Williams (2007) e Palmer (2009). O Quadro 1.1 sintetiza as variáveis metodológicas analisadas ao longo dessa tese. Por fim, realizou-se a interpretação da correlação multiescalar da inserção das cavernas nas bacias hidrográficas dos rios Tocantins/Araguaia, Paranã e São Vicente.

¹⁴ Disponível em <http://www.neotectonica.ufpr.br/2013/index.php/aplicativos>. Acesso em 18/02/2020.

Quadro 1.1: Metodologia do estudo conforme a escala de análise

Fatores analisados	Escala de análise nas bacias hidrográficas		
	Tocantins/ Araguaia	Paraná	Lapa São Vicente I
Litologia e estruturas geológicas	Grupos geológicos Escala 1:1.000.000	Formações geológicas Escala 1:1.000.000 <i>Hillshade</i> , Geomática, <i>AzimuthFinder</i> , <i>StereoNet 7</i>	Revisão bibliográfica <i>Hillshade</i> , Geomática, <i>AzimuthFinder</i> , <i>StereoNet 7</i>
Relevo	Planimetria e perfis geomorfológicos SRTM 90m Trabalhos de campo	Planimetria e perfis geomorfológicos SRTM 30m Trabalhos de campo	Perfis geomorfológicos Trabalhos de campo

1.5. Interpretação das escalas espaciais no estudo geomorfológico das bacias hidrográficas dos rios Tocantins/Araguaia, Paraná e São Vicente

A interpretação das escalas espaciais no estudo geomorfológico das bacias hidrográficas estudadas foi realizada a partir da discussão teórica. Essa etapa foi subsidiada pelos resultados obtidos nas etapas anteriores e pelas suas interpretações geomorfológicas. Por fim, os resultados foram confrontados com as hipóteses apresentadas para este estudo.

CAPÍTULO 2: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E BASES CONCEITUAIS

2.1. Escalas espaciais nos estudos geomorfológicos

A escala espacial é um elemento de análise geográfica, cujas definições e aplicabilidades teóricas estão estabelecidas cientificamente. Entretanto, há limitações práticas quanto às compatibilidades de escalas. Nas Geociências, a relação entre a escala e a análise do relevo foi discutida por alguns autores. Ellenberg e Mueller Dombois (1974) indicam escalas adequadas para os estudos em Geociências (Quadro 2.1). Essa proposta demonstra que deve haver relação entre o nível de detalhamento da informação e a amplitude da escala utilizada. As amplitudes de escalas ali indicadas são numéricas, o que orienta objetivamente os pesquisadores. Entretanto, em algumas regiões do Brasil não há dados gratuitos disponíveis em escalas de detalhes (1:10.000 e 1:50.000) sobre alguns temas.

Quadro 2.1: Exemplo de escalas indicadas para tipos de informações em Geociências

Amplitude de escala	Tipos de dados
1:1.000.000 a 1:3.000.000	Domínio climático e bioma
1:500.000 a 1:1.000.000	Grupo geológico, geomorfologia, classes pedológicas (1º nível), formações vegetais
1:100.000 a 1:500.000	Formação geológica, compartimentos geomorfológicos, classes pedológicas (2º nível ou superior) e vegetação
1:10.000 a 1:50.000	Feições geomorfológicas, perfis geomorfológicos, espécies vegetais

Fonte: Modificado de Ellenberg e Mueller Dombois (1974)

Christofolletti (1999) analisa a modelagem de sistemas ambientais e apresenta fundamentos conceituais sobre a compreensão analítica dessa temática. Esse aspecto inclui a classificação dos sistemas, que pode ser baseada em processos, escalas temporais, escalas espaciais e técnicas de resolução numérica, análoga ou analítica. Em relação às escalas temporais e espaciais, Santos (2004) compreende que cada evento ambiental possui sua escala. Assim, em geral, os fenômenos geológicos e geomorfológicos requerem tempos geológicos para ocorrerem e atingem espaços quilométricos. Já o intervalo de ação e resposta das transformações urbanas, por exemplo, corresponde a alguns anos e abrange território de alguns quilômetros (Figura 2.1).

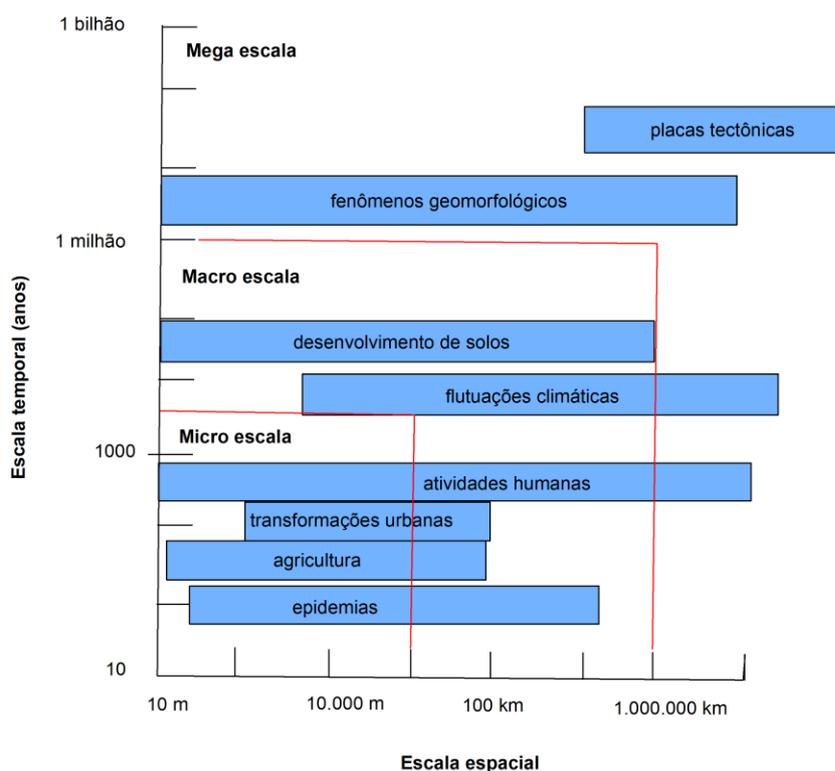


Figura 2.1: Representação dos planos de abordagem espacial e temporal

Fonte: Modificado de Santos (2004)

White e MC Kenzie (1986), ao analisarem resoluções e escalas temporais e espaciais da cobertura vegetal, concluem que nenhuma escala é perfeita. Portanto, a grandeza da escala e, conseqüentemente, o nível de detalhamento do estudo, dependem do objetivo a ser alcançado. Essa proposta, embora seja subjetiva, adequa-se a diferentes realidades, temáticas e tipos de estudos.

Santos (2004) destaca que o desafio durante o planejamento é definir o nível de detalhe condizente com os objetivos e instrumentos disponíveis. A autora destaca que não existe escala correta ou única. Entretanto, deve-se ter critérios diante dos métodos e técnicas possíveis de serem utilizadas ou custeadas. A recomendação da autora é que seja definido durante o planejamento: a) os níveis de organização; b) o quanto da heterogeneidade espacial deve ser representada e c) o quanto serão representadas as medidas de direção, distância, forma e geometria dos elementos.

Segundo Santos (2004), na escala espacial é necessário interpretar as circunstâncias que ocorrem no espaço ocupado. Nesta tese as circunstâncias investigadas estão relacionadas às formas, processos e fatores associados à formação e desenvolvimento das cavernas

desenvolvidas em rochas carbonáticas nas referidas bacias hidrográficas. A unidade de análise é bacia hidrográfica e a extensão territorial corresponde à área e perímetro delas.

Além disso, Santos (2004) ressalta a importância de adequação entre a área escolhida e a escala de trabalho. Afinal, a área deve ter relação com a escala e os fenômenos analisados. Dessa forma, a autora registra que os fatores que comandam as distribuições dos elementos variam de importância, tanto em diferentes áreas como em diferentes períodos da história. Essa temática faz parte das interpretações geomorfológicas.

Tricart (1965) classifica as escalas associadas às análises geomorfológicas conforme o Quadro 2.2. Verifica-se que o autor estabelece elementos de investigação geomorfológica de acordo com a unidade espacial de estudo. A unidade espacial varia da escala global ao micron. Assim, conhecimentos, métodos e técnicas da Pedologia, Sedimentologia, Geologia e Climatologia são aplicados em diferentes escalas investigativas.

Quadro 2.2: Escalas de análises geomorfológicas

Ordem de grandeza	Unidade espacial	Elementos investigativos
1 ^a	Escala global	- Considera as formas de relevo como um todo e a maior divisão em terras e águas. - O estudo geomorfológico está no antagonismo de forças endógenas e exógenas.
2 ^a	Unidades estruturais Milhões de quilômetros quadrados	- Regiões de escudos antigos, faixas orogênicas e bacias sedimentares; - Zonas morfoclimáticas - Considera a relação conjunta entre o contexto tectônico, estrutural e morfoclimático
3 ^a	Dezenas de milhares de quilômetros quadrados	- Analisa a evolução do relevo - Investiga pequenas unidades estruturais, como por exemplo: bacias sedimentares brasileiras
4 ^a	Centenas de quilômetros quadrados	- Analisa pequenas unidades estruturais, dentro de unidades maiores, por exemplo: maciço de Poços de Caldas no Planalto da Mantiqueira
5 ^a	Alguns quilômetros quadrados Escala 1:20.000	- Estudo da influência da litologia e erosão diferencial no relevo; - Pesquisas em escarpas, cuestas, sinclinais, anticlinais.
		... continua

		... continuação
6 ^a	Centenas de metros quadrados	- A influência da tectônica não aparece de forma direta; - Exemplo de formas de relevo estudadas: tálus, patamares, colinas
7 ^a	Decímetros de metros	- Analisa a relação entre os processos de esculturação e deposição; - Exemplos de formas de relevo investigadas: lapies, taffonis, matacões
8 ^a	Milímetros a microm	- Análise de objetos de estudo da sedimentologia e pedologia que auxiliam a Geomorfologia; - Interpretações químicas e/ou microscópicas de solos, rochas e sedimentos

Fonte: elaborado a partir de Tricart (1965)

Além disso, os princípios de mapeamento geomorfológico (IBGE, 2009) incluem o ordenamento das formas da superfície terrestre de acordo com as variações hierárquicas temporais e espaciais. Dessa forma, a metodologia de mapeamento geomorfológico proposto por Ross (1992) envolve o entendimento das unidades geomorfológicas de forma taxonômica (Figura 2.2). Essa metodologia, portanto, inclui a compreensão do relevo em diferentes escalas e níveis de detalhamento. Em geral, o primeiro táxon corresponde às unidades morfoestruturais e o segundo táxon inclui as unidades morfoesculturais, ou seja, os subcompartimentos do relevo. Os exemplos de morfoesculturas são planaltos, chapadas, depressões, dentre outras feições. Já o terceiro táxon envolve os padrões de formas de relevo e, portanto, representa o aprofundamento dos detalhes do táxon anterior. O quarto táxon demonstra os tipos das formas de relevo, que podem ser resultado de processos denudacionais ou agradacionais. O quinto táxon especifica os tipos de vertentes de cada forma de relevo descrita anteriormente. Por fim, o sexto táxon envolve o estudo das formas resultantes de processos atuais (Figura 2.2). Essa proposta metodológica demonstra a interrelação das escalas no estudo das unidades de relevo.

Para Santos (2004), nos estudos geomorfológicos o tipo da escala implica no nível de profundidade do estudo. Assim, a escala é classificada em pequena, média ou grande e isso condiciona o desenvolvimento de trabalhos, respectivamente, com níveis de reconhecimento, semidetalhe e detalhe (Quadro 2.3).

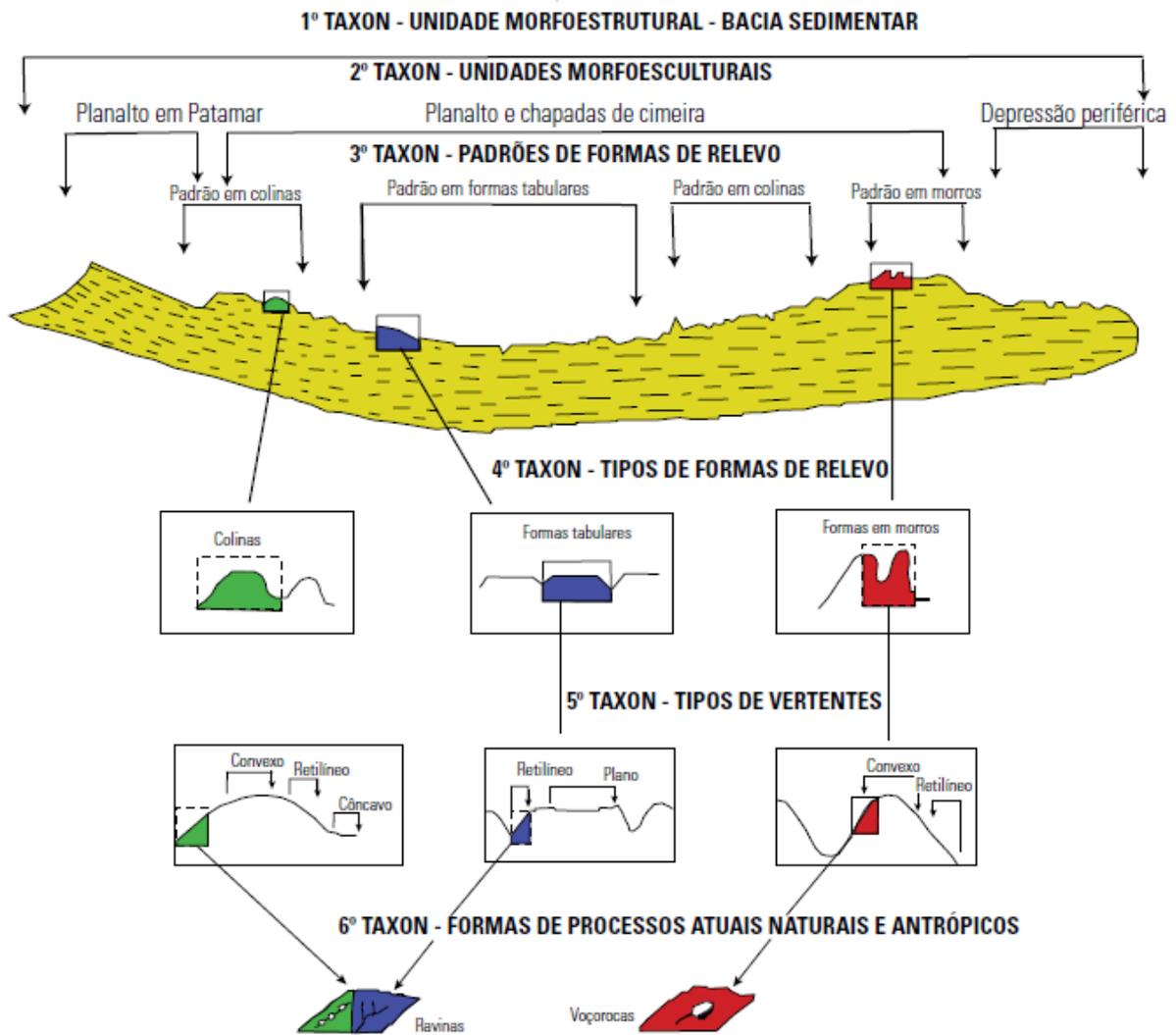


Figura 2.2. Unidades taxonômicas de classificação do relevo

Fonte: ROSS (1992) modificado por Santos *et al.* (2015b)

Quadro 2.3: Uso de diferentes escalas em estudos geomorfológicos

Tipo de escala	Nível de estudo	Unidade Geomorfológica	Exemplo
Pequena	Reconhecimento	Unidade morfoestrutural	Formação Piramboia
Média	Semidetalhe	Formas de relevo	Colinas amplas, Colinas pequenas
Grande	Detalhe	Tipos de vertentes	Encosta de colina

Fonte: Modificado de Santos (2004)

Observa-se que nas Geociências e Geomorfologia, a escala direciona o aspecto metodológico a ser utilizado no trabalho. Esse fator também interfere nas análises

geomorfológicas fluviais. Segundo Stevaux e Latrubesse (2017) há relação direta entre escalas temporais e espaciais de variáveis dos sistemas fluviais. Assim, deve-se haver proporção entre escalas espaciais e temporais, uma vez que formas e processos de hierarquia espacial menor surgiram, transformaram e desapareceram ao longo do tempo. Esse fator está associado à intensidade e velocidade das transformações das formas e processos.

Nesse sentido, Knighton (1998) compreende que os elementos, formas e processos fluviais se modificam no tempo e espaço. Portanto, as variáveis dos sistemas fluviais devem ser analisadas de forma que compatibilize as escalas espaciais que elas ocupam e o tempo necessário para surgimento e transformação desses elementos (Figura 2.3). Verifica-se que algumas formas do sistema fluvial interferem em outras (Figura 2.3). Assim, compreende-se que uma ou mais variáveis podem ser investigadas concomitantemente, desde que se observem as escalas a elas associadas.

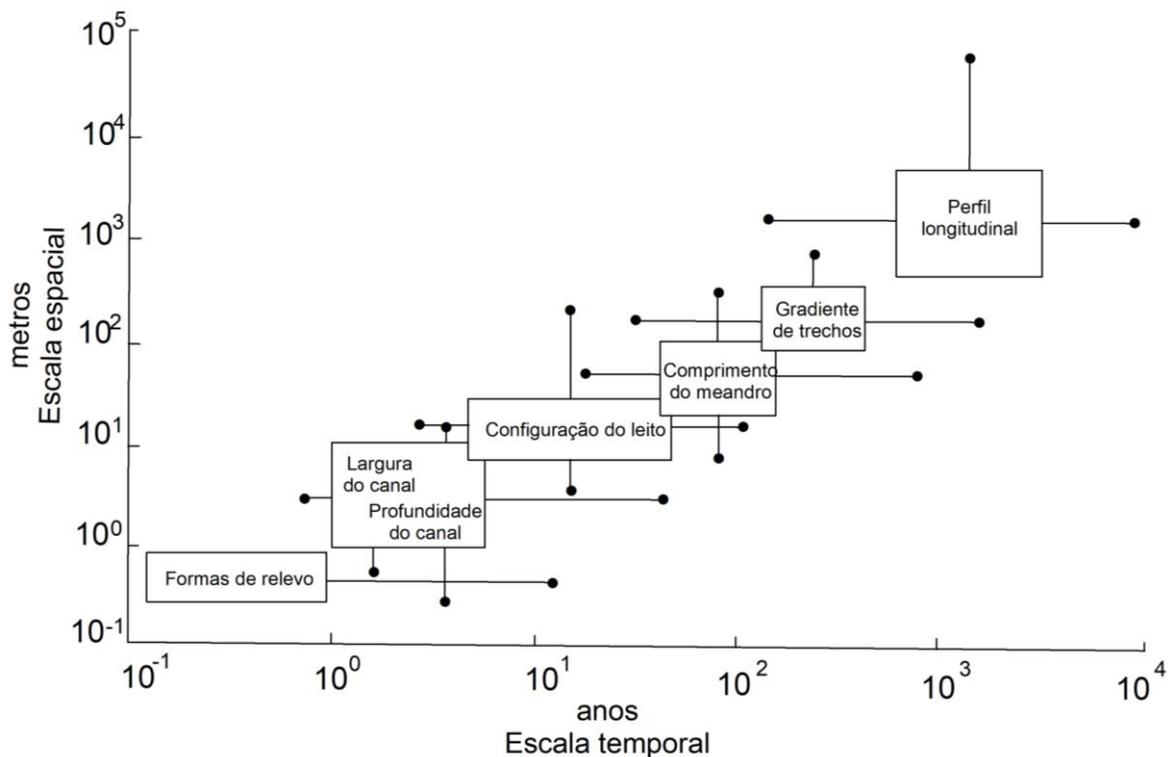


Figura 2.3: Elementos de análise fluvial conforme as escalas espaciais e temporais

Fonte: Modificado de Knighton (1998)

Santos (2004) destaca a diferença entre a escala de tempo de ocorrência de um fenômeno e a escala de tempo de resposta de um organismo ao que ocorreu. Essa diferença também se aplica aos processos geomorfológicos, uma vez que envolve a interpretação da complexidade do sistema geomorfológico, tendo em vista os princípios de equilíbrio dinâmico

definidos por Schumm e Lichty (1965). Schumm e Lichty (1965) demonstram as principais variáveis que interferem no sistema fluvial e registra que, em condições naturais, a dependência, ou seja, a influência dessas variáveis no sistema fluvial ocorre em determinada escala temporal. Esses autores classificaram a escala de tempo em cíclico ($10^6 - 10^7$ anos), dinâmico ($10^4 - 10^5$ anos), estável ($10^2 - 10^3$ anos) e instantâneo ($< 10^1$ anos). Assim, a relação de dependência entre relevo regional e sistema fluvial, por exemplo, ocorre em escala de tempo cíclico, visto que o relevo regional interfere na dinâmica fluvial, ou o oposto pode ocorrer, geralmente entre 10^6 e 10^7 anos. Já a relação entre a forma do leito e o sistema fluvial se estabelece em escala de tempo instantâneo (menor que 10^1 anos) (Quadro 2.4).

Quadro 2.4: Hierarquia e dependência de variáveis do sistema fluvial em condições naturais com a escala temporal

Variáveis em sistemas fluviais	Escala temporal (anos)			
	Cíclico ($10^6 - 10^7$)	Dinâmico ($10^4 - 10^5$)	Estável ($10^2 - 10^3$)	Instantâneo ($< 10^1$)
Relevo regional	■			
Perfil longitudinal	■			
Solos		■		
Vegetação		■		
Descarga de água e sedimentos			■	
Forma do canal e da planície			■	
Forma do leito				■
Características do fluxo hídrico				■

■ Dependência

Fonte: Modificado de Schumm e Lichty (1965)

A relação de dependência e independência determina a complexidade do sistema, uma vez que a instabilidade em elementos pode causar ou aumentar a complexidade em outras áreas desse sistema. Além disso, ressalta-se que há diferenças na intensidade, variedade, distribuição e concentração das ocorrências e respostas dos processos geomorfológicos de acordo com a escala analisada. Assim, é complexo explicar as razões e fatores que condicionaram as formas terrestres atuais. Dessa forma, apesar da ausência de datação absoluta das formas e processos associados às cavernas desenvolvidas em rochas carbonáticas nas bacias hidrográficas dos rios Tocantins/Araguaia, Paranã e São Vicente, foram estabelecidos parâmetros temporais para interpretação geomorfológica. Esses parâmetros seguem a relação de proporção entre espaço e tempo, ou seja, quanto maior a unidade espacial, maior a dimensão temporal observada.

Neste trabalho, para a compreensão das escalas temporais e espaciais, considera-se o conceito de uniformitarismo¹⁵ e ergodicidade¹⁶. Conforme Wicander e Monroe (2009), o uniformitarismo significa que embora as velocidades e as intensidades dos processos geológicos variaram no passado, os princípios físicos e químicos da natureza permanecem os mesmos. Nesse sentido, discute-se a aplicação do conceito de escala nas análises de Geomorfologia Cárstica e Espeleologia.

2.2. A escala como elemento de análise em Geomorfologia Cárstica e Espeleologia

Nos estudos espeleológicos, Karmann e Sanchez (1979) indicaram áreas propensas à ocorrência de cavernas. Essas são designadas províncias espeleológicas, que são compostas por distritos espeleológicos, os quais são compostos de sistemas espeleológicos. Essa organização de Karmann e Sanchez (1979) se remete à análise multiescalar dos processos da geomorfologia cárstica e da espeleologia.

As províncias espeleológicas correspondem às unidades litoestratigráficas compostas por rochas favoráveis aos processos de dissolução e formação de cavernas e feições cársticas. Os distritos espeleológicos são definidos por fatores locais e regionais, como continuidade de fácies carbonáticas, compartimentação topográfica, bacias hidrográficas e características climáticas. Os sistemas espeleológicos, por sua vez, são estabelecidos conforme as características do fluxo hidrológico, litologia, padrão de falhas e dobras (KARMANN, 2016). Os sistemas espeleológicos implicam que duas ou mais cavernas estão conectadas. O conceito de sistema demonstra que as cavernas possuem trocas ou fluxos de matéria e energia.

Kohler (1989) defende que quanto menor a escala de análise, mais é preciso recuar no tempo geológico e mais as feições geomorfológicas estarão ligadas aos grandes lineamentos estruturais. Por outro lado, quanto maior a escala de análise, mais recentes são os processos e maior a influência dos processos climáticos no relevo.

Os princípios de escala também estão contidos na Instrução Normativa do MMA nº 2, de 30 de agosto de 2017, que define a metodologia para a classificação do grau de relevância das cavernas (BRASIL, 2017). Segundo essa Instrução Normativa, os estudos espeleológicos de análise de relevância devem apresentar informações sobre os enfoques local e regional (Figura 2.4). As análises em enfoque local, conforme a IN 02/2017, são delimitadas pela

¹⁵ Uniformitarismo é, conforme Stevaux e Latrubesse (2017), um conceito introduzido por Hutton em que o presente é a chave do passado. Assim, os eventos e processos geológicos do presente representam de forma aproximadamente uniforme aqueles que ocorreram no passado.

¹⁶ A ergodicidade, conforme sumarizado por Stevaux e Latrubesse (2017), em algumas situações, espaço e tempo podem ser considerados intercambiados.

unidade geomorfológica que apresenta continuidade espacial, podendo envolver serras, morrotes ou sistema cárstico, o que for mais restritivo em termos de área, desde que contemple a área de influência da caverna¹⁷ (BRASIL, 2017). Nesse caso, destaca-se que para a delimitação da unidade geomorfológica se deve atentar à: a) continuidade espacial; b) ser o mais restritivo em área e c) contemplar a área de influência da caverna.

Já as análises de enfoque regional são delimitadas pela unidade espeleológica. A unidade espeleológica corresponde à área com homogeneidade fisiográfica, geralmente associada às rochas solúveis, que podem agregar formas de relevo cárstico e pseudocárstico, como dolinas, sumidouros, ressurgências, vales cegos, lapiás e cavernas, delimitada por um conjunto de fatores associados à sua formação (BRASIL, 2017).

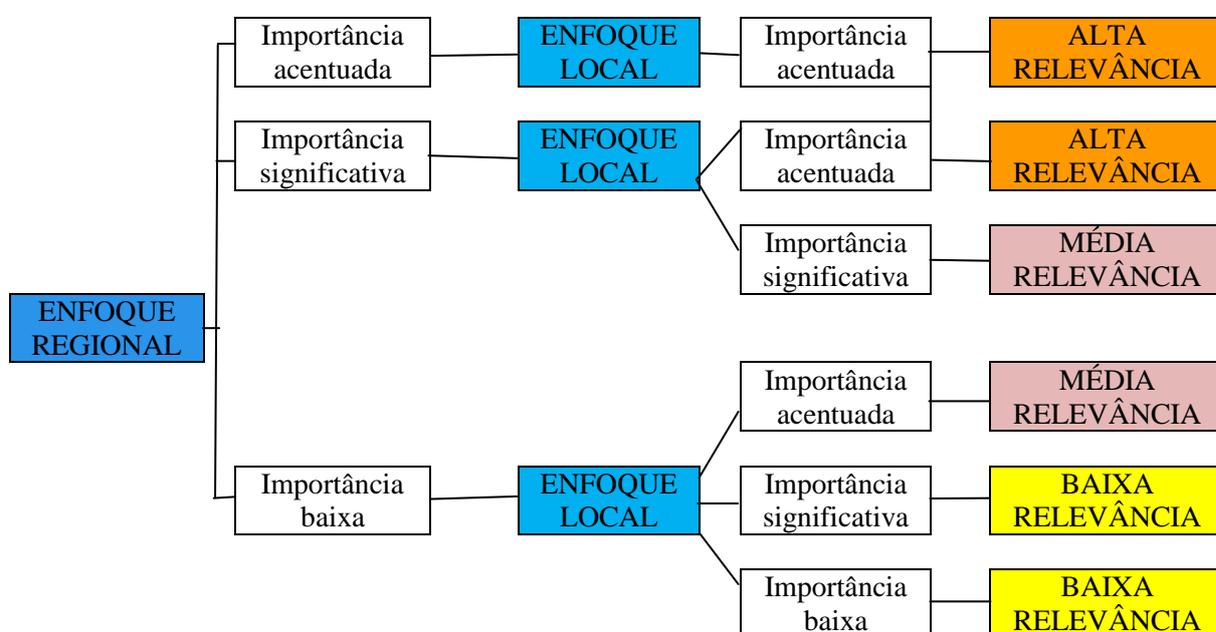


Figura 2.4: Chave de classificação do grau de relevância de cavernas

Fonte: Modificado de Brasil (2017)

A delimitação da unidade geomorfológica e espeleológica deve considerar as particularidades de cada contexto local e regional. Para fins de licenciamento ambiental, deve-se analisar a área a ser licenciada, com influência direta e indireta. Para fins científicos e de conservação do patrimônio espeleológico¹⁸, recomenda-se que os estudos em escala local

¹⁷ A área de influência da caverna corresponde à área composta por elementos bióticos e abióticos, superficiais e subterrâneos, necessários à manutenção do equilíbrio ecológico e integridade física do ambiente espeleológico (BRASIL, 2017).

¹⁸ Patrimônio espeleológico corresponde ao conjunto de elementos bióticos, abióticos, socioeconômicos, históricos, culturais, subterrâneos e superficiais representados pelas cavernas e/ou a elas associadas (CONAMA, 2004).

delimitem a unidade geomorfológica e a unidade hidrológica. Nesse caso, a unidade hidrológica corresponde à bacia hidrográfica vinculada à caverna, uma vez que as atividades e processos que impactam a hidrologia interferem na dinâmica das cavernas. Com isso, apresentam-se as principais bases teóricas sobre o relevo cárstico tradicional.

2.3. O relevo cárstico tradicional

O carste se refere às paisagens e relevos com características específicas geradas, principalmente, pela circulação da água em rochas quimicamente solúveis. Os ambientes cársticos são caracterizados pela presença de cavernas, sistemas de drenagens com fluxos interrompidos, áreas subterrâneas e vales com canais de drenagens (vales secos) decorrentes, principalmente, da solubilização da rocha (JENNINGS, 1971; SWEETING, 1972; GILLIESON, 1996; FORD; WILLIAMS, 2007). Para Ford e Williams (2007), o carste consiste em terrenos com paisagens e hidrologia distintas que surge da combinação de rochas altamente solúveis e porosidade secundária bem desenvolvida.

Conforme Piló (1998), uma paisagem deve ser definida como cárstica em função da representatividade do conjunto de formas típicas dos processos de dissolução, uma vez que o termo carste tem origem morfológica. Segundo Sweeting (1972), essa morfologia específica é composta por feições nas zonas superficiais, subcutânea e subterrânea (Figura 2.5). O exocarste ou zona superficial (Figura 2.5), como o próprio nome indica, corresponde à área externa, na qual as feições são produzidas pela dissolução e estão na superfície da paisagem. Para Auler *et al.* (2005), a morfologia superficial possui diversidades de tipologias em função de um conjunto de variáveis que se ajustam para configurar os relevos cársticos. Assim, Bögli (1980), Jennings (1971) e Sweeting (1972) afirmam que entre as principais feições superficiais cársticas se destacam os *karrens* ou lapiás; verrugas; maciços e paredes rochosos; mogotes; depressões fechadas como dolinas, uvalas e poljes; torres; arcos; pontes naturais; sumidouros; ressurgências; vales secos; vales cegos, entre outras.

O epicarste ou zona subcutânea (Figura 2.5) corresponde à porção superior da rocha, pode ser recoberta por material inconsolidado ou não, e contém uma rede de fissuras alargadas por dissolução (BOGLI, 1980; JENNINGS, 1971; SWEETING, 1972; PALMER, 2009). Nesse contexto, o manto de alteração assume papel fundamental no carste, pois se encontra em contato direto com a rocha solúvel subjacente (AULER *et al.*, 2005).

O endocarste ou zona subterrânea (Figura 2.5) equivale à área que engloba o ambiente subsuperficial e seus depósitos químicos, clásticos e orgânicos (BOGLI, 1980). Conforme Palmer (2009), as principais feições endocársticas são as cavernas e os seus depósitos (como

as estalactites, estalagmites, colunas, cortinas, escorrimentos, helictites, flores de aragonita, pérolas, travertinos, vulcões, dentes de cão, entre outras).

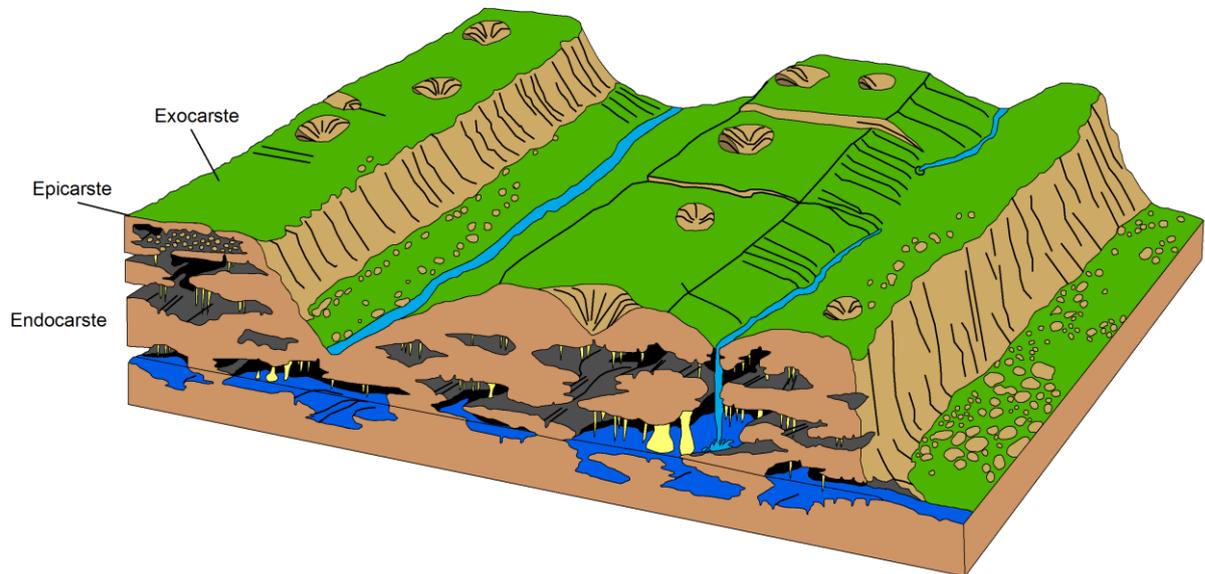


Figura 2.5: Modelo de uma paisagem cárstica com ênfase no exocarste, epicarste e endocarste
Fonte: Modificado de Press *et al.* (2006)

2.4. Feições exocársticas: principais características e aspectos morfogenéticos

As feições exocársticas são elementos fundamentais que integram a morfologia e morfogênese do ambiente cárstico. *Karren* ou *lapiás* (Figura 2.6) consistem em ranhuras, sulcos ou caneluras estreitas com cumes residuais afiados e possuem vários decímetros ou até 5 a 10m de comprimento. As áreas completamente cobertas por *karren* são denominadas *campos de karren* ou *campos de lapiás*. Entretanto, sulcos largos e sinuosos que às vezes se alargam em feições semelhantes a marmitas, separadas umas das outras por cumes residuais arredondados diferem-se dos *karren* típicos. Essas feições são denominadas *kamenitzas*. *Karren* aparecem em qualquer local de área cárstica, do nível do mar às maiores altitudes, bem como em áreas com diversas condições climáticas (CVIJIC, 1895). Além disso, conforme Cvijic (1895), os *karren* são formados pela atividade química nas rochas sob a influência da água que esco.

Karren são feições de dissolução comuns em áreas cársticas, possuem tipologias variadas e origem poligenética. Bögli (1980) classifica os *karren* conforme o tamanho, origem e morfologia. Os principais fatores que afetam a formação dessas feições são a quantidade e

distribuição da precipitação, composição e textura do calcário, grau de inclinação da rocha e sua estrutura (BÖGLI, 1980; JENNINGS, 1985; FORD; WILLIAMS, 2007).



Figura 2.6: Karren na região de Monjolos (MG)

Foto: Rose Lane Guimarães (2012)

Para Cvijic (1895), as dolinas são depressões em forma de bacia, com diâmetro entre 10 e 1000m e profundidade entre 2 e 100m. Os fundos das dolinas podem ser isentos de qualquer tipo de material, preenchidos por material autóctone ou alóctone, ou podem ter a presença de um ou vários sumidouros. Algumas dolinas se alargam e proporcionam acesso a cavernas e canais de drenagens subterrâneas. A maioria dessas feições possui contato com cobertura pedológica. As condições tectônicas e climáticas locais têm influência significativa na morfologia das dolinas. Além disso, para esse autor, alinhamentos de dolinas podem estar associados a sistemas de falhas ou às cavernas. Destaca-se que para a formação dessas depressões fechadas é importante que exista água infiltrada nas fraturas em um período temporal relativamente curto. Isso causa a intensa dissolução da rocha (CVIJIC, 1895).

De acordo com os processos predominantes na gênese dessas geoformas, elas podem ser classificadas como dolinas de colapso ou abatimento; dissolução; aluviais; ou colapso do carste subjacente (JENNINGS, 1985) (Figura 2.7). As dolinas de colapso ou abatimento se formam quando tetos ou paredes de cavernas desmoronam, quebram e caem por ação da gravidade. Afinal, o contínuo alargamento das áreas de dissolução ocasiona a perda de sustentação do teto das cavernas, o que gera o seu colapso. Essas dolinas, em geral, apresentam morfologia de paredes abruptas. As dolinas de dissolução ocorrem quando esse processo ocorre na rocha, especialmente em pontos mais susceptíveis, como fraturas, juntas e planos de acamamento. Assim, as águas superficiais convergem para o ponto central de absorção, o que acelera a dissolução. Esse processo gera depressões fechadas com morfologia suavizada (JENNINGS, 1985) (Figura 2.7).

As dolinas aluviais ocorrem quando há material pedológico inconsolidado e esse é introduzido nas fraturas da rocha. Assim, o solo passa a ser introduzido gradativamente nas fraturas ou condutos. Isso, por sua vez, ocasiona subsidências na superfície e o surgimento das dolinas. A dolina de abatimento devido ao carste subjacente ocorre quando há rocha carbonática subjacente à outra litologia. Assim, ocorre a infiltração e dissolução da rocha carbonática. Consequentemente, o substrato litológico superior perde sustentação e desmorona. Por fim, a dolina em sumidouro aluvial ocorre associada a sumidouro, que facilita e potencializa a dissolução da rocha (JENNINGS, 1985) (Figura 2.7).

As uvalas correspondem às depressões originadas a partir da coalescência de dolinas. Isso origina o surgimento de depressões fechadas com múltiplos pontos de infiltração (WHITE, 1988). Segundo Cvijic (1895), polje é um grande vale cárstico com fundo plano, morfologia alongada ou oval e comprimento equivalente, no mínimo, ao dobro da largura. Essas feições apresentam planícies espaçosas circundadas por vertentes íngremes e seus perfis longitudinais coincidem com os de vales cegos. O que torna os poljes diferentes dos vales cegos longos e sinuosos é a sua grande largura, bem como o fato de que a direção do eixo mais longo é sempre a mesma que a direção das camadas sedimentares. Além disso, os poljes não apresentam declives contínuos e suas bases são sempre planas ou inclinadas em direções diferentes. Os poljes são diferentes das dolinas devido as suas dimensões, formato alongado e suas bases representarem planícies espaçosas. Cada sumidouro do polje possui sua própria área de recarga individual. Assim, a planície do polje possui várias áreas hidrográficas autonômicas.

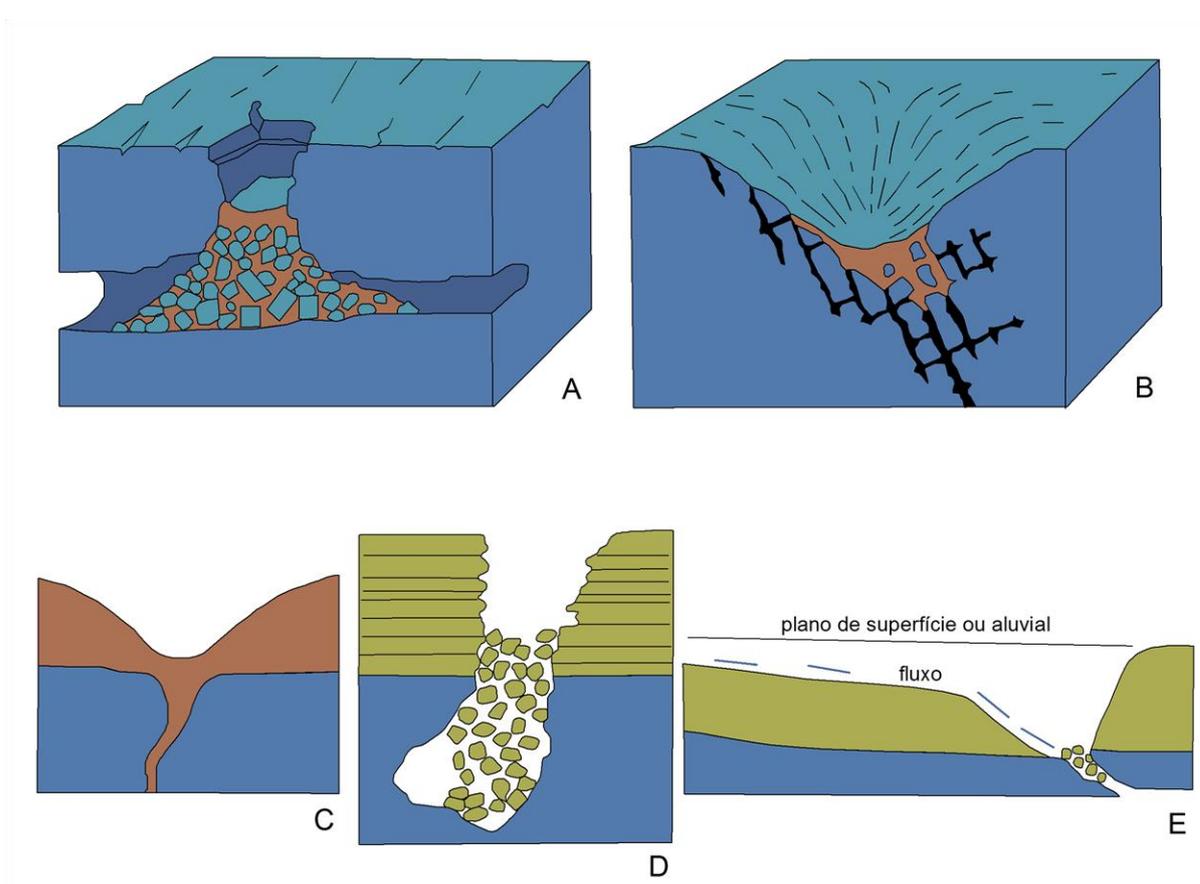


Figura 2.7: Tipos de dolinas conforme os processos envolvidos na sua gênese.

A) Dolina de abatimento; B) dolina de dissolução; C) dolina de dissolução subsidência; D) Dolina de abatimento devido ao carste subjacente; E) dolina em sumidouro aluvial.

Fonte: Modificado de Jennings (1985)

Além dos poljes típicos há outros tipos de poljes. Os poljes abertos são aquelas depressões que não são completamente fechadas. Portanto, elas perdem águas através de passagens entre penhascos. Os poljes circulares são raros e apresentam comprimento não muito maior que a largura. Além disso, há os poljes com formas irregulares. Do ponto de vista hidrográfico, essas feições podem ser secas, periodicamente inundadas ou alagadas durante todo o ano (CVIJIC, 1895). Kohler (1989) acrescenta que os poljes podem ter gênese associada a fatores estruturais, bem como a processos de corrosão.

A Figura 2.8 mostra o processo de desenvolvimento de dolinas a poljes. Observa-se a presença de dolinas na área (A), em seguida elas se ampliam (B) e com o passar do tempo se coalescem, formando as uvalas (C). A morfodinâmica da paisagem cárstica, geralmente, possibilita a dissolução da superfície, o que dá origem a polje, marcado pela presença de paredão de maciço rochoso, algumas torres e banquetas (D).

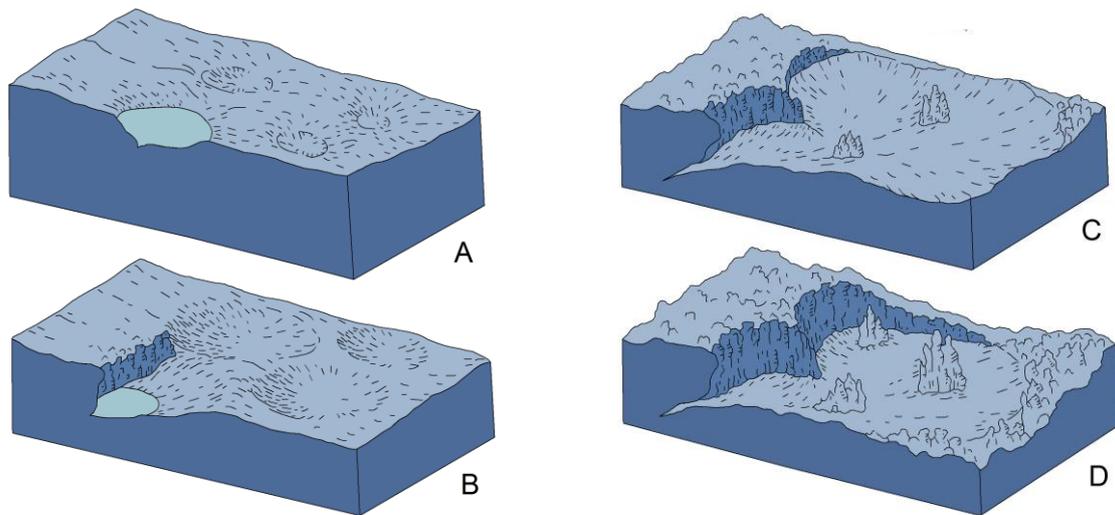


Figura 2.8: Processo de desenvolvimento do relevo exocárstico. A) dolinas; B) dolinas ampliadas; C) uvala; D) polje.

Fonte: Modificado de Kohler (2001)

Conforme Cvijic (1895), parte da precipitação que cai na área cárstica é infiltrada nas fraturas e dolinas, outra parte flui para cursos hídricos e desaparece em outras fraturas e sumidouros. Além disso, o carste é caracterizado pela relativa carência de água em superfície ao passo que há abundância hídrica no meio subterrâneo. As drenagens no ambiente cárstico podem fluir através de vales cársticos profundos ou desaparecer em fraturas, sumidouros ou poljes. Sumidouros são buracos com aproximadamente 1m de diâmetro (CVIJIC, 1895) ou mais e servem para a passagem da água superficial para a subterrânea e, como o próprio nome indica, possibilita o desaparecimento de água da superfície (FORD; WILLIAMS, 2007).

Os ambientes fluviais apresentam características particulares nas regiões cársticas. Um exemplo disso são os vales secos que constituem, individualmente, um vale com fluxo de água temporário, que flui apenas nos períodos de chuva. Eles representam antigos vales fluviais cuja drenagem foi capturada para o meio subterrâneo. Esses vales são geralmente compostos por dolinas. Os vales cegos são caracterizados pela interrupção abrupta da drenagem diante de um sumidouro (CVIJIC, 1895; KOHLER, 2001). Segundo Cvijic (1895) alguns vales cegos são resultados de movimentos tectônicos. Já os vales recuados são aqueles que surgem a partir da ressurgência da água em superfície após ela percorrer o meio subterrâneo. Além disso, há vales com paredões abruptos na forma de *canyons*. Eles estão relacionados, especialmente, a abatimentos do sistema subterrâneo (Figura 2.9).

O relevo cárstico também é marcado pela presença de feições positivas, como maciços, mogotes, torres e verrugas. Maciços são formas residuais rochosas que podem alcançar centenas de quilômetros de extensão e, geralmente, apresentam vertentes escarpadas. Eles apresentam paredões recobertos com campos de *lapiás* e são, às vezes, associados a vales cegos. Por outro lado, nas bases dos maciços também afloram ressurgências, tornando as drenagens superficiais. Os maciços também são caracterizados por abrigarem o ambiente endocárstico (KOHLENER, 2001).

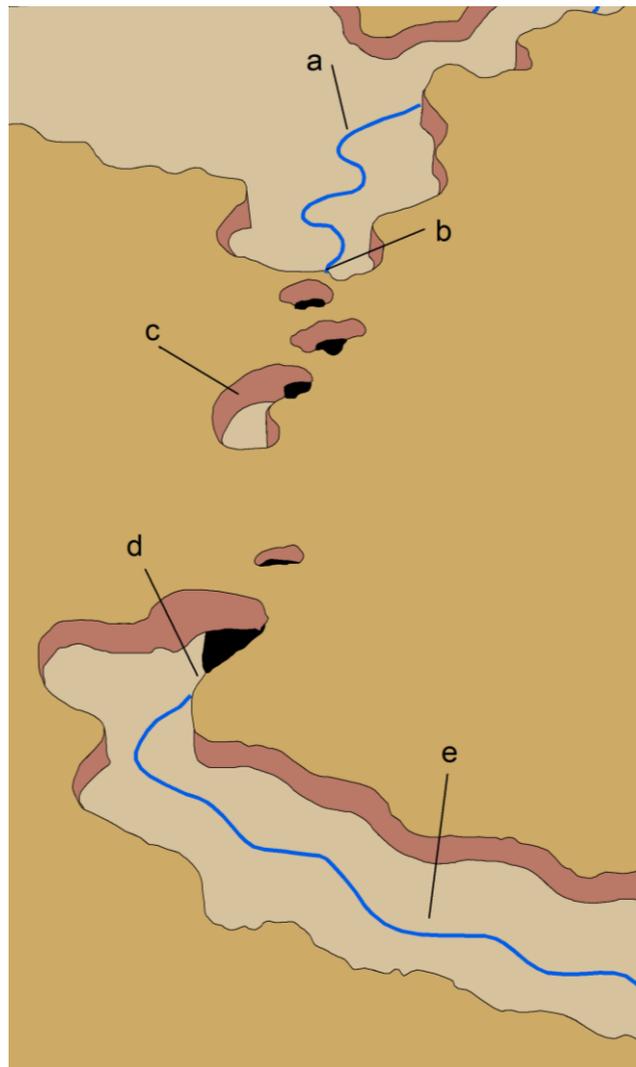


Figura 2.9: Modelo de paisagem fluviocárstica

a) Vale cego; b) sumidouro; c) claraboia; d) ressurgência; e) vale recuado.

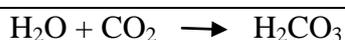
Desenho: modificado de Marcos Brito (sem data)

Fonte: Modificado de Kohler (2001)

Conforme Kohler (2001), os mogotes são feições típicas do carste tropical e constituem em morros residuais com algumas dezenas de metros de altitude. No carste Dinário, essas feições são chamadas *hum*. O autor acrescenta que a variação do relevo em mogotes é o carste de torres, que se trata de um conjunto de torres que se destaca na planície fluvial. As verrugas ou banquetas, por sua vez, são afloramentos individualizados com dimensões que variam de alguns decímetros a um metro de diâmetro e altura. Já os arcos naturais ocorrem quando as torres são unidas por massa rochosa através de estruturas horizontais remanescentes (KOHLE, 2001). Quando essas estruturas são cruzadas ou foram cruzadas por um curso hídrico recebem a denominação de pontes naturais (JENNINGS, 1971). Segundo Jennings (1985), pontes naturais ocorrem em outros tipos de relevo, mas são mais comuns em relevos cársticos. A gênese das pontes naturais está associada a vários fatores e, portanto, ocorre: a) devido ao abatimento de blocos das cavernas e sobram alguns residuais de teto delas; b) associado à captura de um rio subterrâneo; c) em função da existência de uma faixa estreita de calcário mais resistente cruzando a drenagem e d) devido à maior incisão fluvial de alguns locais (JENNINGS, 1971).

2.5. Processo de Formação do Relevo Cárstico

O relevo cárstico é gerado, especialmente, pelo processo de dissolução que exerce papel fundamental na morfogênese cárstica, sendo mais importante e dominante neste do que em qualquer outro tipo de relevo (JENNINGS, 1985; WHITE, 1988). Nos ambientes carbonáticos o processo de dissolução se inicia quando a água (H₂O) fluvial ou pluvial reage com o dióxido de carbono (CO₂), presente nos solos e na atmosfera e forma o ácido carbônico (H₂CO₃) (Equação 2.1) (FORD; WILLIAMS, 2007).

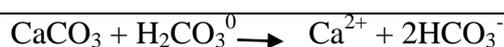


Equação 2.1: Formação do Ácido Carbônico

Fonte: Ford e Williams (2007)

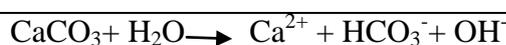
Posteriormente, Ford e Williams (2007) apresentam um conjunto de reações químicas de dissociação do ácido carbônico, da calcita e das reações entre os íons de H⁺, cálcio (Ca²⁺) e carbonato (CO₃²⁻). Esses autores informam os resultados dos experimentos de Plummer *et al.* (1978), segundo os quais, após a formação do ácido carbônico, a água acidulada percorre a rocha carbonática na sua superfície e ao longo de falhas e fraturas e reage com os minerais da rocha. No caso do calcário, o mineral predominante é a calcita (CaCO₃). Essa reação resulta

na formação de íons de cálcio (Ca^{2+}) e bicarbonato (Equação 2.2). Além disso, há a dissociação da calcita na água, o que resulta na formação de íons de cálcio (Ca^{2+}), HCO_3^- e hidroxila (OH^-) (Equação 2.3). Essa sequência de reações também é sumarizada a partir da reação da calcita, com a água e o dióxido de carbono, que resulta na formação de bicarbonato de cálcio e íons livres de cálcio (Equação 2.3) (PLUMMER *et al.*, 1978).



Equação 2.2: Reação da calcita com o ácido carbônico

Fonte: Plummer *et al.* (1978)



Equação 2.3: Dissolução do calcário

Fonte: Plummer *et al.* (1978)

Conforme Ford e Williams (2007), essas reações químicas são reversíveis. A água saturada de minerais, ao precipitar, libera o CaCO_3 e forma os espeleotemas. Além disso, quando isso ocorre há a liberação de moléculas de H_2O e CO_2 , que ficam disponíveis no sistema (Equação 2.4).



Equação 2.4: Precipitação do bicarbonato de cálcio

Fonte: Modificado de Plummer *et al.* (1978)

A relação entre formas, materiais, fluxos e dissolução gera uma dinâmica complexa para a morfogênese de paisagens cársticas. Logo, a diversidade dos condicionantes morfogenéticos determina a existência de diferentes tipos de carste, que são variáveis no tempo e no espaço (WHITE, 1988). Os principais condicionantes que interferem no desenvolvimento do relevo cárstico são, em síntese, a litoestrutura, clima e gradiente hidráulico (DREYBRODT, 1988; WHITE, 1988). Segundo Thornbury (1960), há quatro condições principais para o desenvolvimento do relevo cárstico: a) litologia; b) estrutura; c) diferença topográfica que permita a circulação da água e d) clima com disponibilidade hídrica líquida moderada a abundante. Assim, conforme Ford e Williams (2007), o relevo cárstico é resultado da interação entre vários fatores de formação. Nesse contexto, apresenta-se uma revisão sobre os fatores associados à morfogênese de paisagens cársticas.

2.6. Fatores de Formação do Relevo Cárstico

Há variáveis químicas, físicas e hidrogeológicas que controlam o desenvolvimento do carste. As variáveis químicas são a disponibilidade hídrica, o dióxido de carbono (CO_2) e a temperatura. Esses aspectos são frequentemente agrupados também como fatores climáticos e direcionam o equilíbrio de suas soluções no ambiente cárstico. Para que o processo continue e a solução não fique saturada, é necessária a circulação de água no sistema. Assim, precipitação e o relevo são forças físicas que associadas aos processos químicos favorecem o desenvolvimento do carste. As principais variáveis hidrogeológicas que interferem no desenvolvimento do carste são a tectônica, espessura e solubilidade da rocha, bem como as propriedades litológicas, estruturais e estratigráficas. Além disso, o campo gravitacional da Terra é uma fonte de energia para circulação do lençol freático. Afinal, todos esses fatores interferem na circulação hídrica e na dissolução (WHITE, 1988) (Figura 2.10).

Na Figura 2.10 se pode observar os fatores associados à formação e desenvolvimento do relevo cárstico: rocha solúvel, precipitação no estado líquido e o próprio relevo. Inicialmente, a água oriunda da precipitação reage com o CO_2 atmosférico retido na superfície terrestre, e contribui para a dissolução da rocha solúvel. Posteriormente, a solução química obtida nessa reação escoia pelo relevo íngreme e sai do sistema, deixando espaços vazios subterrâneos e morfologia característica desse tipo de relevo. Logo, nota-se um equilíbrio dinâmico entre as forças químicas, físicas e hidrogeológicas, que atuam em diferentes intensidades na configuração desse relevo.

