



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA TERRA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

RAPHAELA ALMEIDA DE SOUZA

**MORFOGÊNESE DA BACIA DO RIO MINERVA - MÉDIO VALE DO
RIO PARAÍBA DO SUL (MG)**

Rio de Janeiro
2022

RAPHAELA ALMEIDA DE SOUZA

**MORFOGÊNESE DA BACIA DO RIO MINERVA - MÉDIO VALE DO
RIO PARAÍBA DO SUL (MG)**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia Do Departamento de Geografia do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro como requisito para a obtenção do título de mestre em Geografia.

Orientador: Prof^a. Dr^a. Telma Mendes da Silva

Rio de Janeiro
2022

CIP - Catalogação na Publicação

S729m Souza, Raphaela Almeida de
Morfogênese da bacia do rio Minerva - Médio vale
do rio Paraíba do Sul (MG) / Raphaela Almeida de
Souza. -- Rio de Janeiro, 2022.
125 f.

Orientadora: Telma Mendes da Silva.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do
Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Programa
de Pós-Graduação em Geografia, 2022.

1. Geomorfologia. 2. Evolução da paisagem
geomorfológica. 3. Domínio de dissecação. 4. Nível de
base local. 5. Parâmetros morfométricos. I. Silva,
Telma Mendes da, orient. II. Título.

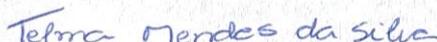
RAPHAELA ALMEIDA DE SOUZA

**MORFOGÊNESE DA BACIA DO RIO MINERVA - MÉDIO VALE DO
RIO PARAÍBA DO SUL (MG)**

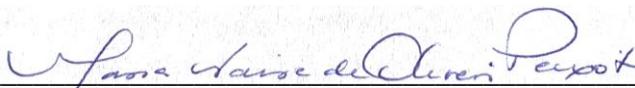
Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia Do Departamento de Geografia do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro como requisito para a obtenção do título de Mestre em Geografia.

Aprovada em: 21/10/2022.

BANCA EXAMINADORA



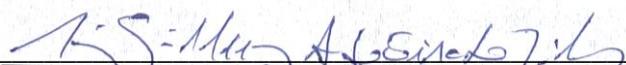
Prof^ª. Dr^ª. Telma Mendes da Silva (Orientadora)
Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)



Prof^ª. Dr^ª. Maria Naíse de Oliveira Peixoto
Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)



Prof. Dr. Marcelo Motta de Freitas
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio)



Prof. Dr. Luiz Guilherme Almeida do Eirado Silva
Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)

Este trabalho é dedicado aos meus queridos pais, familiares e ancestrais.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e ao Programa de Pós-Graduação em Geografia (PPGG), por proporcionarem a minha formação acadêmica.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão de bolsa de mestrado durante grande parte do período da pesquisa.

À minha orientadora Prof^ª. Dr^ª. Telma pela aposta e incentivo desde a banca de defesa do meu TCC a trilhar essa jornada, se fazendo presente em todos os momentos e fortalecendo a proposta da pesquisa.

Ao Prof. Dr. Marcelo Motta por estar acompanhando a evolução dessa pesquisa desde a graduação e por aceitar compor a banca de dissertação.

À Prof^ª. Dr^ª. Maria Naíse e ao Prof. Dr. Luiz Guilherme Eirado por aceitarem compor a banca de dissertação e por demais contribuições.

À Prof^ª. Dr^ª. Mônica Marçal por participar do exame de qualificação e contribuição para o aprimoramento da pesquisa.

Ao Gabriel Loureiro, um agradecimento especial, pela cumplicidade, afeto e escuta nos momentos mais difíceis ao longo desses dois anos de tantas mudanças e desafios.

Às minhas companheiras de trabalho do CEDAPS e IBGE que sempre me apoiaram e proporcionaram um ambiente de trabalho possível de conciliar com as demandas acadêmicas.

Aos amigos que partilharam desse momento atípico de realização do mestrado acadêmico a distância, agradeço pela troca de experiência, cuidado e apoio.

A todas e todos que contribuíram para a concretização desta dissertação, meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

Os estudos de evolução da paisagem geomorfológica têm demonstrado que os principais condicionantes da reorganização fluvial são mudança nos níveis de base, resistência litoestrutural e implicações tectônicas. A morfogênese do relevo da região do sudeste brasileiro é resultado de diversos esforços tectônicos em sua superfície ao longo do tempo, com destaque à orogênese Brasiliana no Pré-cambriano e o Rifte Continental do Sudeste Brasileiro no Cenozoico. Diante disso, a presente pesquisa investiga a morfogênese da bacia do rio Minerva, afluente do rio Paraíba do Sul, a partir de suas influências litoestruturais e evidências de rearranjo fluvial. A operacionalização da pesquisa foi realizada a partir de um conjunto de técnicas baseadas no reconhecimento dos padrões de relevo, configuração da rede de drenagem, mapeamento de níveis de base locais e depósitos sedimentares quaternários, parâmetros morfométricos voltados para análise evolutiva de bacias e reconstituição paleotopográfica. Tais técnicas foram analisadas a partir da compartimentação da bacia em domínios de dissecação. A análise dos lineamentos estruturais demonstra uma disposição prioritária na orientação NE-SW, seguido de NW-SE. Boa parte dos canais principais da bacia apresentaram uma atual condição de relativo “desequilíbrio”, com relação direta com áreas em controle litológico e/ou estrutural, possibilitando a compartimentação da bacia em domínios de dissecação com padrões de relevo distintos, incluindo ainda distintos ambientes de retenção da sedimentação quaternária. A reconstituição paleotopográfica permitiu a criação de perspectivas evolutivas e de processos que atuam na esculturação da paisagem geomorfológica da bacia, com indícios de um quadro evolutivo distinto entre os domínios de dissecação. A pesquisa também possibilitou levantar a hipótese de mudança da direção do percurso do rio principal da bacia por captura fluvial, além outros possíveis processos de captura fluvial na relação entre bacias adjacentes. Por fim, a compartimentação da bacia do rio Minerva a partir de domínios de dissecação se mostrou de grande eficiência para investigação da história evolutiva da conformação do relevo e de sua rede de drenagem.

Palavras-chave: Domínio de dissecação; nível de base local; rearranjo de drenagem; parâmetros morfométricos; Médio Vale do rio Paraíba do Sul.

ABSTRACT

Studies on the evolution of the geomorphological landscape have shown that the main conditioning factors of fluvial reorganization are changes in base levels, lithostructural resistance and tectonic implications. The relief's morphogenesis from southeastern region of Brazil is the result of several tectonic efforts on its surface over time. Brasiliano orogeny in the Precambrian and the Continental Rift of Southeast Brazil in the Cenozoic are the main responsible tectonic events. Therefore, the present research intends to investigate the morphogenesis of the Minerva river basin, a tributary of the Paraíba do Sul river, from its lithostructural influences and evidence of fluvial rearrangement. The operationalization of the research was carried out from a set of techniques. They're based on the recognition of relief patterns, configuration of the drainage network, mapping of local base levels and quaternary sedimentary deposits, morphometric parameters aimed at evolutionary analysis of basins and paleotopographic reconstitution. Such techniques were analyzed from the compartmentalization of the basin into dissection domains. The analysis of the structural lineaments demonstrates a priority arrangement in the NE-SW orientation, followed by NW-SE. A good part of the main channels of the basin present a current condition of relative imbalance, with direct relation with areas in lithological and/or structural control. It allows the compartmentalization of the basin in domains of dissection with different relief patterns, including different environments of sedimentation retention. quaternary. The paleotopographic reconstitution allowed the creation of evolutionary perspectives and processes that act in the sculpting of the geomorphological landscape of the basin, with indications of a distinct evolutionary picture between the dissection domains. The research also made it possible to raise the hypothesis of changing the direction of the course of the main river in the basin by fluvial capture, in addition to other possible processes of fluvial capture in the relationship between adjacent basins. Finally, the compartmentalization of the Minerva river basin from dissection domains proved to be of great efficiency for investigating the evolutionary history of the relief conformation and its drainage network.

Keywords: Dissection domain; local base level; drainage rearrangement; morphometric parameter; middle Paraíba do Sul river valley.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Localização da área de estudo - bacia do rio Minerva. 20
- Figura 2 – Mapa de uso e cobertura da terra da bacia do rio Minerva. Elaboração Própria. ... 22
- Figura 3 - Mapa tectônico do setor central da Faixa Ribeira e do setor meridional da Faixa Brasília. 1-Riftes e coberturas cenozoicos; 2-Rochas alcalinas do Cretáceo e Paleógeno; 3-Nappes inferiores; 4-Nappes superiores; 5-Embasamento do CSF e Domínio Autóctone; 6-Supergrupo São Francisco; 7-Metassedimentos do Domínio Autóctone; 8-Domínio Andrelândia; 9-Domínio Juiz de Fora; 10-Terreno Paraíba do Sul; 11-Terreno Oriental; 12-Granitoides do Arco Magmático Rio Negro; 13-Terreno Cabo Frio; 14-Terrenos São Roque e Açungui; 15-Terreno Embu. A bacia do rio Minerva está destacada pelo quadrado preto, entre o domínio Juiz de Fora e o terreno Paraíba do Sul. Modificado de: Heilbron *et al.* (2004). ... 24
- Figura 4 - Mapa hipsométrico com arcabouço estrutural do Sistema de Riftes Continentais do Sudeste Brasileiro. Destacando os Riftes localizados na bacia do rio Paraíba do Sul: 1 – São Paulo; 2 – Taubaté; 3 – Queluz; 4 – Resende – Volta Redonda; 5 – Baixo Paraíba do Sul. Fonte: Zalán e Oliveira (2005). 25
- Figura 5 – Mapa hipsométrico com localização das zonas de convergência de drenagem no rio Paraíba do Sul, segundo Paixão (2020). Os números correspondem às seguintes zonas: 1. Taubaté. 2. Resende. 3. Volta Redonda. 4. Três Rios. 5. Itaocara. Destaca-se pelo quadrado em linha contínua na cor vermelha a zona de convergência de Três Rios por estar intimamente ligada à evolução da rede de drenagem da bacia do rio Minerva. Modificado de: Paixão (2020). 26
- Figura 6 - Mapa dos Domínios de Dissecação da bacia do rio Minerva. Adaptado de Souza (2019). 30
- Figura 7 – Padrões de rearranjo de drenagem originados por capturas fluviais, resultando na preservação das linhas de drenagem e transferência das áreas de drenagem entre bacias. A linha tracejada é o divisor de drenagem; (a) ilustra a formação de drenagem do tipo *barbed*, composta por cotovelos de drenagem, devido à erosão remontante das cabeceiras (processo de baixo para cima); (b) e (c) ilustram capturas por incursões laterais em bacias adjacentes, tanto através de erosão remontante de um tributário (b) quanto de migração lateral pela curvatura do canal ou tectonismo. Modificado de: Bishop (1995). 33

Figura 8 – Três estágios de captura fluvial (A-C). O rio em menor elevação avança erosivamente através do substrato rochoso menos resistente para capturar as drenagens que fluem a nível mais alto e em formações rochosas mais resistentes. Fonte: Summerfield (1991).....	33
Figura 9 – Comparação entre uma rede de drenagem com a direção de fluxo igual entre seus cursos e outra rede de drenagem com reversão de seu curso principal, caracterizando-a como <i>barbed</i> . Modificado de: PMFIAS, 2019.....	35
Figura 10 – Inflexão de captura do rio Paraíba do Sul, na região de Guararema, destacado pelo quadrado vermelho em linha contínua. Modificado de: Ab’Saber (1957).....	36
Figura 11 – Ilustração de uma hipotética captura fluvial (a ; b), evidenciando possível local de formação do vale seco. Observe o rejuvenescimento que ocorre acima do cotovelo de captura (E), resultante da diferença de altura entre o rio capturador e o capturado, marcado pelo desenvolvimento de um nível de base local. Terraços fluviais podem ser encontrados no vale suspenso. Modificado de: Bishop (1995).....	37
Figura 12 – Ilustração de um rio desajustado em relação ao vale. Modificado de: Goudie e Gardner (1992).	38
Figura 13 – Ilustração em perfil longitudinal de níveis de base local e geral por um rio fluindo para um lago e, posteriormente para o mar. Em cada segmento, o gradiente do perfil ajusta ao menor nível alcançável. Modificado de: Catuneanu (2002).	39
Figura 14 – Ilustração de terraços fluviais (T) e a atual planície de inundação (P) numa paisagem hipotética. A composição dos terraços fluviais por depósito de cascalho (C), presente no perfil estratigráfico, indica a possibilidade de mudanças no regime de transporte sedimentar com maiores descargas e maior efetividade da erosão, em relação ao presente. Modificado de: Jatobá e Lins (2008).	40
Figura 15 – Perfil longitudinal dos rios Dadu e Anning, projetado com o propósito de reconstruir o trajeto do rio estudado antes da captura. Os rios compõem a área de estudo de Clark <i>et al.</i> (2004). A linha tracejada representa a reconstrução sistemática do paleorio Dadu-Anning, antes da captura. As setas apresentam indicadores de captura fluvial, como os vales secos preenchidos por sedimentos, ponto da captura e os terraços. Modificado de: Clark <i>et al.</i> (2004).....	41
Figura 16 – Esquema geral da rotina metodológica adotada na pesquisa. Elaboração própria.	43

Figura 17 – Mapeamento geológico da área em que se insere a bacia do rio Minerva.....	55
Figura 18 – Mapa de modelados de dissecação e formas de relevo simbolizadas da bacia do rio Minerva.	57
Figura 19 – Paisagem do modelado de dissecação estrutural de topo convexo com um índice de dissecação de alta densidade de drenagem e fraco aprofundamento das incisões Planície aluvionar alagada e morros baixos no domínio Baixo Minerva. Foto: T.M. Silva (dez./2021).	58
Figura 20 – Visão panorâmica de um vale afluente do córrego Itabira, no Médio-baixo Minerva, representando o modelado de dissecação estrutural de topo aguçado com alta densidade de drenagem e forte aprofundamento das incisões. Foto: R.A. Souza (dez./2021).	59
Figura 21 – Visão panorâmica da serra do Arribada em último plano - Domínio Médio Minerva. Foto: T.M. Silva (dez./2021).	59
Figura 22 – Paisagem do modelado de dissecação homogênea de topo convexo e índice de dissecação moderado no vale suspenso da serra do Arribada, com presença de planície aluvionar em primeiro plano. Foto: M.M. Freitas (mar/2018).	60
Figura 23 – Lineamentos estruturais e diagrama de rosetas reconhecidos para área de estudo.	62
Figura 24 - Mapa de hierarquia fluvial da bacia do rio Minerva.	64
Figura 25 – Rio Minerva fluindo em um vale com estrangulamento de morros alinhados em direção NNE-SW - Baixo Minerva. Foto: T.M. Silva (dez./2021).	65
Figura 26 - Alinhamento de serras próximo às cabeceiras do córrego Itabira orientadas NE-SW, localizadas no canto esquerdo da figura. Foto: R.A. Souza (dez/2021).	66
Figura 27 - Alinhamento da escarpa da serra do Arribada no domínio de dissecação Médio Minerva. Foto: T.M. Silva (dez/2021).	67
Figura 28 – Mapa hipsométrico sobreposto ao MDE, com distribuição dos níveis de base locais e depósitos aluvionares reconhecidos para a bacia do rio Minerva.	69
Figura 29 – Configuração espacial dos vales suspensos de canais afluentes ao rio Minerva, na serra do Arribada: a – vale suspenso, com relevo suave ondulado a montante do nível de base	

local; b – afloramento rochoso do nível de base local: gnaiss paraderivado do Complexo Paraíba do sul; c – visão panorâmica do vale suspenso a jusante de seu NBL, para o vale principal do rio Minerva, configurando uma área de grande amplitude altimétrica e alto índice de dissecação. Fotos: M.M. Freitas (mar/2018).	70
Figura 30 – Configuração espacial dos vales suspensos do córrego Itabira e seus afluentes: a – vale suspenso, com morros baixo e fundo de vale com retenção de sedimentação quaternárias; b – mesma configuração geomorfológica da figura 30a, porém localizada na fazenda Passatempo; c – visão panorâmica dos vales do córrego Itabira a jusante dos vales suspensos. Fotos: T.M. Silva (dez./2021).	71
Figura 31 – Distribuição espacial do índice RDE gerado pela ferramenta <i>Knickpoint Finder</i> , ressaltando as zonas de maior grau de anomalia de drenagem na bacia do rio Minerva, representadas pela tonalidade mais escura.	74
Figura 32 – Índice RDE aplicado ao rio Minerva e córrego Itabira.	76
Figura 33 – Correlação entre as rupturas de declive no perfil longitudinal do rio Minerva e os índices de RDE. A – Perfil longitudinal do rio Minerva e em B valores de RDE obtidos para o rio em questão.	78
Figura 34 – Correlação entre as rupturas de declive no perfil longitudinal do córrego Itabira e os índices de RDE . A – Perfil longitudinal do rio Minerva e em B valores de RDE obtidos para o canal em questão.	79
Figura 35 - Distribuição espacial do FSTT no rio Minerva e córrego Itabira, considerando os limites de domínios de dissecação.	82
Figura 36 – Índice de concentração de rugosidade da bacia do rio Minerva.	84
Figura 37 – Distribuição percentual das classes do índice de concentração de rugosidade na bacia do rio Minerva, segundo domínios de dissecação.	85
Figura 38 – Imagem da configuração espacial do domínio Médio-alto Minerva. Nota-se o relevo escarpado com o topo florestado, conectando-se com o fundo de vale encaixado, evidenciado pela plantação de espécie arbórea conífera, por onde o rio Minerva percorre. Foto: R.A. Souza (dez/2021).	87

Figura 39 – Perfis normalizados do rio Minerva segmentado por domínio de dissecação e do córrego Itabira, representando o canal fluvial principal do domínio de dissecação Médio-baixo Minerva.	88
Figura 40 – Canais fluviais analisados pelo <i>NProfile</i> na bacia do rio Minerva.	91
Figura 41 – Perfis normalizados dos principais canais fluviais afluentes do rio Minerva.	92
Figura 42 – <i>Swathprofiles</i> (P1; P2; P3 e P4) da bacia do rio Minerva.	96
Figura 43 - Reconstituição paleotopográfica da bacia do rio Minerva e seu entorno.	100
Figura 44 – Compartimentos topográficos do rio Minerva e domínios de dissecação (1 ; 2 ; 3 ; 4 e 5). As fotos ilustram características e padrões do relevo de cada compartimento. Fotos: R.A. Souza e T.M. Silva (dez./2021).	104
Figura 45 – Distribuição percentual dos compartimentos topográficos na bacia do rio Minerva, segundo domínios de dissecação.	105
Figura 46 – Serras escarpadas no domínio Baixo Minerva com localização da cidade de Chiador (MG) no fundo de vale. Foto: M.M. Freitas (mar/2018).	107
Figura 47 - Níveis dos terraços fluviais presentes no domínio do Médio Minerva. A) Terraço fluvial de várzea – nível 3; B) Terraço fluvial inferior – nível 2; C) Terraço fluvial superior – nível 1. Fotos: R.A. Souza (dez./2021).	111

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Uso e Cobertura da Terra da bacia do rio Minerva. Elaboração própria.	22
Tabela 2 - Classes de amplitude altimétrica para a definição dos compartimentos topográficos. Fonte: Silva (2009).....	46
Tabela 3 - Valores relacionados ao cálculo do FABD dos domínios de dissecação da área de estudo. Fonte: Elaboração própria.....	80
Tabela 4 – Fator de simetria topográfica transversal (FSTT) do rio minerva e córrego Itabira, considerando os limites dos domínios de dissecação.....	81
Tabela 5 – Informações geomorfológicas e morfométricas por domínios de dissecação.	105

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO	16
1.1. Questão	17
1.2. Hipótese	17
1.3. Justificativa	18
1.4. Objetivos	18
2.ÁREA DE ESTUDO	19
2.1. Localização	19
2.2. Aspectos evolutivos da paisagem geomorfológica regional	22
2.3. Domínios de Dissecação	28
3.EVOLUÇÃO DO RELEVO E REARRANJOS DE DRENAGEM	31
3.1. Evidências na paisagem dos processos de rearranjo fluvial	34
3.1.1. Cotovelos de captura e reversão de drenagem	34
3.1.2. Vales secos	36
3.1.3. Rios não ajustados em relação aos vales (<i>misfit streams</i>).....	37
3.1.4. Desenvolvimento e propagação de níveis de base locais	38
3.1.5. Terraços Fluviais	40
4.MATERIAIS E MÉTODOS	43
4.1. Revisão Bibliográfica	43
4.2. Organização de bases de dados para desenvolvimento de produtos cartográficos	44
4.3. Análise morfológica e morfométrica do relevo e sistema de drenagem	45
4.3.1. Mapa geológico	45
4.3.2. Mapa geomorfológico	45
4.3.3. Mapa de compartimentação topográfica	45
4.3.4. Mapa de domínios de dissecação	46
4.3.5. Lineamentos estruturais.....	47
4.3.6. Hierarquia Fluvial	47
4.3.7. Mapeamento de níveis de base locais, depósitos aluvionares e terraços fluviais	48
4.3.8. Índice Relação Declividade-Extensão do Canal (RDE).....	48
4.3.9. Fator de assimetria de bacias de drenagem (FABD).....	50
4.3.10. Fator de simetria topográfica transversal (FSTT)	51
4.3.11. Mapa de índice de concentração de rugosidade (ICR).....	52
4.3.12. <i>NProfile</i>	52
4.3.13. <i>Swath Profile</i>	53
4.3.14. Mapas paleotopográficos.....	53
4.4. Trabalho de Campo	54

5.RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
5.1.Caracterização a partir de aspectos geológicos e geomorfológicos	55
5.1.1.Aspectos geológicos e geomorfológicos	55
5.1.2.Lineamentos Estruturais	61
5.1.3.Níveis de Base Locais e Depósitos Aluvionares	68
5.2.Parâmetros morfométricos por domínios de dissecação	72
5.2.1.Índice Relação Declividade-Extensão (RDE)	72
5.2.2.Fator de assimetria de bacias de drenagem (FABD).....	79
5.2.3.Fator de simetria topográfica transversal (FSTT)	80
5.2.4.Índice de concentração de rugosidade (ICR)	83
5.2.5. <i>Nprofiles</i>	87
5.2.6. <i>Swathprofiles</i>	95
5.2.7.Mapas Paleotopográficos – Técnica Seppômen.....	99
5.3.Síntese dos domínios de dissecação da bacia do rio Minerva	103
5.3.1.Domínio de dissecação Baixo Minerva.....	105
5.3.2.Domínio de dissecação Médio-baixo Minerva.....	108
5.3.3.Domínio de dissecação Médio Minerva.....	109
5.3.4.Domínio de dissecação Médio-alto Minerva	112
5.3.5.Domínio de dissecação Alto Minerva	112
6.CONCLUSÕES	115
REFERÊNCIAS	118

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de drenagem são importantes escultores da superfície terrestre por meio da erosão fluvial, trazendo características intrínsecas da história da evolução geomorfológica de uma determinada paisagem. As características atuais desses sistemas são o resultado de diversos eventos geológico-geomorfológicos que ocorreram nas áreas que estão inseridos, desenvolvendo possíveis episódios de rearranjo de drenagem em sua configuração espacial e, portanto, promovendo mudanças contínuas no modelado do relevo.

Nas últimas décadas diversos estudos em contextos geomorfológicos contrastantes demonstraram que o rearranjo de drenagem, também conceituado como reorganização fluvial, se apresenta como um dos principais processos atuantes em recortes temporais de maior relevância em áreas de bordas planálticas e de margem do tipo atlântica (SUMMERFIELD, 1991; PRINCE *et al.* 2010; CHEREM *et al.*, 2012; MARENT, 2016; SALGADO *et al.*, 2016; SORDI *et al.*, 2018; CORDEIRO, 2019; PAIXÃO, 2020). Os estudos de evolução da paisagem geomorfológica têm demonstrado que os principais condicionantes da reorganização fluvial são mudança nos níveis de base, resistência litoestrutural e implicações tectônicas, tendo o clima como um fator secundário devido a este apresentar características semelhantes em vertentes opostas (SUMMERFIELD, 1991; SORDI *et al.*, 2018). Portanto, o rearranjo se refere a uma adaptação do sistema de drenagem a uma nova condição e configuração espacial devido a mudanças nos fatores mencionados acima.

O processo de rearranjo de drenagem envolve o desvio natural das águas de uma bacia para outra, promovendo a expansão de áreas de drenagem em detrimento da vizinha, vinculando-se estritamente ao conceito de captura fluvial que é fundamental para o entendimento da morfogênese dos sistemas de drenagem e do relevo (BISHOP, 1995). Para se compreender a importância de grandes processos de rearranjo drenagem, como em bacias hidrográficas de escala continental, faz-se necessário o estudo de capturas fluviais em pequenas bacias, pois as evidências estão situadas em escala local (SMALL, 1978; SORDI *et al.*, 2018).

A morfogênese do relevo da região do sudeste brasileiro é resultado de diversos esforços tectônicos em sua superfície ao longo do tempo, com destaque à orogênese Brasileira no Pré-cambriano (ALMEIDA *et al.*, 1981; HEILBRON *et al.*, 1995) e o Rifte Continental do Sudeste Brasileiro no Cenozoico oriundo da abertura do Oceano Atlântico (RICCOMINI, 1989; RICCOMINI *et al.*, 2004). Esses eventos foram responsáveis por grande parte da gênese do complexo substrato rochoso da região, e o processo de rifteamento promoveu um novo *input*

erosivo em toda sua superfície devido ao rebaixamento relativo do nível de base geral na porção leste do continente americano com o surgimento do oceano. Soma-se a isso o desenvolvimento dos sistemas de grábens na região (RICCOMINI *et al.*, 2004; ZALÁN e OLIVEIRA, 2005), culminando na reorganização dos sistemas de drenagem e na migração dos divisores de drenagem das bacias para o interior do continente. Os grábens em área continental propiciaram a concentração dos fluxos de água por serem áreas rebaixadas em relação ao seu entorno, tornando possível um episódio de endorreísmo, como foi discutido para o caso da bacia do rio Paraíba do Sul (PAIXÃO, 2020).

Diante disso, a presente pesquisa pretende investigar a morfogênese da bacia do rio Minerva, afluente do rio Paraíba do Sul, a partir de suas influências litoestruturais e evidências de rearranjo fluvial. A bacia encontra-se próxima à cidade de Três Rios – RJ, local de zona de convergência de rios expressivos da bacia do rio Paraíba do Sul (MOTTA *et al.*, 1999; FREITAS, 2007). Essa zona de convergência de Três Rios foi identificada como um possível gráben que perdeu sua configuração endorreica ao ser capturado por erosão remontante do rio Paraíba do Sul (PAIXÃO, 2020) e, com isso, busca-se estudar as evidências desse processo de rearranjo fluvial através da bacia do rio Minerva, contextualizando-a com seu redor. Ressalta-se que essa pesquisa busca dar continuidade ao que foi realizado na área de estudo em meu Trabalho de Conclusão de Curso, contribuindo na análise acerca da evolução de sua paisagem geomorfológica a partir de níveis de base locais (SOUZA, 2019).

1.1. Questão

Dentro do quadro de evolução do Rift Cenozoico do Sudeste do Brasil (SRCSB) (ZALÁN e OLIVEIRA, 2005) nos sistemas de drenagem da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, especificamente, aquele associado à zona de convergência de Três Rios (MOTTA *et al.*, 1999; FREITAS, 2007), a presente pesquisa busca investigar o mecanismo evolutivo da bacia do rio Minerva. Inscreve-se, portanto, como **questão** que instigou o trabalho:

- Quais seriam as evidências de rearranjo fluvial nesta bacia marcada pela diversidade de aspectos litoestruturais e de padrões geomorfológicos?

1.2. Hipótese

Considerando que os cursos fluviais são elementos escultores do relevo, a hipótese formulada é de que a formação da bacia do rio Minerva ocorreu por processos de captura fluvial

advindos de mecanismos evolutivos da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, ligados a ajustes de níveis de base ao longo do tempo. O processo de rifteamento continental Mesozoico-Cenozoico acarretou na incisão vertical da rede de drenagem e erosão remontante levando ao ajuste de níveis de base em diferentes escalas espaço-temporais; ou seja, processos de evolução da rede hidrográfica em escala local, que é a escala de análise dessa pesquisa, mas associados diretamente a uma dinâmica regional.

1.3. Justificativa

A justificativa para o aprofundamento do estudo da bacia do rio Minerva se relaciona à identificação na literatura de anomalias de reordenamento fluvial, já apontadas em seu curso principal por autores como Castanheira *et al.* (2005); Sarti e Freitas (2005); Silva *et al.* (2017); Souza (2019). Tais autores demonstraram que o rio Minerva drena em direção à zona de convergência de Três Rios, sendo esta direção oposta ao fluxo d'água do rio Paraíba do Sul, ou seja, o rio Minerva muda drasticamente de direção para atingir a calha do rio Paraíba do Sul. Além disso, a bacia do rio Minerva apresenta importantes níveis de base locais, formados sobre litotipos mais resistentes e presença de terraços fluviais retrabalhados indicando uma fase de *input* erosivo associado à captura fluvial reconhecida por rebaixamento do nível de base local (SOUZA *et al.*, 2017; SOUZA, 2019).

1.4. Objetivos

Dentro deste contexto, a proposta desta pesquisa teve como objetivo geral investigar à morfogênese do relevo e do sistema de drenagem da bacia do rio Minerva e que estaria atrelada aos mecanismos evolutivos do sistema de Riftes Cenozoico do Sudeste do Brasil.

E como objetivos específicos:

- Buscar evidências de rearranjos de drenagem na bacia do rio Minerva e em seu entorno.
- Identificar a influência litológica e/ou estrutural na conformação do relevo e do sistema de drenagem.
- Elaborar cenários paleotopográficos com intuito de sugerir possíveis configurações morfológicas.

2. ÁREA DE ESTUDO

2.1. Localização

A área de estudo compreende bacia hidrográfica do rio Minerva, tributária da margem esquerda do rio Paraíba do Sul, e está localizada na porção centro-leste do município de Chiador, no estado de Minas Gerais (Figura 1).

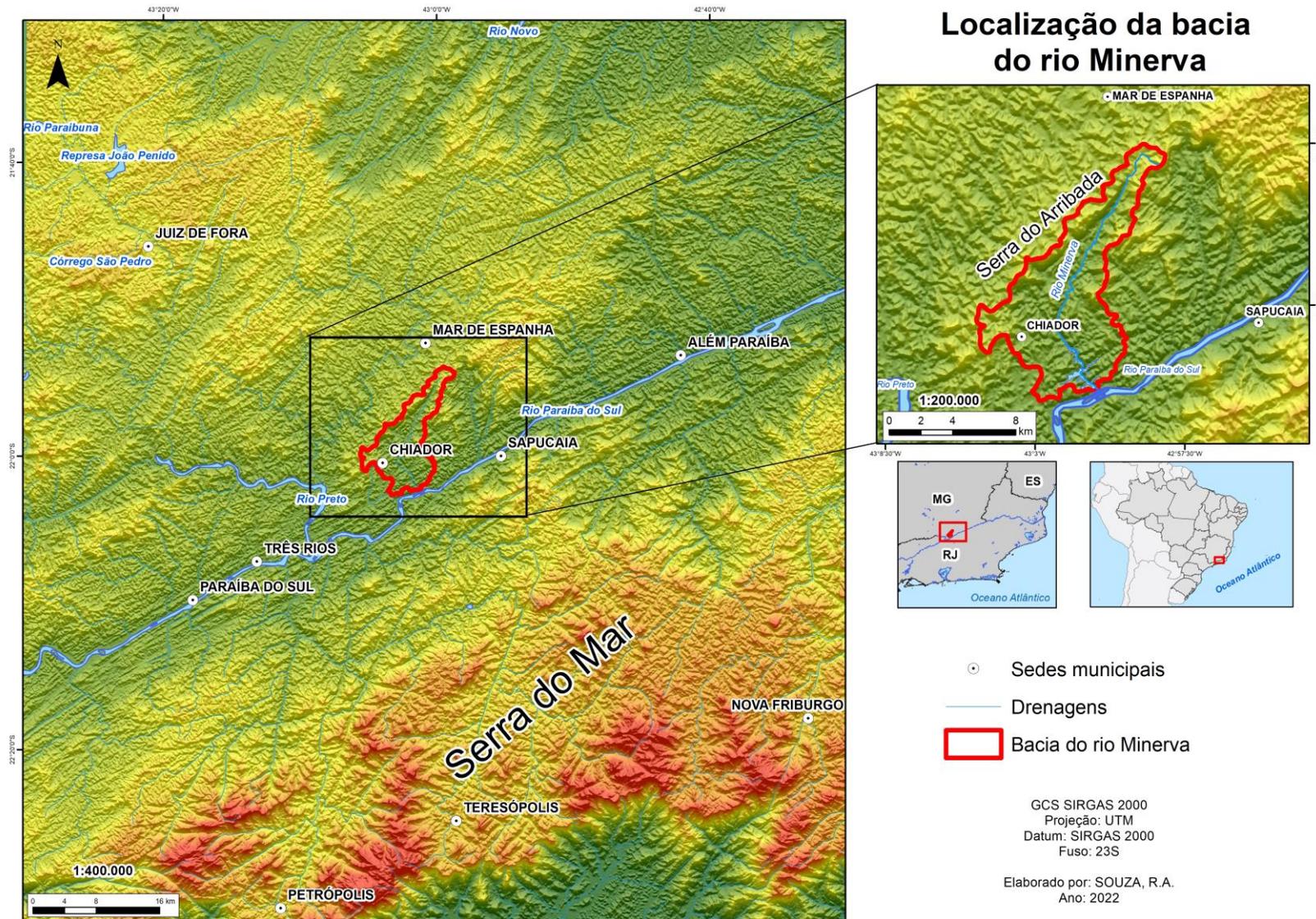


Figura 1 - Localização da área de estudo - bacia do rio Minerva.

Sua área de 75 km² se encontra inserida em sua totalidade no estado de Minas Gerais, sendo o rio Paraíba do Sul o responsável pelos limites interestaduais entre Minas Gerais e Rio de Janeiro, e se encontrando a 16km a nordeste da cidade de Três Rios – RJ. O rio Minerva tem uma extensão de 19 km, disposto na direção NE-SW em seu médio-alto trecho e NW-SE em seu baixo trecho, onde irá desaguar no rio Paraíba do Sul próximo à Anta, distrito do município de Sapucaia - RJ.

O clima típico é tropical úmido, apresentando um período de alto índice pluviométrico no verão e um período de estiagem no inverno, característica própria desse tipo de clima. De acordo com os dados obtidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), da estação automática de Três Rios – RJ, no período entre 13/02/2018 a 13/02/2019, a pluviosidade média anual da região onde a área de estudo está inserida foi de 1045 mm e a temperatura média é de 22,5°C.

A vegetação nativa da bacia do rio Minerva é de floresta ombrófila densa, típica do bioma de Mata Atlântica. Porém, de acordo com o mapa e tabela de cobertura e uso da terra (Figura 2) (Tabela 1), a cobertura vegetal que predomina na paisagem atual é a de campo/pastagem, ocupando 62,6% da área da bacia, resultado do desmatamento e mau uso do solo no vale do rio Paraíba do Sul a partir do século XIX com a expansão cafeeira na região, além da criação de gado e mau uso dos recursos hídricos que se perpetua até os dias de hoje. Esses eventos de desmatamento da vegetação nativa em grande escala e degradação dos rios foram culminantes para a cessão do equilíbrio ecológico da área, ocasionando modificações no sistema geomorfológico ao desenvolver intensos processos erosivos e de assoreamento de cursos fluviais (ALVES, 2019). Os fragmentos de áreas florestadas se encontram atualmente em topos de morro e nas porções de maior altitude e declividade da bacia, mais precisamente na parte noroeste da serra do Arribada, correspondendo a cerca de 5% de sua área total.

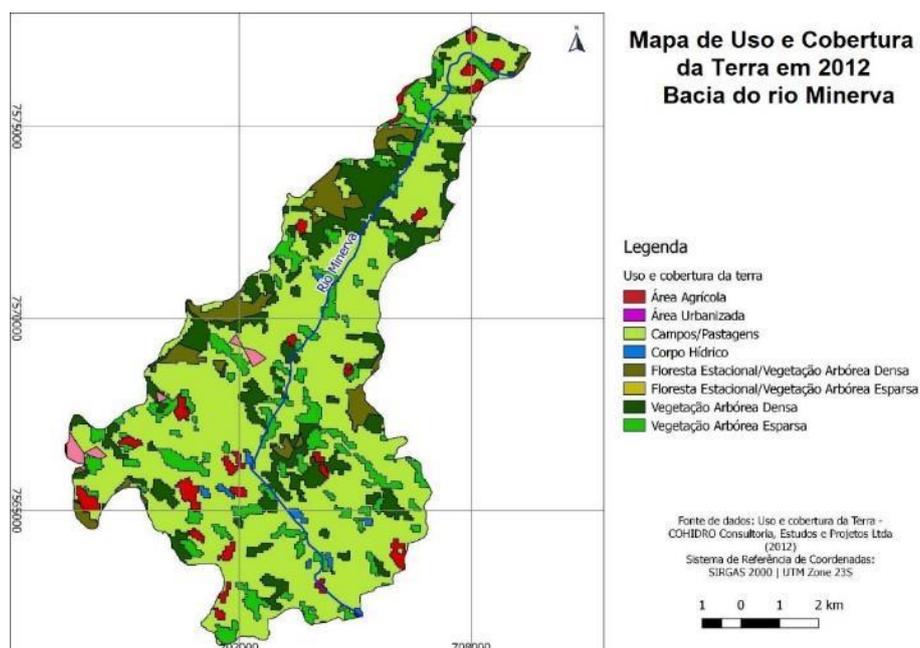


Figura 2 – Mapa de uso e cobertura da terra da bacia do rio Minerva. Elaboração Própria.

Tabela 1 - Uso e Cobertura da Terra da bacia do rio Minerva.

Classe de Uso e Cobertura da Terra	Área (km ²)	Percentual (%)
Área Agrícola	0,56	0,75
Área Urbanizada	2,51	3,35
Campos/Pastagens	46,75	62,60
Corpo Hídrico	0,54	0,72
Floresta Estacional/Vegetação Arbórea Densa	3,87	5,18
Floresta Estacional/Vegetação Arbórea Esparsa	0,08	0,11
Vegetação Arbórea Densa	11,45	15,33
Vegetação Arbórea Esparsa	8,92	11,95
Total		100,00

Elaboração própria.

