



www.ugb.org.br  
ISSN 2236-5664

## Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 20, nº 1 (2019)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v20i1.1498>



# MORFOGÊNESE DO DIVISOR HIDROGRÁFICO PARANÁ/PARAÍBA DO SUL: O CASO DA SUB-BACIA DO PARAÍBUNA

## MORPHOGENESIS OF THE PARANÁ/PARAÍBA DO SUL HYDROGRAPHIC DIVIDER: THE CASE OF THE PARAÍBUNA SUB-BASIN

**Rodrigo Wagner Paixão**

*Departamento de Geografia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro  
Rua Marquês de São Vicente, 225, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. CEP: 22451-900. Brasil  
E-mail: rodrigowpp1@gmail.com*

**André Augusto Rodrigues Salgado**

*Departamento de Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais  
Av. Antônio Carlos, 6627, Belo Horizonte, Minas Gerais. CEP 31270-901. Brasil  
E-mail: geosalgado@yahoo.com.br*

**Marcelo Motta de Freitas**

*Departamento de Geografia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro  
Rua Marquês de São Vicente, 225, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. CEP: 22451-900. Brasil  
E-mail: marcelomotta@puc-rio.br*

### Informações sobre o Artigo

Recebido (Received):  
16/08/2018  
Aceito (Accepted):  
08/11/2018

### Palavras-chave:

Morfogênese; Capturas fluviais;  
rio Paraíba.

### Keywords:

Morphogenesis; river capture;  
Paraibuna river.

### Resumo:

O presente artigo tem como objetivo analisar a morfogênese do relevo da borda oeste do Rift Continental do Sudeste do Brasil (RCSB) no divisor hidrográfico Paraná / Paraíba do Sul, localizado na Serra da Mantiqueira. Para tanto, serão realizadas análises morfológicas e morfométricas do relevo em bacias hidrográficas que drenam tanto para o interior do continente sobre o planalto no reverso da Serra da Mantiqueira – Bacia Hidrográfica do Rio Grande - quanto para bacias que drenam a frente escarpada da serra em direção ao Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba. Utilizou-se como base para a realização do trabalho o levantamento de informações bibliográficas, análises em ambiente SIG, trabalhos de campo e elaboração de mapas. A análise dos perfis topográficos e longitudinais dos rios indicam a existência de morfologias de relevo planáltico para bacias que drenam a frente escarpada da Serra da Mantiqueira. A amplitude de relevo nas bacias que drenam o planalto interiorano é mais baixa que as bacias que drenam para o RCSB, variando entre 200m e 500m respectivamente. A densidade de *knickpoints* é maior nas bacias que drenam para o RCSB o que pode ser comprovado pela presença de rupturas no perfil longitudinal dos rios. Os lineamentos estruturais apresentaram orientação preferencial para N50W e N40W, este comportamento também pode ser observado entre as bacias interioranas e do graben do Paraíba do Sul quando analisadas separadamente. A orientação dos canais de drenagem de

1ª e 2ª ordem indicou forte controle estrutural nos rios, uma vez que as orientações preferencias identificadas foram para o quadrante NW, principalmente para os canais associados à sub-bacia do rio Paraíba que apresentou N50W como a direção mais representativa. Em termos morfométricos, as taxas máximas e mínimas de SPI apresentaram mudanças significativas nos valores entre as bacias, contudo, o valor médio das bacias se manteve semelhante. De maneira geral, as bacias que drenam para o RCSB apresentam os valores máximos mais elevados em relação às bacias do planalto interiorano. Este comportamento aponta para um maior potencial erosivo nas bacias que drenam frentes escarpadas do que nas bacias situadas nos planaltos superiores com morfologia mais suave. A análise da rede de drenagem demonstrou feições geomorfológicas típicas de anomalias, tais como cotovelos, e capturas fluviais principalmente, nas bacias afluentes da sub-bacia do rio Paraíba. Estas feições indicam processos de reorganização fluvial por meio de capturas de drenagem, que ao capturar rio adjacentes, promovem mudança na direção do segmento do rio, formando um cotovelo, bem como, a formação de um divisor rebaixado e um vale superdimensionado. O conjunto de análises aponta para o fato de que os afluentes da bacia hidrográfica do Rio Paraíba apresentam maior agressividade no processo de dissecação do relevo do que aqueles que drenam as terras altas da Serra da Mantiqueira em direção ao Rio Grande.