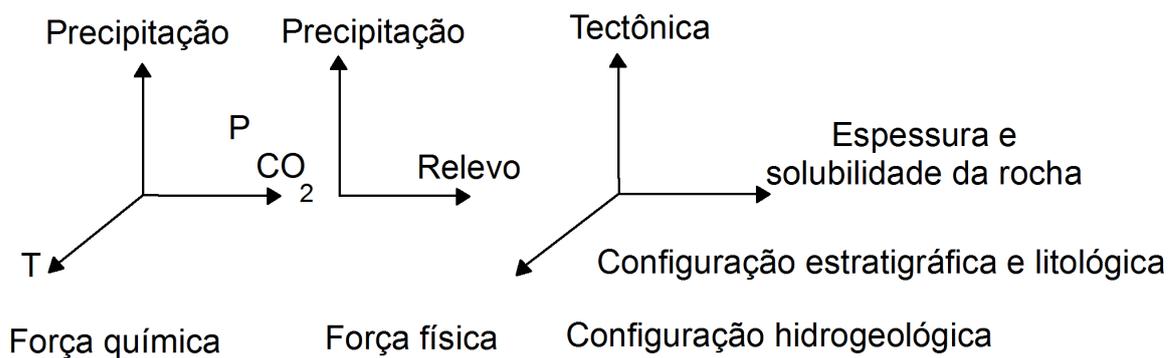
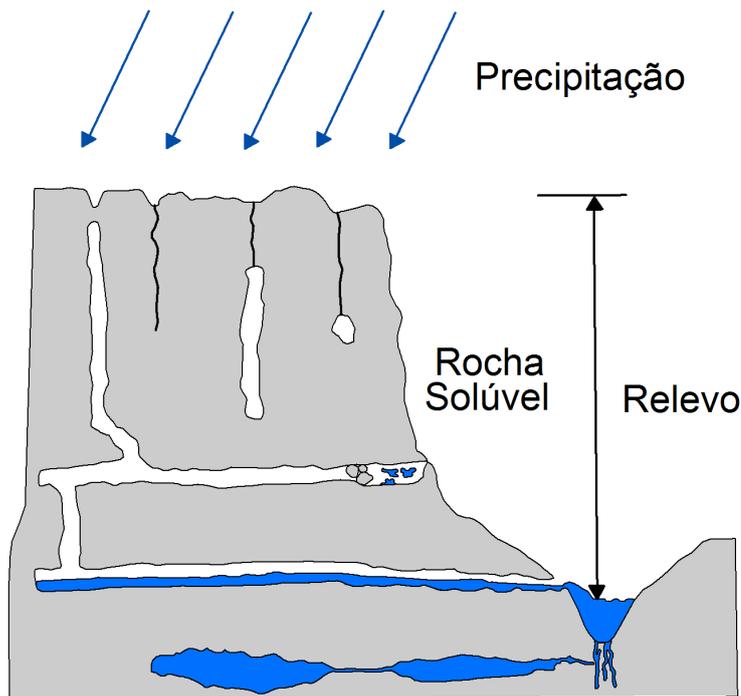


Figura 2.10: Características essenciais do processo cárstico e variáveis independentes que guiam o desenvolvimento das paisagens cársticas

Fonte: Adaptado de White (1988)

Deve-se frisar, entretanto, que a interação conjunta do regime climático (principalmente dos elementos temperatura e disponibilidade hídrica), composição química e textura das rochas, estruturas geológicas, volume de água infiltrada e gradiente hidráulico são os elementos chave a serem discutidos no processo de dissolução e formação do relevo cárstico. Conforme Ford e Williams (2007), a litoestrutura é um fator fundamental para o surgimento do carste, uma vez que suas propriedades estão relacionadas aos processos de dissolução. Os aspectos litológicos mais importantes nesse processo são a composição e pureza da rocha, sua textura e porosidade. Nesse contexto, não há consenso científico sobre considerar como cárstico o relevo desenvolvido em litologias não carbonáticas. Por isso, neste

estudo, serão apresentadas apenas as características das rochas carbonáticas e sua relação com o processo de dissolução.

A composição e pureza da rocha carbonática corresponde ao percentual de minerais solúveis presentes na matriz litológica. As rochas carbonáticas com maior potencial de desenvolvimento de relevo cárstico possuem acima de 70% de pureza. As principais impurezas nessas rochas correspondem predominantemente aos minerais argilosos e silicosos que, quando abundantes, principalmente em termos de argila, podem obstruir os protocondutos que, inicialmente, se formam no processo de dissolução da rocha carbonática (FORD; WILLIAMS, 2007). Em síntese, quanto maior a composição de minerais carbonáticos¹⁹, maior a solubilidade da rocha.

Em geral, quanto menor o tamanho do grão mineral, maior e mais rápida é a dissolução da rocha, pois há maior superfície intragranular exposta para atuação química da água. Porém, se a rocha for homogênea, compacta e composta principalmente por grãos finos, a solubilidade será menor que a rocha heterogênea. Isso ocorre porque os grãos finos formam uma massa uniforme em seu arranjo e tamanho, o que dificulta a percolação da água. Assim, quanto maior a heterogeneidade no tamanho dos grãos minerais, maior a superfície a ser dissolvida (FORD; WILLIAMS, 2007) e maior a possibilidade da penetração de água. Souza (2011), em pesquisa em cavernas desenvolvidas em mármore na Serra do Cipó afirma que as rochas carbonáticas sedimentares (como o calcário e o dolomito, por exemplo) são mais solúveis que as metamórficas (como o mármore). Afinal, o metamorfismo reduz os espaços intergranulares das rochas e assim dificulta a penetração e ação química da água.

Nesse sentido, as rochas possuem porosidade primária e secundária. A porosidade primária corresponde aos espaços intragranulares desenvolvidos antes da diagênese. A porosidade secundária equivale às estruturas formadas após a diagênese, como, por exemplo, as falhas, fraturas, juntas, planos de acamamento e demais descontinuidades litológicas (DREYBRODT, 1988). A porosidade secundária é importante porque guia o caminho da solução subterrânea e contribui para a formação da rede de condutos. Assim, quanto maior a porosidade primária e secundária, maior a quantidade de poros, logo maior é a capacidade de circulação hídrica e dissolução (SWEETING, 1972; DREYBRODT, 1988; IBGE, 1999; FORD; WILLIAMS, 2007). Os dobramentos também podem criar diferentes estilos de relevos cársticos e variadas organizações hidrogeológicas. Isso ocorre porque forças

¹⁹ Cita-se, principalmente, a calcita, dolomita, magnesita e siderita.

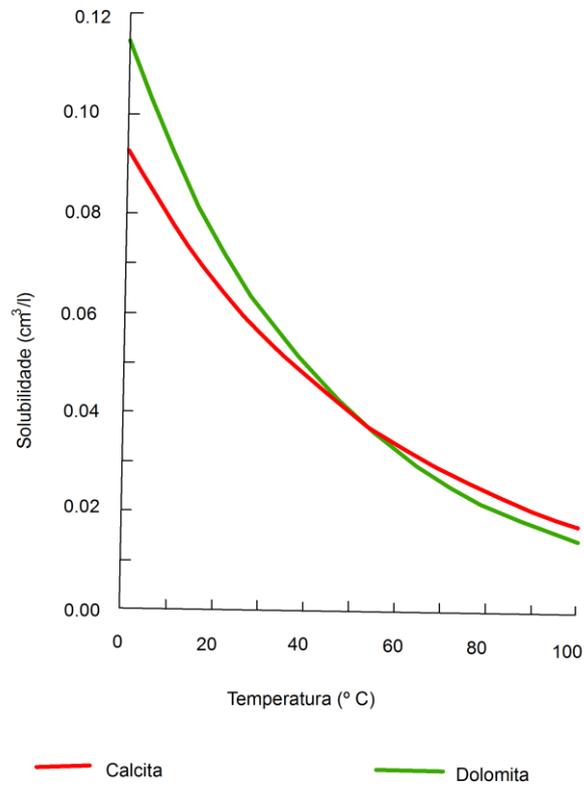
tensionais tendem a criar um conjunto de juntas nas cristas de anticlinais e nas depressões dos sinclinais, o que potencializa os processos de dissolução (DREYBRODT, 1988; PILÓ, 1998).

Em pequena escala, a força mecânica da rocha é uma função que interfere na conexão interpartículas. Essa força pode ser mensurada em laboratório por testes de martelo, compressão e cisalhamento. Em larga escala, a força mecânica nas rochas sedimentares possui relação com a densidade de fissuras, como, por exemplo, as juntas e os planos de acamamentos. A maioria das rochas carbonáticas é bastante forte, pois elas suportam penhascos verticais e tetos de cavernas por longos períodos mesmos em camadas finas e altamente fissuradas. Caso contrário, essas rochas não seriam capazes de suportar vazios subterrâneos datados do Pleistoceno como as cavernas e elas se abateriam com maior frequência (FORD; WILLIAMS, 2007).

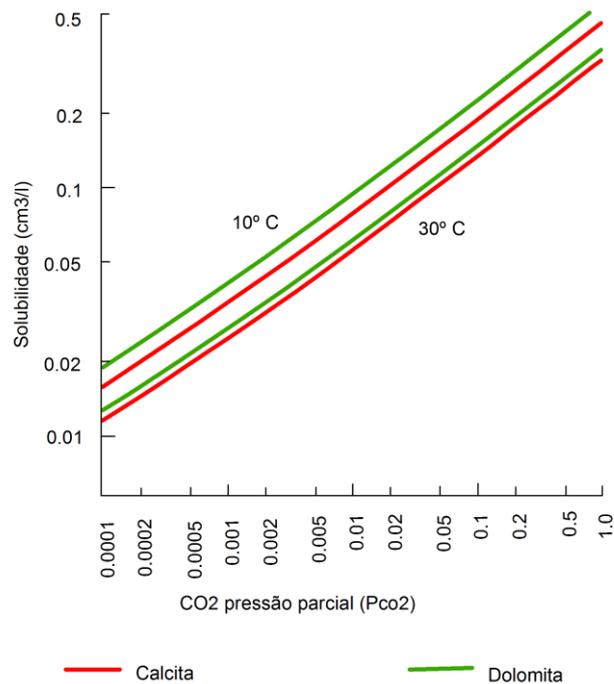
As condições climáticas também são fatores essenciais para o desenvolvimento do relevo cárstico. Entre os principais elementos climáticos se destaca a precipitação e a temperatura como aqueles que mais interferem na dissolução. Quanto maiores os índices de precipitação no estado líquido, maior o percentual de dissolução (FORD; WILLIAMS, 2007). Afinal, a água líquida é o principal agente de dissolução. Registra-se, portanto, que a paisagem cárstica está condicionada à circulação de água no sistema: sua infiltração, percolação e reação química com a rocha encaixante. Como a disponibilidade hídrica varia ao longo do tempo geológico e no espaço geográfico, a transformação do meio cárstico é descontínua e, além disso, gera diferentes morfologias.

Já a temperatura possui relação inversamente proporcional com a dissolução da calcita. Assim, quanto maior a temperatura, menores são os índices de dissolução desse mineral (Gráfico 2.1) (WHITE, 1988; FORD; WILLIAMS, 2007; PALMER, 2009). As taxas de dissolução de calcita em função da temperatura e da consequente pressão do CO_2 demonstram que os maiores índices de solubilidade de calcita e dolomita são concordantes com as menores temperaturas (Gráficos 2.1 e 2.2) (WHITE, 1988; PALMER, 2009).

Gráfico 2.1: Variação da solubilidade de calcita e dolomita com a temperatura



Fonte: Palmer (2009)

Gráfico 2.2: Variação da solubilidade de calcita e dolomita com a temperatura e CO₂

Fonte: Palmer (2009)

Assim, considerando-se apenas os valores de temperatura, espera-se que regiões frias e temperadas apresentem relevos cársticos mais desenvolvidos que aqueles em áreas tropicais. Entretanto, para haver carstificação é necessário que haja abundância em água no estado líquido. Nas regiões tropicais úmidas as temperaturas são elevadas, mas os índices pluviométricos no estado líquido também são. Isso dinamiza as reações e favorece a ocorrência de altos índices de dissolução de minerais carbonáticos. Logo, apesar das temperaturas elevadas, as áreas tropicais apresentam condições para a morfogênese cárstica graças à abundância de água no estado líquido.

Paralelamente, é necessário que haja uma diferença topográfica que permita a percolação das águas infiltradas para que os trabalhos dissolutivos e mecânicos ocorram (ROLFF, 1973). Além disso, a cobertura vegetal atua em conjunto com as condições climáticas e contribui para o desenvolvimento do relevo cárstico, pois produz ácido húmico, que acelera o processo de dissolução. Por fim, algumas bactérias presentes no solo oxidam a matéria orgânica e produzem CO₂. Ford e Williams (2007) mostram, porém, que o papel das bactérias do solo na gênese do relevo cárstico não foi totalmente avaliado, mas parece ser secundário.

Diante da compreensão dos fatores associados ao desenvolvimento do relevo cárstico, surgiram vários estudos voltados para a interpretação dos processos evolutivos desse relevo. Alguns autores (GRUND, 1914; CVIJIC, 1918; LEHMANN, 1936) tentaram integrar os elementos que compõem o relevo cárstico e explicar como e por que a paisagem cárstica apresenta determinadas morfologias. Essas explicações e modelos evolutivos mudaram ao longo do tempo à medida que a ciência geomorfológica evoluía e suas principais teorias surgiam. Nesse sentido, entende-se que todos os modelos evolutivos contribuíram para o pensamento do relevo cárstico, mas constata-se que as paisagens cársticas, em geral, são poligenéticas e a variedade de tipos e características desse relevo está associada a variações e combinações de elementos locais, assim como às condições ambientais existentes em determinada escala temporal (JENNING, 1985; DREYBRODT, 1988; WHITE, 1988; FORD; WILLIAMS, 2007).

2.7. Espeleogênese: a gênese das cavernas

Quanto à gênese, as cavernas se classificam em epigênicas e hipogênicas. As cavernas epigênicas são geradas a partir do fluxo da água meteórica de origem pluvial e/ou fluvial que chega à superfície, penetra os maciços cársticos a partir das zonas de recarga, dissolve a rocha e, ao longo de milhares de anos, dá origem aos espaços naturais subterrâneos, que são as

cavernas. Logo, as cavernas epigênicas se formam por singênese ou paragênese. As cavernas hipogênicas, por sua vez, são aquelas originadas pela circulação ascendente da água oriunda de subsuperfície. Assim, a água acidulada de origem subsuperficial realiza ação química no sentido ascendente e permite a formação das cavernas das áreas profundas em direção à superfície (PALMER, 1991). Em síntese, nas cavernas epigênicas a água se infiltra no maciço a partir do exterior. Já nas cavernas hipogênicas, o agente ativo da dissolução provém da subsuperfície e pode ser o ácido carbônico ou ácido sulfúrico (PALMER, 1991; PALMER, 2009).

Ewers (1972) realizou vários experimentos sobre a propagação de galerias de cavernas. Um desses experimentos mostra que essa propagação ocorre a partir de um ponto de infiltração. Assim, inicialmente, forma-se uma série de canalículos que se propagam em direção ao ponto de saída. Quando um desses protocondutos se conecta ao ponto de saída, ele passa a transmitir uma quantidade maior de água e se alarga cada vez mais. Isso faz com que os demais condutos se desenvolvam em direção a ele, ou então, sejam abandonados. Assim, inicia-se a formação de uma caverna com padrão dendrítico. Nesse caso, há um conduto principal e várias galerias secundárias. Registra-se que ocorre um aumento das taxas de dissolução quando o protoconduto ultrapassa o limite de transição entre o fluxo laminar e o turbulento. O fluxo passa a ser turbulento quando o protoconduto atinge, aproximadamente, 10mm de diâmetro. Segundo Ford e Williams (2007), à medida que a água dissolve o carbonato de cálcio, ela se torna saturada e diminui a sua capacidade de dissolver a rocha e, conseqüentemente, de alargar condutos. Porém a redução dessa potencialidade dissolutiva ocorre de forma lenta e contínua (PALMER, 1991; FORD; WILLIAMS, 2007).

Depois que o conduto passa por essas fases de iniciação, ele pode se desenvolver de duas formas: singênese e paragênese. Na singênese, o conduto evolui de forma descendente e na paragênese de forma ascendente. Durante a singênese, inicialmente com o conduto totalmente na zona freática, a água dissolve o teto, paredes e piso da cavidade. Isso favorece a formação de uma seção aproximadamente circular. Depois, com o rebaixamento do nível freático, a dissolução passa a ocorrer somente no piso da cavidade e cria um perfil do tipo *canyon*. As juntas e rebaixamentos abruptos do nível de base podem causar a migração de água para condutos inferiores, fato que, quando ocorre, deixa as galerias superiores secas. A evolução singenética cessa quando o nível impermeável é atingido (PALMER, 1991; FORD; WILLIAMS, 2007; PALMER, 2009).

Na evolução paragenética (Figura 2.11), o fluxo lento da água permite que sedimentos se acumulem no piso da caverna. Esses sedimentos impermeabilizam a base da caverna e

fazem com que a água pressione e dissolva preferencialmente o seu teto. Assim, o conduto evolui de forma ascendente e há equilíbrio entre a deposição de materiais finos no piso e a dissolução no teto. O desenvolvimento paragenético cessa quando o nível freático é atingido (RENAULT, 1968; WHITE, 1988; PALMER, 1991; FORD; WILLIAMS, 2007; PALMER, 2009). Algumas *espeleogens* ou feições esculpidas pela água no piso, teto e parede das cavernas indicam os processos envolvidos na formação das cavernas. Entre os principais *espeleogens* se destacam os *scallops*, cúpulas, anastomoses, pendentes, canais de teto, entre outras (PALMER, 2009; AULER; PILÓ, 2011).

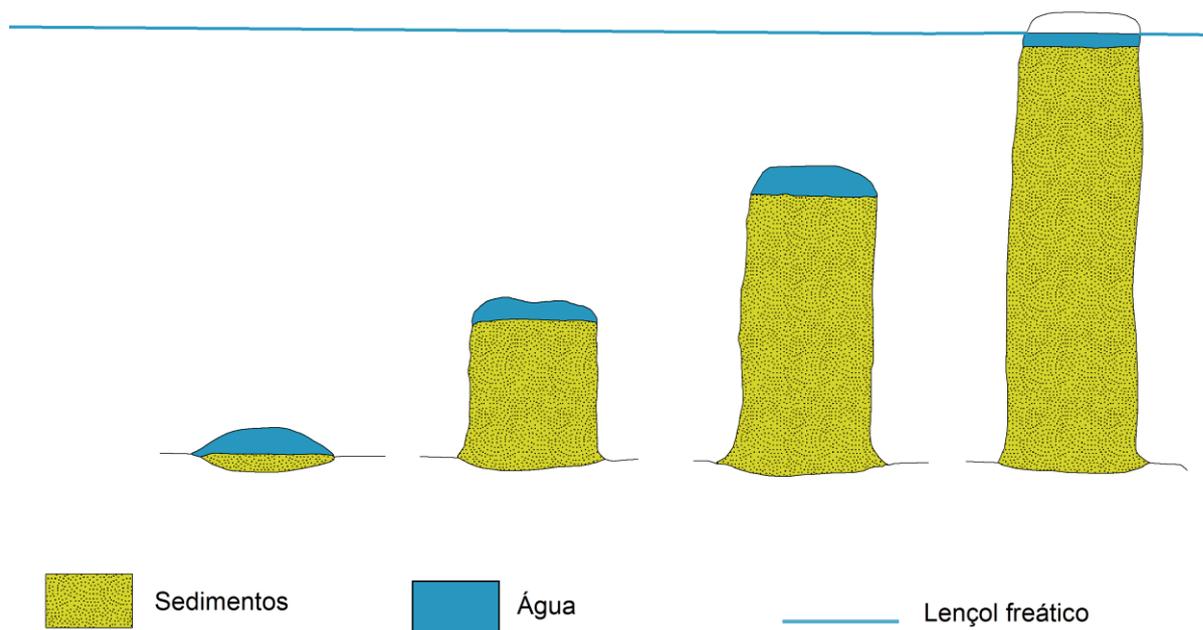


Figura 2.11: Evolução espeleológica paragenética

Fonte: Modificado de White (1988); Ford e Williams (2007)

Nas cavernas hipogênicas, o agente dissolutivo provém da subsuperfície. A água, geralmente aquecida devido à profundidade, ascende à superfície e pode estar carregada de ácido carbônico e ácido sulfúrico. As cavernas geradas por esse processo são denominadas hidrotermais. O ácido sulfúrico, principal agente genético das cavernas hipogênicas, é produzido a partir do gás sulfeto de hidrogênio (H_2S) que ascende pela rocha, mistura-se com a água subterrânea e produz o ácido sulfúrico que dissolve a rocha. A origem do H_2S pode estar ligada a bacias de hidrocarbonetos. A oxidação de lentes de pirita também pode gerar ácido sulfúrico em quantidade suficiente para formar cavernas (PALMER, 1991; PALMER, 2009).

As cavernas hipogênicas, por serem criadas no interior da rocha, não possuem nenhuma relação com a área superficial. Assim, as entradas dessas cavernas estão geralmente associadas a abatimentos e os sedimentos fluviais são ausentes. Os espeleotemas das cavernas associadas a ácido sulfúrico são de gesso. As cúpulas e pendentes, embora não sejam exclusivas, são feições recorrentes nessas cavernas (PALMER, 1991).

A forma como a água circula no maciço permite a formação de diferentes padrões de cavernas. O fluxo hídrico pode ser concentrado (por exemplo, via depressão cárstica ou sumidouros), difuso (como, por exemplo, em áreas de inundação) ou hipogênico (associado a ácido carbônico ou sulfúrico). Palmer (1991) define o padrão das cavernas conforme o tipo de circulação hídrica e o tipo de porosidade predominante na rocha. Em geral, registra-se a ocorrência de cinco tipos de padrões planimétricos de cavernas: 1) dendrítico; 2) reticulado ou em rede; 3) ramiforme; 4) espongiforme e 5) anastomosado ou anastomático (PALMER, 1991; PALMER, 2009).

2.8. Padrão Planimétrico das Cavernas

As cavernas com padrão dendrítico (Figuras 2.12 e 2.13) consistem no padrão de um rio com passagens que convergem para tributários. Nesse caso, a drenagem é essencialmente subterrânea e equivale ao mesmo padrão dos rios da superfície. Assim, pontos fechados são raros, exceto quando a água abandona uma passagem original para formar uma nova passagem e juntar-se a uma rota antiga. Os efeitos da estrutura litológica local na morfologia planimétrica também são aparentes. Em rochas bem bandadas as passagens são sinuosas e curvilíneas. Já em locais com rochas proeminentemente fraturadas, as passagens apresentam padrão angular (PALMER, 2009).

O padrão dendrítico é o tipo de morfologia mais comum das cavernas. Porém, o padrão dendrítico das cavernas pode ser obscurecido em várias formas. Se as galerias se formam em vários estágios diferentes, de modo que a água desvia para rotas progressivamente mais baixas, ambas as passagens (novas e velhas) contribuem para o padrão geral da caverna. Porém, alguns dos segmentos podem ficar isolados, de modo que seu o padrão original não esteja claro e pode ser confundido, por exemplo, com o anastomosado (PALMER, 2009). A relação entre as fontes de recarga e os tipos de porosidades da rocha demonstra que as cavernas com padrão dendrítico estão associadas a locais em que a infiltração é pontual e a porosidade segue os planos de acamamento e as fraturas. As áreas com porosidade intergranular e fonte de recarga pontual, geralmente, condicionam a formação de cavernas com padrão dendrítico rudimentar (PALMER, 1991) (Figuras 2.12 e 2.13).

As cavernas com padrão anastomosado ou anastomático (Figura 2.12) são compostas por tubos curvilíneos que interceptam em padrão trançado. Elas, geralmente, são formadas por água de inundação periódica alimentada por fluxo de afundamento ou por infiltração rápida em superfície cárstica. A caverna com padrão anastomosado típico pode possuir algumas fraturas que controlam o seu padrão planimétrico, mas elas não dominam nesse padrão morfológico. Embora algumas cavernas inteiras tenham esse padrão, também é comum que pequenos labirintos anastomosados sirvam como rotas e segmentos de cavernas, onde há áreas propensas a inundações (PALMER, 2009). Essas cavernas (Figuras 2.12 e 2.12) geralmente estão associadas a áreas com fontes de recarga pontual, descarga em bom funcionamento e o fluxo hídrico segue preferencialmente os planos de acamamento (PALMER, 1991).

As cavernas com padrão reticulado ou em rede (Figura 2.12) apresentam morfologia em grades angulares e são formadas pelo alargamento das principais fraturas locais. Elas são produzidas de várias formas: 1) infiltração uniforme pela rocha da camada superior; 2) inundação periódica; 3) mistura de água com diferentes composições químicas ou 4) geração de ácido sulfúrico por oxidação de sulfeto de hidrogênio. As fissuras em cavernas reticuladas não são alimentadas por fontes individuais de água. É comum a ocorrência de condutos fechados e as galerias possuem morfologia retilínea. A maioria das cavernas desse padrão é limitada a um único nível, embora algumas cavernas possuam vários níveis (PALMER, 2009). Essas cavernas geralmente ocorrem: a) em locais de recarga pontual, descarga em bom funcionamento e ocorrência de fraturas; b) em áreas de recarga difusa, com ocorrência de fraturas e com porosidade predominante segundo os planos de acamamento e c) em localidades com fonte de recarga hipogênica e ocorrência de fraturas (PALMER, 1991). Esse padrão também geralmente está associado ao desenvolvimento de cavernas em rochas carbonáticas metamórficas, como o mármore, por exemplo. Isso ocorre porque como nessa rocha a porosidade primária é reduzida, o principal meio para circulação da água é a porosidade secundária. Assim, as cavernas tendem a seguir a direção das falhas e fraturas, assim como apresentam, preferencialmente, o padrão planimétrico reticulado. Souza (2011) estudou um conjunto de cavernas em mármore na Serra do Cipó e descobriu que parte das cavernas dessa região apresenta padrão reticulado (Figuras 2.12 e 2.13).

As cavernas com padrão esponjiforme (Figura 2.12) possuem galerias de vários tamanhos interligados e produzem padrão tridimensional como os poros numa esponja. Elas se formam pelo crescimento e coalescência de poros intergranulares e outras aberturas pequenas nas rochas que não contêm grandes fraturas. As cavernas esponjiformes são comuns também em rochas carbonáticas com porosidade primária acentuada. A maioria das

cavernas espongiiformes é produzida pela mistura de vários tipos de água contrastantes ou por ácido sulfúrico (PALMER, 2009). Segundo Palmer (1991), essas cavernas geralmente estão associadas a: a) áreas com recarga pontual, descarga em bom funcionamento e porosidade intergranular; b) locais com recarga difusa em rochas carbonáticas com ocorrência predominante de planos de acamamento ou à porosidade intergranular e c) localidades com recarga hipogênica associadas aos planos de acamamento ou à porosidade intergranular.

As cavernas com padrão ramiforme (Figura 2.12) são compostas por salões irregulares e galerias em arranjos tridimensionais semelhantes a ramos que se estendem para além das porções centrais. Elas são produzidas preferencialmente por ácido sulfúrico e oxidação do sulfeto de hidrogênio. Os perfis topográficos e as secções transversais geralmente são irregulares e mostram mudanças bruscas em curtas distâncias. Observa-se, geralmente, a ocorrência de fendas sem saída que se estendem para baixo, a partir dos níveis principais (PALMER, 2009). Conforme Palmer (1991), essas cavernas geralmente se formam a partir de recargas hipogênicas associadas aos planos de acamamento ou à porosidade intergranular (Figuras 2.12 e 2.13). Além disso, para Palmer (2009), algumas cavernas possuem passagens simples. Elas são formas rudimentares de qualquer um dos cinco tipos de padrões planimétricos.

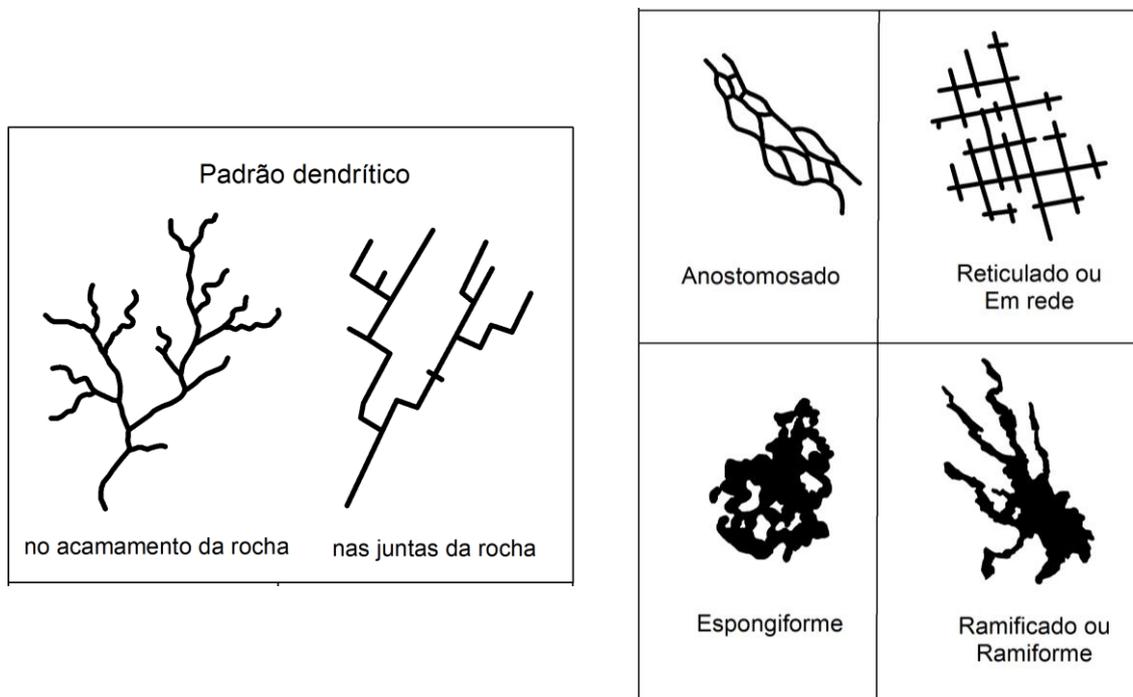


Figura 2.12: Padrão planimétrico das cavernas

Fonte: Palmer (2009)

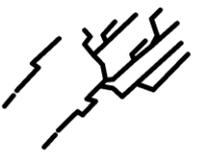
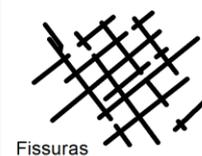
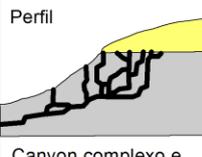
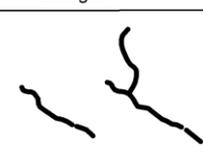
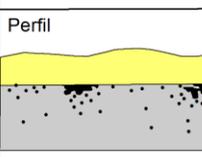
		TIPO DE RECARGA				
		Via Depressão Cárstica		Difusa		Hipogênica
		Sumidouro Descarga limitada	Sumidouro Descarga ótima	Com arenito	nos póros da rocha solúvel	Dissolução de ácidos de fontes de água profundas ou resfriamento de água termal
		Padrão dendrítico	Passagem simples e padrão dendrítico, frequentemente seguindo feições superimpostas	cavernas ampliadas por recargas de outras fontes	cavernas formadas por mistura em profundidade	
TIPO DE POROSIDADE DOMINANTE	Fratura	 Passagem angular	 Fissuras Redes irregulares	 Fissuras Reticulado	 Fissuras isoladas e rede rudimentar	 Reticulado Passagens simples, Fissuras
	Acamamento	 Passagem curvilínea	 Anastomosada	 Perfil Canyon complexo e solução interestratos	 Espongiforme	 Ramiforme, Passagem simples rara e caverna anastomosada
	Intergranular	 Dendrítico rudimentar	 Espongiforme	 Perfil Espongiforme rudimentar	 Espongiforme	 Ramiforme e Espongiforme

Figura 2.13: Relação entre os tipos de recarga, os tipos de porosidades dominantes e os padrões planimétricos das cavernas

Fonte: Adaptado de Palmer (1991)

Registra-se que o desenvolvimento das cavernas e, conseqüentemente, a sua evolução planimétrica é complexa e envolve muitas variáveis no tempo e no espaço. Assim, as morfologias endo e exocársticas sinalizam processos envolvidos na sua formação e suas mudanças ao longo do tempo. Por isso, destaca-se a importância das técnicas de campo no ambiente subterrâneo e superficial a fim de identificar as características locais desse relevo. Além disso, devem-se conhecer as particularidades e características específicas da área analisada, pois elas interferem diretamente na geomorfologia cárstica local e regional.

CAPÍTULO 3: CARACTERÍSTICAS LITOESTRUTURAIS E GEOMORFOLÓGICAS ASSOCIADAS ÀS CAVERNAS DESENVOLVIDAS EM ROCHAS CARBONÁTICAS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO TOCANTINS/ARAGUAIA

A bacia hidrográfica do rio Tocantins/Araguaia drena, aproximadamente, 918.822 km² do território brasileiro (ANA, 2009). Ela abrange as regiões Centro-Oeste, Norte e Nordeste, especialmente parte do Distrito Federal e dos Estados do Mato Grosso, Goiás, Tocantins, Pará e Maranhão (Figura 3.1). Ela é a maior bacia hidrográfica contida integralmente em território nacional (ANA, 2009).

Essa bacia hidrográfica possui formato alongado, drena, preferencialmente, no sentido S-N e deságua no Oceano Atlântico. Os principais limites geográficos dessa bacia hidrográfica são Planalto Central, Serra dos Carajás, Serra Geral de Goiás e estuário do rio Amazonas. Em termos de unidades de planejamento, a bacia hidrográfica do rio Tocantins/Araguaia é subdividida em bacia do Araguaia, do Alto Tocantins e do Baixo Tocantins (ANA, 2009).

O rio Araguaia nasce na Serra do Caiapó, que faz divisa entre os estados de Goiás, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul, possui aproximadamente 2.110 km, deságua no rio Tocantins, na região conhecida como Bico do Papagaio, e tem vazão média de 6.420 m³/seg. A bacia hidrográfica do rio Araguaia possui área de 380.000 km² (BAYER, 2010). O rio Araguaia é marcado tectonicamente pelo lineamento Transbrasiliano (SCHOBENHAUS *et al.*, 1975), Brasiliano (VALENTE, 2007), bem como por reativações tectônicas do final do Cretáceo e do Quaternário (ABREU; HASUI, 1978 *apud* VALENTE, 2007).

O rio Tocantins possui extensão²⁰ de 2.400 km e é formado a partir da confluência dos rios das Almas e Maranhão, cujas cabeceiras se localizam no Planalto Central. Os principais afluentes do rio Tocantins são: Paranã, Manoel Alves, do Sono e Manoel Alves Grande (ANA, 2009). O rio Tocantins possui baixa sinuosidade, o que está associado ao controle tectônico, neotectônico e topográfico (LIMA, 2015). Diante desse esboço, apresentam-se as características da bacia hidrográfica do rio Tocantins/Araguaia e sua relação com a localização e ocorrências das cavernas desenvolvidas em rochas carbonáticas e cadastradas oficialmente no CANIE.

²⁰ Essa extensão equivale ao perímetro entre a nascente do rio Tocantins até a sua foz no Oceano Atlântico.

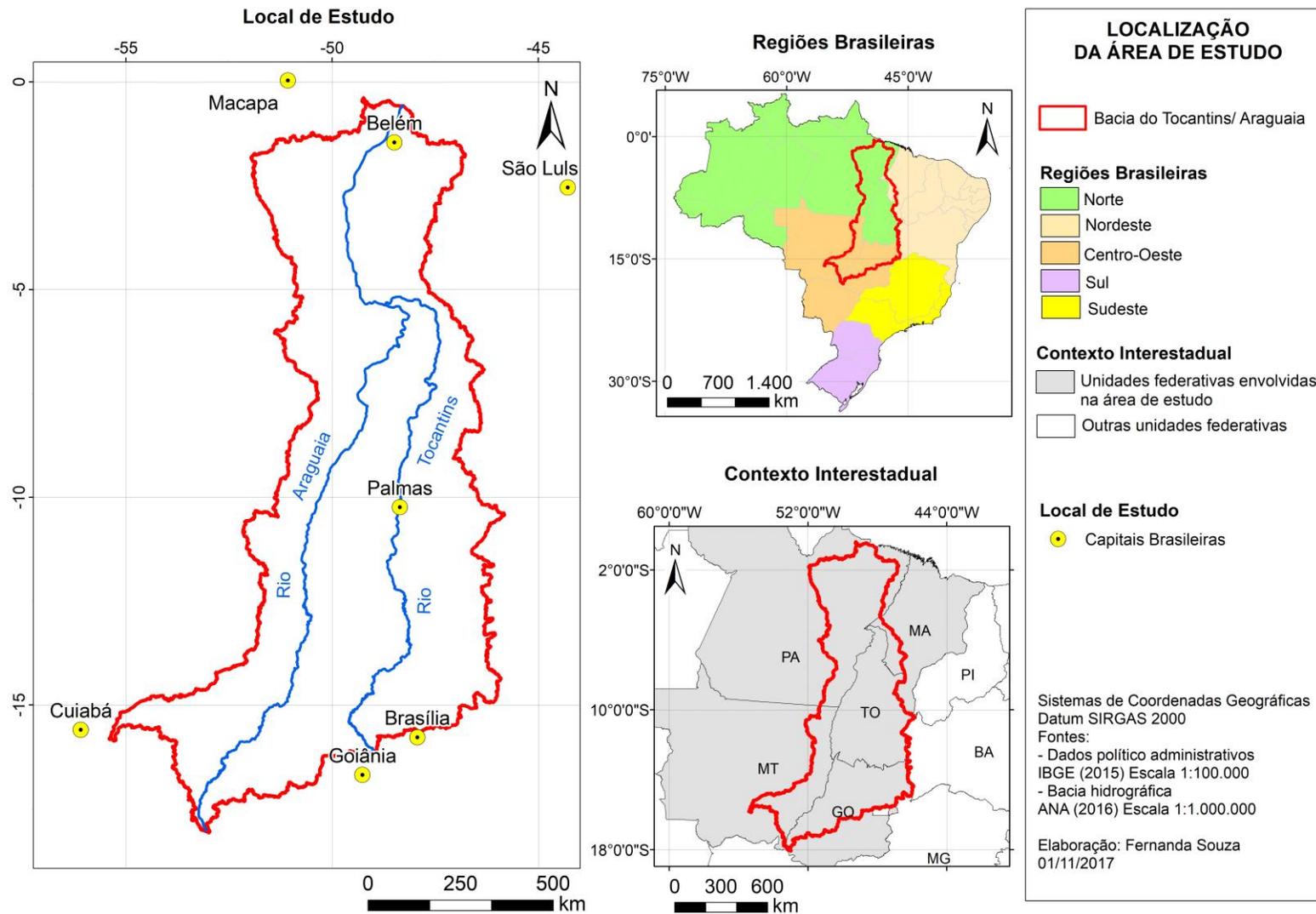
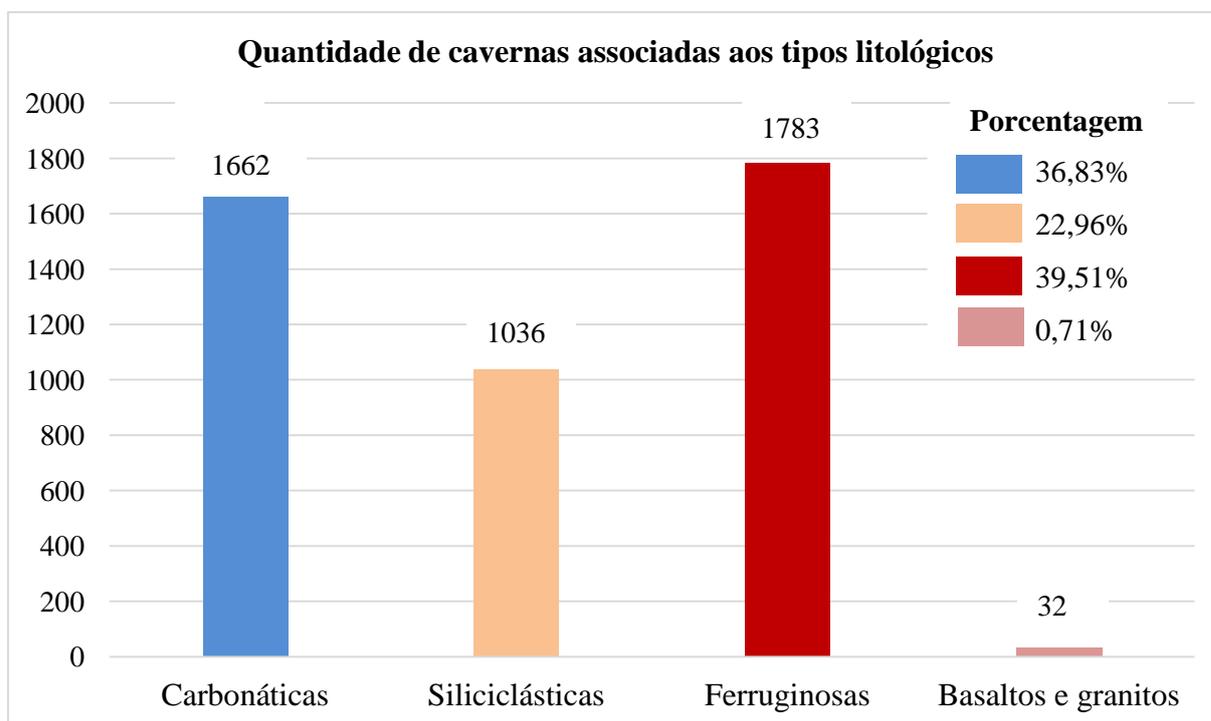


Figura 3.1: Localização da bacia hidrográfica do rio Tocantins/Araguaia no contexto nacional

Registra-se que na bacia hidrográfica do Tocantins/Araguaia há 4513 cavernas cadastradas (CECAV, 2018) e potencialidade para descoberta de outras feições espeleológicas. Essas cavernas estão vinculadas a diferentes tipos litológicos, como as rochas carbonáticas, siliciclásticas, ferruginosas, basaltos e granitos (Gráfico 3.1). As cavernas desenvolvidas em rochas carbonáticas representam 36,83% do total de cavernas cadastradas oficialmente na bacia hidrográfica do rio Tocantins/Araguaia (Gráfico 3.1).

Gráfico 3.1



Fonte: Elaborado a partir de Cecav (2018)

O contexto de ocorrência das cavernas na bacia hidrográfica do rio Tocantins/Araguaia é complexo, dada a diversidade de ambientes existentes. Essa bacia hidrográfica é subdividida em três unidades de planejamento ou sub-bacias: Araguaia, Alto Tocantins e Baixo Tocantins (Figura 3.2) (ANA, 2009). Nesse contexto, 98,74% das cavernas desenvolvidas em rochas carbonáticas estão situadas dentro dos limites do Alto Tocantins; 1,26% se localizam nas áreas drenadas pelo rio Araguaia e não há feições em rochas carbonáticas nas áreas do Baixo Tocantins (Figura 3.2 e Gráfico 3.2).

Verifica-se que a bacia hidrográfica do rio Araguaia possui morfologia geral simétrica e as cavernas estão distribuídas, predominantemente, na margem leste da unidade hidrográfica. Já a bacia hidrográfica do Alto Tocantins apresenta morfologia assimétrica e as

cavernas estudadas se situam, essencialmente, na margem sudeste dessa bacia hidrográfica e no contexto do alto curso rio principal (Figura 3.2). Os dados de densidade espeleológica total reiteram que a maior concentração de cavernas está na parte SE da bacia hidrográfica em estudo, que é drenada pelo alto curso do rio Tocantins (Figura 3.3).

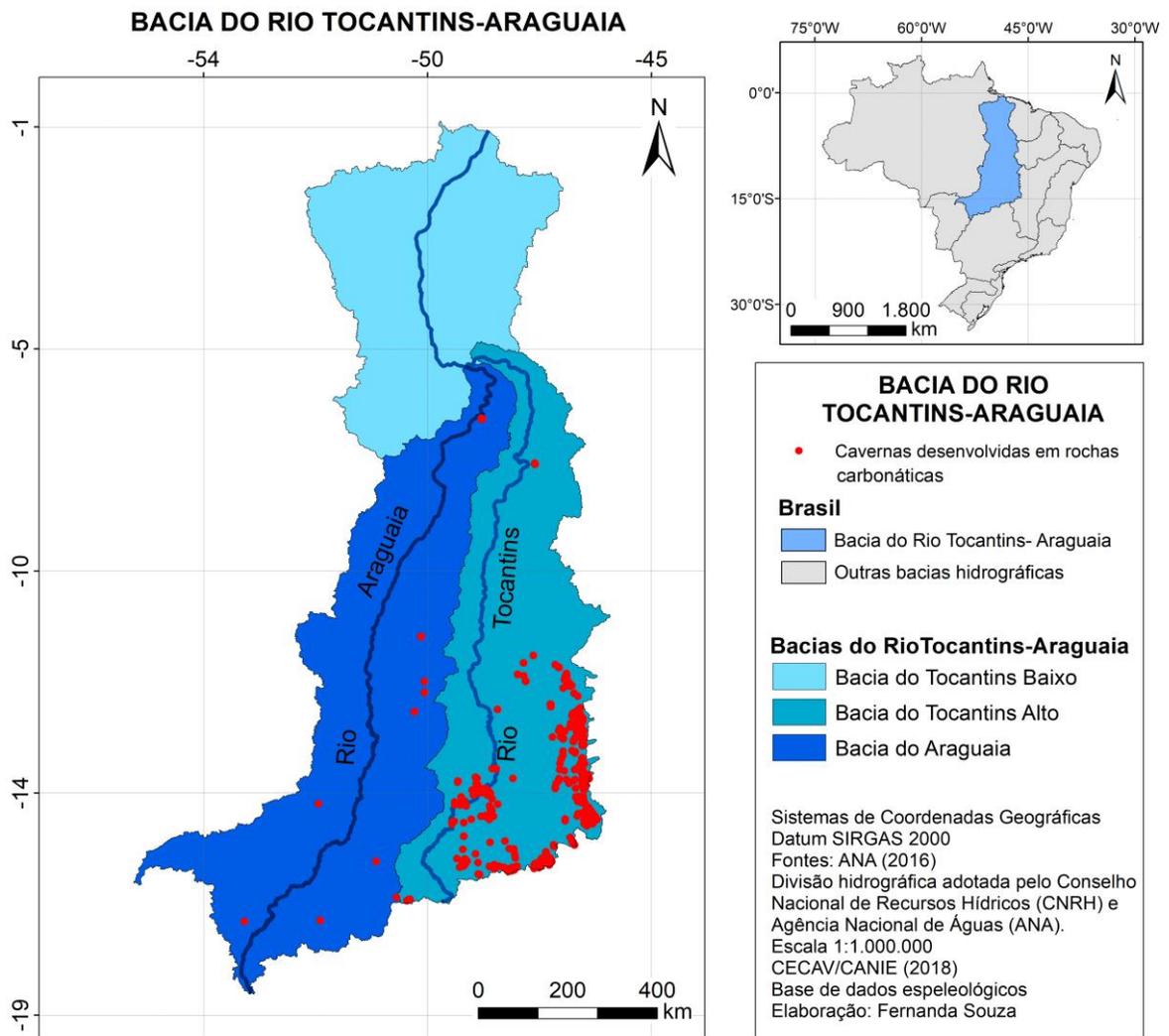
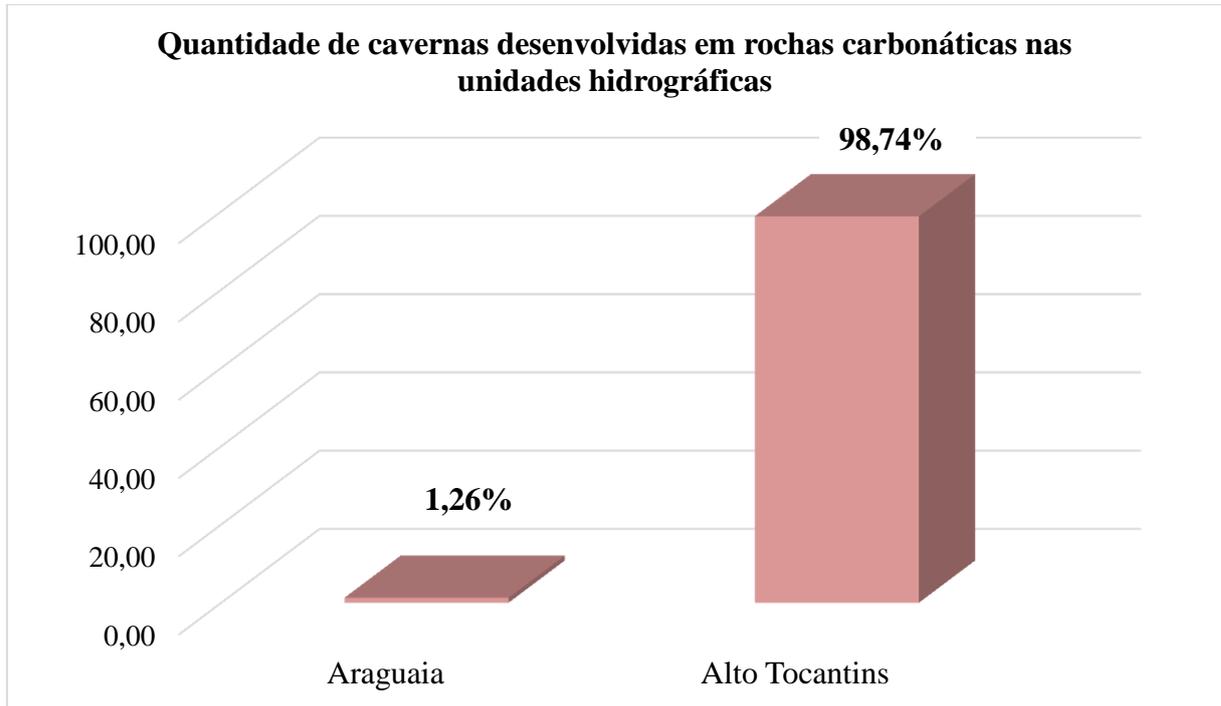


Figura 3.2: Distribuição das cavernas desenvolvidas em rochas carbonáticas na bacia hidrográfica do rio Tocantins/Araguaia e suas sub-bacias

Gráfico 3.2



Fonte: Elaborado a partir de Cecav (2018)

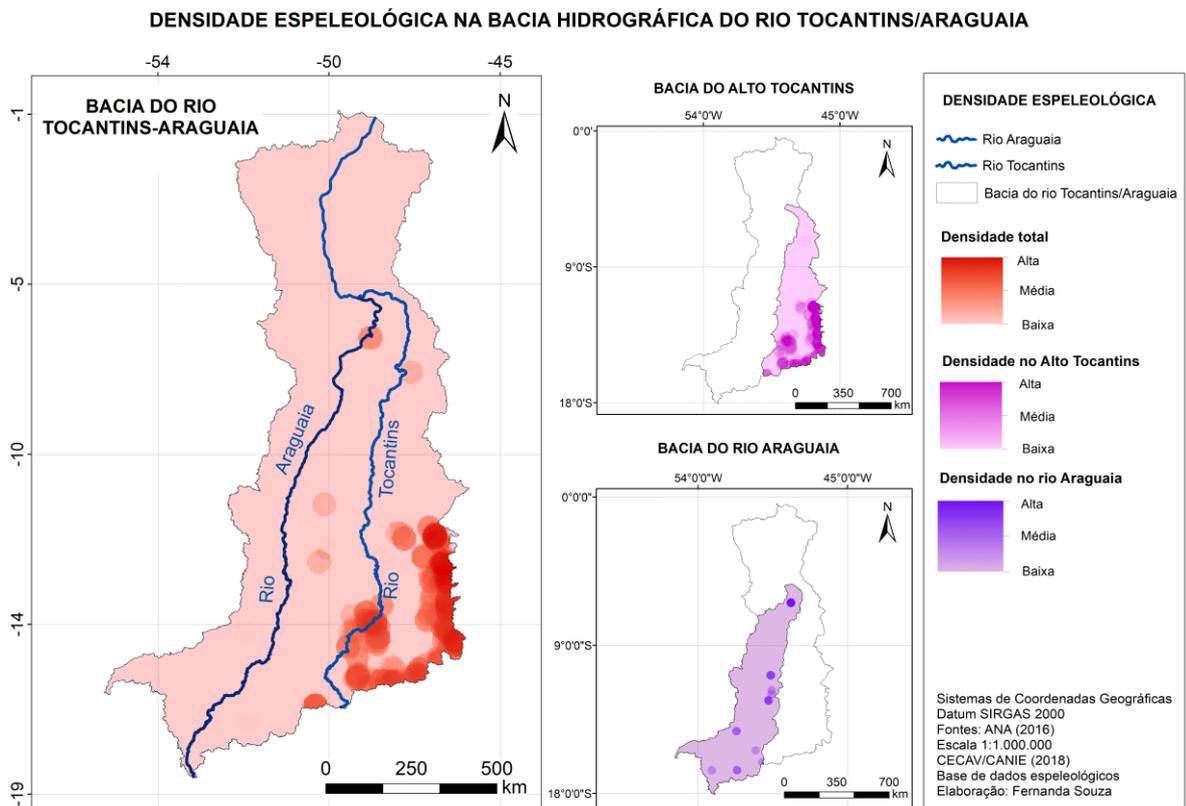


Figura 3.3: Densidade das cavernas desenvolvidas em rochas carbonáticas na bacia hidrográfica do rio Tocantins/Araguaia e suas sub-bacias

Diante dessas informações gerais, analisam-se as principais características geológicas e geomorfológicas vinculadas às cavernas na bacia hidrográfica do rio Tocantins/Araguaia.

3.1. Características geológicas da bacia hidrográfica do rio Tocantins/Araguaia

Alkmim (2015) mostra a relação entre unidades tectônicas, estruturas em largas escalas e o relevo brasileiro, assim como a importância dessa relação no estudo geomorfológico. Por isso, este trabalho irá apresentar as principais características geológicas da bacia hidrográfica do rio Tocantins/Araguaia. Essa bacia hidrográfica é constituída geologicamente por partes de várias unidades geotectônicas que englobam o território nacional.

Em termos gerais, o Lineamento Transbrasiliano (SCHOBENHAUS *et al.*, 1975) possui trechos na área de estudo. Assim, observa-se a ocorrência de segmentos de “Dois Brasis Geotectônicos” (BRITO NEVES, 1991) e “Dois Brasis Geomorfológicos” (SAADI *et al.*, 2005), cujas fronteiras são estabelecidas pelo Lineamento Transbrasiliano. A parte centro-norte da bacia hidrográfica do rio Tocantins/Araguaia é marcada pelo Brasil Amazônico, que se trata de uma área relativamente estável, com morfologia plana a ligeiramente ondulada e altitudes geralmente inferiores a 500m. Já a parte centro-sul dessa bacia hidrográfica é constituída por unidades do Brasil Extra Amazônico, que é caracterizado por eventos tectônicos localizados, morfologia de planaltos elevados a serranos, acidentados e altitude frequentemente superiores a 500m (SAADI *et al.*, 2005).

Ratifica-se que, além do lineamento Transbrasiliano, o período Brasileiro e eventos neotectônicos influenciaram a dinâmica geomorfológica e hidrológica nessa bacia hidrográfica. Saadi *et al.* (2005) citam a influência do Brasileiro nas frentes de empurrão existentes nas bordas do Cráton do São Francisco. Além disso, esses autores citam ocorrências de atividades geológicas nos arcos tectônicos e magmáticos presentes nas bacias sedimentares do Amazonas e Paraná, nos *horsts* e *grabens* que deram origem, por exemplo, à Ilha do Bananal e Fossa do Araguaia, assim como a neotectônica nas unidades da Formação Barreiras (SAADI *et al.*, 2005).

As províncias estruturais²¹ presentes na área de estudo são Amazônia Norte, Amazônia Sul, Parnaíba, São Francisco, Tocantins e Paraná (ALMEIDA *et al.*, 1977) (Figura 3.4). Essas províncias se subdividem em crátons, bacias sedimentares e faixas de dobramentos locais. A área da província estrutural Amazônia Norte está localizada na porção norte da bacia

²¹ Províncias estruturais são regiões geológicas que apresentam feições estratigráficas, tectônicas, magmáticas e metamórficas próprias e diferentes das apresentadas pelas províncias confinadas (ALMEIDA *et al.*, 1977).

hidrográfica do rio Tocantins/Araguaia (Figura 3.4) e é localmente afetada pela margem passiva continental e bacia intracratônica Amazônica. A província Amazônia Sul se localiza na parte W da área de estudo e é constituída localmente, principalmente, pelo Cráton Amazônico Xingu/ Tapajós, Carajás e pela bacia sedimentar de Parecis.

A parte E da bacia estudada é constituída, predominantemente, pela província de Parnaíba, que é representada localmente pela bacia sedimentar homônima, que segundo Suguio e Fulfaro (1977) também é conhecida como bacia do Maranhão e do Meio Norte. A província São Francisco também se situa na porção E da área estudada e é representada pelas bordas do Cráton do São Francisco. A província Tocantins envolve a maior parte da área de estudo (Figura 3.4) e é representada localmente pela Faixa Paraguai-Tocantins, Arco de Goiás, Maciço Central de Goiás e Faixa Brasília. A província estrutural Paraná se situa na parte SW da área de estudo e é representada pela porção norte da bacia sedimentar homônima. Portanto, constata-se que a área estudada é constituída por unidades com atividade tectônica e outras relativamente estáveis, o que confere heterogeneidades locais.

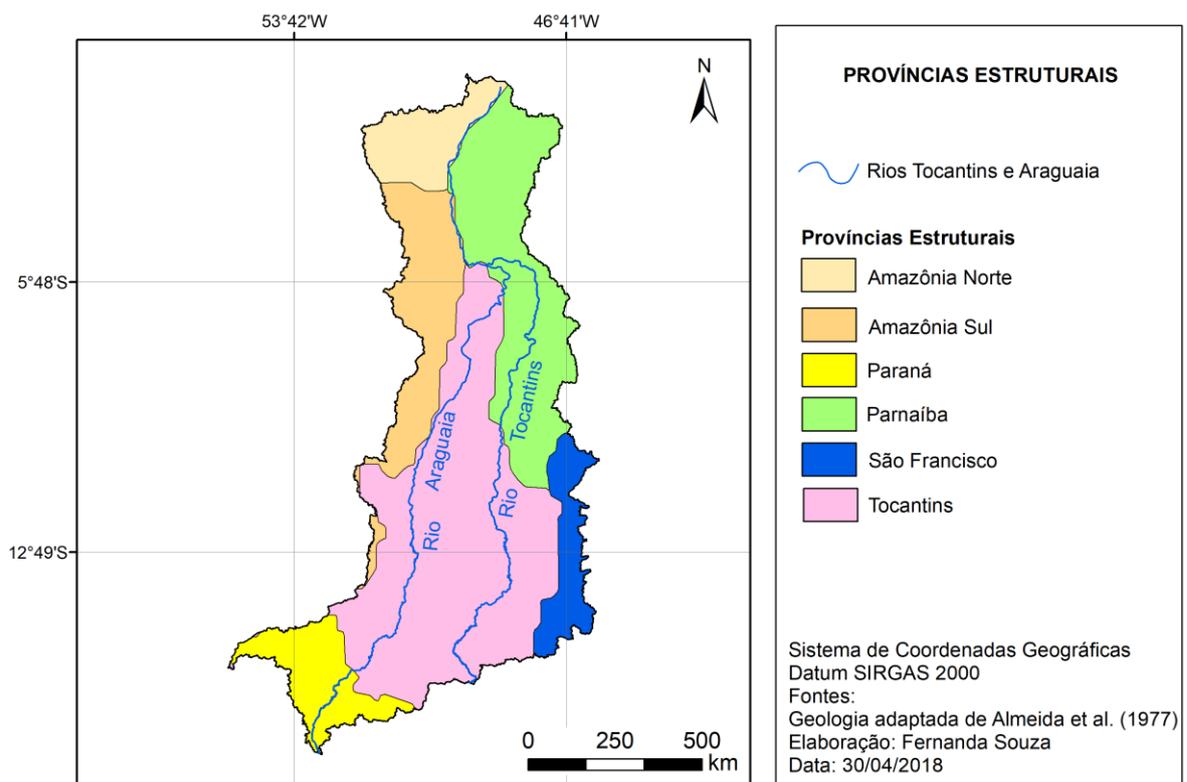


Figura 3.4: Províncias estruturais na bacia hidrográfica do Tocantins/Araguaia

O contexto litológico dessa bacia hidrográfica é composto por diversidade de rochas pelíticas, porções carbonáticas, quartzíticas, mas predominantemente por granitos e gnaisses do embasamento cristalino (Figura 3.5). Os depósitos aluvionares de origem fluvial, lacustre ou fluviomarinha estão localizados ao longo das principais drenagens, leitos fluviais e planícies de inundação. Porém, as maiores concentrações desses depósitos estão próximo à foz do rio Tocantins, assim como no médio e baixo curso do rio Araguaia (Figura 3.5).