2.2. Aspectos evolutivos da paisagem geomorfológica regional

Em relação aos aspectos geomorfológicos regionais, a bacia do rio Minerva está situada na depressão do médio vale do rio Paraíba do Sul, entre as regiões geomorfológicas Escarpas e Reversos da Serra do Mar a sul-sudeste e as regiões do Planalto do Leste de Minas e fragmentos da Serra da Mantiqueira Setentrional a norte (IBGE, 2006), compreendendo parte do Planalto Sudeste Brasileiro. A forma de relevo predominante na região é constituída por colinas e morros, localizada no domínio morfoclimático da zona costeira brasileira Mar de Morros (AB'SABER, 2012). A amplitude topográfica da bacia varia entre 800 e 240 metros e os divisores que compõe a bacia em sua porção médio-superior correspondem às linhas de

cumeadas da serra do Arribada, atingindo 800 metros em seu pico mais alto e com declividade acentuada.

A área de estudo está geotectonicamente localizada na Província Estrutural da Mantiqueira (ALMEIDA *et al.*, 1981), marcada por eventos tectônicos remotos como a orogênese Brasileira no Neoproterozoico e a abertura do Oceano Atlântico durante parte do Mesozoico-Cenozoico. A orogênese Brasileira está associada ao metamorfismo de alto grau da crosta terrestre no fim do Pré-cambriano e início do Paleozoico. Esse evento tectônico atingiu unidades geológicas pré-existentes, gerando deformações e migmatização resultando em rochas metamórficas orto e paraderivadas com *trend* estrutural N60E, além da expressiva granitogênese, gerada na fusão parcial da crosta (ALMEIDA *et al.*, 1981; HEILBRON *et al.*, 1995). Dentro da compartimentação tectônica da Província Mantiqueira, a área de estudo localiza-se no cinturão orogenético denominado como Faixa Móvel Ribeira (HEILBRON *et al.*, 2000) que apresenta em seu setor central quatro terrenos tectono-estratigráficos (HEILBRON *et al.*, 2004) (Figura 3): Ocidental, Paraíba do Sul, Embú, Oriental e Cabo Frio. Estes terrenos estão distribuídos heterogeneamente pelo território do estado do Rio de Janeiro e no Sul de Minas Gerais, constituindo um complexo substrato geológico para a evolução subsequente do relevo. Portanto, a bacia do rio Minerva apresentará um substrato geológico diversificado decorrente desses processos descritos acima. A bacia está localizada no terreno Paraíba do Sul e no terreno Ocidental, mais precisamente no domínio Juiz de Fora.

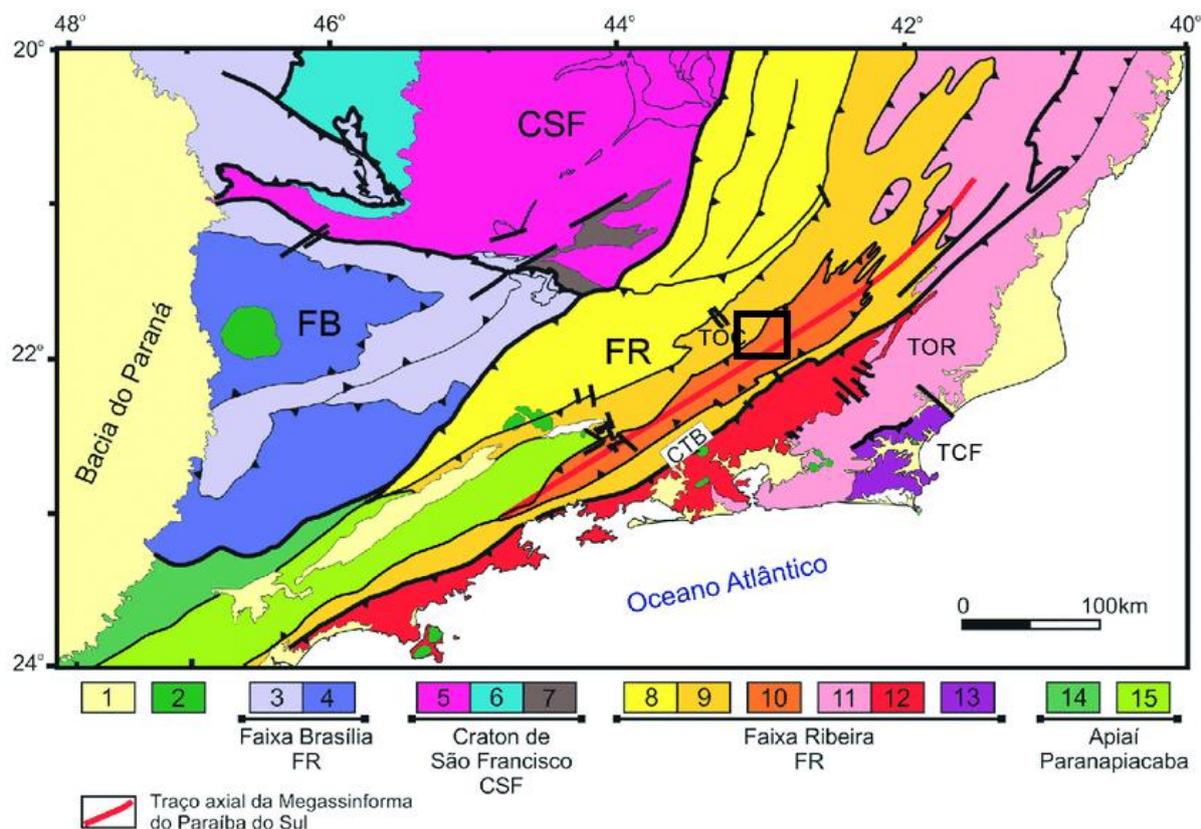


Figura 3 - Mapa tectônico do setor central da Faixa Ribeira e do setor meridional da Faixa Brasília. 1-Riftes e coberturas cenozoicas; 2-Rochas alcalinas do Cretáceo e Paleógeno; 3-Nappes inferiores; 4-Nappes superiores; 5-Embasamento do CSF e Domínio Autóctone; 6-Supergrupo São Francisco; 7-Metassedimentos do Domínio Autóctone; 8-Domínio Andrelândia; 9-Domínio Juiz de Fora; 10-Terreno Paraíba do Sul; 11-Terreno Oriental; 12-Granitoides do Arco Magmático Rio Negro; 13-Terreno Cabo Frio; 14-Terrenos São Roque e Açungui; 15-Terreno Embu. A bacia do rio Minerva está destacada pelo quadrado preto, entre o domínio Juiz de Fora e o terreno Paraíba do Sul. Modificado de: Heilbron *et al.* (2004).

O segundo evento tectônico de natureza rúptil ocorreu devido a uma intensa atividade de magmatismo básico no Jurássico que culmina com a quebra do supercontinente Gondwana e, subsequentemente, da abertura do Oceano Atlântico, durando até o Cretáceo, havendo pulsos descontínuos até o Eoceno, reativando estruturas antigas. O resultado desses esforços tectônicos distensivos foi um estágio de desenvolvimento de *rift-valley* na região sudeste do Brasil durante a era Cenozoica (ASMUS e FERRARI, 1978), nomeada como Rife Continental do Sudeste do Brasil (RCSB) (RICCOMINI, 1989; RICCOMINI *et al.*, 2004) ou Sistema de Rife Cenozoico do Sudeste do Brasil (SRCSB) (ZALÁN e OLIVEIRA, 2005). A consolidação do SRCSB ocorreu após diversas reativações tectônicas entre o Paleógeno e Neógeno. Esse evento marcou a paisagem geomorfológica atual ao gerar porções mais elevadas do relevo oriundas dos blocos soerguidos (*horsts*) e depressões oriundas do abatimento de blocos (*grabens*).

Conduzidos por trabalho erosivo, atualmente são exemplos de *horsts* as feições topográficas das Serras da Mantiqueira e do Mar (ALMEIDA e CARNEIRO, 1998) e de grábens, preenchidos por sedimentos, como o vale do rio Paraíba do Sul, gráben da Guanabara e bacias petrolíferas de Santos e Campos. Além de ter resultado numa significativa mudança no relevo do sudeste brasileiro e, conseqüentemente, em seus sistemas de drenagens, diversas falhas (N-S) e fraturas (NW-SE/NE-SW) afetaram as estruturas geológicas existentes do orógeno brasileiro. Já em termos litológicos foram geradas rochas ígneas intrusivas compostas pelo magma básico que chegou à crosta e em grande parte preencheu as falhas, como os diabásios.

No início da evolução do Sistema de Rifte Cenozoico do Sudeste do Brasil (SRCSB), a configuração da rede de drenagem da atual depressão do rio Paraíba do Sul era direcionada para as áreas de grábens que surgem no início dessa atividade tectônica em ambiente rúptil (ZALÁN e OLIVEIRA, 2005; MOTTA *et al.*, 1999; PAIXÃO, 2020). Isso fez com que os sistemas de riftes em porções rebaixadas da superfície propiciassem a concentração dos fluxos de água, formando grábens, como Taubaté, Resende e Volta Redonda e o rifte Baixo Paraíba do Sul (Figura 4) (RICCOMINI, 1989; ZALÁN e OLIVEIRA, 2005).

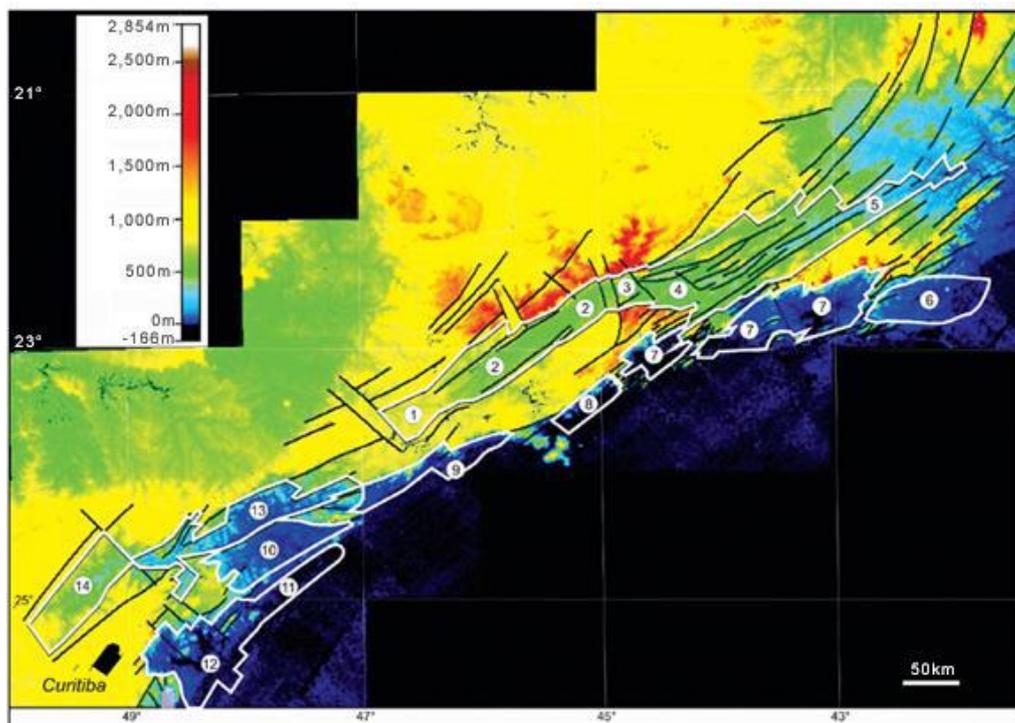


Figura 4 - Mapa hipsométrico com arcabouço estrutural do Sistema de Riftes Continentais do Sudeste Brasileiro. Destacando os Riftes localizados na bacia do rio Paraíba do Sul: 1 – São Paulo; 2 – Taubaté; 3 – Queluz; 4 – Resende – Volta Redonda; 5 – Baixo Paraíba do Sul. Fonte: Zalán e Oliveira (2005).

O rebaixamento do nível de base geral e a formação do SRCSB, consequência dessa quebra de massa continental, culminaram na migração do divisor da bacia do rio Paraíba do Sul para o interior do continente, devido ao seu potencial erosivo em detrimento de possíveis bacias interioranas endorreicas ao longo de sua evolução (PAIXÃO, 2020).

A zona de convergência de Três Rios (MOTTA *et al.*, 1999) (Figura 5), área de interesse direta do presente trabalho, apresenta evidências de um processo de endorreísmo em seu cenário evolutivo (PAIXÃO, 2020). Essa área é uma depressão de convergência de drenagens entre os rios Paraíba do Sul, Paraibuna, Piabanha, Bemposta, Calçado, Chiador, Minerva, entre outros (FREITAS, 2007). O episódio de endorreísmo na zona de convergência de Três Rios pode ser evidenciado pela convergência dos sistemas de drenagem e padrão radial das mesmas, além da identificação de drenagens com direção de fluxo opostas ao rio Paraíba do Sul (PAIXÃO, 2020). Entretanto, o referido possível gráben apresenta ausência de registros de depósitos sedimentares correspondentes ao Neógeno ou Paleógeno, apenas os associados à dinâmica fluvial e de encostas de idade quaternária até agora mapeados.

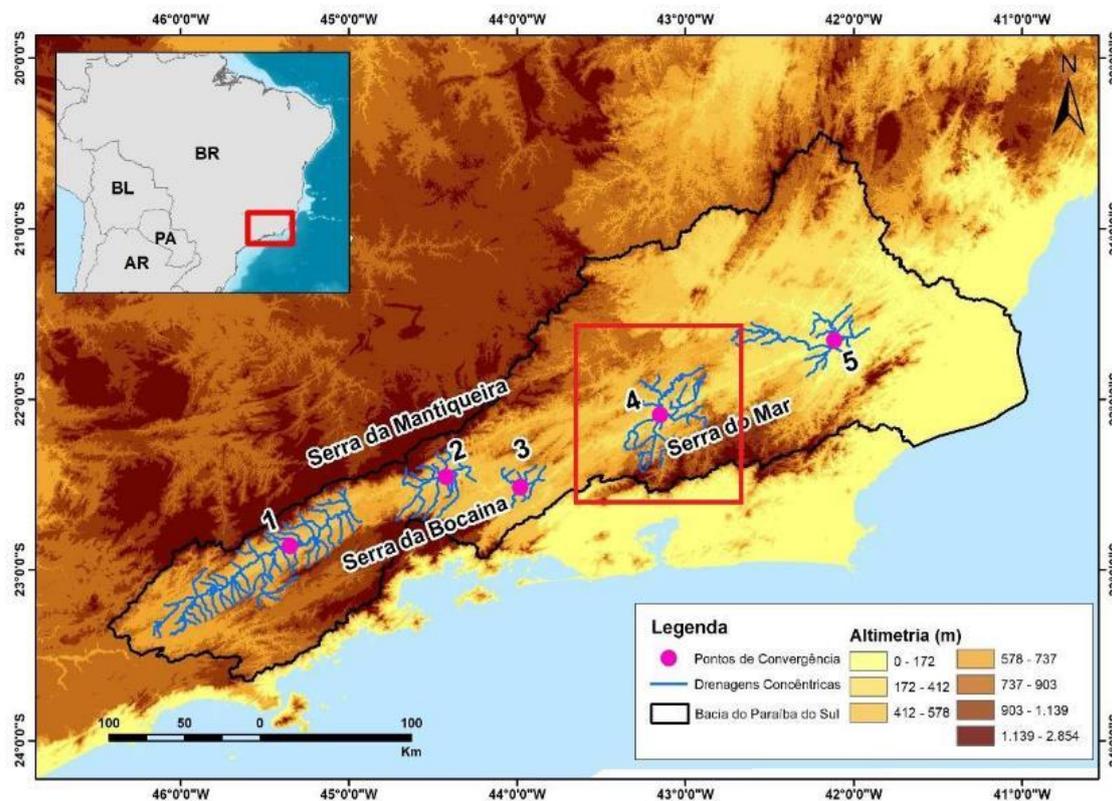


Figura 5 – Mapa hipsométrico com localização das zonas de convergência de drenagem no rio Paraíba do Sul, segundo Paixão (2020). Os números correspondem às seguintes zonas: 1. Taubaté. 2. Resende. 3. Volta Redonda. 4. Três Rios. 5. Itaocara. Destaca-se pelo quadrado em linha contínua na cor vermelha a zona de convergência de Três Rios por estar intimamente ligada à evolução da rede de drenagem da bacia do rio Minerva. Modificado de: Paixão (2020).

Um fator que pode estar atrelado ao desenvolvimento da zona de convergência de Três Rios com um sistema de drenagem radial centrípeta próxima à área de estudo, é a possibilidade de ocorrência de paleodivisores formados em altos estruturais, como é o caso do paleodivisor do gráben de Taubaté, associado ao alto estrutural de Queluz (RICCOMINI, 1989). Próximo a essa zona de convergência de Três Rios, a sua jusante, está localizado o estreito de Sapucaia que, segundo Sarti (2008), indica um paleodivisor que limitava a drenagem do rio Paraíba do Sul e fazia com que essas drenagens fluíssem para o ponto de convergência. Acredita-se que este fato ocorreu durante a reativação tectônica rúptil na transição dos períodos Cretácico/Paleogênio quando foram geradas estruturas que se sobrepuseram às antigas estruturas até então existentes, reorganizando, assim, a distribuição dos fluxos hidrológicos (SARTI, 2008). Atualmente o estreito de Sapucaia apresenta um vale estreito, marcado por um nível de base regional (CASTANHEIRA *et al.*, 2006), indicando uma vaga erosiva por onde o divisor foi rebaixado pelo potencial erosivo do rio Paraíba do Sul.

A evidência de drenagens com direção de fluxo opostas ao rio Paraíba do Sul é encontrada no rio Minerva que apresenta em maior parte de seu médio-alto trecho uma direção a oeste, concordante com o ponto de convergência de Três Rios, e muda drasticamente a direção ao atingir a calha do rio Paraíba do Sul, gerando um ponto de inflexão marcado por um nível de base local (SOUZA *et al.*, 2017; SOUZA, 2019). Essa inflexão de drenagem é discutida aqui como sendo resultado do processo de migração do divisor da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul (BHRPS) para as áreas interioranas, desenvolvendo sistemas de capturas fluviais marcados por anomalias de drenagem como cotovelos de drenagem e vales abandonados (CHEREM *et al.*, 2012; PAIXÃO, 2020). Algumas evidências de capturas fluviais ao longo da BHRPS também são o alto curso do rio Tietê capturado pelo próprio rio Paraíba do Sul (AB'SABER, 1957), ao longo da bacia do rio Grande, afluente do rio Paraíba do Sul (PINTO *et al.*, 2018), anomalias identificadas no perfil longitudinal do rio Grande (MG), afluente do rio Paraná (REZENDE e CASTRO, 2017) e anomalias resultado da evolução a longo prazo da escarpa denudacional no sudeste brasileiro (CHEREM *et al.*, 2012).

Atualmente o divisor da bacia do rio Paraíba do Sul migra no sentido das bacias do rio Paraná (SALGADO *et al.*, 2016; REZENDE *et al.*, 2013) e do rio Doce, promovendo uma perda de área nestas, devido ao seu menor nível de base promover um maior potencial erosivo através de seus cursos fluviais (CHEREM *et al.*, 2012; MARENT, 2016; PAIXÃO, 2020).

2.3. Domínios de Dissecação

Os níveis de base locais (NBLs) têm como funcionalidade a homogeneização da dissecação do relevo a montante, definindo um bloco do terreno no qual a drenagem tende a não mais dissecá-lo, gerando uma condição inicial para o reajuste das vertentes deste trecho suspenso de uma bacia hidrográfica. Com isso, a porção suspensa da bacia do rio Minerva, controlada pelo mesmo NBL, irá apresentar similaridades na sua dinâmica hidrológica, erosiva e evolutiva, originando domínios de dissecação distintos. Segundo Rezende et al. (2016), cada tipo de ruptura de declive, responsável pela formação de um NBL, resulta em dinâmicas fluviais diferenciadas entre os segmentos a montante e a jusante e, conseqüentemente, em padrões de relevo também distintos.

Portanto, domínios de dissecação correspondem a um modo de compartimentação geomorfológica em bacias hidrográficas baseado em uma abordagem que considera a importância do nível de base local na distinção de dinâmicas diferenciadas de evolução do relevo, apresentando trechos com similaridades em sua dinâmica hidrológica, erosiva e evolutiva (PINTO, 2015; SOUZA, 2019). Tais domínios são reconhecidos a partir dos níveis de base locais (NBLs) dos cursos d'água até os divisores topográficos da bacia de drenagem, distinguindo-se de outro domínio pelo próximo nível de base local a montante ou pelo divisor de drenagem da bacia (INEA, 2014).

O Plano de Manejo da Área de Proteção Ambiental Estadual de Macaé de Cima – RJ (INEA, 2014) é um dos primeiros trabalhos publicados com a abordagem de domínios de dissecação para análise da paisagem geomorfológica. De forma geral, a APA de Macaé de Cima delimita o contorno do conjunto de vales suspensos que formam as cabeceiras do rio Macaé e seus afluentes do alto curso, configurando rios de planalto que foram capturados por drenagens de nível de base mais baixo. E o resultado é a ocorrência de uma paisagem marcada por diversos níveis de base locais, em forma de cachoeiras, que sustentam e suspendem compartimentos distintos ao longo do vale fluvial, com delimitação de dez domínios de dissecação distintos na referida bacia. Esses domínios apresentam altimetria distintas que se associam a dinâmicas hidrológicas e erosivas particulares, compostas por amplitudes de relevo, comprimento de encostas e formas diferenciadas. No referido trabalho, os domínios de dissecação foram descritos a partir de tais características da paisagem: declividade, condicionantes litoestruturais, amplitude altimétrica e padrão do relevo; extensão do canal principal; trends estruturais dos canais fluviais; dinâmicas hidroerosivas; tipo de cobertura vegetal; padrão de uso e ocupação do solo.

Em Pinto (2015), a abordagem dos domínios de dissecação foi aplicada na investigação da evolução da paisagem geomorfológica da bacia do rio Grande – RJ. A definição dos domínios perpassou pela análise conjunta do perfil longitudinal do rio, informações hipsométricas do relevo e identificação de seus níveis de base locais rochosos (knickpoints). Com isso, foram delimitados cinco domínios de dissecação para a bacia do rio Grande com a descrição de tais características da paisagem: declividade; condicionantes litoestruturais; amplitude altimétrica e padrão do relevo; extensão e trend estrutural do canal principal; e padrão de drenagem. É válido destacar a discussão feita no trabalho acerca dos padrões de relevo de alguns domínios de dissecação com possíveis paleosuperfícies na evolução geomorfológica da área estudada.

Em Freitas et al. (2016), a abordagem dos domínios de dissecação é aplicada, porém não se menciona o termo propriamente dito, mas sim domínios geomorfológicos. A definição dos domínios, em conjunto com análises hidroerosivas, apoiaram a elaboração de um mapeamento geomorfológico da área no entorno da Usina Hidrelétrica de Itaocara - RJ, com vistas ao entendimento da evolução dinâmica desta paisagem e dos efeitos que o empreendimento poderia causar sobre os processos erosivos atuantes. Foram delimitados dez domínios geomorfológicos de influência do empreendimento, em função dos processos evolutivos de dissecação do relevo regulados por um nível de base local. Os domínios delimitados foram descritos a partir das características: amplitude altimétrica; condicionantes litoestruturais; declividade e padrão de relevo; geometria de encostas e de topos de morro; trend estrutural do canal principal; e descrição dos fundos de vale.

Ao aplicar a abordagem de domínios de dissecação na bacia do rio Minerva para investigar sua evolução da paisagem geomorfológica, Souza (2019) se baseou no reconhecimento dos níveis de base locais mais expressivos da bacia. Portanto, a proposta preliminar de Souza (2019) subsidiou o reconhecimento de cinco domínios de dissecação que foram aprofundados nessa dissertação e identificados por outros parâmetros de análise.

Os domínios de dissecação reconhecidos são: Baixo Minerva, Médio-baixo Minerva, Médio Minerva, Médio-alto Minerva e Alto Minerva (Figura 6). Ainda para Souza (2019), os domínios delimitados puderam ser descritos a partir das seguintes características: amplitude altimétrica; condicionantes litoestruturais; declividade e padrão de relevo; geometria de encostas; trend estrutural do canal principal; e descrição dos fundos de vale. A autora também utilizou o mapa de índice de concentração de rugosidade do relevo, baseado em Sampaio

(2008), para complementar a análise do padrão de dissecação em cada domínio.

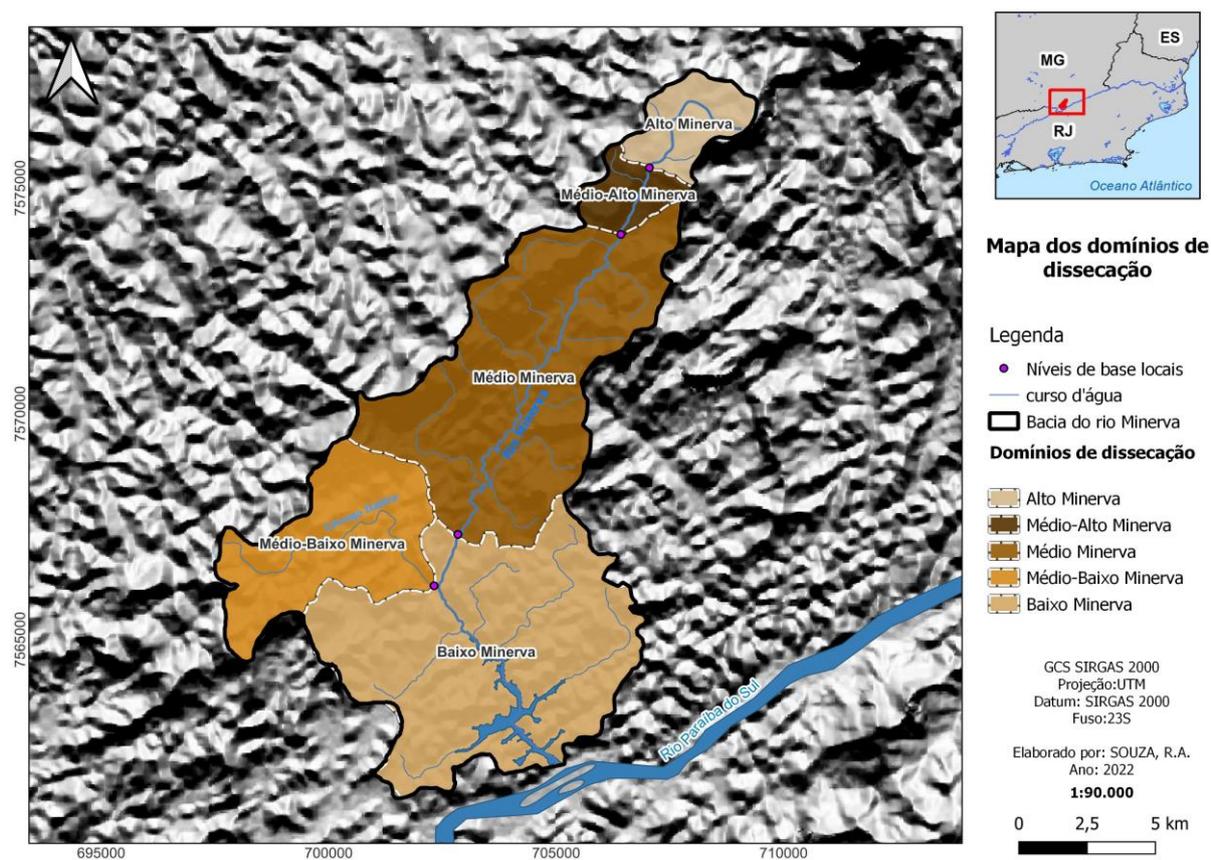


Figura 6 - Mapa dos Domínios de Dissecação da bacia do rio Minerva. Adaptado de Souza (2019).

Como resultado preliminar sobre os domínios de dissecação da bacia do rio Minerva, Souza (2019) evidenciou a influência que os níveis de base locais exercem na evolução do relevo ao gerar blocos de dissecação distintos nesse relevo e, com isso, permitir o reconhecimento de uma compartimentação geomorfológica para a bacia. As distinções entre os domínios puderam ser evidenciadas por padrões de relevo que apresentavam topos de morro com altimetria semelhantes mais dissecados e remodelados em domínios de dissecação a jusante, enquanto formas de relevo mais preservadas foram encontradas no domínio mais a montante da bacia. Presume-se, portanto, que o ajuste do sistema encosta-calha desse domínio situado na porção mais suspensa da bacia hidrográfica estaria sendo menos impactado pela intensidade erosiva advinda do NBL do rio Paraíba do Sul.

3. EVOLUÇÃO DO RELEVO E REARRANJOS DE DRENAGEM

A água, por meio das drenagens, é um agente intempérico e erosivo importante no processo morfogenético de esculturação da superfície terrestre, sobretudo em paisagens tropicais. Os padrões de drenagem e arranjos espaciais dos canais fluviais na paisagem são determinados pela inclinação do terreno e pelas estruturas de seu substrato geológico (SMALL, 1978; TWIDALE, 2004). Perante isso, o entendimento da dinâmica evolutiva de uma rede de drenagem através do estudo de seus padrões, características e condicionantes favorece a compreensão dos processos de dissecação e formas resultantes do relevo (BISHOP, 1995).

As placas tectônicas e a evolução associada às margens ditas “passivas” (melhor denominadas como “margens do tipo atlântica”), como é o caso do litoral brasileiro, forneceram um novo quadro para a consideração da evolução da paisagem de longo prazo e história de drenagens, reacendendo diversos debates sobre evolução dos sistemas fluviais nesses ambientes (SUMMERFIELD, 1991). Os padrões de drenagem são influenciados por diversos fatores, incluindo os climáticos e variações litológicas, porém as estruturas geológicas é o fator mais significativo em sua caracterização (SUMMERFIELD, 1991). Dito isso, os controles tectônicos em sistemas de drenagem em margem do tipo atlântica são desenvolvidos através da influência exercida pela organização de estruturas litológicas pré-existentes, efeito esse advindo de atividades tectônicas pretéritas. Entretanto, nem todos os casos de desenvolvimento dos rios se iniciarão a partir das estruturas geológicas, mas certamente elas exercerão um controle sobre o desenvolvimento posterior de suas drenagens subsequentes em processos de erosão remontante nas cabeceiras, estendidos por suas linhas de fraqueza como afloramentos de argila e areia, falhas, juntas principais e eixos anticlinais (SMALL, 1978). Um importante resultado do desenvolvimento e mudança dos sistemas fluviais a partir das drenagens consequentes em direção às subsequentes se dá pelo processo de captura fluvial (PEDERSON, 2001; SMALL, 1978; SUMMERFIELD, 1991) e que será tratado e aprofundado posteriormente. A identificação e interpretação desse mecanismo evolutivo nos sistemas de drenagem nesta pesquisa serão importantes para a reconstituição da história evolutiva da área de estudo.

Numa preocupação de elucidar melhor os processos que compõem o desenvolvimento dos rios e a história da paisagem, Bishop (1995) apresenta uma revisão de conceitos e avaliação dos processos de rearranjos de drenagem em sistemas fluviais rochosos de escalas espaciais locais, até regionais e subcontinentais. O rearranjo de drenagem consiste na transferência de parte ou de todo o fluxo de um rio para outro rio e essas mudanças podem afetar a quantidade e proveniência dos sedimentos transportados pelo rio e ter impactos significativos em sua biota

(BISHOP, 1995; PEDERSON, 2001). O conceito de rearranjo de drenagem vincula-se, portanto, diretamente ao conceito de capturas fluviais (também conhecido como pirataria fluvial) entendido como o desvio natural das águas de uma bacia para outra, promovendo a expansão de áreas de drenagem em detrimento da vizinha (BISHOP, 1995; CHRISTOFOLETTI, 1977; OLIVEIRA, 2010; PEDERSON, 2001; SUMMERFIELD, 1991).

Baseado em Bishop (1995), a captura fluvial é uma categoria de um conjunto mais amplo de formas de rearranjo de drenagem, que também é composto pelas formas de desvio e decapitação. Essa classificação se dá a partir de dois critérios fundamentais que são: distinção entre rearranjo das áreas de escoamento superficial pertencentes às bacias envolvidas e rearranjo das linhas de drenagem; e distinção entre os processos de cima para baixo (*top-down*) e de baixo para cima (*bottom-up*). Exemplificando o primeiro critério, a captura fluvial envolve a invasão progressiva de um limite de bacia para a bacia adjacente, resultando na transferência da área de um sistema para outro, podendo ocorrer pelo avanço das cabeceiras de drenagem (erosão remontante) ou migração lateral (Figura 7 e Figura 8). Exemplificando o segundo critério, os processos *top-down* fazem com que um rio se desloque ativamente para outra área, geralmente devido à destruição do divisor pelo canal desviado como resultado da migração do canal, tectonismo ou fluxos catastróficos. Os processos *bottom-up*, por outro lado, é decorrente do deslocamento passivo de um rio, executado por outro rio que o intercepta e o abstrai, localizado em nível altimétrico mais rebaixado e tendo como exemplo mais comum a captura fluvial por erosão remontante de cabeceiras fluviais de um rio adjacente.

Portanto, mediante os critérios exemplificados acima, a classificação dos rearranjos de drenagem está agrupada em: capturas, comumente ocorrendo por mudança de *bottom-up* das linhas de drenagem; desvios, geralmente envolvido em processos das mudanças *top-down* das linhas de drenagem; e decapitação que consiste na transferência progressiva das áreas de escoamento superficial de uma bacia para outra (BISHOP, 1995).

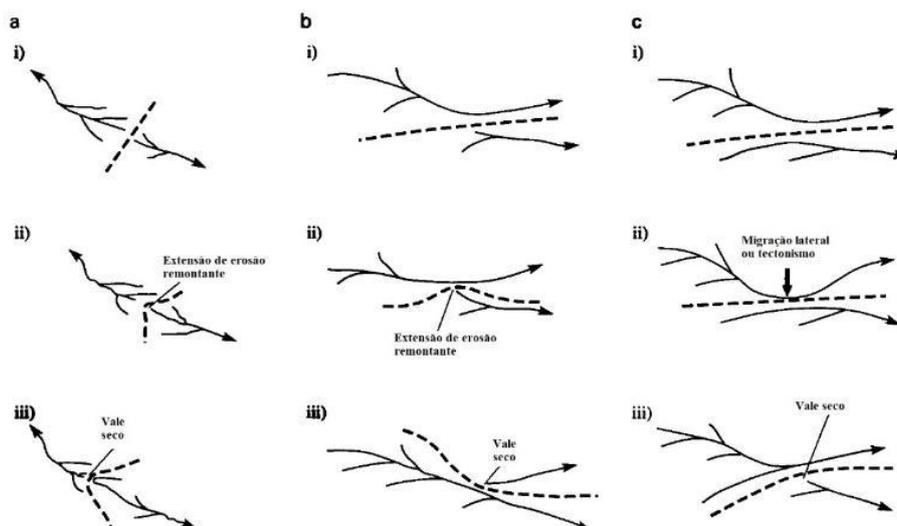


Figura 7 – Padrões de rearranjo de drenagem originados por capturas fluviais, resultando na preservação das linhas de drenagem e transferência das áreas de drenagem entre bacias. A linha tracejada é o divisor de drenagem; (a) ilustra a formação de drenagem do tipo *barbed*, composta por cotovelos de drenagem, devido à erosão remontante das cabeceiras (processo de baixo para cima); (b) e (c) ilustram capturas por incursões laterais em bacias adjacentes, tanto através de erosão remontante de um tributário (b) quanto de migração lateral pela curvatura do canal ou tectonismo. Modificado de: Bishop (1995).

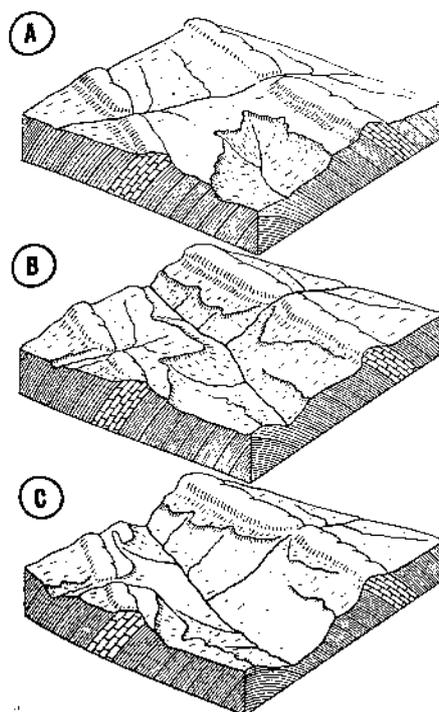


Figura 8 – Três estágios de captura fluvial (A-C). O rio em menor elevação avança erosivamente através do substrato rochoso menos resistente para capturar as drenagens que fluem a nível mais alto e em formações rochosas mais resistentes. Fonte: Summerfield (1991).

3.1. Evidências na paisagem dos processos de rearranjo fluvial

Os processos de rearranjo fluvial marcam a paisagem com indícios que podem ser utilizados para investigar sua história evolutiva. Alguns vestígios que podem ser indicadores desses processos são cotovelos de captura, rios desajustados (em relação ao vale), vales secos, níveis de base locais (*knickpoints*) e terraços fluviais (SMALL, 1978; BISHOP, 1995; PEDERSON, 2001; CLARK *et al.*, 2004).

3.1.1. Cotovelos de captura e reversão de drenagem

Uma das evidências morfológicas mais conhecidas de rearranjo de drenagem é o cotovelo de captura (BISHOP, 1995). Essa anomalia de drenagem é formada pela mudança abrupta do canal capturador, frequentemente indicando o ponto de ocorrência da captura (SUMMERFIELD, 1991). Entretanto, nem sempre inflexões de drenagem são evidências de rearranjo de drenagem, podendo ser produzidas estritamente por influências de fatores geológicos como falhas retangulares ou junções, aos qual o fluxo foi ajustado (SMALL, 1978). Além disso, em casos que o rio capturador e o capturado têm a mesma direção, muitas vezes controlados pelas mesmas estruturas geológicas, a captura fluvial poderá não produzir cotovelos (ZAPROWSKI *et al.*, 2002), como exemplo possíveis casos de rearranjo por migração lateral ou tectonismo (BISHOP, 1995).