As principais unidades geológicas Quaternárias e Terciárias na área pesquisada são representadas pelas Formações Araguaia, Tucunaré, Barreiras, Ipixuna e Ronuro (Figura 3.5). A Formação Araguaia está localizada no médio curso do rio Araguaia e é composta, principalmente, por sedimentos quaternários argilosilto arenoso inconsolidados ou seminconsolidados fluviais e lacustres (FARACO *et al.*, 2004). A Formação Ronuro possui área pequena, está localizada próxima à Formação Araguaia e é composta por areia, argila e cascalhos terciários, conforme Faraco *et al.* (2004).

As rochas das Formações Tucunaré, Barreiras e Ipixuna estão localizadas na porção norte da área de estudo, próximas à foz do rio Tocantins no oceano Atlântico. As rochas dessas formações são especialmente arenitos, siltitos e argilitos com lentes de conglomerados e arenitos grossos (BAHIA *et al.*, 2004).

Os arenitos são rochas comuns na área de estudo. Em geral, esses arenitos possuem diferenças quanto à pureza, seleção, granulometria, ambiente de formação, entre outras características. Por se tratar de uma caracterização geral e visando a objetividade, as unidades geológicas areníticas serão descritas em conjunto e associadas às bacias sedimentares as quais pertencem. Na parte norte da área pesquisada há a Formação Alter do Chão (Cretáceo), que pertence à bacia sedimentar de Amazonas. Os arenitos dessa formação são grossos, friáveis e de cores variadas (BAHIA *et al.*, 2004).

As rochas da bacia sedimentar Paraná estão situadas na parte SW da área de estudo e são compostas pelo Grupo Bauru (Cretáceo), Formações Serra Geral e Botucatu (Cretáceo), Formações Palermo e Aquidauana (Carbonífero) e Formações Ponta Grossa, Furnas e Água Bonita (Devoniano) (Figura 3.5). Segundo Lacerda Filho *et al.* (2004), essas rochas são representadas por arenitos, siltitos, siltitos arenosos, diamictitos, folhelhos e arcóseos grossos.

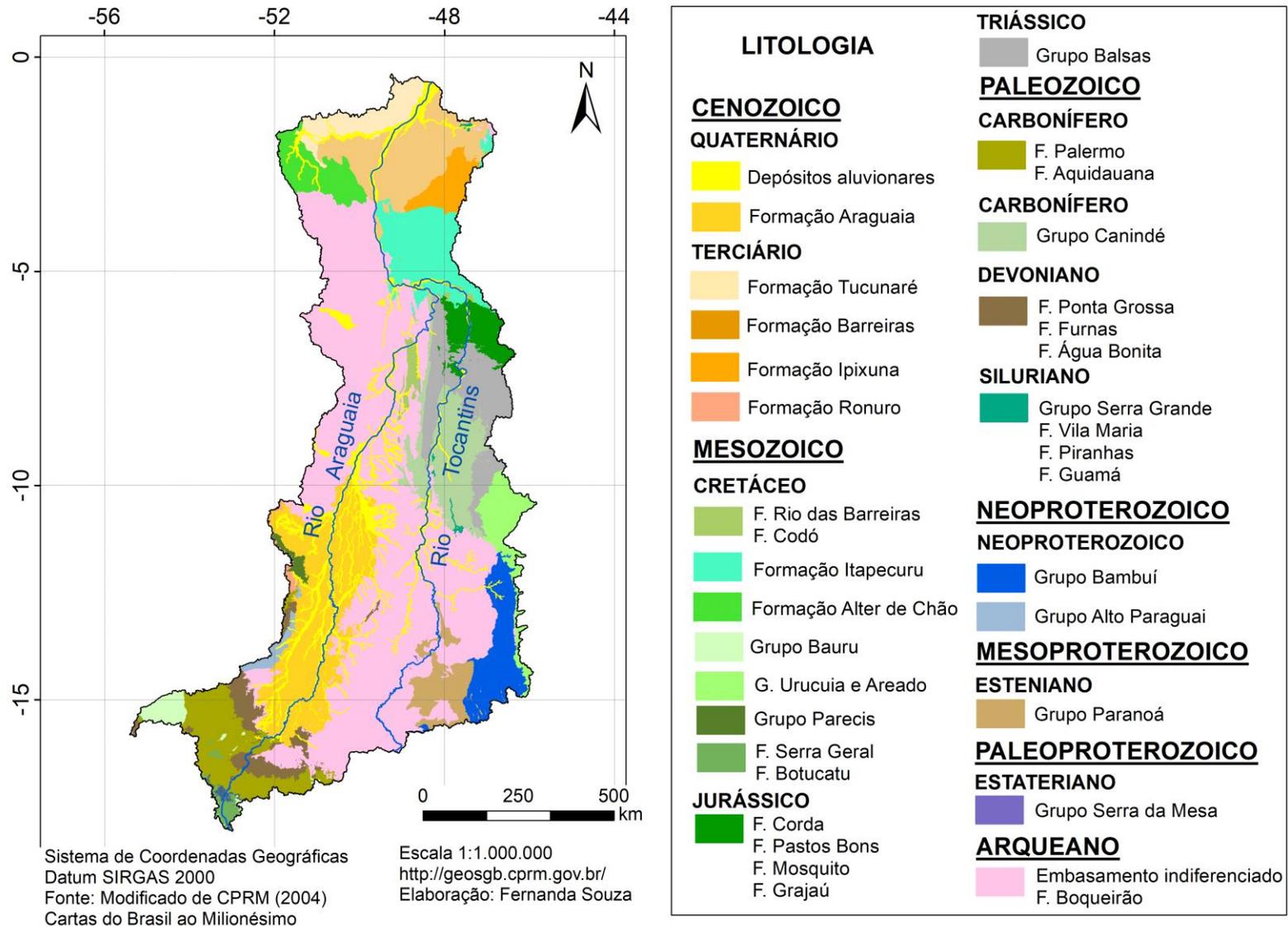


Figura 3.5: Contexto litológico da bacia hidrográfica do rio Tocantins/Araguaia

A bacia sedimentar Parecis possui abrangência limitada na área de estudo e está restrita à porção W, entre a Formação Araguaia e o limite dessa bacia hidrográfica. As rochas da bacia sedimentar Parecis pertencem ao Grupo Parecis (Cretáceo) e Grupo Alto Paraguai, Formação Araras (Neoproterozoico). Conforme Valente *et al.* (2004), as rochas do Grupo Parecis são arenitos finos a médios, vermelhos, amarelos e brancos e com estratificação cruzada de pequeno porte. Já as rochas do Grupo Alto Paraguai, Formação Araras são arenitos, dolomitos, siltitos, argilitos, calcário e sílex.

A bacia sedimentar do São Francisco é constituída por arenitos e calcários. As unidades geológicas dessa bacia sedimentar estão situadas na parte SE da área de estudo. As rochas dessa unidade geológica pertencem ao Grupo Urucuaia (Cretáceo), Grupo Areado (Cretáceo) e Grupo Bambuí (Neoproterozoico). Conforme Vasconcelos *et al.* (2004), os Grupos Urucuaia e Areado são compostos por arenitos, siltitos, folhelhos e conglomerados. O Grupo Bambuí, por sua vez, é representado por calcários, dolomitos, margas, metarcóseos e calcarenitos.

A parte E da bacia hidrográfica do rio Tocantins/Araguaia é composta por rochas da bacia sedimentar do Parnaíba. As principais rochas nessa área são das Formações Itapecuru, Codó, Rio das Barreiras (todas do Cretáceo), Cordas, Pastos Bons, Mosquito e Grajaú (todas do Jurássico), Grupo Balsas (Triássico), Grupo Canindé (Carbonífero), Grupo Serra Grande, Formações Vila Maria, Piranhas e Guamá (todas do Siluriano) (Figura 3.5). Essas formações são compostas, principalmente, por arenitos, argilitos, folhelhos e siltitos (VASCONCELOS *et al.*, 2004).

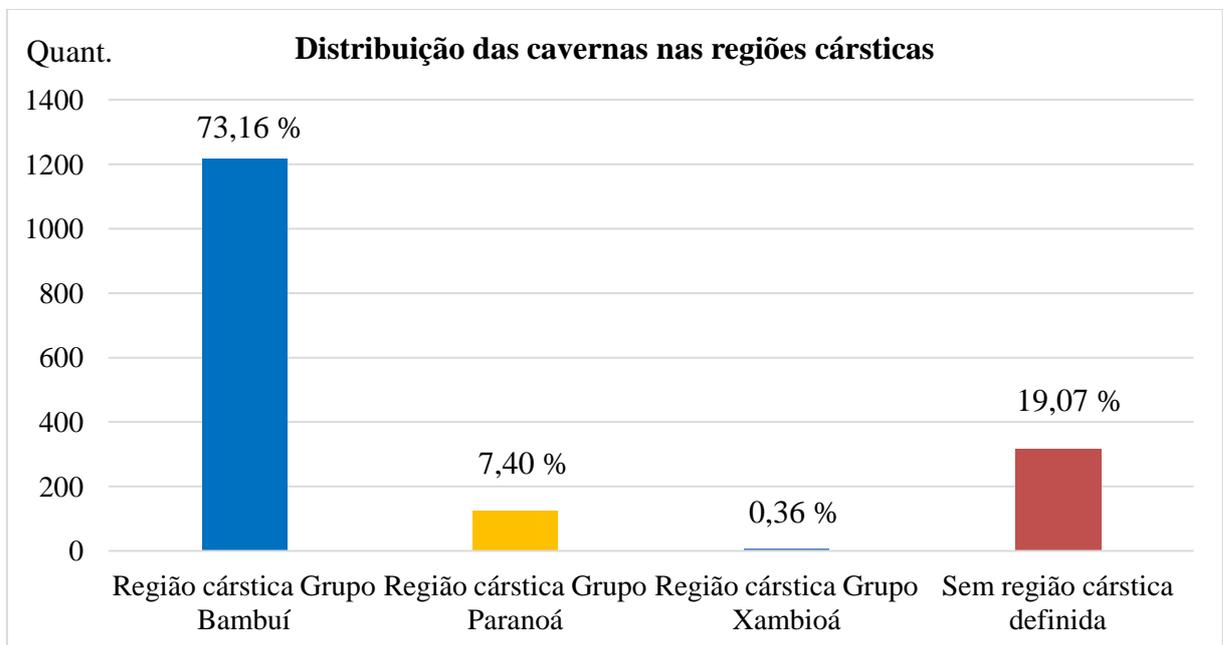
Destaca-se a ocorrência de rochas metamórficas, como quartzitos e metassiltitos do Grupo Paranoá (Mesozoico), além de quartzitos, biotita muscovita xisto e metacalcários do Grupo Serra da Mesa (Paleoproterozoico). Registra-se que parte da área central e oeste da bacia pesquisada é composta, predominantemente, por gnaisses e granitos do embasamento cristalino (LACERDA FILHO *et al.*, 2004).

Registra-se que o contexto geológico interfere diretamente na distribuição das cavernas e nas características espeleológicas. As cavernas associadas a rochas carbonáticas estão concentradas em litologias pertencentes ao Grupo Bambuí ou no contato com micaxistos e siltitos pertencentes ao Grupo Paranoá (Figura 3.6).

Nessa bacia hidrográfica existem quatro regiões cársticas: Formação Carajás, Grupo Paranoá, parte do Grupo Bambuí e Grupo Xambioá (Figura 3.7). As cavernas desenvolvidas em rochas carbonáticas se localizam, predominantemente (73,16%), na região cárstica Grupo Bambuí (Gráfico 3.3). Essas cavernas se desenvolvem associadas, principalmente, a calcários,

dolomitos e margas do Grupo Bambuí e sofre influência das bordas do Cráton do São Francisco. Destacam-se cavernas em rochas carbonáticas (7,40%) na região cárstica Grupo Paranoá; 0,36% vinculadas à região cárstica Grupo Xambioá e 19,07% das cavernas em rochas carbonáticas na bacia hidrográfica do rio Tocantins/Araguaia não estão associadas à região cárstica definida (Gráfico 3.3). A região cárstica Grupo Xambioá se localiza próxima ao encontro dos rios Tocantins e Araguaia e possui cavernas associadas a calcário e ao seu contato com micaxistos. Essa região sofre influência da Faixa de Dobramentos Araguaia e outras feições estruturais de menor expressão.

Gráfico 3.3



Fonte: Elaborado a partir de dados espeleológicos (CECAV, 2018)

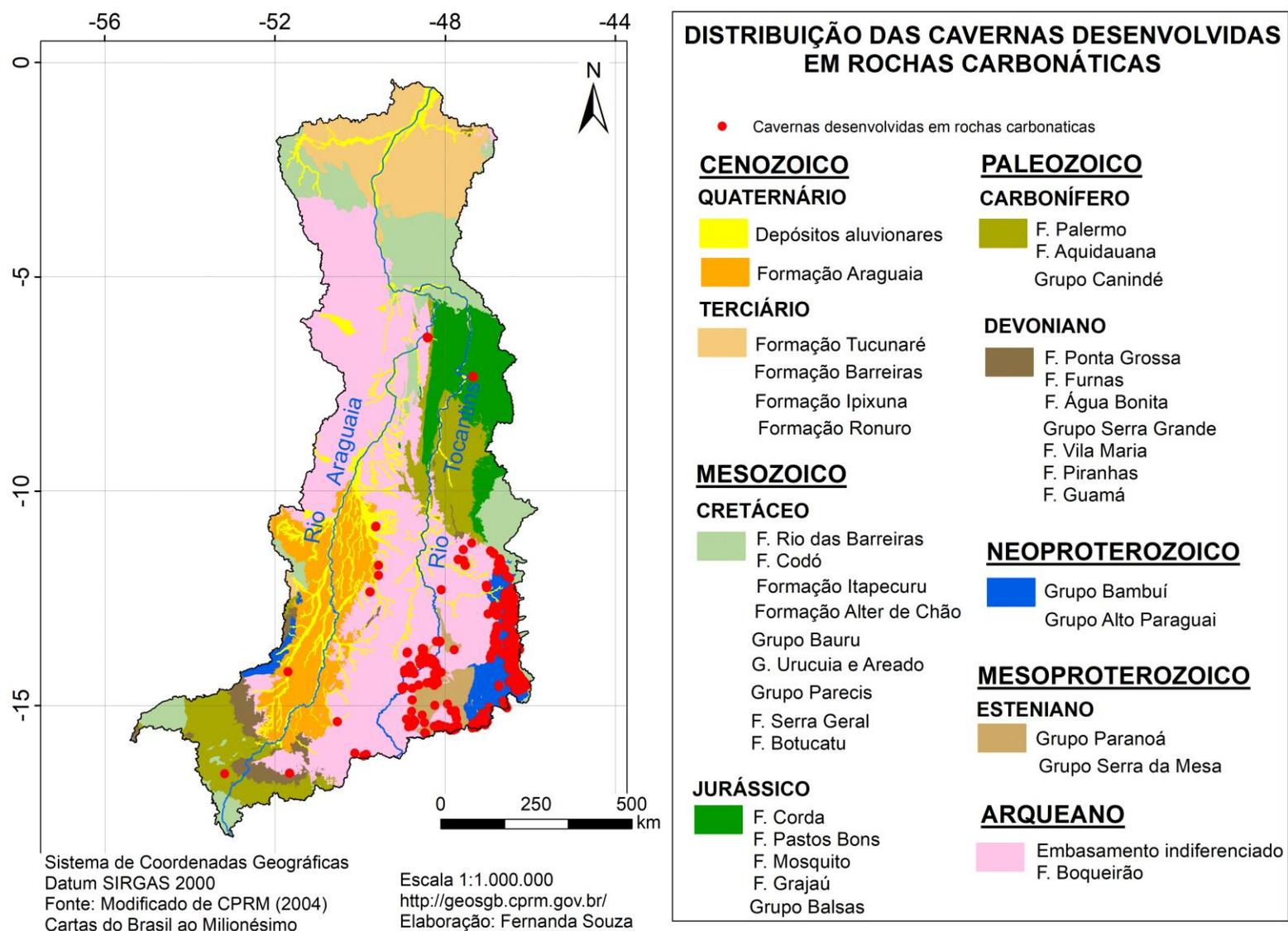


Figura 3.6: Distribuição das cavernas desenvolvidas em rochas carbonáticas na bacia hidrográfica do rio Tocantins/Araguaia

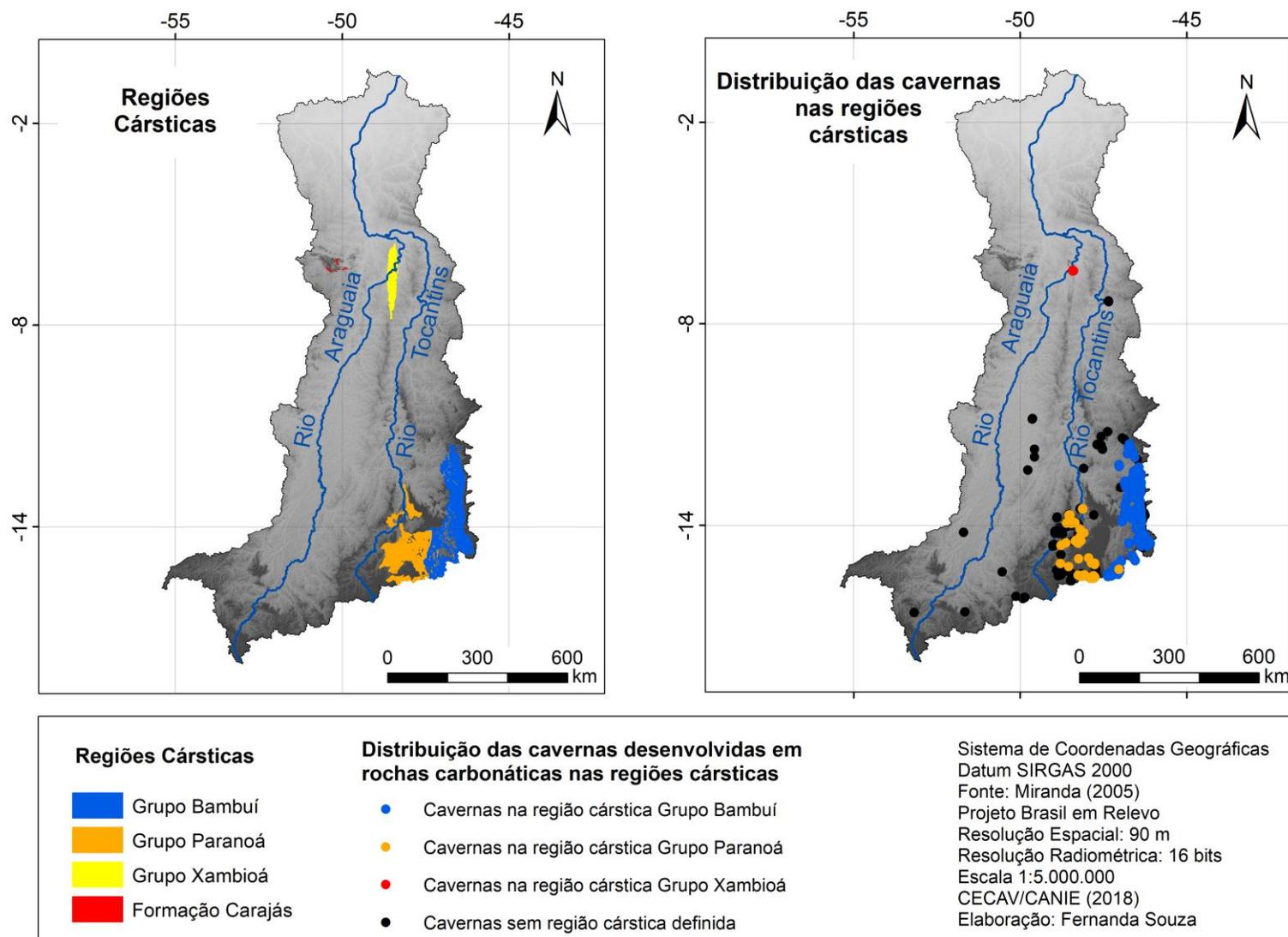


Figura 3.7: Regiões cársticas na bacia hidrográfica do rio Tocantins/Araguaia

As descontinuidades geológicas também são elementos importantes na interpretação do relevo regional. As estruturas geológicas presentes na parte do Brasil Amazônico são menores, porém mais numerosas que as do Brasil Extra Amazônico. De acordo com Silva *et al.* (1974) há um conjunto de dobras, além de falhas e fraturas de direção preferencial NW-SE, e menos recorrente, N-S. Entre as estruturas de maior expressividade na área de estudo estão a Falha de Carajás, Fossa do Marajó, Lineamento Maranhão/Paraná, Fossa Araguaiana, Faixa Orogênica Araguaia/Tocantins, Sinéclise Amazonas e Sinéclise do Maranhão/Piauí, além de outras estruturas de menor expressão (SILVA *et al.*, 1974; CUNHA *et al.*, 1981; DRAGO *et al.*, 1981).

Algumas cavernas na bacia hidrográfica do rio Tocantins/Araguaia ocorrem associadas a lineamentos estruturais, o que inclui as principais falhas, fraturas, juntas, dobras regionais e zonas de cisalhamento indiscriminadas. Essa observação é menos recorrente na área do Cráton do São Francisco (Figura 3.8). A área do Baixo Tocantins, o alto e baixo curso da bacia hidrográfica do Araguaia e o médio curso do rio Tocantins são marcados por concentrações de fraturas. Conjuntos de sistemas de falhas interferem diretamente nas cavernas situadas na bacia hidrográfica do rio Araguaia e no contexto do alto curso do rio Tocantins (Figura 3.8). Verifica-se que as direções preferenciais das principais estruturas geológicas são NE-SW (39,26 %) e E-W (35,58 %) (Gráfico 3.4).

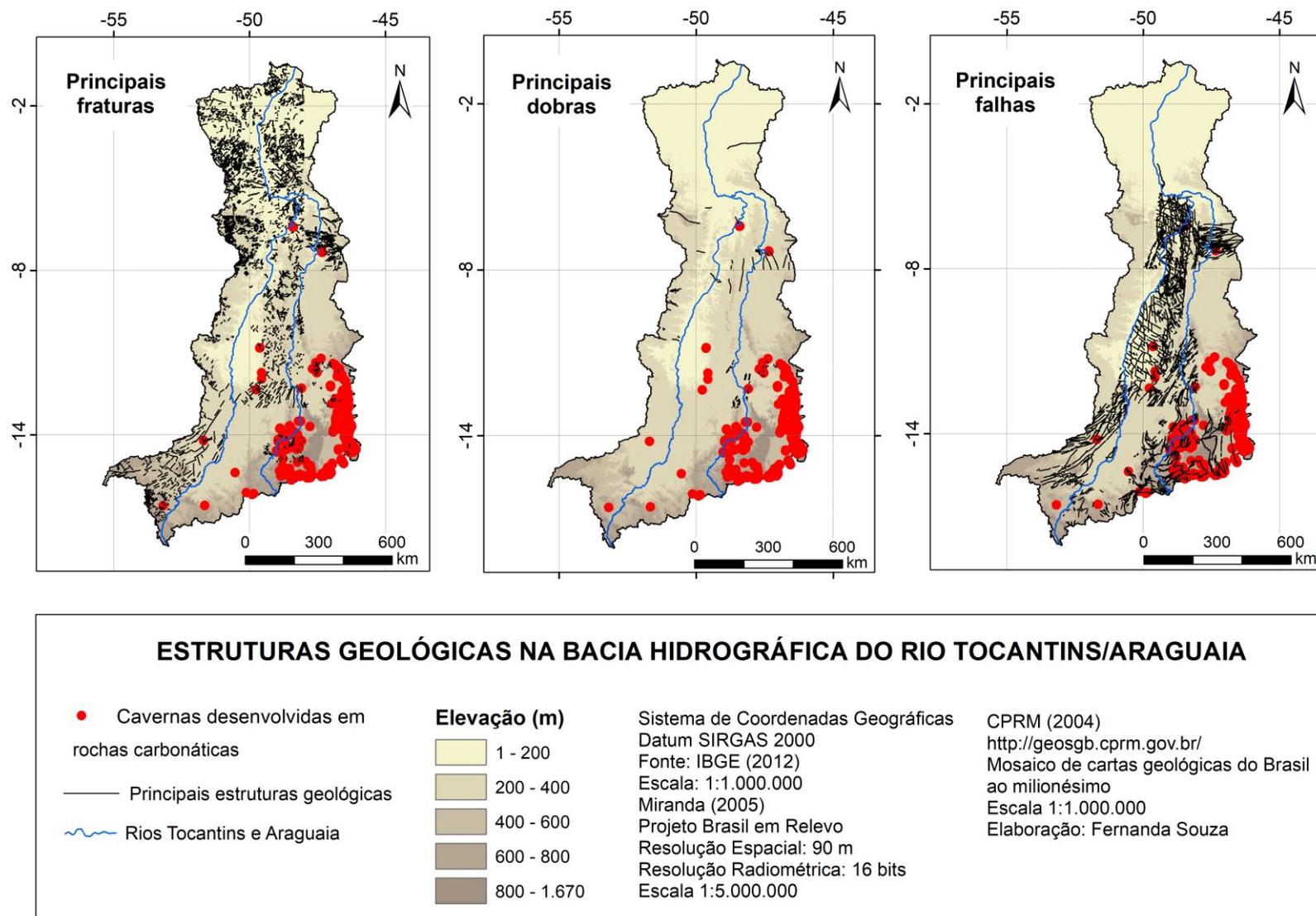
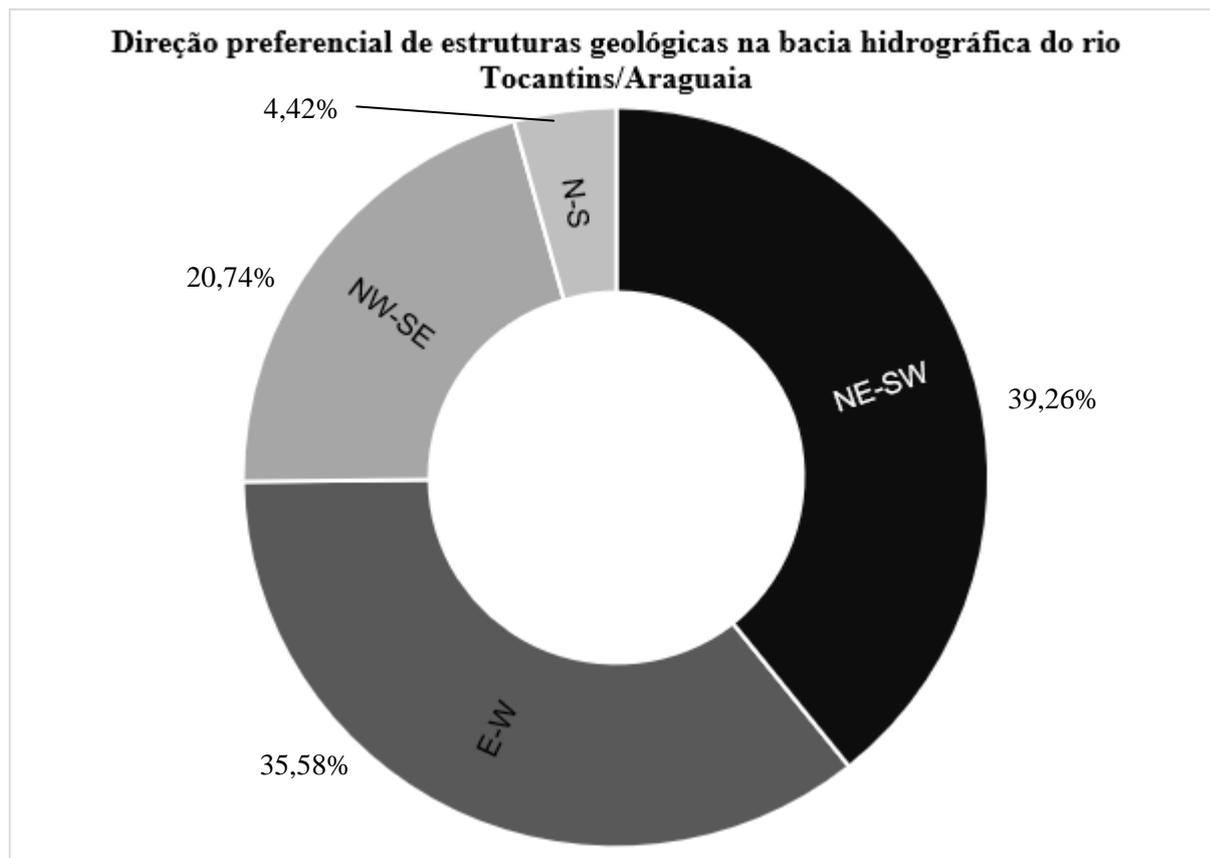


Figura 3.8: Principais estruturas geológicas na bacia hidrográfica do Tocantins/Araguaia

Gráfico 3.4



Fonte: Elaborado a partir de CPRM (2004)

As estruturas geológicas são importantes no processo de desenvolvimento das cavernas, pois são meios que favorecem a infiltração da água no maciço. Essa água, ao reagir com os minerais da rocha, forma as cavernas. Dessa forma, há cavernas direta ou indiretamente associadas às estruturas geológicas. Além disso, o contexto estrutural pode interferir na geomorfologia regional.

3.2. Características geomorfológicas na bacia hidrográfica do rio Tocantins/Araguaia

A geomorfologia da área de estudo é marcada essencialmente pela influência da geologia regional. As unidades de relevo regionais são agrupadas predominantemente em seis tipos de formas de relevo: planícies²², tabuleiros costeiros²³, depressões²⁴, patamares²⁵, planaltos²⁶ e cuestas²⁷ (Figura 3.9).

²² Planície é uma forma de relevo predominantemente plana, onde os processos de deposição são superiores aos de erosão ou dissecação da paisagem. Elas são formas de relevo frequentemente inundadas por ocasião de cheias (GUERRA, 2009).

²³ Tabuleiros costeiros constituem uma unidade geomorfológica composta, possui origem sedimentar, morfologia tabular, ocorre ao longo do litoral brasileiro, do Amapá ao Rio de Janeiro, com largura de 100 a

As planícies são representadas, predominantemente, pelas áreas de influências fluviais, fluviolacustres e fluviomarinhas. As planícies fluviais e fluviolacustres estão localizadas especialmente próximas aos rios Tocantins, Araguaia, seus afluentes e a alguns lagos. Destaca-se que o rio Araguaia possui planícies fluviais amplas no seu médio curso, que é marcado por um trecho contínuo de aproximadamente 1100 km de extensão. No baixo curso do rio Araguaia, essa drenagem cobre predominantemente rochas cristalinas pré-cambrianas, há pequenas ilhas isoladas, cachoeiras e controle estrutural marcado (LATRUBESSE; STEVAUX, 2006).

O rio Tocantins se caracteriza por apresentar planícies fluviais do seu médio curso até a foz do rio Araguaia. Após esse ponto, somente próximo à foz do rio Tocantins no Oceano Atlântico as planícies voltam a se formar e possuem caráter fluviomarinho (Figura 3.9). Entre as principais unidades de relevo associadas a essas planícies estão a Ilha de Marajó, no Golfão Amazônico, e a Ilha do Bananal, no rio Araguaia.

Parte dos tabuleiros costeiros está localizada no extremo norte da área de estudo (Figura 3.9). Os tabuleiros costeiros são formas de relevo terciárias associadas às deposições sedimentares da Formação Barreiras e inclui a faixa litorânea brasileira (SILVA *et al.*, 2012; VIEIRA *et al.*, 2012). Esses tabuleiros, em geral, apresentam topografia plana, composta por rochas sedimentares, às vezes intemperizadas, e possuem baixas altitudes (GUERRA, 2009).

As depressões são as formas de relevo mais recorrentes na bacia hidrográfica estudada e se estende desde as proximidades de Barra do Garças (MT) até o encontro com os tabuleiros costeiros. Essas depressões possuem denominações locais conforme a área de ocorrência e, portanto, são subdivididas em Depressões do Araguaia, do Médio Tocantins e do Baixo Tocantins (Figura 3.9).

200m e altitude entre 20 e 50m, aproximadamente. Esses tabuleiros podem conter vales estreitos ou abertos, encostas abruptas ou suaves, ou seja, suas características são variáveis ao longo do litoral brasileiro (adaptado de GUERRA, 2009; PEREIRA; CESTARO, 2012).

²⁴ Depressão é a forma de relevo que possui cotas altimétricas mais baixas que o entorno (GUERRA, 2009).

²⁵ Patamares são superfícies que interrompem a continuidade do declive de uma vertente. Essas superfícies podem ser formadas pela erosão, deposição ou atividade estrutural (modificado de GUERRA, 2009).

²⁶ Planaltos são formas de relevo elevadas, relativamente planas, tabulares, delimitadas por escarpas e marcadas pela predominância de processo de erosão, que são superiores aos de deposição (GUERRA, 2009).

²⁷ Cuesta é a forma de relevo composta pela alternância de camadas litológicas de diferentes resistências, reverso com declive suave (inferir a 30°) e *front* abrupto ou íngreme (GUERRA, 2009).

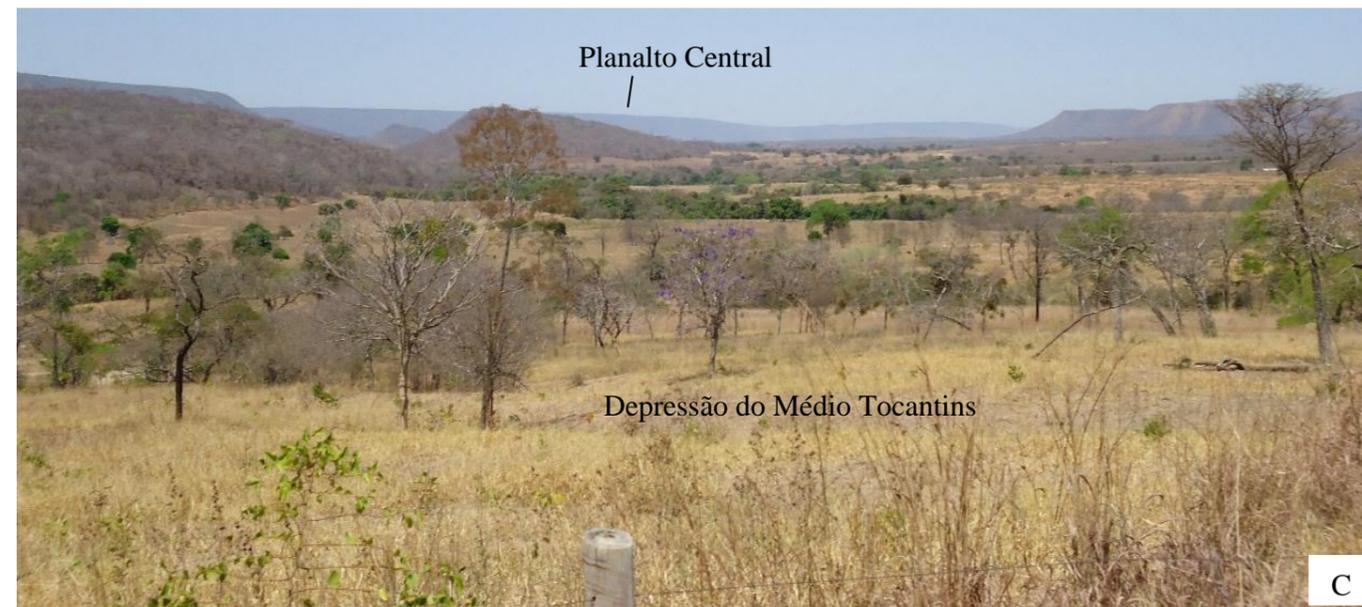
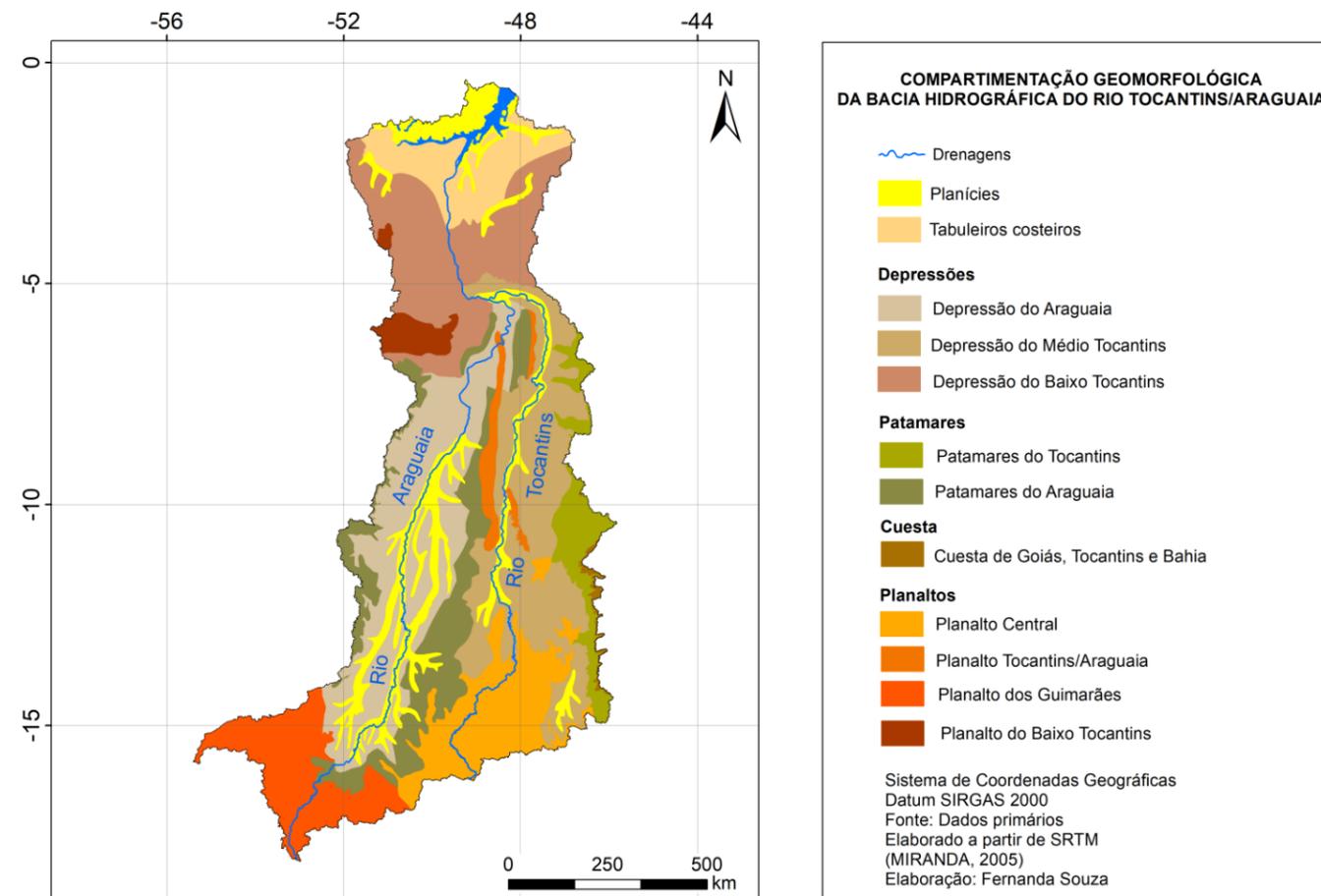


Figura 3.9: Compartimentação geomorfológica da bacia hidrográfica do rio Tocantins/Araguaia
Fotos: Fernanda Souza

Os Patamares do Tocantins se situam entre a Depressão do Médio Tocantins e parte do limite leste da bacia hidrográfica ou entre essa depressão e a Cuesta de Goiás, Tocantins e Bahia (Figura 3.9). Essa unidade geomorfológica foi denominada localmente por Silva (2018) como Patamares da Serra Geral de Goiás e classificada como a área com altitude média entre 595 e 791m.

A Cuesta de Goiás, Tocantins e Bahia ocorre no extremo leste da área de estudo (Figura 3.9), sendo que o *front* desta unidade geomorfológica marca o divisor hidrográfico das bacias do Tocantins e São Francisco. Essa cuesta é composta predominantemente por arenitos, calcários, siltitos, dolomitos e margas dos Grupos Urucuia, Areado e Bambuí. O *front* da cuesta é modelado pelas ações dos afluentes do rio Tocantins. O reverso suave inclinado desta cuesta é drenado pelos afluentes do rio São Francisco. Essa feição geomorfológica se destaca na paisagem devido à sua extensão, à representatividade altimétrica do *front* de cuesta para o entorno e às condições morfológicas da Depressão do Médio Tocantins, que permitem a visualização do *front* de cuesta a partir de vários ângulos.

Silva (2018), ao estudar a morfogênese do relevo e do divisor hidrográfico entre as bacias hidrográficas do São Francisco e Tocantins, constatou que os afluentes do rio Tocantins possuem agressividade superior às do São Francisco e concluiu que isso favoreceu o recuo das escarpas e expansão da bacia do Tocantins para leste. Registra-se que a parte oeste da bacia hidrográfica do rio Tocantins/Araguaia é marcada pela ausência de cuesta e chapadas na escala do mapeamento geomorfológico realizado (Figura 3.9).

Os planaltos, por sua vez, são as formas de relevo localizadas especialmente na porção sul da área de estudo, nos divisores dos rios Tocantins e Araguaia, e isoladamente no limite oeste da bacia pesquisada. Esses planaltos recebem denominações locais, conforme as áreas de ocorrência. O Planalto Central e o Planalto dos Guimarães são os que possuem maior área de abrangência nessa bacia (Figura 3.9). O Planalto Central apresenta áreas planas, extensas, com altitudes médias de 800 a 1000m, geralmente é dissecado pelas drenagens e delimitado por escarpas ou colinas arredondadas (GUIMARÃES, 1949). O Planalto dos Guimarães constitui um relevo plano, com vertentes abruptas ou colinas amplas, marcado pela erosão e é sustentado por rochas das formações Furnas e Ponta Grossa (ROSS; SANTOS, 1982).

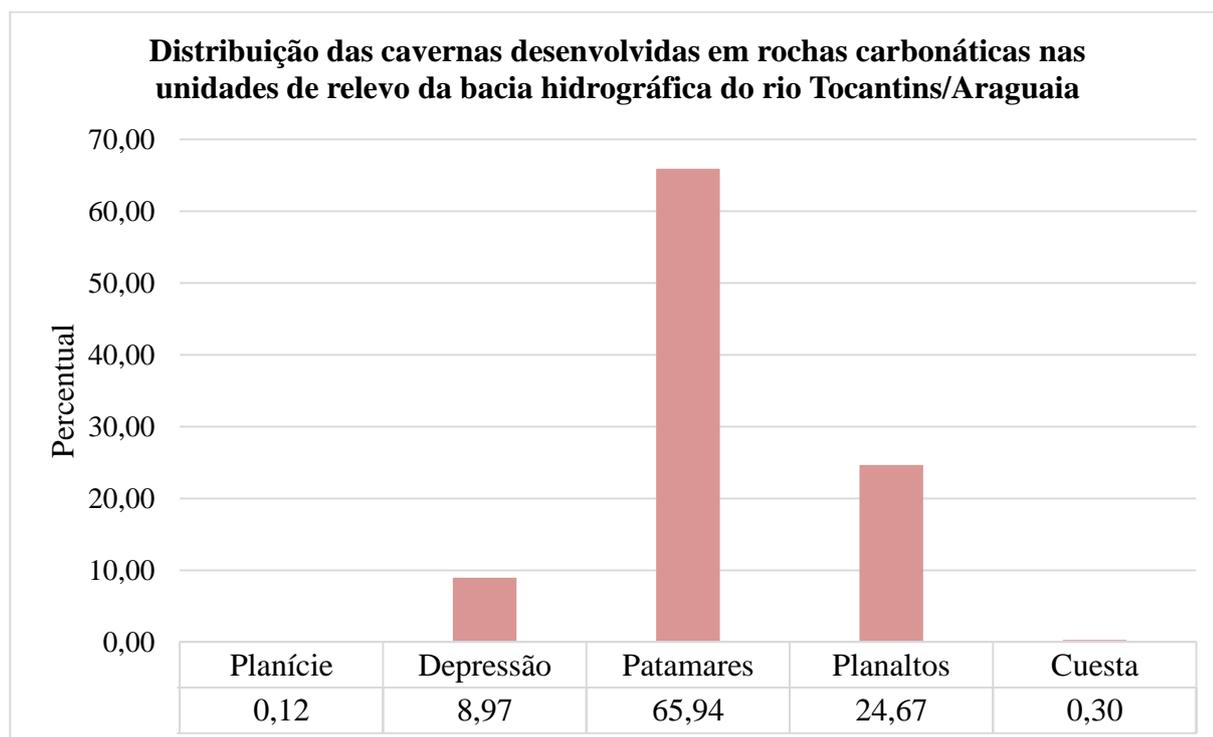
Além disso, destaca-se o Planalto Tocantins/Araguaia, que marca o divisor hidrográfico das bacias homônimas. O Planalto Tocantins/Araguaia se trata de uma feição elevada, possui topo plano, é estreito e possui alinhamento preferencial N-S (Figura 3.9). O Planalto do Baixo Tocantins é composto, predominantemente, por rochas ferruginosas,

localiza-se na parte oeste dessa bacia hidrográfica e é drenado pelos afluentes do baixo curso do rio Tocantins (Figura 3.9).

As características das principais unidades geomorfológicas da área de estudo demonstram que essa bacia hidrográfica apresenta relevo predominantemente plano, situado nas áreas de depressões, planícies e planaltos. Todavia, destaca-se a ocorrência de algumas escarpas e encostas denominadas localmente de serras. Entre as feições de maior destaque nacional contido na área de estudo, registra-se a Serra de Carajás, Serra do Roncador, Jalapão, Chapada dos Veadeiros, Planalto Central, Depressão do Araguaia, Ilha de Marajó e Depressão do Tocantins.

As cavernas ocorrem em várias unidades de relevo da bacia hidrográfica do rio Tocantins/Araguaia, incluindo as planícies, patamares, depressões, cuesta e planaltos (Figura 3.10). Nesse contexto, os maiores percentuais de cavernas desenvolvidas em rochas carbonáticas ocorrem nas áreas de patamares (65,94%) e planaltos (24,67%) (Gráfico 3.5).

Gráfico 3.5



Fonte: Elaborado a partir de Cecav (2018)

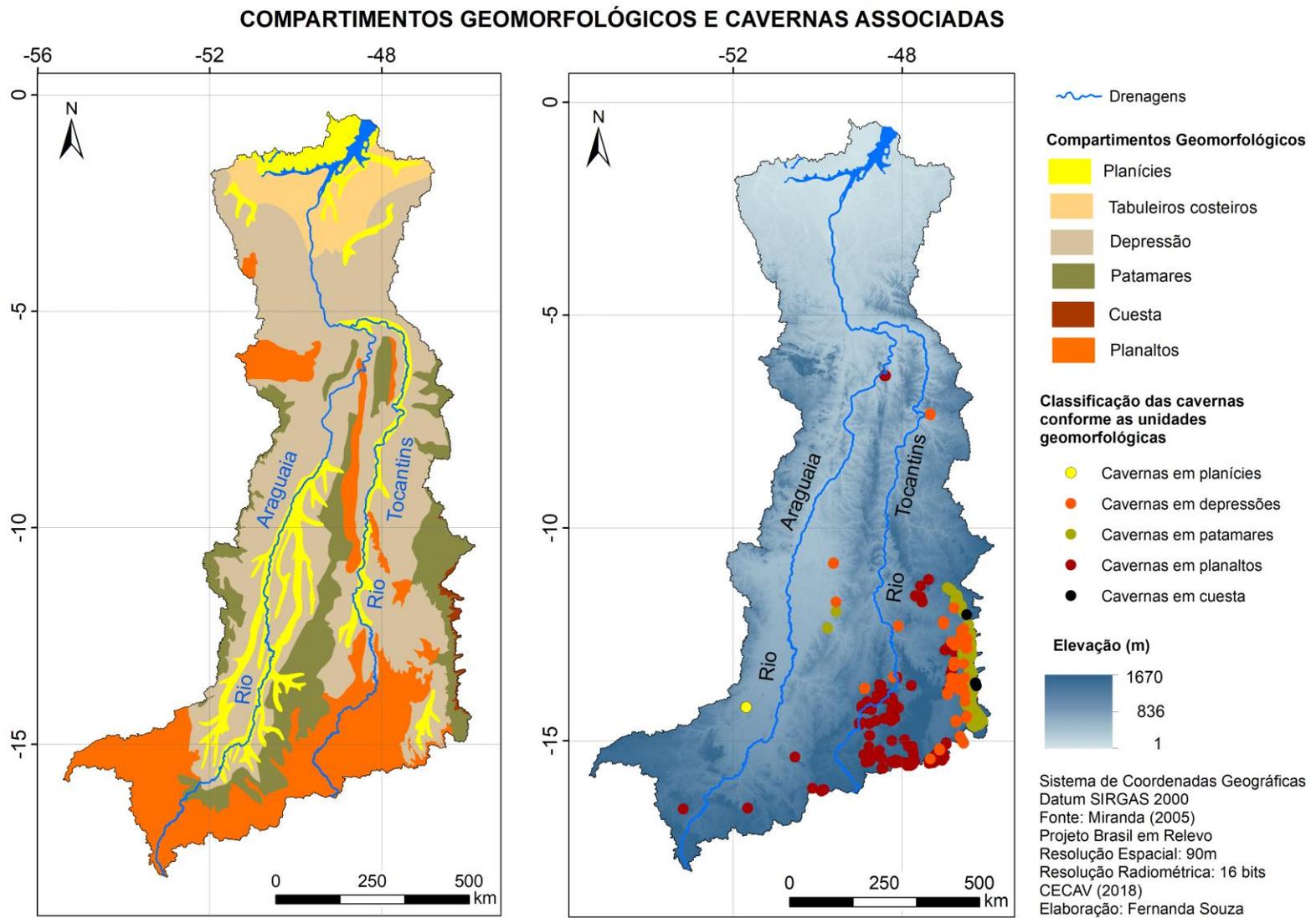


Figura 3.10: Distribuição das cavernas nos compartimentos geomorfológicos da bacia hidrográfica do rio Tocantins/Araguaia

Verifica-se que as cavernas desenvolvidas em rochas carbonáticas associadas aos patamares se localizam, principalmente, nos Patamares do Tocantins. As cavernas situadas nas áreas de planaltos se concentram, predominantemente, no Planalto Central. Já as cavernas localizadas nas depressões se situam, essencialmente, na Depressão do Médio Tocantins e estão concentradas nas áreas próximas aos Patamares do Tocantins (Figura 3.10). Portanto, as áreas topograficamente mais elevadas, em geral, possuem maiores concentrações de cavernas desenvolvidas em rochas carbonáticas. As cavernas situadas em depressões geralmente ocorrem nas bordas dessas unidades geomorfológicas.

Os perfis topográficos na bacia hidrográfica do rio Tocantins/Araguaia (Figura 3.11) reforçam características geomorfológicas regionais. Nestes perfis é possível observar, em vários contextos, as diferenças nos relevos associados ao rio Araguaia e ao rio Tocantins. Constata-se que, em geral, as áreas drenadas pelo rio Araguaia contêm depressões amplas, que são mais largas no médio curso (C-D, E-F, G-H) que no baixo curso do rio principal (A-B). O rio Araguaia possui direção preferencial NE-SW e é caracterizado por poucas mudanças de direção do canal. A extensão das planícies e depressões, bem como o relevo plano a suavizado, destaca-se na paisagem.

A área pertencente ao rio Tocantins, por sua vez, possui mais diversidade topográfica se comparado à bacia hidrográfica do rio Araguaia. Verifica-se que o rio Tocantins drena áreas do Planalto Central e, em seguida, passa a correr encaixado. O rio Tocantins possui trechos de canal predominantemente retilíneo, segue paralelo ao rio Araguaia e é limitado por planaltos. Essa característica indica controle estrutural (NE-SW) nesse trecho de canal do rio Tocantins. O perfil A-B mostra trecho em que o relevo possui cotas altimétricas baixas e arrasadas. Além disso, o perfil A-B fica próximo ao local de mudança de direção do rio Tocantins. O rio Tocantins, que possuía direção preferencial NE-SW, migra aproximadamente 90° para oeste e posteriormente 90° para norte. Essas mudanças angulares de direção do canal sinalizam capturas fluviais associadas ao soerguimento dos Andes e estabelecimento do Oceano Atlântico como nível de base para os rios Amazonas e Tocantins. Registra-se a importância de estudos futuros com foco para a análise fluvial, bem como o uso de métodos e técnicas específicas sobre as influências tectônicas e estruturais no relevo e dinâmica fluvial.

A observação específica de cada perfil topográfico permite constatar a presença de planaltos (G-H), que são erodidos pelas drenagens (Figura 3.11). Nesta localidade, há várias cavernas na porção leste da bacia hidrográfica e algumas cavernas no lado oeste (Figura 3.11). A área associada ao rio Tocantins é marcada por diversidade topográfica (Figura 3.11),

composta pelo Planalto Central, Patamares do Tocantins, Depressão do Tocantins e Cuesta de Goiás, Tocantins e Bahia. Assim, o maior quantitativo de cavernas desenvolvidas em rochas carbonáticas se situa nos Patamares do Tocantins e Planalto Central (Figura 3.11). Por fim, o perfil A-B demonstra um conjunto de planaltos intercalados pela Depressão do Araguaia e Depressão do Tocantins. Nessa área, as cavernas desenvolvidas em rochas carbonáticas se localizam próximas ao rio Araguaia (Figura 3.11).

A Figura 3.12 mostra a declividade e características altimétricas no relevo da área de estudo, o permite constatar a diversidade topográfica. Afinal, o relevo varia de 1m, próximo à foz do rio Tocantins, até 1670m, próximo às nascentes do rio principal. Verifica-se a predominância de relevo arrasado, plano (declividade de 0 a 3%) ou suave ondulado (declividade de 3 a 8%). As características de declividade e altimetria baixas predominam na porção W e N da bacia, especialmente na área drenada pelo rio Araguaia e seus afluentes, e após a confluência do rio Araguaia com o rio Tocantins. Nessa escala de mapeamento as áreas escarpadas são pontuais. As áreas com as cotas altimétricas mais elevadas se situam na parte S e SE dessa bacia, que é marcada por patamares e planaltos. As áreas mais declivosas se localizam próximas aos planaltos e correspondem às escarpas dessas feições. Assim, a maioria das cavernas na bacia hidrográfica do rio Tocantins/Araguaia se desenvolve nas áreas de relevo ondulado e forte ondulado.

As áreas com altitudes elevadas, especialmente com altimetria entre 1670 e 500m, apresentam maiores concentrações de cavernas (Figura 3.12). As localidades entre 500 e 300m possuem concentrações intermediárias de cavernas e se localizam especialmente nos domínios do Alto Tocantins. Já as áreas com altitudes inferiores a 300m possuem as menores ocorrências de cavernas e elas se distribuem, predominantemente, na Depressão do Tocantins e Depressão do Araguaia. Essas características reforçam as afirmações de Ford e Williams (2007), que compreendem o gradiente hidráulico como fator de ocorrência de cavernas. Assim, com a evolução do relevo as áreas atualmente arrasadas e com baixas altitudes topográficas continham cavernas que foram suprimidas à medida que houve erosão remontante, retração lateral das escarpas, dissolução e aplainamento do relevo regional.

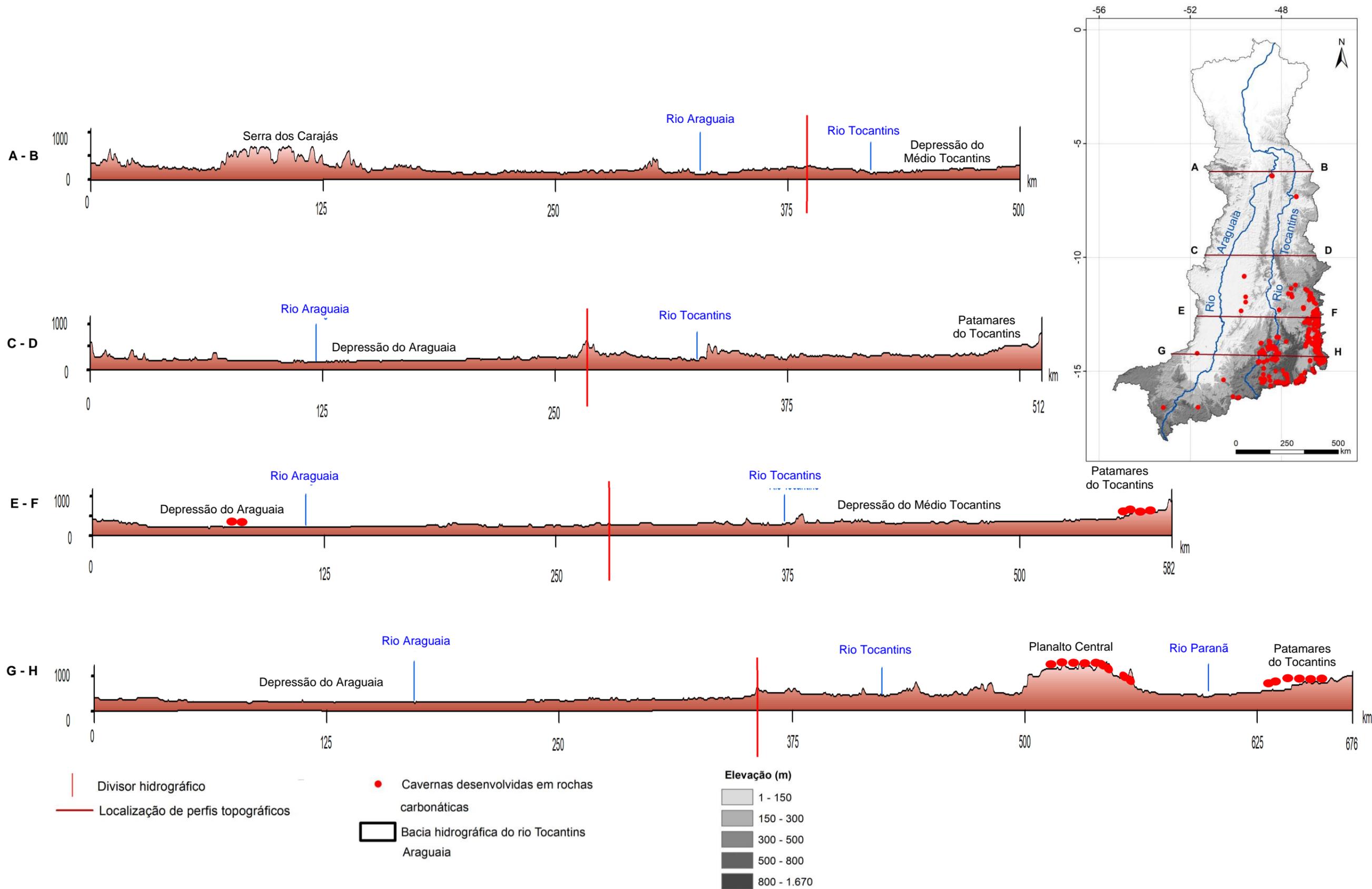


Figura 3.11: Perfis topográficos na bacia hidrográfica do rio Tocantins/Araguaia.