O grande número de ocorrência de cotovelos de captura numa determinada rede de drenagem faz com que esta apresente uma malha de drenagem anômala caracterizada como *barbed drainage*, evidenciada pela direção reversa dos fluxos dos tributários em relação ao rio principal (Figura 9). Portanto, as drenagens do tipo *barbed* são caracterizadas por cursos d'água com ângulos de confluência entre os tributários com ângulo de aproximadamente 90°, possibilitando um diagnóstico de reversão de drenagem em conjunto com outras evidências (BISHOP, 1995; CLARK *et al.*, 2014; SUMMERFIELD, 1991). Além disso, vales secos e níveis de base locais podem ocorrer no local da captura ou à montante do cotovelo, sendo que este reflete a diferença altimétrica entre as bacias envolvidas que é de extrema importância para que haja o desvio de drenagem e a captura se estabeleça (BISHOP, 1995; SMALL, 1978).

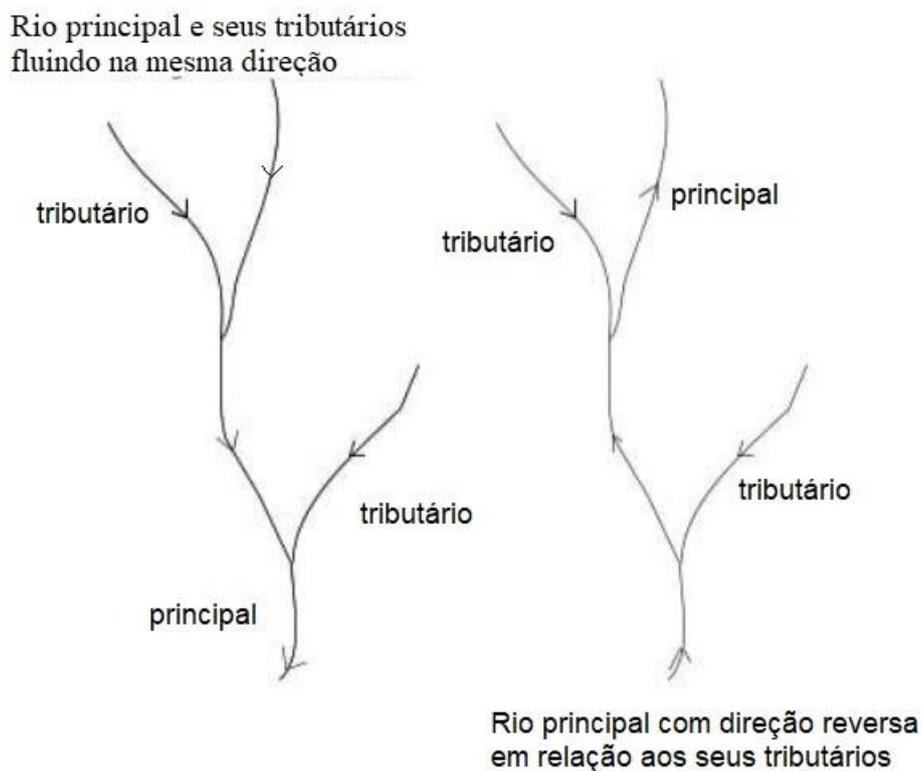


Figura 9 – Comparação entre uma rede de drenagem com a direção de fluxo igual entre seus cursos e outra rede de drenagem com reversão de seu curso principal, caracterizando-a como *barbed*. Modificado de: PMFIAS, 2019.

Alguns trabalhos desenvolvidos na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul apresentam como causas associadas à geração da feição de cotovelo de captura as estruturas tectônicas regionais, tais como, fratura, falha, resistência litológica (AB’SABER, 1957; COELHO NETTO, 2003; CASTANHEIRA *et al.*, 2006; SILVA *et al.*, 2006; PINTO, 2015; SOUZA, 2019). Destaca-se a captura do rio Tietê pelo rio Paraíba do Sul, demonstrado por uma inflexão de captura (Figura 10) como importante evidência regional do processo de rearranjo de drenagem do rio Paraíba do Sul em sua história evolutiva (AB’SABER, 1957).

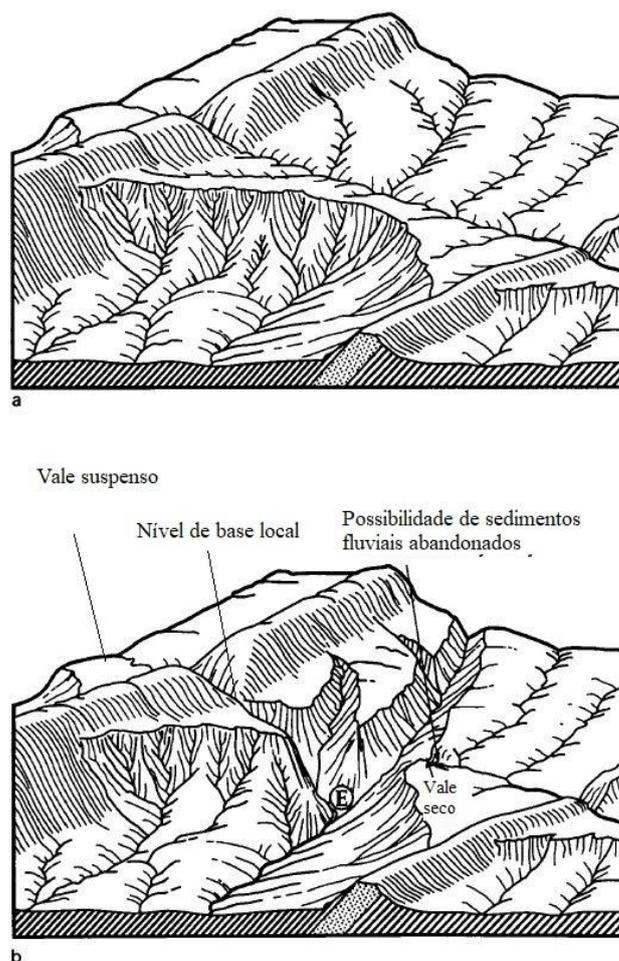


Figura 11 – Ilustração de uma hipotética captura fluvial (**a**; **b**), evidenciando possível local de formação do vale seco. Observe o rejuvenescimento que ocorre acima do cotovelo de captura (**E**), resultante da diferença de altura entre o rio capturador e o capturado, marcado pelo desenvolvimento de um nível de base local. Terraços fluviais podem ser encontrados no vale suspenso. Modificado de: Bishop (1995).

3.1.3. Rios não ajustados em relação aos vales (*misfit streams*)

A identificação de um rio não ajustado é feita quando este é nitidamente muito menor ou maior para ter erodido o vale no qual ele flui (Figura 12). Um rio ou canal fluvial com meandros que obviamente não são proporcionais à largura da planície de inundação que se encontram podem ser identificados como anomalias de drenagem, consequência de processo de captura fluvial (SMALL, 1978). Isso porque o trecho remanescente do rio capturado terá uma perda significativa de descarga e de sedimentos, apresentando efeito oposto na área do rio capturador (ZAPROWSKI *et al.*, 2002). Porém não são todos os casos de rios desajustados que estão intimamente relacionados com processo de captura fluvial, podendo ser consequência de mudanças paleoclimáticas (TWIDALE, 2004). De acordo com Dury (1960), os rios desajustados podem ser relacionados à processo de captura a partir da distribuição dos casos

deste fenômeno numa dada região com ocorrências essencialmente localizadas, diferentemente da hipótese de mudança climática que atingiria toda região. Portanto, a identificação de rios com largura desproporcional aos seus vales, em conjunto com as demais evidências morfológicas descritas (cotovelos de drenagens, terraços fluviais, níveis de base locais e vales secos), apresenta-se como argumento favorável ao processo de captura fluvial (SMALL, 1978).

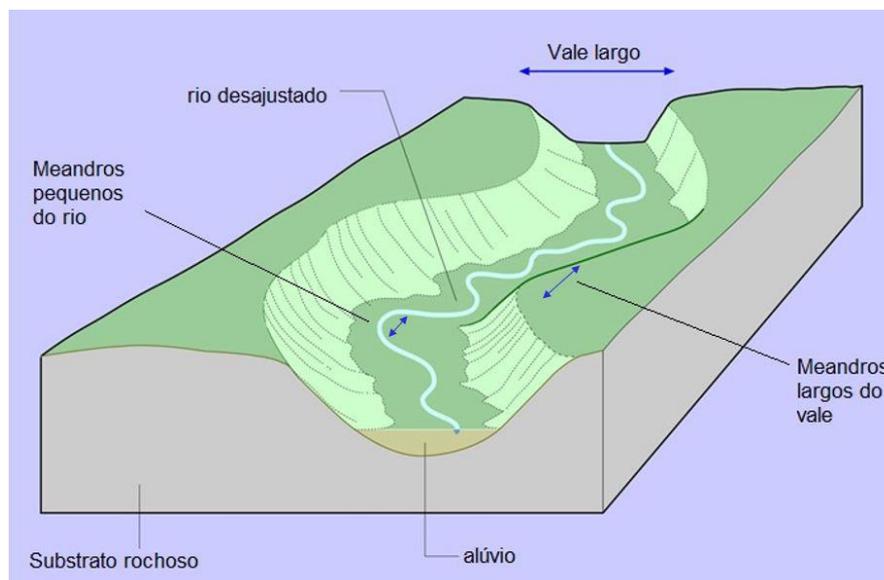


Figura 12 – Ilustração de um rio desajustado em relação ao vale. Modificado de: Goudie e Gardner (1992).

3.1.4. Desenvolvimento e propagação de níveis de base locais

Os níveis de base exercem uma grande influência na evolução da rede de drenagem e, conseqüentemente, também na própria evolução do relevo por serem níveis reguladores da dissecação da superfície pela ação da água. A evolução da rede de drenagem de qualquer bacia hidrográfica depende do seu nível de base geral, dado pelo prolongamento do nível do mar, associando-o ao limite de evolução dos processos fluviais (POWELL, 1875; CATUNEANU, 2002), bem como da ocorrência de níveis de base locais. Os níveis de base locais (NBLs), também conhecidos como *knickpoints*, correspondem a pontos de inflexão ou rupturas de declive no gradiente de um rio, geralmente manifesto através de quedas d'água (corredeiras ou cachoeiras) (CROSBY e WHIPPLE, 2006), mas também como lagos no perfil longitudinal ou em posição da foz em confluências com o rio principal (CHRISTOFOLETTI, 1977) (Figura 13).

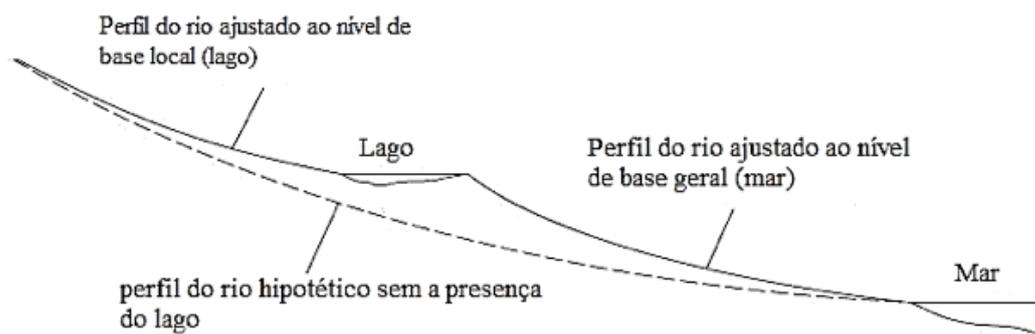


Figura 13 – Ilustração em perfil longitudinal de níveis de base local e geral por um rio fluindo para um lago e, posteriormente para o mar. Em cada segmento, o gradiente do perfil ajusta ao menor nível alcançável. Modificado de: Catuneanu (2002).

Os NBLs irão se desenvolver a partir de uma mudança para o rebaixamento do nível de base devido a eventos de regressões marinhas, tectonismo, mudanças climáticas, entre outros. Isso desencadeará numa retomada de erosão progredindo em direção a montante e que produzirá um rejuvenescimento de drenagem por aumento de suas taxas de incisão (CHRISTOFOLETTI, 1977). Ao encontrar camadas de rochas resistentes, a erosão remontante irá condicionar, portanto, a formação de rupturas de declive que têm como papel no processo desnudacional de retardar a migração da vaga erosiva e, com isso, os trechos a montante não serão afetados pelas mudanças ocorridas no nível de base (CHRISTOFOLETTI, 1977; SMALL, 1978).

Partindo da ideia que o êxito de uma captura fluvial dependerá de a capacidade de um canal erodir a um nível mais baixo do que o outro, o canal capturado é submetido a uma queda repentina do nível de base, formando então os *knickpoints* (BISHOP, 1995; CROSBY e WHIPPLE, 2006; SUMMERFIELD, 1991). Um NBL produzido por rearranjo fluvial tende a se propagar em direção a montante (CLARK *et al.*, 2004) e essas feições geomorfológicas são ocasionalmente encontradas próximo aos cotovelos de captura, evidenciando a diferença altimétrica entre os rios envolvidos (SMALL, 1978) (Figura 11). Em rios de leito aluvial, a incisão desencadeada ao longo dos principais vales pode levar ao desenvolvimento de terraços fluviais associados aos níveis de base locais (DOUGLASS *et al.*, 2009).

A migração remontante do nível de base local propaga o sinal de mudanças para toda a bacia. Porém é válido ressaltar que áreas separadas da mesma bacia podem estar sob regimes diferenciados: a jusante dos níveis de base locais, ocorre o progressivo ajuste às novas

condições, enquanto a montante as condições pré-captura ainda podem prevalecer (CROSBY e WHIPPLE, 2006).

3.1.5. Terraços Fluviais

Os terraços fluviais são formas de relevo originadas em ambiente de fundo de vale, constituindo-se em uma feição de topo plano horizontal ou aproximadamente horizontal, limitado por uma parede abrupta para o lado do canal fluvial, podendo ainda corresponder e limites de outros terraços mais altos ou pela vertente do vale (CHRISTOFOLETTI, 1981). Pode ser definido como sendo antiga planície de inundação que foi abandonada (Figura 14) (LEOPOLD *et al.*, 1964; SUMMERFIELD, 1991), tendo sua delimitação definida pelo critério da magnitude e frequência das cheias não atingirem seu topo com recorrência de no mínimo dez anos (CHRISTOFOLETTI, 1981). Sendo assim, os terraços são testemunhos de um paleocanal existente em uma antiga fase de agradação e essas mudanças no regime do vale podem ser provocadas por variações climáticas ou eventos tectônicos. Portanto, os depósitos aluvionares são constituídos tanto por uma atual planície de inundação, mas também podem apresentar terraços fluviais com material aluvionar em níveis suspensos que remetem às antigas planícies de inundação.

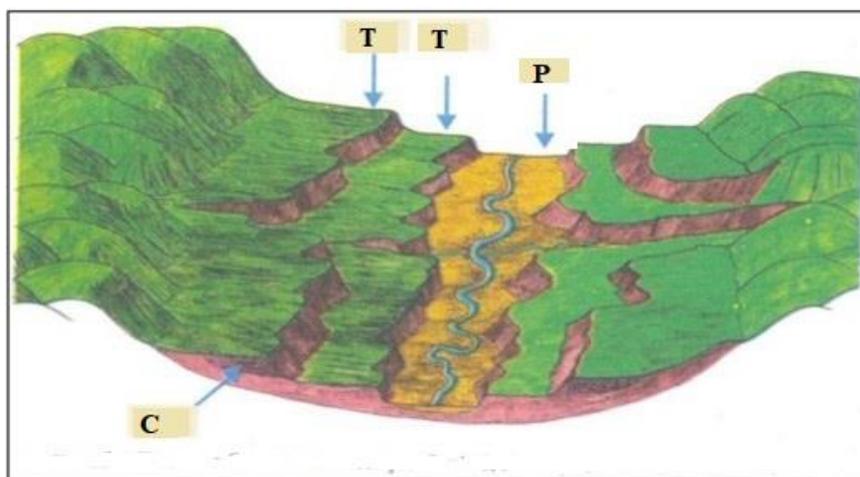


Figura 14 – Ilustração de terraços fluviais (T) e a atual planície de inundação (P) numa paisagem hipotética. A composição dos terraços fluviais por depósito de cascalho (C), presente no perfil estratigráfico, indica a possibilidade de mudanças no regime de transporte sedimentar com maiores descargas e maior efetividade da erosão, em relação ao presente. Modificado de: Jatobá e Lins (2008).

Em algumas regiões, a captura fluvial é o fator principal de desenvolvimento de uma paisagem de terraços e que os rios podem ser os responsáveis pela deposição de material grosseiro em seu vale e podem dar pistas sobre a origem destes cascalhos, isto é, sua área fonte,

no caso de uma captura fluvial (OLIVEIRA, 2010; PRINCE *et al.*, 2010). De acordo com Zaprowski *et al.* (2002), as mudanças no fluxo do rio também podem ser reconhecidas pela análise estratigráfica dos terraços fluviais, pois as inclinações de seus depósitos refletem a direção do fluxo quando os sedimentos foram depositados. Se a direção do mergulho do terraço é distintamente diferente da direção do fluxo do canal atual, isso pode ser um indicador de captura fluvial. Caso um depósito fluvial, como cascalhos, contenha tipos de rochas não encontradas no rio atual, também pode ser que uma captura fluvial tenha ocorrido anteriormente (ZAPROWSKI *et al.*, 2002).

Santos (2017) aponta que um dos critérios para distinguir a formação de terraços por captura daqueles produzidos por outros processos é sua distribuição espacial numa dada área. O autor pontua que em casos de sincronidade regional é esperado que a produção de terraços seja devida ou a mudanças paleoclimáticas, ou ao longo de estruturas tectonicamente ativas, ao passo que os terraços produzidos por capturas tendem a ser restritos às margens dos rios diretamente afetados (SANTOS, 2017). Um exemplo de produção de terraços por instabilidade climática regional, é o caso do evento Manso que atingiu a bacia do rio Paraíba do Sul Holoceno inicial, havendo entulhamento dos vales, seguido de entalhamento fluvial, desenvolvendo tais formas aluviais (MOURA e MELLO, 1991; PELECH, 2016).

Os terraços fluviais presentes ao longo da linha de drenagem a montante do ponto de captura podem se correlacionar com o vale seco e definir um gradiente longitudinal do paleorio antes da captura (Figura 15) (CLARK *et al.*, 2004; PRINCE *et al.*, 2010).

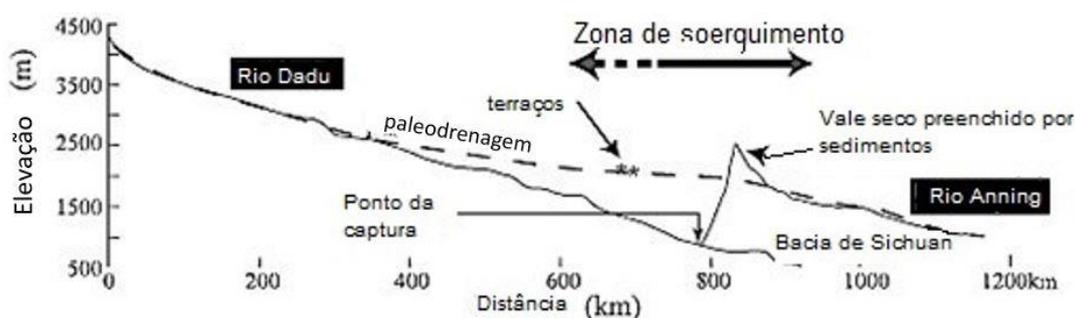


Figura 15 – Perfil longitudinal dos rios Dadu e Anning, projetado com o propósito de reconstruir o trajeto do rio estudado antes da captura. Os rios compõem a área de estudo de Clark *et al.* (2004). A linha tracejada representa a reconstrução sistemática do paleorio Dadu-Anning, antes da captura. As setas apresentam indicadores de captura fluvial, como os vales secos preenchidos por sedimentos, ponto da captura e os terraços. Modificado de: Clark *et al.* (2004)

Um ponto de atenção a ser feito na caracterização dos terraços é que a sua morfologia pode ser modificada por erosão ou soterramento a partir de processos derivados das vertentes,

ou mesmo por processos fluviais, ou em leques aluviais por tributários, o que requer maior cautela na interpretação de formas e depósitos neles descritos (STOKES *et al.*, 2012). A preservação dessa forma torna-se progressivamente descontínua, à medida que se tornam mais antigos e dissecados.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A operacionalização da pesquisa se fez em quatro etapas distintas e complementares: revisão bibliográfica, organização de bases de dados, análise morfológica e morfométrica do relevo e do sistema de drenagem e atividades de campo (Figura 16).

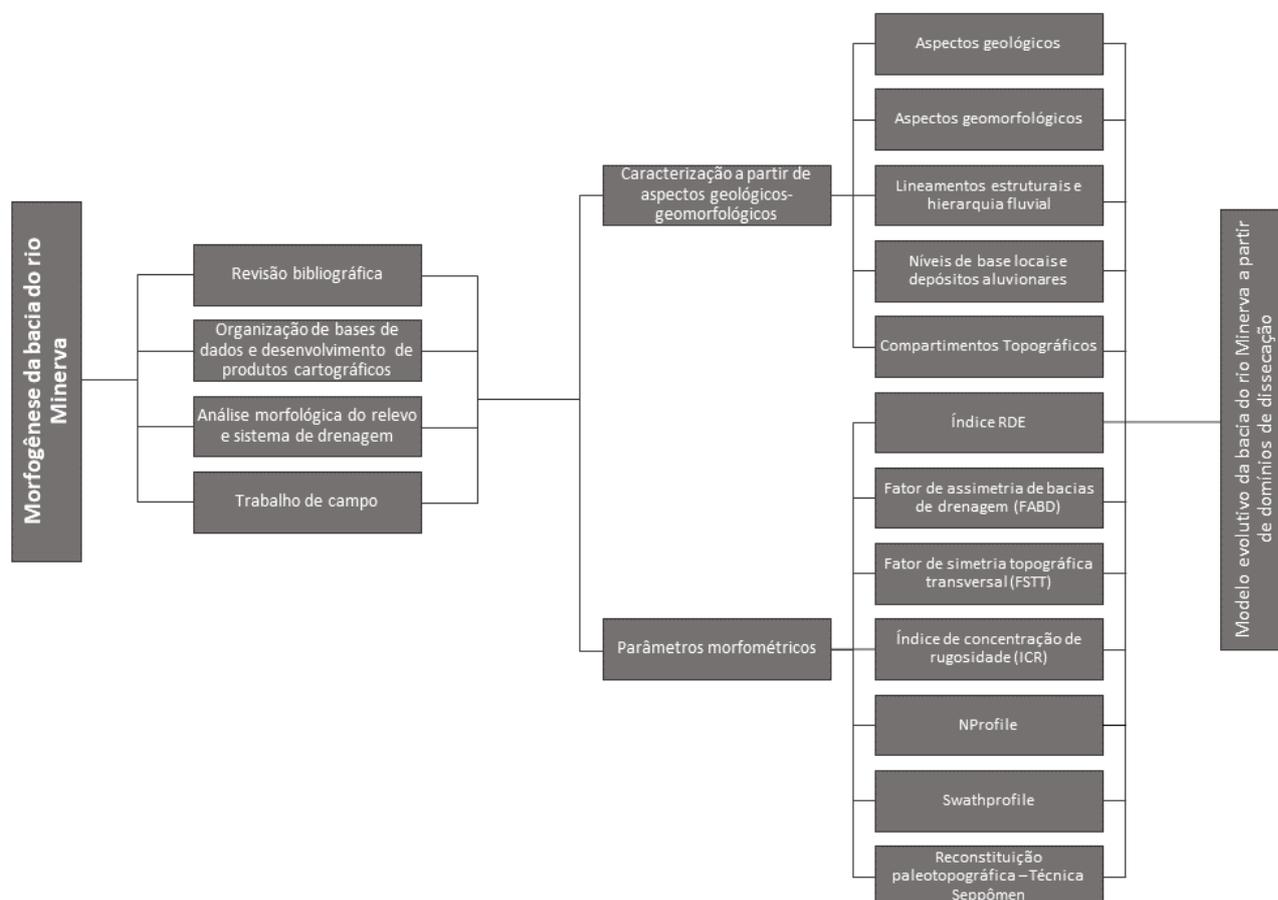


Figura 16 – Esquema geral da rotina metodológica adotada na pesquisa. Elaboração própria.

4.1. Revisão Bibliográfica

Essa etapa foi responsável por sistematizar e analisar informações obtidas a partir de levantamento bibliográfico sobre trabalhos que abrangem fenômenos da evolução da paisagem geomorfológica e de bacias de drenagem em contexto do Planalto Sudeste Brasileiro. Destacam-se as temáticas referentes à: aspectos fisiográficos da área de estudo; aspectos geológicos e geomorfológicos regionais; expansão da rede drenagem; rearranjo fluvial; e utilização de parâmetros morfométricos na análise de evolução do relevo.

Para avaliar a importância relativa dos rearranjos de drenagem à morfogênese da bacia, foram analisadas as propostas metodológicas de Bishop (1995), Clark *et al.* (2004), Small (1978) e Zaprowski *et al.* (2002), que consistem na identificação de elementos morfológicos

sugestivos no rearranjo de sistemas de drenagem. Sendo, também, avaliados os principais elementos sugeridos por estas bibliografias: cotovelos de captura; padrões de drenagem anômalos (*barbed*); rios desajustados em relação ao vale (*misfit streams*); vales secos; anomalias no perfil longitudinal (ex. níveis de base locais) e terraços fluviais.

4.2. Organização de bases de dados para desenvolvimento de produtos cartográficos

Os materiais cartográficos e os dados presentes em tabelas, gráficos e diagramas de rosetas foram desenvolvidos a partir de dados georreferenciados extraídos tanto de cartas topográficas, como cartas geológicas, imagens de satélite, modelos digitais de elevação e, quando possível, de atividades de campo.

Para a estruturação do banco de dados, a presente pesquisa reuniu os seguintes materiais:

- Cartas topográficas na escala de 1:50:000 disponibilizadas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE): Folha Sapucaia (SF-23-X-D-V-3), Folha Três Rios (SF-23-Z-B-I-2), Folha Anta (SF-23-Z-B-II-1) e Folha Mar de Espanha (folha SF-23-X-D-IV-4).

- Imagens de satélites Maxar Technologies (2021) obtidas com o uso do *software* Google Earth.

- Modelo digital de elevação do projeto TOPODATA (VALERIANO e ROSSETTI, 2012) elaborado a partir das imagens de radar *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM) da *U.S. Geological Survey* (USGS) com resolução espacial de aproximadamente 30 metros.

Os *softwares* utilizados foram:

- Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) *ArcGIS Desktop*®10.5 e *QGIS*®3.10 no auxílio da confecção dos produtos cartográficos, análise espacial, geração do diagrama de roseta e dos índices morfométricos apresentados na pesquisa.

- Google Earth© para obtenção das imagens de satélites.

- *Knickpoint Finder*: ferramenta computacional código aberto em *Python* e opera como uma *toolbox* no *software ArcGIS*® (QUEIROZ *et al.*, 2014; SALAMUNI *et al.*, 2013). Esse *software* se baseia no parâmetro morfométrico proposto por Hack (1973), identificando as anomalias de drenagem ao longo dos perfis longitudinais dos rios e foi utilizado na análise do parâmetro do Índice Relação Declividade-Extensão do Canal.

- O *software* Excel® do Pacote *Office* utilizado para realizar cálculos de alguns índices morfométricos e também para elaborar os perfis longitudinais plotados em gráficos de coordenadas cartesianas.

4.3. Análise morfológica e morfométrica do relevo e sistema de drenagem

Os procedimentos referentes à produção de dados para análise morfológica e morfométrica da bacia do rio Minerva foram realizados a partir de uma série de etapas que serão destacadas a seguir.

4.3.1. Mapa geológico

O mapa geológico foi obtido e feito o recorte da área de interesse a partir das folhas geológicas de 1:100.000 de Nova Friburgo (CPRM, 2009a) e Três Rios (CPRM, 2009b) e as folhas geológicas de 1:100.000 de Juiz de Fora (CODEMIG, 2003) e Leopoldina (CODEMIG, 2002).

4.3.2. Mapa geomorfológico

Este mapa foi gerado a partir do recorte da área de interesse do arquivo vetorial em *shapefile* disponibilizado pelo banco de dados de Informações Ambientais (BDIA) referente ao mapeamento geomorfológico sistemático do Brasil, executado pelo IBGE em escala de 1:250.000.

4.3.3. Mapa de compartimentação topográfica

A compartimentação topográfica se fundamentou no trabalho de Meis *et al.* (1982) refinado por Silva *et al.* (2007), que consiste no cálculo da amplitude altimétrica (Δh) dada pela diferença entre a altitude superior ($\Delta h_{\text{máx}}$) e a inferior ($\Delta h_{\text{mín}}$) de bacias de drenagem de primeira e segunda ordem até sua confluência com a rede coletora. Os cálculos da amplitude altimétrica são obtidos através da equação:

$$\Delta h = h_{\text{máx}} - h_{\text{mín}}$$

O mapeamento foi feito em cartas topográficas contempladas para área de estudo e o cálculo feito de forma manual em ambiente SIG. Optou-se pela realização deste mapeamento em meio analógico, em função da maior agilidade operacional obtida na etapa de interpretação visual.

Após a delimitação das bacias de primeira e segunda ordem realizada e o cálculo da amplitude altimétrica (Δh), foram reconhecidas bacias de drenagem que possuíam as mesmas classes de amplitude altimétrica, separando-se bacias com valores diferentes através da delimitação de interflúvios e divisores. E assim o mapa elaborado reflete o grau de encaixamento fluvial ou entalhamento erosivo das encostas, associando-se intimamente a variações litoestruturais e/ou tectônicas. O mapeamento das planícies fluviais foi realizado por uma adaptação metodológica, considerando-se que as rupturas de declive existentes entre as encostas e as áreas de baixo declive seria o critério de delimitação da área de acumulação ou retenção da sedimentação quaternária (feição morfológica correspondente às áreas de planícies fluviais) com as demais feições em que predominavam os processos erosivos ou de dissecação (SILVA *et al.*, 2007; SILVA, 2009). As subdivisões das classes de amplitude altimétrica e suas respectivas associações às feições morfológicas utilizadas estão sintetizadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Classes de amplitude altimétrica para a definição dos compartimentos topográficos.

Classes de Amplitude Altimétrica	Compartimentos Topográficos	Característica Morfológica
0-20m	planícies flúvio-marinhas	feições de topografia plana - horizontal a sub-horizontal
20-100m	colinas	feições de colinas de topos planos caracterizadas pelo entulhamento de vales e reenâncias de cabeceiras de drenagem
100-200m	morros	feições de encosta bem íngremes e que ocorrem muitas vezes isoladas em meio de planícies fluviais
200-400m	serras reafeiçoadas	feições de transição entre compartimentos diferentes
>400m	serras escarpadas	encostas escarpadas com topos bem elevados, com mudança abrupta entre os compartimentos

Fonte: Silva (2009).

4.3.4. Mapa de domínios de dissecação

Os domínios de dissecação são compartimentações geomorfológicas em bacias hidrográficas que apresentam similaridades na dinâmica hidrológica, erosiva e evolutiva do seu relevo devido ao controle de níveis de base locais (PINTO, 2015; SOUZA, 2019). Eles são delimitados a partir dos níveis de base locais dos cursos d'água até os divisores topográficos da bacia de drenagem, limitando-se pelo próximo nível de base local a montante ou pelo divisor de drenagem da bacia (no caso do domínio a extrema montante) (INEA, 2014).

A delimitação dos domínios de dissecação foi feita no *software* ArcGIS® a partir da interpretação das cartas topográficas atreladas ao mapeamento dos níveis de base locais da bacia. A compartimentação da bacia em domínios de dissecação a partir do rio principal e do

córrego Itabira subsidiou a análise da evolução erosiva do relevo. Foram ainda nomeados e classificados os domínios de dissecação da bacia reconhecidos, de acordo com a compartimentação do rio principal, sendo subdivididos em segmentos de alto, médio e baixo curso.

4.3.5. Lineamentos estruturais

Os lineamentos estruturais são representados por feições lineares identificadas em imagens de sensoriamento remoto da superfície terrestre, e podem estar associados a estruturas geológicas, como, falhas, sistemas de fraturas, zonas de cisalhamento e *trends* litológicos. A análise dos lineamentos auxilia, portanto, no entendimento da influência tectônica ou estrutural sob a organização morfológica de uma determinada área.

A extração dos lineamentos foi realizada em ambiente digital utilizando o MDE com a opção de relevo sombreado acionada através da ferramenta *hillshade* do *software* ArcGIS®. Após isso, as linhas estruturais foram mapeadas através de técnica de iluminação artificial com angulação de 45°, 90°, 311° e 360°, permitindo um reconhecimento eficiente dos lineamentos. Buscou-se reconhecer feições lineares naturais da superfície, tais como vales, cristas e escarpas retilíneas, depressões alongadas segmentos retilíneos de drenagem, descontinuidades retilíneas de terrenos textualmente distintos e feições tonais lineares (CHIANG, 1984). As direções principais e do comprimento dos lineamentos foram representadas em diagramas de rosetas geradas pelo *software* QGIS®. Por fim, foi gerado um mapa de densidade de lineamentos através da ferramenta *Line Density* presente no *ArcToolBox* do *software* ArcGIS®.

4.3.6. Hierarquia Fluvial

A análise da hierarquia fluvial, em conjunto com os lineamentos estruturais, permitiu caracterizar a rede de drenagem da bacia em termos estruturais e de ordenamento para apoiar nas investigações morfométricas.

O mapeamento da hierarquia fluvial permitiu um melhor conhecimento da configuração da rede de drenagem e apoio às análises morfométricas realizadas. Foi feito, portanto, a hierarquização e individualização das sub-bacias conforme a proposta de Strahler (1952), classificando o ordenamento de cada segmento fluvial manualmente em ambiente SIG, utilizando a rede de drenagem de base vetorial das cartas topográficas. E, por fim, foi gerado um mapa para apresentar as drenagens hierarquizadas.

A análise da rede de drenagem da bacia em conjunto com os lineamentos estruturais permitiu inferir o condicionamento das estruturas geológicas na organização e conformação do sistema fluvial na bacia

4.3.7. Mapeamento de níveis de base locais, depósitos aluvionares e terraços fluviais

O mapeamento dos depósitos aluvionares, correlacionado ao mapa de níveis de base locais, amparou à identificação de evidências de processos evolutivos que ocorreram na bacia, dado a partir do *input* erosivo resultante da captura da bacia pelo rio Paraíba do Sul. Com isso, o mapeamento dos terraços fluviais auxiliou nessa análise por serem feições correspondentes à antigas planícies aluviais que, após um processo de incisão fluvial e rebaixamento do nível de base, foram abandonados em níveis topográficos mais elevados.

Os níveis de base locais (*knickpoints*) e depósitos aluvionares foram extraídos a partir de uma base de dados já existentes, mapeamento feito através das cartas topográficas do IBGE (SILVA *et al.*, 2017; SOUZA *et al.*, 2018). Os terraços foram mapeados através de identificação das feições em imagens de satélite e checados em atividades de campo.

4.3.8. Índice Relação Declividade-Extensão do Canal (RDE)

O parâmetro morfométrico Relação Declividade-Extensão do Canal (RDE), método proposto por Hack (1973), permite a identificação de alterações ao longo de um rio através da análise de seus perfis longitudinais. Ao gerar o índice, esse parâmetro possibilita a comparação entre cursos fluviais de ordens e portes diferentes ao propiciar bases para o estabelecimento de comparações entre os mesmos. Diante disso, a aplicação do RDE na análise de bacias de drenagem se torna útil na identificação de locais com maior concentração de alteração do gradiente dos canais que, associados à controles estruturais, permitem verificar anomalias de drenagem.

O índice de RDE é calculado da seguinte forma para um determinado trecho da drenagem:

$$RDE_{trecho} = \left(\frac{\Delta H}{\Delta L} \right) \times L$$

Onde:

ΔH - é a diferença altimétrica do trecho estudado ao longo do curso d'água.

ΔL - é o comprimento da projeção horizontal da extensão do referido trecho.

L - corresponde ao comprimento da projeção horizontal entre a cabeceira do curso d'água e seu ponto mais a jusante que está sendo estudado.

O respectivo índice também poder ser calculado para toda extensão de um canal fluvial, considerando sua amplitude altimétrica e o logaritmo natural da sua extensão. Com isso, o RDE_{total} é obtido a partir da seguinte expressão:

$$RDE_{total} = \frac{\Delta H}{\log L}$$

Onde:

ΔH - é a diferença altimétrica do canal estudado.

$\log L$ - logaritmo natural da extensão do canal

Os valores de RDE_{trecho}/RDE_{total} permitem uma análise integrada, possibilitando o reconhecimento de anomalias no perfil e traçar relações com mecanismos evolutivos do próprio canal e da bacia.

O índice RDE foi aplicado a partir de rotinas e materiais distintos, uma de forma automatizada, através de uso de MDE e a ferramenta computacional *Knickpoint Finder* (QUEIROZ *et al.*, 2014; SALAMUNI *et al.*, 2013) e outra de forma manual, utilizando-se de cartas topográficas e planilha no software Excel®.

O índice RDE extraído de forma automatizada foi aplicado no rio principal e nos afluentes de maior ordem da bacia através da ferramenta computacional *Knickpoint Finder* (QUEIROZ *et al.*, 2014; SALAMUNI *et al.*, 2013) que se baseia nesse parâmetro morfométrico proposto por Hack (1973), identificando as anomalias de drenagem ao longo dos perfis longitudinais dos rios. O *Knickpoint Finder* é um *software* de código aberto em *Python* e opera como uma *toolbox* no *software* ArcGIS® e o seu algoritmo utiliza o MDE com dados altimétricos, obtendo assim as informações tridimensionais da drenagem. Foi preciso definir duas variáveis antes de iniciar o processamento dos dados, que são a escala de trabalho e a equidistância altimétrica. Ao rodar a ferramenta, ela gera a rede de drenagem segmentada e uma malha de pontos (*knickpoints*) com valores de RDE de um trecho (RDE_{trecho}), RDE Total (RDE_{total}), e a razão entre o RDE_{trecho} e RDE_{total} (RDE_{trecho}/RDE_{total}), indicando seu grau

de anomalia. Adotou-se os intervalos propostos por Andrade Filho (2010), no qual a distinção das anomalias se dá em quatro tipos: menor que 2, correspondendo a trechos que se encontram bastante retrabalhados/erodidos; de 2 a 4, sendo trechos com influência intermediária de controles tectônicos sendo diferenciados; os de 4 a 6 de anomalias 3a. e 2a. ordens; e valor maior que 6 interpretados como anomalias de 1ª ordem, ou seja, trechos de rios com forte influência tectônica, mas, normalmente, com ocorrência isolada. A partir disso, gerou-se um mapa de densidade das anomalias de drenagem a partir do método de interpolação espacial *Kernel* e também um mapa do índice RDE pela interpolação IDW para ressaltar as zonas de concentração das anomalias de maior grau.

Já a extração do índice RDE de forma manual foi dado calculando-se tais valores a partir do levantamento hipsométrico e de extensão do rio Minerva e do córrego Itabira, utilizando cartas topográficas e posteriormente plotando os valores em uma planilha no *software* Excel®. Os cursos fluviais em estudo foram segmentados a partir das curvas de níveis que atravessam ortogonalmente a linha do canal. Após isso, o índice RDE (RDE_{trecho}/RDE_{total}) encontrado na planilha foi transferido para a tabela de atributos do segmento do canal em ambiente GIS e com isso gerou-se um mapa e gráficos, adotando-se os intervalos propostos por Andrade Filho (2010).

Esta análise buscou evidenciar anomalias que indicam mecanismos de reordenamento dos sistemas de drenagem e identificar áreas que ainda estão em processo de ajuste do perfil longitudinal de drenagem.

4.3.9. Fator de assimetria de bacias de drenagem (FABD)

O Fator de Assimetria de Bacias de Drenagem (FABD) permite inferir a ocorrência de falhas recentes mascaradas ou pouco aparentes. O deslocamento lateral do rio principal de uma bacia, causado por processos fluviais internos e/ou forças tectônicas, pode ser representado pelo seguinte cálculo do índice:

$$FABD = 100 \times \frac{Ar}{At}$$

Onde:

Ar = área à direita do canal principal

At = área total da bacia

De modo que para obter o valor de Ar , o polígono de cada sub-bacia é dividido em duas partes, considerando a posição e sentido do fluxo do canal principal. Segundo Salamuni *et al.* (2004) os valores encontrados muito próximos ou iguais a 50 indicam pouca ou nenhuma atividade tectônica, enquanto aqueles bem menores ou bem maiores que 50 indicam basculamentos das margens direita e esquerda, respectivamente.

O FABD foi calculado a partir da medida da área da bacia e da área à direita do canal principal, através da calculadora de geometria do *software* ArcGIS®.

4.3.10. Fator de simetria topográfica transversal (FSTT)

Esse parâmetro morfométrico proposto por Cox (1994) se baseia no fato de que a migração preferencial de um canal fluvial vai de encontro com uma das vertentes, caracterizando uma assimetria do perfil topográfico transversal da bacia. A assimetria ou não pode ser influência das condições tectono-estruturais do substrato rochoso que, por sua vez, podem influenciar a morfologia dos vales fluviais. Para uma identificação mais detalhada da influência tectono-estrutural na bacia, o FSTT foi aplicado no rio principal e no córrego Itabira, utilizando os domínios de dissecação como unidade espacial analítica.

O cálculo do FSTT se dá partir da fórmula:

$$FSTT = \frac{Da}{Dd}$$

Onde:

Da – é a distância da linha média do eixo da bacia até a linha média do canal fluvial ativo

Dd – é a distância da linha média do eixo da bacia à linha de seu divisor de drenagem.

Quando o perfil topográfico se aproxima do divisor de drenagem, o valor de FSTT chega mais próximo de um, identificando grande assimetria, ao contrário dos valores mais próximos a zero que evidencia um perfil topográfico transversal sem alteração.

Para se obter o índice, foram inseridos pontos no canal com equidistância de 2 km do exutório à cabeceira dos canais fluviais. A linha média das bacias dos canais selecionados foi construída com auxílio da ferramenta ‘*Midpoint*’. Em seguida, foram construídos os perfis topográficos transversais para o cálculo do índice, representados por feição vetorial em linhas. O cálculo dos perfis foi feito a partir da calculadora de geometria e os dados gerados de cada

variável foram disponibilizados numa planilha do *software* Excel e, assim, calculados os valores de FSTT, que posteriormente foram inseridos nas geometrias correspondentes em ambiente SIG.

4.3.11. Mapa de índice de concentração de rugosidade (ICR)

O Índice de Concentração de Rugosidade (ICR) foi aplicado com a finalidade de amparar a análise morfométrica da dissecação do relevo. Esta que se propõe identificar compartimentos do relevo com distintos padrões de dissecação (SAMPAIO, 2008).

Para se obter o ICR é extraído valores de declividades em porcentagem do MDE e com isso, converte-se esse dado *raster* em dado vetorial representado por pontos através da ferramenta de conversão *raster to point* contida no *ArcToolbox* do ArcGIS®. Após essa conversão, é aplicado o interpolador Kernel na ferramenta de análise espacial de densidade Kernel, também contida no *ArcToolbox*, e elege-se como atributo o valor de declividade e o raio de 564m (1km²), tendo como resultado o ICR Local. Segundo Sampaio e Augustin (2014), o ICR Local possibilita a compartimentação de quaisquer ambientes em subunidades morfológicas, indicado para estudos exploratórios e com a finalidade de identificar unidades preliminares de estudo. Com isso, é possível reconhecer, de modo preliminar, unidades morfológicas e processos evolutivos da bacia.

4.3.12. *NProfile*

NProfile é uma ferramenta que gera perfis normalizados de drenagens para se calcular o índice de concavidade da drenagem pela forma do seu perfil longitudinal. Assim como o *Swath Profile*, esse parâmetro é muito utilizado em análises para investigar respostas de curto a longo prazo na paisagem, se mostrando como potência para estudos de evolução do relevo e da rede de drenagem (PÉREZ-PENA *et al.*, 2017). A partir dessa ferramenta, o índice de concavidade é definido como a área percentual de um triângulo formado pelo perfil do rio e a reta que conecta a nascente até sua foz. Os valores positivos dos perfis de concavidade representam perfis côncavos para cima demonstrando proximidade das condições de equilíbrio, enquanto os valores negativos indicam perfis convexos, evidenciando rios que ainda não estão adaptados ao nível de base geral. O índice também mostra o ponto máximo de concavidade (C_{max}).

O cálculo do índice de concavidade foi feito através do *plug-in NProfile* instalado no ArcGIS®, no qual são necessários dados de entrada em linhas, correspondentes aos rios analisados, e o MDE para fonte de elevação. O *plug-in* está disponível para *download* em: https://github.com/geolovic/NProfiler_ArcGIS. Com isso, o *software* gera o perfil normalizado em formato gráfico e os dados são exportados para geração de tabelas em Excel. O *NProfile* foi aplicado no rio principal e no córrego Itabira, setorizado por domínios de dissecação e nos principais canais afluentes do rio Minerva.

4.3.13. *Swath Profile*

Perfis *swath* (*Swath profile*) auxiliam na interpretação de padrões topográficos, possibilitando identificar influências tectono-estruturais em diferentes compartimentos geomorfológicos. A construção desse perfil é obtida através da definição de uma janela móvel na superfície, na qual os dados serão examinados estatisticamente através de um MDE através da extração da elevação topográfica máxima, média e mínima em um transecto (PÉREZ-PENA *et al.*, 2017). Esse perfil possibilita identificar a evolução erosiva da bacia pelo comparativo da diferença altimétrica entre setores distintos.

Os perfis *swath* foram gerados a partir da extração de valores máximos, médios e mínimos de uma janela predefinida no MDE relacionada ao transecto feito em formato vetorial de polilinha. Para isso, foi utilizado o *plug-in Swath Profiler* (disponível em: https://github.com/geolovic/SwathProfiler_ArcGIS) no ArcGIS®. Os perfis foram aplicados no rio principal da bacia e no córrego Itabira, setorizados a partir dos domínios de dissecação.

4.3.14. Mapas paleotopográficos

Buscando corroborar com as análises evolutivas e de processos que atuaram e atuam na esculturação do relevo da bacia, foi feita a restituição paleotopográfica a partir da técnica seppômen (MOTOKI *et al.*, 2008). Essa técnica permite discutir características relativas à evolução do relevo numa perspectiva temporal a partir da modelagem de nivelamento de valores máximos de altimetria, através da extração dessas informações no MDE em células com tamanho pré-definido, compondo uma grade. Em síntese, esses mapas de nivelamento dos topos revelam a configuração geral do relevo anterior à dissecação atual, em um período estimado com base nas dimensões das células para as quais o procedimento é executado (MARQUES NETO *et al.*, 2019). A escala de trabalho e as dimensões das células da grade

influenciam os resultados obtidos pela técnica *Seppômen*, sendo sugerido que estudos mais locais, como em áreas de pequenas bacias hidrográficas, utilizem células de maiores dimensões.

Portanto foram utilizadas três malhas para a reconstituição paleotopográfica na bacia do rio Minerva: 0,5 km × 0,5 km, 1,0 km × 1,0 km e 2,0 km × 2,0 km. A grade foi gerada através da ferramenta “Criar Grade” no QGIS©; e a base cartográfica de onde foi feita a extração dos pontos culminantes do relevo da bacia correspondeu ao MDE utilizado ao longo do trabalho. Para a geração dos mapas paleotopográficos, utilizou-se a técnica de interpolação *Inverse Distance Weighted* (IDW) presente no SIGs trabalhados na pesquisa.

4.4. Trabalho de Campo

Os trabalhos de campo foram importantes para reconhecimento da área, validação dos resultados obtidos através das análises morfométricas e morfológicas e, também, para identificar elementos geológicos e geomorfológicos que auxiliaram na investigação dos processos de capturas fluviais na evolução da rede de drenagem da bacia, como: cotovelos de captura, vales secos, níveis de base locais e terraços fluviais.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Caracterização a partir de aspectos geológicos e geomorfológicos

5.1.1. Aspectos geológicos e geomorfológicos

Em termos geológicos, a bacia do rio Minerva é constituída por seis litotipos (Figura 17). São eles: ortognaisses do Complexo Quirino; ortogranulitos do Complexo Juiz de Fora; Biotita gnaisses bandado do Complexo Paraíba do Sul; Granada-biotita gnaisse do Grupo Andrelândia; diques de diabásio e depósitos colúvio-aluvionares.

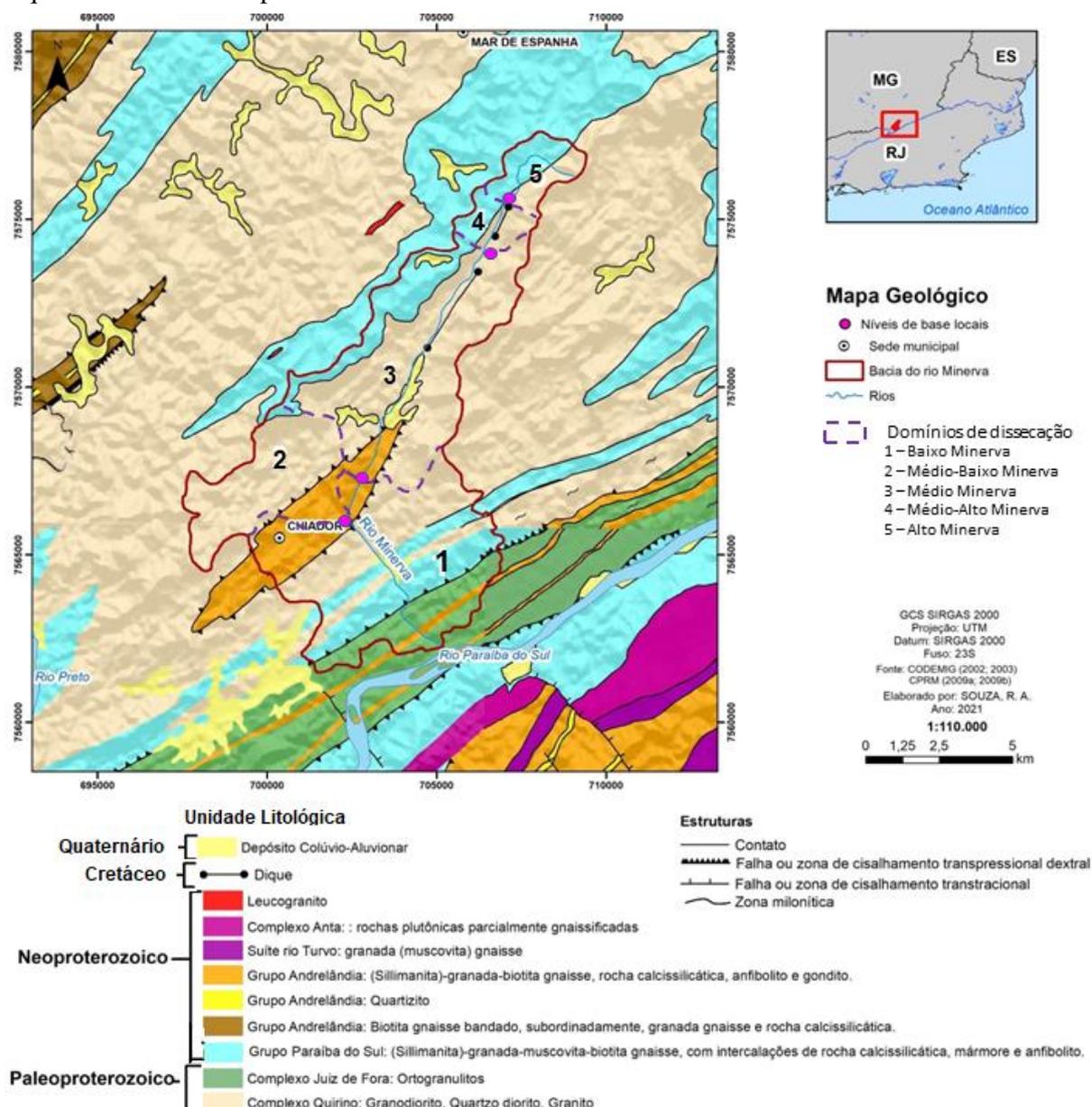


Figura 17 – Mapeamento geológico da área em que se insere a bacia do rio Minerva.

Segundo Valladares *et al.* (2012) as unidades do Grupo Andrelândia e do Complexo Juiz de Fora constituem o Terreno Ocidental, correspondente à “margem passiva” do paleocontinente São Francisco, representado pelo Domínio Juiz de Fora. Já as unidades do Complexo Quirino e do Grupo Paraíba do Sul correspondem ao terreno Paraíba do Sul que se encontra sobre o Terreno Ocidental de forma sinformal dobrada. Em relação a idade geológica de cada unidade, o ortognaisse do Complexo Quirino e o ortogranulito do Complexo Juiz de Fora são embasamentos paleoproterozoicos. Já a biotita gnaisse bandado do Complexo Paraíba do Sul e a granada-biotita gnaisse do Grupo Andrelândia são gnaisses metassedimentares do Neoproterozoico, sendo o primeiro uma sequência metassedimentar de posicionamento estratigráfico indefinido (VALLADARES *et al.*, 2012).

O embasamento na porção sul da bacia, local do exutório do rio principal, é afetado por uma zona de falhamento transcorrente dextral com uma faixa de rochas blastomiloníticas de alto ângulo, também conhecida como lineamento de Além Paraíba (ALMEIDA *et al.* 1975; CAMPANHA, 1981), zona de cisalhamento do rio Paraíba do Sul (DAYAN e KELLER, 1990) ou zona de cisalhamento Além Paraíba (SILVA, 2010). Essa zona é tardia em relação a colisão e está situada no contato da *klippe* com o Domínio Juiz de Fora, gerando, então, uma foliação marcante nessas rochas, com um mergulho vertical que favorece também um caminho para o rio Paraíba do Sul fluir. Nos domínios Médio Minerva e Médio-alto Minerva foram identificados diques máficos de diabásio oriundos do processo de rifteamento da crosta na área de estudo (CODEMIG, 2003), reforçando evidências do processo de abertura do Oceano Atlântico que gerou intrusões máficas na superfície terrestre do sudeste brasileiro no início do Jurássico.

Numa caracterização geomorfológica inicial, focalizada nos processos morfogenéticos da área de estudo (Figura 18), o relevo apresenta três tipos de modelados de dissecação, segundo a classificação do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2009): Dissecação Estrutural de topo aguçado; Dissecação Estrutural de topo convexo e Dissecação homogênea de topo convexo.

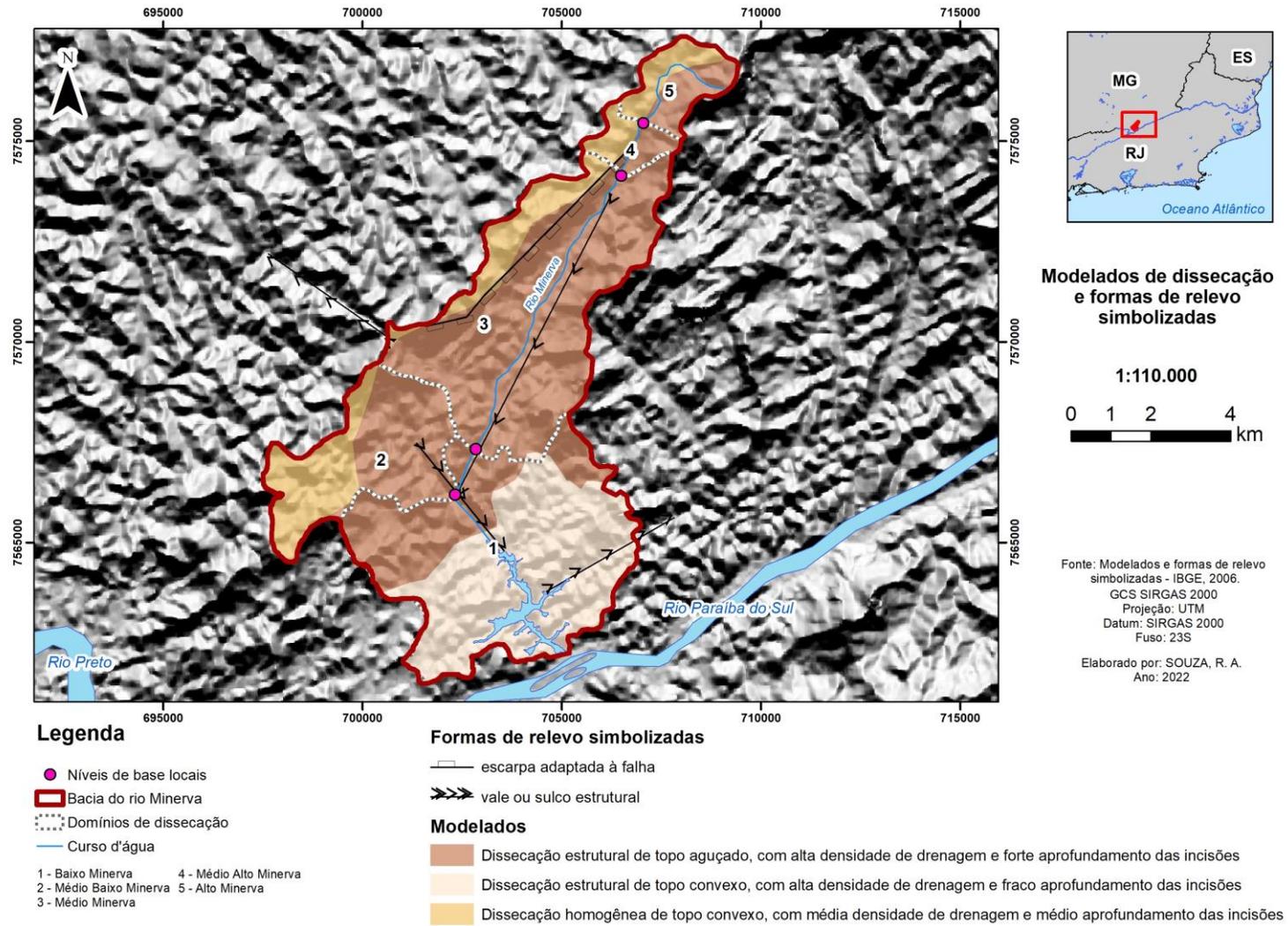


Figura 18 – Mapa de modelados de dissecação e formas de relevo simbolizadas da bacia do rio Minerva.

Boa parte do relevo da porção inferior da bacia, setorizado pelo domínio Baixo Minerva, é caracterizado por um modelado de dissecação estrutural de topo convexo com um índice de dissecação de alta densidade de drenagem e fraco aprofundamento das incisões. Esse relevo se apresenta em morros baixos e serras reafeiçoadas, além de uma presença de extensas planícies aluvionares marcadas por ambientes alagadiços devido à influência de uma Pequena Central Hidrelétrica, no distrito de Anta (SOUZA, 2019) (Figura 19). Essa porção apresenta também vales estruturais em direção ENE, devido a influência da zona de cisalhamento do rio Paraíba do Sul (CAMPANHA, 1981; DAYAN e KELLER, 1990; SILVA, 2010) e o rio principal encontra-se encaixado em NW-SE em outro vale estrutural, possivelmente aproveitando estruturas originadas pela abertura do oceano atlântico.



Figura 19 – Paisagem do modelado de dissecação estrutural de topo convexo com um índice de dissecação de alta densidade de drenagem e fraco aprofundamento das incisões Planície aluvionar alagada e morros baixos no domínio Baixo Minerva. Foto: T.M. Silva (dez./2021).

Responsável por 56 % do padrão das formas de relevo da área de estudo, o modelado de dissecação estrutural de topo aguçado com alta densidade de drenagem e forte aprofundamento das incisões está distribuído em grande parte da bacia. Essa porção apresenta algumas colinas e morros baixos (Figura 20), porém a predominância de formas de relevo são serras reafeiçoadas e escarpadas e planícies aluvionares ao longo dos cursos fluviais de maior ordem. A ocorrência das colinas e morros baixos diminui a sentido montante, com a presença

maior de serras reafeiçoadas na paisagem emparedada pela serra do Arribada (Figura 21) a oeste-noroeste e serras isoladas a leste, com amplitude de até 450 metros (SOUZA, 2019).



Figura 20 – Visão panorâmica de um vale afluente do córrego Itabira, no Médio-baixo Minerva, representando o modelado de dissecação estrutural de topo aguçado com alta densidade de drenagem e forte aprofundamento das incisões. Foto: R.A. Souza (dez./2021).



Figura 21 – Visão panorâmica da serra do Arribada em último plano - Domínio Médio Minerva. Foto: T.M. Silva (dez./2021).

O limite entre o domínio Médio-baixo Minerva e Baixo minerva a sudoeste da bacia é marcado por uma janela estrutura do biotita-gnaissse do Grupo Andrelândia no ortognaissse do

Complexo Quirino. Esta última unidade forma um degrau soerguido na paisagem, marcando a mudança entre os modelados de dissecação estrutural no terreno rebaixado para o de dissecação homogênea na porção suspensa, num compartimento topográfico de serras reafeiçoadas. A serra do Arribada está relacionada a uma escarpa de orientação NE-SW, identificada no contato litológico do granada-muscovita-biotita gnaiss do Grupo Paraíba do Sul no alto serrano com o ortognaiss do complexo Quirino em boa parte do vale da bacia. O vale estrutural muda de direção NW-SE para NE-SW a montante com segmento de 3,4 km na primeira direção e 8,4 km na última.

A porção superior da serra do Arribada é marcada por vales suspensos com relevo planáltico de menor índice de dissecação que o modelado anterior (Figura 22). Esse modelado não apresenta controle estrutural marcante, sendo classificado como modelado de dissecação homogênea de topo convexo e índice de dissecação moderado. As características desse modelado segue a oeste da bacia, indicando que as bacias do reverso que desaguam no rio Paraíba, apresentam um relevo menos dissecado, enquanto a bacia do rio Minerva apresenta uma possível influência erosiva maior.



Figura 22 – Paisagem do modelado de dissecação homogênea de topo convexo e índice de dissecação moderado no vale suspenso da serra do Arribada, com presença de planície aluvionar em primeiro plano. Foto: M.M. Freitas (mar/2018).

5.1.2. Lineamentos Estruturais

Ao longo da bacia do rio Minerva foram traçados os lineamentos para avaliar a influência de possíveis controles estruturais na organização morfológica e no desenvolvimento da rede de drenagem da área. Foram gerados um total de 185 lineamentos (Figura 23), com a orientação preferencial N40-50E e N50-60E, seguido pela direção N40-50W, sendo os lineamentos W-E e N-S os menos representativos, respectivamente. Os lineamentos de orientação NE-SW correspondem às estruturas oriundas da orogênese Brasileira no Neoproterozoico (ALMEIDA *et al.*, 1981; HEILBRON *et al.*, 1995), enquanto os lineamentos NW-SE correspondem aos eventos de natureza rúptil da abertura do Oceano Atlântico durante parte do Mesozoico-Cenozoico, em especial o Rife Continental do Sudeste do Brasil (RCSB) no Cenozoico (RICCOMINI, 1989).

Os lineamentos se apresentam em toda bacia, porém sua densidade evidenciada no mapa auxilia a identificação de porções de maior concentração de lineamentos, destacadas em manchas avermelhadas.

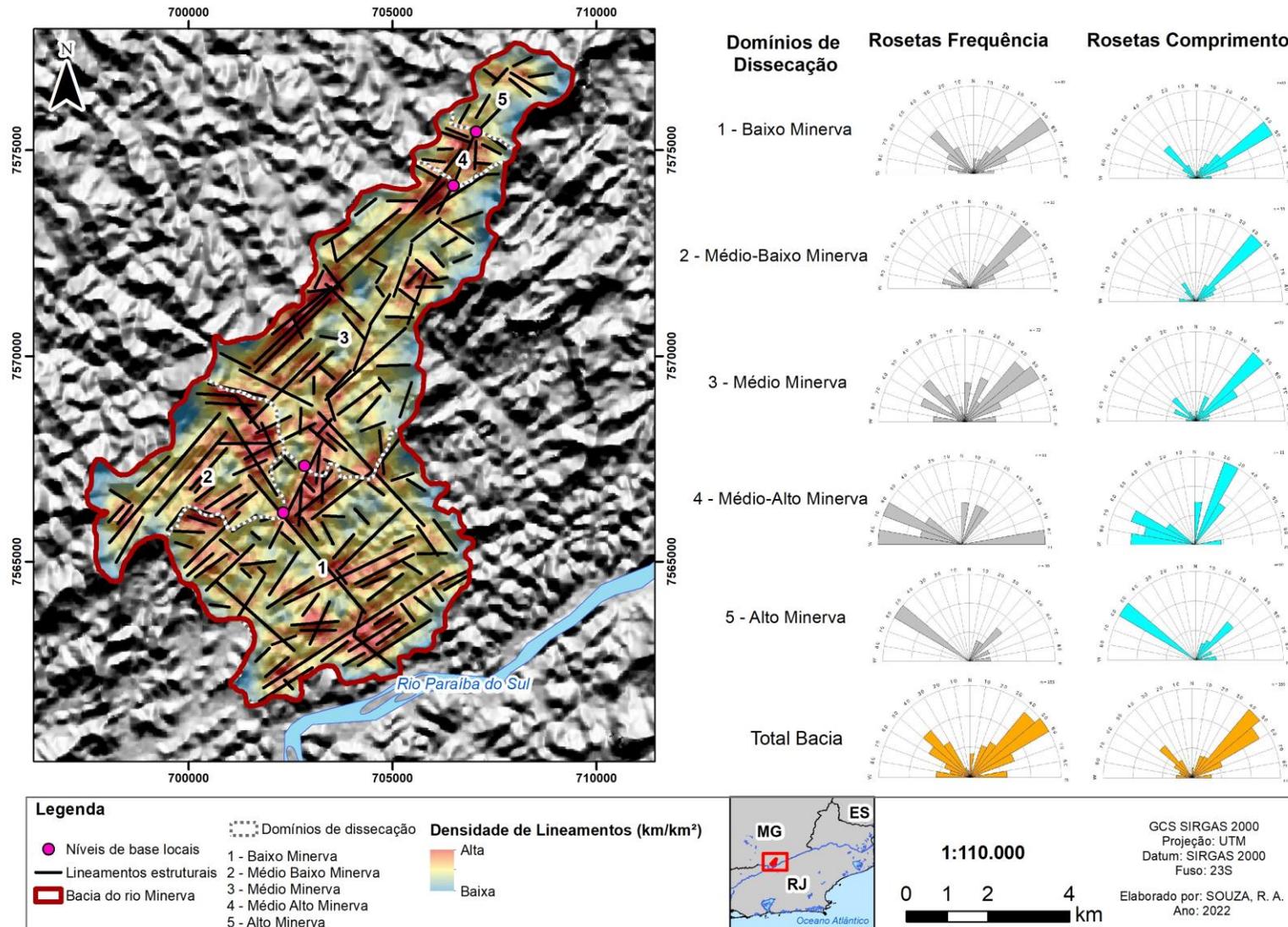


Figura 23 – Lineamentos estruturais e diagrama de rosetas reconhecidos para área de estudo.

O domínio de dissecção Baixo Minerva apresenta oitenta e um lineamentos, representando o domínio com maior quantidade de lineamentos mapeados na bacia. A porção sul desse domínio apresenta orientações predominantes a N50-60E, sendo o local afetado por uma zona de falhamento transcorrente dextral com uma faixa de rochas blastomiloníticas de alto ângulo, também conhecida como lineamento de Além-Paraíba (ALMEIDA *et al.*, 1975; CAMPANHA, 1981), zona de cisalhamento do rio Paraíba do Sul (DAYAN e KELLER, 1990) ou zona de cisalhamento Além Paraíba (SILVA, 2010). Esses lineamentos de orientação NE-SW possibilitaram o desenvolvimento de cursos fluviais de segunda e terceira ordens em vales estruturais. Ainda nesse domínio de dissecção, notamos também a relevância de lineamentos N40-50W, trazendo indícios mais expressivos de fraturas na direção NW-SE, que propiciam o desenvolvimento do rio principal e de boa parte dos cursos fluviais de primeira ordem e segmentos iniciais dos de segunda ordem (Figura 24). É válido ressaltar que a hierarquia fluvial do rio principal passa de quarta para quinta ordem apenas nesse domínio, exatamente no ponto de transição entre ele e o domínio médio-minerva, marcado pelo nível de base local do córrego Itabira e ocorrendo a mudança da orientação do rio Minerva de NE-SW para NW-SE. Logo a montante desse ponto de inflexão da drenagem, o rio principal flui pelo vale estrangulado por morros alinhados a NNE-SW e com similaridades de um plano de falha, identificado apenas por aspectos morfológicos do relevo (Figura 25).

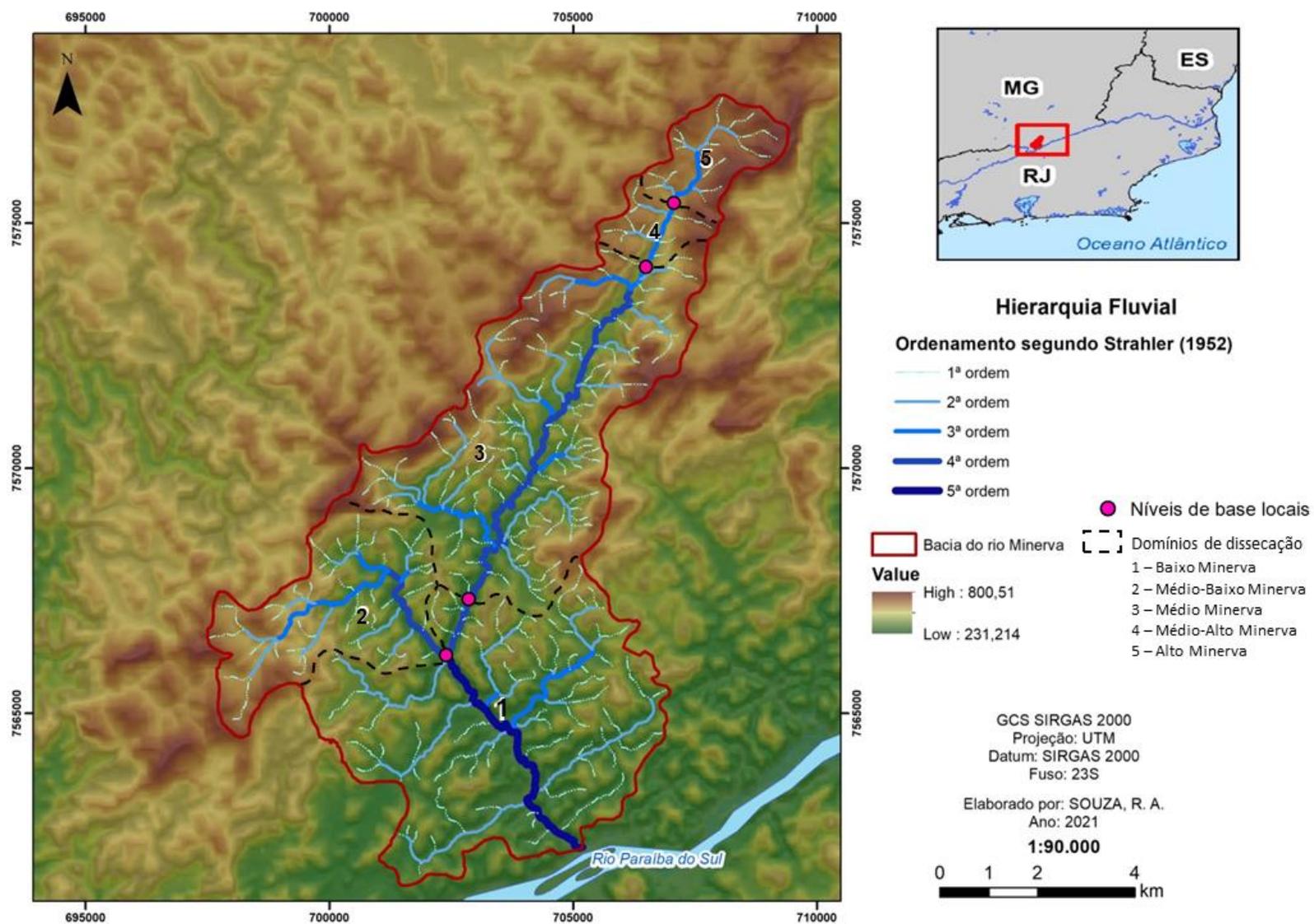


Figura 24 - Mapa de hierarquia fluvial da bacia do rio Minerva.



Figura 25 – Rio Minerva fluindo em um vale com estrangulamento de morros alinhados em direção NNE-SW - Baixo Minerva. Foto: T.M. Silva (dez./2021).

O domínio Médio-baixo Minerva é delimitado a partir do córrego Itabira, devido ao domínio hidrológico que ocorre a partir de seu nível de base ao confluir com o rio Minerva, sendo este o único curso fluvial de quarta ordem tributário do rio principal da bacia. Os lineamentos estruturais de orientação N40-50E seguem sendo de frequência predominante nesse domínio, assim como no Baixo Minerva, seguido dos lineamentos N50-60E e N40-50W. O córrego Itabira nasce e se desenvolve até a porção central do domínio na orientação NE-SW, sob hierarquia fluvial de terceira ordem. Ele muda de direção em seu médio curso de NE-SW para NW-SE, no encontro com um curso fluvial de terceira ordem orientado a NW-SE. Desse ponto até o seu nível de base, o córrego Itabira passa para uma hierarquia fluvial de quarta ordem e se desenvolve nos alinhamentos NW-SE. Observa-se que grande parte da área e da rede de drenagem desse domínio se desenvolveu em sua porção oeste, na margem direita do córrego Itabira e apresenta predominantemente lineamentos NE-SW. Grande parte dos seus cursos fluviais de primeira e segunda ordem da margem direita do córrego principal também estão orientados nessa mesma direção. O alinhamento de serras próximo à cabeceira do córrego Itabira também está orientado a NE-SW (Figura 26), dando segmento à serra do Arribada, presente nesse domínio e no domínio Médio Minerva.



Figura 26 - Alinhamento de serras próximo às cabeceiras do córrego Itabira orientadas NE-SW, localizadas no canto esquerdo da figura. Foto: R.A. Souza (dez/2021).

O domínio do Médio Minerva é o que representa a segunda maior ocorrência de lineamentos da bacia com setenta e dois deles mapeados. Os lineamentos de orientação N40-50E também apresentam a frequência predominante nesse domínio, assim como os outros dois a jusante, descritos anteriormente. Lineamentos N50-60E e N40-50W seguem como secundários, além de ocorrências em mais direções nesse domínio em relação aos anteriores. O rio Minerva se desenvolve em um vale estrutural orientado a NE-SW em todo trecho do domínio e lineamentos NW-SE e NE-SW orientam os vales de cursos fluviais de segunda e terceira ordem. A porção oeste do Médio Minerva é marcada pela escarpa da serra do Arribada (Figura 27) de alinhamento N40-50E, inferido no mapa geomorfológico como uma escarpa adaptada à falha.



Figura 27 - Alinhamento da escarpa da serra do Arribada no domínio de dissecação Médio Minerva. Foto: T.M. Silva (dez/2021).

O domínio do Médio-alto Minerva apresenta um total de onze lineamentos. A baixa frequência de lineamentos nesse domínio em relação aos outros é decorrência do tamanho menor de sua área. Sua maior frequência de lineamentos está orientada entre E-W e N60-70W, marcando os quatro principais vales tributários ao rio Minerva e o lineamento de seus topos de morro. Além disso, é válido destacar o comprimento predominante N20-30E do vale que o rio principal flui, seguindo a mesma orientação do dique de diabásio, e também a leve inflexão do lineamento N30-40E da escarpa da serra do Arribada que em grande parte do domínio anterior (Médio Minerva) tinha como orientação N40-50E.

O domínio do Alto Minerva apresenta um total de dez lineamentos, sendo junto com o domínio médio alto minerva, os de menores área da bacia. A direção predominante é N50-60W, marcando alinhamento de topos de morro e vales de rios tributários ao rio principal e o próprio rio principal que volta a ter uma orientação NW-SE no vale de sua cabeceira. Tais lineamentos seguem a orientação de fraturas NW-SE. Porém, o rio logo sofre uma inflexão a jusante, encaixando-se num lineamento NE-SW e seguindo nessa orientação, perpassando o nível de base local e seguindo assim nos demais domínios a jusante, apenas voltando a encaixar-se a NW-SE na inflexão de drenagem do Baixo Minerva. Alguns topos de morro no Alto Minerva também seguem com lineamento de orientação NE-SW.