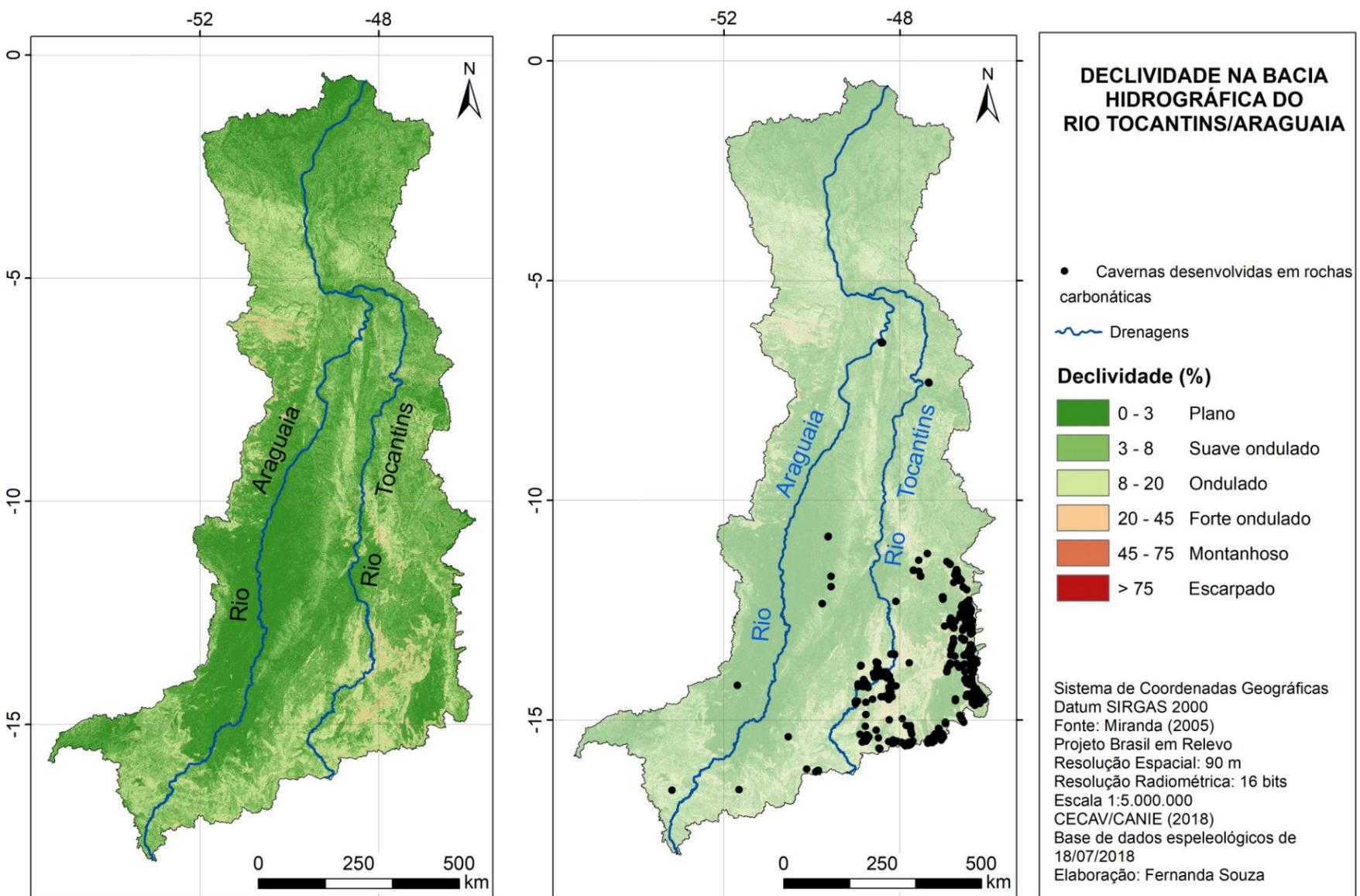
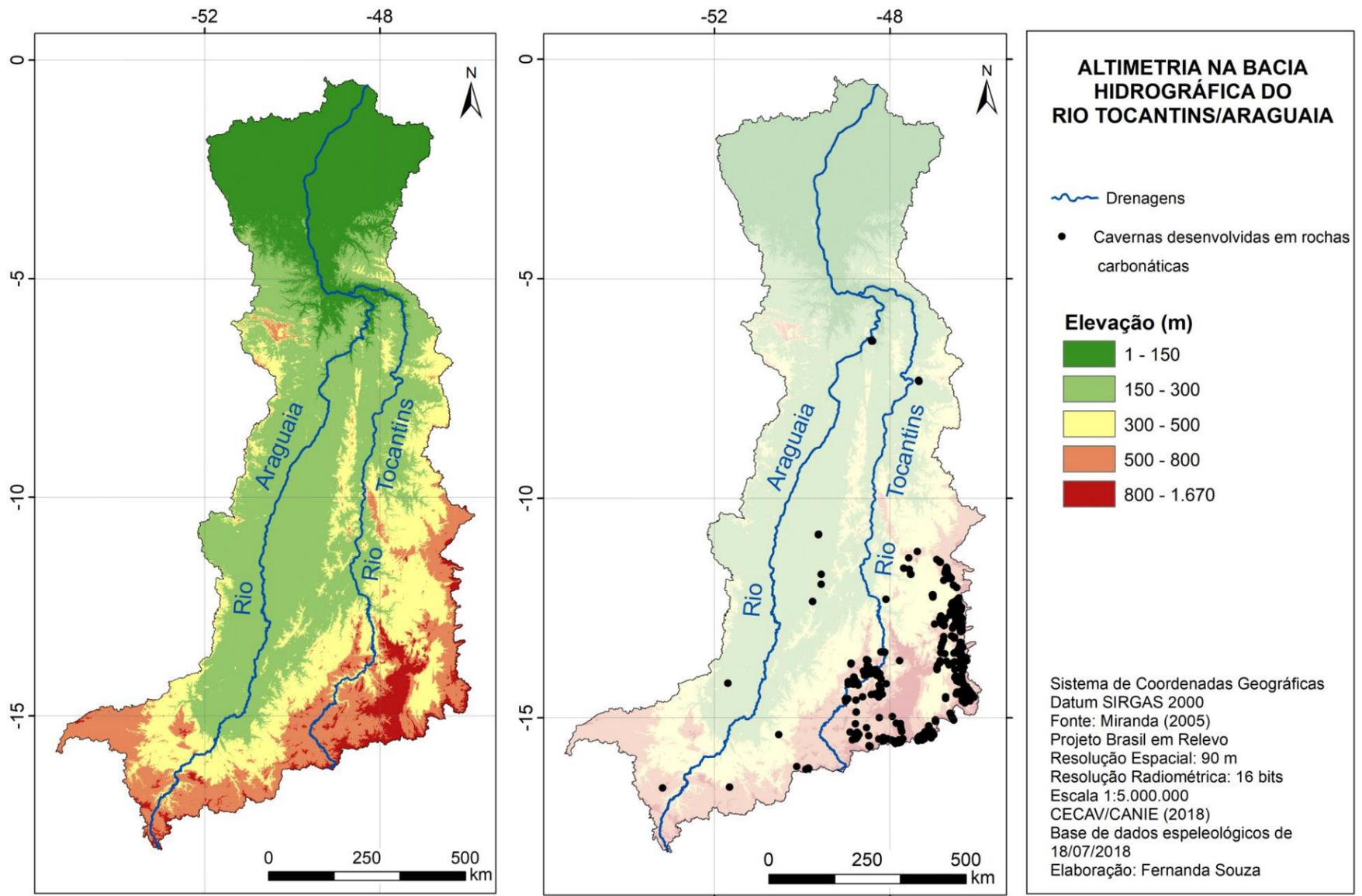


Figura 3.12: Altimetria e declividade na bacia hidrográfica do rio Tocantins/Araguaia

Em síntese, constata-se que a formação e a distribuição das cavernas desenvolvidas em rochas carbonáticas na bacia hidrográfica do rio Tocantins/Araguaia estão associadas a contribuições multifatoriais (Quadro 3.1):

Quadro 3.1:

Elementos geológicos e geomorfológicos preferenciais para distribuição das cavernas desenvolvidas em rochas carbonáticas na bacia hidrográfica do rio Tocantins/Araguaia

<p>Elementos geológicos preferenciais</p>	<p>Borda do Cráton do São Francisco e seu entorno</p> <p>Calcários, dolomitos e margas, em contato ou não com siltitos, arenitos e micaxisto</p> <ul style="list-style-type: none"> - Grupo Bambuí - Contato de rochas do Grupo Bambuí e Grupo Paranoá - Grupo Xambioá
	<p>Estruturas geológicas (dobras, falhas, fraturas e juntas), preferencialmente com direções NE-SW e E-W.</p> <p><i>Nessa escala de estudo, constata-se que as cavernas se desenvolvem em áreas com falhas, dobras e fraturas. Não há considerações sobre as contribuições estruturais na determinação do padrão planimétrico das cavernas.</i></p>
<p>Elementos geomorfológicos preferenciais</p>	<p>Patamares e planaltos</p> <ul style="list-style-type: none"> - Patamares do São Francisco - Planalto Central - Planalto dos Guimarães
	<p>Áreas com altimetrias iguais ou superiores a 500m</p> <ul style="list-style-type: none"> - 500 a 800m de altitude, predominantemente. Em geral, os patamares possuem essa altitude na área de estudo. <p>Áreas de relevo ondulado ou forte ondulado, ou seja, com declividades entre 8 e 45%.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Os relevos declivosos correspondem geralmente às áreas de patamares e escarpas de planaltos.

Verifica-se que as variáveis geológicas e geomorfológicas se complementam e, em conjunto, influenciam a dinâmica fluvial e sua atuação para desenvolvimento do patrimônio espeleológico, bem como para os processos geoquímicos e hidrogeológicos a ele associados. Esses fatores e processos, por sua vez, interferem nas feições geomorfológicas de superfície e

subsuperfície. Assim, a partir desses conhecimentos gerais sobre a bacia hidrográfica do rio Tocantins/Araguaia e à potencialidade espeleológica existente, sugere-se para estudos futuros:

- Análise da evolução geomorfológica regional;
- Levantamento dos fatores hidrológicos e climáticos associados ao desenvolvimento do relevo cárstico nessa bacia hidrográfica;
- Estudos paleontológicos, hidrogeológicos e bioespeleológicos;
- Prospecção espeleológica nas áreas compostas por rochas carbonáticas do Grupo Paraguai;
- Mapeamentos espeleológicos;
- Divulgação do conhecimento espeleológico em meios populares e científicos;
- Proteção ao patrimônio espeleológico.

Esta tese defende a compatibilização entre escalas e nível de detalhamento das informações espeleológicas. Em estudos de geomorfologia geral, os critérios e métodos de trabalho estão consolidados, mas em geomorfologia cárstica e espeleologia é preciso amadurecer reflexões, métodos, técnicas e procedimentos necessários e compatíveis com a realidade brasileira. Na bacia hidrográfica do rio Tocantins/Araguaia, o levantamento de dados geológicos e geomorfológicos foi generalizado. Nesse sentido, registra-se a importância de conhecer o contexto de desenvolvimento das cavernas na bacia hidrográfica do rio Paraná e os principais fatores associados à sua distribuição espacial.

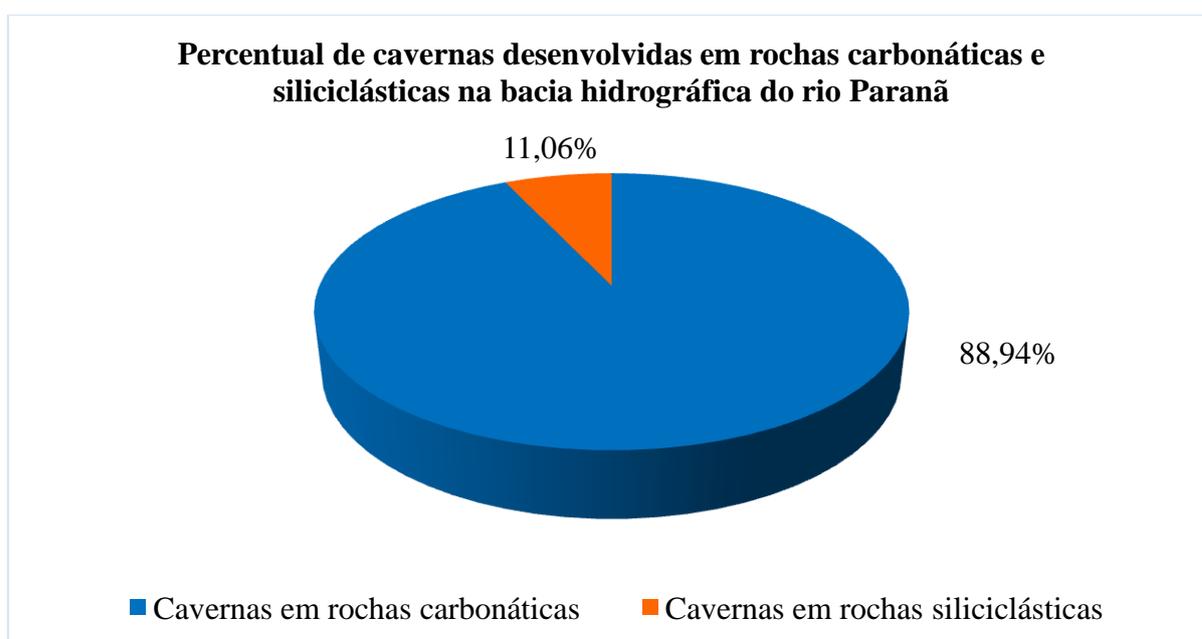
CAPÍTULO 4: CAVERNAS EM ROCHAS CARBONÁTICAS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARANÃ

A bacia hidrográfica do rio Paranã possui área de 59.993,80 Km², drena as unidades federativas do Goiás e Tocantins, contém uma área espeleológica de destaque nacional e regional. Por isso, busca-se compreender os principais fatores litoestruturais e geomorfológicos associados ao desenvolvimento das cavernas vinculadas a rochas carbonáticas. Essa bacia hidrográfica é representativa para a pesquisa, porque contém a maior quantidade de cavernas desenvolvidas em rochas carbonáticas.

4.1. Litologia e sua influência nas cavernas desenvolvidas em rochas carbonáticas na bacia hidrográfica do rio Paranã

Na bacia hidrográfica do rio Paranã, 88,94% das cavernas se desenvolvem em rochas carbonáticas. Nessa unidade de planejamento, 11,06% das cavernas estão vinculadas a rochas siliciclásticas (Gráfico 4.1). Em relação às cavernas em rochas carbonáticas, verificam-se os seguintes aspectos: 1) distribuição espacial; 2) variedade de rochas carbonáticas e 3) outras propriedades litológicas, e quais as relações dessas três variáveis com as cavernas desenvolvidas na localidade.

Gráfico 4.1:



Fonte: Dados da pesquisa

Em geral, as cavernas desenvolvidas em rochas carbonáticas se localizam na parte leste e sudoeste da bacia hidrográfica do rio Paranã (Figura 4.1). Assim, a distribuição espacial é irregular e desigual. Em relação às influências litológicas para essa distribuição, destaca-se que a maioria das cavernas está associada às rochas carbonáticas do Grupo Bambuí, cuja localização é predominante, de forma contínua, na parte leste dessa bacia hidrográfica. Na parte sudoeste da área pesquisada as rochas carbonáticas do Grupo Bambuí ocorrem, de forma descontínua, intercaladas por metapelitos e depósitos terciários. Nesse contexto, observa-se o desenvolvimento de algumas cavernas (Figura 4.1).

Nos domínios territoriais a oeste de Iaciara (GO) e Alvorada do Norte (GO), embora sejam marcados pela presença descontínua de rochas carbonáticas do Grupo Bambuí, intercalada por metapelitos e coberturas detrito lateríticas, não há registro de cavernas (Figura 4.1). Esse fator está relacionado ao contexto geomorfológico plano, baixa declividade (0 a 3%) e proximidade ao nível de base (o rio Paranã). A relação desses aspectos com o desenvolvimento das cavernas será discutida com maior profundidade posteriormente.

A área localizada na parte noroeste dessa bacia hidrográfica é composta por granitos, paragneisses e micaxistos principalmente do Complexo Almas-Cavalcante e Grupo Araí. Essa localidade é marcada pela ausência de cavernas cadastradas e há potencialidades espeleológicas baixas, uma vez que as rochas são pouco solúveis e o contexto geomorfológico é plano (Figura 4.1). Nesse contexto, constata-se que a maior quantidade e densidade de cavernas em rochas carbonáticas está associada à presença de: 1) unidades contínuas de rochas carbonáticas do Grupo Bambuí e 2) unidades descontínuas de rochas carbonáticas do Grupo Bambuí.

A distribuição das cavernas em rochas carbonáticas na bacia hidrográfica do rio Paranã está vinculada, conforme o mapeamento geológico da CPRM (2004), à: Formação Lagoa do Jacaré, Formação Sete Lagoas, Subgrupo Paraopeba indiviso e Formação Serra de Santa Helena, todas do Grupo Bambuí (Figura 4.2).

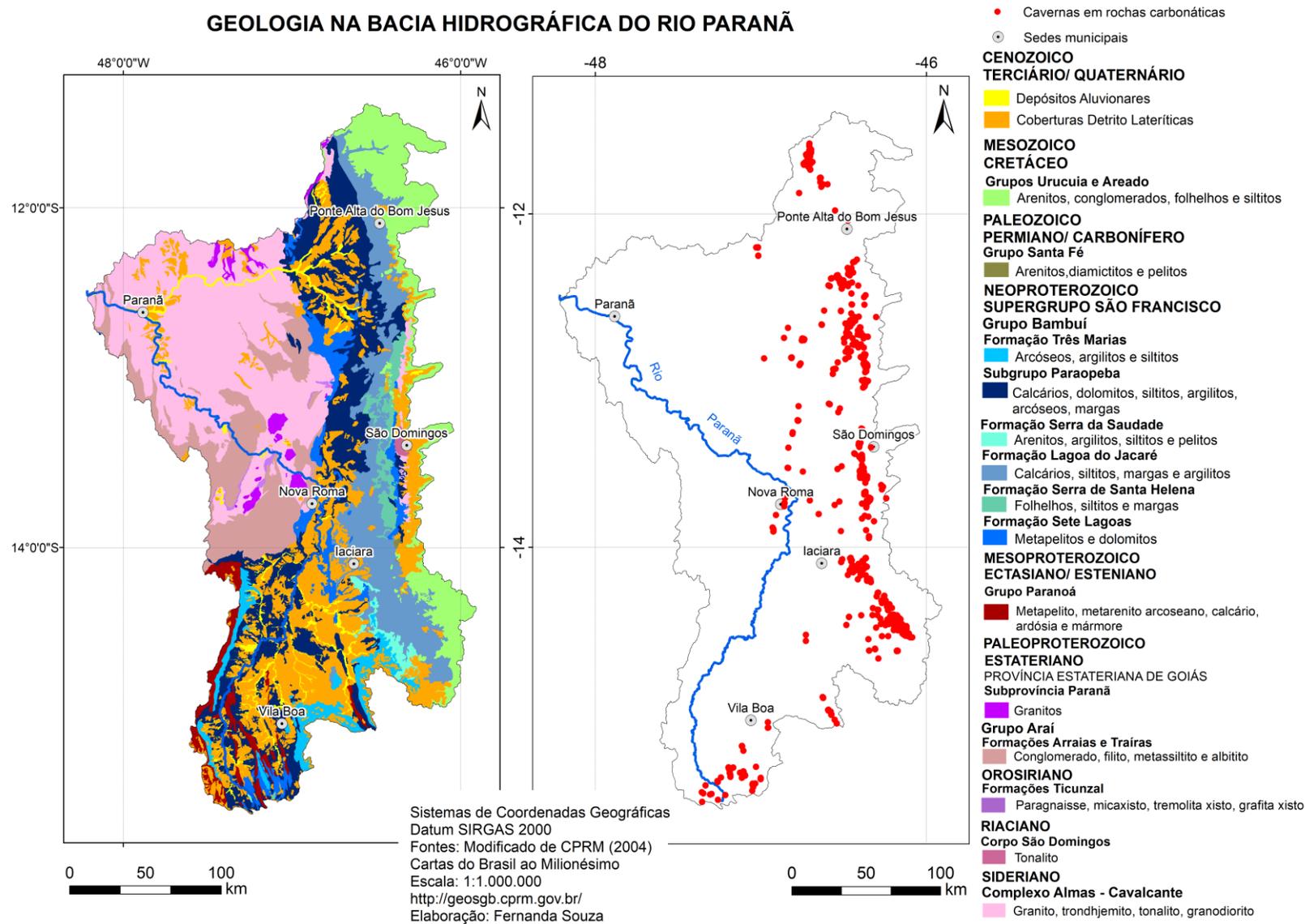
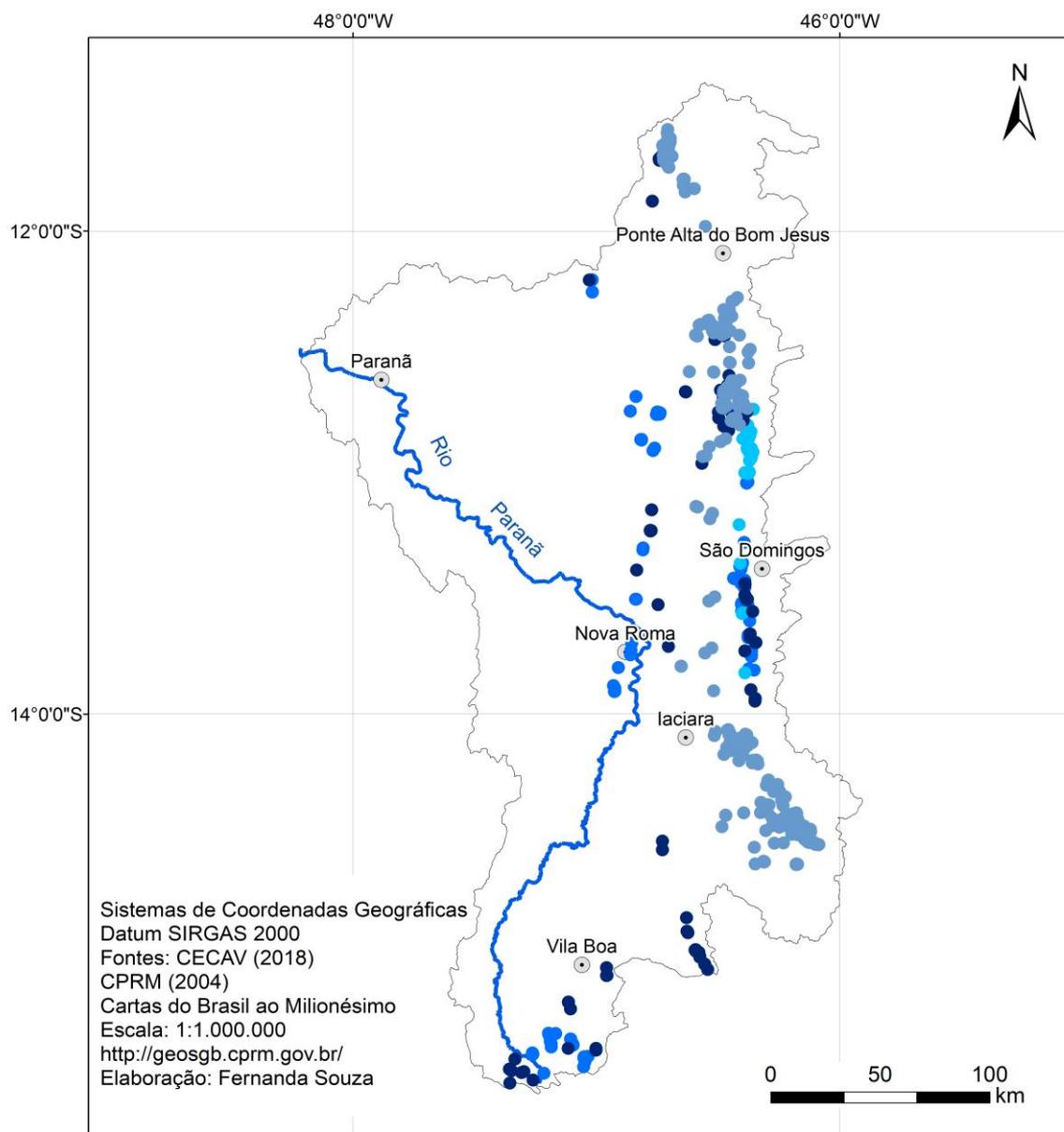


Figura 4.1: Contexto litológico na bacia hidrográfica do rio Paranã e localização das cavernas desenvolvidas em rochas carbonáticas

LOCALIZAÇÃO DAS CAVERNAS CONFORME AS UNIDADES LITOLÓGICAS



◉ Sedes municipais

Localizao das cavernas conforme as unidades litológicas encaixante

NEOPROTEROZOICO SUPERGRUPO SÃO FRANCISCO

Grupo Bambuí

Subgrupo Paraopeba

● Calcários, dolomitos, siltitos, argilitos, arcóseos, margas

Formao Lagoa do Jacaré

● Calcários, siltitos, margas e argilitos

Formao Serra de Santa Helena

● Folhelhos, siltitos e margas

Formao Sete Lagoas

● Metapelitos e dolomitos

Figura 4.2: Localizao das cavernas na bacia hidrográfica do Paran, conforme as unidades litológicas associadas ao seu desenvolvimento

Registra-se que a espessura das formações geológicas interfere na presença e dimensão das cavernas. Segundo Alvarenga e Dardenne (1978), a espessura média das formações geológicas do Grupo Bambuí é de 250 a 500m. Em relação à largura, na área leste da bacia hidrográfica em estudo, onde há sequências de rochas carbonáticas contínuas, há maior extensão territorial de litologias carbonáticas. Isso, portanto, permite a formação de maior quantidade de feições e maior desenvolvimento horizontal das cavernas. Esse fator justifica, por exemplo, o destaque nacional das cavernas da região de São Domingos como algumas das maiores do país (AULER *et al.*, 2001; SBE, 2016). Já na região próxima às nascentes do rio Paranã e à Chapada dos Veadeiros há baixa concentração de cavernas, devido a menor extensão territorial das rochas carbonáticas e por ser zona de transição entre diferentes grupos litológicos.

O Grupo Bambuí (Neoproterozoico) é constituído por duas sucessões principais: marinha e marinho continental. A sucessão basal é a marinha, que é composta da base para o topo pelas Formações Sete Lagoas (carbonática), Serra de Santa Helena (pelito carbonática), Lagoa do Jacaré (carbonática) e Serra da Saudade (pelítica). Essas formações compõem o Subgrupo Paraopeba. A sucessão do topo é de origem marinho continental, representada pela Formação Três Marias (psamítica) (DARDENNE, 1978; CAMPOS; DARDENNE, 1997; IGLESIAS; UHLEIN, 2009). A Figura 4.3 sintetiza as características das fácies do Grupo Bambuí na depressão do rio Paranã, local de principal ocorrência de cavernas na área de estudo.

Na bacia hidrográfica do rio Paranã, a Formação Sete Lagoas está localizada predominantemente nas proximidades do contato com os granitos, gnaisses e paragneisses do Complexo Almas Cavalcante (Figuras 4.1 e 4.2). Conforme Dardenne (1978), essa formação geológica é composta por calcários, dolomitos e argilitos com lentes de calcário (Figura 4.3). A Formação Serra de Santa Helena é representada, essencialmente, por argilito com lentes de calcário (Figura 4.3) e está localizada na parte leste da bacia hidrográfica do rio Paranã, próximo ao contato com depósitos terciários e arenitos dos Grupos Areado e Urucuia (Figura 4.1).

A Formação Lagoa do Jacaré possui maior ocupação territorial se comparada às outras formações carbonáticas (Figura 4.1) e esse fator contribui para maior quantidade de cavernas a ela associada. Essa formação geológica é composta por calcários oolíticos, margas e siltitos intercalados com bancos ou lentes de calcário (Figuras 4.1 e 4.3). A Formação Serra da Saudade é composta por arcóseos, siltitos, com calcários na base e argilitos (Figuras 4.1 e

4.3). Essa unidade geológica está próxima ao contato com os grupos Areado e Urucuaia e não possui cavernas associadas na bacia hidrográfica analisada (Figura 4.2).

Litologia	Formação	Ambiente de Sedimentação
Arcóseo esverdeado em maciços intercalando siltito arcoseano esverdeado	Três Marias	Marinho raso a continental
Siltitos argilosos margosos esverdeados com calcário cinza na base. No topo há bancos de arcóseo esverdeado.	Serra da Saudade	Sublitorâneo com águas tranquilas a fracamente marinho
Siltitos argilosos intercalando bancos ou lentes de calcário preto oolítico. Níveis margosos constantes.	Lagoa do Jacaré	Periodicamente com retorno à sedimentação sublitorânea, com águas rasas e agitadas pelas correntes de maré
Argilito com lentes de calcário cinza escuro e níveis de margas.	Serra de Santa Helena	Sublitorâneo relativamente profundo, com águas calmas
Calcário cinza escuro, localmente oolítico.	Sete Lagoas	Sublitorâneo
Dolomito laminado, brechas dolomíticas e dolarenitos.		Litorâneo
Calcário argiloso cinza escuro laminado.		Sublitorâneo
Argilito com lentes de dolomito bege bem laminado.	Litorâneo	
Paraconglomerado polimitico.	Jequitaí	Glacial
Complexo basal. Xistos Araxá (?). Quartzitos Araí.		

Figura 4.3: Grupo Bambuí no vale do rio Paranã

Fonte: Modificado de Dardenne *et al.* (1978) *apud* Brasil (1982)

O Subgrupo Paraopeba indiviso se destaca na área de estudo e ocorre, geralmente, intercalado com outras variedades de rochas carbonáticas ou siliciclásticas. Esse subgrupo representa indivisivelmente os calcários, dolomitos, siltitos e margas das formações basais do Grupo Bambuí (Figura 4.1 e 4.2). Esse subgrupo apresenta algumas cavernas associadas. A Formação Três Marias é marcada, essencialmente, por arcóseos, representa o topo do Grupo Bambuí (Figura 4.3) e não possui cavernas associadas na área de estudo (Figuras 4.1 e 4.2).

Essa descrição geral das formações do Grupo Bambuí e as cavernas associadas demonstram que as formações com predomínio de carbonatos são as que mais apresentam cavernas. Isso concorda com o princípio básico da dissolução das rochas, entretanto enfatiza-se que a heterogeneidade de rochas carbonáticas do Grupo Bambuí resulta em diversidade na gênese e localização das cavernas. Afinal, a variação na velocidade de dissolução está

diretamente associada às variações petrográficas, químicas, físicas e mineralógicas das formações geológicas e suas fácies.

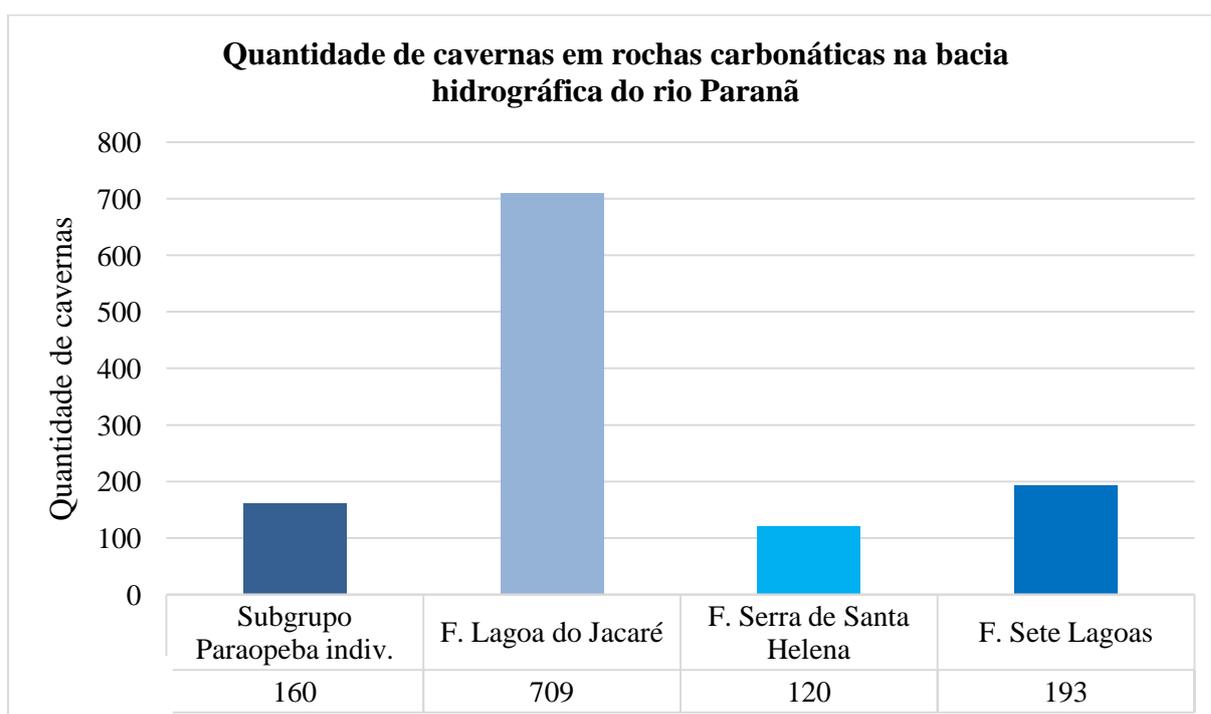
Em termos quantitativos, a Formação Serra de Santa Helena por ser predominantemente pelito carbonática, apresenta o menor percentual (10,15%) de cavernas desenvolvidas em unidades do Grupo Bambuí na área de estudo (Tabela 4.1). Já a Formação Lagoa do Jacaré, por ser predominantemente carbonáticas e com baixa concentração de pelitos, possui o maior número (709 ou 59,98 %) de cavernas na área pesquisada (Gráfico 4.2, Tabela 4.1).

Tabela 4.1: **Quantidade de cavernas na bacia hidrográfica do rio Paranã, associadas às unidades litológicas**

Unidades Geológicas		Quantidade	Porcentagem (%)
Grupo Bambuí	Subgrupo Paraopeba indiv.	160	13,54
	F. Lagoa do Jacaré	709	59,98
	F. Serra de Santa Helena	120	10,15
	F. Sete Lagoas	193	16,33
TOTAL		1182	100

Fonte: Dados da pesquisa

Gráfico 4.2



Fonte: Dados da pesquisa

Em geral, as cavernas desenvolvidas em rochas carbonáticas estão circundadas por tipologias litológicas de diferentes composições, sendo predominantemente siliciclásticas. Logo, as rochas com maior solubilidade possuem maiores índices de cavernas cadastradas. Entretanto, a direção da transição entre grupos litológicos também interfere na localização das cavernas. Isso também é comum na transição das formações litológicas do Grupo Bambuí (Figura 4.1), que são alinhadas predominantemente nas direções: a) N-S na parte leste da bacia hidrográfica do rio Paranã, e b) NE-SW na parte sudoeste da área pesquisada. Assim, torna-se importante compreender as influências das estruturas geológicas na distribuição das cavernas desenvolvidas em rochas carbonáticas na bacia hidrográfica em análise.

4.2. Estruturas geológicas e suas influências na distribuição de cavernas desenvolvidas em rochas carbonáticas na bacia hidrográfica do rio Paranã

Na bacia hidrográfica do rio Paranã, as estruturas geológicas secundárias estão diretamente associadas ao contexto tectônico regional, que interfere na origem e desenvolvimento das cavernas. O contexto tectônico regional corresponde à borda oeste do Cráton do São Francisco e à margem leste da Faixa Brasília (Figura 4.4). Nessa circunstância, as cavernas em rochas carbonáticas se localizam nas áreas do Cráton do São Francisco, que apresenta estabilidade tectônica relativa, especialmente por estar numa unidade de borda. Esse fator contribui para maior ocorrência de cavernas, se comparado às áreas centrais cratônicas. Conforme Saadi *et al.* (2005), a relativa estabilidade cratônica proporciona isotropia aos agentes e processos morfogenéticos. Esse fator é fundamental para a formação do relevo cárstico regional. Registra-se também que as proximidades de contato entre o Cráton do São Francisco e a Faixa Brasília também são marcadas pela presença de cavernas (Figura 4.4).

As áreas de faixas móveis foram formadas e/ou remobilizadas durante o Ciclo Brasileiro e isso condicionou a formação de várias unidades orográficas (SAADI *et al.*, 2005). Assim, essa remobilização regional também contribuiu para dinamizar o gradiente hidráulico na bacia hidrográfica analisada. Na área de estudo, o complexo da Chapada dos Veadeiros é marcado por estruturas geológicas e morfologias descontínuas. Essa área demonstra potencial para desenvolvimento de cavernas associadas a quartzitos e metassiltitos dos Grupos Paranoá e Araí. Como essas rochas são metamórficas, a densidade de drenagens e estruturas geológicas presentes na região contribuiu para a formação e desenvolvimento das cavernas.

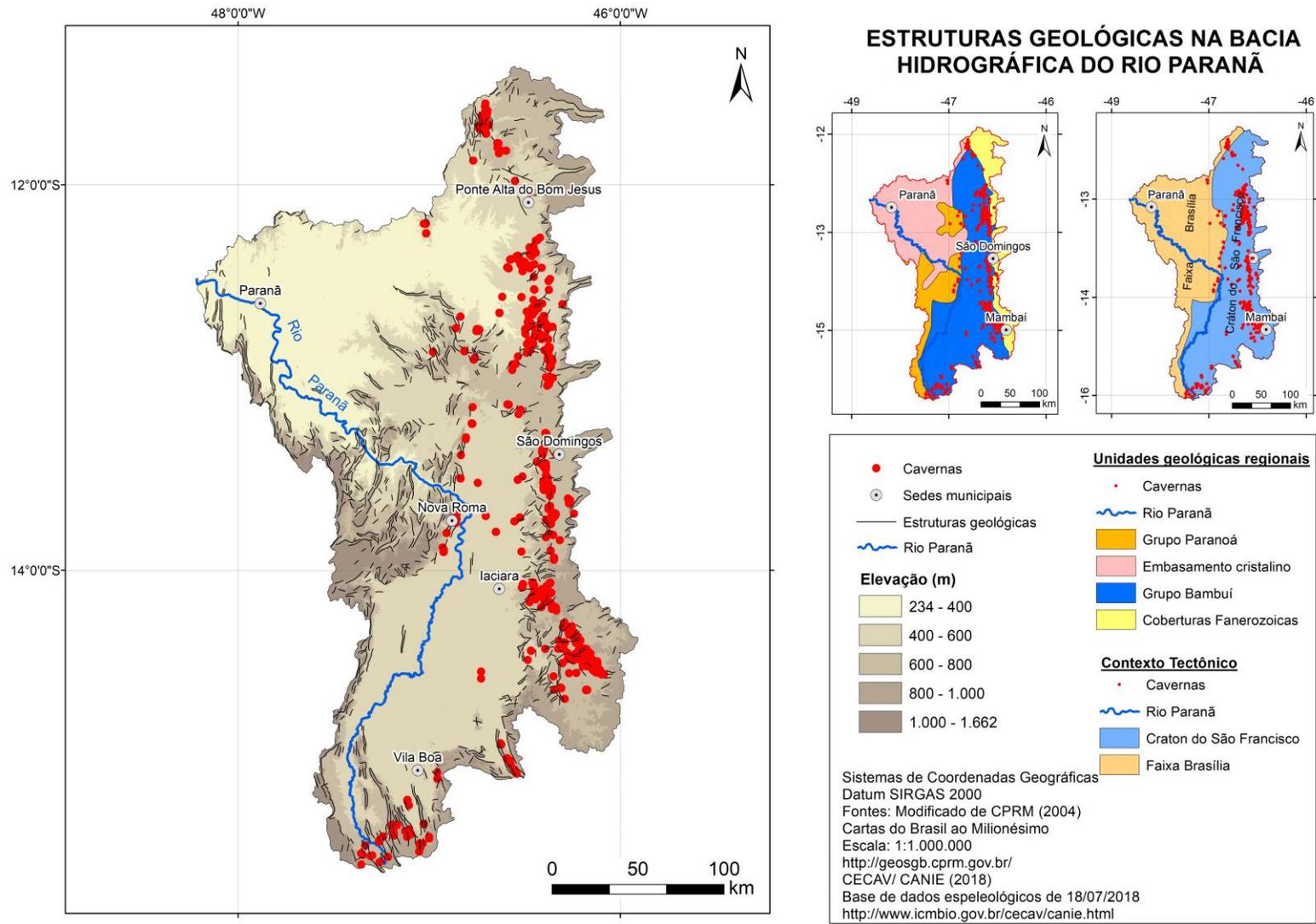


Figura 4.4: Contexto estrutural na bacia hidrográfica do rio Paraná e localização das cavernas desenvolvidas em rochas carbonáticas

Observa-se que a localização das cavernas desenvolvidas em rochas carbonáticas ocorre próxima aos contatos com: 1) arenitos dos Grupos Urucuia e Areado e 2) quartzitos do Grupo Paranoá (Figura 4.4). A localização das cavernas próximas aos contatos geológicos marca, em nível regional, que as rupturas das propriedades físicas e químicas de grupos de rochas carbonáticas e siliciclásticas contribuem para o desenvolvimento das cavernas.

Com base nessas informações, constata-se que a presença de processos de dissolução, erosão e denudação ocorrem de forma diferenciada, o que condiciona diversidade geomorfológica e espeleológica. O mapa das estruturas geológicas secundárias permite compreender o contexto e a diversidade dessas feições (Figura 4.4). O levantamento generalizado das estruturas geológicas em toda a bacia hidrográfica do rio Paranã demonstra o predomínio de feições nas direções NW-SE, N-S e NE-SW (Figura 4.5). Em geral, o alinhamento litológico na direção N-S na parte leste da bacia hidrográfica do rio Paranã está associado aos reflexos da unidade cratônica.

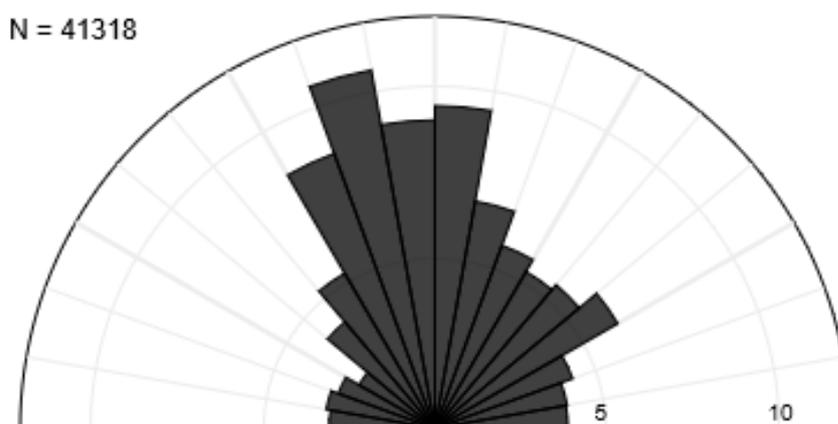


Figura 4.5: Diagrama de rosetas dos lineamentos estruturais na bacia hidrográfica do rio Paranã

Na área cratônica há menores concentrações de estruturas geológicas, exceto nas zonas declivosas. As áreas declivosas do *front* da cuesta possuem estruturas com direção preferencial NE-SW e E-W (Figura 4.4). Além disso, como descreveu Cherem e Varajão (2014), as áreas declivosas e mais fraturadas do Vão do Paranã possuem maiores concentrações de cavernas. Esses autores constatam que a declividade e estruturas geológicas estão associadas ao desenvolvimento cárstico local.

A direção do contato entre essas formações geológicas, além de marcarem mudanças nas composições físicas, químicas e mineralógicas das rochas, são descontinuidades que

favorecem a penetração da água, que reage com as rochas em suas diferentes composições e permitem a formação das cavernas. Dessa forma, observa-se que a concentração das cavernas predominantemente no eixo N-S na área leste da bacia hidrográfica analisada é concordante com a direção dos contatos entre as formações geológicas do Grupo Bambuí (Figura 4.1). Ao mencionar a água na formação das cavernas, torna-se importante analisar o contexto hidrográfico regional.

4.3. Hidrografia e suas influências nas cavernas desenvolvidas em rochas carbonáticas na bacia hidrográfica do rio Paranã

O estudo das características hidrográficas é fundamental para a compreensão das cavernas. Observa-se que a morfologia da bacia hidrográfica do rio Paranã é assimétrica e alongada (Figura 4.6). Conforme Stevaux e Latrubesse (2017), a morfologia possui relação direta com o modo de escoamento e concentração de água na bacia. Nas bacias hidrográficas alongadas, como é o caso da bacia do rio Paranã, o tempo para que a água percorra o canal principal é maior se comparado aos canais fluviais curtos, ou seja, associados a bacias hidrográficas circulares. Nesta tese, acrescenta-se que a morfologia de bacia, escoamento e concentração hídrica influenciam o desenvolvimento do relevo cárstico.

O fator de assimetria de bacia hidrográfica corresponde a 79,74 (Tabela 4.2). Assim, esse índice geomórfico indica migração ortogonal no eixo da bacia hidrográfica, que é consequência de processos tectônicos e/ou aluviais (SALAMUNI, 1998). Como o fator de assimetria foi superior a 50, constata-se a migração ortogonal direita do rio Paranã, conforme considerações metodológicas de Salamuni *et al.* (2004). Essa migração está limitada pela soleira litológica composta por quartzitos que compõem a Chapada dos Veadeiros.

Tabela 4.2: Fator de Assimetria da bacia hidrográfica do rio Paranã

Área da margem direita (km ²)	Área total da bacia (km ²)	Fator de assimetria
47.841,53	59.993,80	79,74

Fonte: Dados primário obtidos a partir de técnicas de geoprocessamento

Cherem e Varajão (2014) defendem a presença de uma cuesta, cujos *front* e cornija compõem a margem leste da bacia hidrográfica do rio Paranã. Essa feição geomorfológica é denominada localmente como Serra Geral de Goiás e Serra Geral de Tocantins. Em trabalho de campo, observa-se a presença de camada de arenito nas escarpas dessas unidades geomorfológicas, suavemente inclinadas em seu reverso, o que reforça a definição de *cuesta*.

O rio Paranã é uma drenagem que requer estudo geomorfológico detalhado para além dos objetivos desta tese, mas algumas observações pontuais podem ser registradas neste trabalho e aprofundadas por outros autores. A dinâmica do rio Paranã até a sua configuração atual e, conseqüentemente, a assimetria da bacia hidrográfica homônima está associada a vários fatores. O rio Paranã possui direção SW-NE até as proximidades de Nova Roma (GO), a partir de onde passa a ter direção geral SE-NW (Figura 4.6) até desaguar no rio Tocantins.

Em ambientes cársticos, a drenagem é dinâmica e geralmente migra em razão de vários fatores, como aproveitamento de fraturas, capturas fluviais por sumidouros, formação de vales cegos, abandono de vales fluviais em função do surgimento de dolinas, entre outros eventos. Assim, para compreender a dinâmica fluvio cárstica geral ou do rio Paranã e seus afluentes, é preciso dedicar-se exclusivamente a este tema.

Os afluentes da margem leste do rio Paranã possuem rede de drenagem com padrão dendrítico, que conforme Schumm (1985) é um padrão comum em áreas de rochas sedimentares e uniformes, ou de rochas cristalinas. Observa-se que, nessa bacia, a rede de drenagem apresenta morfologia apenas superficial. Essa informação é constatada a partir da base de dados da ANA (Figura 4.7) e no processamento de dados SRTM obtidos a partir da ferramenta *watershed* do software QGis, com escala mínima de 5000 (Figura 4.7). Essa constatação também sofre influências dos métodos de obtenção da rede de drenagens, que homogeneíza a superfície e exclui feições pontuais como sumidouros e ressurgências. Assim, nesta escala de análise, a tipologia da drenagem não corresponde àquela mais comum em áreas cársticas, em que, geralmente, a drenagem se alterna em superficial e subterrânea.

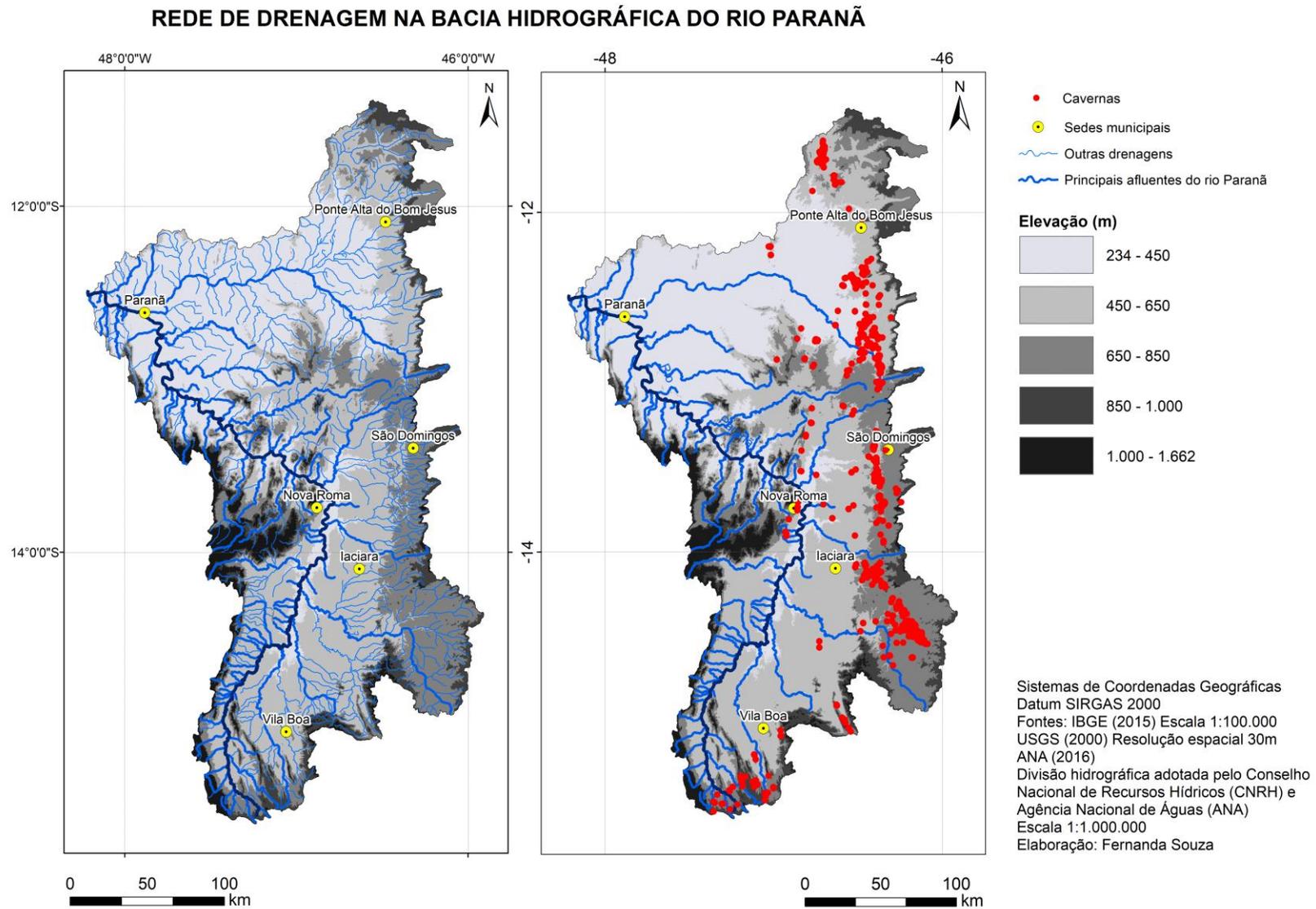


Figura 4.6: Rede de drenagem na bacia hidrográfica do rio Paraná e localização das cavernas desenvolvidas em rochas carbonáticas

COMPARAÇÃO DA REDE DE DRENAGEM NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARANÁ OBTIDAS COM MÉTODOS DIFERENTES

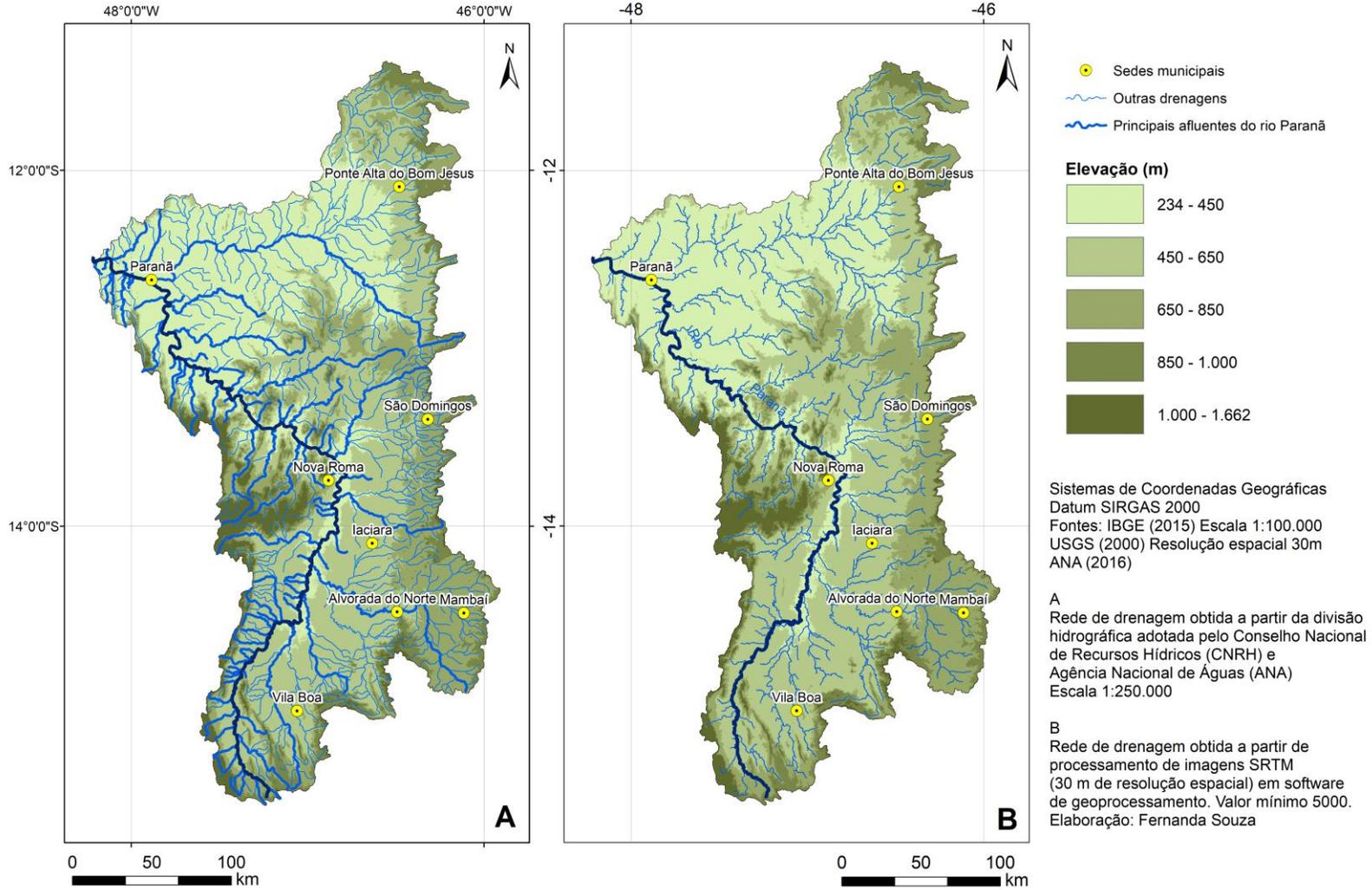
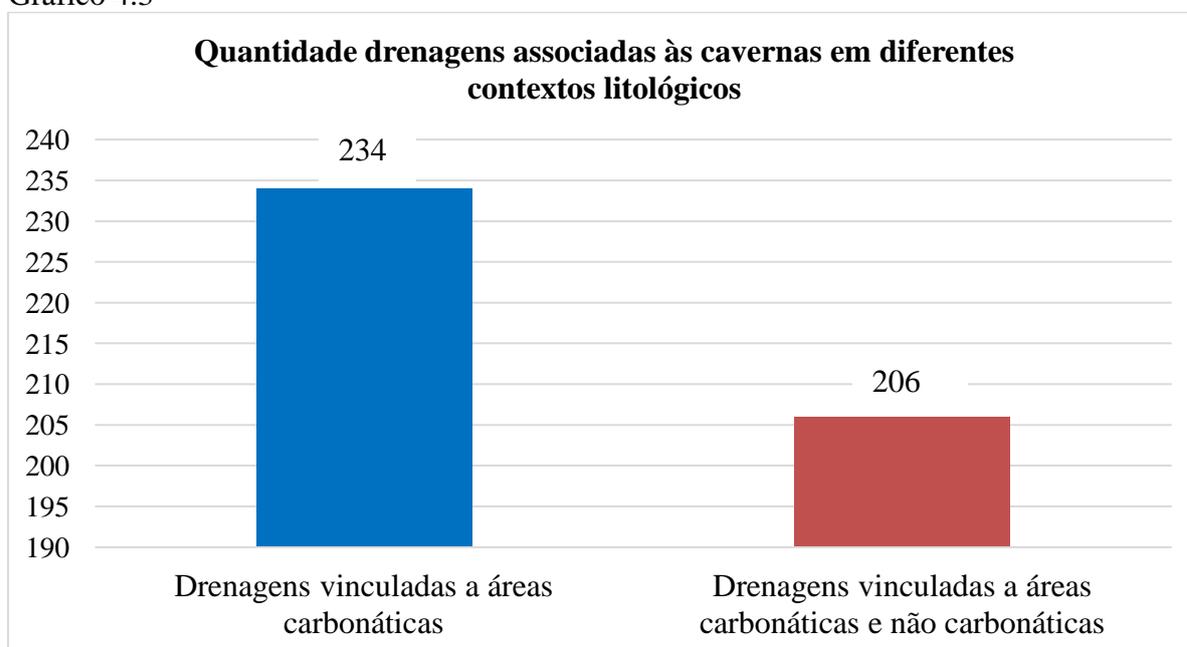


Figura 4.7: Rede de drenagem na bacia hidrográfica do rio Paraná obtidas com diferentes métodos

A maioria das cavernas na bacia hidrográfica em análise está localizada próxima às nascentes e no médio curso dos afluentes de primeira e segunda ordem da margem direita do rio Paranã (Figura 4.8). Portanto, a maioria das cavernas recebe influências das drenagens de primeira e segunda ordem. Esse fator demonstra a importância dessas drenagens na formação do relevo cárstico, uma vez que elas contribuem para transportar ácido silicioso que potencializa a dissolução das rochas carbonáticas.

Registra-se que as drenagens associadas às cavernas possuem nascentes e alguns segmentos de canal fluvial em áreas não carbonáticas e, posteriormente, passam a drenar áreas carbonáticas. Na concepção conceitual clássica de carste, Palmer (2009) classifica essas drenagens como aquelas de origem autogênica ou alogênica. As drenagens de origem autogênica correspondem àquelas que nascem em áreas cársticas, concebida como associadas a rochas carbonáticas. As drenagens de origem alogênica nascem em região não carbonática e depois passam a drenar as áreas com rochas carbonáticas. Neste trabalho, independente da concepção conceitual de carste, realiza-se o levantamento de drenagens que nascem em áreas carbonáticas e não carbonáticas. Os resultados obtidos mostram que a maior parte das drenagens flui exclusivamente em áreas carbonáticas da nascente à foz (Gráfico 4.3).

Gráfico 4.3



Fonte: Dados primários obtidos a partir de técnicas de geoprocessamento

Verifica-se que a bacia hidrográfica do rio Paranã possui drenagens cujas nascentes estão em áreas não carbonáticas e algumas delas desaguam diretamente no rio Paranã (Figura 4.8). Segundo Palmer (2009), as drenagens originadas em rochas siliciclásticas são ácidas e ao

atingirem as áreas carbonáticas contribuem para intensificar os processos dissolutivos e, conseqüentemente, favorecem a formação das feições cársticas. Dessa forma, constata-se que a maioria das cavernas está situada imediatamente à jusante da área com arenitos dos Grupos Urucuia e Areado (Figura 4.8). Esse fator, portanto, demonstra a importância da relação geologia/hidrografia para as cavernas nessa bacia hidrográfica.

Em termos gerais, as áreas com maior densidade de drenagens da margem leste do rio Paranã correspondem às localidades com maior densidade de cavernas. A exceção é a área situada a norte de São Domingos (GO) e a sul de Ponte Alta do Bom Jesus (TO) que possui, em geral, média densidade hidrográfica e alta concentração de cavernas (Figura 4.9). Nesse aspecto, cabe compreender a geomorfologia regional e suas relações com as cavernas desenvolvidas em rochas carbonáticas.

DRENAGENS ASSOCIADAS AO LITOTIPO E DECLIVIDADE NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARANÁ

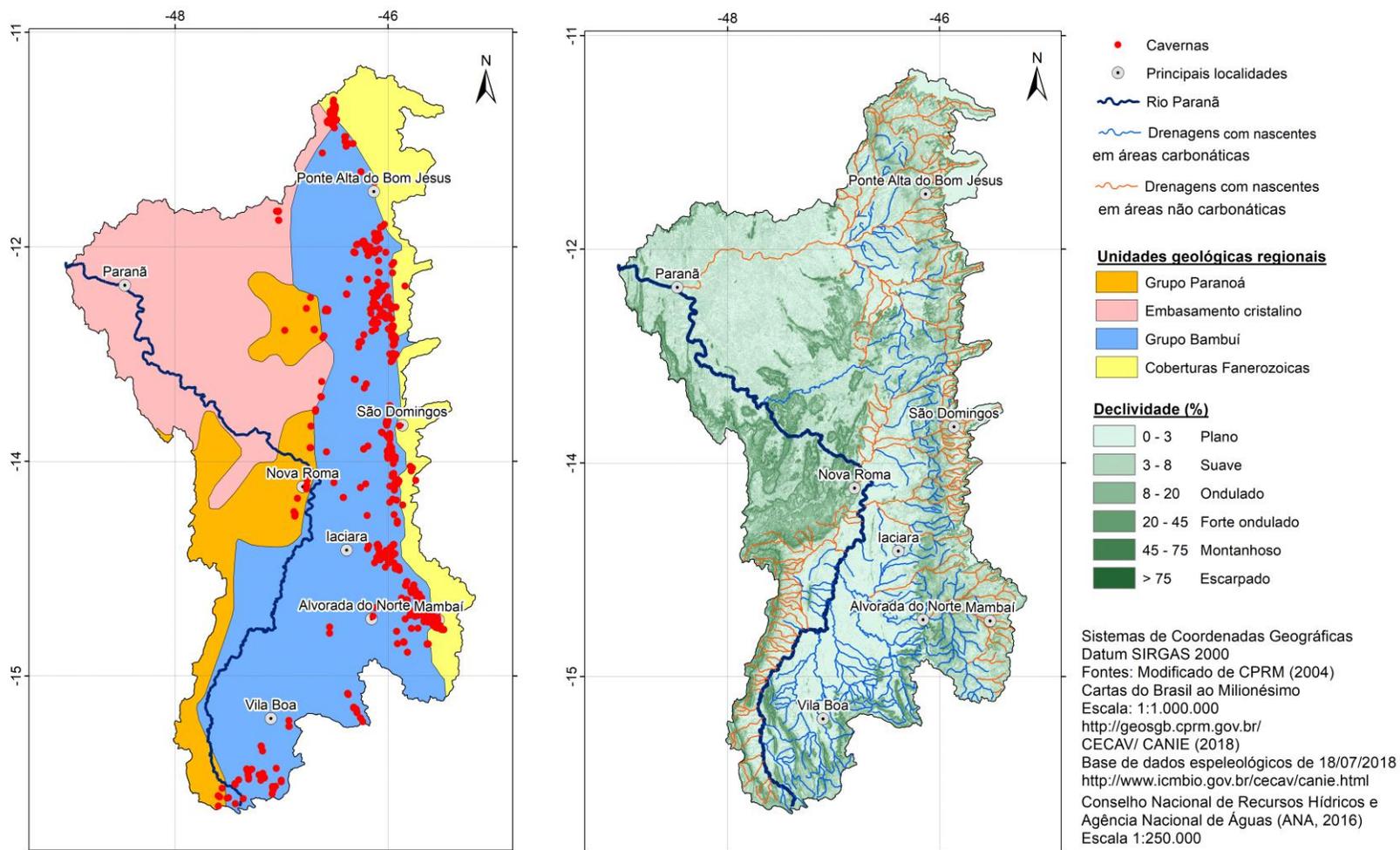


Figura 4.8: Drenagens associadas aos litotipos e declividade na bacia hidrográfica do rio Paraná

DENSIDADE DE CAVERNAS E DE DRENAGENS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARANÁ

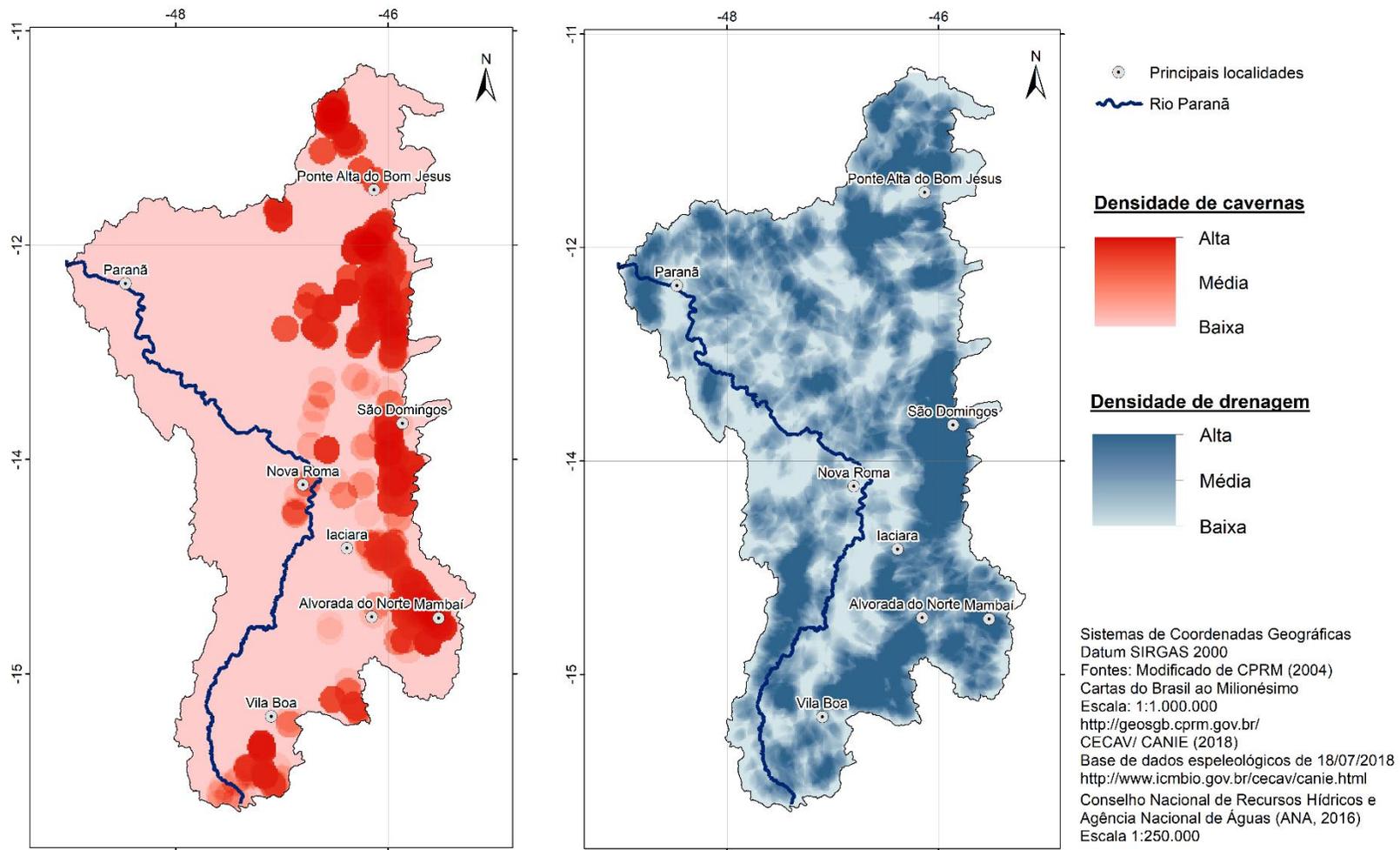


Figura 4.9: Densidade de cavernas e de drenagens na bacia hidrográfica do rio Paraná

4.4. Contexto geomorfológico na bacia hidrográfica do rio Paranã

As principais feições geomorfológicas existentes na área de estudo e seu entorno estão registradas na Figura 4.10 e serão citadas ao longo do trabalho. A bacia hidrográfica do rio Paranã possui algumas áreas pontuais entre 1000 e 1662m de altitude, que se localizam na parte W e S da bacia pesquisada. Essas áreas são sustentadas por rochas metapelíticas dos Grupos Paranoá e Araí, são montanhosas e escarpadas (Figura 4.11). Nesse contexto, destacam-se um conjunto de *canyons* do rio Paranã e seus afluentes situados no complexo da Chapada dos Veadeiros.

As áreas com cotas topográficas entre 750 e 1000 m de altitude bordejam a bacia hidrográfica do rio Paranã, possuem, majoritariamente, declividade entre 45 e 75% e apresentam topo plano e bordas escarpadas (Figura 4.11). As áreas com altitudes que variam de 600 a 750m se concentram, principalmente, na parte leste da bacia hidrográfica do rio Paranã, possui relevo ondulado e forte ondulado e apresentam as maiores concentrações de cavernas em rochas carbonáticas (Figura 4.11).

As áreas com altimetria entre 450 e 600m se localizam nos domínios do alto e médio curso do rio Paranã e incluem a parte SW e central da bacia hidrográfica homônima. Essa área possui relevo plano e suave ondulado, é marcado pontualmente por morros, maciços e mogotes (Figura 4.11). As áreas com índices topográficos que variam de 234 a 450m estão localizadas nas margens do médio e baixo curso do rio Paranã e na parte norte da bacia hidrográfica do rio Paranã. Essas áreas são planas, suave onduladas e não possuem cavernas cadastradas (Figura 4.11).

Em síntese, observa-se que a bacia hidrográfica do rio Paranã possui relevo regional predominantemente plano e suave ondulado (Figura 4.11), com alguns patamares e escarpas. As áreas planas, suave onduladas e com baixas altitudes foram modeladas em substratos com calcários, dolomitos, granitos e gnaisses. As áreas planas, suave onduladas e com altitudes elevadas são compostas por arenitos e, às vezes, sustentadas com crostas ferruginosas. Os patamares são as áreas mais declivosas entre o *front* de cuesta e as depressões. Além disso, essa localidade possui substrato predominantemente composto por calcários e dolomitos.

PRINCIPAIS FEIÇÕES GEOMORFOLÓGICAS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARANÁ

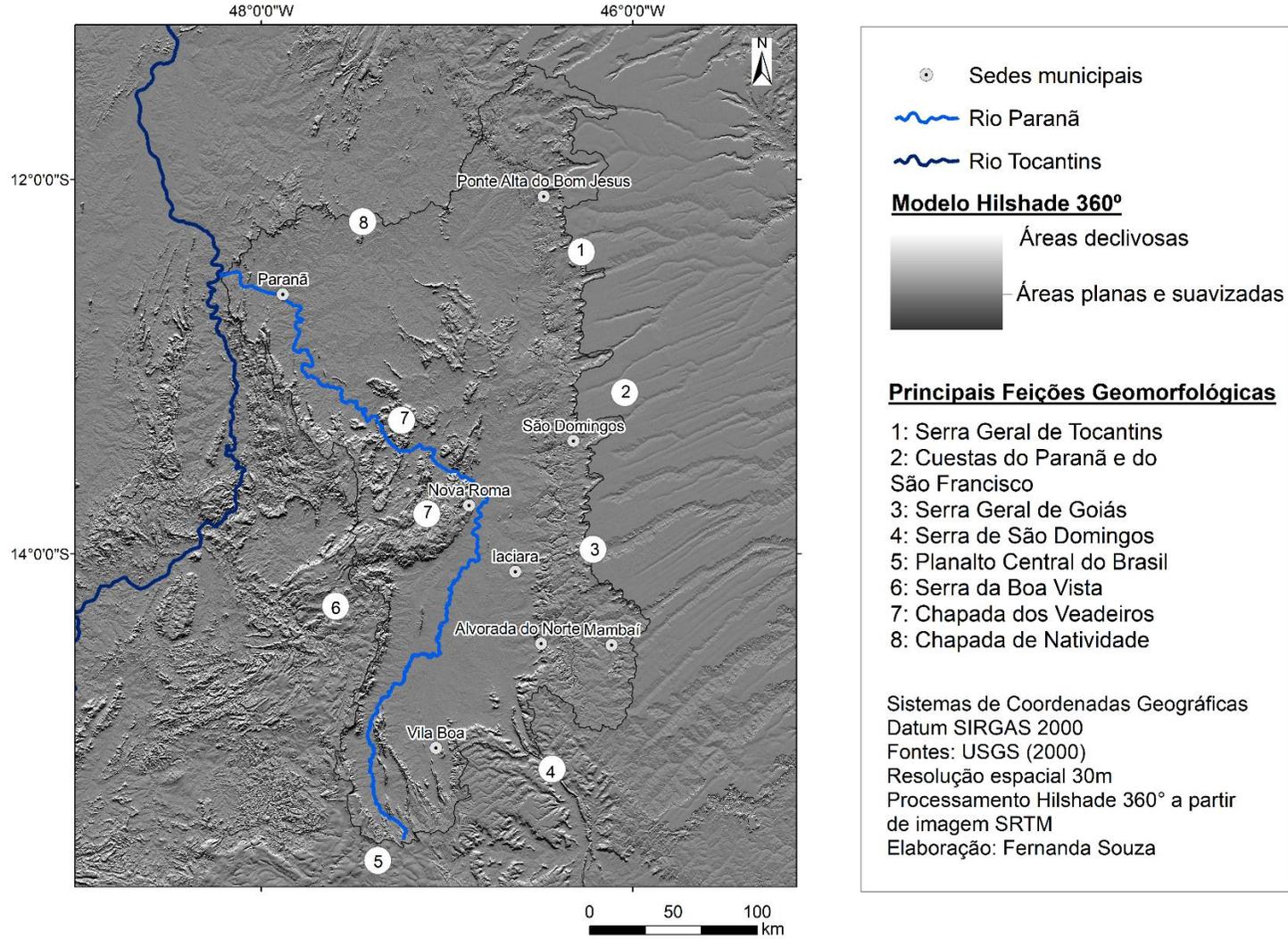


Figura 4.10: Principais feições geomorfológicas na bacia hidrográfica do rio Paranã

ALTIMETRIA E DECLIVIDADE NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARANÁ

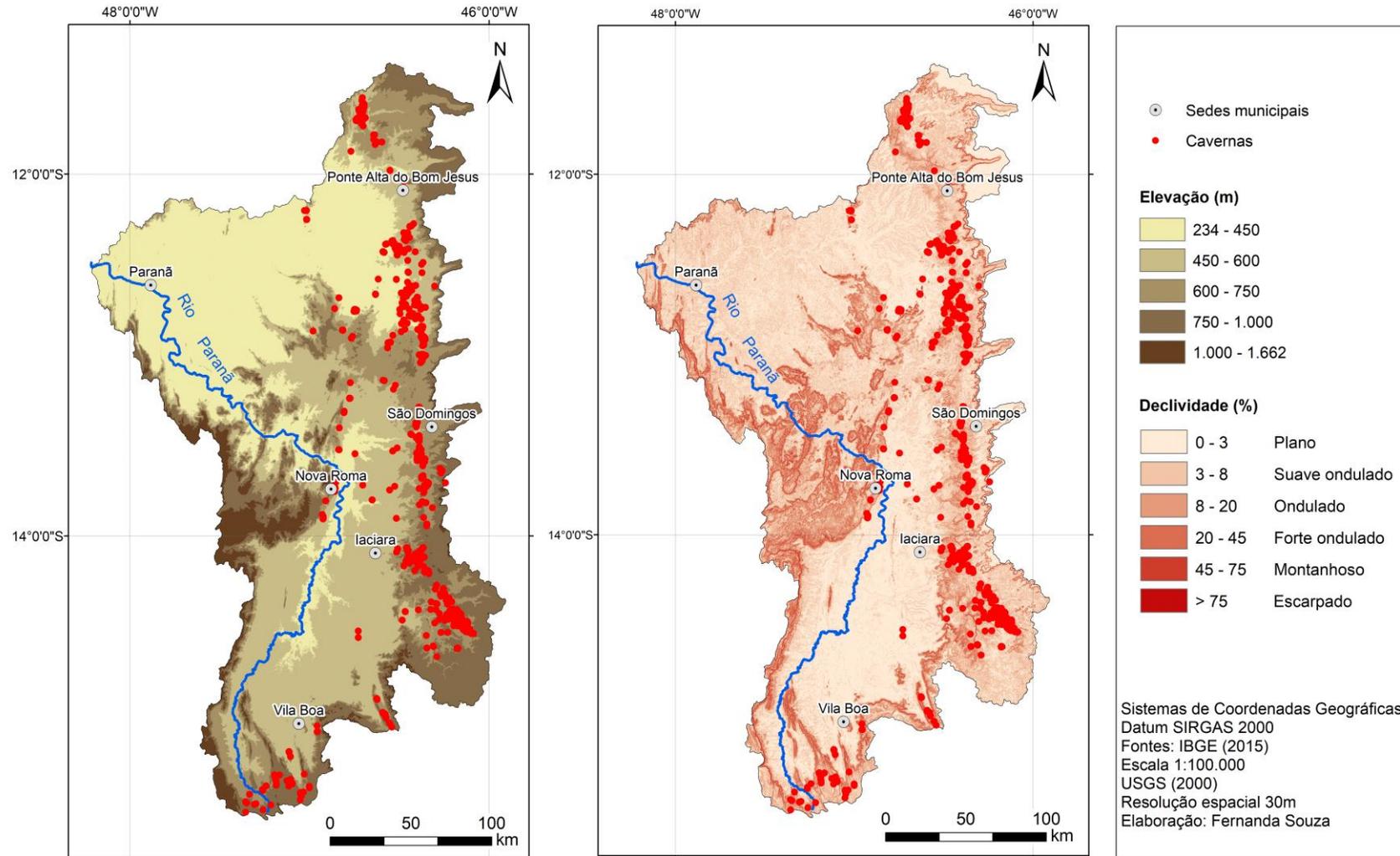


Figura 4.11: Altimetria e declividade na bacia hidrográfica do rio Paraná

Com base na interpretação de altimetria, declividade e na configuração geomorfológica, obtidas a partir de técnicas de geoprocessamento, foram mapeados na bacia hidrográfica do rio Paranã os seguintes compartimentos geomorfológicos regionais: 1) Planície do Médio rio Paranã; 2) Planície do rio Palma; 3) Depressão do Alto Médio rio Paranã; 4) Depressão do rio Palma e do Baixo rio Paranã; 5) Patamares do Paranã; 6) Planaltos do Paranã e 7) Morros, mogotes e *front* de cuesta (Figura 4.12).

As planícies se destacam, principalmente, no médio curso do rio Paranã e nas margens do rio Palma (Figura 4.12). A Planície do Médio rio Paranã possui formação associada à deposição de sedimentos fluviais, à existência de soleira litológica e geomorfológica, composta por quartzitos e metapelitos da Chapada dos Veadeiros. A Planície do Médio rio Paranã recebe contribuições sedimentares do rio Paranã e seus afluentes. Essa planície está localizada em área cujo substrato litológico é composto por rochas carbonáticas do Grupo Bambuí, recobertas por materiais pedológicos e sedimentares.

A Planície do rio Palma, afluente da margem direita do rio Paranã, é estreita e recebe influências de materiais sedimentares transportados pelos seus afluentes (Figura 4.12). Essa planície está localizada em áreas cuja base litológica é composta especialmente por carbonatos, granitos e gnaisses. A Figura 4.12 registra o vale, que pertence a um afluente do rio Paranã no contexto da Chapada dos Veadeiros e destaca as características hidrográficas do trecho do canal.

As depressões (Figura 4.13) são segmentadas pelos patamares e planaltos. A Depressão do Alto Médio rio Paranã é alongada no sentido NE-SW, circundada pelos planaltos e patamares do Paranã e limitada pela Chapada dos Veadeiros. Nessa área foram observadas feições doliniformes, conforme descrito por Souza *et al.* (2018). A Depressão do rio Palma e do Baixo rio Paranã possui direção preferencial E-W, circundada pelos planaltos e patamares do Paranã e se localiza a jusante da Chapada dos Veadeiros (Figura 4.12). Essa depressão possui influências, principalmente, dos processos exógenos exercidos pelo rio Palma e seus afluentes. Registra-se que a Depressão do rio Palma e do Baixo rio Paranã possuem cotas altimétricas inferiores (entre 234 e 450m) às existentes na Depressão do Alto Médio rio Paranã, cujas elevações médias são entre 450 e 600m de altitude (Figura 4.11). Esse fator está associado ao controle exercido pelos diferentes níveis de base, sendo, respectivamente, a Chapada dos Veadeiros e a foz do rio Paranã.

COMPARTIMENTOS GEOMORFOLÓGICOS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARANÁ

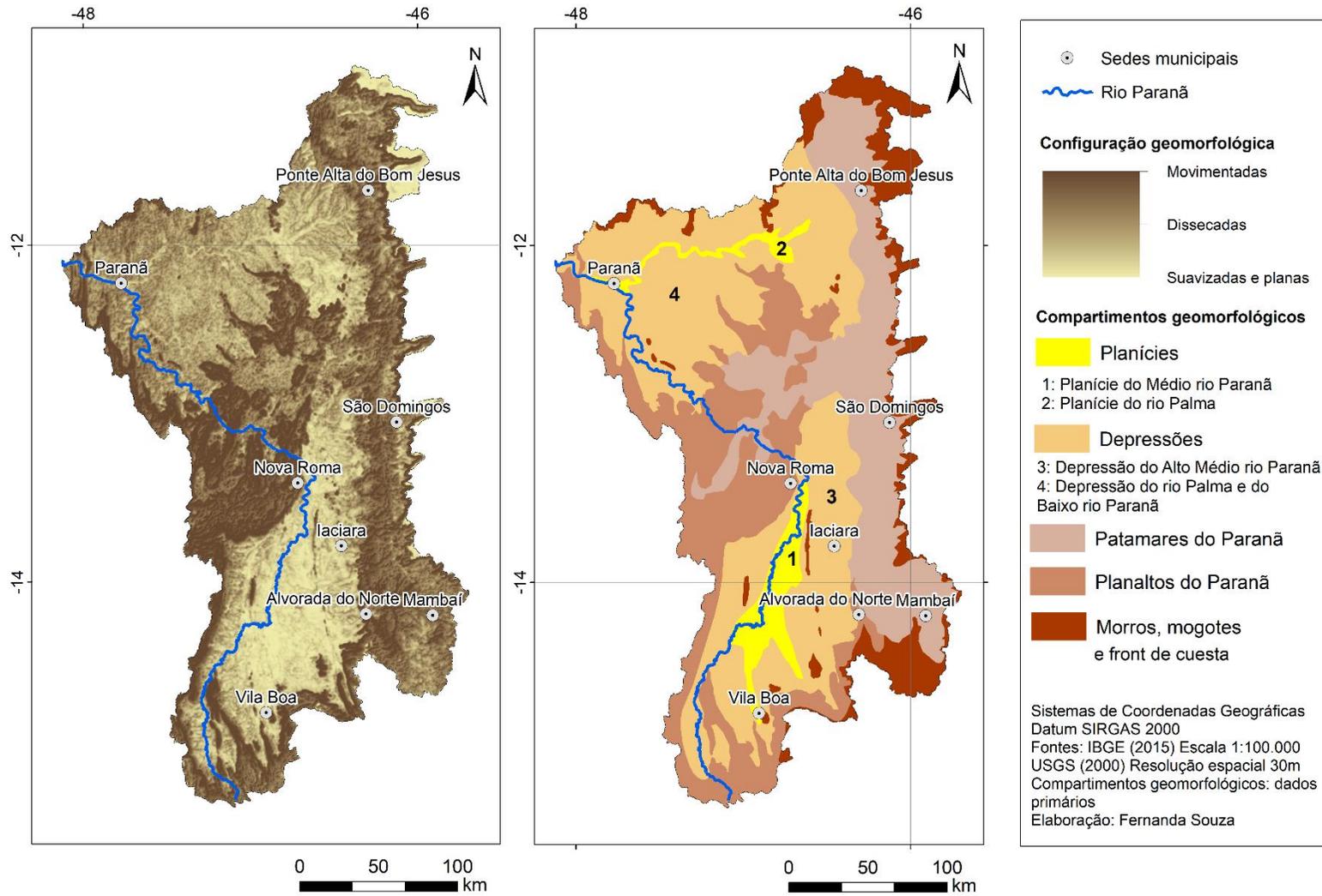


Figura 4.12: Compartimentos geomorfológicos na bacia hidrográfica do rio Paraná

Nas depressões, atualmente, há as menores concentrações de cavernas. Esse contexto geomorfológico é desfavorável à presença de cavernas, uma vez que predominam os processos deposicionais e supressão natural das cavernas outrora existentes. As depressões são popularmente conhecidas como Vão²⁸ do Paranã.

Os Patamares do Paranã (Figura 4.13) são unidades geomorfológicas com direção preferencial N-S, possuem as maiores declividades regionais e há majoritariamente rochas carbonáticas. Nos Patamares do Paranã estão localizados os maiores quantitativos de cavernas. Esse fator está associado à composição litológica e geomorfológica. Dessa forma, a litologia favorece os processos dissolutivos e a declividade contribui com o gradiente hidráulico, abertura das cavernas, aumento da vazão fluvial e carreamento dos materiais provenientes da dissolução. Nos domínios dos Patamares do Paranã são observados *canyons* e outras feições geomorfológicas associadas aos processos dissolutivos.

Os Planaltos do Paranã são compostos por partes do Planalto Central do Brasil e feições geomorfológicas denominadas localmente de Chapada dos Veadeiros. Esses planaltos estão localizados, principalmente, na parte oeste e sul da bacia hidrográfica do rio Paranã. Os Planaltos do Paranã marcam os limites geomorfológicos entre: a) bacia hidrográfica do rio Paranã e o rio Tocantins, no contexto oeste e b) bacia hidrográfica do rio Paranã e bacia hidrográfica do Urucuia, afluente do rio São Francisco.

Os Planaltos do Paranã (Figura 4.13) são feições geomorfológicas associadas a quartzitos, metapelitos, metarenitos, conglomerados, filitos e metassiltitos, principalmente do Grupo Paranoá, Formação Arraias (Grupo Araí) e Formação Traíras (Grupo Araí). Esses planaltos são marcados por estruturas geológicas que contribuíram para a formação de feição geomorfológica descontínua e escarpada. As transformações geológicas e geomorfológicas contribuíram para que o rio Paranã apresente morfologia paralela ao rio Tocantins, no qual desagua próximo da sede municipal de Paranã (Figura 4.13). Nesse compartimento geomorfológico se observam cavernas próximas às nascentes do rio Paranã e na margem leste da Chapada dos Veadeiros.

²⁸ A expressão Vão do Paranã é utilizada em outros estudos científicos, por exemplo, Pôssas e Cherem (2016); Moreira e Cherem (2018).

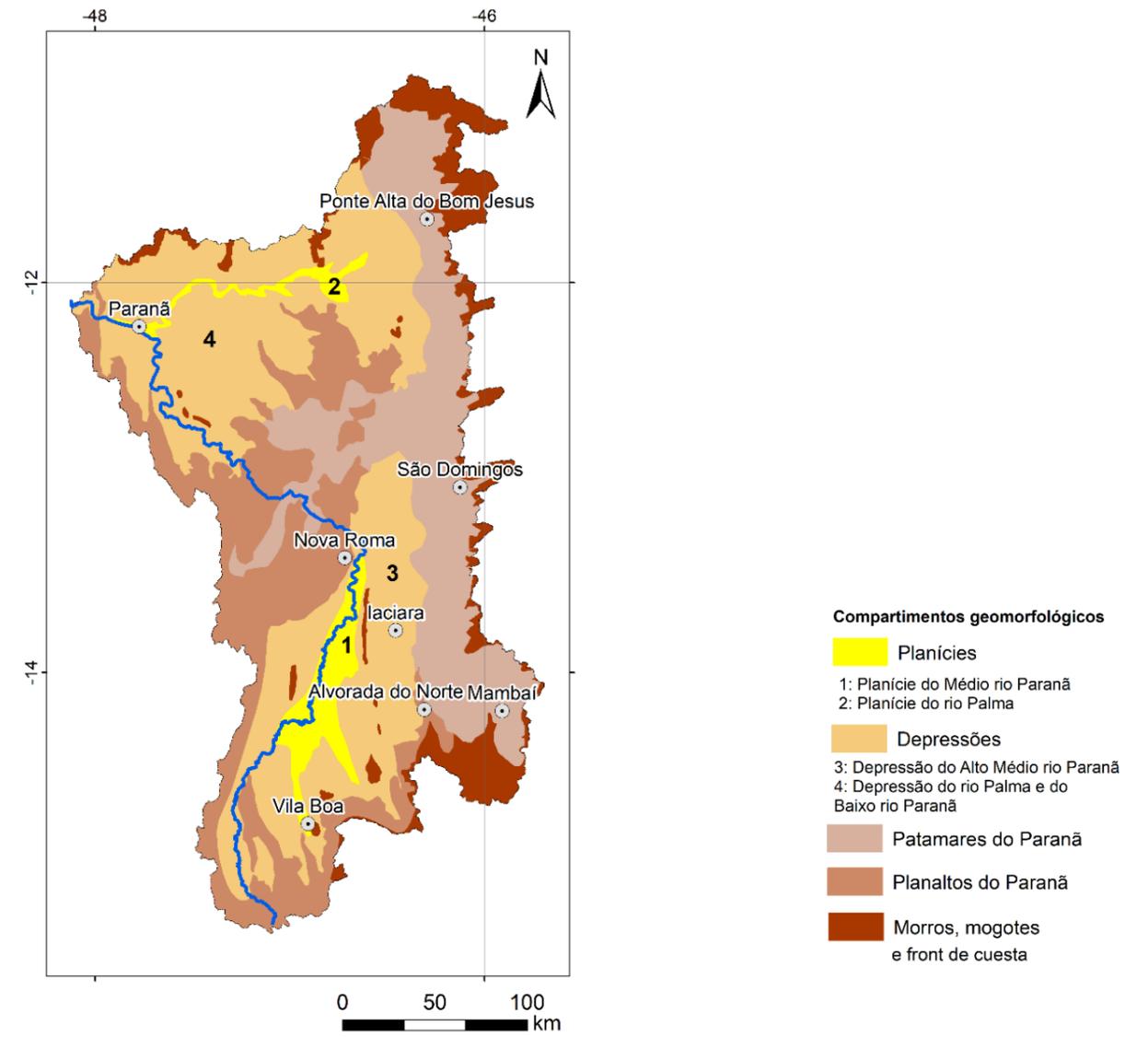
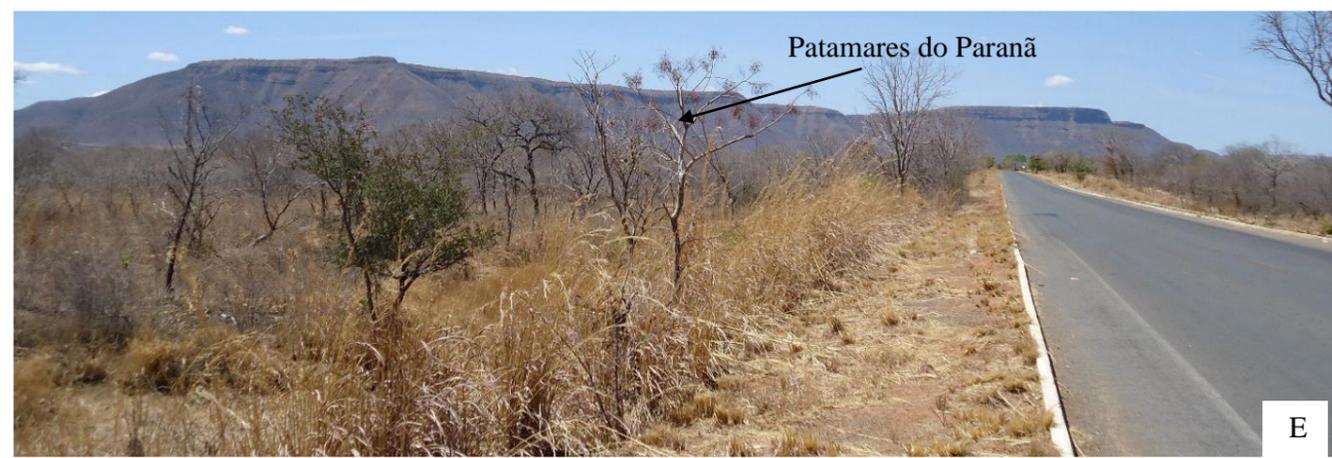


Figura 4.13: Compartimentos geomorfológicos na bacia hidrográfica do rio Paranã – depressões e patamares
Fotos: Fernanda C. R. de Souza

A Chapada dos Veadeiros (Figura 4.14) é uma unidade do Planalto do Paranã, caracterizada por extensões de relevos com altimetrias elevadas em relação ao seu entorno, porém entrecortadas por vales fluviais (DARDENNE; CAMPOS, 2002). A litologia dessa unidade geomorfológica é composta principalmente por quartzitos e metassiltitos dos Grupos Paranoá e Araí (DARDENNE; CAMPOS, 2002) e confere a morfologia de chapada suavemente ondulada. Essa morfologia é diferente das chapadas desenvolvidas em rochas sedimentares, que são predominantemente planas.



Figura 4.14: Rio Paranã a jusante da Chapada dos Veadeiros

Fotos: Fernanda C. R. de Souza

Os morros e mogotes são feições descontínuas, localizadas principalmente próximas aos limites leste e norte da bacia hidrográfica do rio Paranã. Destacam-se morros e mogotes pontualmente no interior das depressões (Figura 4.15). O *front* da cuesta (Serra Geral de Goiás e Tocantins) constitui o limite leste da bacia hidrográfica do rio Paranã e é formado, majoritariamente, por arenitos dos Grupos Areado e Urucuia. Devido ao contato entre arenitos e calcários e suas propriedades frente aos processos intempéricos, erosivos e dissolutivos, os morros possuem escarpas abruptas e topo plano ou suavemente inclinado.

A Figura 4.16 mostra a distribuição de cavernas nas unidades geomorfológicas da bacia hidrográfica do rio Paranã. Observa-se que a maioria (74,35%) das cavernas desenvolvidas em rochas carbonáticas se localiza nos patamares e o menor percentual (4,22%) se situa nas depressões.

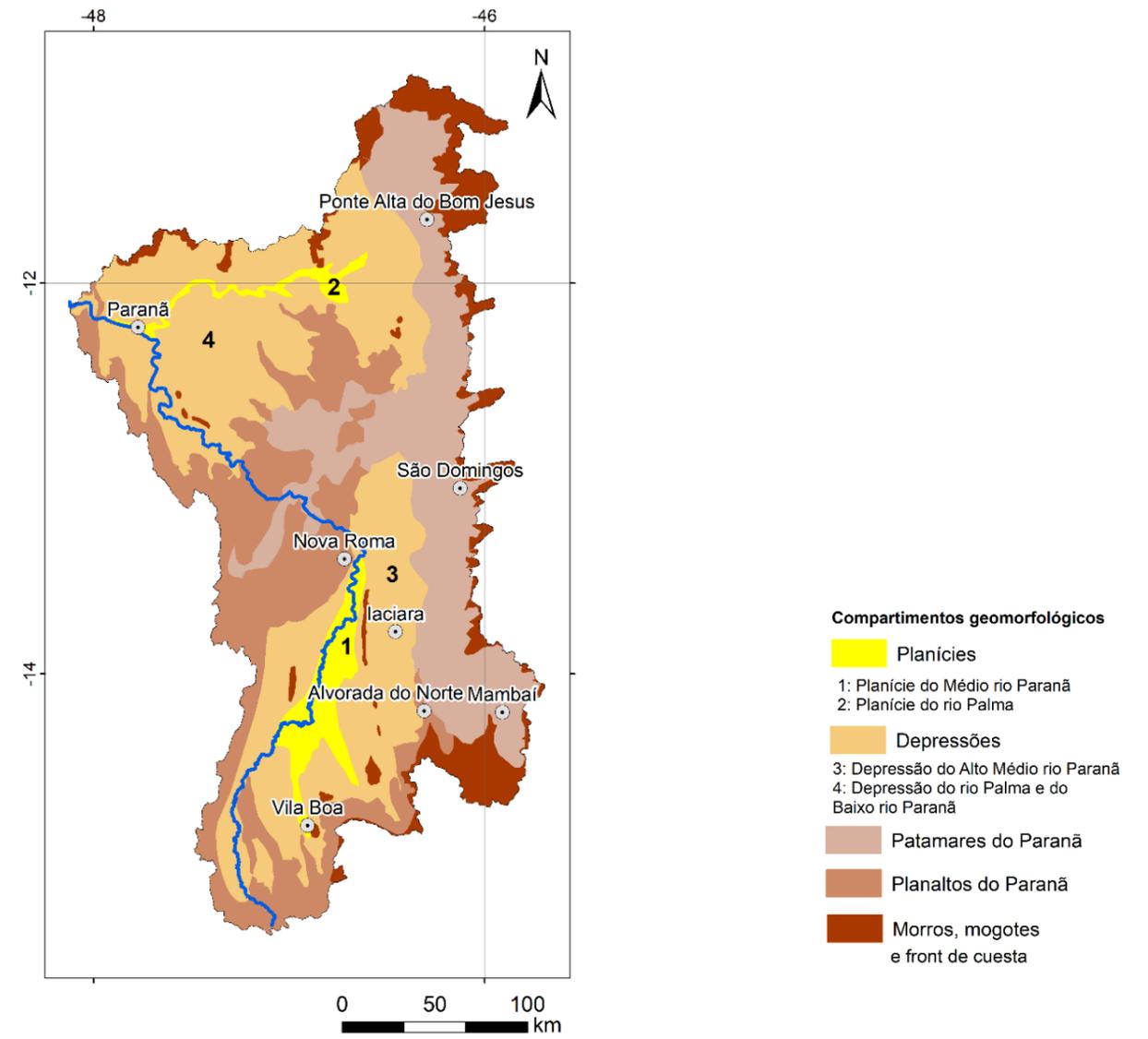
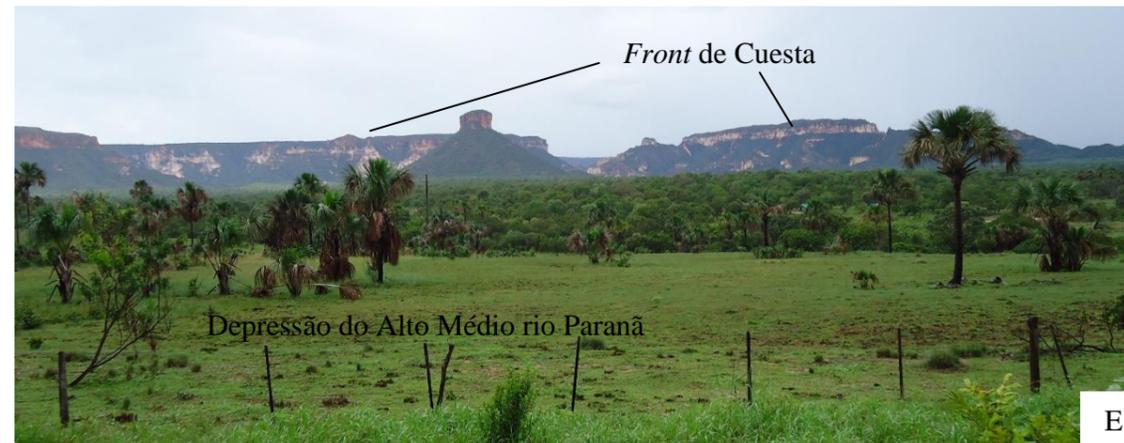


Figura 4.15: Compartimentos geomorfológicos na bacia hidrográfica do rio Paranã – planaltos e depressões
Fotos: Fernanda C. R. de Souza

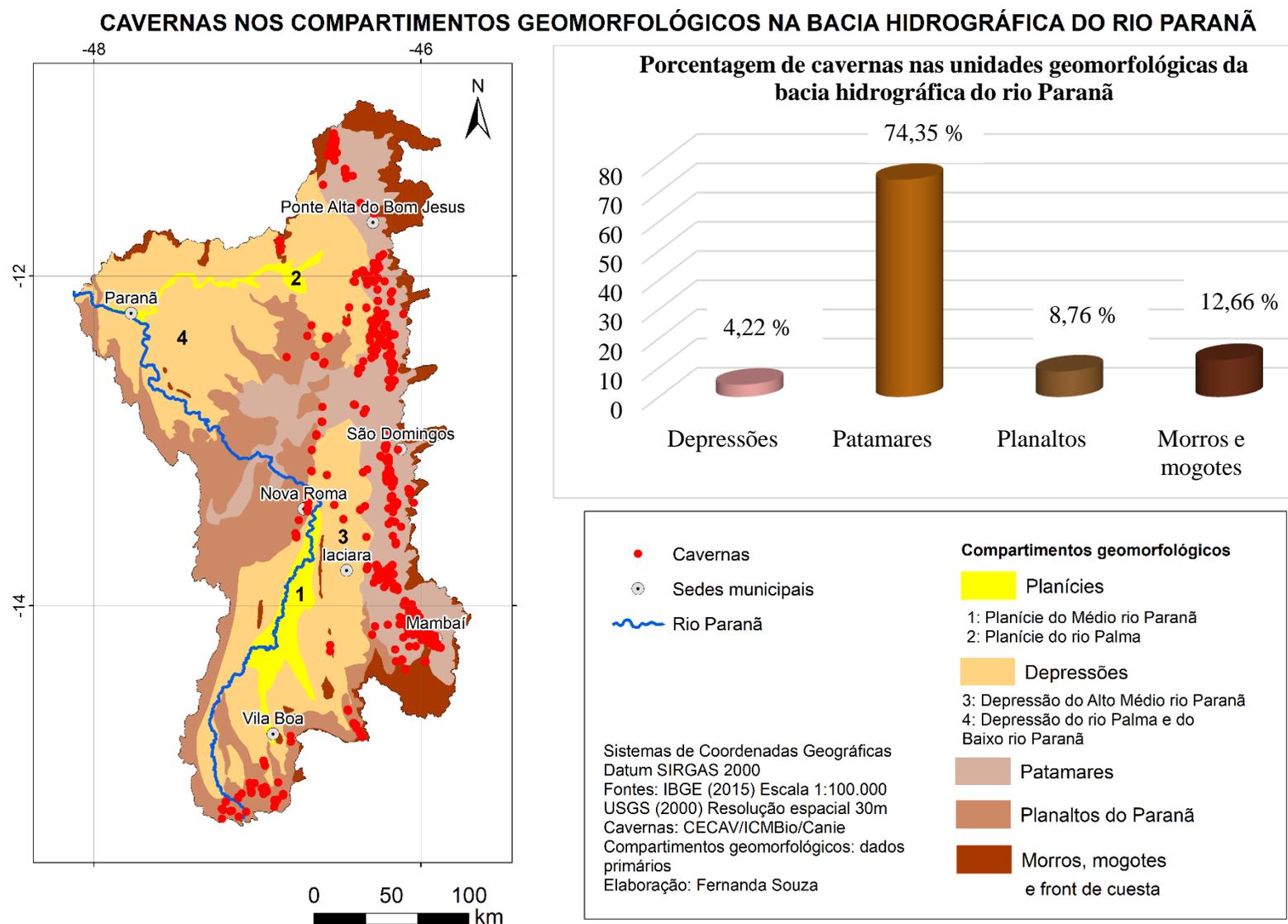


Figura 4.16: Cavernas desenvolvidas em rochas carbonáticas e sua distribuio nos compartimentos geomorfológicos na bacia hidrográfica do rio Paran

A topografia planimétrica da bacia hidrográfica do rio Paranã e seu entorno está representada na Figura 4.17, que também indica a localização dos perfis topográficos. A visualização bidimensional do relevo e dos compartimentos geomorfológicos mapeados (Figura 4.18) permite interpretações sobre a dinâmica geomorfológica regional, conforme descrito a seguir.

Observa-se que os divisores hidrográficos da margem oeste da bacia hidrográfica do rio Paranã entre as nascentes do rio principal (Figura 4.18, perfil A-B) e o complexo da Chapada dos Veadeiros (Figura 4.18, perfil C-D) são mais elevados que os divisores hidrográficos da margem leste desta bacia. Esse fator está associado aos eventos epirogênicos que configuraram a margem oeste, enquanto a borda leste dessa bacia está na área cratônica e bacia sedimentar do São Francisco.

As áreas do *front de cuesta* na margem leste da bacia hidrográfica do rio Paranã possuem as maiores altitudes no segmento de médio curso fluvial se comparados com o baixo curso do rio Paranã (Figuras 4.17 e 4.18). Esse fator está relacionado à: 1) migração lateral do rio Paranã e 2) diversidade litológica.

A migração lateral do rio Paranã ocorreu em função das diferentes propriedades litológicas e suas características frente aos processos dissolutivos e erosivos. As diferenças de composições litológicas dinamizam os processos geomorfológicos. Dessa forma, a predominância de rochas sedimentares (carbonáticas e siliciclásticas) na parte central e leste da atual bacia hidrográfica do rio Paranã contribuíram para que o intemperismo, dissolução, erosão, infiltração hídrica e o contato entre a hidrologia superficial e subterrânea. Assim, o rio Paranã realizou o seu trabalho controlado, em parte, pela soleira litológica metamórfica. Com isso, os afluentes da margem leste do rio Paranã recebem as influências do contexto litológico sedimentar. Esse fator permite que esses afluentes se dinamizem com a migração do rio Paranã, que é o nível de base desses afluentes.

Com a migração do rio Paranã, os seus afluentes ganham energia e aumentam os potenciais erosivos e dissolutivos. Essa dissolução e dissecação resultam na formação dos relevos que, atualmente, configuram-se como morros e mogotes. Silva (2018) estuda a morfogênese do relevo no divisor hidrográfico das bacias dos rios São Francisco e Paranã (Tocantins). A autora consta que a incisão fluvial dos afluentes do rio Paranã é superior àquela realizada pelos afluentes do rio São Francisco.

ORIENTAÇÃO DE PERFIS TOPOGRÁFICOS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARANÁ

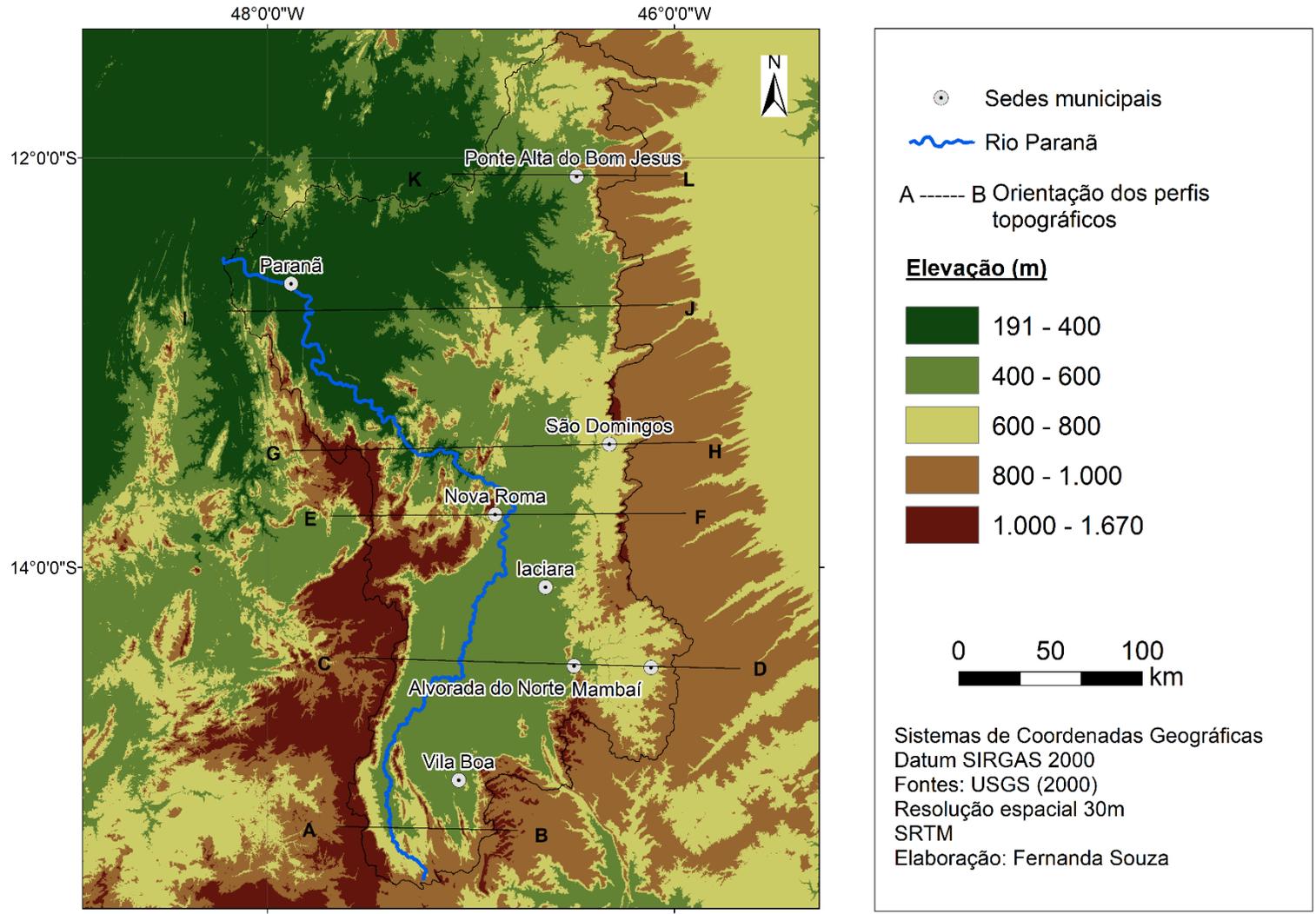
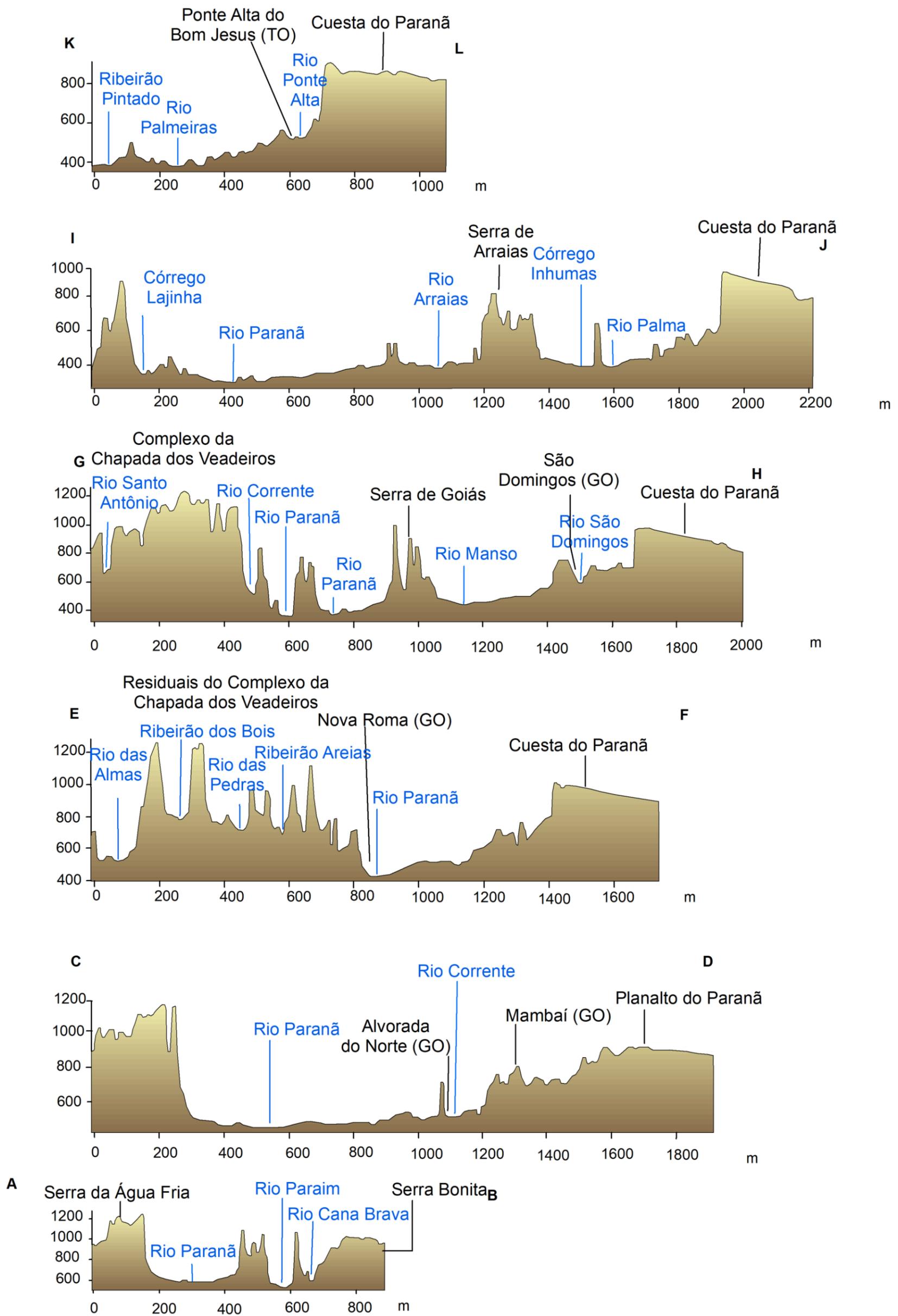


Figura 4.17: Orientações de perfis topográficos com a elevação do terreno na bacia hidrográfica do rio Paranã

Considerando que a assimetria de bacia se estende de norte a sul da área de estudo, as diferenças de altitudes dos morros no médio e baixo segmento da bacia hidrográfica estão associadas às dinâmicas fluviais e à litologia. No baixo curso do rio Paranã o nível de base é a sua foz e, portanto, ela controla os afluentes do baixo curso, bem como possibilita o avanço da erosão e dissolução. Assim, as áreas do baixo curso do rio Paranã que possuíam cotas altimétricas semelhantes àquelas do médio curso fluvial foram erodidas e atualmente inexistem na paisagem. A litologia do baixo curso do rio Paranã é composta por granitos, gnaisses, paragnaisses, calcários, dolomitos e arenitos. Esse conjunto de rochas, devido à composição química e física ou ao tempo de intemperismo e transformações, facilitam a dissolução, erosão, transporte e deposição de materiais. Esses fatores contribuíram com o recuo das vertentes e suavização do relevo.

Os Patamares do Paranã existem atualmente apenas na parte leste da bacia hidrográfica do rio Paranã ao longo de todo o eixo N-S dessa borda da bacia e próximo aos planaltos da Chapada dos Veadeiros (Figuras 4.18). Assim, os patamares são mais extensos na parte oriental da bacia devido à migração do rio Paranã e ao recuo lateral das vertentes. Dessa forma, com a migração do rio Paranã de E para W, ele abandonou níveis erosivos e deposicionais na parte leste, condicionou a reorganização dos afluentes e erodiu patamares na parte oeste da bacia. Os patamares da parte ocidental da bacia hidrográfica quando existentes eram mais estreitos que os patamares orientais devido, entre outros fatores, às escarpas dos planaltos e cuestas. Essas escarpas se vinculam ao intemperismo e processos geomorfológicos atuantes em rochas metamórficas. Afinal, os processos erosivos são mais lentos nas rochas metamórficas que nas sedimentares. Os Patamares do Paranã representam uma superfície ondulada com a presença de drenagens de primeira e segunda ordem.