5.1.3. Níveis de Base Locais e Depósitos Aluvionares

Na bacia do rio Minerva foram identificados trinta e dois níveis de base locais (NBLs) e 5,1% de sua área total composta por depósitos aluvionares (Figura 28). Nesta figura, é possível notar que a maior para menor concentração de NBLs nos diferentes domínios de dissecção de são distribuem-se da seguinte maneira: Médio Minerva (38% do total), Médio-baixo Minerva (34% do total), Médio-alto Minerva (13% do total), Baixo minerva (9% do total) e, por último, alto minerva com apenas dois níveis de base locais reconhecidos (6% do total).

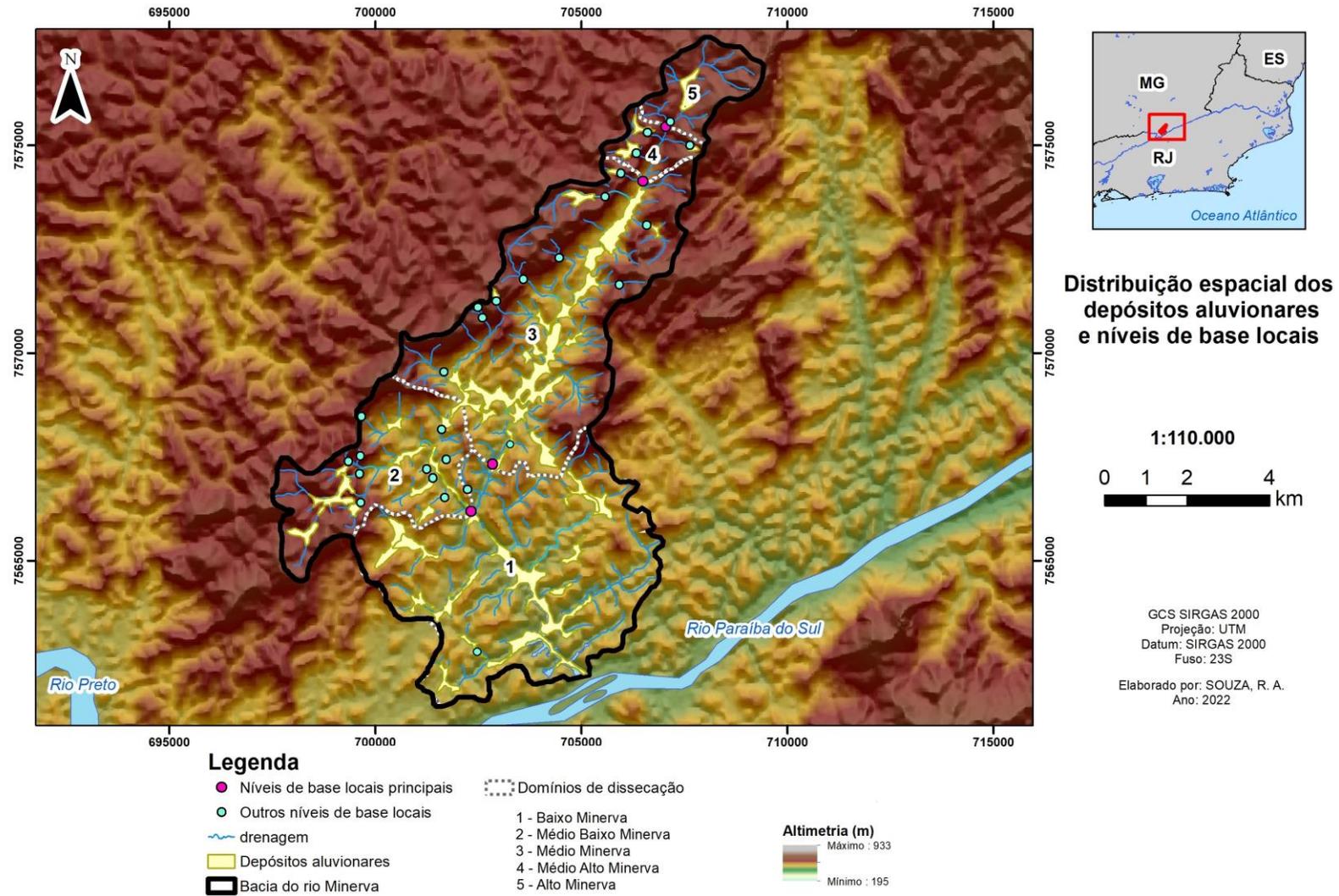


Figura 28 – Mapa hipsométrico sobreposto ao MDE, com distribuição dos níveis de base locais e depósitos aluvionares reconhecidos para a bacia do rio Minerva.

De maneira geral, a porção oeste da bacia contém uma densidade de NBLs alinhados em NE-SW, situados no domínio Médio-alto Minerva até o limite do Médio Minerva com Médio-baixo Minerva. Essa área é composta em boa parte pela zona de escarpa da serra do Arribada marcando o contato litológico do Complexo Paraíba do Sul, constituindo as porções elevadas, com o Complexo Quirino que constitui as porções rebaixadas. Nas porções elevadas, há formação de vales suspensos com relevo suavizado e retenção sedimentar quaternária (Figura 29). Há também uma concentração de NBLs próximo ao nível de base local principal do domínio Médio-baixo Minerva que não está relacionada à serra do Arribada, mas possivelmente ao contato litológico entre o ortognaisse do complexo Quirino com os metassedimentos do Grupo Andrelândia ou à zona de cisalhamento transpressional dextral, informações apresentadas no mapa geológico (Figura 17).



Figura 29 – Configuração espacial dos vales suspensos de canais afluentes ao rio Minerva, na serra do Arribada: **a** – vale suspenso, com relevo suave ondulado a montante do nível de base local; **b** – afloramento rochoso do nível de base local: gnaisse paraderivado do Complexo Paraíba do sul; **c** – visão panorâmica do vale suspenso a jusante de seu NBL, para o vale principal do rio Minerva, configurando uma área de grande amplitude altimétrica e alto índice de dissecação. Fotos: M.M. Freitas (mar/2018).

Nota-se também que os depósitos aluvionares estão distribuídos com os seguintes alinhamentos: NE-SW do rio principal a montante da sua inflexão e nos vales suspensos do córrego Itabira; NW-SE no trecho a jusante da inflexão do rio principal, nos vales suspensos da serra do Arribada e nos vales dos principais afluentes nos domínios Médio Minerva, Médio-baixo Minerva e Baixo minerva; e ENE-SSW nos vales estruturais próximo ao exutório por influência da zona de cisalhamento (CAMPANHA, 1981; DAYAN e KELLER, 1990; SILVA, 2010). Essas direções estão seguindo o padrão de lineamentos estruturais apresentados anteriormente.

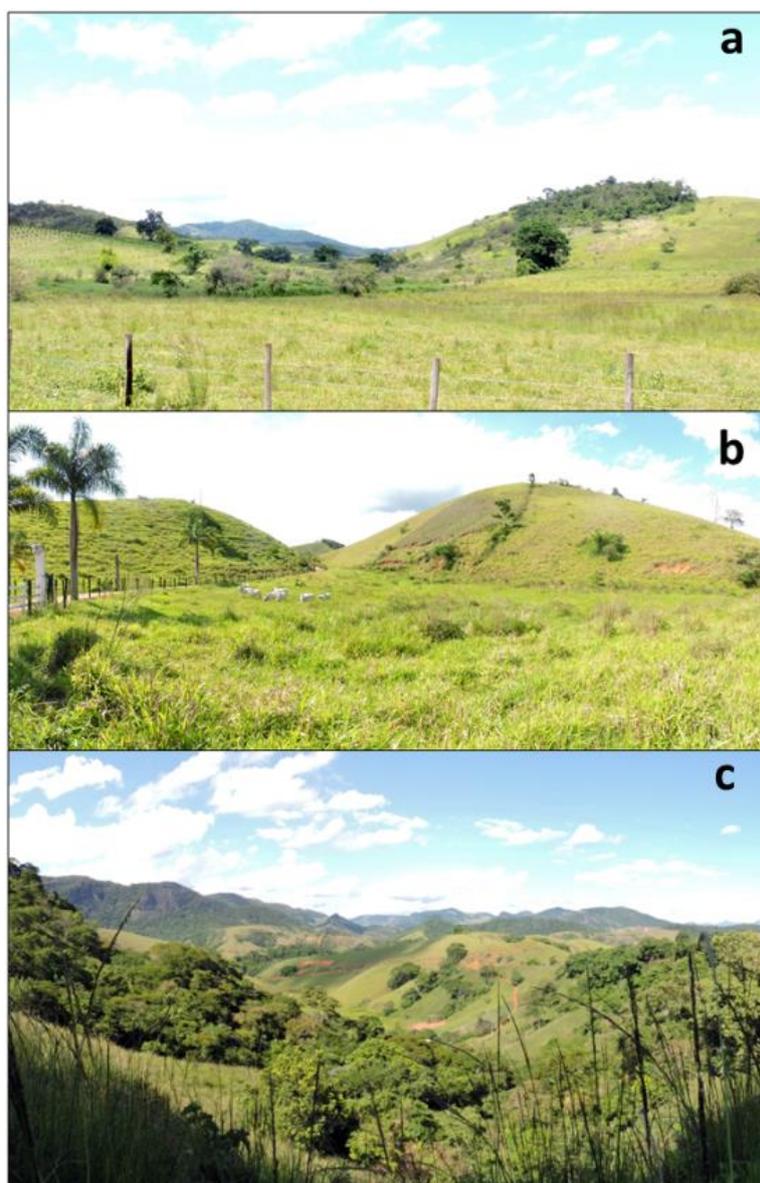


Figura 30 – Configuração espacial dos vales suspensos do córrego Itabira e seus afluentes: **a** – vale suspenso, com morros baixo e fundo de vale com retenção de sedimentação quaternárias; **b** – mesma configuração geomorfológica da figura 30a, porém localizada na fazenda Passatempo; **c** – visão panorâmica dos vales do córrego Itabira a jusante dos vales suspensos. Fotos: T.M. Silva (dez./2021).

Ao longo do rio principal é possível identificar que os níveis de base locais são seguidos a montante por retenções sedimentares quaternárias, mesma configuração ocorre em alguns NBLs em rios de menor ordem, configurando a sedimentação aluvial dos vales suspensos. No rio principal, boa parte desses NBLs também marcam zonas de contato litológico, definindo o nível de base local do Médio-baixo Minerva entre o ortognaisse do complexo Quirino com os metassedimentos do Grupo Andrelândia e os NBLs do Médio-alto Minerva e alto minerva no contato entre diques de diabásio com o ortognaisse do complexo Quirino (SOUZA, 2019). A associação dos NBLs aos depósitos aluvionares pode indicar “desequilíbrios” em vários trechos fluviais, reiterando o papel do tectonismo cenozoico na bacia. Reforça-se, portanto, uma possibilidade de os processos evolutivos da bacia estarem ainda em fase de ajuste ao nível de base local do rio Paraíba do Sul.

5.2. Parâmetros morfométricos por domínios de dissecação

5.2.1. Índice Relação Declividade-Extensão (RDE)

No total foram identificadas 199 anomalias de drenagem no índice **RDE** gerado pela ferramenta *Knickpoint Finder* ao longo da bacia, em forma de rupturas de declive marcadas por NBLs (níveis encachoeirados). A obtenção do índice de **RDE** por segmentos apresentou indícios de ocorrência das anomalias de drenagem tanto em segmentos do alto curso dos rios, quanto em seus médio e baixos cursos. A densidade das anomalias apresenta similaridade ao mapa de densidade de níveis de base locais apresentado anteriormente, com uma concentração de anomalias na porção oeste e norte da bacia (Figura 31). A porção norte de alta densidade é interrompida a montante por uma área de baixa densidade, correspondida pelo vale suspenso de relevo planáltico suavizado e com baixo índice de concentração de rugosidade. Apesar das semelhanças, o mapa de anomalias de drenagem gerado pela ferramenta *Knickpoint Finder* demonstrou também uma distribuição dessas feições no baixo curso do rio Minerva, não evidenciada pelo mapa de distribuição de níveis de base locais. Será preciso checar em campo a possibilidade de existência das anomalias em baixo curso, com destaque ao trecho bem próximo ao exutório da bacia que apresenta uma densidade alta.

Seguindo para análise do índice RDE, os segmentos da área de estudo que apresentam os maiores graus de anomalia se encontram no alto-médio curso do rio principal e destaque para o córrego Itabira a WSW da bacia, com segmentos anômalos de índice acima de 6 (Figura 31). No rio principal, quatro zonas de concentração das anomalias de maior grau apresentam maior

destaque, sendo uma no alto curso e três no médio curso. No médio curso próximo ao cotovelo de drenagem que marca a mudança da direção do rio principal de NE-SW para NW-SE até 1 km a montante, a zona de anomalia se encontra no biotita-granada gnaisse do grupo Andrelândia, próxima ao contato litológico com o ortognaisse do complexo Quirino. Nota-se, portanto, que boa parte da rede de drenagem do rio minerva, principalmente os segmentos explicitados acima têm possibilidades de estarem com seus perfis longitudinais em processo de ajuste ao menor nível de base da bacia no ponto de seu encontro com o rio Paraíba do Sul.

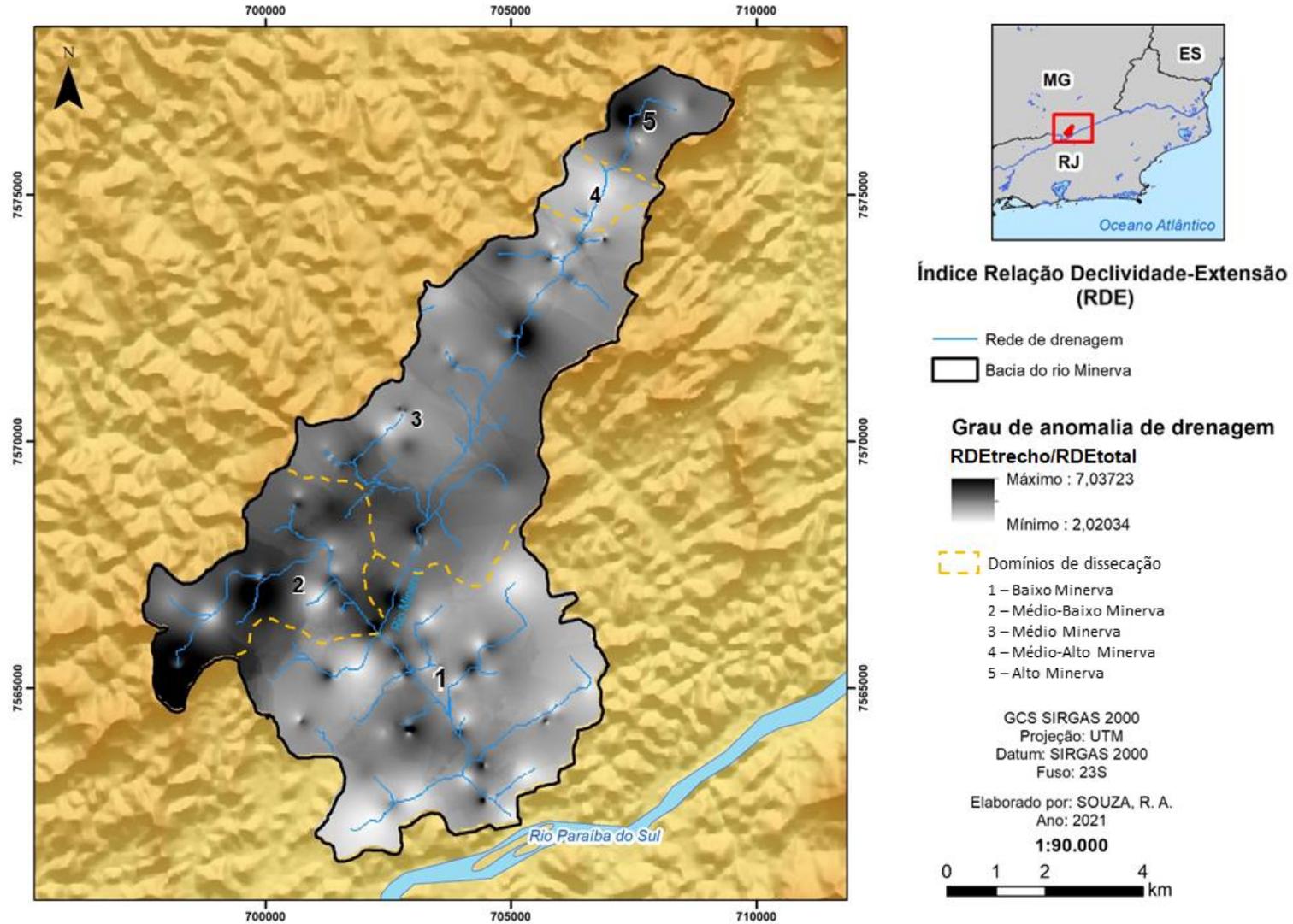


Figura 31 – Distribuição espacial do índice **RDE** gerado pela ferramenta *Knickpoint Finder*, ressaltando as zonas de maior grau de anomalia de drenagem na bacia do rio Minerva, representadas pela tonalidade mais escura.

Com o intuito de apresentar uma representação mais detalhada dos cursos principais dos domínios de dissecção, o índice **RDE** também foi aplicado no rio Minerva e no córrego Itabira pelo RDE_{Trecho}/RDE_{Total} (Figura 32) a partir do levantamento feito dos dados hipsométricos e hidrográficos das cartas topográficas.

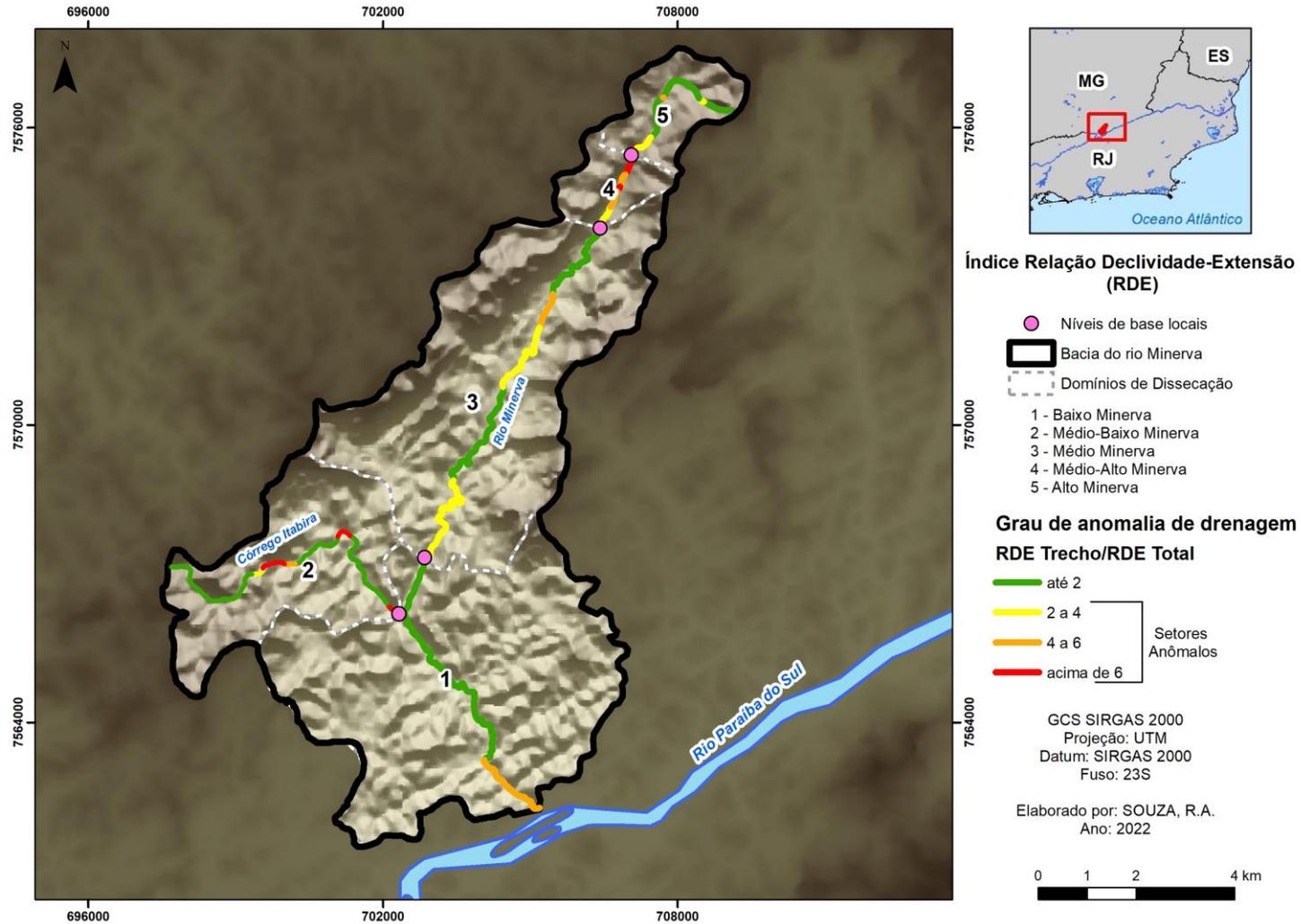


Figura 32 – Índice RDE aplicado ao rio Minerva e córrego Itabira.

É possível identificar que todos os níveis de base locais dos domínios de dissecação perpassados pelo rio Minerva encontram-se em setores anômalos, correspondendo às quebras na linha contínua do perfil do canal (Figura 33). Esse resultado corrobora com a detecção de provável existência de influência litoestrutural e/ou tectônica na evolução do canal fluvial. A maior concentração de anomalias se dá no trecho do domínio Médio-alto Minerva, no qual o canal se encontra encaixado e com a ruptura de declive com maior amplitude altimétrica da bacia, com aproximadamente 60 metros. Em conjunto com a análise geológica desse trecho, infere-se que o contato litológico do dique de diabásio sendo uma rocha menos resistente que a do complexo Quirino situada a montante, corrobora na ocorrência de tal desnível.

O alto índice **RDE** próximo ao nível de base local do Médio-baixo Minerva também se encontra num contato litológico, dessa vez entre a biotita gnaiss do grupo Andrelândia e do ortognaiss do complexo Quirino, com uma falha ou zona de cisalhamento transpressional dextral mapeada.

Para além dos trechos próximos aos níveis de base locais, foi possível identificar diversos segmentos anômalos no rio Minerva e no córrego Itabira (Figura 34), demonstrando que, em geral, esses canais fluviais podem ser caracterizados por uma condição atual de relativo desequilíbrio, podendo apresentar reajustes fluviais. Nessa condição, destacam-se os domínios Médio-baixo Minerva e Médio-alto Minerva que apresentaram índice **RDE** acima de 6, indicando anomalias de 1ª ordem. Em conjunto com a análise geológica, também foi possível identificar no domínio Médio Minerva uma relação entre anomalias de 3ª e 2ª ordem e contato litológico entre um dique de diabásio e o ortognaiss do complexo Quirino. No domínio Baixo Minerva é possível relacionar também um trecho de anomalias de 3ª e 2ª ordem com o contato litológico entre o granada-muscovita biotita gnaiss do Complexo Paraíba do Sul com ortogranulitos do Complexo Juiz de Fora, na zona de cisalhamento Além Paraíba (SILVA, 2010).

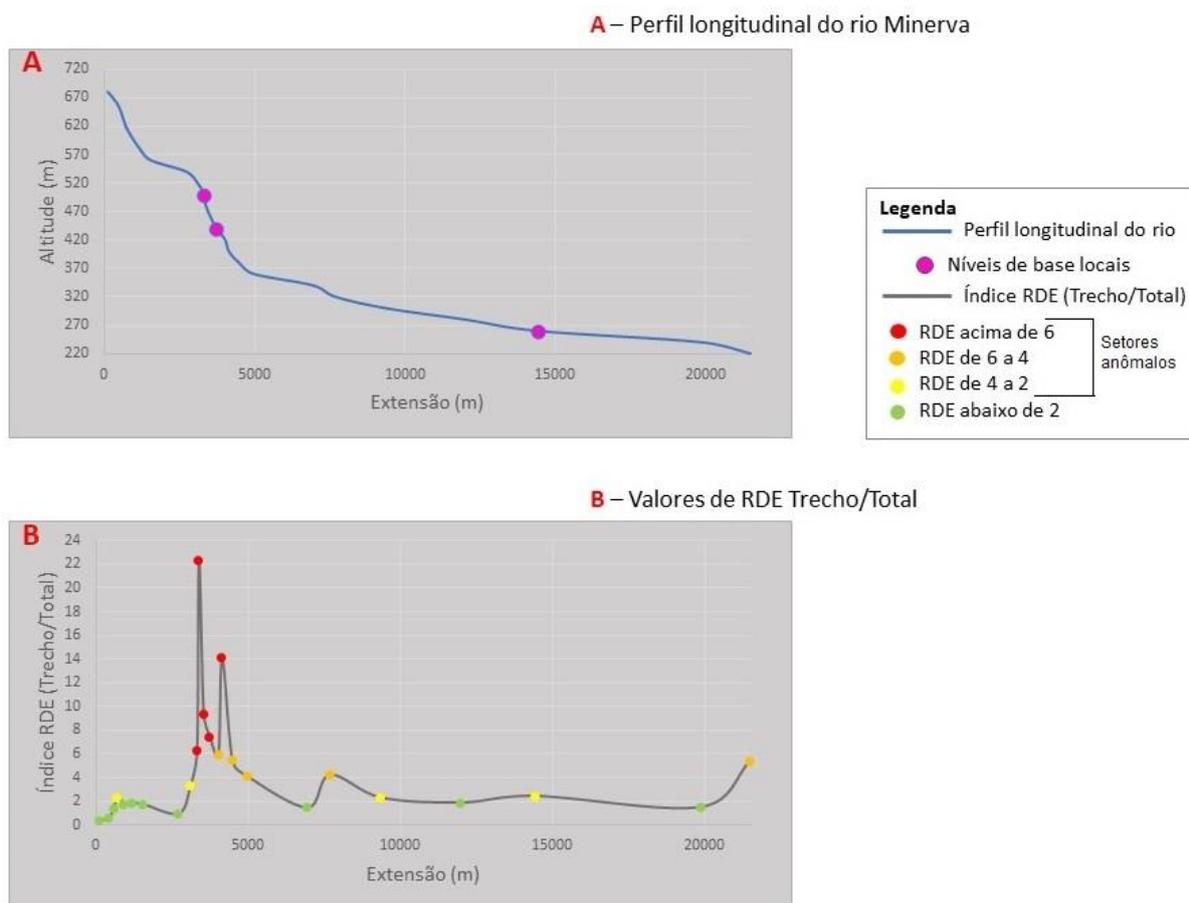


Figura 33 – Correlação entre as rupturas de declive no perfil longitudinal do rio Minerva e os índices de RDE. **A** – Perfil longitudinal do rio Minerva e em **B** valores de RDE obtidos para o rio em questão.

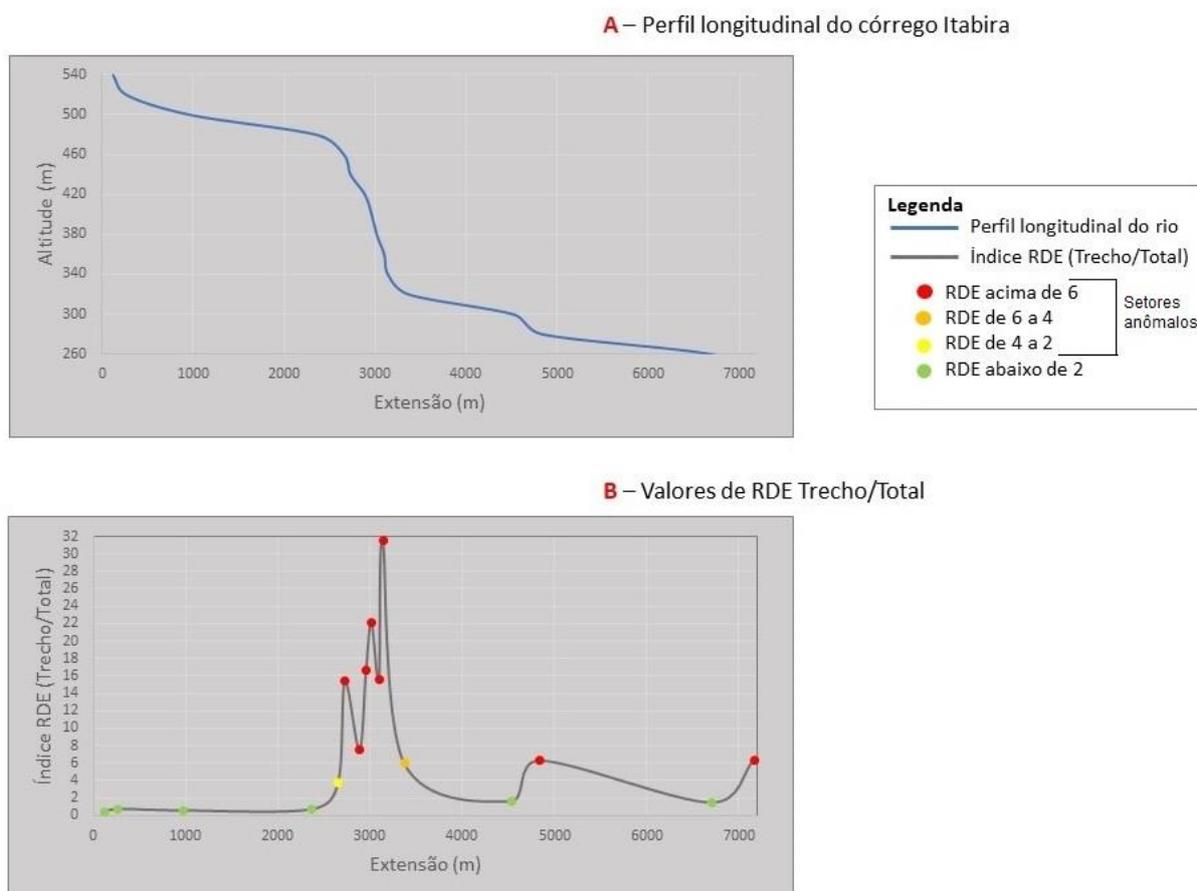


Figura 34 – Correlação entre as rupturas de declive no perfil longitudinal do córrego Itabira e os índices de **RDE**. **A** – Perfil longitudinal do rio Minerva e em **B** valores de **RDE** obtidos para o canal em questão.

5.2.2. Fator de assimetria de bacias de drenagem (FABD)

Os valores do índice **FABD** revelaram provável atividade tectônica em alguns domínios de dissecação e na bacia como um todo (Tabela 3). Os domínios Baixo Minerva (49,8%) e Médio-baixo Minerva (50,8%) apresentaram valores próximos a 50, revelando pouca ou nenhuma atividade tectônica; enquanto os domínios Médio Minerva (55%), Médio-alto Minerva (66,6%) e Alto Minerva (60,9%) apresentaram valores superiores 50, indicando um provável basculamento da margem esquerda.

Tabela 3 – Valores relacionados ao cálculo do **FABD** dos domínios de dissecação da área de estudo.

Domínio de Dissecação	Lado esquerdo (km²)	Lado direito (km²)	Total (km²)	FABD
Baixo Minerva	14,5	14,4	28,9	49,83
Médio-baixo Minerva	6	6,2	12,2	50,82
Médio Minerva	11,9	14,6	26,5	55,09
Médio-alto Minerva	0,9	1,8	2,7	66,67
Alto Minerva	1,6	2,5	4,1	60,98
Total (Bacia do rio Minerva)	29,7	44,7	74,4	60,08

Elaboração própria.

A bacia do rio Minerva apresentou uma assimetria moderada, com 60% de sua área à esquerda do canal principal. Analisando o mapa geológico, notamos a presença de um contato litológico entre biotita gnaisse do complexo Paraíba do Sul e ortognaisse do complexo Quirino na porção oeste da bacia e no mesmo local há o mapeamento de escarpa adaptada à falha pelo mapa geomorfológico, correspondendo à serra do Arribada. A biotita gnaisse encontra-se nas porções mais elevadas da serra, enquanto o ortognaisse se apresenta nas porções mais rebaixadas. Portanto, pode-se inferir que há um moderado basculamentos de blocos, com uma inclinação da margem direita (porção oeste) do sistema fluvial, com possível influencia geológica e o favorecimento de um baixo estrutural no lado esquerdo (leste).

O Médio-alto Minerva apresenta o maior valor **FABD**, com um grau de assimetria moderado também para a margem esquerda. Os condicionantes geológicos descritos acima estão presentes no relevo desse domínio e, somado a isso, temos a ocorrência dos diques de diabásio localizado no seu fundo de vale, indicando mais um aspecto de controle estrutural.

O Médio Minerva além de apresentar todos os condicionantes geológicos descritos acima, é marcado pelo contato litológico entre a granada biotita gnaisse bandado do grupo Andrelândia e o ortognaisse do complexo Quirino, além de uma estrutura de falha ou zona de cisalhamento transpressional dextral nessa área de contato. Essas evidências podem corroborar com o valor moderado de assimetria do canal encontrado em tal domínio.

5.2.3. Fator de simetria topográfica transversal (FSTT)

O **FSTT** foi aplicado na bacia com o intuito complementar os resultados do **FABD** ao indicar basculamentos de blocos do relevo de forma mais detalhada em diferentes trechos. Portanto, a aplicação do **FSTT** considerou os limites dos domínios de dissecação, sendo aplicado nos trechos do rio Minerva e do córrego Itabira em segmentos com equidistância de

700 metros (Tabela 4). Foi gerado um mapa com a distribuição espacial do **FSTT**, considerando os domínios de dissecação e sinalizando a migração preferencial do trecho dos canais (Figura 35).

Tabela 4 – Fator de simetria topográfica transversal (**FSTT**) do rio minerva e córrego Itabira, considerando os limites dos domínios de dissecação.

Canal	Domínio de dissecação	Nº de segmentos	FSTT máx.	FSTT mín.	FSTT médio
Rio Minerva	Alto Minerva	4	0,46	0,1	0,3
	Médio-alto Minerva	2	0,41	0,09	0,26
	Médio Minerva	11	0,41	0,08	0,23
	Baixo Minerva	8	0,92	0,006	0,32
Córrego Itabira	Médio-baixo Minerva	9	0,46	0,06	0,23

Elaboração própria.

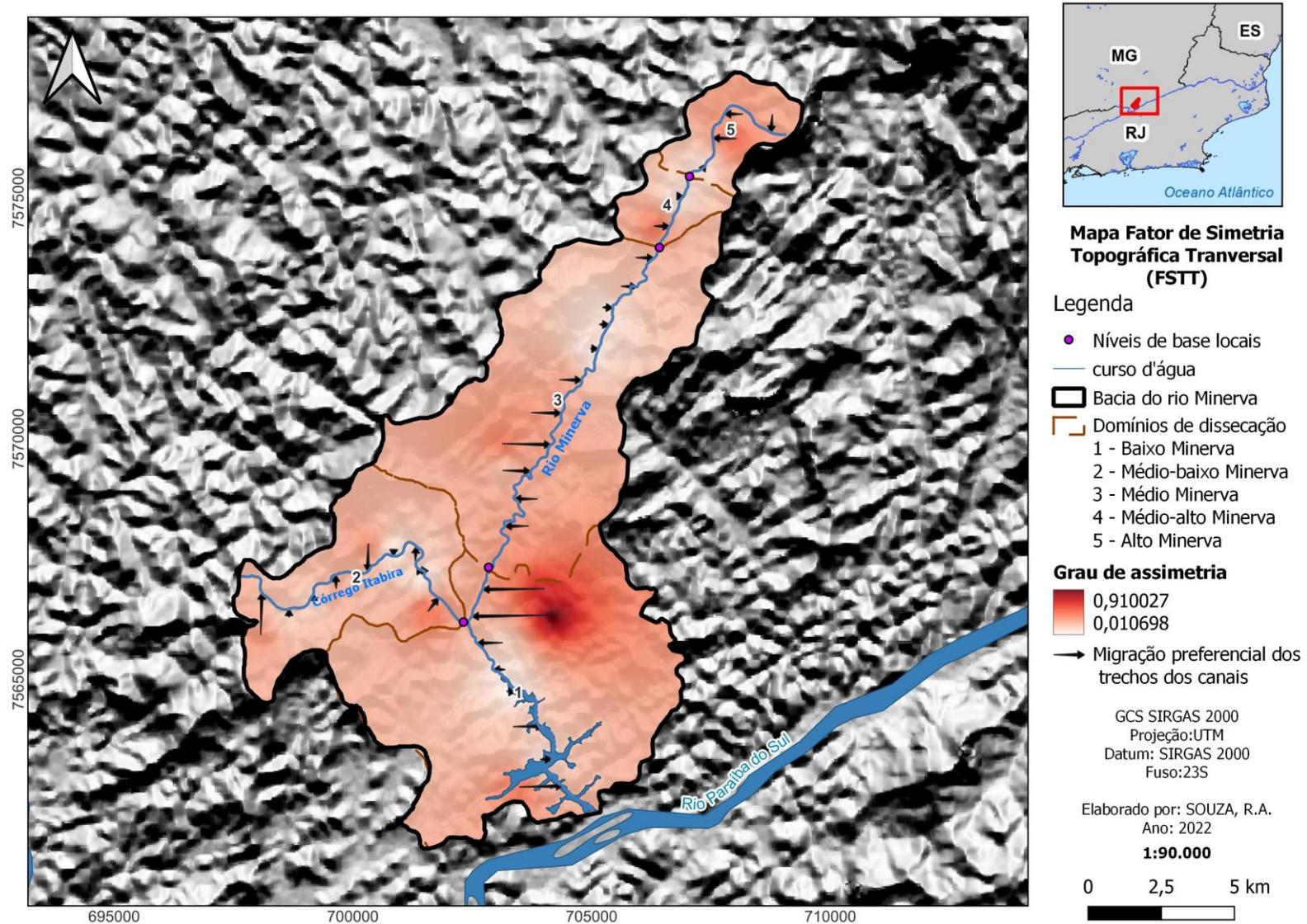


Figura 35 - Distribuição espacial do FSTT no rio Minerva e córrego Itaboraí, considerando os limites de domínios de dissecação.

O índice foi aplicado em 34 segmentos e todos os domínios de dissecação apresentaram algum trecho com um grau de assimetria considerado moderado apesar de que 79% dos trechos apresentaram **FSTT** abaixo de 0,4, considerados de assimetria fraca ou muito fraca. O Baixo Minerva apresentou **FSTT** médio de 0,3, sendo o de maior índice entre os domínios de dissecação. Isso se deve a um trecho a montante da mudança de direção do rio Minerva apresentar o maior índice da bacia, com 0,94. Portanto, a migração preferencial do canal nesse trecho é alta e segue para oeste. O Médio-baixo Minerva apresentou um fraco grau de assimetria em seus trechos, com exceção da cabeceira de drenagem do córrego Itabira que apresentou um grau de assimetria moderado com migração preferencial para norte. Reforçando a análise feita no **FABD**, 80% dos trechos do rio Minerva no domínio Médio Minerva apresenta uma migração preferencial sentido leste; porém há uma leve migração para oeste na parte mais a jusante do rio Minerva nesse domínio. O Médio-alto Minerva apresentou uma moderada assimetria para leste no seu trecho mais a jusante, acompanhando a migração preferencial do canal da maior parte do domínio Médio Minerva. O domínio alto Minerva também apresentou trechos com grau de assimetria moderado, porém com migração preferencial do canal para oeste e o trecho da cabeceira de drenagem do rio Minerva apresentou migração preferencial para sul.

5.2.4. Índice de concentração de rugosidade (ICR)

Por meio da espacialização das classes de rugosidade foi possível reconhecer os compartimentos geomorfológicos que caracterizam o relevo e que auxiliaram na investigação dos mecanismos evolutivos da bacia.

Este índice mostrou coerência na representação da dissecação da área de estudo, apresentando valores da classe ‘muito alta’ para os setores escarpados, assim como uma distribuição das classes ‘alta’ e ‘média’ nos setores com morros e morfologias mamelonares, além das classes ‘baixa’ e ‘muito baixa’ se apresentarem em boas partes dos vales dos canais de 3^a, 4^a e 5^a ordem, evidenciando áreas de menor rugosidade caracterizadas por relevos de morfologia suaves (Figura 36). É possível identificar também que todos os níveis de base locais se encontram em áreas de **ICR** alto e muito alto. Para auxiliar a análise do parâmetro, a Figura 37 apresenta em gráfico a distribuição percentual das classes de **ICR**, segundo os domínios de dissecação.

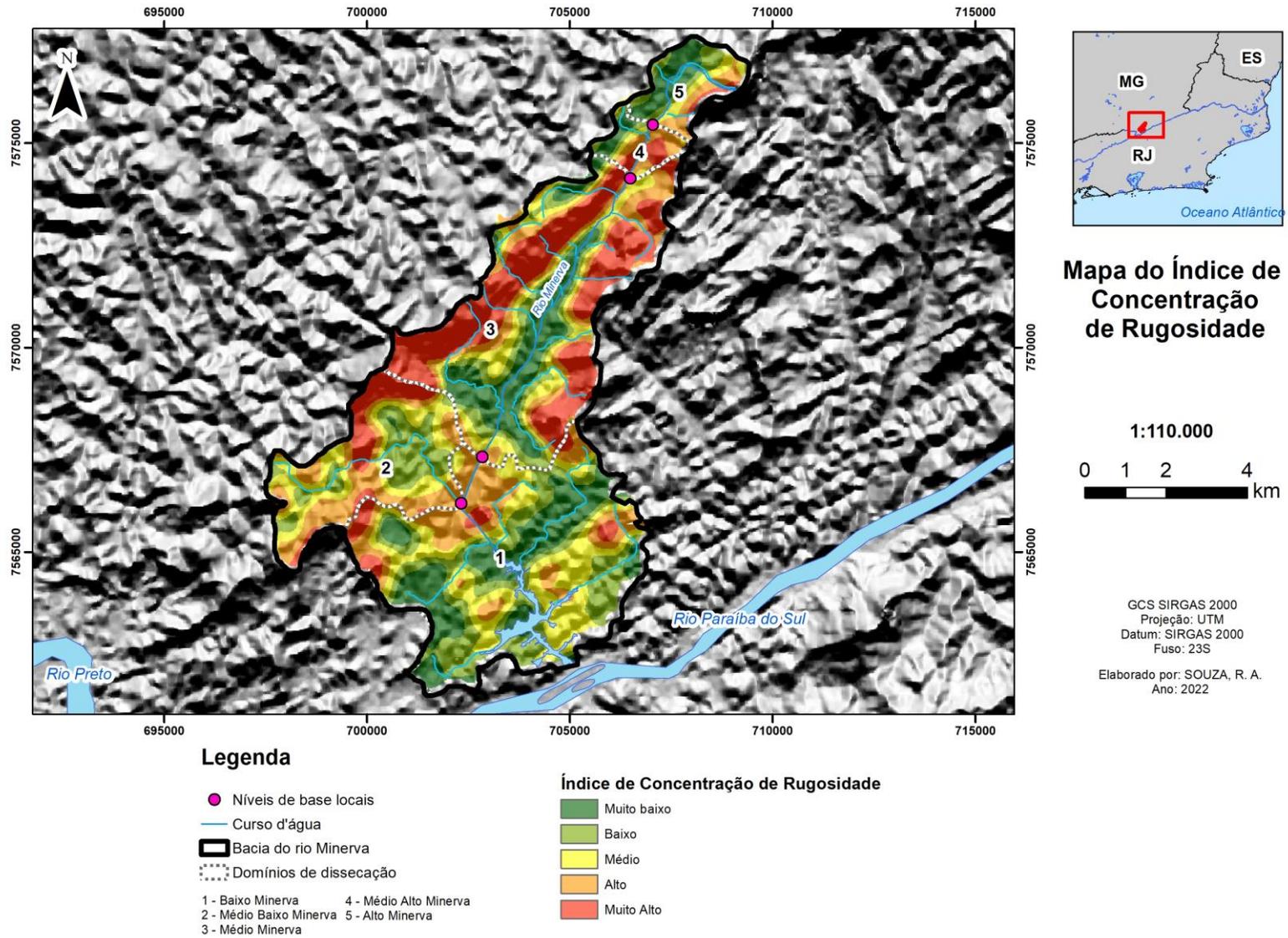


Figura 36 – Índice de concentração de rugosidade da bacia do rio Minerva.

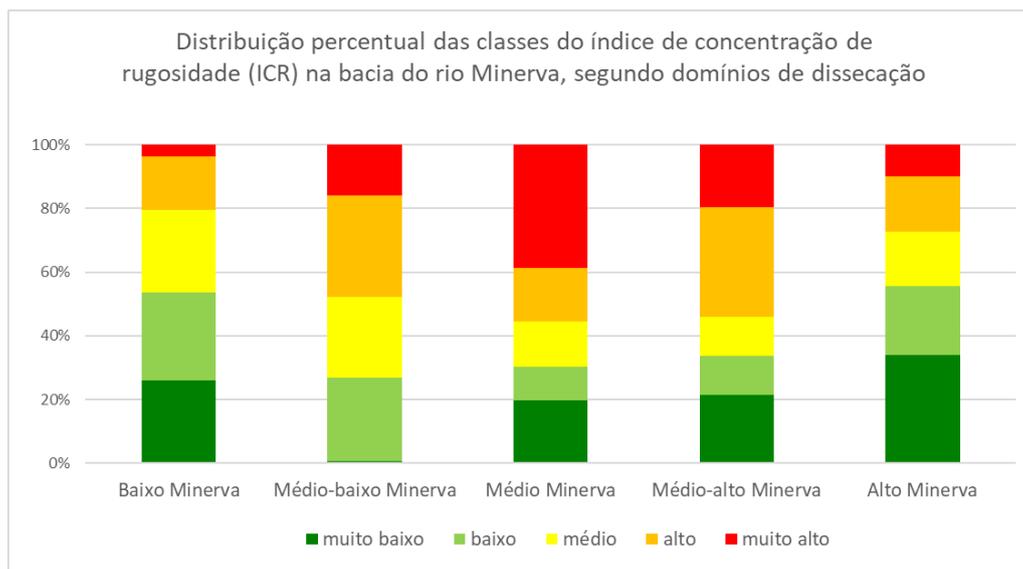


Figura 37 – Distribuição percentual das classes do índice de concentração de rugosidade na bacia do rio Minerva, segundo domínios de dissecação.

O Baixo Minerva apresenta classe de **ICR** baixo como sendo a de maior predominância, representando 28% da área total do domínio, seguida das classes “muito baixo” (26%) e “médio” (26%). Portanto, este trecho da bacia é composto majoritariamente por baixos índices de concentração de rugosidade, marcado por vale fluvial com morros baixos e planícies aluvionares, facilmente identificadas, por exemplo, no trecho da área atingida pela represa da UHE Anta. Entretanto, esse domínio apresenta algumas serras reafeiçoadas, gerando **ICR** alto (17%) e muito alto (4%) na sua porção sul, com alinhamento ENE da zona de cisalhamento do rio Paraíba do Sul; e também na área limite do Baixo Minerva com os domínios Médio-baixo e Médio Minerva.

As classes de maior distribuição espacial no Médio-baixo Minerva são: “alto” (32%), “baixo” (26%) e “médio” (25%). Esse domínio apresentou valores não significativos de **ICR** muito baixo. Analisando a figura 36, notamos que ele apresenta um baixo **ICR** ao redor do córrego Itabira, com exceção do trecho no seu médio alto curso apresentando **ICR** alto e muito alto, que corresponde a uma zona com presença de níveis de base locais (Figura 20) e também identificado com um alto índice **RDE** (Figura 23). Esse trecho é marcado por um desnível no domínio, gerando mudanças nos modelados de seu relevo. Com isso, seu relevo passa de modelados de dissecação estrutural de topo aguçado, com alta densidade de drenagem e forte aprofundamento das incisões a jusante, para um modelado de dissecação homogênea de topo convexo, com médio índice de dissecação, evidenciado no mapa geomorfológico (Figura 17). O nível de base local desse domínio se encontra no **ICR** alto, marcando a transição dos **ICRs**

baixo e médio a montante, com **ICRs** alto e muito alto a jusante, no trecho de serras reafeiçoadas do domínio Baixo Minerva.

O Médio Minerva apresenta a classe de **ICR** muito alto como sendo a de maior predominância, representando 39% da área total do domínio, seguida da classe “muito baixa” (20%). Notamos que o **ICR** muito alto se encontra nos relevos das porções leste e oeste e de ampla extensão, desde o limite com os domínios a jusante até o limite com o domínio Médio-alto Minerva a montante. Portanto, essa área apresenta um elevado grau de dissecação, expondo na paisagem compartimentos serranos que se conectam, em grande parte, ao fundo de vale com extensos depósitos aluvionares na porção central do domínio, ou a colinas e morros baixos. A noroeste do Médio Minerva, nota-se uma área contínua ao domínio Médio-alto Minerva de **ICR** baixo a muito baixo, em contraste com as serras escarpadas de **ICR** muito alto. Essa área é compartimentada por vales suspensos com um padrão de relevo suavizado composto por morros baixos, dispostos a montante dos setores escarpados (SOUZA, 2019). Essa configuração espacial pode estar atrelada a retrabalhamento erosivo das morfologias planálticas à bacia do rio Minerva por processos de capturas fluviais através de recuo de cabeceiras. As bacias limítrofes a essa área estão inseridas no sistema de drenagem do rio Paraibuna que apresenta um nível de base local mais alto do que o do rio Minerva, preservando características morfológicas de ambiente planáltico com uma sequência de morros baixos. O nível de base local desse domínio se encontra no **ICR** alto, marcando a transição dos **ICRs** médio, baixo e muito baixo a montante, com uma continuidade do **ICR** alto a sua jusante, já no domínio Baixo Minerva, marcado pelas serras escarpadas.

No domínio Médio-alto Minerva, para além dessa última análise feita entre ele e o Médio Minerva sobre os vales suspensos com morros baixos, notamos a ausência de um **ICR** muito baixo ou baixo na área onde passa o rio principal. Esse é o único domínio da bacia com tal característica, evidenciado pelo vale mais encaixado por onde o rio Minerva corre (Figura 38). O nível de base local desse domínio se encontra no **ICR** médio, marcando a transição dos **ICRs** alto e muito alto a montante, com a continuidade do **ICR** médio a sua jusante, já no domínio Médio Minerva irá suavizando ao longo do curso.



Figura 38 – Imagem da configuração espacial do domínio Médio-alto Minerva. Nota-se o relevo escarpado com o topo florestado, conectando-se com o fundo de vale encaixado, evidenciado pela plantação de espécie arbórea conífera, por onde o rio Minerva percorre. Foto: R.A. Souza (dez/2021).

Por fim, o domínio Alto Minerva apresenta uma média de índices de concentração de rugosidade mais baixos do que o domínio a jusante, sendo marcado por uma paisagem de morros baixos e serras escarpadas. A classe **ICR** predominante nesse domínio é “muito baixo”, correspondendo a 34% da sua área total, seguido das demais classes com percentual de forma decrescente. O rio Minerva nasce em uma pequena área de **ICR** muito alto, sendo logo diminuído para alto, médio e percorrendo até o seu nível de base local por depósito aluvionar com **ICR** muito baixo a baixo. O nível de base local desse domínio se encontra no **ICR** médio, marcando a transição dos **ICRs** muito baixo e baixo a montante, com **ICR** alto e muito alto a jusante, já no domínio Médio-alto Minerva.

5.2.5. *Nprofiles*

A análise do índice de concavidade gerado pelos perfis normalizados demonstra o nível de ajuste dos canais fluviais em relação ao nível de base. Relembrando que quanto maior for o valor percentual dos perfis de concavidade, formando perfis côncavos para cima, mais próximo das condições de equilíbrio o canal fluvial estará; enquanto valores negativos e mais próximo a estes indicam perfis convexos, evidenciando canais que ainda não estão adaptados

ao nível de base local. Foram extraídos perfis normalizados do rio Minerva segmentado pelos domínios de dissecção Alto Minerva, Médio-alto Minerva, Médio Minerva e Baixo Minerva, e também do córrego Itabira, responsável pelo principal canal fluvial afluente do domínio Médio-baixo Minerva, totalizando em cinco perfis normalizados (Figura 39).

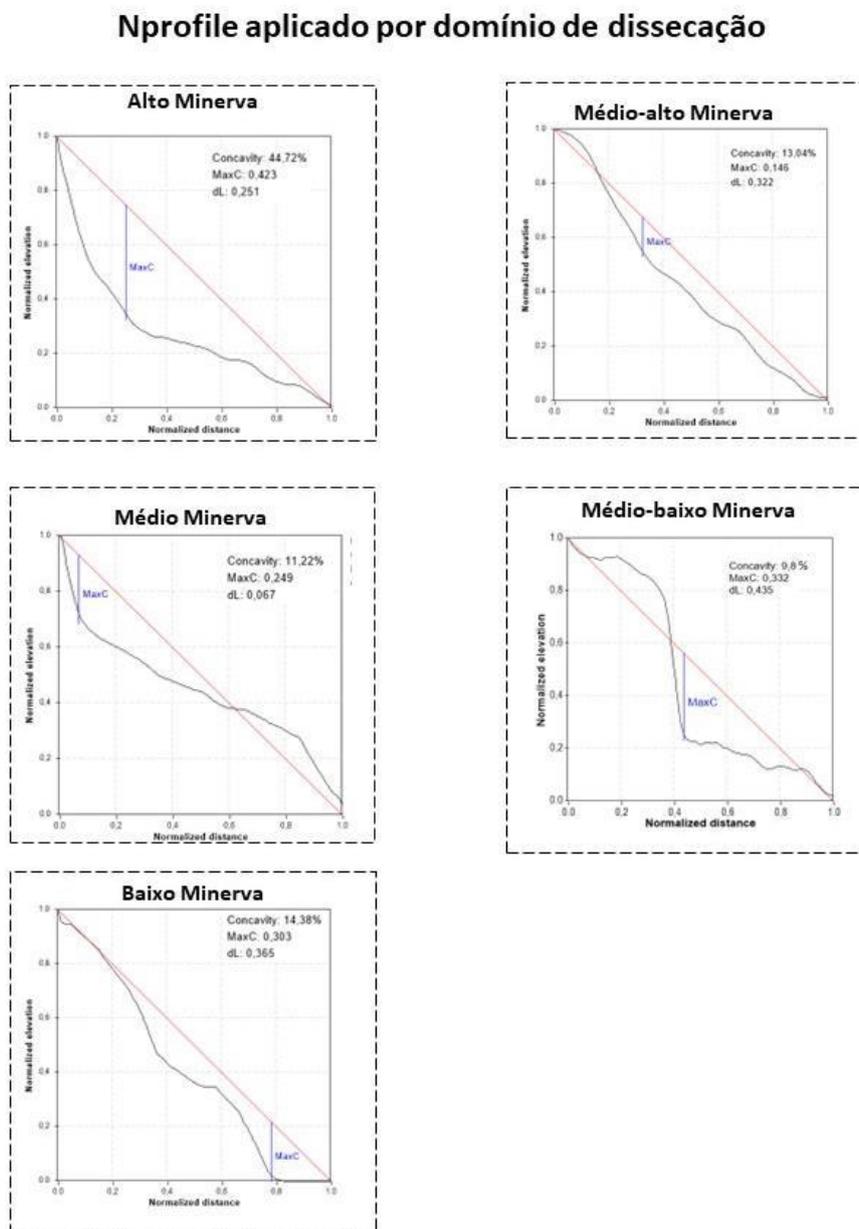


Figura 39 – Perfis normalizados do rio Minerva segmentado por domínio de dissecção e do córrego Itabira, representando o canal fluvial principal do domínio de dissecção Médio-baixo Minerva.

Todos os *Nprofiles* apresentaram valores positivos, indicando perfis próximo ao estado de equilíbrio. Porém, ressalta-se que os domínios Médio-alto Minerva, Médio Minerva e Médio-baixo Minerva apresentaram segmentos da linha do perfil em forma convexa e externa

à linha normalizada (em vermelho), evidenciando trechos que ainda não estão adaptados ao nível de base local.

O domínio de dissecação responsável pelo maior índice de concavidade (*Concavity* = 44,72%) e com ponto mais côncavo ($MaxC = 0,423$) é o Alto Minerva, o mais a montante da bacia. Nota-se que seu perfil apresenta uma curva parabólica côncava com declividades maiores em direção à nascente. Os cursos d'água com tal morfologia em seu perfil longitudinal, são considerados em equilíbrio, mantendo uma relativa igualdade entre a atuação da erosão, transporte e deposição. Tal resultado obtido pelo NProfile se relaciona com a hipótese de que o domínio do Alto Minerva é menos atingido pelo avanço erosivo do nível de base local do rio Paraíba do Sul do que os demais domínios e, conseqüentemente, suas drenagens encontram-se mais entulhadas, resultando em perfis côncavos.

Em contraponto, o domínio Médio-alto Minerva apresenta um índice de concavidade de 13,04% e com ponto mais côncavo no valor de 0,146, ambos resultados mais baixos que o do domínio à montante. Apesar de não apresentar um valor negativo do índice de concavidade, esse perfil encontra-se mais próximo a uma morfologia retilínea, representando um curso fluvial em estado transitório (PEREZ-PEÑA *et al.*, 2017) do que a côncava de um perfil próximo ao equilíbrio.

Seguindo a jusante, o domínio Médio Minerva apresenta um índice de concavidade de 11,22% e 0,249 de ponto mais côncavo, sendo o menor valor de ponto côncavo entre os domínios. Seu perfil inicia com uma morfologia similar ao de um perfil em estado de equilíbrio, porém o trecho próximo ao nível de base local é marcado por uma forma convexa, indicando uma área em desvio do estado de equilíbrio.

Com a aplicação do *Nprofile* no córrego Itabira para analisar sua condição ao ajuste do seu nível de base local, obtivemos o perfil normalizado do domínio de dissecação Médio-baixo Minerva. Esse domínio é o que apresenta o índice de concavidade de menor valor percentual em relação aos outros (9,8%) e com ponto de maior concavidade a 0,332. Analisando o seu perfil normalizado, nota-se que boa parte do trecho inicial do canal encontra-se em situação convexa, justificando o baixo valor do índice de concavidade. Esse trecho é marcado por níveis de base locais em forma de cachoeira em seu médio-alto curso. O ponto de maior concavidade desse domínio localiza-se na ruptura de declive para o médio-baixo curso do córrego Itabira e a partir desse ponto, o curso passa para uma situação de maior condição de equilíbrio.

Mais a jusante, o perfil normalizado do domínio Baixo Minerva apresenta o segundo maior índice de concavidade de 14,38% e um ponto de maior concavidade a 0,303. Esse perfil apresenta uma morfologia mais retilínea no médio-alto curso, se tornando côncavo e com seu ponto máximo de concavidade próximo à desembocadura do rio Minerva no rio Paraíba do Sul que é o seu nível de base local. Esse domínio não apresenta trecho em forma convexa e forma da linha normalizada (em vermelho). Com isso, o Baixo Minerva é o segundo domínio de dissecação com seu canal principal mais próximo ao estado de equilíbrio da bacia do rio Minerva.

Também foram extraídos perfis normalizados de 23 canais fluviais afluentes do rio minerva, sendo eles: 11 canais da margem esquerda, 11 canais da margem direita e o rio principal. Para facilitar a identificação dos canais afluentes, nomeou-se os canais da margem direita como “**D**” e os da margem esquerda como “**E**”, seguido do número do canal que ordem crescente da foz para a cabeceira. O mapa abaixo apresentado em figura apresenta a distribuição espacial dos canais fluviais afluentes analisados pelo *NProfile* (Figura 40) e a Figura 41 apresenta seus perfis normalizados.

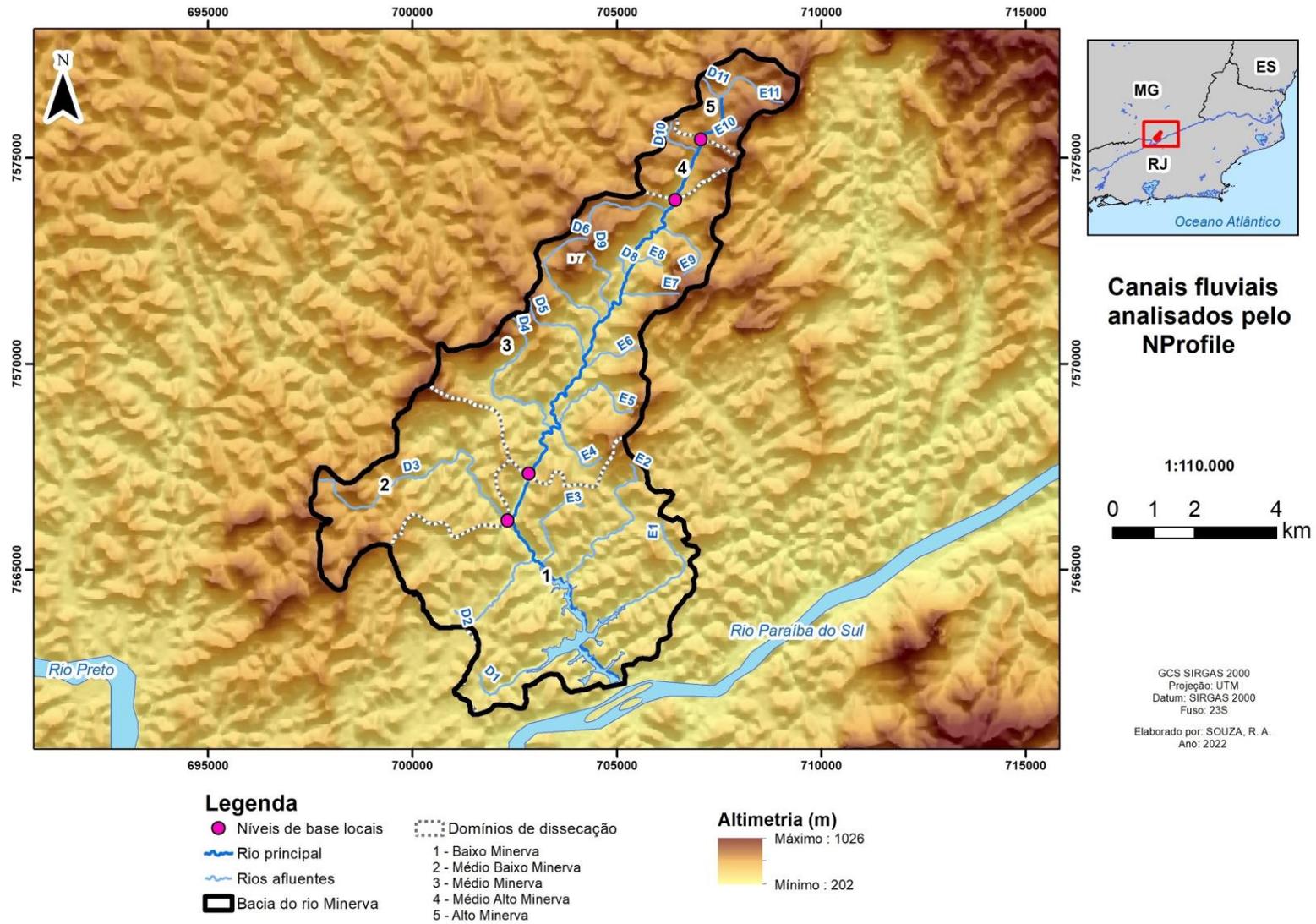


Figura 40 – Canais fluviais analisados pelo *NProfile* na bacia do rio Minerva.

Nprofile - Canais fluviais da margem direita

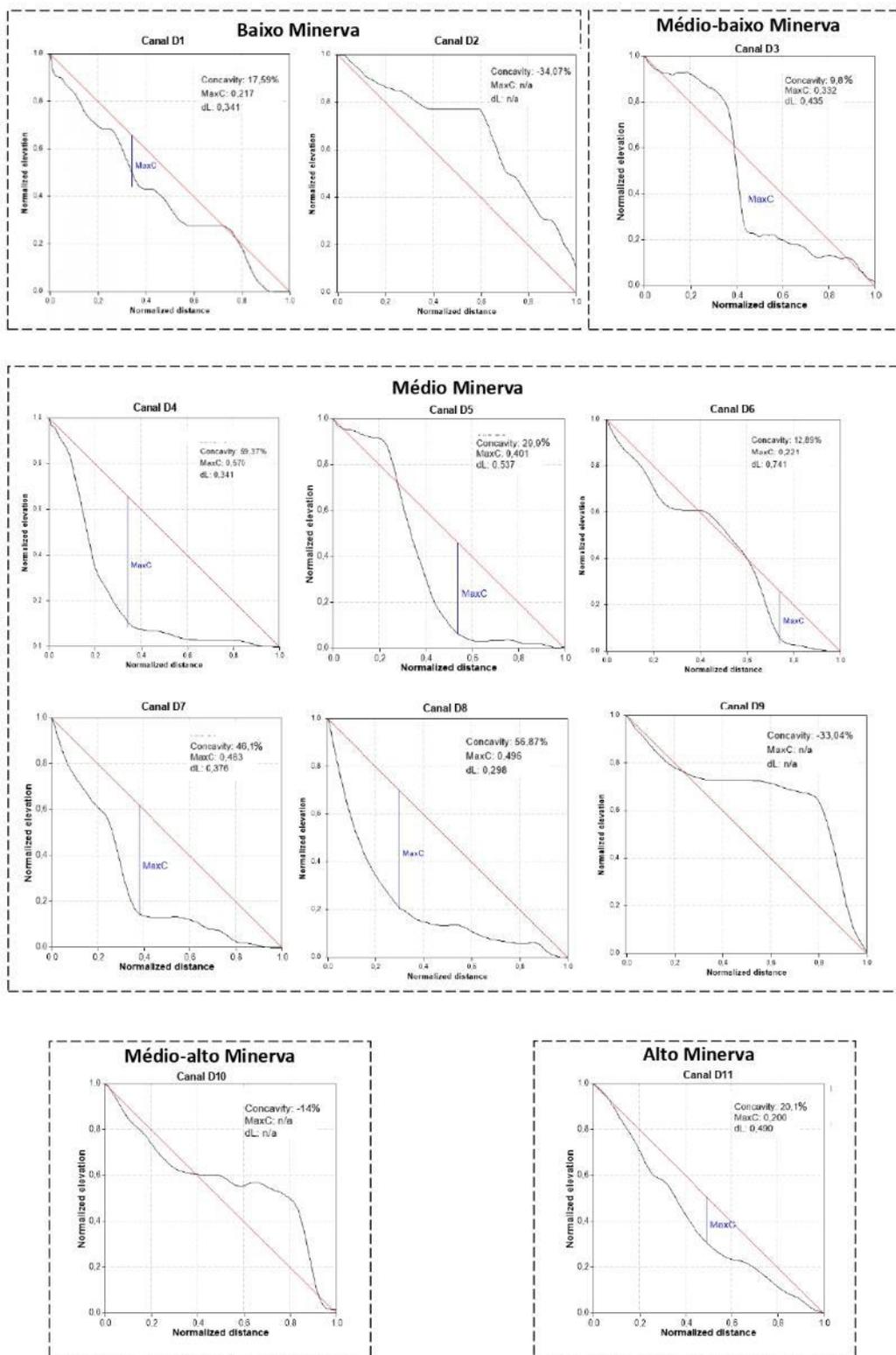


Figura 41 – Perfis normalizados dos principais canais fluviais afluentes do rio Minerva.

Nprofile - Canais fluviais da margem esquerda

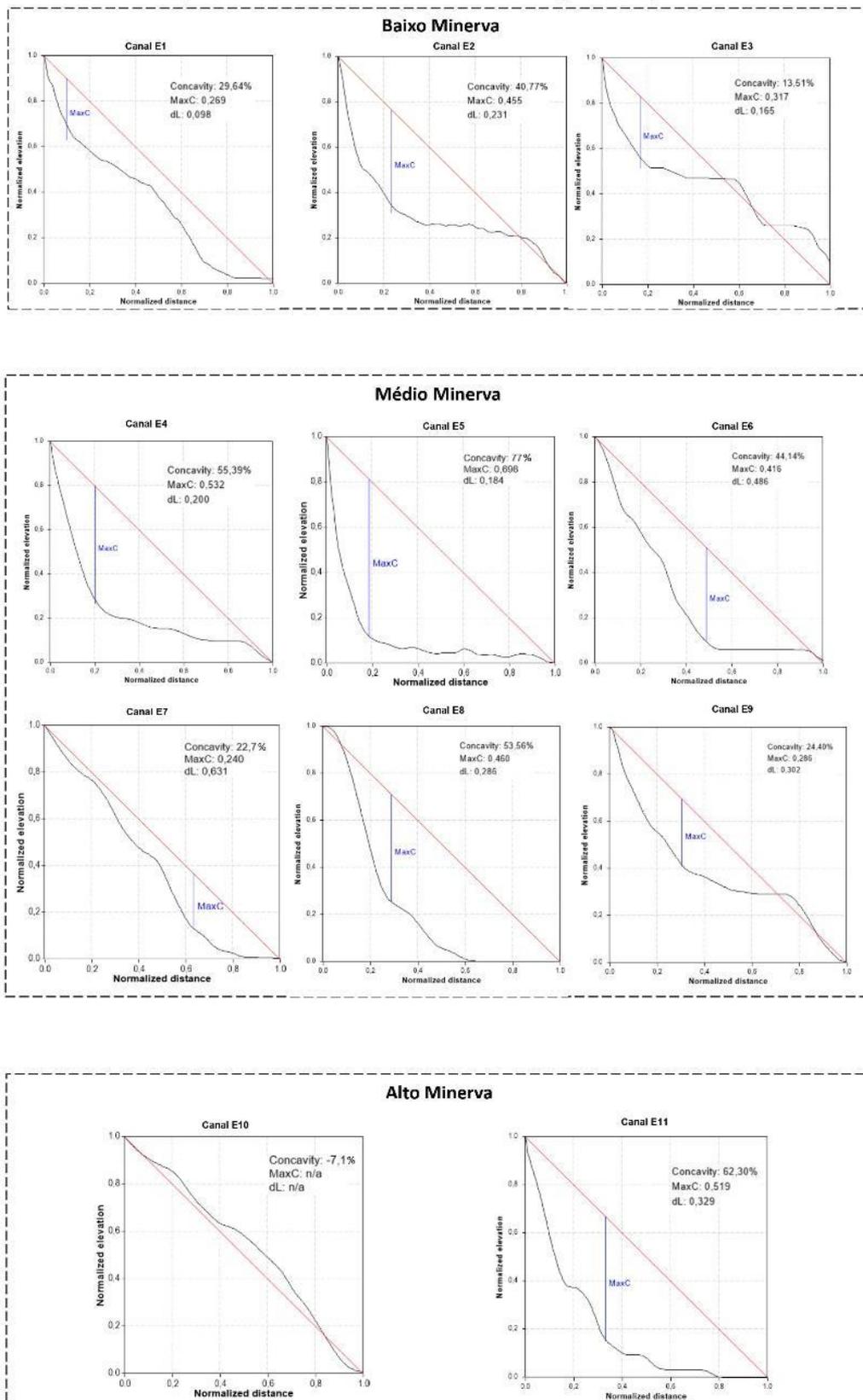


Figura 41 – Perfis normalizados dos principais canais fluviais afluentes do rio Minerva (continuação).

Os perfis longitudinais normalizados dos cursos fluviais da margem direita estão divididos em oito com perfil de valores de concavidade positiva e três de perfil com valores de concavidade negativa. Os perfis com indicador negativo encontram-se nos domínios Baixo Minerva, Médio Minerva e Médio-alto Minerva. Já os *NProfiles* dos cursos fluviais da margem esquerda apresentam dez com valores de concavidade positiva e apenas um com valor de concavidade negativa, localizado no Alto Minerva. Os perfis convexos podem indicar que esses cursos fluviais estão em estado transicional por não se encontrarem adaptados ao nível de base local mais baixo do rio Minerva.

Ao analisar os perfis normalizados côncavos, com um índice de concavidade positivo e valores mais baixos, percebeu-se que se tratam de perfis com alguma parte da linha em forma convexa e externa à linha normalizada (em vermelho), evidenciando trechos que ainda não estão adaptados ao nível de base local do rio Minerva, mas sim de um nível de base local ao longo do canal. Alguns desses perfis, como é o caso dos **D3** (9,8%), correspondendo o córrego Itabira no Médio-baixo Minerva, e os **D5** (29,9%) e **D6** (12,8%) apresentam níveis de base locais à montante de relevo escarpado, gerando compartimentos em forma de vales suspensos que podem ser delimitados e indicar outros domínios de dissecação na bacia e que necessitam ser melhores investigados.

A média percentual do índice de concavidade da margem direita do rio Minerva é 16,2%, enquanto o da margem esquerda é 35,2%, indicando que os rios da margem esquerda encontram-se mais adaptado ao nível de base local do rio principal da bacia. O menor índice na margem direita pode estar atrelado ao controle litoestrutural da serra do Arribada nos seus cursos fluviais. O mapa geomorfológico indica a área da serra do Arribada como uma escarpa adaptada à falha e o mapa geológico indica nessa mesma área um contato litológico entre biotita gnaisse bandado do complexo Paraíba do Sul com ortognaisse do complexo Quirino. O parâmetro Fator de Assimetria de Bacias de Drenagens (**FABD**) indica um moderado basculamento de blocos na bacia, com uma inclinação positiva do lado direito (porção oeste) do sistema fluvial e o favorecimento de um baixo estrutural no lado esquerdo (leste). Com isso, a presença de cursos fluviais ou trechos da margem direita em nítida condição de desequilíbrio, evidenciada pelo *Nprofile*, pode estar atrelada a um controle litoestrutural e/ou tectônico que levou à compartimentação no sentido oeste do vale do rio Minerva, com presença da serra escarpada do Arribada e de vales suspensos da serra com relevo suavizado.

5.2.6. *Swathprofiles*

Ao identificarem as superfícies mais elevadas e mais baixas do relevo, os *Swathprofiles* ou perfis *Swath* possibilitaram inferir a diferença do potencial erosivo e do padrão topográfico entre os domínios de dissecação, reforçando o papel dos níveis de base locais no processo evolutivo do relevo das bacias de drenagem.

Portanto, foram calculados quatro *Swathprofiles* aplicados ao rio principal e córrego Itabira (Figura 42), identificando as partes do relevo de maior e menor altimetria dentro de uma faixa de varredura de 500m para três perfis e 2,5km para um perfil. Os *Swathprofiles* com faixa de varredura de 500m realizados referem-se aos domínios: Médio-baixo e Baixo Minerva (**P1**); Médio-alto e Médio Minerva (**P3**) e Alto Minerva e Médio-alto Minerva (**P4**). O *Swathprofile* com faixa de varredura de 2,5km foi entre o domínio Médio Minerva e Baixo Minerva (**P2**) por estes domínios apresentarem uma maior extensão da largura de suas áreas em relação aos demais, permitindo uma varredura geomorfométrica mais abrangente.