O rio Paranã possui depressão em seu alto curso com aproximadamente 450m de largura (Figura 4.18, perfil A-B). A Depressão do Alto Médio rio Paranã atingem, aproximadamente, 900m de largura (Figura 4.18, perfil C-D) e se estreita próximo à Nova Roma (GO), onde possui, em média, 300m de largura (Figura 4.18, perfil E-F). Nas proximidades de São Domingos (GO), a quantidade de morros e mogotes aumenta e a Depressão do Alto Médio rio Paranã se estende por 850m de largura em média (Figura 4.18, perfil G-H). A Depressão do rio Palma e do Baixo rio Paranã possui extensões que variam de 1600m (Figura 4.18, perfil I-J) a 400m (Figura 4.18, perfil K-L).



Fonte: Elaborado a partir de SRTM (30m)

Figura 4.18: Perfis topográficos na bacia hidrográfica do rio Paraná

Destaca-se a quantidade, extensão e altitude dos morros que marcam o divisor hidrográfico na parte norte da bacia fluvial (Figura 4.17), como, por exemplo, a Chapada de Natividade. Esses morros e chapadas indicam reorganização na hierarquia fluvial, assim como na configuração geomorfológica no segmento da baixa bacia hidrográfica do rio Paranã e seu entorno. Alguns perfis geomorfológicos nessa região são apresentados por Cherem e Varajão (2014) e complementam as informações contidas nesta tese.

Assim, o entorno da bacia hidrográfica do rio Paranã requer estudos aprofundados, mas indicam que se tratava de uma superfície contínua que foi segmentada pelo rio Paranã e seus afluentes. Os perfis topográficos com as feições geomorfológicas locais, as principais drenagens e o entorno (Figura 4.18) demonstram:

- a) as dimensões de áreas arrasadas pelo rio Paranã (Figura 4.18, perfis C-D e I-J);
- b) os *canyons* no complexo da Chapada dos Veadeiros (Figura 4.18, perfil E-F);
- c) a morfologia de *cuestas* na borda leste da bacia hidrográfica (Figura 4.18, perfis E-F, G-H, I-J, K-L);
- d) a quantidade de afluentes do rio Paranã, especialmente nas áreas declivosas. Afinal, esses afluentes contribuem para a geomorfologia cárstica local.

Observações em trabalhos de campo, dados cartográficos e de geoprocessamento indicam que os processos evolutivos do relevo geral na bacia hidrográfica do rio Paranã são marcados pelas seguintes etapas (Figura 4.19):

- a) superfície contínua;
- b) incisão do rio Paranã controlado pelas litologias e estruturas geológicas locais;
- c) formação de patamares;
- d) expansão lateral e alargamento dos vales fluviais, associados aos processos intempéricos, erosivos e dissolutivos. Assim, a abertura das cavernas está associada a esses processos;
- e) o surgimento das depressões e de novos patamares condiciona transformações na paisagem, como rebaixamento, suavização do relevo, aumento da declividade, do potencial erosivo e da sedimentação;
- f) expansão das depressões, redução dos patamares e surgimento de maciços e mogotes isolados na paisagem.

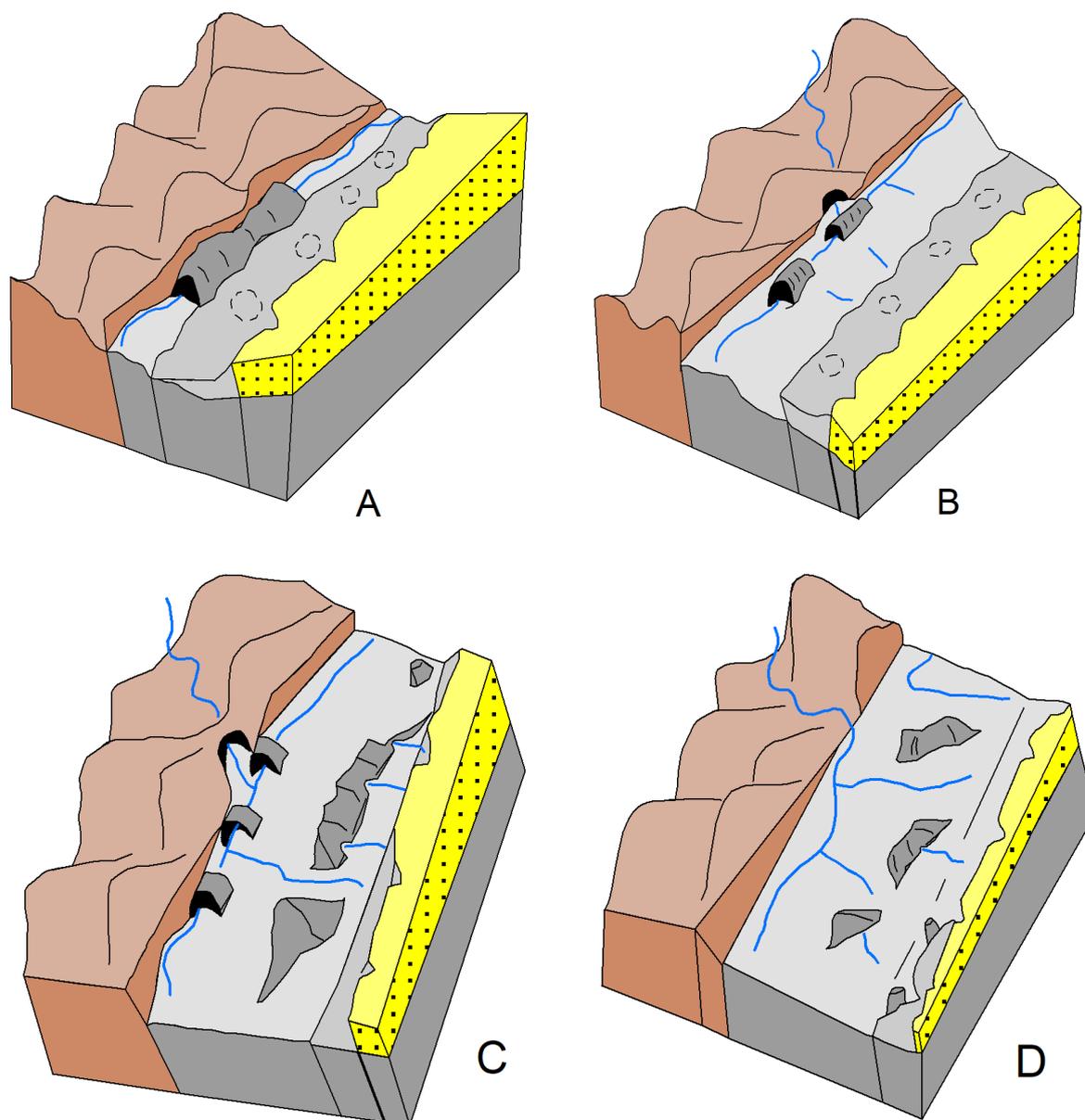


Figura 4.19: Principais etapas evolutivas no relevo da bacia hidrográfica do rio Paran. A: Instalao das principais redes de drenagem, depressão estreita, presença de dolinas e cavernas. B: Supressão natural de segmentos de cavernas, expansão das depressões, reduo das áreas de patamares e planaltos. C: Supressão natural de segmentos de cavernas, expansão das depressões, reduo das áreas de patamares e planaltos, reorganizao da rede de drenagem, formao de maciços. D: Reorganizao da rede de drenagem, reduo de maciços e sumidouros, formao de mogotes, aplainamento do relevo.

A partir do estudo realizado, o Quadro 4.1 sintetiza os principais elementos geológicos e geomorfológicos associados  distribuio das cavernas desenvolvidas em rochas carbonáticas na bacia hidrográfica do rio Paran.

Quadro 4.1:

Elementos geológicos e geomorfológicos preferenciais para distribuição das cavernas desenvolvidas em rochas carbonáticas na bacia hidrográfica do rio Paranã

Elementos geológicos preferenciais	Borda do Cráton do São Francisco
	<p>Calcários, siltitos, margas e argilitos</p> <p>- <i>Grupo Bambuí</i></p> <p><i>Formação Lagoa do Jacaré</i></p>
Elementos geomorfológicos preferenciais	<p>Estruturas geológicas, preferencialmente com direções NW-SE e N-S.</p> <p><i>Nessa escala de estudo, constata-se que as cavernas se desenvolvem em áreas com falhas, dobras e fraturas. Não há considerações sobre as contribuições estruturais na determinação do padrão planimétrico das cavernas.</i></p>
	<p>Patamares</p> <p>- <i>Patamares do Tocantins</i></p> <p><i>Patamares do Paranã</i></p>
	<p>Áreas com altimetrias intermediárias</p> <p>- <i>650 a 850m de altitude, predominantemente. Em geral, os patamares possuem essa altitude na área de estudo.</i></p>
	<p>Áreas de relevo ondulado ou forte ondulado, ou seja, com declividades entre 8 e 45%.</p> <p>- <i>Os relevos declivosos correspondem geralmente às áreas de patamares.</i></p> <p><i>Surgimento do front de cuesta, pois ele interfere na reorganização da rede de drenagem e dissolução das rochas carbonáticas.</i></p>

Os estudos de geomorfologia regional podem ser realizados para aprofundamento analítico e investigação das etapas de transformações do relevo. Com base na interpretação da evolução geomorfológica regional e nos princípios de evolução geomorfológica cárstica, analisa-se a Lapa São Vicente I e os processos associados ao seu desenvolvimento.

CAPÍTULO 5: CARACTERÍSTICAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO VICENTE E FATORES ASSOCIADOS AO DESENVOLVIMENTO DA LAPA SÃO VICENTE I

A Lapa São Vicente I se localiza na região cárstica ou província espeleológica Bambuí. Essa região cárstica é caracterizada como uma das maiores unidades em rochas carbonáticas no Brasil e é composta pelas litologias do grupo geológico homônimo (KARMANN; SANCHEZ, 1979; PINTO, 1984). As explorações, descobertas e mapeamentos do ambiente subterrâneo na região de São Domingos avançaram a partir da década de 1970 (BERTONI, 2001).

A Lapa São Vicente I está situada no município de São Domingos (GO), possui 10.130m de projeção horizontal, 140m de desnível e é drenada pelo rio São Vicente (BERTONI, 2001), afluente do rio São Domingos. Essas informações espeleométricas demonstram que a Lapa São Vicente I apresenta dimensões notáveis em termos de extensão e desnível. A Lapa São Vicente I está inserida no alto curso do rio São Vicente (Figura 5.1). Essa caverna contém três entradas, várias cachoeiras e corredeiras (BERTONI, 2001).

O rio São Vicente possui vazão de $5\text{m}^3/\text{s}$ na estação seca, é caudaloso e drena 9 km da Lapa São Vicente I (BERTONI, 2001). Essa drenagem possui nascentes na Serra Geral de Goiás, abre *canyons* e outros vales, atravessa maciços carbonáticos, deposita sedimentos e dinamiza o relevo. Esse rio possui orientação principal E-W, sendo predominantemente paralelo ao rio São Domingos (Figura 5.2).

Registra-se que a morfologia planimétrica fluvial possui padrões diferenciados à montante e à jusante da Serra do Calcário. A Serra do Calcário se trata de um conjunto de maciços carbonáticos de alinhamento geral N-S, escavado e segmentado pela dinâmica fluvial e fluvio-cárstica. Nesse maciço há um conjunto de cavernas, entre elas a Lapa São Vicente I.

A montante da Serra do Calcário o rio São Vicente e seus principais afluentes possuem padrão paralelo e são controlados: a) pela Serra do Calcário; b) pelos sumidouros e c) pelas cavernas. Além disso, neste contexto, as drenagens são marcadas por maior incisão que à jusante dessa serra. Os afluentes do rio São Vicente situados à jusante da Serra do Calcário, possuem padrão dendrítico, drenam as áreas superficiais ou exocársticas e são controlados pelo rio São Domingos (Figura 5.2). A morfologia planimétrica do rio São Vicente será interpretada ao longo da análise do contexto de inserção da Lapa São Vicente I paisagem.

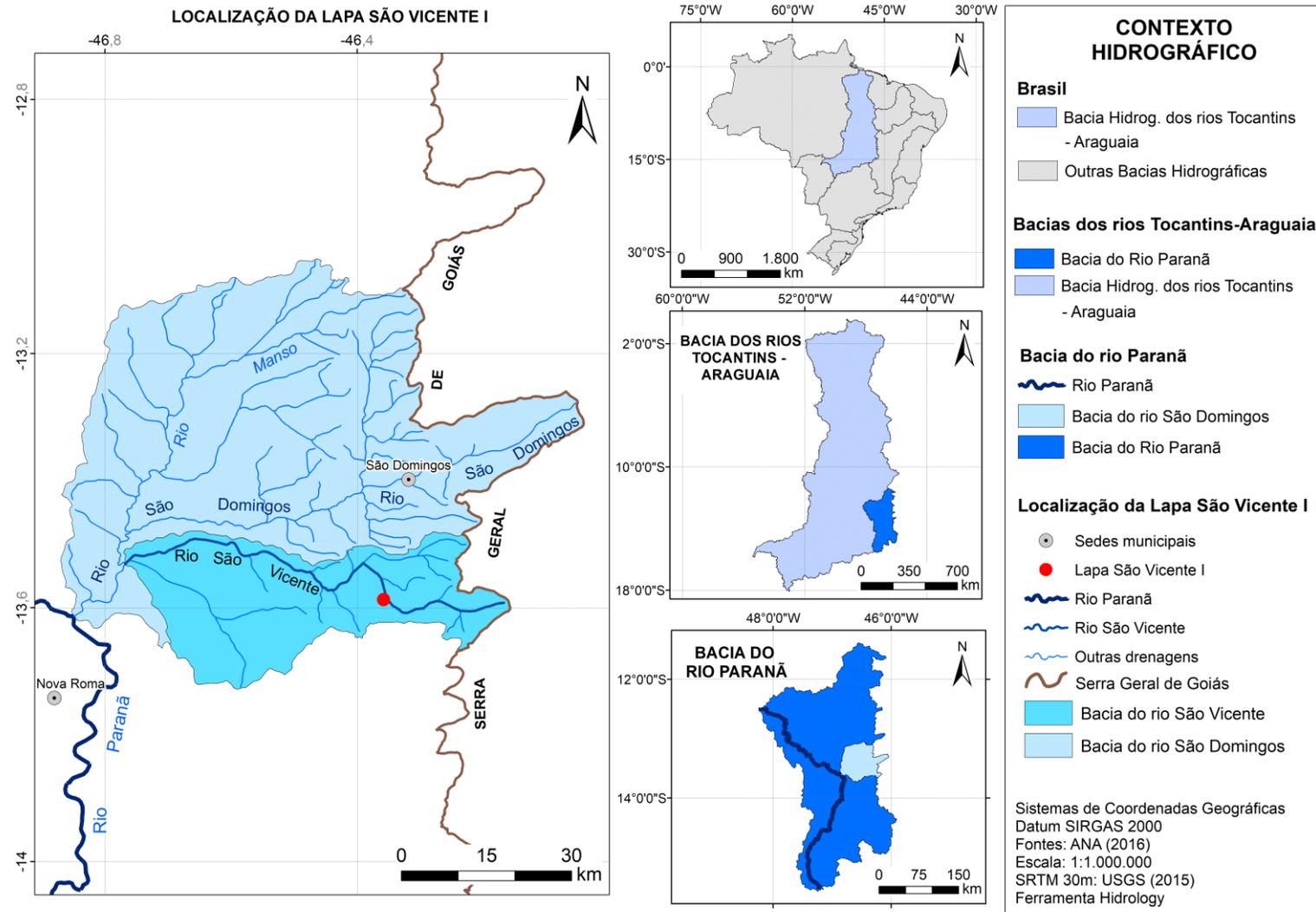


Figura 5.1: Contexto hidrográfico de localização da Lapa São Vicente I

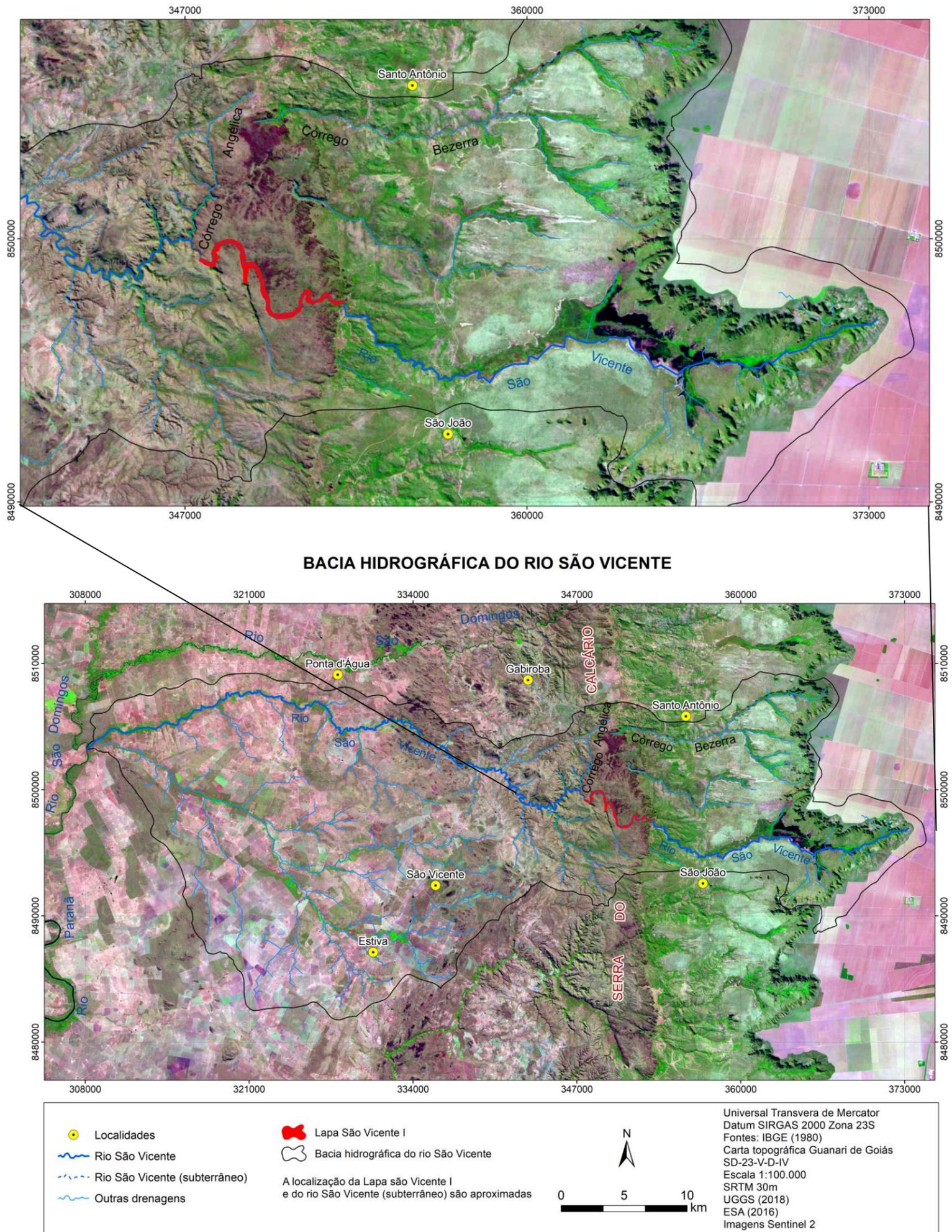


Figura 5.2: Bacia hidrográfica do rio São Vicente

A planta baixa da Lapa São Vicente I registra que essa caverna possui padrão dentrítico com passagens curvilíneas (Figura 5.5), conforme classificação de Palmer (1991). Esse tipo de padrão morfológico demonstra a presença de sumidouro, recarga com depressão cárstica e descarga limitada e pontual (PALMER, 2009). Além disso, o escoamento hidrogeológico que implica em maiores contribuições para esse tipo de padrão planimétrico são as percolações via porosidade dos acamamentos da rocha (PALMER, 1991).

Na região da pesquisa, os calcários do Grupo Bambuí possuem acamamentos plano paralelos. Nas proximidades de Mambaí (GO), verifica-se, em algumas localidades, a intercalação entre rochas carbonáticas e pelíticas (Figura 5.3 e 5.4). Assim, a friabilidade, solubilidade e acamamento dos carbonatos na Serra do Calcário contribuem para o desenvolvimento planimétrico dessa caverna.

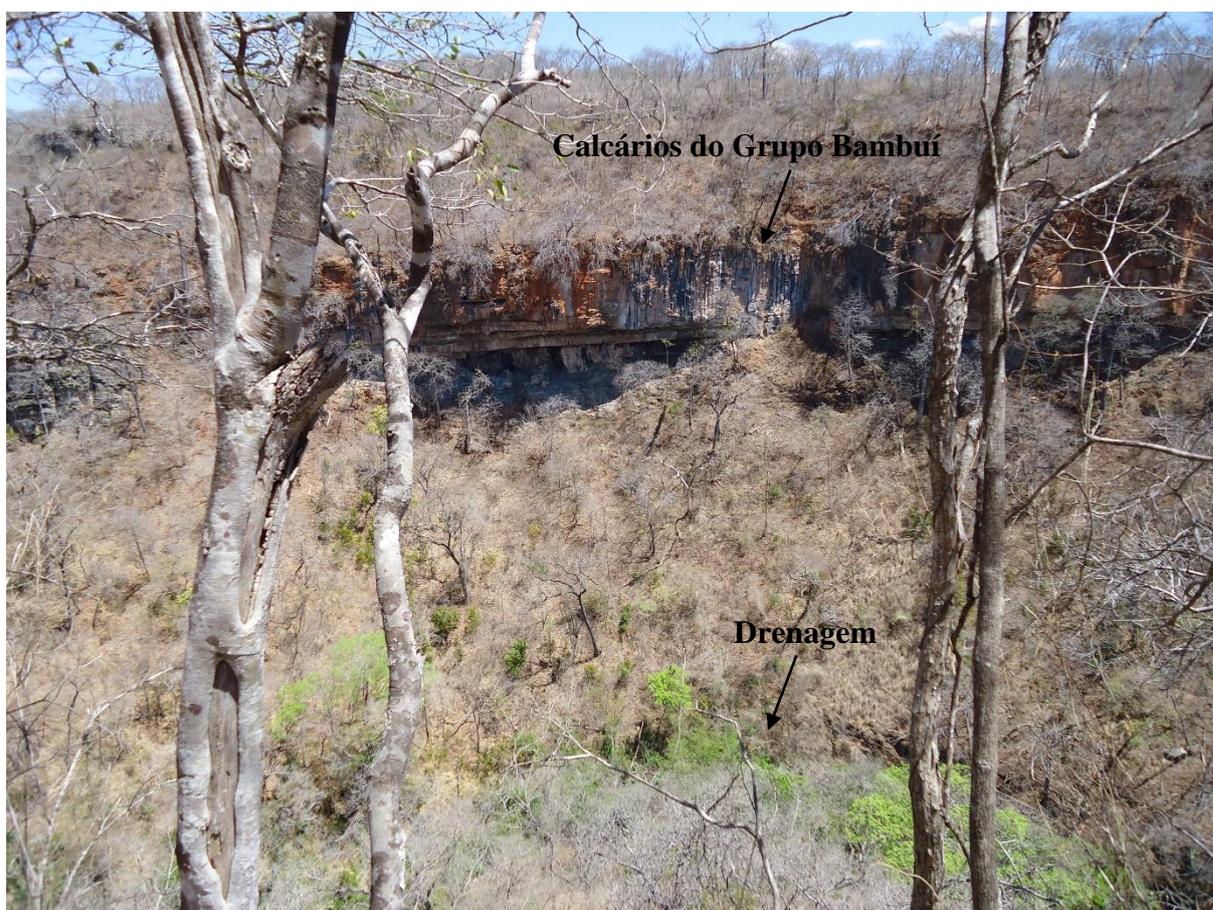


Figura 5.3: Características dos calcários do Grupo Bambuí na região estudada

Foto: Fernanda Souza



Figura 5.4: Características de acamamento das rochas do Grupo Bambuí na região estudada
Foto: Fernanda Souza

Além disso, o padrão planimétrico dendrítico registra a contribuição majoritariamente hidrológica no desenvolvimento da caverna (PALMER, 2009). As contribuições hidrológicas são do rio São Vicente e do rio Passa Três. A Lapa São Vicente I possui um conduto principal, alguns condutos secundários de pequenas dimensões (Figura 5.6). O conduto principal é drenado pelo rio São Vicente e os condutos secundários se localizam em patamares superiores e não possuem drenagens ativas.

Os cortes transversais da Lapa São Vicente I mostram a presença de condutos circulares ou semicirculares (Figura 5.6 perfis G-G', N-N', O-O', Q-Q', R-R', S-S') e elípticas (Figura 5.6 perfis E-E', J-J', K-K', V-V'). Essa característica demonstra predominância de atividade fluvial com zona freática.

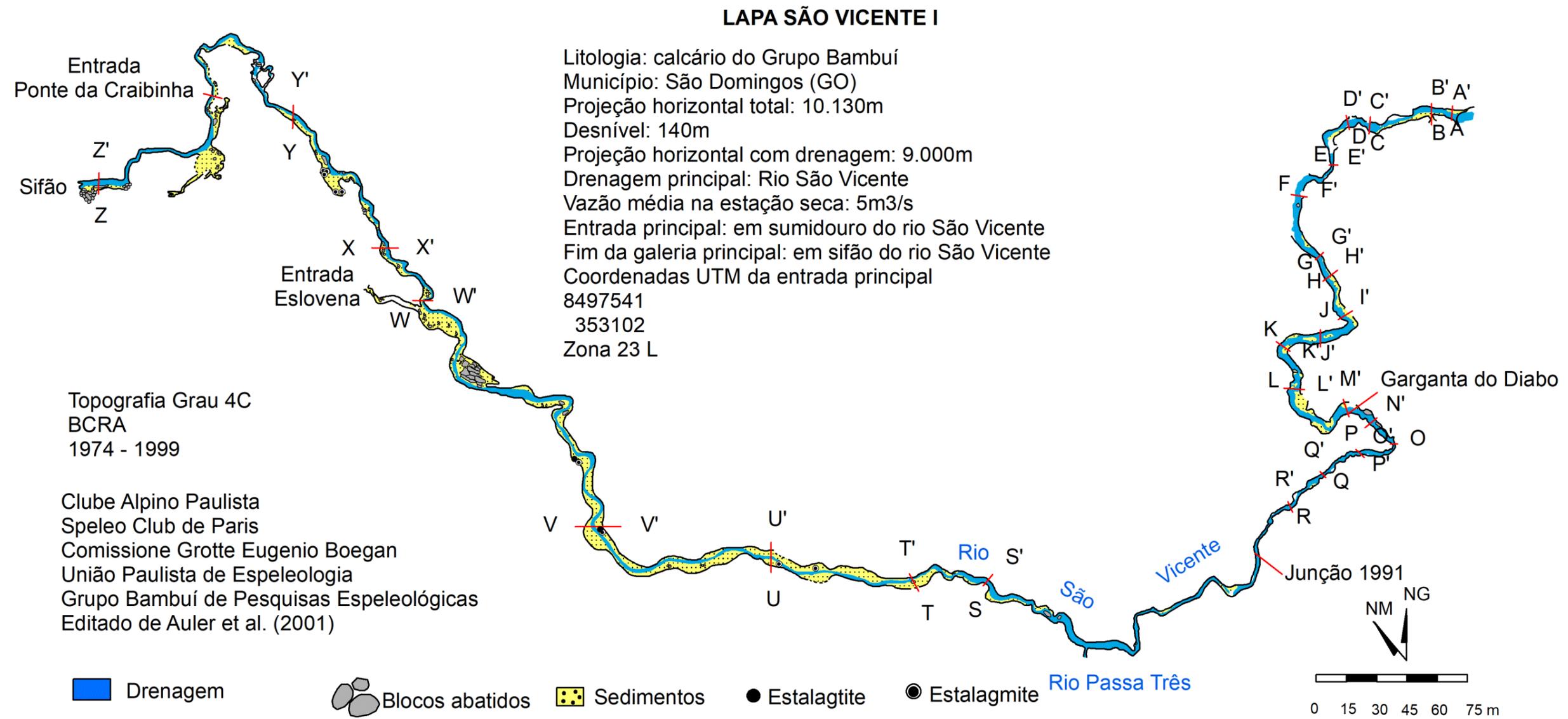


Figura 5.5: Planta baixa da Lapa São Vicente I

Fonte: Modificado de Auler *et al.* (2005)



Figura 5.6: Cortes transversais da Lapa São Vicente I

Fonte: modificado de Auler *et al.* (2005)

A Figura 5.7 mostra as características morfológicas da Lapa São Vicente I na estação seca. Verifica-se a atividade hidrológica (Figura 5.7 A, B, C e D), corredeiras (Figura 5.7 A, B, C), conjuntos de espeleotemas de várias colorações e tipologias, que incluem estalagmites, estalagmites, colinas e escorrimentos (Figura 5.7 A, B, C e D). Além disso, observam-se depósitos clásticos finos (areia, silte, argila), assim como blocos e matacões (Figura 5.7 A e C). Registra-se que as escalas humanas contribuem para a percepção das dimensões de alguns trechos da caverna.

Verifica-se a presença de alguns patamares, principalmente a partir da Entrada Eslovena (Figura 5.6, perfis M-M', T-T', V-V', W-W', X-X', Y-Y', Z-Z'). Essa característica morfológica indica mudança de níveis fluviais, que pelo contexto geológico local registra aprofundamento do leito fluvial. Nesse sentido, torna-se importante analisar o contexto de inserção dessa caverna.

A Lapa São Vicente I está inserida numa área com predominância de metapelitos e dolomitos da Formação Sete Lagoas, Grupo Bambuí. Próximo à entrada principal da Lapa São Vicente I observa-se que o rio São Vicente escavou as rochas carbonáticas, formou sumidouro que dá acesso à referida caverna e o canal fluvial se assenta em granitos do Complexo Almas-Cavalcante (Figura 5.8).

Esse contexto litológico possui elementos que auxiliam a interpretação geomorfológica. Os fundos de vale das principais drenagens da bacia hidrográfica do rio São Vicente atingiram o embasamento composto por granitos, gnaisse e paragneisses do Complexo Almas Cavalcante (Figura 5.8). Registra-se que as áreas com maior rugosidade são representadas pelos vales encaixados, vertentes e escarpas de maciços e morros presentes no interior da área ou nos divisores hidrográficos locais. Já as áreas com menor rugosidade estão presentes no topo da cuesta e à jusante da Serra do Calcário, especialmente a partir da localidade de São Vicente, distrito de São Domingos (GO) (Figura 5.9).

Assim, além de variações na dinâmica fluvial e fluviocárstica, observa-se a existência de erosão e dissolução. Afinal, os morros e maciços são, geralmente, formados por rochas de formações geológicas do Grupo Bambuí mais resistentes, a saber: 1) metapelitos e dolomitos da Formação Sete Lagoas, que formam a Serra do Calcário e colinas na parte oeste da bacia hidrográfica do rio São Vicente; 2) o Morro do Sapé, Pico da Vereda e Pico do Macaco são mogotes formados por calcários, siltitos, margas e argilitos da Formação Lagoa do Jacaré, mas é circundado por folhelhos, siltitos e margas da Formação Serra de Santa Helena (Figura 5.9). Registra-se que até o momento não foram identificadas cavernas no Morro do Sapé, Pico da Vereda e Pico do Macaco.



Figura 5.7: Características morfológicas da Lapa São Vicente I

Fotos: Daniel de Stefano Menin



Figura 5.8: Contexto litológico de localização da Lapa São Vicente I

CONTEXTO LITOLÓGICO E RUGOSIDADE NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO VICENTE

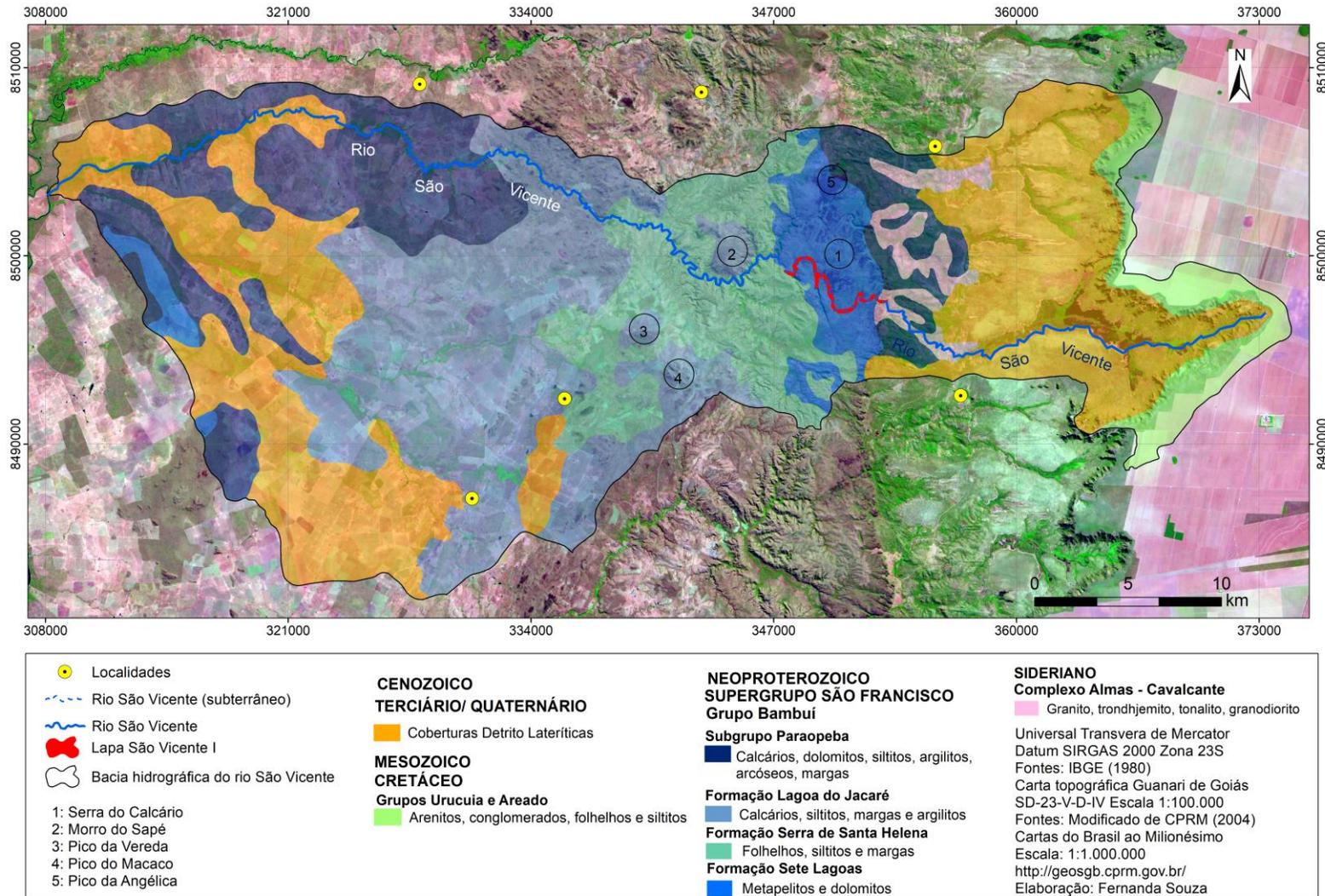


Figura 5.9: Contexto litológico e rugosidade na bacia hidrográfica do rio São Vicente

Verificam-se feições geomorfológicas isoladas formadas no topo por rochas mais solúveis (pertencentes à Formação Lagoa do Jacaré) circundadas por relevo dissecado e rebaixado composto por rochas menos solúveis (vinculadas à Formação Serra de Santa Helena). A presença dessas feições está associada, predominantemente, à dissolução, ao padrão evolutivo geral de áreas cársticas e formação de mogotes (Figura 5.9). Portanto, esse processo resulta das atividades geoquímicas exercidas pelo rio São Vicente e seus afluentes.

A evolução da paisagem cárstica e a formação de mogotes estão associadas à instalação da rede de drenagem (Figura 5.10 A), que, em seguida, penetra na rocha e forma sumidouros e/ou dolinas. Essa afirmação é sustentada por Jennings (1971), Piló (1998), Sauro (2012), Souza e Auler (2018), visto que as dolinas consistem em pontos de convergência de águas superficiais para o meio subterrâneo. Essas dolinas evoluem para uvalas, as quais passam a convergir o escoamento pluvial e fluvial para o seu centro. Nesse sentido, observa-se a formação de colinas na paisagem (Figura 5.10 B). Posteriormente, com o avanço dos processos dissolutivos, as dolinas e uvalas se coalescem. Esse processo proporciona a expansão lateral e vertical dos processos dissolutivos, bem como a formação de ressurgência das drenagens, individualização de formas de relevo e formação de colinas (Figura 5.10 C). Em seguida, os processos dissolutivos condicionam a formação de depressões, extensas áreas planas ou suave onduladas e alguns mogotes individualizados na paisagem (Figura 5.10 D).

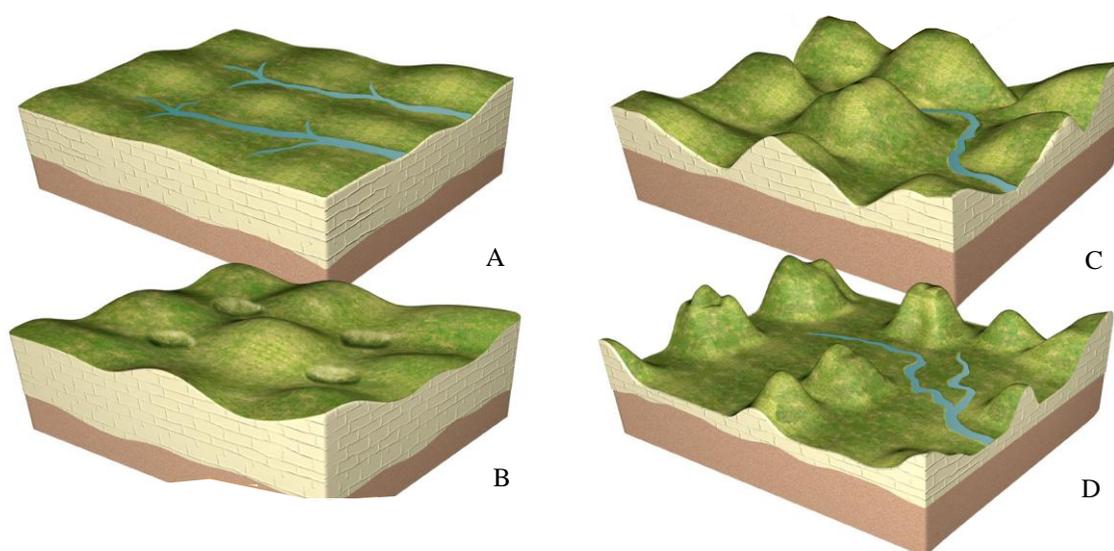


Figura 5.10: Evolução da paisagem e formação de mogotes em áreas cársticas

Fonte: modificado de Souza e Auler (2018)

Recomendam-se estudos aprofundados sobre alterações na dinâmica fluvial na bacia hidrográfica do rio São Vicente. Todavia, registra-se que o rio São Vicente possui canal meandrante, com curvas acentuadas, nas áreas compostas por rochas da Formação Serra de Santa Helena (Figura 5.9). Esse fator está associado à carga sedimentar alta, resultante tanto da erosão das rochas encaixantes (folhelhos, siltitos e margas), como dos materiais clásticos advindos das cavernas existentes à montante e da Serra Geral de Goiás.

À jusante da Serra do Calcário, as áreas com morfologia suavizada são compostas por calcários, siltitos, margas e argilitos da Formação Lagoa do Jacaré e coberturas detríticas. Já as áreas compostas por rochas do Subgrupo Paraopeba estão situadas na parte oeste da bacia hidrográfica do rio São Vicente, próximo à foz da drenagem homônima, e na parte leste dessa bacia, próximo à Serra do Calcário. Em geral, as localidades com predominância de rochas do Subgrupo Paraopeba indiviso são situadas nas proximidades dos principais divisores hidrográficos da bacia hidrográfica do rio São Vicente (Figura 5.9).

Portanto, a apresentação litológica da área de inserção da Lapa São Vicente I e seu entorno indica interrelações geológicas e geomorfologias. A Serra do Calcário possui estruturas geológicas e isso contribuiu para a sua segmentação e formação de unidades hidrográficas, entre elas, a bacia hidrográfica do rio São Vicente. Observa-se que os limites dessa bacia hidrográfica e suas proximidades possuem estruturas geológicas. As direções preferenciais das estruturas geológicas na bacia hidrográfica do rio São Vicente são NW-SE e NE-SW (Figura 5.11).

Verifica-se que a relação entre a direção do rio São Vicente e as estruturas geológicas está presente, especialmente, nas proximidades da nascente e nos primeiros quilômetros dessa drenagem. O conjunto de fatores formado por estruturas geológicas, declividade, disponibilidade hídrica e sumidouro contribuem para a vazão do rio São Vicente. Assim, essas variáveis favoreceram a formação da Lapa São Vicente I, cujas dimensões morfométricas e diversidade morfológica, as tornam relevantes no contexto espeleológico local e nacional.

Constata-se que: a) não há sobreposição entre as principais estruturas geológicas e o conduto principal da caverna; b) a morfologia planimétrica sinuosa das cavernas não acompanha a direção preferencial das estruturas geológicas externas; c) a morfologia de condutos circulares e semicirculares indica escoamento fluvial via acamamento litológico e d) a quantidade e dimensão dos espeleotemas demonstram condições para precipitação e acumulação de material químico secundário.

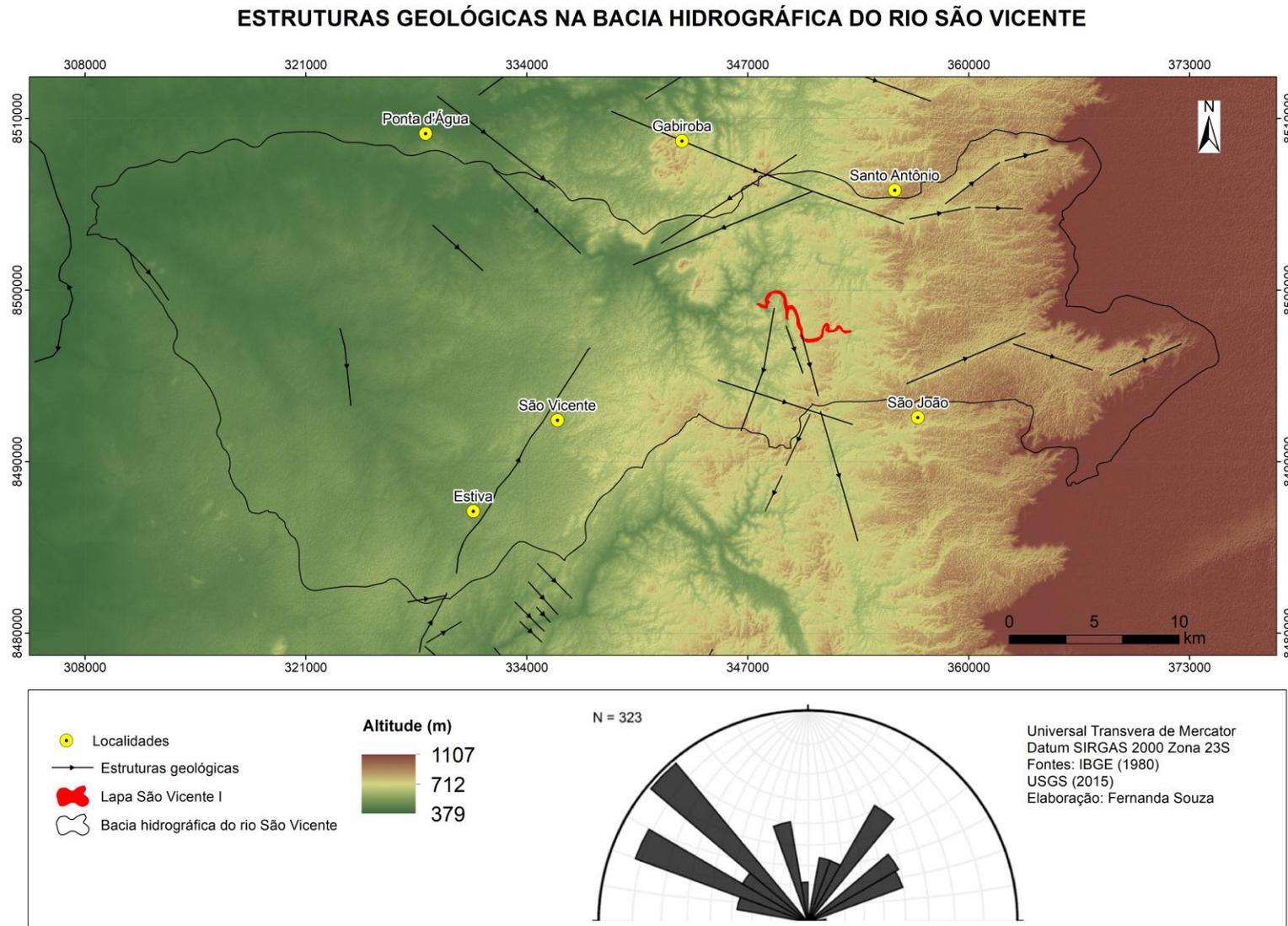


Figura 5.11: Estruturas geológicas na bacia hidrográfica do rio São Vicente

Portanto, essas características denotam que as contribuições de falhas e fraturas são poucas ou ausentes para a formação e desenvolvimento dessa caverna. Já os acamamentos e a porosidade primária dos calcários favorecem a penetração e percolação hídrica e, conseqüentemente, desenvolvimento da Lapa São Vicente I.

Na bacia hidrográfica do rio São Vicente, observa-se a predominância territorial de áreas planas e suaves onduladas. As áreas escarpadas predominam nas vertentes da Serra Geral de Goiás (Figura 5.12). A Lapa São Vicente I possui entrada principal associada a relevo forte ondulado. Essa caverna está situada na Serra do Calcário, que é um maciço demarcado por escarpas, possui superfície irregular, além de sulcos, fendas e *karrens* no topo e nas escarpas. Já o interior desse maciço é composto por cavernas. À jusante da Serra do Calcário e das ressurgências das drenagens que o atravessam, observam-se dinamizações do relevo. Assim, as declividades das áreas próximas às ressurgências oscilam e permitem a formação de relevo, que varia de escarpado a plano, especialmente devido à presença de morros, mogotes e drenagens locais. Registra-se que a partir da localidade de São Vicente, o relevo possui superfície plana a suave ondulada (Figura 5.12).

A bacia hidrográfica do rio São Vicente possui variações altimétricas entre 412 e 1008m na superfície terrestre. Nas áreas à jusante da Serra do Calcário predominam relevos com altitudes baixas (412 a 600m) e as áreas à montante desse maciço contêm altimetrias entre 850 e 1008m (Figura 5.13). Compreende-se que a Serra do Calcário se configura como remanescente geomorfológico dos processos dissolutivos nessa região. Essas informações são reiteradas por Guyot *et al.* (1996) e Rodet (1996). A partir de cálculos hidrogeoquímicos preliminares, Guyot *et al.* (1996) constatam que se as condições hidroclimáticas atuais persistirem, entre 5 e 10 Ma futuros a Serra do Calcário estará naturalmente suprimida.

Assim, a entrada principal da Lapa São Vicente I se localiza no sopé da Serra do Calcário, numa área com cotas altimétricas de 622m. Registra-se que embora existam cavernas situadas no topo da Serra do Calcário, a maioria delas possui entradas principais no sopé da escarpa. Além disso, a maioria das cavernas está situada em cotas altimétricas entre 600 e 700m (Figura 5.14). Deve-se destacar que algumas cavernas possuem mais de uma entrada, como é o caso da Lapa São Vicente I, que possui três entradas (Entrada Principal, Entrada Eslovena e Entrada Ponte da Craibinha). A quantidade dessas entradas indica variações nos processos geomorfológicos, evolução geomorfológica, interconexões entre os ambientes subterrâneo e superficial, meios de aportes de matéria e energia, bem como locais para a atuação de agentes dissolutivos e erosivos.

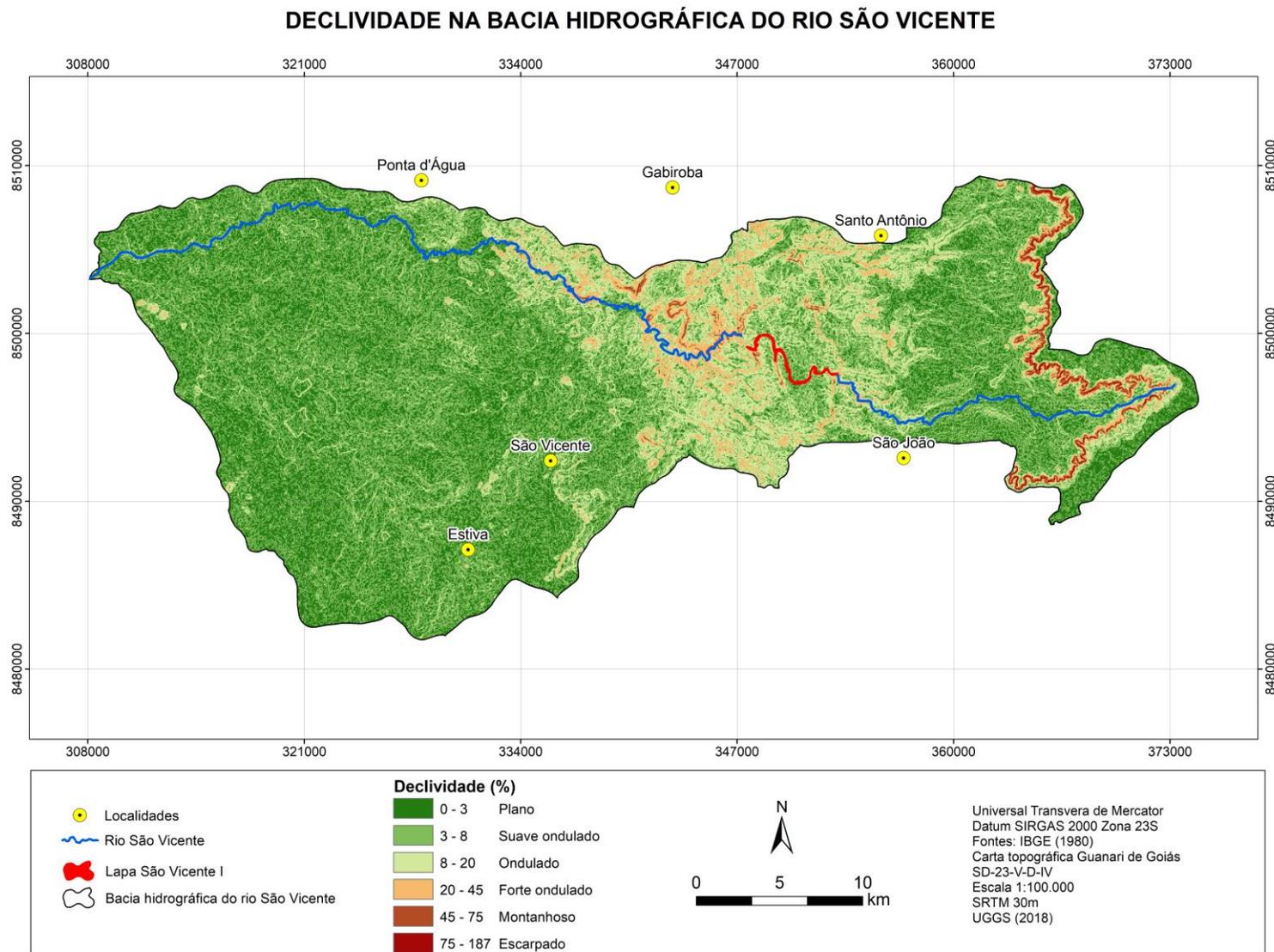


Figura 5.12: Declividade na bacia hidrográfica do rio São Vicente

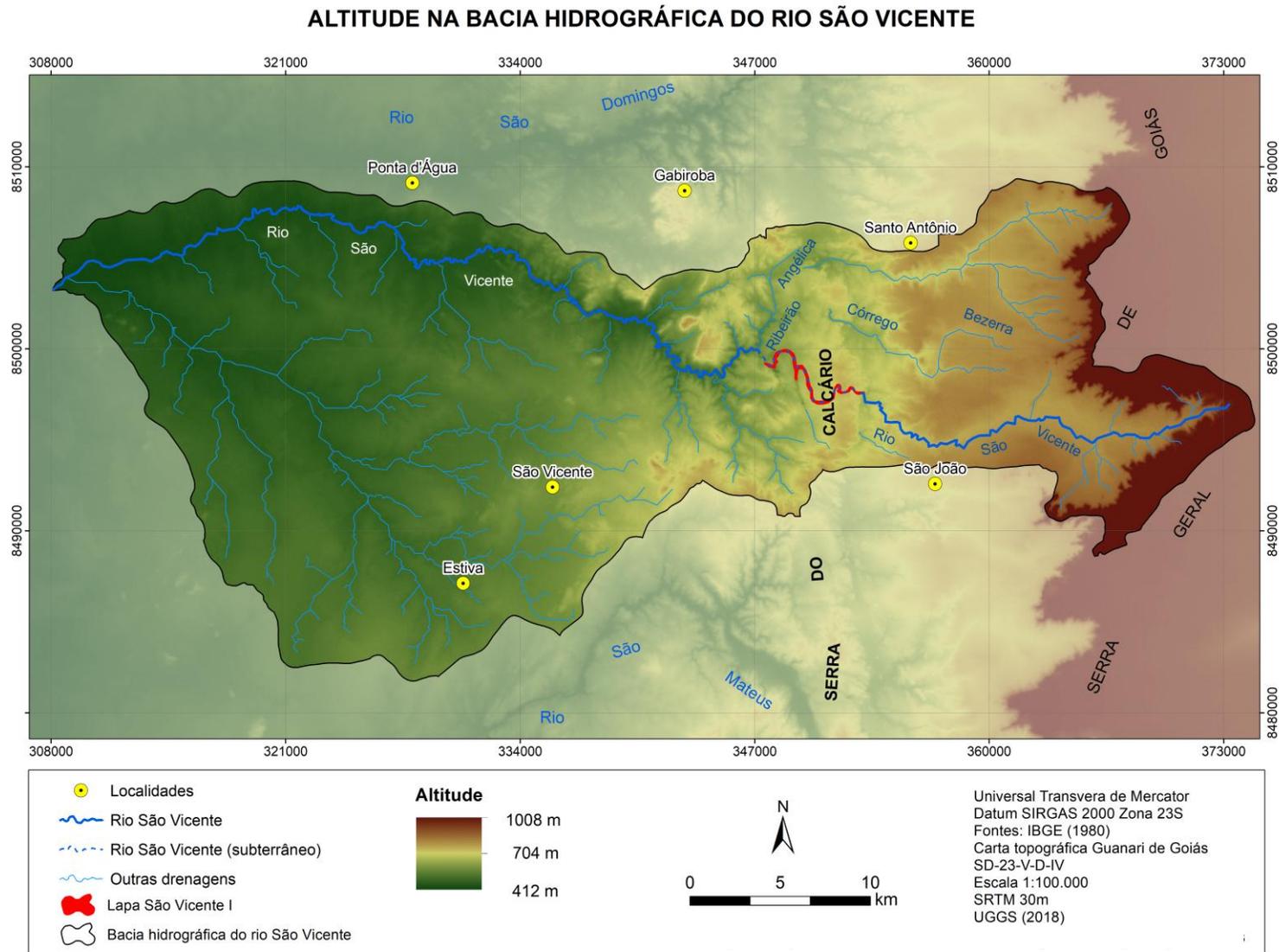


Figura 5.13: Altitude na bacia hidrográfica do rio São Vicente

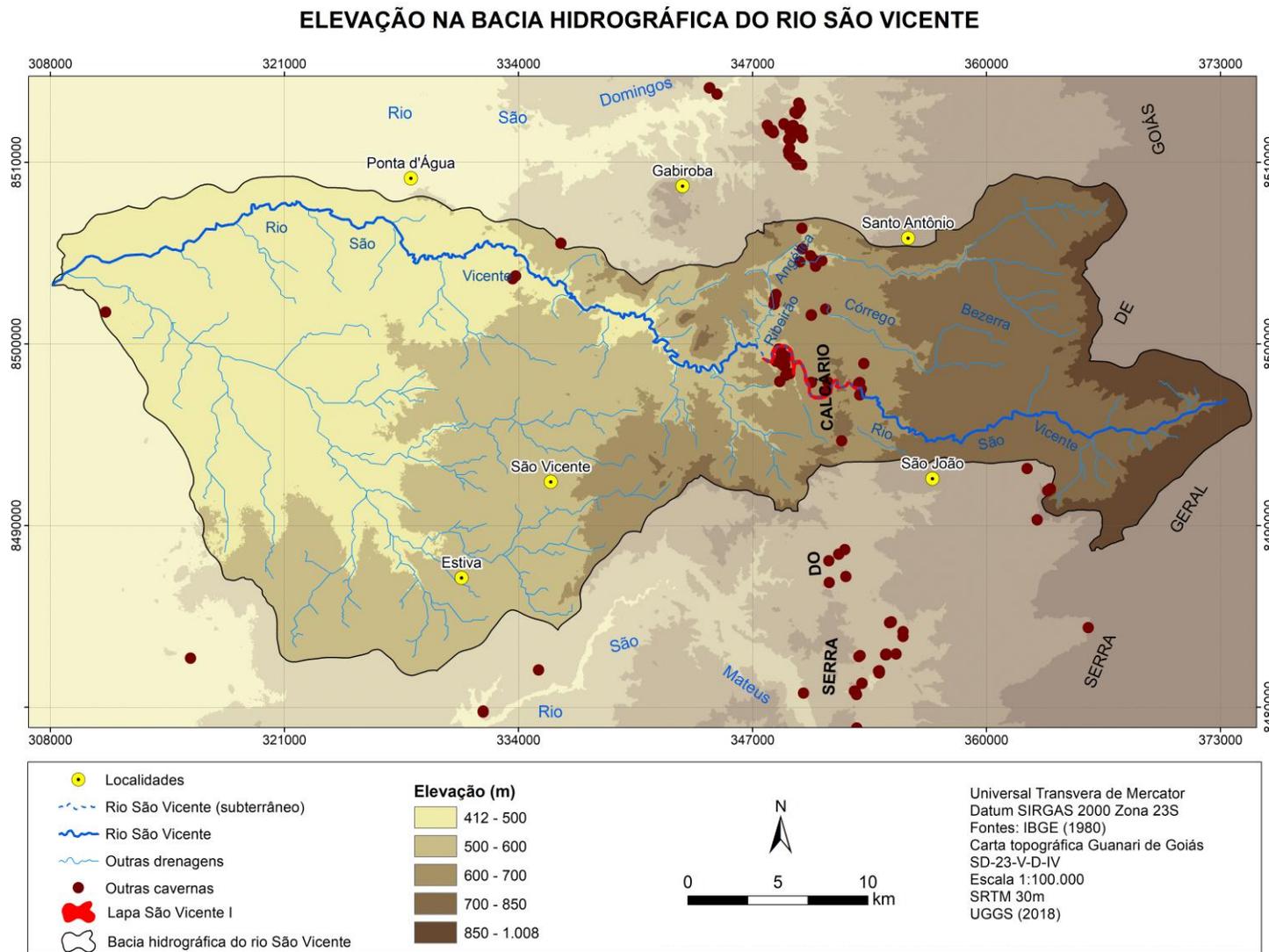


Figura 5.14: Elevação topográfica na bacia hidrográfica do rio São Vicente

Os perfis topográficos na bacia hidrográfica do rio São Vicente reforçam as características gerais do relevo (Figura 5.15). No perfil A-B são observadas as escarpas da Serra Geral de Goiás, seguido de superfície suave ondulada. Posteriormente, verificam-se as características gerais da Serra do Calcário, que é sulcada por drenagens (Figura 5.15, perfil C-D). No perfil E-F se nota a existência de mogotes segmentados por drenagens, bem como a existência de planícies e patamares. Já no baixo curso do rio São Vicente (Figura 5.15, perfil G-H), registra-se a presença de relevo suavizado e planície do rio principal.