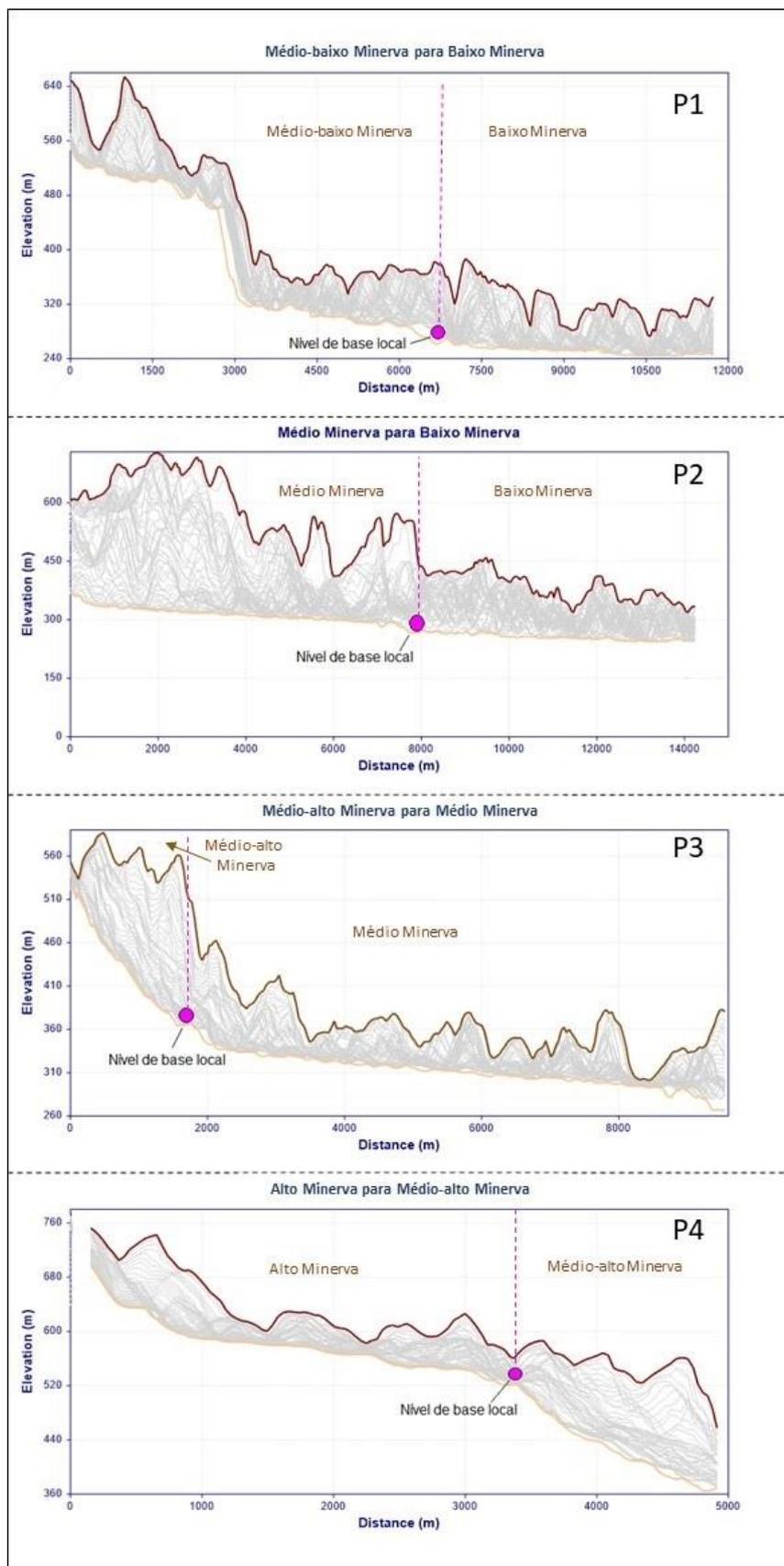


Figura 42 – Swathprofiles (P1; P2; P3 e P4) da bacia do rio Minerva.

Cada linha gerada nos *Swathprofiles* representa um perfil longitudinal do relevo traçado pela varredura. A linha marrom escura representa os níveis topográficos de maior altimetria, enquanto a linha em cor bege claro representa os níveis de menor altimetria do relevo dentro da faixa de varredura. As linhas cinzas representam os demais perfis captados pela varredura que não apresentaram altimetrias máximas e mínimas. Cada *Swathprofile* tem dados de 50 linhas, sendo 25 linhas de cada lado da linha base, ou seja, do rio principal e do córrego Itabira nos perfis aplicados no domínio Médio-baixo Minerva. Em geral, notamos que o padrão das linhas do perfil *Swath* muda próximo ao ponto que marca a mudança do nível de base local do domínio à montante, indicado nos perfis, para o domínio a jusante. Com isso, esse resultado indica uma mudança do comportamento topográfico e do potencial erosivo entre os domínios de dissecação limítrofes.

O **P1** (Figura 42), na área próxima ao nível de base local do Médio-baixo Minerva, é marcado por um padrão topográfico semelhante nos topos mais elevados, porém apresenta um degrau do fundo de vale do córrego Itabira para o rio Minerva, marcando o rebaixamento do nível de base local e a diferença da amplitude altimétrica entre seus dois domínios. Portanto, nessa área próxima ao nível de base local do **P1**, o domínio Médio-baixo Minerva apresenta uma amplitude altimétrica menor que a do Médio-alto Minerva, conseqüentemente também um menor potencial erosivo. Entretanto, a porção mais à montante do domínio Médio-baixo Minerva apresenta um nível de base local com degrau expressivo na sua topografia, marcando aproximadamente 160 metros de amplitude altimétrica, tanto entre suas elevações mínimas como entre as máximas. Em casos de futuras investigações mais detalhadas da bacia do rio Minerva, em especialmente no córrego Itabira, é válido inserir esse compartimento topográfico como um novo domínio de dissecação.

O **P2** (Figura 42), na área próxima ao NBL do Médio Minerva, apresenta uma mudança no padrão topográfico entre os domínios, evidenciado pela variação altimétrica de aproximadamente 50 metros do perfil de elevações máximas, pela mudança de comportamento dos perfis em cinza e pela pequena quebra no perfil de elevações mínimas. No domínio Baixo Minerva, percebe-se amplitudes altimétricas menores, em relação ao Médio Minerva e também um adensamento dos perfis em cinza. Esse adensamento das linhas evidencia uma coleta de elevações com valores próximos dentro da faixa de varredura de 2,5km, apresentando, portanto, padrões de relevo similares. Somado a isso, a amplitude altimétrica menor do que a do domínio Médio Minerva demonstra o menor potencial erosivo no Baixo Minerva. A grande variação da amplitude altimétrica e dos padrões topográficos no Médio Minerva é demonstrado pelo

Swathprofile P2 através do espaçamento entre a linha marrom escura e marrom clara e também entre a variação dispersada entre as linhas cinzas.

Trabalhando com uma faixa de varredura de 500 metros, o **P3** (Figura 42) apresenta comportamento topográfico mais reduzido do relevo do domínio Médio Minerva, diferentemente do *Swathprofile* anterior (**P2**) que trabalhou com uma faixa de varredura de maior largura. Entretanto, a redução da faixa de varredura foi necessária para que a largura da mesma não ultrapassasse os limites da bacia no domínio Médio-alto Minerva, visto que este tem uma menor largura do que o Médio Minerva. Portanto, pontua-se que as linhas do *Swathprofile P3* do domínio Médio Minerva são correspondentes aos relevos de sua área mais próxima ao fundo de vale. Na área próxima ao nível de base local do Médio-alto Minerva, percebe-se uma mudança no comportamento das linhas cinzas que se encontram espaçadas no Médio-alto Minerva e vão se tornando mais adensadas ao longo do Médio Minerva, além do degrau na linha de menor elevação e da grande amplitude altimétrica entre as linhas marrons no Médio-alto Minerva. Com isso, este domínio apresenta um grande potencial erosivo em sua curta área.

Por fim, analisando o *Swathprofile P4* (Figura 42), identificamos uma disparidade do comportamento topográfico entre os domínios de dissecação Alto Minerva e Médio-alto Minerva. Essa mudança se apresenta na queda da elevação dos valores altimétricos do fundo de vale, representado pela linha marrom clara, e da concentração e dispersão das linhas cinzas no alto e Médio-alto Minerva, respectivamente. Nota-se que a linha marrom escura representante de elevações máximas não apresenta uma quebra pontual como a linha marrom clara, diminuindo sua elevação de forma suavizada ao longo do perfil. Essa distinção evidente entre o comportamento dos topos e do fundo de vale entre o domínio Alto Minerva e Médio-alto Minerva pode ser explicado pelos aspectos geológicos desse trecho. O dique de diabásio presente no Médio-alto Minerva é uma rocha menos resistente que a biotita gnaisse bandado do complexo Paraíba do Sul e os ortognaisses do complexo Quirino. Portanto, o terreno composto pelo dique de diabásio possui maior potencial de intemperização e, conseqüentemente, denudação do relevo em relação às demais compostas pelas outras litologias supracitadas. O dique de diabásio encontra-se no fundo de vale, enquanto as demais rochas se localizam nas áreas mais elevadas. Há um contato litológico entre diabásio e biotita gnaisse bandado na formação o nível de base local do Alto Minerva. Com isso, infere-se que a ruptura de declive do perfil das elevações mais baixas é causada pelo controle litoestrutural, dado pela transição da resistência entre rochas biotita gnaisse bandado e dique de diabásio. Já a queda suave do

perfil das elevações máximas ocorre pela denudação do relevo de maneira mais homogênea, por se tratar de terreno com mesma litologia. Seguindo para a análise do *Swathprofile P4* na parte do domínio Alto Minerva, percebemos uma menor amplitude altimétrica entre os perfis representados pelas linhas em cor marrom, em relação ao Médio-alto Minerva e um adensamento das linhas em cinza, indicando um relevo com baixo potencial erosivo. Em sua porção mais à montante, apresenta uma maior variação entre as linhas, pois corresponde a área da nascente do rio principal, num relevo significativamente mais declivoso.

5.2.7. Mapas Paleotopográficos – Técnica Seppômen

A reconstituição paleotopográfica para a área de estudo, em conjunto com a configuração do relevo discutida ao longo dessa pesquisa, buscou convergir para análises que subsidiassem às perspectivas evolutivas e de processos que atuam e atuaram na esculturação da paisagem, dando indícios para um quadro de desenvolvimento distinto em diferentes domínios de dissecação da bacia.

Apesar de não ser uma técnica geocronológica, os mapas seppômen permitem discutir características relativas à evolução do relevo em caráter temporal.

A Figura 43 retrata as paleotopografias da bacia do rio Minerva e arredores a partir do relevo atual em malhas de 0,5km², 1km² e 2km², que correspondem aos cenários paleotopográficos do mais recente ao mais antigo, respectivamente, além do perfil topográfico do segmento do vale do rio Minerva.

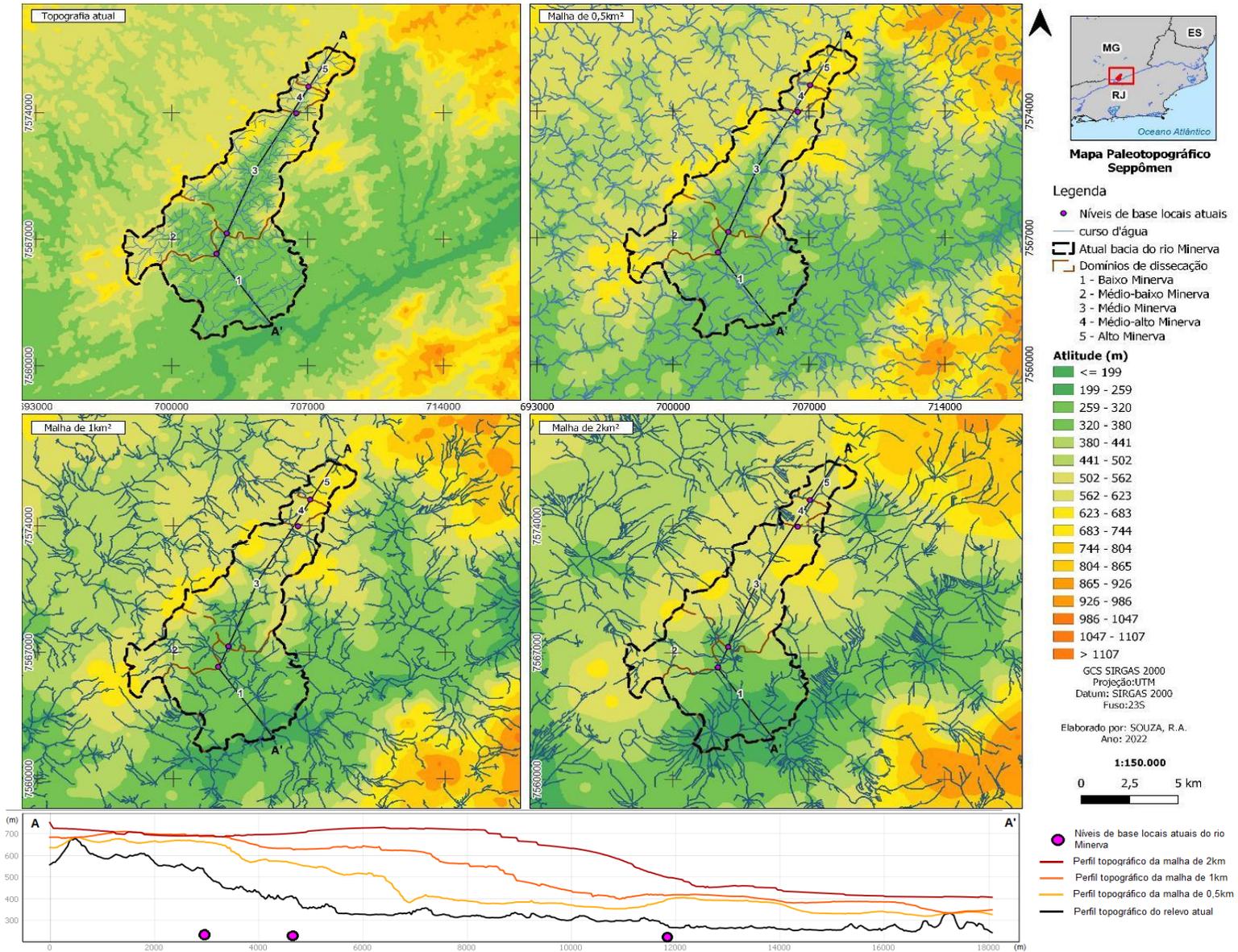


Figura 43 - Reconstituição paleotopográfica da bacia do rio Minerva e seu entorno.

A análise conjunta dos cenários paleotopográficos e da topografia atual evidencia um processo de incisão vertical e recuo erosivo de setores escarpados num sentido preferencial para NE, resultando no desenvolvimento de áreas mais baixas da bacia nessa orientação e, conseqüentemente, no vale do rio principal. Ao longo do cenário evolutivo é possível visualizar a serra do Arribada se conectando topograficamente com serras isoladas localizadas a sudoeste, nordeste e norte da bacia, evidenciando que os domínios de dissecação, com exceção do Baixo Minerva, se localizavam numa área soerguida; enquanto este se encontrava num bloco mais rebaixado, com maior similaridade à altimetria dos relevos próximos ao eixo do rio Paraíba do Sul. Analisando o cenário paleotopográfico de malha de 2km², nota-se que o limite entre esses dois setores topográficos descritos anteriormente é marcado pelos níveis de base locais atuais do Médio-baixo Minerva e Médio Minerva. O perfil topográfico demonstra que o atual NBL do Médio Minerva marcava o ponto inferior da maior ruptura de declive de aproximadamente 200 metros do perfil do cenário mais antigo, composto pela malha de 2km². Portanto, é evidente que em distintos momentos da história evolutiva da bacia, alguns níveis de base locais atuais apresentavam um papel importante na dinâmica da paisagem geomorfológica da bacia, marcando uma setorização de compartimentos altimétricos com desníveis significativos. Ao analisar os cenários mais antigos, o grande compartimento serrano localizado em grande parte da área atual da bacia do rio Minerva, se conecta a leste à serra Alto D'Ouro na área identificada por Sarti (2008) como o estreito de Sapucaia. Esse estreito foi caracterizado como um paleodivisor existente até o Paleoceno e dissecado posteriormente pelo nível de base atlântico (SARTI, 2008).

Em relação à configuração das drenagens e a mudança do interflúvio da bacia, há um crescimento da área da bacia ao longo do tempo e, conseqüentemente, uma ampliação da sua rede de drenagem a partir do processo de possíveis capturas fluviais.

No mapa de malha de 0,5km² as drenagens a extremo norte da área fluíam para a atual bacia do rio Cágado, a noroeste desta. Portanto, nesse cenário, o divisor mais montante do rio Minerva se encontrava no meio do atual domínio Alto Minerva. No Médio Minerva, percebe-se que algumas drenagens localizadas nos vales suspensos da serra do Arribada e da serra a leste do domínio fluíam para onde atualmente é a bacia do rio Cágado e a bacia do rio da Areia, respectivamente. Ainda no Médio Minerva, percebe-se que há uma probabilidade de mudança do rio principal no seu limite com o domínio Baixo Minerva. O rio não passaria por onde atualmente está localizado o NBL do Médio Minerva, mas sim por um caminho orientado a SE, conectando-se ao curso fluvial de 3ª ordem, identificado na Figura 40 como curso fluvial **E2**.

Nessa dinâmica, o rio principal muda de NE para NW-SE no Médio Minerva e já no Baixo Minerva muda novamente sua orientação para ENE, correspondendo às estruturas da zona de cisalhamento Além Paraíba (SILVA, 2010). Após isso, volta a aproveitar a orientação das estruturas NW-SE até desaguar no rio Paraíba do Sul.

O atual córrego Itabira apresentava uma maior extensão, desenvolvendo o trecho NW-SE no domínio Baixo Minerva que no cenário atual é o trecho NW-SE mais a montante do rio principal. Retomando o cenário da malha de 0,5km², o córrego Itabira, portanto, se desenvolvia até o encontro com o rio Minerva, na inflexão de ENE para NW-SE deste. A leste do domínio Baixo Minerva, foi identificado mais um curso fluvial que nesse cenário drenava para uma bacia adjacente.

Ao analisar o mapa da malha de 1km², notamos que o divisor mais a montante do rio principal se encontrava mais recuado que o cenário anterior, localizando-se no meio do domínio Médio-alto Minerva. Com isso, as drenagens existentes no domínio Alto Minerva se configuravam como cabeceiras de drenagem da bacia do rio Cágado, assim como algumas drenagens de vales suspensos da serra do Arribada. Nesse cenário, o curso do rio principal entre o limite dos domínios Médio Minerva e Baixo Minerva aparenta estar mais próximo ao cenário atual, percorrendo caminhos próximos ao nível de base local do Médio Minerva. O curso fluvial a leste do domínio Baixo Minerva segue drenando para a bacia adjacente, porém nesse cenário apresenta uma extensão maior dentro da atual bacia do rio Minerva, com sua nascente na serra isolada na porção leste do domínio Médio Minerva.

No cenário da malha de 2km², o divisor mais a montante do rio Minerva se encontra na porção central do atual domínio Médio Minerva. Portanto, as drenagens a montante desse ponto fluíam para bacias adjacentes, sendo principalmente para a bacia do rio Cágado o caminho preferencial das drenagens da margem direita e para a bacia do rio Areia as drenagens da margem esquerda. Nesse cenário, o curso do rio principal entre o limite dos domínios Médio Minerva e Baixo Minerva aparenta percorrer caminhos próximos ao nível de base local do Médio Minerva.

As drenagens localizadas na área do atual Baixo Minerva não possibilitam compreender o possível trajeto do rio principal. Aparenta-se que o rio Paraíba do Sul se desenvolvia na porção sul do Baixo Minerva, onde se localiza a zona de cisalhamento do Além Paraíba (SILVA, 2010) e a desembocadura do rio Minerva teria a possibilidade de se localizar mais a sudoeste do domínio, onde encontra-se atualmente o curso fluvial **D1**, localizado na Figura 40.

5.3. Síntese dos domínios de dissecação da bacia do rio Minerva

O presente subitem buscou organizar e sintetizar as principais informações geológico-geomorfológicas para a área de estudo por domínio de dissecação, além da descrição de seus compartimentos topográficos (Figura 44). A figura 45 apresenta a distribuição percentual dos compartimentos topográficos na bacia do rio Minerva, segundo domínios de dissecação. Entende-se que essa análise permitiu investigar a morfogênese do relevo e do sistema de drenagem da bacia do rio Minerva, considerando a grande influência dos níveis de base locais em seus mecanismos evolutivos. A tabela 5 reúne os dados fundamentais para a compreensão do cenário evolutivo de cada domínio.

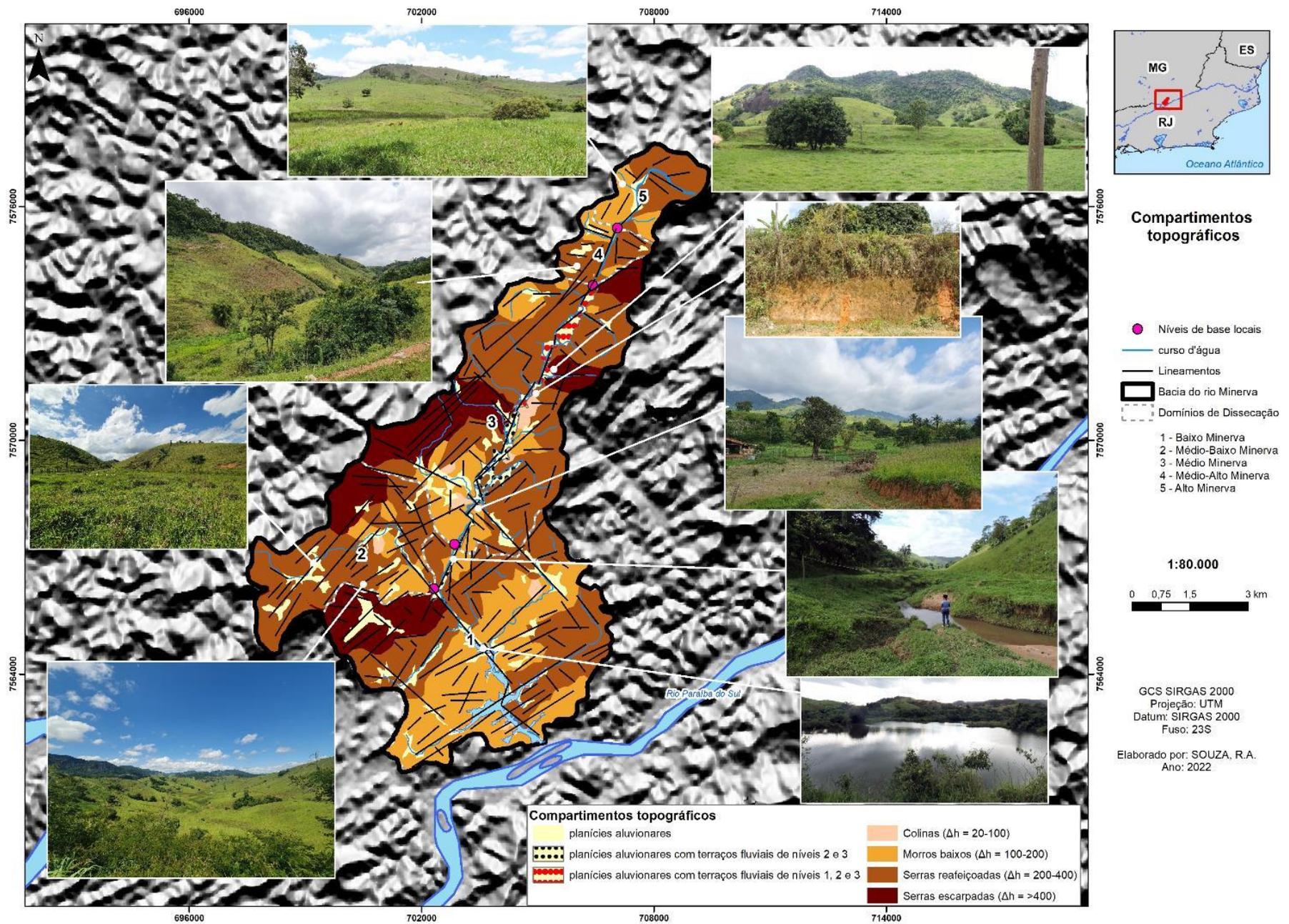


Figura 44 – Compartimentos topográficos do rio Minerva e domínios de dissecação (1; 2; 3; 4 e 5). As fotos ilustram características e padrões do relevo de cada compartimento. Fotos: R.A. Souza e T.M. Silva (dez./2021).

Distribuição percentual dos compartimentos topográficos na bacia do rio Minerva, segundo domínios de dissecação

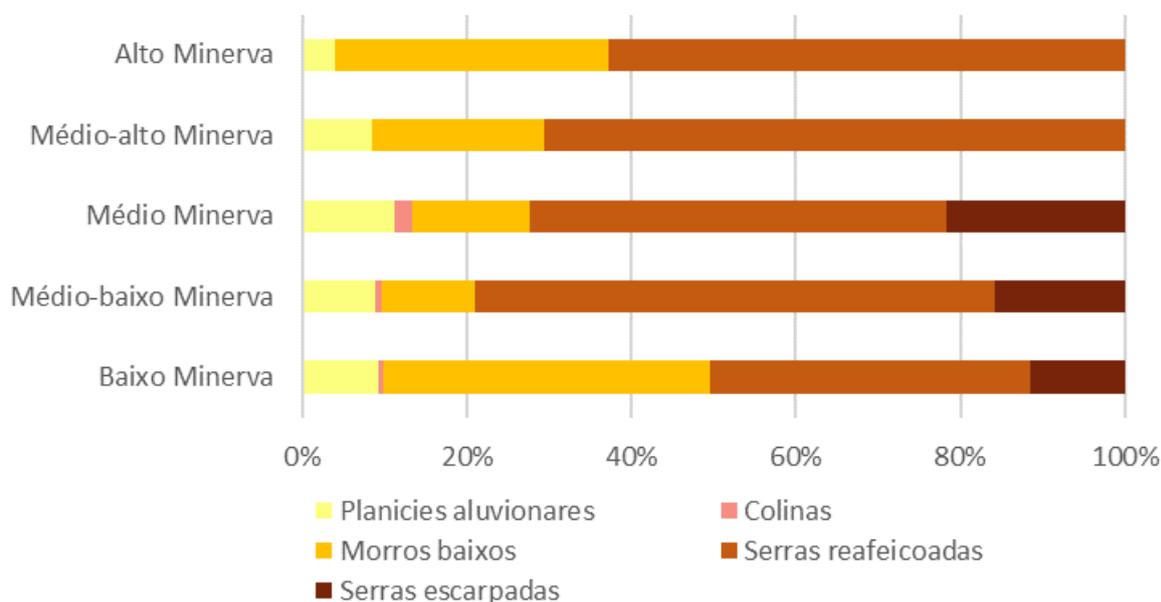


Figura 45 – Distribuição percentual dos compartimentos topográficos na bacia do rio Minerva, segundo domínios de dissecação.

Tabela 5 – Informações geomorfológicas e morfométricas por domínios de dissecação.

Domínio de dissecação	Lineamentos estruturais - direção predominante	Índice RDE	FABD	Trecho com FSTT máximo	Índice de concentração de rugosidade (ICR) predominante	Índice de concavidade (%)	Compartimento topográfico predominante	Presença de terraços no canal principal
Baixo Minerva	N50-60E	3,74	46,83	0,92	Baixo	14,3	Morros baixos	T3 e T2
Médio-baixo Minerva	N40-50E	6,58	50,82	0,46	alto	9,8	Serras reafeiçoadas	Nenhum
Médio Minerva	N40-50E	2,51	55,09	0,41	Muito alto	11,2	Serras reafeiçoadas	T1, T2 e T3
Médio-alto Minerva	N20-30E	9,86	66,67	0,41	alto	13	Serras reafeiçoadas	Nenhum
Alto Minerva	N50-60W	4,11	60,98	0,46	Muito baixo	44	Serras reafeiçoadas	Nenhum

Elaboração própria.

5.3.1. Domínio de dissecação Baixo Minerva

O domínio de dissecação Baixo Minerva é o domínio a extrema jusante da bacia, tendo como seu nível de base local a foz do rio Minerva, desaguando no rio Paraíba do Sul. Sua área

de 28,95km² é constituída por morros baixos (40%), serras reafeiçoadas (39%), serras escarpadas (11%), planícies aluvionares (9%) e uma pequena ocorrência de colinas (1%) – Figuras 44 e 45. Próximo à foz, o rio Minerva e seus afluentes são marcados pelo aumento do nível da vazão por ser uma área diretamente afetada pela represa da UHE Anta, situada a 1,25 km de distância de seu nível de base, formando vales e planícies aluvionares alagadas desse trecho. Tais planícies aluvionares dos afluentes se desenvolvem a partir das estruturas N50-60E da zona de cisalhamento transcorrente dextral com uma faixa de rochas blastomiloníticas de alto ângulo da Zona de Cisalhamento Além Paraíba (SILVA, 2010), enquanto o rio principal segue por um alinhamento NW-SE. Por conta da área represada, não conseguimos acessar suas planícies para investigar presença de terraços fluviais nelas.

Também é possível identificar que os compartimentos de morros baixos e de serras reafeiçoadas nessa área estão orientados pela estrutura NE-SW da zona de cisalhamento Além Paraíba, sendo que os compartimentos de maior amplitude altimétrica, no caso as serras reafeiçoadas, são formadas por litologias do ortogranulitos do Complexo Juiz de Fora que são mais resistentes em relação às de seu entorno. Os granada-biotita gnaisses do Grupo Andrelândia, que perpassam os ortogranulitos, seguindo a mesma direção N50-60E, apresentam uma menor resistência ao intemperismo e por onde se desenvolveram os principais canais afluentes nesse trecho deste domínio de dissecação. Seguindo para montante, os morros baixos predominam a paisagem geomorfológica seguindo o alinhamento NE-SW, em embasamento composto por ortognaisses do Complexo Quirino e paragnaisses do Grupo Paraíba do Sul. As serras escarpadas estão localizadas a noroeste desse domínio e sua porção central é marcada pelo desenvolvimento de um vale com significativo depósito aluvionar onde está localizada a sede municipal do município de Chiador/MG (Figura 46). As serras foram formadas por uma falha de empurrão do biotita-gnaisses do Grupo Andrelândia no ortognaisse do complexo Quirino (CODEMIG, 2003), responsáveis pelas elevações na paisagem.



Figura 46 – Serras escarpadas no domínio Baixo Minerva com localização da cidade de Chiador (MG) no fundo de vale. Foto: M.M. Freitas (mar/2018).

Na inflexão do rio Minerva de NW-SE para NE-SW (Figura 44), próximo ao limite com o domínio Médio-baixo Minerva, as serras reafeiçoadas voltam a aparecer na paisagem, estreitando o vale do rio principal. Nessa área, identificamos a presença de terraços fluviais recentes (várzea – T3) e do nível de terraço intermediário (T2), associados às fases de encaixamento fluvial posteriores a fase de entulhamento dos eixos de drenagem durante o Holoceno. Nesse mesmo local, o vale encontra-se estrangulado por um relevo alinhado NE-SW e com similaridades de um plano de falha (Figura 25).

Em relação aos outros domínios, os parâmetros morfométricos indicam que o Baixo Minerva é um dos que apresentam menor potencial de dissecação na bacia. o índice **RDE** do rio principal no Baixo Minerva (3,74) (Tabela 5) é o segundo mais baixo da bacia e indica trechos com alteração apenas próximo à foz e de influência intermediária de controles tectônicos. O índice de concentração de rugosidade (**ICR**) predominante é baixo, indicando o domínio com menor padrão de dissecação da bacia. Já o índice de concavidade indica que este é o segundo domínio de dissecação onde o canal principal está mais próximo ao estado de “equilíbrio”.

O fator de assimetria de bacias de drenagem (**FABD**) também obteve menor índice, em relação aos outros domínios, apresentando pouquíssima probabilidade de falhas ou basculamento no canal principal. Entretanto, o fator de Simetria Topográfica Transversa (**FSTT**) inferiu alta migração do rio Minerva nesse domínio, se deslocando de leste para oeste,

fluindo atualmente pelo vale estrangulado com possibilidade da presença de um plano de falha. Na análise paletopográfica, o cenário constituído pela malha de 0,5km² demonstrou que nesse trecho o rio Minerva fluía mais a leste, por um caminho orientado a NW-SE, onde atualmente localiza-se o interflúvio entre este domínio e o Médio Minerva e onde se desenvolvem cursos fluviais de 3^a ordem para o Baixo Minerva e de 2^a ordem para o Médio Minerva. Reforçando essa análise, o **ICR** aponta valores baixos a muito baixos nesse local, demonstrando um relevo com baixo potencial de dissecação e características aplainadas, marcado por planícies aluvionares alinhadas a NW-SE. Portanto, as análises em conjunto indicam um local com grande probabilidade de captura fluvial, tendo como evidência geomorfológica um relevo suavizado, características de um possível vale abandonado. Além disso, há a proximidade do nível de base local do domínio Médio Minerva com essa área, no qual poderia ser interpretado como o ponto da possível captura. Uma pesquisa posterior de investigação dos materiais sedimentares nessa área, com análise estratigráfica de detalhe e datação dos sedimentos, pode auxiliar na identificação de possíveis sedimentos fluviais abandonados e, com isso, corroborar com este indicativo de captura fluvial e ocorrência de vale abandonado (*wind gap*).

5.3.2. Domínio de dissecação Médio-baixo Minerva

Esse domínio de dissecação em particular é definido pelo córrego Itabira, diferentemente dos demais que compõem o rio Minerva. Portanto, o nível de base local desse domínio é a própria foz do córrego Itabira que deságua no rio Minerva. Sua área de 12,24km² é constituída por serras reafeiçoadas (63%), serras escarpadas (16%), morros baixos (11%), planícies aluvionares (9%) e colinas (1%) – Figuras 44 e 45. Não foi possível investigar terraços fluviais ao longo de seu vale fluvial por não haver acesso por estradas até eles. Esse domínio é marcado por um degrau topográfico na altura do médio-alto curso do canal principal (a oeste do domínio), originado pela falha de empurrão com janela estrutural do biotita gnaiss do Grupo Andrelândia no ortognaisse do Complexo Quirino (CODEMIG, 2003), assim como o trecho a noroeste no domínio Baixo Minerva. Porém nesse domínio, a área soerguida na paisagem é composta pelo ortognaisse do Complexo Quirino, num compartimento topográfico de serras reafeiçoadas, com ocorrência de marcantes planícies aluvionares que são ocupadas por fazendas. Por conta dessa configuração, tal trecho apresenta uma densidade alta de níveis de base locais nos canais fluviais, fazendo com que esse domínio apresente o segundo maior índice RDE em comparação com os demais e o índice de concavidade mostra que este é o domínio com o curso fluvial menos ajustado a seu nível de base (Tabela 5). Grande parte dos vales

fluviais dos afluentes, que se desenvolvem na transição desse degrau topográfico para as áreas mais baixas no encontro com o canal principal, estão alinhados a N40-50E. As serras escarpadas presentes nesse domínio possuem alinhamento N40-50E da serra do Arribada que ocorrerá em maior parte no domínio Médio Minerva. O canal principal apresenta um alto índice **RDE** na inflexão de drenagem, mostrando indícios da existência de uma possível captura fluvial no cenário evolutivo desse domínio. Seus relevos com alta amplitude altimétrica são evidenciados pelo alto **ICR**, tornando um domínio com alto potencial de dissecação. O **FABD** indica um domínio com pouco ou nenhum basculamento e os trechos do canal principal não apresentam migrações significativas, de acordo com os resultados do **FSTT**.

5.3.3. Domínio de dissecação Médio Minerva

O domínio do Médio Minerva compartimenta o médio curso do rio principal da bacia. Sua área de 26,48km² é constituída por serras reafeiçoadas (51%), serras escarpadas (22%), morros baixos (14%), planícies aluvionares (11%) e colinas (2%) – Figuras 44 e 45. Os lineamentos predominantes são N40-50E, orientando o vale do rio principal e suas planícies aluvionares, além de serras escarpadas e reafeiçoadas. Esse domínio é o que apresenta maiores percentuais de planícies aluvionares e de serras escarpadas em relação aos mesmos compartimentos nos demais domínios de dissecação. Ou seja, ele é o que apresenta uma maior composição de sua área por compartimentos díspares em amplitude altimétrica, característica também evidenciada pelo seu **ICR** predominante ser muito alto (Tabela 5), compartimentado pelas serras escarpadas e reafeiçoadas, e também **ICR** com segunda predominância ser muito baixo, constituídos pelas extensas planícies aluvionares. Tal configuração evidencia um domínio com padrões de dissecação do relevo alto, conseqüentemente com alto potencial de produção e transporte de sedimentos, e com relevos de baixa dissecação que favorecem a deposição de tais materiais.

A oeste desse domínio, há um contato litológico entre ortogneisses do Complexo Quirino (mais a leste), com biotita gnaisse do Complexo Paraíba do Sul (mais a oeste), marcando uma zona de níveis de base locais em afluentes do rio Minerva e compartimentando a serra do Arribada. A porção superior da serra do Arribada é marcada por vales suspensos orientados a NW-SE e compartimentados por morros baixos mais a noroeste e com presença de planícies aluvionares. As características desse relevo mais suavizado e menos dissecado, como é apresentado também pelo índice **ICR**, seguem nas bacias ao reverso que desaguam no rio Paraíba e também apresentam orientação NW-SE dos seus canais principais. O índice de

concavidade de alguns desses canais da margem direita do rio Minerva apresentou resultados negativos, indicando que eles ainda não estão adaptados ao nível de base. Além disso, esses canais apresentam inflexões de drenagem, marcadas pelos níveis de base locais com *strike* alinhado à escarpa da serra do Arribada. Portanto, tais evidências inferem uma alta probabilidade de que esses vales suspensos são resultantes de captura fluvial, na qual as cabeceiras de drenagem do rio Minerva que apresentam um maior potencial erosivo devido ao nível de base mais rebaixado, capturaram os canais que fluíam para o rio Paraibuna, num processo de erosão remontante das cabeceiras (BISHOP, 1995).

Analisando as características geomorfológicas do fundo de vale do rio principal, identificou-se a presença de terraços fluviais inferiores ou terraços de várzea (**T3**) e **T2** (terraço intermediário) no médio-baixo curso e no médio-alto curso, além de níveis de terraços fluviais superiores (**T1**) neste último trecho (Figura 47). O terraço superior nesse médio-alto curso apresentam aproximadamente 6 metros e características bem similares aos terraços fluviais desenvolvidos no evento Manso, ao longo do médio vale do rio Paraíba do Sul (MOURA e MELLO, 1991; PELECH, 2016). Com isso, esses terraços de nível mais elevados (**T1**) podem ser indicadores um episódio de instabilidade na paisagem durante o início do Holoceno que atingiram a área de estudo. Segundo Moura e Mello (1991), no período do quaternário superior houveram intensos processos erosivos nas encostas na região de Bananal (SP/RJ) e a remobilização desses sedimentos foi tão intensa que os canais fluviais não conseguiram transportá-los, gerando um entulhamento generalizado dos fundos de vale. Os depósitos sedimentares desse evento são da aloformação Manso e estão associados ao nível de terraço superior, identificado regionalmente no médio Vale do rio Paraíba do Sul. Com isso, esses terraços de nível mais elevados (**T1**) na bacia do rio Minerva podem ser indicadores um episódio de instabilidade na paisagem durante o início do Holoceno que atingiram a área de estudo. Além disso, tais terraços podem apresentar evidências de capturas fluviais no rio principal com investigações futuras a partir de análises estratigráficas e cronológicas de seus materiais sedimentares. O Médio Minerva também é marcado pela ocorrência de diques de diabásio que orientam o rio a N30-40E por se tornar um caminho preferencial devido a sua baixa resistência ao intemperismo. Nesse trecho, o índice **RDE** detectou influência intermediária de controles tectônicos e anomalias de 3ª e 2ª ordem.

O **FABD** (Tabela 5) sugeriu um leve basculamento de blocos, com uma inclinação positiva do lado direito (porção oeste) do sistema fluvial, com o favorecimento de um baixo

estrutural no lado esquerdo (leste). Com isso, o **FSTT** apresentou valores máximos nos trechos que apresentam uma migração preferencial de oeste para leste.

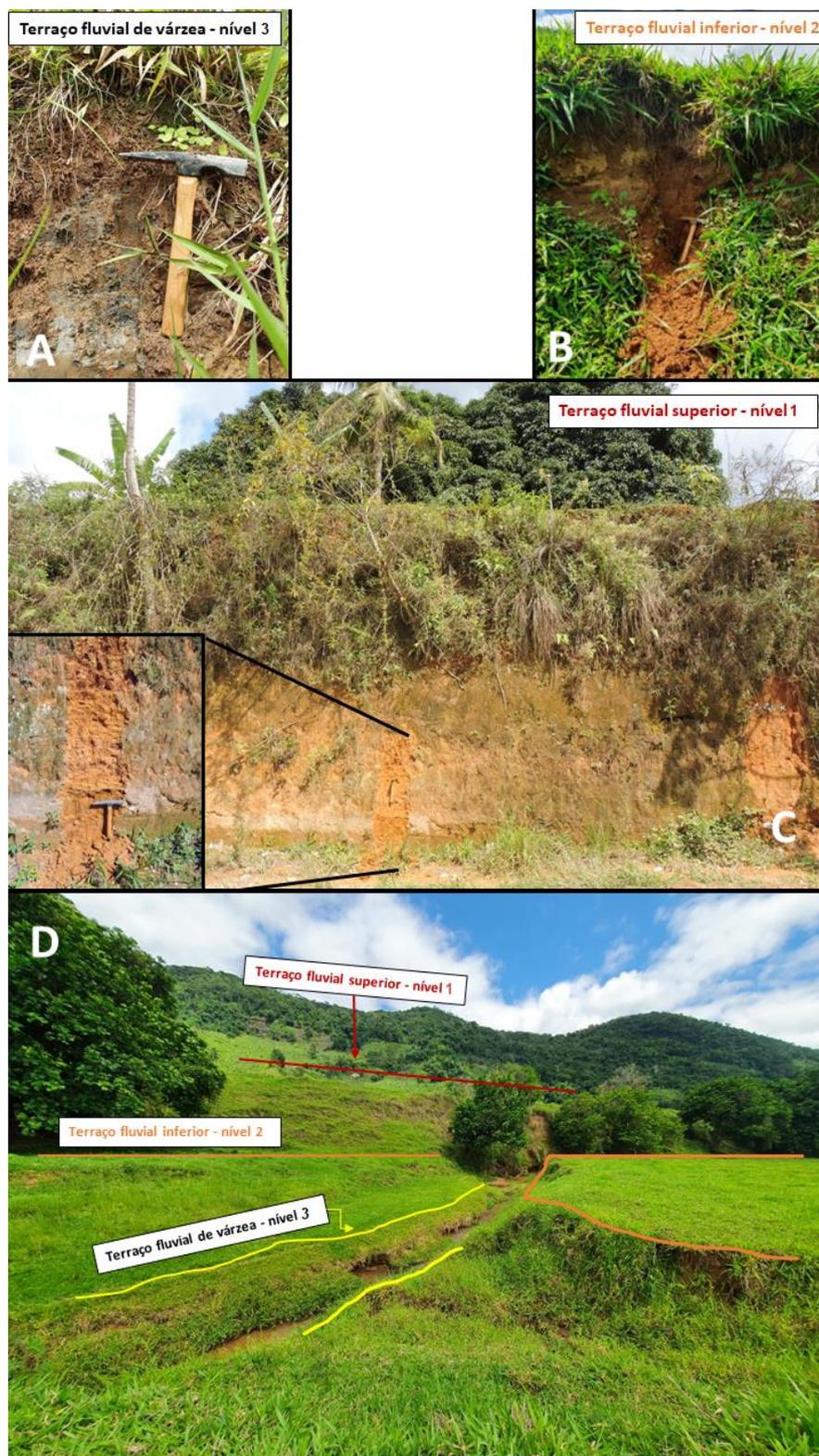


Figura 47 - Níveis dos terraços fluviais presentes no domínio do Médio Minerva. A) Terraço fluvial de várzea – nível 3; B) Terraço fluvial inferior – nível 2; C) Terraço fluvial superior – nível 1. Fotos: R.A. Souza (dez./2021).

5.3.4. Domínio de dissecação Médio-alto Minerva

O Médio-alto Minerva é o que apresenta a menor área entre os domínios de dissecação, totalizando 2,68km². Sua área é constituída por serras reafeiçoadas (71%), morros baixos (21%) e planícies aluvionares (9%) – Figuras 44 e 45. O rio principal nesse domínio flui num fundo de vale encaixado a N20-30E, decorrente da influência litoestrutural do dique de diabásio em seu embasamento que por apresentar baixa resistência ao intemperismo em relação às demais litologias locais, favorece o entalhamento fluvial. Não foi identificado a presença de terraços fluviais nesse trecho do rio principal. A compartimentação da serra do Arribada nesse domínio segue os mesmos mecanismos evolutivos do domínio Médio Minerva, a partir do contato litológico entre ortognaisse do Complexo Quirino e biotita-gnaisse do Complexo Paraíba do Sul, mais a oeste. Há apenas uma mudança do alinhamento da serra nesse domínio que passa de N40-50E no Médio Minerva para N20-30E. A porção superior da serra do Arribada também é marcada por vales suspensos, compartimentados por morros baixos mais a noroeste e com presença de planícies aluvionares. As mesmas evidências de alta probabilidade de captura fluvial dos canais afluentes desses vales suspensos que foram identificadas no Médio Minerva, são identificadas nesse domínio.

O trecho do rio principal no Médio-alto Minerva apresenta um índice **RDE** com valor de anomalias de 1ª ordem (Tabela 5), ou seja, trechos de rios com forte influência tectônica, mas, normalmente, com ocorrência isolada. Esse é o domínio com maior índice **RDE** e **FABD** entre os domínios de dissecação. O **FABD** indica um grau de assimetria moderado para a margem esquerda e o **FSTT** também apresenta uma leve migração preferencial do canal para a esquerda. O desenvolvimento da ruptura de declive a montante desse domínio que forma o nível de base local do Alto Minerva é caracterizado por uma anomalia de 1ª ordem de forma encachoeirada, apresentando aproximadamente 60 metros de amplitude altimétrica - a maior em relação aos níveis de base locais dos demais domínios. De acordo com Souza (2019) o paredão rochoso que forma o degrau topográfico abrupto desse nível de base local a montante do Médio-alto Minerva é formado pelo ortognaisse do Complexo Quirino (rocha mais resistente), tendo o contato litológico com o dique de diabásio logo a jusante (rocha menos resistente).

5.3.5. Domínio de dissecação Alto Minerva

O Alto Minerva apresenta uma área de 4,11 km², constituída por serras reafeiçoadas (63%), morros baixos (33%) e planícies aluvionares (4%) – Figuras 44 e 45. Não foi encontrado

terraços fluviais no fundo de vale do rio Minerva nesse domínio. Boa parte do seu relevo suavizado apresenta características morfológicas similares às dos vales suspensos da serra do Arribada, evidenciado também pelo **ICR** predominantemente ser muito baixo (Tabela 5). Seu índice de concavidade infere que o trecho do rio Minerva nesse domínio está mais ajustado ao seu nível de base local do que os demais domínios. Com isso, pode-se afirmar que junto ao Baixo Minerva, o Alto Minerva é um dos domínios com baixo potencial erosivo na configuração atual da bacia. Porém a interpretação desse baixo potencial erosivo dos dois domínios é distinta. O Baixo Minerva é o domínio mais atingido pelo avanço/pulso erosivo do rio Paraíba do Sul (RPS), apresentando em seu relevo e drenagens formas suavizadas e de baixo potencial erosivo por já estar diretamente ajustado ao nível de base do RPS. Já o Alto Minerva pouco está sendo atingido pelo avanço erosivo do nível de base local do rio Paraíba do Sul, por estar mais a montante do rio Minerva e tendo tal impacto erosivo amortecido pelos NBLs dos demais domínios e pela expressividade do seu próprio NBL. Diante disso, seu índice de concavidade baixo se relaciona com a ideia de que o domínio do Alto Minerva ainda não foi atingido pelo avanço erosivo do nível de base local do rio Paraíba do Sul como os demais domínios e, conseqüentemente, suas drenagens encontram-se entulhadas, resultando num perfil normalizado mais côncavo. Com o avanço erosivo do rio Paraíba do Sul ao longo do tempo, o nível de base local do Alto Minerva poderá ser erodido e rebaixado perdendo cada vez mais sua função de reter o processo de dissecação. Nesse cenário, possivelmente o perfil normalizado desse domínio desenvolverá trechos convexos e, conseqüentemente, um maior índice de concavidade, passando a apontar um estágio de maior desequilíbrio ao ter maior potencial erosivo pelo rebaixamento do nível de base local e, portanto, favorecendo o entalhamento fluvial.

Em relação a direção predominante de lineamentos estruturais, o Alto Minerva apresenta um *trend* predominante de N50-60W, orientação essa relacionada às fraturas oriundas da abertura do oceano atlântico, diferentemente dos demais domínios que apresentaram *trends* NE-SW como principais e os NW-SE secundários. Esse lineamento segue sendo predominante na orientação dos canais tributários ao rio Paraíba, localizados a oeste do domínio e da bacia do rio Minerva em geral. A análise da reconstituição paleotográfica demonstrou que ao longo dos cenários pretéritos do Alto Minerva, seus canais fluviais drenavam para sentido oeste, em direção ao atual rio Paraíba. É válido pontuar que há uma inflexão de drenagem do rio Minerva nesse domínio, onde seu fluxo orientado a NW-SE passa para NE-SW até sua próxima inflexão de drenagem, já no Baixo Minerva. A partir daí, a rede fluvial desse domínio pode ter

sido capturada pelo rio Minerva por erosão remontante das cabeceiras de drenagem, porém, como foi dito anteriormente, o relevo de baixa dissecação do domínio Alto Minerva pode apresentar tais características por estar, simplesmente, preservado pelo seu nível de base local. Com isso, o impacto do pulso erosivo agressivo do nível de base regional do rio Paraíba do sul no relevo do domínio do Alto Minerva seria “amortecido” pelos níveis de base locais dos demais domínios.

O **FABD** desse domínio apresenta um grau de assimetria moderado para a esquerda e o **FSTT** indicou uma moderada migração preferencial do rio principal para oeste, em sua porção mais próxima ao nível de base local, e uma baixa migração preferencial para sul na sua cabeceira.

6. CONCLUSÕES

Essa pesquisa se propôs em aprofundar as análises da dinâmica evolutiva da bacia do rio Minerva, sobretudo correlacionando com parâmetros morfométricos para o entendimento da conformação de seu relevo e sistema de drenagem. Com isso, foi possível concluir que a história evolutiva da bacia do rio Minerva, contada a partir dos domínios de dissecação, é marcada por um forte controle tectono-estrutural do substrato rochoso evidenciado pelas feições morfológicas diferenciadas, formação de níveis de base locais, assimetria moderada da bacia, orientação da rede de drenagem e capturas fluviais.

A análise dos lineamentos estruturais demonstra uma disposição prioritária na orientação NE-SW, seguido de NW-SE. A primeira orientação está condicionada, principalmente, a estruturas originadas da orogênese Brasileira no Neoproterozoico e reativadas na abertura do Oceano Atlântico iniciada no Jurássico e a segunda está diretamente condicionada aos mecanismos desse último evento tectônico. O que não foi possível de responder nessa pesquisa foi em qual(is) fase(s) tectônica(s) que ocorreram tais eventos responsáveis pela configuração atual da paisagem e que aparenta ter sofrido modificações recentes.

Boa parte dos canais principais da bacia apresentaram uma atual condição de relativo desequilíbrio, marcado por níveis de base locais, índice de concavidade baixo ou negativo e trechos anômalos, diagnosticados pelo índice de Relação Declividade-Extensão (**RDE**). A ocorrência de tais indicadores na paisagem apresentou relação direta com áreas em controle litológico e/ou estrutural, possibilitando a compartimentação da bacia em domínios de dissecação com padrões de relevo distintos, incluindo distintos ambientes de retenção da sedimentação quaternária. Nessa perspectiva, a análise dos domínios de dissecação através dos perfis *Swath* reforçou o papel dos níveis de base locais no processo evolutivo do relevo ao inferir a diferença do potencial erosivo e do padrão topográfico entre tais domínios. Destaca-se a disparidade do comportamento topográfico entre o Alto Minerva e Médio-alto Minerva, em que o contato do dique de diabásio (rocha menos resistente) com o ortognaisse do Complexo Quirino (rocha mais resistente) condiciona a formação de relevo com potencial erosivo extremamente desigual entre esses domínios.

Tais análises permitiram, inclusive, a identificação de novos potenciais nos domínios de dissecação da bacia que podem ser considerados numa futura pesquisa de maior detalhe na área

de estudo. Os novos domínios seriam os vales suspensos do córrego Itabira e da serra do Arribada que apresentam semelhanças morfológicas e evolutivas com o domínio Alto Minerva.

A reconstituição paleotopográfica permitiu a criação de perspectivas evolutivas e de processos que atuam na esculturação da paisagem geomorfológica da bacia, com indícios de um quadro evolutivo distinto entre os domínios de dissecação. Ficou evidente que em distintos momentos da história evolutiva da bacia, alguns níveis de base locais atuais apresentavam um papel importante na dinâmica de sua da paisagem geomorfológica. Um exemplo é a setorização de compartimentos altimétricos no cenário mais antigo, marcada pelo NBL do Médio Minerva numa ruptura de declive de, aproximadamente, 200 metros. Outra configuração evolutiva que a análise dos mapas seppômen permitiu, em conjunto com os demais indicadores, foi que há uma grande probabilidade dos canais fluviais dos vales suspensos da serra do Arribada e do Alto Minerva drenarem para fora da bacia sentido oeste, em direção ao atual rio Paraibuna. Também foi identificado possíveis capturas de drenagem da rede de drenagem do rio Minerva em cursos fluviais de bacias adjacentes a oeste do Baixo Minerva. Com isso, conclui-se que houve um crescimento da área da bacia ao longo do tempo e, conseqüentemente, uma ampliação da sua rede de drenagem a partir do mecanismo de possíveis capturas fluviais por erosão remontante das cabeceiras de drenagem.

A pesquisa também possibilitou levantar a hipótese de mudança da direção do percurso do rio principal da bacia por captura fluvial entre os domínios Baixo Minerva e Médio Minerva, próximo ao nível de base local deste último domínio. Tal mudança foi evidenciada no cenário paleotopográfico mais recente. Para além disso, essa hipótese foi permitida pela identificação de tais evidências próximas à área analisada: inflexão de drenagem; nível de base local e possível plano de falha no atual curso do rio, identificado por aspectos morfológicos do relevo, em contraponto ao relevo suave, com índice de dissecação baixo e muito baixo por onde o rio Minerva pode ter passado.

O Médio Minerva é composto por terraços fluviais superiores que são potenciais indicadores de instabilidade climática que atingiram a área de estudo no início do Holoceno. Além disso, essas formas de relevo podem apresentar evidências de capturas fluviais no rio principal com investigações futuras a partir de análises estratigráficas e cronológicas de seus materiais sedimentares.

A partir das conclusões geradas por essa pesquisa, alguns questionamentos foram levantados e que podem ser solucionados com futuros estudos na área de estudo. São eles:

- Os possíveis processos de capturas fluviais, localizados nos vales suspensos da serra do Arribada, no Alto Minerva e próximo ao nível de base local do Médio Minerva estariam relacionados à influência da neotectônica na bacia?

- Os terraços fluviais superiores, localizados no Médio Minerva, estão relacionados a fase de entulhamento fluvial no holoceno (evento Manso - Moura e Mello, 1991)?

- A partir da reunião de elementos sugestivos para um elo com eventos neotectônicos, como estes podem ter afetado a organização geomorfológica e conformação topográfica da bacia? A partir de quais direções estruturais e em qual ordem cronológica?

Por fim, a compartimentação da bacia do rio Minerva a partir de domínios de dissecação se mostrou de grande eficiência para investigação da história evolutiva da conformação do relevo e de sua rede de drenagem. Os níveis de base locais exercem grande influência na evolução da rede de drenagem da área e, conseqüentemente, também na própria evolução do relevo. Portanto, é de suma importância considerar esse fator em estudos que se propõem a investigar a evolução de bacias de drenagens e o reconhecimento de domínios de dissecação se apresentam como uma abordagem espacial analítica potente para ser utilizada em estudos dessa concepção.

Os parâmetros morfométricos utilizados para investigação do modelo evolutivo da bacia se mostraram eficientes. Destacando-se os parâmetros ICR, *Seppômen* e FSTT que auxiliaram na investigação da existência de capturas fluviais e subsidiaram registrar evidências de áreas semelhantes com grande potencial de serem ou terem sido capturadas; O RDE e *NProfiles* auxiliaram na avaliação da condição de equilíbrio dos cursos fluviais e identificação de anomalias de drenagem; enquanto o *Swathprofile* permitiu a inferência de potenciais erosivos distintos entre os domínios de dissecação, corroborando com a importância dos níveis de base locais na dinâmica evolutiva do relevo em bacias de drenagem.

REFERÊNCIAS

- AB'SABER, A. N. O problema das conexões antigas e da separação da drenagem do Paraíba e do Tietê. **Boletim Paulista de Geografia**, n. 26, p. 38–49, 1957.
- AB'SABER, A. N. **Os domínios de natureza no Brasil: Potencialidades Paisagísticas**. 7ª. ed. São Paulo: Ateliê Editorial, 2012.
- ALMEIDA, F. F. M. D.; CARNEIRO, C. D. R. Origem e evolução da Serra do Mar. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 28, n. 2, p. 135–150, 1998.
- ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y.; CARNEIRO, C.D.R. Lineamento de Além Paraíba. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 47, n. 3-4, p. 575, 1975.
- ALMEIDA, F. F. M. et al. Brazilian structural provinces: An introduction. **Earth-Science Reviews**, v. 17, n. 1–2, p. 1–29, 1981.
- ALVES, L. C. **Degradação do Rio Paraíba do Sul no Município de Três Rios: causas e consequências**. 2019, 55f. Monografia (Gestão Ambiental), Departamento de Ciências do Meio ambiente, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Três Rios, 2019.
- ANDRADES FILHO, C.O. **Análise morfoestrutural da porção central da bacia Paraíba (PB) a partir de dados MDE-SRTM e ALOS-PALSAR FBD**. Dissertação (Mestrado). Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos, 177p. 2010.
- ASMUS, H. E.; FERRARI, A. L. Hipótese sobre a causa do tectonismo Cenozoico na região sudeste do Brasil. Hipótese sobre a causa do Tectonismo Cenozoico na Região Sudeste do Brasil. **Aspectos Estruturais da Margem Continental Leste Brasileira**. Série Projeto REMAC, 4: 75–88, 1978.
- BISHOP, P. Drainage rearrangement by river capture, beheading and diversion. **Progress in Physical Geography**, v. 19, n. 4, p. 449-473, 1995.
- CAMPANHA, G. C. O lineamento de Além-Paraíba na área de Três Rios (RJ). **Revista Brasileira de Geociências**, v. 11, n. 13, p. 159-171, 1981.
- CASTANHEIRA, M. V. S.; FREITAS, M. M.; COUTO, D. L. N. Rebaixamento do Nível de Base Regional no Médio Vale do Rio Paraíba do Sul e Evidências dos Processos de Captura de Drenagem. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 11. 2005, **Anais...** São Paulo: SBGFA, 2005 [s.p].
- CASTANHEIRA, M. V. S.; FREITAS, M. M.; SARTI, T. P. Evolução da rede de drenagem controlada por nível de base regional e evidências do processo de captura fluvial no Médio Vale. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA/ REGIONAL CONFERENCE ON GEOMORPHOLOGY, 6. 2006, **Anais...** Goiania: SINAGEO, 2006, p. 1-10.
- CATUNEANU, O. Sequence stratigraphy of clastic systems: concepts, merits, and pitfalls. **Journal of African Earth Sciences**, v. 35, n. 1, p. 1-43, 2002.

CHEREM, L. F. S. et al. Long-term evolution of denudational escarpments in southeastern Brazil. **Geomorphology**, v. 173–174, p. 118–127, 2012.

CHIANG, L. C. **Análise estrutural de lineamentos em imagens de sensoriamento remoto: aplicação ao estado do Rio de Janeiro**. 1984, 157f. Doutorado (Geologia Geral e de Aplicação). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1984.

CHRISTOFOLETTI, A. Considerações sobre o nível de base, rupturas de declive, capturas fluviais e morfogênese do perfil longitudinal. **Geografia**, v. 2, n. 4, p. 81-102, 1977.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia Fluvial**. ed.1 São Paulo: Editora Edgar Blücher, 1981

CLARK, M. K. et.al. Surface uplift, tectonics, and erosion of eastern Tibet from large-scale drainage patterns. **Tectonics**, v.23, p. 1-20, 2004.

CODEMIG. **Mapa Geológico da Folha Leopoldina, SF-23-X-D-V - escala 1:100.000**. 2002.

CODEMIG. **Mapa Geológico da folha Juiz de Fora, SF-23-X-D-IV - escala 1:100.000**. 2003.

COELHO NETTO, A L. Evolução de cabeceiras de drenagem no Médio Vale do Rio Paraíba do Sul (SP/RJ): a formação e o crescimento da rede de canais sob controle estrutural. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 4, n.2, p. 69-100, 2003.

CORDEIRO, C. M. **Evolução da rede de drenagem na Bacia do Alto Rio Paraguaçu: capturas fluviais, drenagem transversa e pirataria de bacias**. 183 f. Tese (Doutorado em Geografia), Departamento de Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

COX, T. R. Analysis of drainage-basin symmetry as a rapid technique to identify areas of possible Quaternary tilt-block tectonics an example from the Mississippi Embayment. **Geological Society of America Bulletin**, v. 106, n. 5, p. 571–581, 1994.

CPRM. **Mapa geológico da Folha Nova Friburgo SF.23-Z-B-II, escala 1:100.000**. 2009a.

CPRM. **Mapa Geológico da Folha Três Rios (RJ). SF-23-Z-B-I. Escala 1:100.000**. 2009b.

CROSBY, B.T.; WHIPPLE, K.X. Knickpoint initiation and distribution within fluvial networks: 236 waterfalls in the Waipao River, North Island, New Zealand. **Geomorphology**, v.82, n. 1-2, p. 16-38, 2006.

DAYAN H.; KELLER, J. V. A. A zona de cisalhamento do rio Paraíba do Sul nas vizinhanças de Três Rios (RJ): uma análise da deformação dada por algumas feições estruturais. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 19, n. 4, p. 494-506, 1990.

DOUGLASS J., M. N.; DORN, R. I.; SCHMEECKLE, M. W. **Geological Society of America Bulletin**, v.121, n. 3-4, p. 586 598, 2009.

- DURY, G.H. Misfit Streams: Problems in Interpretation, Discharge and Distribution. **Geographical Review**, v.50, n.2, p. 219-242, 1960.
- FREITAS, M. M. Evolução da Paisagem Geomorfológica. In: RUA, J. (org.). **Paisagem, Espaço e Sustentabilidades: uma perspectiva multidimensional da geografia**. Rio de Janeiro, RJ: Editora PUC Rio, 2007. p. 91–128.
- FREITAS, M.M. et al. Dinâmica Geomorfológica da dissecação dos planaltos no entorno da hidrelétrica de Itaocara, RJ. **GEOgraphia**, v. 18, n.4, p. 178 – 204, 2016.
- GOUDIE A.; GARDNER R. Cotswold misfits and the leaking Leach. In: GOUDIE A., GARDNER R. (org.). **Discovering Landscape in England & Wales**. Springer, Dordrecht, 1992.
- HACK, J. T. Stream-Profile Analysis and Stream-Gradient Index. **Journal of Research of the U.S. Geological Survey**, v. 1, n. 4, p. 421–429, 1973.
- HEILBRON, M. et al. A Orogênese Brasileira no Segmento Central da Faixa Ribeira, Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 25, n. 4, p. 249–266, 1995.
- HEILBRON, M. et al. From collision to extension: The roots of the southeastern continental margin of Brazil. In: MOHRIAK, W.; TAIWANI, M. (Eds.). **Geophysical Monograph Series**. Washington, D. C.: American Geophysical Union, v. 115, p. 1–32, 2000.
- HEILBRON, M. et al. Província Mantiqueira. In: **Geologia do Continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. São Paulo, SP: Beca, [s.d.]. p. 203–234, 2004.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapeamento Geomorfológico do Brasil em escala 1:250.000**. 2006.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual Técnico de Geomorfologia**. 2ª ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2009.
- INEA – Instituto Estadual do Meio Ambiente/RJ. **Domínios de Dissecação: Plano de Manejo - APA Macaé de Cima**. Rio de Janeiro: INEA, 2014.
- JATOBÁ, L.; LINS, R. C. **Introdução à Geomorfologia**. 5ª ed. Recife: editora Bagaço, 2008.
- LEOPOLD, L.; WOLMAN, M. G.; MILLER, J. P. **Fluvial Processes in Geomorphology**. New York: Dover Publications, INC, 1964.
- MARENT, B.R. **Geomorfogênese dos degraus escalonados do Sudeste de Minas Gerais**. 2016, 189 f. Tese (Doutorado em Geografia). Programa de Pós-Graduação em Geografia, Inst. Geociências, UFMG, Belo Horizonte, 2016.
- MARQUES NETO, R.; MOREIRA, J. A.; DA SILVA, F. P. Evolução de Escarpamentos em Margens Rifte: uma Discussão sobre Soerguimento e Desnudação na Mantiqueira Meridional

a partir de Mapas Paleotopográficos e Parâmetros Geomorfométricos. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 20, n. 4, 2019.

MEIS, M. R.; MIRANDA, L. H. G.; FERNANDES, N. F. Desnívelamento de altitude como parâmetro para a compartimentação do relevo: bacia do médio-baixo Paraíba do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 32, 1982, Salvador. **Anais...** Salvador: SBG. 1982, v. 4, p. 1489-1509.

MILLER, A. M. Wind Gaps. **Science**, v. 42, n. 1086, 571-573, 1915.

MOTOKI, A. et al. Origem dos relevos do maciço sienítico do Mendanha, RJ, com base nas análises geomorfológicas e sua relação com a hipótese do vulcão de Nova Iguaçu. **Revista Geociências UNESP**, v. 27, n. 1, p. 18, 2008.

MOTTA, M.; EIRADO, L. G.; TUPINAMBÁ, M.; ALMEIDA, J. Landform mosaic resulting from Cretaceous and Cenozoic tectonic evolution of southeastern Brazil. In: REGIONAL CONFERENCE ON GEOMORPHOLOGY, 1999, Rio de Janeiro. **Resumo...** Rio de Janeiro: RCG, 1999, p. 38-38.

MOURA, J.R.; MELLO, C.L. Classificação Aloestratigráfica do Quaternário Superior na Região de Bananal (SP/RJ). **Revista Brasileira de Geociências**, v. 21, n. 3, p. 236-254, 1991.

OLIVEIRA, D. Capturas fluviais como evidências da evolução do relevo: uma revisão bibliográfica. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 20, p. 37-50, 2010.

PAIXÃO, R. **Morfogênese do Sistema Fluvial do Rift Continental Sudeste do Brasil: Endorreísmo e Captura Fluvial**. 2020, 207 f. Tese (Doutorado em Geografia), Programa de Pós-Graduação em Geografia, Departamento de Geografia e Meio Ambiente, PUC – Rio, Rio de Janeiro, 2020.

PEDERSON, D. T. Stream Piracy Revisited: A Groundwater-Sapping Solution. **GSA Today**, v. 11, n. 9, p. 4-10, 2001.

PELECH, A. S. Paleorrelevo Pleistocênico e estimativas de dissecação vertical e volumétrica para o Holoceno em uma pequena bacia hidrográfica - médio vale do rio Paraíba do Sul (RJ). **Quaternary and Environmental Geosciences**, v. 7, n. 1-2, p. 6-13, 2016.

PÉREZ-PEÑA, J. V. et al. SwathProfiler and NProfiler: two new ArcGIS Add-ins for the automatic extraction of swath and normalized river profiles. **Computers & Geosciences**, v. 104, p. 135–150, 2017.

PINTO, R. W. P. **Evolução da Paisagem Geomorfológica do Rio Grande: Dinâmicas De Dissecação e Capturas de Drenagem**. 2015, 155f. Dissertação (Mestrado em Geografia). Programa de Pós-Graduação em Geografia, Departamento de Geografia e Meio ambiente. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

PINTO, R. W. P. et al. Evolução Geomorfológica do Rio Grande, RJ: Influências Geológicas e Capturas de Drenagem. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 19, n. 2, 2018.

PMFIAS. Drainage Patterns: Concordant, Discordant, Dendritic, Trellis. PMFIAS, 2019. Disponível em: <https://www.pmfias.com/drainage-patterns-concordant-discardant-dendritic-trellis/>. Acesso em: 21 jun. 2021.

POWELL, J. W. **Exploration of the Colorado River and its canyons**. New York: Dover Publications, 400 p. 1875.

PRINCE, P. S.; SPOTILA, J. A.; HENIKA, W. S. New physical evidence of the role of stream capture in active retreat of the Blue Ridge escarpment, southern Appalachians. **Geomorphology**, n. 123, n. 3-4, p. 305-319, 2010.

QUEIROZ, G.L.; SALAMUNI, E.; NASCIMENTO, E.R. *Knickpoint Finder*: A software tool that improves neotectonic analysis. **Computers & Geosciences**, v. 76, p. 80-87, 2014.

REZENDE, E. A.; CASTRO, P. T. A. Análise do perfil longitudinal do alto/médio Rio Grande - MG: gênese de rupturas de declive e distribuição de registros sedimentares. In: PEREZ FILHO, A.; AMORIM, R. R (orgs.). **Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento**. Campinas, SP: Instituto de Geociências - UNICAMP, 2017. p. 6064–6075.

REZENDE, E. A. et al. Fatores controladores da evolução do relevo no flanco NNW do Rifte Continental do Sudeste do Brasil: uma análise baseada na mensuração dos processos denudacionais de Longo-Termo. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 14, n. 2, 2013.

REZENDE, E. A.; CASTRO, P. T. A. Variação espacial e condicionantes do entalhamento fluvial na bacia do Rio Grande, sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 17, n. 4, 2016.

RICCOMINI C. **O Rift Continental do Sudeste do Brasil**. 1989. 256 f. Tese (Doutorado), Instituto de Geociências, USP, São Paulo, 1989.

RICCOMINI, C.; SANT'ANNA, L. G.; FERRARI, A. L. Evolução geológica do Rift Continental do Sudeste do Brasil. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C. D. R; BRITO NEVES, B. B. (Org.). **Geologia do Continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. São Paulo: Beca, p. 383-405. 2004.

SALAMUNI, E.; EBERT, H. D.; HASUI, Y. Morfotectônica da bacia sedimentar de Curitiba. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 34, n. 4, p. 469–478, 2004.

SALAMUNI, E. et al. *Knickpoint Finder*: ferramenta para a busca de geossítios de relevante interesse para o geoturismo. **Boletim Paranaense de Geociências**, v. 70, p. 200-208, 2013.

SALGADO, A. A. R. et al. Relief evolution of the Continental Rift of Southeast Brazil revealed by in situ-produced ^{10}Be concentrations in river-borne sediments. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 67, p. 89–99, 2016.

SAMPAIO, T. V. M. **Parâmetros morfométricos para melhoria da acurácia do mapeamento da rede de drenagem – uma proposta baseada na análise da Bacia**

Hidrográfica do Rio Benevente - ES. 2008. 147 f. Tese (Doutorado em Geografia), Departamento de Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

SAMPAIO, T. V. M.; AUGUSTIN, C. H. R. R. Índice de Concentração da Rugosidade: uma nova proposta metodológica para o mapeamento e quantificação da dissecação do relevo como subsídio a cartografia geomorfológica. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 15, n. 1, 2014.

SANTOS, A. H. B. **Rearranjos de drenagem na bacia do rio Capivari e morfogênese da Serra do Mar em São Paulo (SP): uma contribuição ao estudo de capturas fluviais em meio tropical úmido.** 376 f. Tese (Doutorado em Ciências), Departamento de Geografia, Faculdade de Filosofia, Letras, e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

SANTOS, D.A.R.; MORAIS, F. Assimetria de bacias hidrográficas e influências litoestruturais na geomorfologia do rio Formoso, TO. **Caminhos da Geografia**, v. 18, n. 61, 2017.

SARTI, T. P. **Condicionantes litológicos e estruturais na evolução da rede de drenagem, Sapucaia-RJ, médio vale do Rio Paraíba do Sul.** 2008, 95f. Dissertação (Mestrado em Geologia), Faculdade de Geologia, Universidade Estadual do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

SARTI, T. P.; FREITAS, M. M. Processos erosivos no médio vale do rio Paraíba do Sul RJ/MG: o efeito do rebaixamento do nível de base. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 11. 2005, São Paulo. **Anais...** São Paulo: SBGFA, 2005, [s.p].

SILVA, C.M.T. **O sistema transcorrente da porção sudeste do orógeno Araucaí e norte da faixa Ribeira: Geometria e significado tectônico.** 2010, 221f. Tese (Doutorado em Geologia), Departamento de Geologia, Programa de Pós-Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

SILVA, S. E. L. et al. Distribuição espacial dos depósitos sedimentares aluvionares e suas relações com o processo de evolução da rede de drenagem no médio vale do Paraíba do Sul – RJ/MG. In: PEREZ FILHO, A.; AMORIM, R. R (org.). **Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento.** Campinas: Instituto de Geociências - UNICAMP, 2017. p. 6465–6469.

SILVA, T. M. Geomorfologia do estado do Rio de Janeiro: distribuição espacial das feições morfológicas e contexto evolutivo. In BICALHO, A. M. S.; GOMES, P. C. C. (orgs.). **Questões metodológicas e novas temáticas na pesquisa geográfica.** Rio de Janeiro: Publit, 2009, p. 243-264.

SILVA, T. M.; MORENO, R. S.; CORREIA, J. D. A utilização de cartas topográficas 1:50.000 para classificação morfológica região do médio vale do rio Paraíba do Sul (RJ/SP). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 23. 2007, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SBC, 2007, v. 1, p. 429-437.

SILVA, T.M.; MONTEIRO, H.S.; CRUZ, M.A.; MOURA, J.R.S. Anomalias de drenagem e evolução da paisagem no médio vale do rio Paraíba do Sul (RJ/SP). **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 29, p. 210-224, 2006.

SMALL, R. J. **The Study of Landforms: a Textbook of Geomorphology**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1978.

SORDI, M. V.; VARGAS, K. B.; FORTES, E. Mecanismos controladores do rearranjo fluvial: o caso da captura do ribeirão Laçador pelo ribeirão Laçadorzinho, Faxinal, (PR). **Revista Continentes (UFRRJ)**, v. 7, n. 12, p. 143-176, 2018.

SOUZA, R. A. **Um olhar dinâmico sobre a paisagem geomorfológica: A influência dos knickpoints na evolução do relevo da bacia do rio Minerva**. 2019, 54f. Trabalho (Conclusão de Curso em Geografia), Departamento de Geografia e Meio ambiente, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

SOUZA, R. A. et al. A ocorrência dos *knickpoints* e sua relação com a lito-estrutura do substrato geológico na evolução da rede de drenagem no médio vale do Paraíba do Sul. In: PEREZ FILHO, A.; AMORIM, R. R (org.). **Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento**. Campinas: Instituto de Geociências - UNICAMP, 2017. p. 6470–6475.

SOUZA, R. A. et al. Relação entre *knickpoints* e depósitos sedimentares aluvionares na dinâmica erosiva e evolutiva do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul: uma proposta de compartimentação do relevo a partir de domínios de dissecação na bacia do rio minerva. In: SINAGEO, 12, 2018, Crato. **Anais eletrônicos...** Crato: SINAGEO 12, 2018. [s.p] disponível em: <<https://www.sinageo.org.br/2018/trabalhos/1/1-510-2215.html>>. Acesso em: 1 jun. 2021

STOKES, M.; CUNHA, P. P.; MARTINS, A. A. Techniques for analysing Late Cenozoic river terrace sequences. **Geomorphology**, v. 165-166, p. 1-6, 2012.

STRAHLER, A. N. Dynamic basis of geomorphology. **Geological Society of American Bulletin**, v. 63, p. 923-938, 1952.

SUMMERFIELD, M. A. **Global Geomorphology**. Nova York: John Wiley & Sons, 1991.

TWIDALE, C. R. River patterns and their meaning. **Earth Science Reviews**, n.67, p. 159-218, 2004.

VALERIANO, M. M.; ROSSETTI, D. F. Topodata: Brazilian full coverage refinement of SRTM data. **Applied Geography**, v. 32, p. 300–309, 2012.

VALLADARES, C. et al. Geologia e recursos minerais da folha Três Rios SF.23-Z-B-I, estado do Rio de Janeiro escala 1:100.000. Belo Horizonte: CPRM, 2012.

ZALÁN, P. V.; OLIVEIRA, J.A.B. Origem e evolução estrutural do Sistema de Riftes Cenozoicos do Sudeste do Brasil. **Boletim de Geociências - Petrobrás**, v. 13, n. 2, p. 269–300, 2005.

ZAPROWSKI, B. J.; EVENSON, E. B.; EPSTEIN, J. B. Stream Piracy in the Black Hills: A geomorphology lab exercise. **Journal of Geoscience Education**, v. 50, n. 4, p. 380-388, 2002.