Associado à declividade e altimetria, o índice Relação Declividade-Extensão (RDE) ou índice de Hack auxilia a identificação de anomalias na energia fluvial. A aplicação desse índice na área de estudo mostra que, em geral, os indicadores morfométricos são baixos (1 a 20). Mas há anomalias pontuais, cujos índices RDE são de 40 a 49. As principais anomalias estão localizadas próximo à nascente do rio São Vicente e à Serra do Calcário (Figura 5.16). Esses resultados demonstram aumento da energia fluvial à montante e à jusante das cavernas. Esse fator está associado às variações da declividade, assim como à existência de sumidouros e ressurgências locais. Registra-se, assim, a relação retroalimentativa entre feições cársticas e declividade na área de estudo. As áreas com índice RDE anômalos que interferem diretamente na Lapa São Vicente I estão situadas próximo às escarpas da Serra Geral de Goiás e às proximidades da localidade de São João (Figura 5.16). Nesse sentido, esse fator registra as áreas com aumento da vazão, que auxilia a ação dissolutiva e abertura de cavernas.

O mapeamento das corredeiras e quedas d'água na Lapa São Vicente I mostram que elas estão concentradas predominantemente na parte inicial da caverna. Além disso, observam-se sequências de degraus ao longo da caverna (Figura 5.17). Na estação seca há conjuntos de depósitos sedimentares na caverna. Em geral, após os segmentos com corredeiras, o fluxo da água na Lapa São Vicente I é rápido devido à declividade suave do piso da caverna. Assim, constata-se que a declividade e disponibilidade hidrológica são fatores que contribuem para o desenvolvimento e morfologia da Lapa São Vicente I.

Registra-se que as estruturas secundárias atuaram e não impactaram diretamente no desenvolvimento da Lapa São Vicente I. A influência das estruturas geológicas secundárias está marcada em cavernas situadas na parte sudeste da bacia hidrográfica do Paranã, onde há condutos altos, retilíneos e requer práticas verticais para acesso ao ambiente subterrâneo.

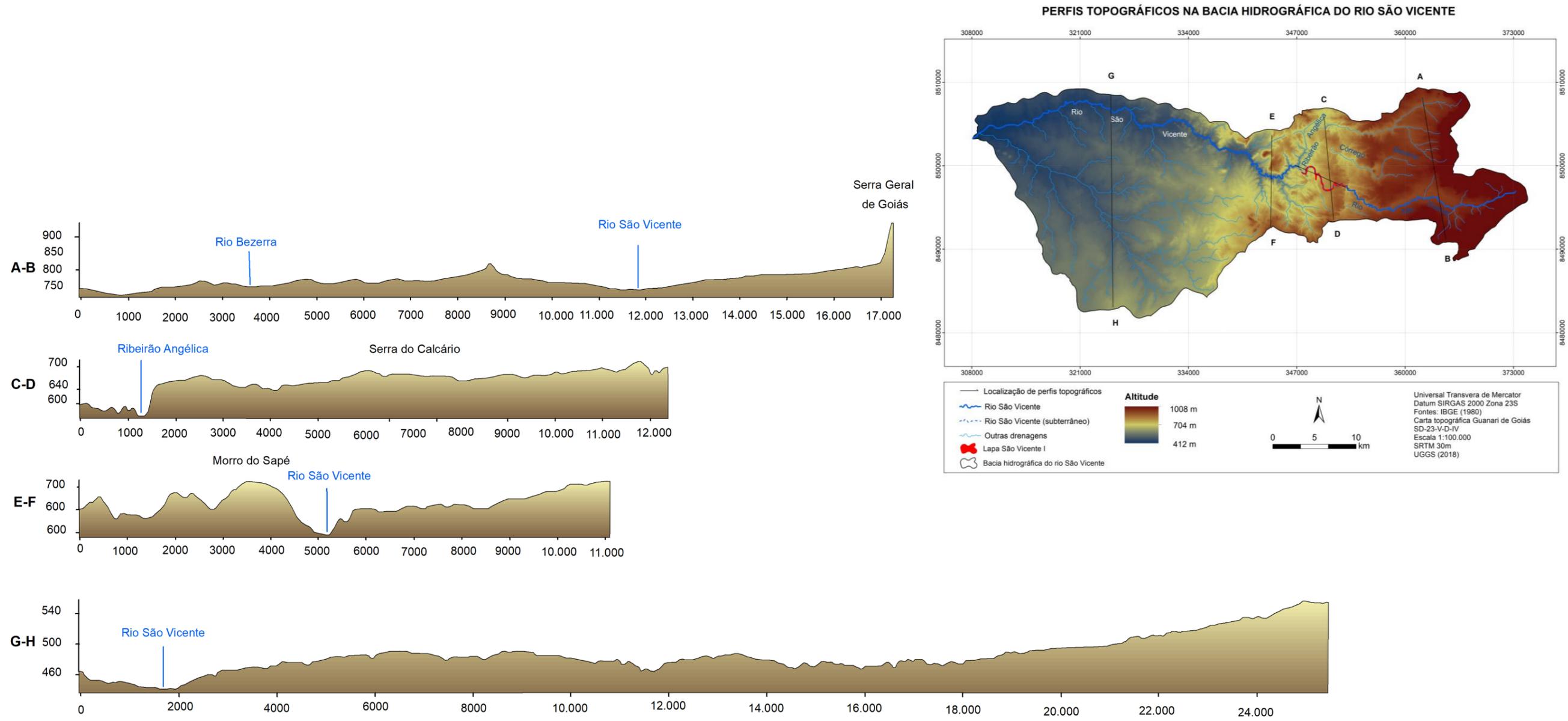


Figura 5.15: Perfis topográficos na bacia hidrográfica do rio São Vicente

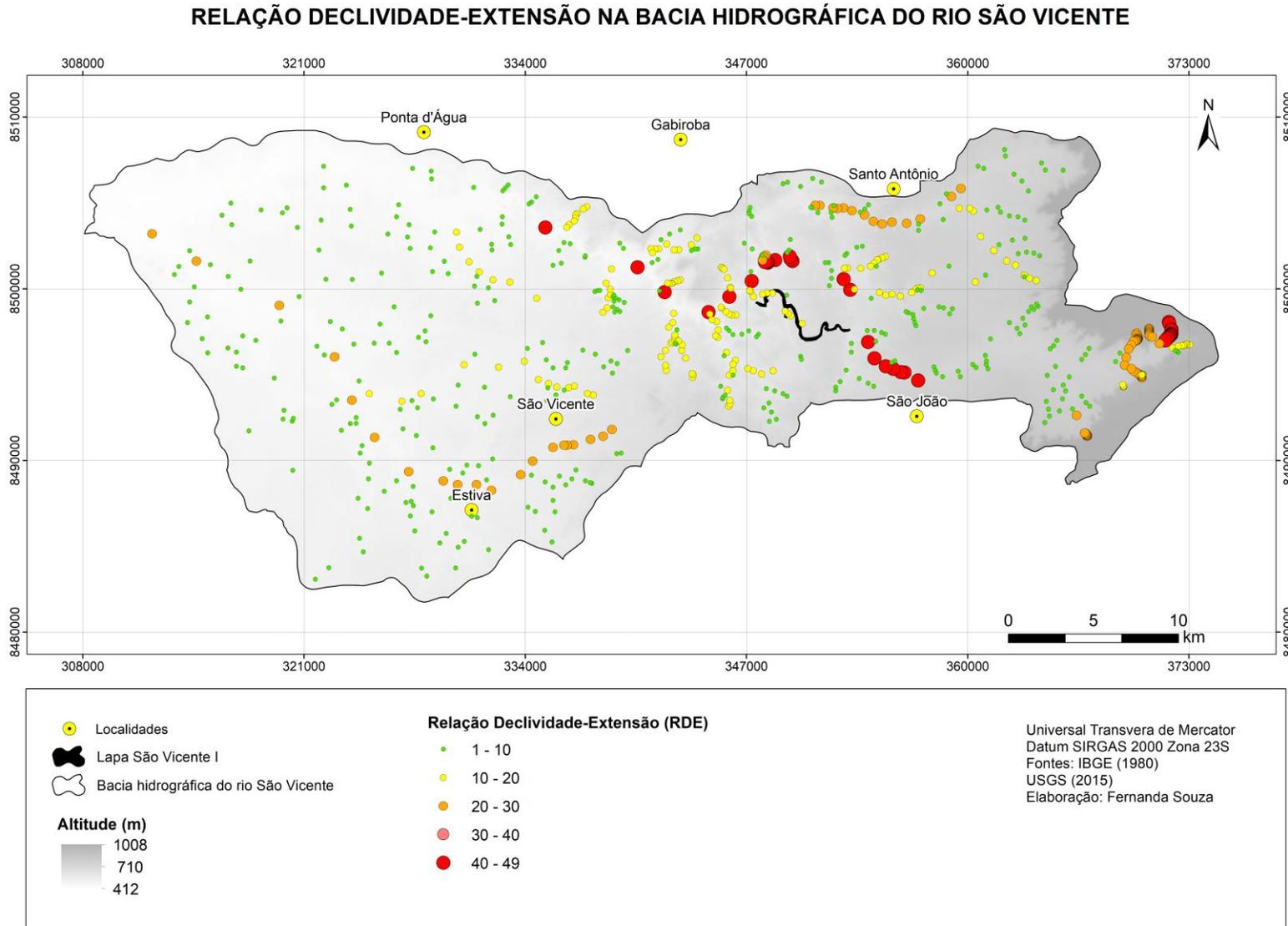


Figura 5.16: Relação Declividade-Extensão (RDE) total na bacia hidrográfica do rio São Vicente

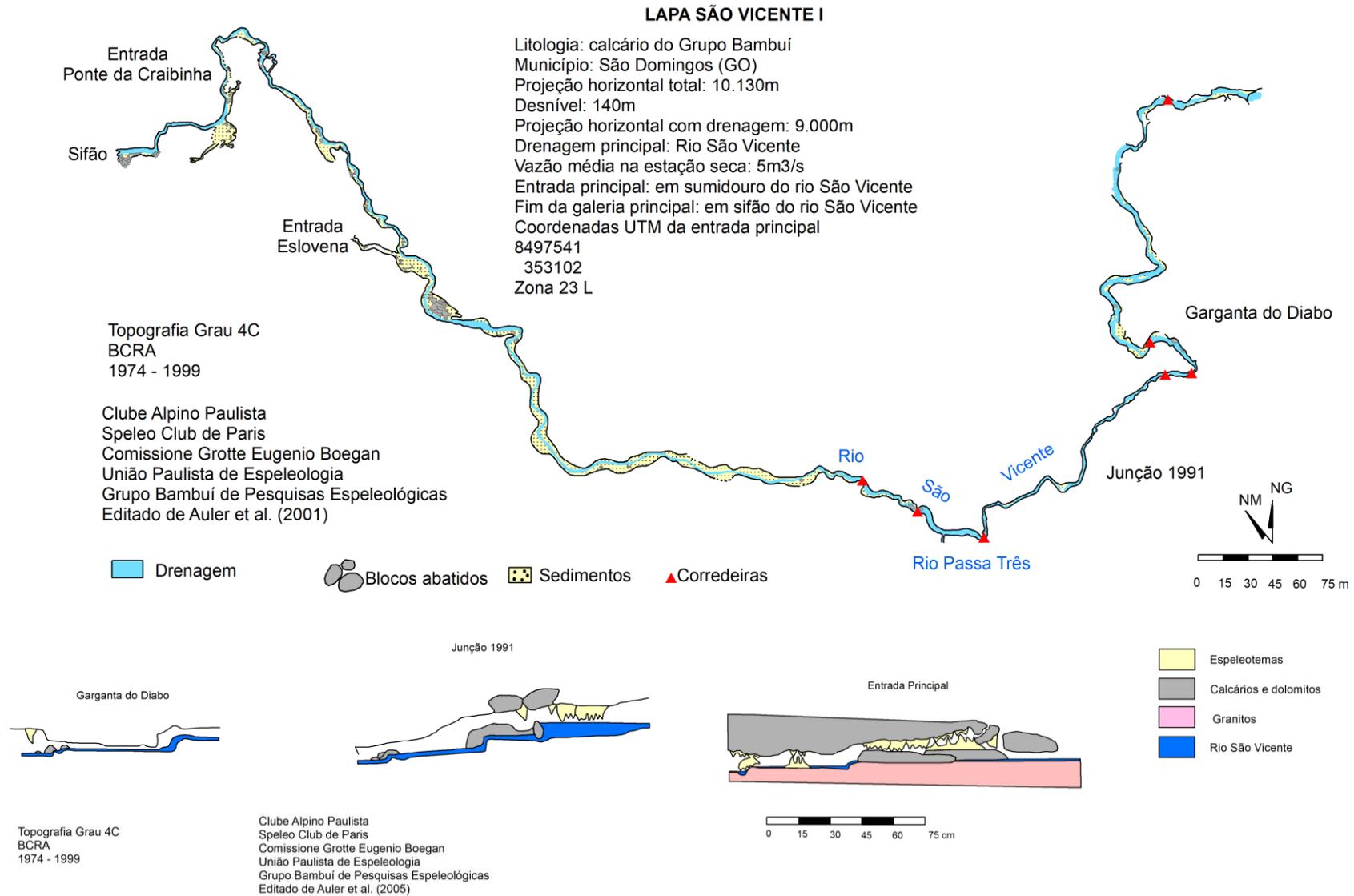


Figura 5.17: Corredeiras e quedas d'água na Lapa São Vicente I

A síntese dos fatores geológicos e geomorfológicos associados à distribuição das cavernas desenvolvidas em rochas carbonáticas na bacia hidrográfica do rio São Vicente (Quadro 5.1). Registra que o detalhamento das informações permite constatações mais precisas sobre a relação litoestrutural e geomorfológica com o desenvolvimento da Lapa São Vicente I. Verifica-se que essa caverna recebe influências de um conjunto de fatores e ela contribui para as transformações geomorfológicas das áreas no seu entorno. A principal contribuição dessa caverna para o relevo da superfície se trata do seu funcionamento como nível de base, que aumenta a declividade e controla os processos erosivos no *front* de cuesta. Esse processo ao longo do tempo permite a expansão da bacia hidrográfica e outras transformações no relevo. Destaca-se que as dimensões espeleométricas da caverna devem ser estudadas futuramente como fator na transformação do relevo da superfície.

Quadro 5.1:

Elementos geológicos e geomorfológicos preferenciais para distribuição das cavernas desenvolvidas em rochas carbonáticas na bacia hidrográfica do rio São Vicente

Elementos geológicos preferenciais	Borda do Cráton do São Francisco
	Dolomitos e metasiltitos <i>- Grupo Bambuí</i> <i>Formação Sete Lagoas</i> <i>Fácies litológicas (Figura 5.18)</i>
Elementos geomorfológicos preferenciais	Estruturas geológicas, preferencialmente com direções NW-SE. <i>Nessa escala de estudo, verifica-se que as estruturas geológicas não o padrão planimétrico das cavernas.</i>
	O acamamento das rochas é o principal tipo de estrutura que favorece a infiltração da água e formação da caverna.
	Patamares <i>- Patamares do Tocantins</i> <i>Patamares do Paranã</i> <i>Serra do Calcário</i> <i>Maciço em rochas carbonáticas</i>
	Sopé de maciço da Serra do Calcário Desnível: 140m no ambiente subterrâneo
	Lapa São Vicente I associada a sumidouro <i>- Serra do Calcário, sumidouro do rio São Vicente e Lapa São Vicente I são níveis de base que controlam o relevo à montante.</i>

Verifica-se que o desenvolvimento da Lapa São Vicente I como caverna de destaque local e nacional está associado ao contexto litológico, composto por alternâncias de fácies com dolomitos e calcários. Esse fator contribui para o desnível da caverna, uma vez que ao encontrar fácies com minerais mais solúveis, o desenvolvimento subterrâneo se aprofunda. Assim, há retroalimentação entre composição litológica, desnível e vazão, o que contribui para o aprofundamento da caverna. Os acamamentos litológicos, a friabilidade das rochas e a disponibilidade hídrica contribuem para a abertura da caverna e sua morfologia planimétrica em padrão dentrítico, com formas curvilíneas, arredondadas ou elípticas.

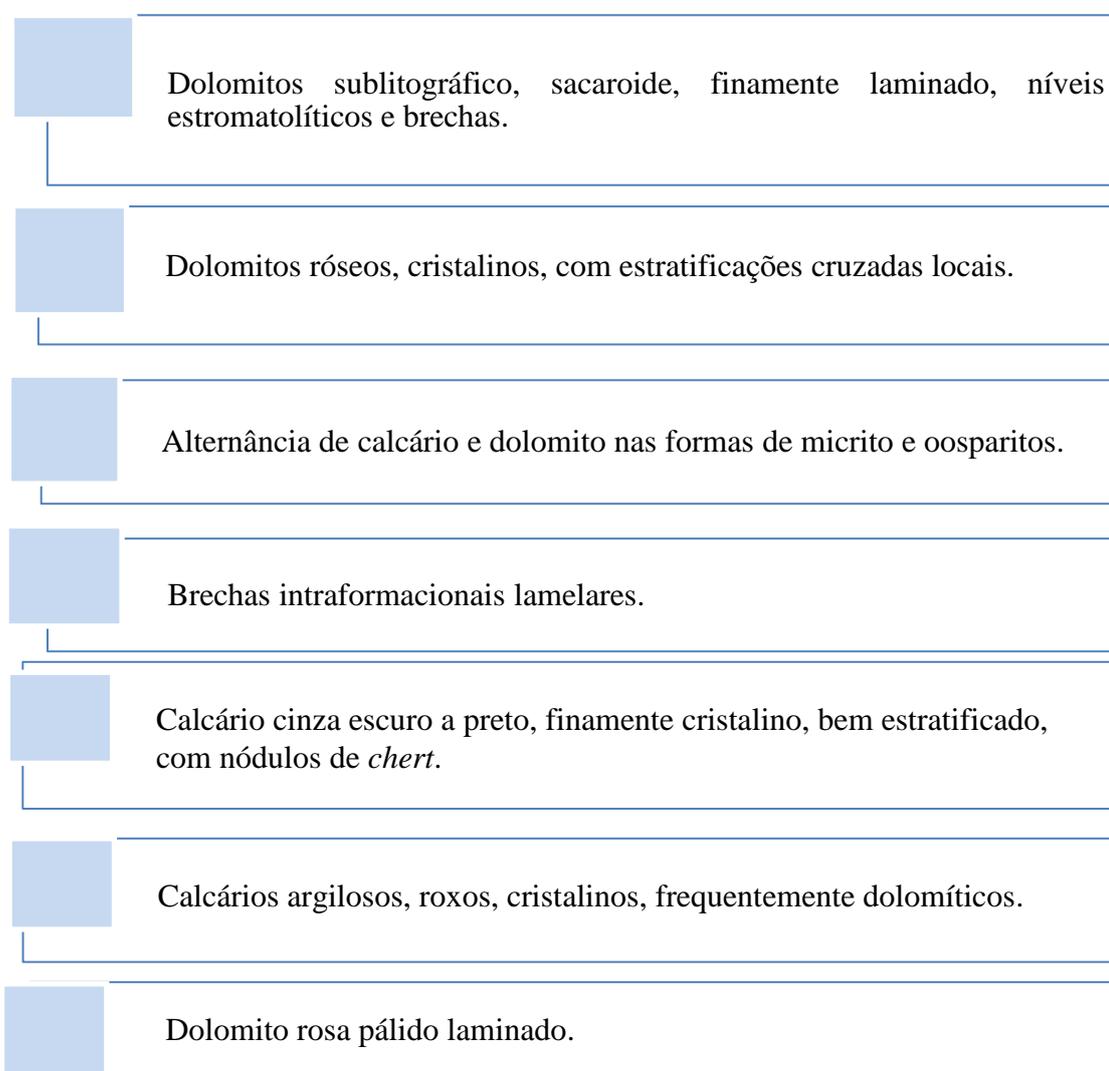


Figura 5.18: Fácies da Formação Sete Lagoas

Fonte: modificado de Iglesias e Uhlein (2009)

A Lapa São Vicente I se situa em contexto geomorfológico, que registra transformações na paisagem, uma vez que se localiza em sopé de maciço da Serra do Calcário, que compõe os Patamares do Paranã. Esse maciço é resultado de transformações morfológicas associadas à instalação e erosão do *front* de cuesta, dissolução das rochas carbonáticas, consequentemente redução das áreas contínuas de rochas carbonáticas expostas. Assim, ao longo do tempo, os processos dissolutivos tendem a transformar esse maciço em um conjunto de mogotes, reduzir a declividade da área e suprimir parte da caverna. Com base nessas observações, deve-se refletir sobre o estudo geomorfológico nas bacias hidrográficas analisadas, tendo como base a perspectiva multiescalar.

CAPÍTULO 6: ESCALAS ESPACIAIS NO ESTUDO GEOMORFOLÓGICO DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS RIOS TOCANTINS/ARAGUAIA, PARANÃ E SÃO VICENTE

6.1. A análise multiescalar nas bacias hidrográficas analisadas e o papel dos fatores litoestruturais no desenvolvimento das cavernas

A análise multiescalar dos fatores litoestruturais e geomorfológicos associados às cavernas nas bacias hidrográficas dos rios Tocantins/Araguaia, Paranã e São Vicente permite algumas constatações. O Quadro 6.1 mostra a síntese de alguns dados espeleométricos (quantidade e densidade de cavernas). Observa-se que, em termos quantitativos, a densidade de cavernas desenvolvidas em rochas carbonáticas é mais representativa nas bacias hidrográficas dos rios Paranã e São Vicente (Quadro 6.1). Registra-se que esses dados estatísticos consideram a localização pontual da entrada das cavernas, mas a análise multiescalar deve contemplar também aspectos qualitativos. Assim, destaca-se a importância de investigação da área, declive, desenvolvimento horizontal, características geoespeleológicas e a representatividade que a caverna e o relevo cárstico possuem para a dinâmica geomorfológica em cada bacia hidrográfica.

Quadro 6.1: Principais dados espeleométricos nas bacias hidrográficas dos rios Tocantins/Araguaia, Paranã e São Vicente

Aspectos analisados	Tocantins/Araguaia	Paraná	São Vicente
Área da bacia	918.822 km ²	59.993,80 Km ²	1.036,32 Km ²
Quantidade de cavernas cadastradas	4.513	1.329	51
Quantidade de cavernas em rochas carbonáticas	1.662	1.182	47
Densidade espeleológica ²⁹ total	0,005	0,02	0,02
Densidade espeleológica das cavernas em rochas carbonáticas	0,002	0,05	0,05

A litologia carbonática se trata da variável de análise comum para as cavernas analisadas. Nas bacias hidrográficas investigadas as rochas carbonáticas são de origem sedimentar, representadas principalmente por calcários e dolomitos. Assim, verifica-se que um conjunto de propriedades litológicas contribui para a formação das cavernas investigadas, especialmente alta porosidade primária e pureza. Afinal, verifica-se maior concentração de

²⁹ Representa a quantidade de cavernas por km².

cavernas nas unidades litológicas com maior concentração de calcita. Portanto, características litológicas favorecem os processos dissolutivos e desenvolvimento das cavernas nas bacias hidrográficas investigadas. As diferentes fácies de rochas carbonáticas favorecem o desenvolvimento de cavernas com desnível representativo (superiores a 100m) para o patrimônio espeleológico nacional.

A análise comparativa da relação entre litologias e distribuição das cavernas nas bacias hidrográficas dos rios Tocantins/Araguaia, Paranã e São Vicente (Figura 6.1) mostra que o nível de detalhamento das informações litológicas e espeleológicas é proporcional. Quanto maior a descrição dos dados litológicos, maior complexidade interpretativa sobre a relação desse fator na distribuição das cavernas (Quadro 6.2). Além disso, nas bacias hidrográficas dos rios Paranã e São Vicente se verificam que o contexto litológico à montante das cavernas contém informações associadas a fatores geoquímicos de desenvolvimento das cavernas, o que aumenta a complexidade de análise. Afinal, os minerais, ácidos silicosos e matéria orgânica presente nas áreas com rochas siliciclásticas, situados à montante das cavernas, contribuem para acidificar a água que dissolve as rochas carbonáticas e forma o relevo cárstico.

Quadro 6.2: Relação entre informações litológicas e interpretação da distribuição das cavernas

Bacia hidrográfica	Informação litológica	Níveis de complexidade para interpretação das cavernas
Tocantins/Araguaia	- Grupo geológico	Baixa complexidade
Paraná	- Formação geológica - Trabalho de campo geral	Média complexidade
São Vicente	- Fácies litológicas - Trabalho de campo local	Alta complexidade

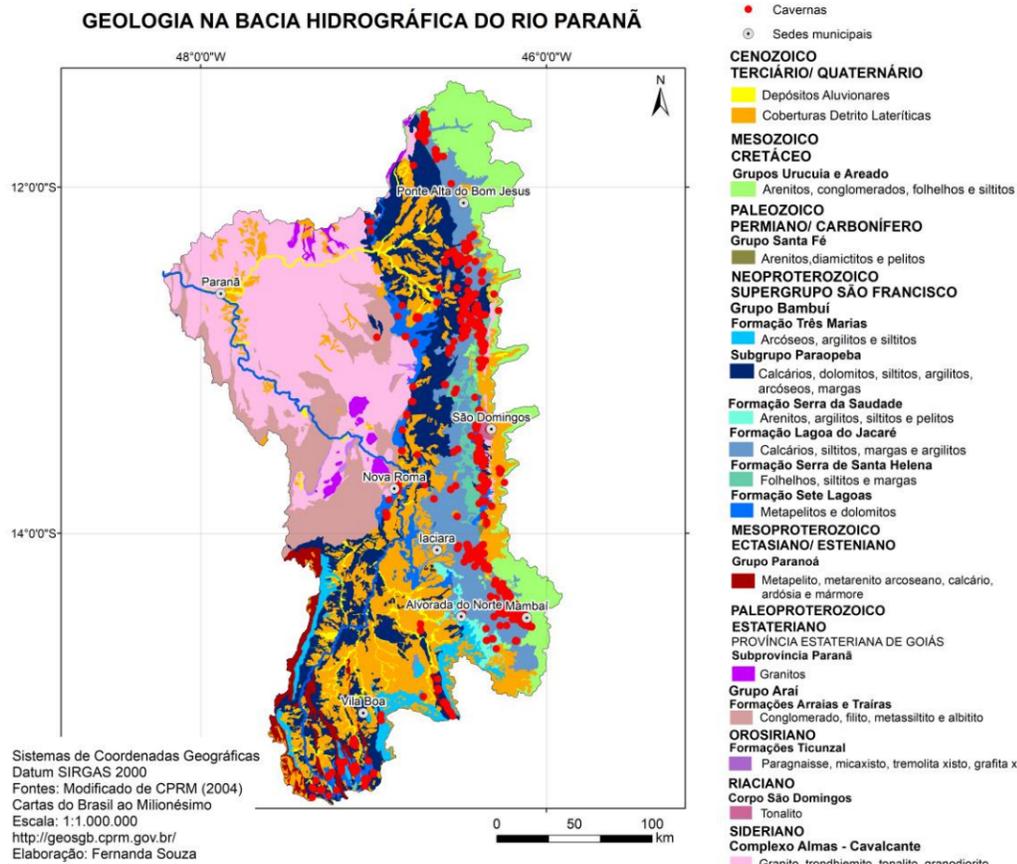
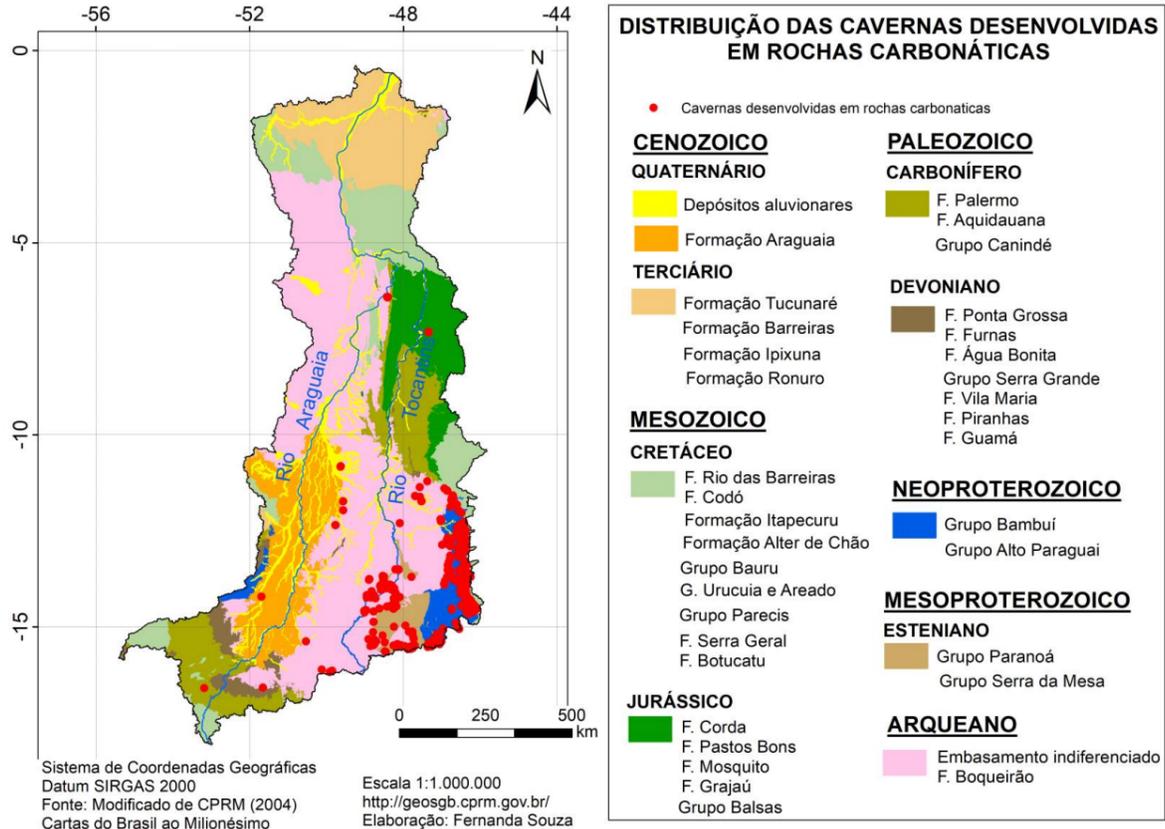


Figura 6.1: Relação comparativa das escalas de análises litológicas no estudo das cavernas

Os dados da relação entre as principais estruturas geológicas e distribuição das cavernas nas bacias hidrográficas investigadas mostram que o detalhamento de escalas e informações permite conclusões mais robustas sobre a relação entre as variáveis analisadas (Figura 6.2, Quadro 6.3). Na bacia hidrográfica do rio Tocantins/Araguaia se observa que o sistema de falhas corresponde ao tipo de estrutura geológica mais recorrente nas áreas com ocorrências de cavernas. Na bacia hidrográfica do rio Paranã se verifica um conjunto de estruturas geológicas nas áreas com presença de cavernas desenvolvidas em rochas carbonáticas. Além disso, a distribuição das cavernas predominantemente ao longo do eixo N-S é concordante com a direção preferencial das estruturas geológicas (NW-SE e N-S) (Figura 6.2).

Na bacia hidrográfica do rio São Vicente, observa-se que as estruturas geológicas possuem contribuições indiretas no desenvolvimento da Lapa São Vicente I, pois o padrão planimétrico da caverna demonstra que o conduto principal é controlado pelo acamamento e dinâmica hidrológica (Figura 6.2). Os condutos secundários dessa caverna recebem influências diretas de estruturas geológicas secundárias. Essas informações são evidenciadas na planta baixa e cortes da Lapa São Vicente I. Por isso, classifica-se que o nível de complexidade interpretativa é concordante com a escala de estudo das bacias hidrográficas (Quadro 6.3).

Quadro 6.3: Relação entre estruturas geológicas e interpretação da distribuição das cavernas

Bacia hidrográfica	Informação litológica	Níveis de complexidade para interpretação das cavernas
Tocantins/Araguaia	- Dados secundários (CPRM, 2004)	Baixa complexidade
Paraná	- Geoprocessamento - Trabalho de campo geral	Média complexidade
São Vicente	- Geoprocessamento - Mapa espeleológico - Trabalho de campo local	Alta complexidade

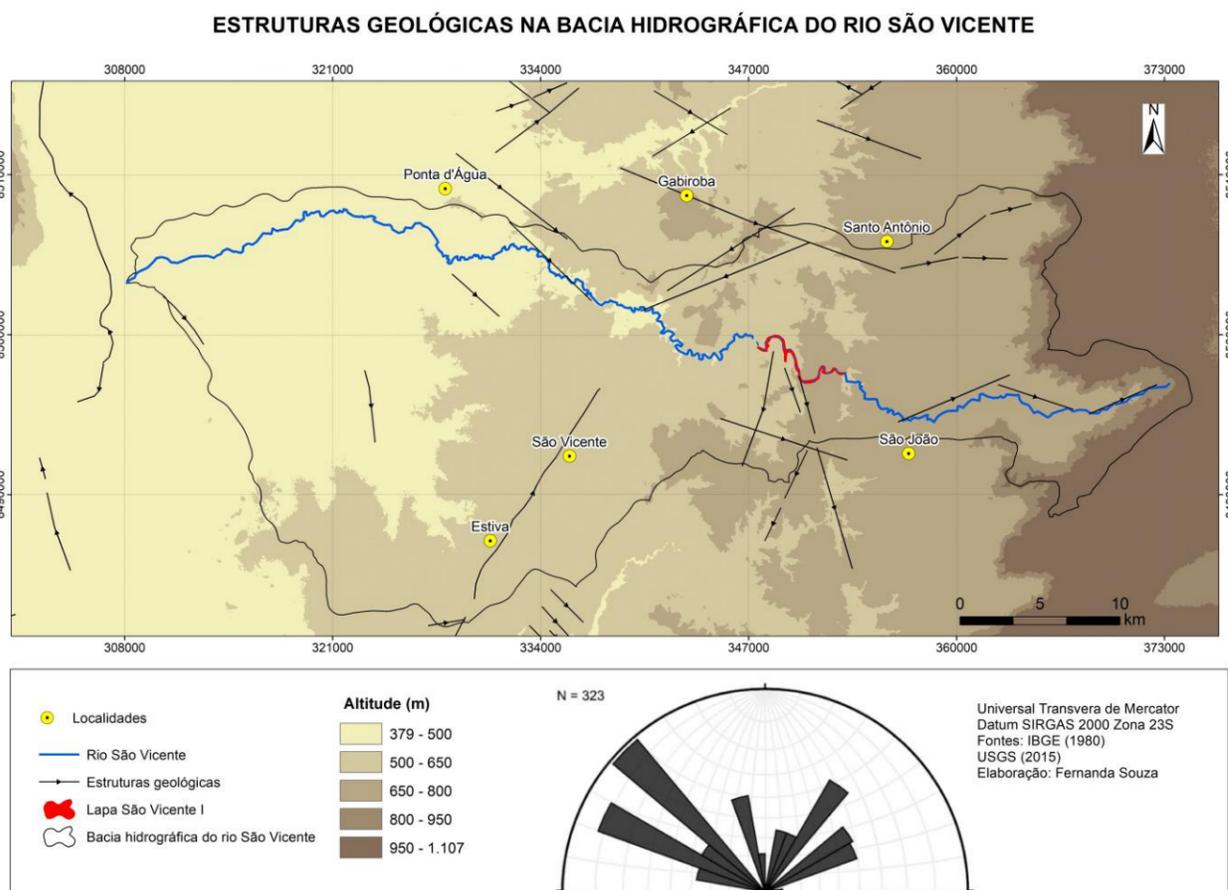
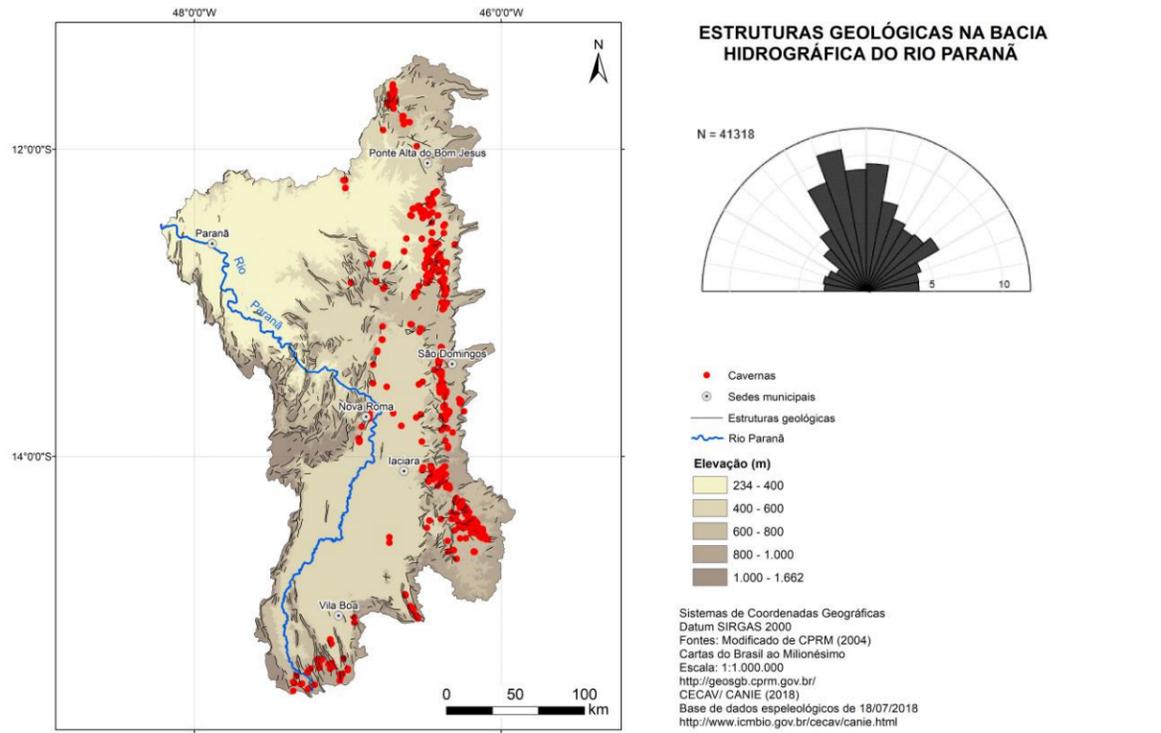
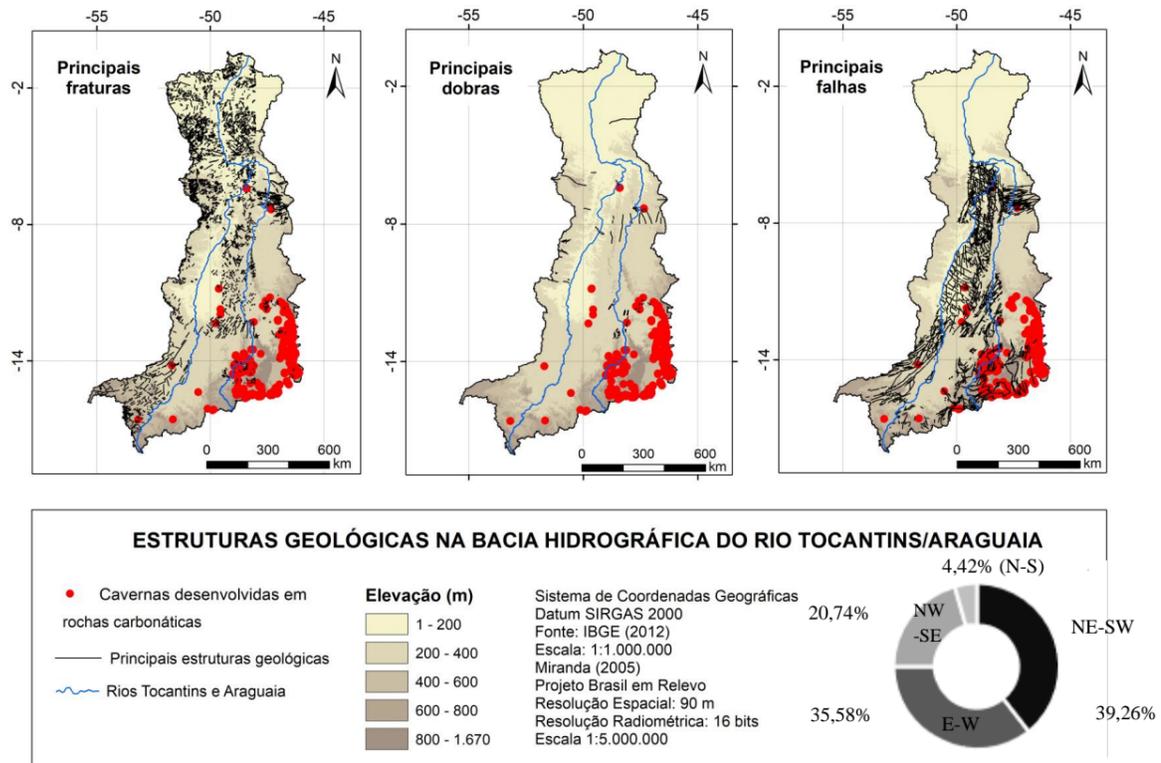


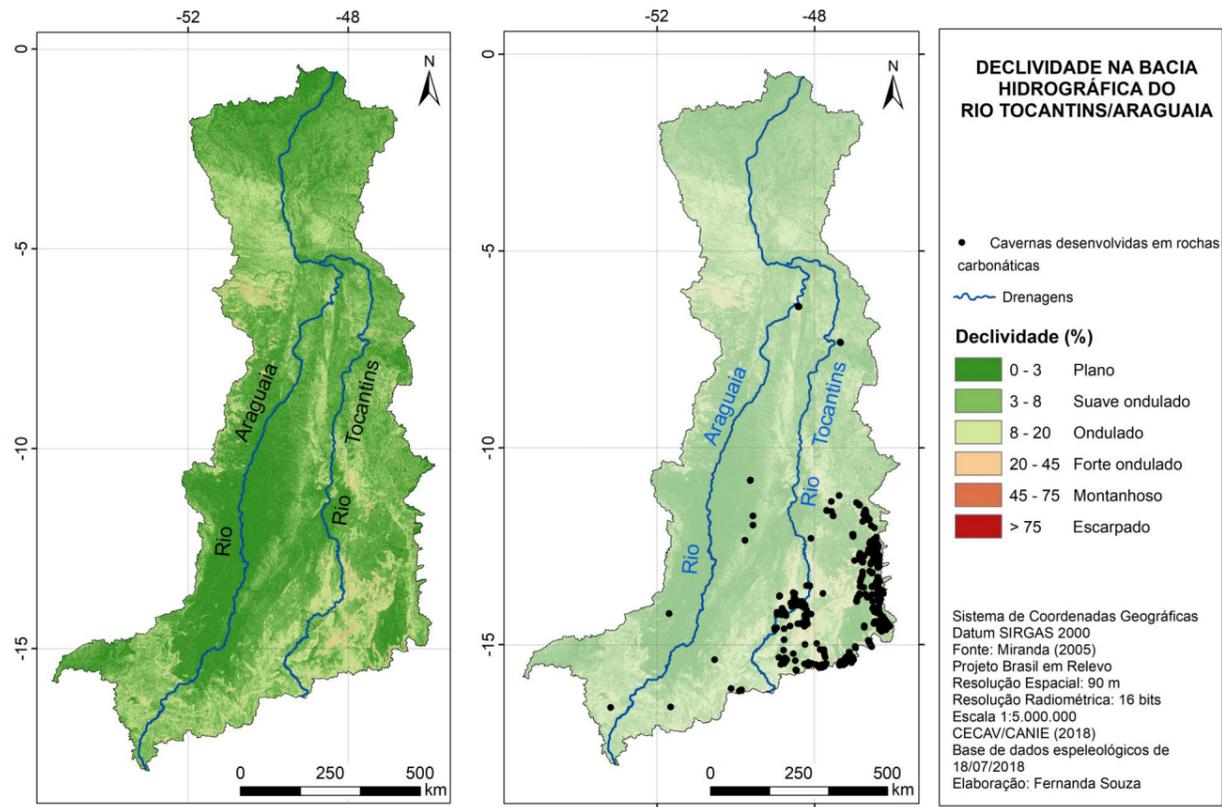
Figura 6.2: Relação comparativa das escalas de dados de estruturas geológicas no estudo das cavernas

Os dados geomorfológicos agregam informações para interpretação da relação entre as cavernas e a morfologia do relevo externo. A complexidade da interpretação espeleológica é proporcional à escala de estudo geomorfológico (Quadro 6.4). Nas bacias hidrográficas dos rios Tocantins/Araguaia e Paranã, as áreas declivosas (Figuras 6.3) e patamares (Patamares do Tocantins e Patamares do Paranã, respectivamente) favorecem o desenvolvimento de cavernas. Na bacia hidrográfica do rio São Vicente, a Lapa São Vicente I se desenvolve em um dos maciços carbonáticos da Serra do Calcário. Esse maciço possui topo e escarpas sulcadas, contém sumidouro e ressurgência, o seu interior é composto por cavernas, cujos acessos podem ocorrer nas entradas situadas no topo ou sopé do maciço. Em geral, a maioria das entradas principais das cavernas se localiza no sopé do maciço e está associada às drenagens.

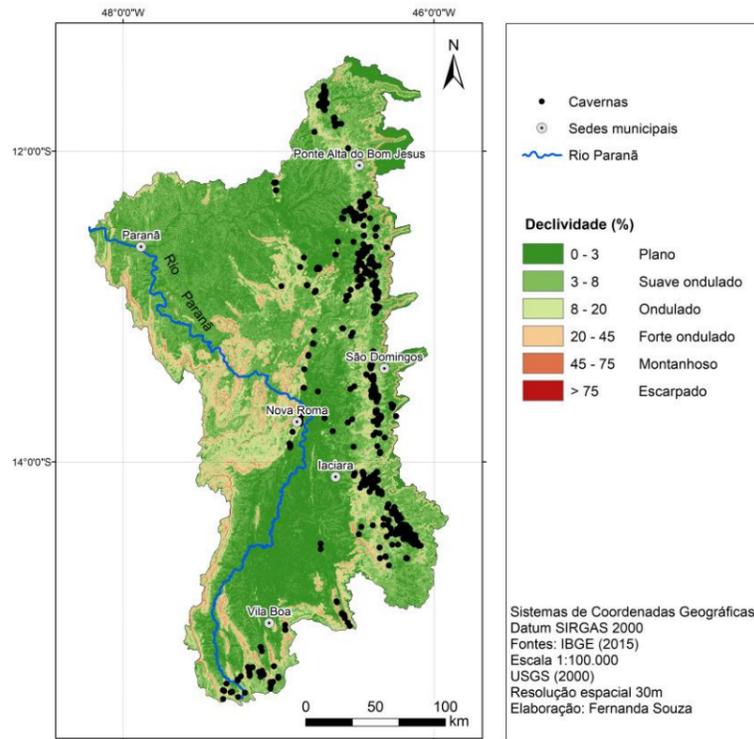
Além disso, na bacia hidrográfica do rio São Vicente é possível observar características geoespeleológicas do ambiente subterrâneo, como a morfologia das paredes, piso, teto, depósitos químicos e clásticos, além da atividade hidrográfica na Lapa São Vicente I. Todas essas informações contribuem para a interpretação da relação entre as cavernas e o desenvolvimento do relevo na bacia hidrográfica.

Quadro 6.4: **Relação entre geomorfologia e interpretação da distribuição das cavernas**

Bacia hidrográfica	Informação litológica	Níveis de complexidade para interpretação das cavernas
Tocantins/Araguaia	- SRTM 90m	Baixa complexidade
Paraná	- SRTM 30m - Trabalho de campo geral	Média complexidade
São Vicente	- SRTM 30m - Mapa espeleológico - Trabalho de campo local	Alta complexidade



DECLIVIDADE NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARANÁ



DECLIVIDADE NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO VICENTE

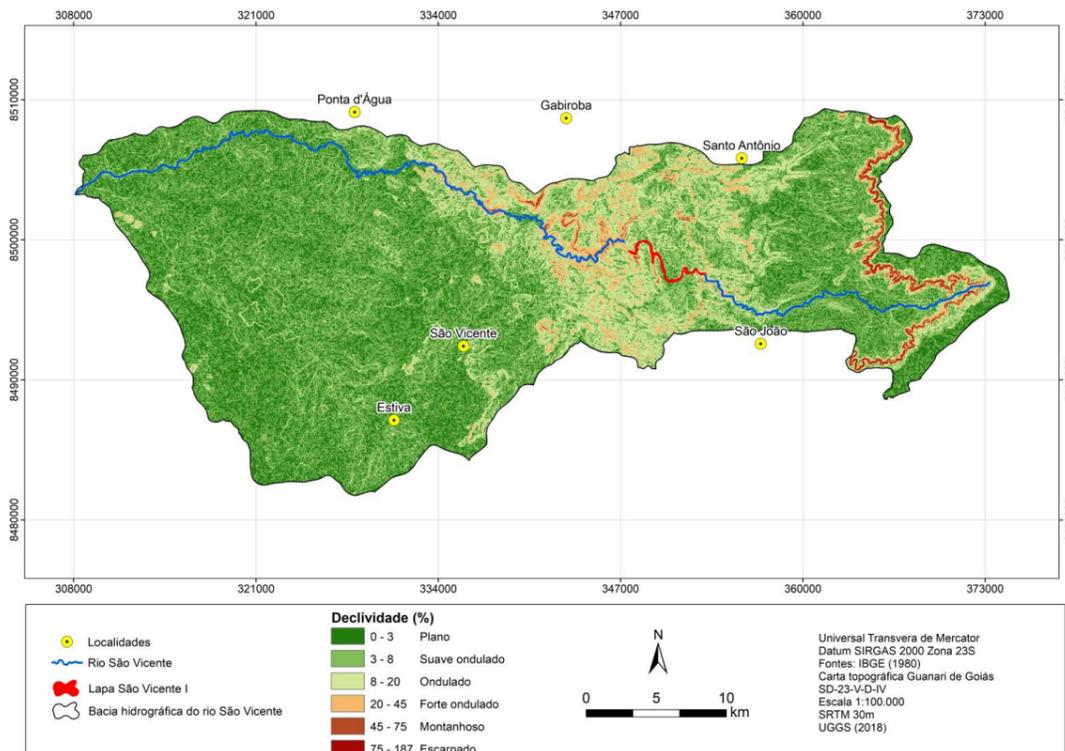


Figura 6.3: Relação comparativa das escalas de dados de declividade no estudo das cavernas

Na bacia hidrográfica do rio Paranã a estruturação do *front* de cuesta, associada ao recuo das escarpas areníticas, à exposição da litologia carbonática subjacente e à atuação da rede de drenagem, são os principais elementos da formação e desenvolvimento das cavernas. As características litoestruturais no entorno do Vão do Paranã (Figura 6.4) marcam a continuidade de carbonatos subjacentes a arenitos, o que permite interpretar transformações no relevo.

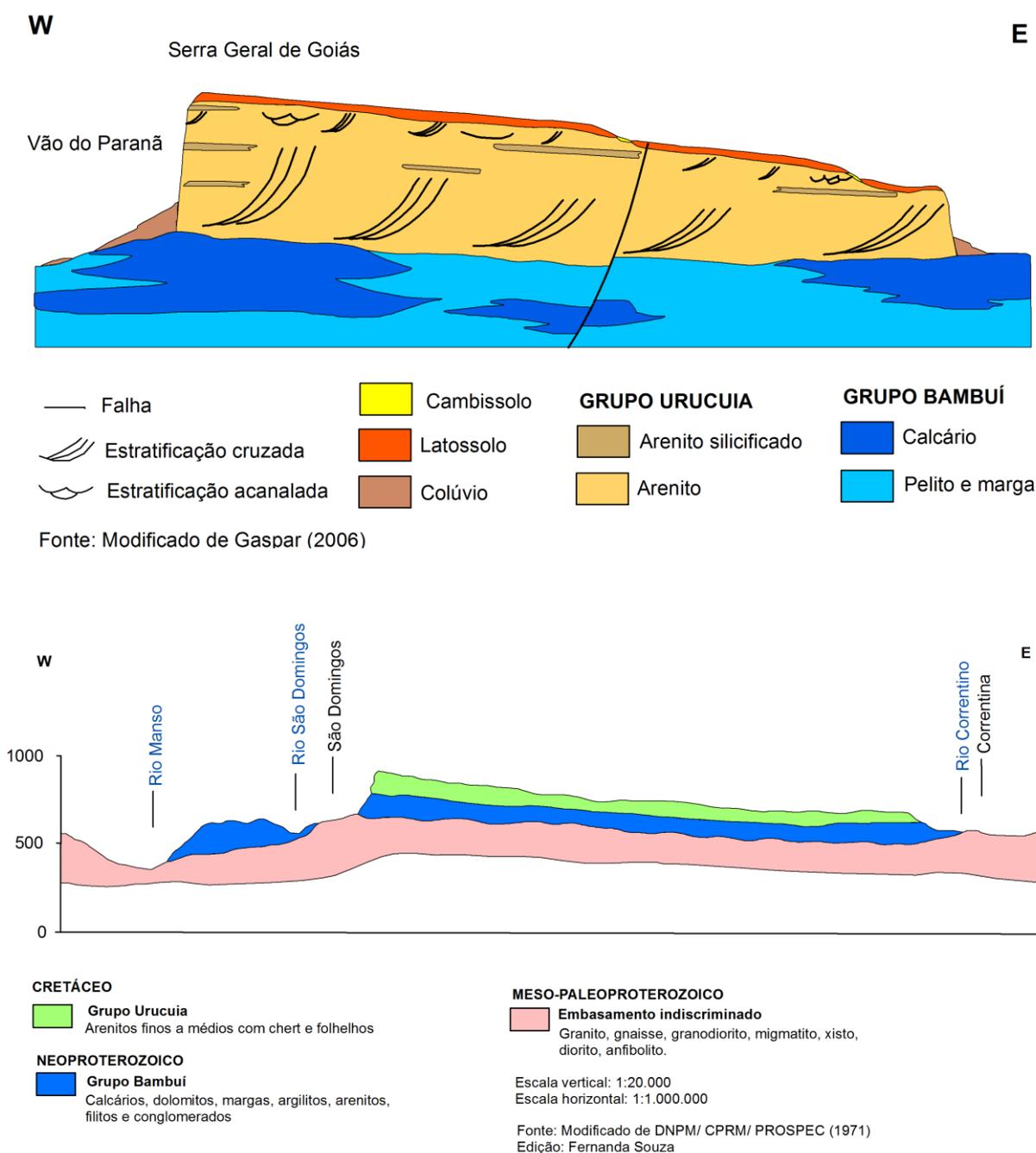


Figura 6.4: Perfis litoestratigráfico da região do Vão do Paranã e entorno

Fonte: modificado de Gaspar (2006) e DNPM/ CPRM/ PROSPEC (1971)

Assim, o modelo evolutivo de desenvolvimento do relevo regional é marcado pela rede de drenagem, que infiltra no material pedológico e nas rochas pelas estruturas geológicas. Isso causa a dissolução das rochas carbonáticas subjacentes e a formação de cavernas oclusas. Os processos erosivos e dissolutivos continuam e, posteriormente, exumam as rochas carbonáticas. Com a exumação das rochas carbonáticas, a dissolução e dissecação se intensificam. Assim, surgem dolinas, sumidouros e cavernas. Essas feições funcionam como níveis de base, que controlam o desenvolvimento do relevo à montante. As áreas à jusante das cavernas se evoluem e formam paisagem planas ou suavizadas, com presença de mogotes.

Dessa forma, à medida que ocorre dissolução e recuo lateral das vertentes, novas cavernas, anteriormente oclusas, ficam expostas e passam a ampliar-se. Já as cavernas anteriormente expostas se abatem, à medida que a área entra em equilíbrio com o nível de base. Com isso, ficam na paisagem apenas *canyons*, pontes, arcos, vales secos e outras feições do relevo cárstico. Nesse contexto, a morfologia da Lapa São Vicente I e do relevo na bacia hidrográfica do rio São Vicente demonstra que as cavernas contribuem para o recuo das escarpas da cuesta. Essa afirmação está associada: 1) aos fatores associados ao desenvolvimento das cavernas e 2) às influências das cavernas nos processos geomorfológicos gerais na referida bacia hidrográfica.

Os acamamentos litológicos são condicionantes essenciais do desenvolvimento da Lapa São Vicente I, uma vez que favorecem a penetração da água fluvial nos maciços, o que permite a formação de sumidouros e cavernas. As características morfológicas dessa caverna mostram que a atividade fluvial e fluviocárstica, disponibilidade hídrica e o relevo à montante condicionaram a existência de morfologias espeleológicas sinuosas, arredondadas e marcadas por drenagens ativas. O contexto da bacia hidrográfica do rio São Vicente é marcado por cavernas que, como a Lapa São Vicente I, demonstram influências de agentes exógenos na sua elaboração.

Verifica-se que as cavernas e outras feições cársticas associadas (como maciços e sumidouros) recebem influências de elementos geomorfológicos gerais (como declividade, incisão fluvial, acidez hídrica, vazão fluvial, entre outras variáveis) na bacia hidrográfica do rio São Vicente. Além disso, as cavernas e outras feições cársticas também interferem no relevo do entorno, pois controlam diretamente o recuo das escarpas da Serra Geral de Goiás. Além disso, a Lapa São Vicente I e demais cavernas do entorno possuem desníveis próximos ou superiores a 100m (AULER *et al.*, 2001), o que aumenta o potencial dissolutivo, bem como amplia a erosão nas escarpas associadas a arenitos dos Grupos Urucuia e Areado. Reitera-se, assim, a importância do ambiente cárstico no controle dos processos

geomorfológicos da superfície terrestre local. Registra-se que a dissolução, o desenvolvimento das cavernas e seus abatimentos também contribuem para os processos geomorfológicos gerais.

Na bacia hidrográfica do rio São Vicente são verificadas diferentes etapas de desenvolvimento do relevo cárstico (Figura 6.5):

- 1) entre a Serra Geral de Goiás e a Serra do Calcário se observa a existência de sumidouros, cavernas e maciços sulcados. Em geral, o relevo nessa área é composto por escarpas, superfícies irregulares, onduladas e declivosas;
- 2) da Serra do Calcário até as proximidades de São Vicente, em São Domingos (GO), registra-se a presença de algumas cavernas, residuais e mogotes intercalados por relevo suavizado;
- 3) das proximidades de São Vicente até a foz da drenagem homônima, há relevo plano, solos espessos, predomínio de planícies e de processos deposicionais.

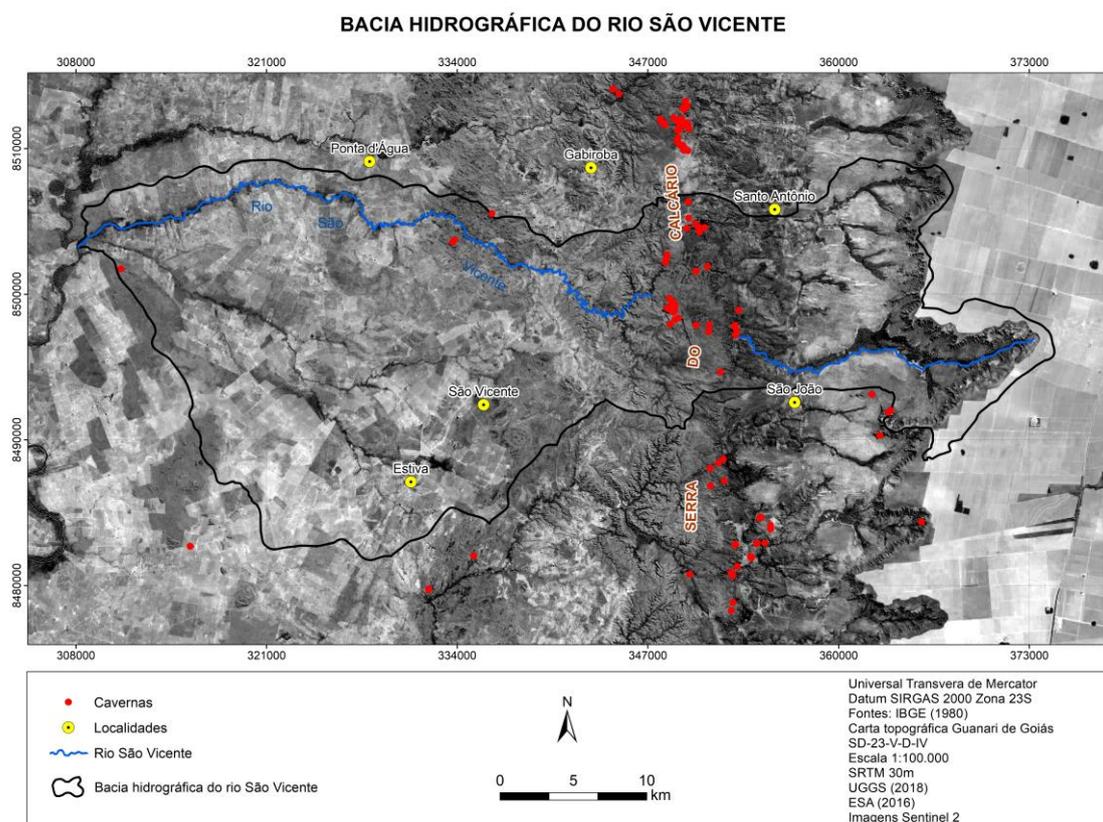


Figura 6.5: Superfície geomorfológica na bacia hidrográfica do rio São Vicente

A identificação dessas etapas se fundamenta nos argumentos de evolução do relevo cárstico apresentados por Ford e Williams (2007) e Kohler (2001). Com isso, compreende-se

que à medida que ocorrem os processos dissolutivos, o relevo cárstico se reconfigura e condiciona: a) surgimento de cavernas e desenvolvimento dos Patamares do Paranã (Figura 6.6, 1); b) recuo das escarpas de cuesta, formação de maciços e mogotes (Figura 6.6, 2) e c) formação de depressões, áreas deposicionais planas, redução das áreas de patamares, supressão de algumas cavernas e desenvolvimento de novos maciços e cavernas (Figura 6.6, 3).

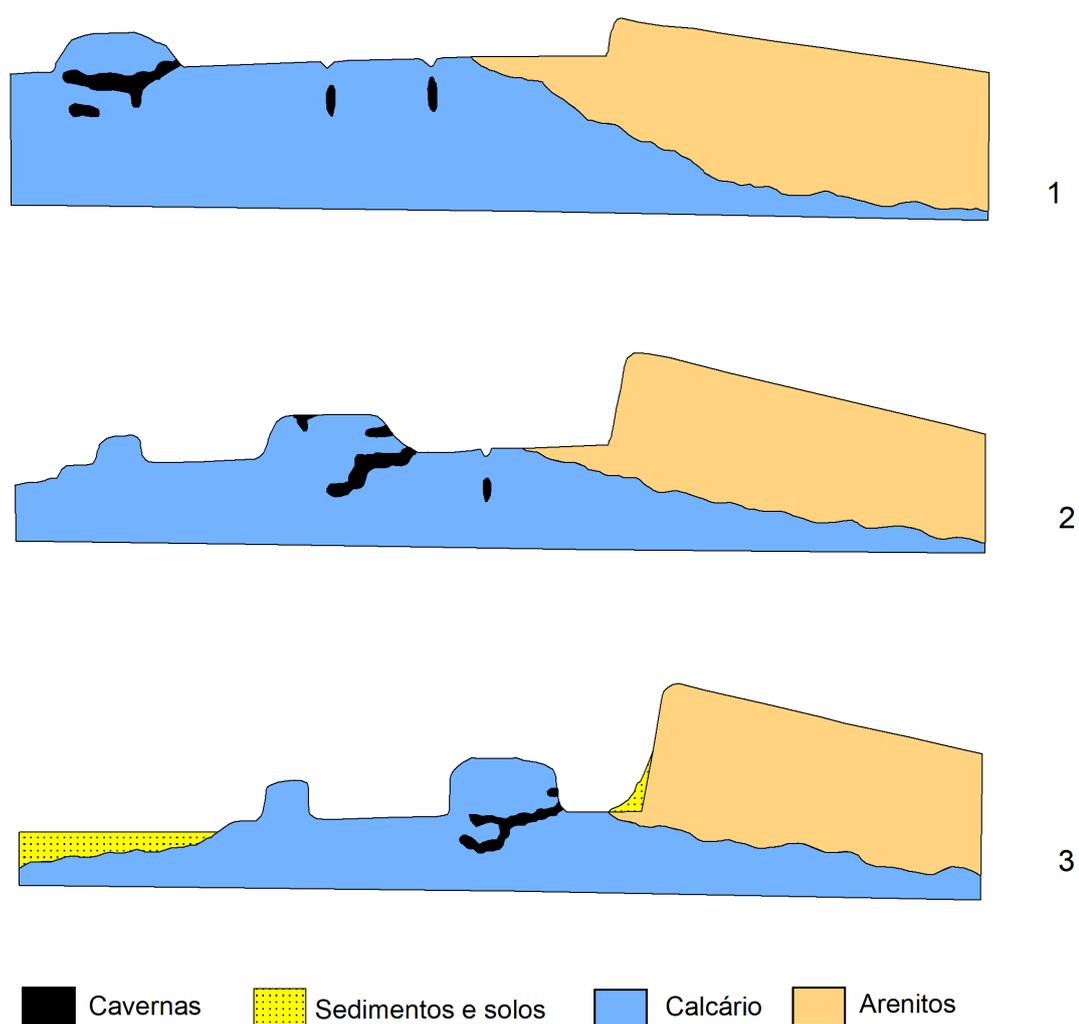


Figura 6.6: Modelo de desenvolvimento do relevo na bacia hidrográfica do rio São Vicente

Nessa perspectiva, os processos evolutivos do relevo na área de estudo estão associados aos seguintes fatores: a) surgimento de novos maciços e cavernas; b) a Serra do Calcário se tornará um conjunto de mogotes e as atuais cavernas serão menores e/ou

inexistentes e c) os atuais mogotes serão dissolvidos e erodidos, tornando-se, assim, áreas planas e deposicionais.

6.2. O papel da evolução do relevo nas cavernas e do desenvolvimento das cavernas no relevo: interrelação entre as cavernas e transformações gerais do relevo nas bacias hidrográficas dos rios Tocantins/Araguaia, Paranã e São Vicente

As reflexões realizadas ao longo da tese permitem constatar interações de processos geomorfológicos em diferentes escalas espaciais ao longo do tempo. Além disso, identifica-se a participação das cavernas nas transformações do relevo do entorno e na expansão de área das bacias hidrográficas dos rios Tocantins/Araguaia, Paranã e São Vicente (Quadro 6.5). Em todas as unidades espaciais analisadas, as cavernas interferem e recebem interferências de níveis de base e capturas fluviais, que, por sua vez, refletem diretamente em processos geomorfológicos de pequenas e grandes unidades de relevo.

Quadro 6.5: **Relações entre espaço, tempo, processos predominantes e contribuições das cavernas no relevo do entorno**

Unidade espacial bacia hidrográfica	Escala temporal geomorfológica ³⁰	Processos predominantes	Principal reflexo dos processos na geomorfologia	Contribuições das cavernas no relevo
Tocantins/Araguaia	Longa	Dissolução Erosão Aplainamento Deposição		Indireta
Paraná	Longa e média	Dissolução Erosão Aplainamento	Níveis de base e capturas fluviais	Direta
São Vicente	Média	Dissolução Deposição		Direta

A configuração espacial da bacia hidrográfica do rio Tocantins/Araguaia e das unidades de relevo contidos nela é resultante de processos que atuaram em longa escala

³⁰ A determinação de longa, média e curta escala temporal geomorfológica tem como base a escala geológica, a partir do Cenozoico e os fundamentos de Summerfield (1991), Ross (2001), Ross (2016) e outros autores sobre a atuação dos processos endógenos, exógenos e antrópicos na configuração do relevo.

temporal geomorfológica. Assim, esse relevo provém de um conjunto de processos que envolveram diferentes etapas de soerguimentos vinculados à Faixa Brasília, Cordilheira dos Andes e atividades neotectônicas. Esses processos interferiram diretamente no relevo brasileiro, conforme destacado por Saadi *et al.* (2005), Ross (2016) e outros autores. Além disso, esses eventos determinam a configuração de grandes unidades de relevo, os principais planaltos e depressões da bacia hidrográfica do rio Tocantins/Araguaia e do estabelecimento de nível de base geral, que gera dinâmica fluvial de toda a bacia hidrográfica em análise e suas sub-bacias, entre elas há aquelas vinculadas aos rios Paranã e São Vicente.

Registra-se, também, que ocorreram processos de exumação de rochas subjacentes, erosão, dissolução, aplainamento e deposição de materiais. Esses processos favoreceram a suavização do relevo, formação de patamares, depressões e planícies fluviais que se destacam na paisagem. Todos esses processos, com maior ou menor influência ao longo do tempo, também contribuíram para o estabelecimento de níveis de base, capturas fluviais, entalhamento e migração da rede de drenagem. Nesse aspecto, todos esses fatores contribuem para a existência de cavernas na bacia hidrográfica do rio Tocantins/Araguaia, que estão concentradas, principalmente, no setor SE da referida bacia.

As principais etapas e processos morfogenéticos da região central do Brasil (ROSS, 2001 e 2016) corroboram com os argumentos sobre o desenvolvimento do relevo na bacia hidrográfica do rio Tocantins/Araguaia.

Quadro 6.6: **Etapas de processos morfogenéticos na região central do Brasil**

1. Formação do Cinturão Orogenético Brasília (Proterozoico);
2. Diferentes fases erosivas;
3. Rebaixamento e aplainamento da superfície
4. Reativação tectônica no Cenozoico, soerguimento e basculamento de blocos geológicos que sustentam os atuais planaltos e chapadas;
5. Erosão e rebaixamento do relevo regional (pós Cretáceo), gerando patamares, depressões intermontanas e do Tocantins, bem como residuais;
6. Entalhamento da rede de drenagem, em função de reativações e soerguimentos de baixa magnitude ao longo do Quaternário superior. Esse processo é constatado nas coberturas Terciário – Quaternárias presentes nas depressões e terraços de rios como o Tocantins.

Fonte: modificado a partir de Ross (2001; 2016)

As cavernas, por sua vez, também interferem no relevo e expansão da bacia hidrográfica do rio Tocantins/Araguaia, visto que elas são feições diretamente associadas às atividades hidrológicas e estabelecimento de níveis de base. Entretanto, nessa escala de trabalho, as cavernas possuem contribuições indiretas e pontuais, uma vez que as unidades geotectônicas brasileiras coincidem de forma proeminente nas principais unidades geomorfológicas.

O relevo na bacia hidrográfica do rio Paranã está vinculado a processos de longa e média escala temporal. Afinal, essa área possui unidades geomorfológicas que registram influências de: a) soerguimentos, que resultaram na formação da unidade geomorfológica da Chapada dos Veadeiros e b) estabelecimento do *front* de cuesta na margem E da bacia hidrográfica. Registra-se que o surgimento do *front* de cuesta mudou a dinâmica da região e condicionou a formação da bacia hidrográfica do Paranã e, posteriormente, a ampliação da bacia hidrográfica do rio Tocantins/Araguaia. Nessa bacia hidrográfica se desenvolveram planaltos, chapadas e cuestras. À medida que a área passou por processos de dissolução, erosão e aplainamento, ocorreram retrabalhamentos das unidades geomorfológicas, assim como o surgimento e ampliação de patamares, planícies e depressões.

Nesse contexto, a atuação hidrológica contribui em todos os processos exógenos. Além disso, Silva (2018) identifica cotovelos de drenagens, entre outras áreas, na região entre Formosa (GO) e Aurora do Tocantins (TO). Assim, a dinâmica hidrográfica e os processos dissolutivos na bacia hidrográfica do rio Paranã contribuem para: a) expansão de área da bacia do rio Tocantins/Araguaia; b) estabelecimento de outros níveis de base regionais; c) intensificação de aplainamento e suavização do relevo regional; d) evolução do relevo cárstico, intensificação da retração lateral das escarpas da Serra Geral de Goiás, surgimento e abatimento de cavernas e e) expansão de planícies e depressões. Assim, o rio Paranã contribui com a bacia hierarquicamente superior, à medida que erode a Serra Geral de Goiás. Nesse sentido, em concordância com Silva (2018), o rio Tocantins tende a ganhar áreas atualmente pertencentes à bacia hidrográfica do rio São Francisco.

Nessa escala espacial, as cavernas possuem influência direta na reorganização da rede de drenagem e na configuração geomorfológica existente. Afinal, as migrações de algumas drenagens, suas capturas, surgências e ressurgências estão associadas à evolução espeleológica. Esse fator impulsiona a dissolução, erosão remontante, surgimento de cavernas e maciços, bem como a suavização do relevo e expansão das áreas vinculadas aos rios Paranã e, conseqüentemente, à bacia hidrográfica do rio Tocantins/Araguaia. Portanto, nessa escala de trabalho, as cavernas interferem diretamente na geomorfologia do entorno.

Na bacia hidrográfica do rio São Vicente, o relevo atual está associado, majoritariamente, à média escala temporal. Nessa área, os processos de dissolução e deposição de materiais possuem maior influência na configuração geomorfológica. A presença de áreas planas e suavizadas, mogotes, maciços, cavernas, sumidouros, ressurgências e patamares denotam predomínio de dissolução e deposição.

A morfologia da Lapa São Vicente I em termos de projeção horizontal (10.130 m), desnível (140 m), planimetria dendrítica, características das paredes, tetos, piso e seção transversal demonstram que a atividade fluvial e acamamento das rochas carbonáticas são fatores decisivos na espeleologia nessa escala de trabalho. Assim, as cavernas expressam, diretamente, as influências dos fatores externos no seu desenvolvimento. Especialmente nessa escala, as cavernas e outras feições cársticas a elas vinculadas interferem diretamente na organização da bacia fluvial e no relevo da superfície. Afinal, a caverna, seus sumidouros e maciços representam níveis de base locais (JENNINGS, 1971; GUYOT *et al.*, 1996; RODET, 1996; PILÓ, 1998; SAURO, 2012). Com isso, em geral, aumenta-se a vazão das drenagens controladas pelos sumidouros e maciços. Esse processo contribui para ampliar as cavernas e, concomitantemente, para acelerar a dissolução e erosão das áreas superficiais à montante. Dessa forma, processos cársticos subterrâneos e em superfície se retroalimentam. Assim, ao longo do tempo, os tetos das cavernas se abatem por alívio de tensão e resultam na redução das dimensões das cavernas, assim como condicionam a formação de *canyons*, segmentação de maciços, formação de mogotes, aplainamento de áreas e expansão da área da bacia.

As cavernas são feições diretamente associadas à erosão do *front* de cuesta do Parana (ou Serra Geral de Geral) e à expansão para leste da bacia hidrográfica do rio São Vicente. Nesse sentido, percebem-se interrelações entre cavernas, processos geomorfológicos gerais e as dinâmicas das bacias hidrográficas. Registra-se que conjuntos de cavernas são feições geomorfológicas, cujas influências em unidades geomorfológicas são perceptíveis em pequenas e médias escalas. Contudo, a médio e longo período, a proximidade entre as Províncias Espeleológicas ou Regiões Cársticas de Bambuí e Paranoá favoreceram para a configuração atual de grandes bacias hidrográficas, em especial nos domínios do alto rio Tocantins.

Nesse sentido, interpreta-se que a bacia hidrográfica do rio Tocantins/Araguaia estava limitada a leste por orografia composta por rochas metamórficas dos Grupos Paranoá e Araí. Assim, as áreas compostas por arenitos dos Grupos Urucuia e Areado representavam planalto vinculado à outra bacia hidrográfica. Após o surgimento do *front* de cuesta com alinhamento N-S, houve reorganização na rede de drenagem, em função do estabelecimento de novo

divisor hidrográfico, que segmentou o antigo planalto. Com esse processo, as drenagens do reverso da cuesta passaram a compor a bacia hidrográfica do rio São Francisco.

MUDANÇAS DE ÁREA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO TOCANTINS/ARAGUAIA

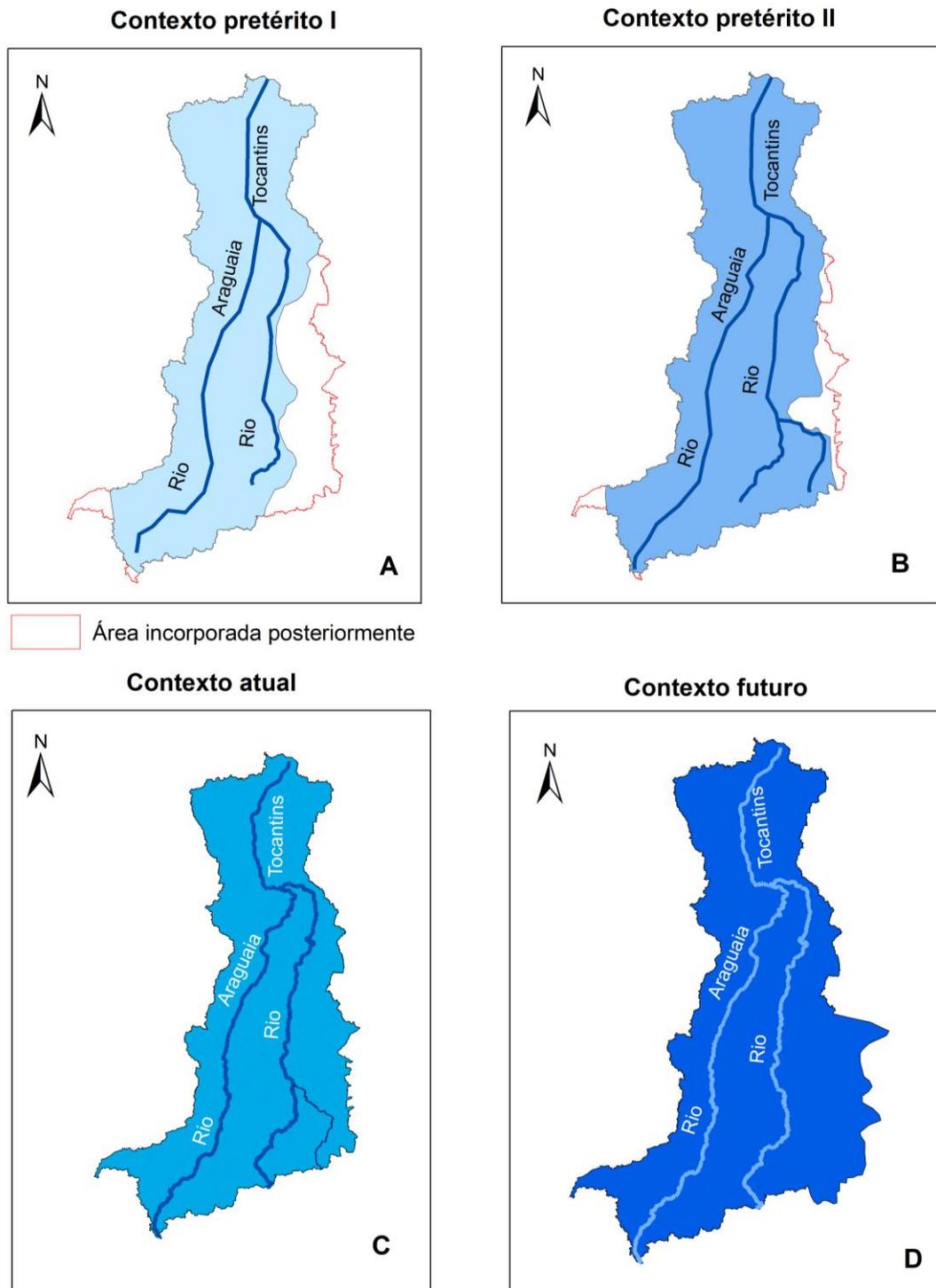


Figura 6.7: Processo de mudança na área da bacia hidrográfica do rio Tocantins/Araguaia

As drenagens a oeste do *front* de cuesta formaram a atual bacia hidrográfica do Paranã e eram controladas pelas feições orográficas compostas por rochas quartzíticas. Nessa área os processos dissolutivos contribuíram para a formação das cavernas. Posteriormente, a bacia hidrográfica do rio Tocantins/Araguaia ganhou área rumo a leste, o que potencializa os processos erosivos das escarpas da Serra Geral de Goiás e Tocantins e favorece os processos dissolutivos das rochas carbonáticas subjacentes.

Dessa forma, a bacia hidrográfica do rio Tocantins/Araguaia obteve as características morfológicas atuais. A perspectiva para o cenário futuro é que essa bacia expanda áreas para leste. A Figura 6.7 sintetiza as principais expansões dessa bacia hidrográfica.

Sinaliza-se a importância de estudos mais aprofundados para a compreensão das transformações dessa unidade de planejamento. Todavia, essas interpretações mostram que um conjunto de cavernas interfere na transformação do relevo e da rede hidrográfica, o que condiciona a expansão de pequenas e grandes bacias hidrográficas. Nesse sentido, analisar o patrimônio espeleológico em diferentes escalas contribui para a compreensão das transformações geomorfológicas ocorridas ao longo do tempo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A Geomorfologia permite integrar os elementos do meio estudado e suas interrelações. Com essa premissa é que se desenvolveu a análise multiescalar do contexto das cavernas desenvolvidas em rochas carbonáticas nas bacias hidrográficas dos rios Tocantins/ Araguaia, Paranã e São Vicente. Dessa forma, os resultados obtidos mostram as influências do contexto litoestrutural e geomorfológico no desenvolvimento dessas cavernas. Essas influências ocorrem de forma diferenciada, conforme a escala estudada.

Na bacia hidrográfica do rio Tocantins/Araguaia, em geral, o contexto geotectônico interfere diretamente na configuração do relevo regional e, conseqüentemente, na distribuição de cavernas desenvolvidas em rochas carbonáticas. As cavernas associadas a rochas carbonáticas se localizam, predominantemente, na parte SE dessa bacia hidrográfica e estão situadas no contexto das rochas do Grupo Bambuí e Cráton do São Francisco. Verifica-se que, nessa área, a exumação das rochas carbonáticas e desenvolvimento do relevo cárstico estão associados à reorganização da rede de drenagem devido ao estabelecimento do Oceano Atlântico como nível de base do rio Tocantins. Esse processo resulta no recuo lateral das escarpas da Serra Geral de Goiás, erosão das rochas areníticas e dissolução das rochas carbonáticas subjacentes. Assim, esse processo associado às transformações geomorfológicas, declividade das escarpas, disponibilidade hídrica, condições climáticas tropicais, gradiente hidráulico, entre outras características favoreceram formação e transformação do relevo. Além disso, a alteração no nível de base geral interfere na reorganização das redes de drenagens em diferentes hierarquias fluviais.

Na bacia hidrográfica do rio Paranã, as cavernas desenvolvidas em rochas carbonáticas se localizam ao longo do eixo N-S da parte leste da bacia. Constatou-se que a maioria das cavernas (59,98%) está associada ao Grupo Bambuí, Formação Lagoa do Jacaré. Além disso, a transição das formações litológicas do Grupo Bambuí que estão organizadas na direção N-S é concordante com a localização geral das cavernas. Verificou-se que as estruturas geológicas na bacia hidrográfica do rio Paranã seguem as direções NW-SE e N-S. A distribuição espacial demonstra que as estruturas com direção N-S se situam na parte leste da bacia.

Além disso, o *input* de drenagens com nascentes em áreas areníticas, o ácido silicoso presente nas rochas areníticas e a declividade das escarpas do *front* de cuesta contribuem para a vazão e acidez das águas que dissolvem as rochas carbonáticas. Registra-se que a maioria das cavernas se desenvolve nos Patamares do Paranã. Nesse sentido, constata-se que apesar da heterogeneidade de fatores associados às cavernas na bacia hidrográfica do Paranã, a

litoestrutura, instalação do *front* de cuesta e disponibilidade hídrica são os principais elementos associados aos processos dissolutivos.

Na Lapa São Vicente I, as características morfológicas da planta baixa e cortes transversais da caverna demonstram que a atuação hidrológica na rocha encaixante é o principal fator de seu desenvolvimento. Os resultados do índice de relação declividade-extensão da drenagem, bem como o mapeamento de corredeiras e quedas d'água na caverna e os resultados bibliográficos sobre a vazão no rio São Vicente na estação seca permitem constatar que a declividade local associada à disponibilidade hídrica e aos acamamentos das rochas são fatores fundamentais para dissolução e desenvolvimento da Lapa São Vicente I. Considerando os trabalhos de campo exploratórios realizados, recomenda-se o desenvolvimento de estudos sobre a dinâmica fluviocárstica e os remanescentes de cavernas na região.

A análise conjunta do trabalho registra correlações concordantes entre as escalas espaciais e processos geomorfológicos. Afinal, as cavernas, bacias hidrográficas de diferentes ordens e unidades geomorfológicas estão interligadas de forma sistêmica. Destaca-se a influência das cavernas em diferentes unidades hidrográficas e, principalmente, no relevo das bacias hidrográficas dos rios São Vicente e Paranã.

A partir do trabalho desenvolvido, verifica-se que as hipóteses desta tese são parcialmente confirmadas. Comprova-se que a distribuição de cavernas em rochas carbonáticas na bacia hidrográfica do rio Tocantins/Araguaia está condicionada às características litoestruturais. Constatou-se que Cherem e Varajão (2014) e Pôssas e Cherem (2016) já haviam afirmado que as cavernas na região do Paranã estavam associadas às áreas de maiores declividades. Nesse caso, este trabalho corrobora com as afirmações dos referidos autores e registra que a declividade, disponibilidade hídrica e instalação do *front* de cuesta favorecem o desenvolvimento do relevo cárstico. Certifica-se a hipótese de que o desenvolvimento das cavernas em rochas carbonáticas na bacia hidrográfica do rio Paranã recebe influências da sua interação com o relevo regional. Confirma-se a hipótese de que o desenvolvimento da Lapa São Vicente I está associado a processos dissolutivos, declividade e dinâmica hidrográfica subsuperficial.

Verifica-se que o desenvolvimento do relevo na bacia hidrográfica do rio São Vicente é influenciado diretamente pela presença de cavernas. Afinal, constata-se que a Serra do Calcário, seus sumidouros e cavernas interferem no relevo situado à montante e à jusante desse ponto. Além disso, o relevo situado à jusante da Serra do Calcário é, predominantemente, plano a suave ondulado e marcado pela presença de mogotes. Portanto, o

relevo cárstico modifica a dinâmica hidrológica, que se reorganiza e promove a erosão do relevo não carbonático.

Em termos metodológicos, trabalhar com multiescalaridade é um desafio. Observa-se que a disponibilidade de dados georreferenciados gratuitos são geralmente em escalas pequenas e, portanto, apresentam informações generalizadas. Assim, recomenda-se fomento e investimento do poder público em equipamentos e pesquisas para estudos em escalas de detalhe para melhor compreensão dos fenômenos de evolução do relevo e seus reflexos na organização da paisagem local.

Os mesmos desafios são enfrentados no levantamento de informações de escala temporal. Afinal, essa escala implica compreender as formas e processos ao longo do tempo geológico e geomorfológico. Nas regiões Nordeste, Centro-Oeste e Norte do Brasil, os dados da escala temporal são restritos inclusive para grandes unidades territoriais. Assim, recomenda-se a ampliação da qualidade e quantidade de estudos em várias áreas do conhecimento sobre as transformações paleoambientais, arqueológicas e geomorfológicas que interferiram nas regiões Centro-Oeste, Norte e Nordeste.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. **Plano Estratégico de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica dos Rios Tocantins e Araguaia**: relatório síntese. Brasília: ANA; SPR, 2009. 256p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. **Hidroweb**. 2017. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/>>. Acesso em: 15 outubro 2017.

ALKMIM, Fernando Flecha. Geological Background: a tectonic panorama of Brazil. In: VIEIRA, Bianca Carvalho; SALGADO, André Augusto Rodrigues Salgado; SANTOS, Leonardo José Cordeiro (org.). **Landscapes and landforms of Brazil**. New York: Springer Dordrecht Heidelberg, 2015. p. 9-17.

ALMEIDA, Fernando Flávio Marques de; HASUI, Yociteru; BRITO NEVES, Benjamim Bley de; FUCK Reinardt Adolfo. Províncias Estruturais Brasileiras. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, 8, 1977, Campina Grande. **Anais...** Campina Grande: Sociedade Brasileira de Geologia, 1, 1977. p. 363-392.

ALVARENGA, Carlos José Souza de; DARDENNE, Marcel Auguste. Geologia dos Grupos Bambuí e Paranoá, na Serra de São Domingos, MG. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30, 1978, Recife. **Anais...** Recife: Sociedade Brasileira de Geologia, 2, 1978. p. 546-556.

AULER, Augusto; RUBBIOLI, Ézio; BRANDI, Roberto. **As Grandes Cavernas do Brasil**. Belo Horizonte: A. Auler. Grupo Bambuí de Pesquisas Espeleológicas. 2001. 228p.

AULER, Augusto Sarreiro; PILÓ, Luís Beethoven; SAADI, Allaoua. Ambientes Cársticos. In: SOUZA, Célia Regina de Gouveia *et al.* **Quaternário do Brasil**. Ribeirão Preto: Holos. Associação Brasileira de Estudos do Quaternário (ABEQUA), 2005. p. 321-342.

AULER, Augusto; PILÓ, Luís. Geoespeleologia. **Curso de Espeleologia e Licenciamento Ambiental**. Brasília: ICMBio/ CECAV, 2011. p.25-44.

BAHIA, Ruy Benedito Calliari *et al.* Folha SA.22 Belém. In: SCHOBENHAUS, Carlos *et al.* (eds). **Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo – Folha SA.22 Belém**. Brasília: CPRM, 2004. mapa, color., 84,5 cm x 73,5. Escala 1:1.000.000. Programa Geologia do Brasil.

BAYER, Maximiliano. **Dinâmica do transporte, composição e estratigrafia dos sedimentos da planície aluvial do rio Araguaia**. 2010. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.

BERTONI, Leandro Dybal. Lapa São Vicente I. In: AULER, Augusto Sarreiro; RUBBIOLI, Ézio; BRANDI, Roberto (org.). **As Grandes Cavernas do Brasil**. Belo Horizonte: Grupo Bambuí de Pesquisas Espeleológicas, 2001. p.98-101.

BÖGLI, Alfred. **Karst Hydrology and Physical Speleology**. Berlin: Springer Verlag, 1980. 284p.

BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Projeto RADAMBRASIL. Folha SD.23 – Brasília**: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. v. 29. Rio de Janeiro: MME/ SG, 1982. 660p.

BRASIL. PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA. **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**. Brasília: Brasil, 1988. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm>. Acesso em 18 janeiro 2018.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA. **Instrução Normativa nº2**, de 30 de agosto de 2017. Define a metodologia para a classificação do grau de relevância das cavidades naturais subterrâneas. Brasília: MMA, 2017

BRITO NEVES, Benjamim Bley de. Os Dois “Brasis” Geotectônicos. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, 15, 1991, Recife. **Anais ...** Recife: Sociedade Brasileira de Geologia – Nordeste, n.12, 1991. p.6-8.

CADASTRO NACIONAL DE INFORMAÇÕES ESPELEOLÓGICAS – CANIE. **Dados de Cavernas disponíveis para download**. Brasília: CECAV/ICMBio, 2018. Data de incorporação dos dados: 18/07/2018. Disponível em: <<http://www.icmbio.gov.br/cecav/canie.html>>. Acesso em: 18 novembro 2018.

CAMPOS, José Eloi Guimarães; DARDENNE, Marcel Auguste. Estratigrafia e Sedimentação da Bacia Sanfranciscana: uma revisão. **Revista Brasileira de Geociências**. v.3, n.27, p.269-282, setembro. 1997.

CHEREM, Luis Felipe Soares; VARAJÃO, Cesar Augusto Chicarino. O Papel da Litoestrutura do Carste na Morfodinâmica Cenozoica da Serra Geral de Goiás (GO, TO, BA): aproximações iniciais. **Revista Geonorte**. Manaus, ed. esp. 4, v.10, n.6, p.180-184, outubro. 2014.

CHRISTOFOLETTI, Antônio. **Modelagem de sistemas ambientais**. 1 ed. São Paulo: Blucher, 1999.

COMPANHIA DE PESQUISA E RECURSOS MINERAIS – CPRM. **Mapa geológico do Brasil**. Brasília: CPRM, 2003. mapa, color., 84,5 cm x 73,5. Escala 1:2.500.000.

COMPANHIA DE PESQUISA E RECURSOS MINERAIS – CPRM. **Carta geológica do Brasil ao Milionésimo**. Brasília: CPRM, 2004. mapa, color., 84,5 cm x 73,5. Escala 1:1.000.000. Disponível em <<http://geosgb.cprm.gov.br/downloads/>>. Acesso em: 27 fevereiro 2018.

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE – CONAMA. **Resolução CONAMA nº 347**, de 10 de setembro de 2004. Dispõe sobre a proteção do patrimônio espeleológico. Brasília: DOU nº176, de 13 de setembro de 2004, seção 1, páginas 54-55.

CUNHA, Bernardo Cristovão Colombo da *et al.* Geologia. In: BRASIL. MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. **Projeto Radam**. Folha SC.22 Tocantins: geologia, geomorfologia, solos, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro: MME, 1981. p.20-194.

CVIJIC, Jovan. **Carste**: uma monografia geográfica. 1895. TRAVASSOS, Luiz Eduardo Panisset (trad.); TOTTARO, João Henrique Rettore (rev.). Belo Horizonte: PUCMG, 2017.

CVIJIC, Jovan. Hydrographie souterraine et évolution morphologique du karst. **Recueil des travaux de l'institut de géographie alpine**. v.6, n.4, p.375-426. 1918.

CVIJIC, Jovan. **La Géographie des Terrains Calcaires**. (obra póstuma). Académie Serbe des Sciences et Belgrado, 1960. 212p.

DARDENNE, Marcel Auguste. Síntese sobre a Estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30. 1978, Recife. **Anais...** v.2. Recife: Sociedade Brasileira de Geologia, 1978. p.597-610.

DARDENNE, Marcel Auguste; CAMPOS, José Eloi Guimarães. Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros, GO – sítio de grande beleza cênica do Centro-Oeste brasileiro. In: SCHOBENHAUS, Carlos *et al.* (ed.). **Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil**. 1 ed., v.1. Brasília: DNPM/ CPRM – Comissão Brasileira de Sítios Geológicos e Paleobiológicos (SIGEP), 2002. p. 323-333.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PESQUISAS MINERAIS – DNPRM. COMPANHIA DE PESQUISA E RECURSOS MINERAIS – CPRM. PROSPEC S.A. **Projeto Leste do Tocantins/ Oeste do Rio São Francisco**: síntese dos conhecimentos geológicos na área do

Projeto Leste do Tocantins/ Oeste do Rio São Francisco, até 1971, v.1, 2 e 3. Rio de Janeiro: DNPM/ CPRM, 1971.

DRAGO, Valter Alberto *et al.* Geologia. In: BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL – DNPM. **Projeto Radam**. Folha SD.22 Goiás: geologia, geomorfologia, solos, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro: MME/DNPM, 1981. p.25-298.

DREYBRODT, Wolfgang. **Processes in Karst Systems: physics, chemistry and geology**. New York: Springer Verlag, 1988.

ELLENBERG, Heinz; MUELLER-DOMBOIS, Dieter. **Aims and methods of vegetation ecology**. New York: John Wiley and Sons, 1974.

ETCHEBEHERE, Mario Lincoln *et al.* Aplicação do Índice “Relação Declividade-Extensão – RDE” na Bacia do Rio do Peixe (SP) para Detecção de Deformações Neotectônicas. **Revista do Instituto de Geociências – USP**. São Paulo: USP, v.4, n.2, p.43-56, outubro. 2004.

EUROPEAN SPACE AGENCY – ESA. **Imagens de Satélites Sentinel 2**. Resolução Espacial de 10m. Cenas de 19 julho 2016. Dados disponíveis em: <<http://sentinel-s2-l1c.s3-website.eu-central-1.amazonaws.com/>>. Acesso em: 10 outubro 2016.

EWERS, Robert. **A model for the development of subsurface drainage routes along bedding planes**. 1972. Dissertação (Mestrado) - University of Cincinnati, Cincinnati. Ohio, 1972. 84f.

FARACO, Maria Telma Lins *et al.* Folha SC.22 Tocantins. In: SCHOBENHAUS, Carlos *et al.* (ed.). **Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo – Folha SC.22 Tocantins**. Brasília: CPRM, 2004. mapa, color., 84,5 cm x 73,5. Escala 1:1.000.000. Programa Geologia do Brasil.

FORD, Derek; WILLIAMS, Paul. **Karst Hydrogeology and Geomorphology**. ed. rev. England: John Wiley & Sons Ltda, 2007. 562p.

GASPAR, Márcia Tereza. **Sistema Aquífero Urucuia: caracterização regional e proposta de gestão**. 2006. Tese (Doutorado) - Universidade de Brasília, Brasília, 2006. 158p.

GILLIESON, David. The caves system and karst. In: _____. **Caves: processes, development, management**. Malden: Blackwell Publishers, 1996. p. 1-11.

GREGORY, Kenneth John; WALLING, Desmond Eric. **Drainage basin form and process: a geomorphological approach**. London: Edward Arnold, 1976.

GRUND, Alfred. Der Geographische Zyklus im Karst. **Zeitschrift der Gesellschaft für Erdkunde zu Berlin**: zugl. Organ d. Deutschen Geographischen, n.20, p. 621-640, 1914.

GUERRA, Antônio Teixeira. **Novo Dicionário Geológico Geomorfológico**. 7 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2009.

GUIMARÃES, Fábio Macedo Soares. O Planalto Central e o Problema da Mudança da Capital do Brasil. **Revista Brasileira de Geografia**. Rio de Janeiro: IBGE, n.4, p.3-74, 1949.

GUYOT, Jean Loup *et. al.* Balanço Hidro-geoquímico. In: GUYOT, Jean Loup (org.). **Expedições Espeleológicas Franco Brasileiras – Goiás 94 e 95**. Brasília: GBPE, GRECEO, GSBM, 1996. p. 52-57.

IGLESIAS, Mario; UHLEIN, Alexandre. Estratigrafia do Grupo Bambuí e Coberturas Fanerozoicas no Vale do Rio São Francisco, Norte de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Geociências**. Sociedade Brasileira de Geologia, n.39, v.2, p.256-266, junho. 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Dicionário Brasileiro de Estatística**. 2 ed. Rio de Janeiro: IBGE, 1970.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Glossário Geológico**. Rio de Janeiro: IBGE, 1999. 214p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Manual Técnico de Geomorfologia**. 2 ed. Manuais Técnicos em Geociências, n.5. Rio de Janeiro: IBGE, 2009. 182p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Mapa da Massa de Água do Estado de Goiás**. Rio de Janeiro: IBGE / DSG / SGM. 2014. mapa, color., Escala 1:100.000. Disponível em: <<http://www.sieg.go.gov.br/siegdownloads/>>. Acesso em: 17 novembro 2017.

JANSEN, Débora Campos. Mapa Brasileiro de Potencialidade de Ocorrência de Cavernas. In: ENCONTRO NACIONAL DA ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA EM GEOGRAFIA – ENANPEGE, 9. 2011, Goiânia. **Anais...** Goiânia: Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Geografia, 2011.

JANSEN, Débora Campos; CAVALCANTI, Lindalva Ferreira; LAMBLÉM, Hortência Sousa. Mapa de Potencialidade de Ocorrência de Cavernas no Brasil, na escala 1:2.500.000. **Revista Brasileira de Espeleologia**. Brasília: ICMBio, v. 2, n.1, p. 42-57, outubro. 2012.

JENNINGS, Joseph Newell. **Karst**: an introduction to systematic geomorphology. v.7. Cambridge: The M. I. T. Press, 1971.

JENNINGS, Joseph Newell. **Karst Geomorphology**. Oxford: Basil Blackwel, 1985.

KARMANN, Ivo; SANCHEZ. Luís Enrique. Distribuição das Rochas Carbonáticas e Províncias Espeleológicas do Brasil. **Espeleo-Tema**, São Paulo: Sociedade Brasileira de Espeleologia, n.13, a.9, p. 105-168. 1979.

KARMANN, Ivo. **Carste e Cavernas no Brasil**: distribuição, dinâmica atual e registros sedimentares, breve histórico e análise crítica das pesquisas realizadas no âmbito do IGc USP. 2016. Tese (Livre Docência) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016. 62p.

KNIGHTON, David. **Fluvial form and processes**: a new perspective. London: Hodder Arnold, 1998.

KOHLER, Heinz Charles. **Geomorfologia cárstica na região de Lagoa Santa – MG**. 1989. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989. 113p.

KOHLER, Heinz Charles. Geomorfologia Cárstica. In: GUERRA, Antônio José Teixeira; CUNHA, Sandra Batista. **Geomorfologia**: uma atualização de bases e conceitos. 7º ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2001.

LACERDA FILHO, Joffre Valmório de. *et al.* Folha SD.22 Goiás. In: SCHOBENHAUS, Carlos *et al.* (ed.). **Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo – Folha SD.22 Goiás**. Brasília: CPRM, 2004. mapa, color., 84,5 cm x 73,5. Escala 1:1.000.000. Programa Geologia do Brasil.

LATRUBESSE, Edgardo Manuel; STEVAUX, José Cândido. Características Físico Bióticas e Problemas Ambientais Associados à Planície Aluvial do Rio Araguaia, Brasil Central. **Revista UnG – Geociências**, São Paulo, v.5, n.1, p.65-73. 2006.

LEHMANN, Herbert. Morphological Studies in Java. In: SWEETING, Marjorie Mary (ed). **Karst Geomorphology**: bechmark papers in geology. Hardcover: Hutchinson Ross Publishing Company, 1936. p.320-328.

LIMA, Fernanda Rodrigues de. **Interpretação Paleogeográfica de Sítios Arqueológicos em Solos Arenosos**: o caso do sítio M1 na bacia do médio rio Tocantins (TO). 2015. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015. 181p.

MIRANDA, Evaristo (coord.). **Brasil em Relevo**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 19 fevereiro 2018.

MOREIRA, Helena Gladis; CHEREM, Luis Felipe Soares. Mapeamento geomorfológico de detalhe dos depósitos inconsolidados no limite leste do Vão do Paranã, nordeste do estado de Goiás. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 12, 2018, Crato. **Anais... Crato: União de Geomorfologia Brasileira**, 2018.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION – NASA. Landsat Science, Landsat 8 bands, 2015. Disponível em: <<https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-8/landsat-8-bands/>>. Acesso em: 15 julho 2016.

PALMER, Arthur N. Origin and Morphology of Limestone Caves. **Geological Society of America Bulletin**, New York, v.103, p.1-21, janeiro. 1991.

PALMER, Arthur N. **Cave Geology**. Dayton: Cave Books, 2009. 454p.

PEREIRA, Vitor Hugo Campelo; CESTARO, Luiz Antônio. A unidade geoambiental tabuleiro costeiro e o planejamento municipal: o caso de Senador Georgino Avelino/ RN. **Revista Geonorte**, Manaus, edição especial, v.3, n.4, p. 390-401. 2012.

PILÓ, Luís Beethoven. **Morfologia Cárstica e Materiais Constituintes**: dinâmica e evolução da Depressão Poligonal Macacos – Baú – Carste de Lagoa Santa, MG. 1998. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998. 283p.

PILÓ, Luís Beethoven; AULER, Augusto. Introdução à Espeleologia. In: CENTRO NACIONAL DE PESQUISA E CONSERVAÇÃO DE CAVERNAS - CECAV. **III Curso de Espeleologia e Licenciamento Ambiental**. Brasília: CECAV/Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, 2011. p. 7-23.

PINTO, Maria Novaes. Estudo de algumas cavernas do entorno de Brasília. **Boletim Goiano de Geografia**, Goiânia, v.4, 5, 6, n.1/2, p.77-91, janeiro/dezembro. 1984, 1985, 1986.

PLUMMER, L. N. ; WIGLEY, T. M. L. ; PARKHURT, D. L. The kinetics of calcite dissolution in CO₂ water systems at 5 to 60°C and 0.0 to 1.0 atm CO₂. **American Journal of Science**. v.278, p.179-216, fevereiro. 1978.

PÔSSAS, Isabela Braichi; CHEREM, Luis Felipe Soares. Diferenças Morfológicas do Exocarste da Borda Noroeste do Grupo Bambuí e suas Relações com a Morfodinâmica Regional do Vão do Paranã (GO): resultados preliminares. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA – SINAGEO, 10, 2016, Maringá. **Anais...** Maringá: União de Geomorfologia Brasileira, 2016.

PRESS, Frank. O Ciclo Hidrológico e a Água Subterrânea. In: _____. **Para Entender a Terra**. 4 ed. São Paulo: Bookman, 2006. p. 313-337.

QUEIROZ, Gustavo Lopes; SALAMUNI, Eduardo; NASCIMENTO, Edenilson Roberto do. AzimuthFinder: ferramenta para extração de dados e apoio na análise estrutural. **Revista do Instituto de Geociências - USP**, São Paulo: Série Científica Geologia USP, v.14, n.1, p.69-80, março. 2014.

RENAULT, Philippe. Contribution a l'étude des actions mécaniques et sédimentologiques dans la spéléogénèse. **Annales de Spéléologie**, Dijon, v.1, n.22. 1968.

RIOS, Antônio José Wilman; OLIVEIRA, Virlei Álvaro de. Pedologia: levantamento exploratório de solos. In: BRASIL. MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. **Projeto RADAMBRASIL. Folha SD.22 – Goiás: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra**. Rio de Janeiro: Ministério das Minas e Energia, 1981. p. 377-508.

RODET, Joel. Registros Carstológicos. In: GUYOT, Jean Loup (org.). **Expedições Espeleológicas Franco Brasileiras – Goiás 94 e 95**. Brasília: GBPE, GREGEO, GSBM, 1996. p. 24-42.

ROLFF, P. A. M. de Almeida. Princípios de Espeleologia Exterior. **Revista Espeleologia**, Ouro Preto, ano IV, n.5,6, 1973, p. 2-19, novembro. 1973.

ROSATELLI, José Silva *et al.* Levantamento Exploratório de Solos da Folha SB.22 Araguaia e parte da Folha SC.22 Tocantins. In: BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Projeto Radam. Folha SB.22 Araguaia e parte da Folha SC.22 Tocantins: geologia, geomorfologia, solos, vegetação e uso potencial da terra**. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Produção Mineral, 1974.

ROSS, Jurandy Luciano Sanches; SANTOS, Levi Makert dos. Geomorfologia. In: BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Projeto Radam. Folha**

SD.21 Cuiabá: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Produção Mineral, 1982.

ROSS, Jurandyr Luciano Sanches. O registro cartográfico dos fatos geomórficos e a questão da taxonomia do relevo. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, n. 6, p.19-30. 1992.

ROSS, Jurandyr Luciano Sanches. **Geomorfologia e Geografia Aplicadas à Gestão Territorial:** teoria e metodologia para o planejamento ambiental. 2001. Tese (Livre Docência) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001. 322f.

ROSS, Jurandyr Luciano Sanches. O Relevo Brasileiro no Contexto da América do Sul. **Revista Brasileira de Geografia**, Rio de Janeiro, v.61, n.1, p.21-58, janeiro/junho. 2016.

SAADI, Allaoua *et al.* Neotectônica da Plataforma Brasileira. In: SOUZA, Célia Regina de Gouveia *et al.* **Quaternário do Brasil**. Ribeirão Preto: Holos, 2005. p. 211-234.

SALAMUNI, Eduardo. **Tectônica da bacia sedimentar de Curitiba (PR)**. 1998. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1998. 235f.

SALAMUNI, Eduardo; EBERT, Hans Dirk; HASUI, Yociteru. Morfotectônica da Bacia Sedimentar de Curitiba. **Revista Brasileira de Geociências**. v. 34, n. 4, p. 469-478, dezembro. 2004.

SANTOS, Rozely Ferreira dos. **Planejamento Ambiental:** teoria e prática. São Paulo: Oficina de Textos, 2004.

SANTOS, Raphael David dos *et al.* **Manual de Descrição e Coleta de Solo no Campo**. 7 ed. ampl. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2015a.

SANTOS, Marquiline da Silva; FREITAS, Gilvonete Maria Araújo de; FURRIER, Max. Mapeamento geomorfológico da área correspondente às folhas Alhandra e Pitimbu 1:25.000 – estados da Paraíba e Pernambuco (Nordeste do Brasil). **Cuadernos de Geografia. Revista Colombiana de Geografia**, Bogotá, v.24, n.1, p.87-99, janeiro/junho. 2015b.

SAURO, Ugo. Closed depressions in karst areas. In: WHITE, William; CULVER, David. **Encyclopedia of Caves**. 2 ed. Washington: Academic Press, 2012. p. 140-155.

SCHOBENHAUS, Carlos *et al.* **Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo - Folha Goiás SD22**. Brasília: DNPM, 2004. mapa, color., 84,5 cm x 73,5. Escala 1:1.000.000. Programa Geologia do Brasil.

SCHOBENHAUS, Carlos *et al.* (ed.). **Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo**. Brasília: CPRM, 2004. mapa, color., 84,5 cm x 73,5. Escala 1:1.000.000. Programa Geologia do Brasil.

SCHUMM, S. A.; LICHTY, R. W. Time, space and casuality in geomorphology. **American Journal of Science**. n.263, p.110-119. 1965.

SCHUMM, S. A. Patterns of alluvial rivers. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**. v.13, p.5-27. 1985.

SILVA, Guilherme Galeão da *et al.* Geologia das Folhas SB.22 Araguaia e parte de SC.22 Tocantins. In: BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL – DNPM. **Projeto Radam. Folha SB.22 Araguaia e parte da folha SC.22 Tocantins: geologia, geomorfologia, solos, vegetação e uso potencial da terra**. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Produção Mineral, 1974. p.10-176.

SILVA, Elen Alvarenga *et al.* Morphology, mineralogy and micromorphology of soils associated to summit depressions of the Northeastern Brazilian coastal al plains. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.5, n.36, p.507-517, setembro/outubro. 2012.

SILVA, Thaís Aparecida. **Morfogênese do Relevo e do Divisor Hidrográfico das Bacias do Tocantins/ Araguaia (Paraná) e São Francisco**. 2018. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE ESPELEOLOGIA – SBE. CNC – **Cadastro Nacional de Cavernas do Brasil**. 2016. Disponível em: <<http://www.sbe.com.br/>>. Acesso em: 10 setembro 2016

SOUZA, João Dalton de *et al.* Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo. Folha SD.23 Brasília. Escala 1:1.000.000. In: SCHOBENHAUS, Carlos *et al.* (ed.). **Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo**. Brasília: CPRM, 2004. mapa, color., 84,5 cm x 73,5. Escala 1:1.000.000. Programa Geologia do Brasil.

SOUZA, Tatiana Aparecida Rodrigues. **O Carste em Mármore na Borda Oeste da Serra do Cipó, MG: investigações acerca da morfodinâmica cárstica**. 2011. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011. 216f.

SOUZA, Tatiana Aparecida Rodrigues; AULER, Augusto (org.). **O Carste de Vazante-Paracatu-Unai**: revelando importâncias, recomendando refúgios. Belo Horizonte: Carste Ciência e Meio Ambiente, 2018.

SOUZA, Fernanda Cristina Rodrigues; SALGADO, André Augusto Rodrigues; SILVA, Thaís Aparecida; CHEREM, Luis Felipe Soares. Caracterização de depressões fechadas no Vão do Paranã, a oeste da Serra Geral de Goiás. **Revista Geografia, Ensino e Pesquisa**, Santa Maria, v.22, e.20, p.1-8. 2018.

STEVANUX, José Cândido; LATRUBESSE, Edgardo Manuel. **Geomorfologia Fluvial**. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.

SWEETING, Marjorie Mary. **Karst Landforms**. London: Macmillan, 1972.

SUGUIO, Kenitiro; FULFARO, Vicente José. Geologia da Margem Ocidental da Bacia do Parnaíba (Estado do Pará). **Boletim IG**, São Paulo, v.8, p. 31-54. 1977.

SUMMERFIELD, Michael A. **Global Geomorphology**: an introduction of the study of landforms. Essex: Longman Scientific and Technical, 1991. 537p.

SUPERINTENDÊNCIA DE GEOLOGIA E MINERAÇÃO – SIC/GOIÁS. **Mapa da Hidrografia do Estado de Goiás**. 2014a. mapa, color. Escala 1:100.000. Goiânia: Macrozoneamento Agroecológico e Econômico do Estado de Goiás (MacroZAE). Disponível em: <<http://www.sieg.go.gov.br/siegedownloads/>>. Acesso em: 17 novembro 2017.

SUPERINTENDÊNCIA DE GEOLOGIA E MINERAÇÃO – SIC/GOIÁS. **Mapa das Otto Bacias de Goiás**. Mapa das bacias hidrográficas codificadas segundo o método de Otto Pfafstetter do Estado de Goiás. 2014b, mapa, color. Escala 1:250.000. Goiânia: Macrozoneamento Agroecológico e Econômico do Estado de Goiás (MacroZAE). Disponível em: <<http://www.sieg.go.gov.br/siegedownloads/>>. Acesso em: 17 novembro 2017.

THORNBURY, William David. **Principles of Geomorphology**. New York: John Wiley and Sons, 1960. 618p.

TRICART, Jean. **Principes et Méthodes de la Géomorphologie**. Paris: Masson et Cie. Ed. Paris, 1965.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY – USGS. **Earth Explorer**. 2015. Disponível em: <<http://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: 16 abril 2016.

VALENTE, Cidney Rodrigues *et al.* Folha SD.21 Cuiabá. In: SCHOBENHAUS, Carlos *et al.* (ed.). **Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo – Folha SD.21 Cuiabá**. Brasília: CPRM. 2004. mapa, color., 84,5 cm x 73,5. Escala 1:1.000.000. Programa Geologia do Brasil.

VALENTE, Cidney Rodrigues. **Controles Físicos na Evolução das Unidades Geoambientais da Bacia do rio Araguaia, Brasil Central**. 2007. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2007. 163f.

VASCONCELOS, Antônio Maurilio *et al.* Folha SC. 23 Rio São Francisco. In: SCHOBENHAUS, Carlos *et al.* (ed.). **Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo – Folha SC.23 Rio São Francisco**. Brasília: CPRM. 2004. mapa, color., 84,5 cm x 73,5. Escala 1:1.000.000. Programa Geologia do Brasil.

VIEIRA, Juliana Matos *et al.* Contribuição de material amorfo na gênese de horizontes coesos em Argissolos dos Tabuleiros Costeiros do Ceará. **Ciência e Agrotecnologia**, Fortaleza, v.43, n.4, p. 623-632, outubro/dezembro. 2012.

WHITE, P. S.; MC KENZIE, M. D. Remote sensing and landscape pattern in great smoky montains National Park Biosphere Reserve, North Caroline and Tennessee. In: DYER, M. I.; CROSSLEY JR, D. A. (ed). **Coupling of ecological studies with remote sensing**: potentials at four Biosphere Reserves in the United States. Washington: Man and the Biosphere Program, Department of State Publication 9504, Bureau of Oceans and International Environmental Affairs, 1986.

WHITE, William B. **Geomorphology and Hydrology of Karst Terrains**. Oxford: Oxford University Press, 1988. 464p.

WICANDER, Reed; MONROE, James. **Fundamentos de Geologia**. São Paulo: Cengage Learning, 2009.