### Abstract:

The present article aims to analyze the morphogenesis of the western border of the Continental Rift of Southeastern Brazil (RCSB) in the Paraná / Paraíba do Sul hydrographic divisor, located in the Serra da Mantiqueira. For that, morphological and morphometric analyzes of the relief will be carried out in watersheds that drain both into the interior of the continent on the plateau on the back of the Serra da Mantiqueira - Rio Grande Basin - as well as for basins that drain the steep front of the mountain towards to the Paraíba River Basin. The collection of bibliographic information, GIS analysis, field work and mapping were used as the basis for the work. The analysis of the topographic and longitudinal profiles of the rivers indicates the existence of planar relief morphologies for basins that drain the steep front of the Mantiqueira Range. Moreover, the relief amplitude in the basins draining the interior plateau is lower than the drainage basins for the RCSB, varying between 200m and 500m respectively. The density of knickpoints is greater in the basins that drain into the RCSB, which can be evidenced by the presence of abrupt breaks in the longitudinal profile of the rivers. The structural lineaments presented preferential orientation for N50W and N40W, this behavior can also be observed between the interior and graben basins of Paraíba do Sul when analyzed separately. The orientation of the 1st and 2nd order drainage channels indicated a strong structural control in the rivers, since the orientation preferences identified were for the NW quadrant, mainly for the channels associated to the sub-basin of the Paraíba river that presented N50W as the most representative direction. In morphometric terms, the maximum and minimum SPI rates presented significant changes in the values between the basins, however, the average value of the basins remained similar. In general, the drainage basins for the RCSB show the highest maximum values in relation to the basins of the interior plateau. This behavior indicates a greater erosive potential in the basins that drain steep fronts than in the basins located in the upper plateaus with a softer morphology. The analysis of the drainage network showed typical geomorphological features of anomalies, such as elbows, and fluvial catches, mainly in the affluent basins of the Paraíba sub-basin. These features indicate processes of river reorganization by means of drainage catches, which when capturing adjacent rivers, promote a change in the direction of the river segment, forming an elbow, as well as the formation of a recessed divider and an oversized valley. The set of analyzes points to the fact that the tributaries of the Paraíba River basin present greater aggression in the relief dissection process than those that drain the highlands of the Serra da Mantiqueira towards Rio Grande.

### Introdução

No sul e sudeste do Brasil, os principais divisores hidrográficos são geralmente constituídos por um relevo em forma de degrau onde as terras altas drenam em direção a uma bacia hidrográfica e a escarpa e o

plano inferior drenam em direção a outra (CHEREM *et al.*, 2012, 2013; SALGADO *et al.*, 2012, 2016). Estes divisores em forma de degrau no relevo constituem áreas onde ocorrem feições de reorganização da rede de drenagem, bem como, processos de capturas fluviais (SUMMERFIELD, 1991; BISHOP, 1995; SALGADO

*et al.*, 2012; CHEREM *et al.*, 2013; REZENDE *et al.*, 2013; SORDI *et al.*, 2015). Estes processos ocorrem graças à erosão diferencial e recuo de cabeceiras controlados por níveis de base, onde as bacias que apresentam cota altimétrica mais baixas de nível de base, possuem potencial erosivo maior (CHRISTOFOLETTI, 1977; BISHOP, 1955; OLIVEIRA, 2010; SILVA & MOURA, 2010; MARENT *et al.*, 2013). Neste sentido, no sul e sudeste do Brasil, as bacias hidrográficas que drenam as frentes escarpadas voltadas para o piso inferior de relevos em degrau tendem a apresentar taxas de denudação maior que bacias planálticas interioranas que ocupam o piso superior (CHEREM *et al.*, 2012; SALGADO *et al.*, 2014, 2016; REZENDE *et al.*; 2013; SORDI *et al.*, 2018).

No Brasil, o relevo da região sudeste é resultado de esforços tectônicos compressivos durante o Neoproterozoico e distensivos durante o Paleógeno sobre o qual atuaram os fatores exógenos que moldaram a superfície e que tiveram sua ação condicionados por estruturas geológicas herdadas destes eventos e pela resistência litológica (HEILBRON *et al.*, 2000; FERRARI, 2001; RICOMINNI *et al.*, 2004; RICOMINNI *et al.*, 2010). Os esforços distensivos da passagem do Mesozoico para o Cenozoico promoveram a formação do Rift Continental do Sudeste do Brasil (RCSB) ou do Sistemas de Riftes Cenozoicos do Sudeste do Brasil (ASMUS & FERRARI, 1978; RICOMINNI *et al.* 2010; ZALÁN *et al.*, 2005). A formação do RCSB implicou na formação de escarpas morfológicas no sudeste brasileiro e, conseqüentemente, alterou a organização e a dinâmica hidrológica e erosiva dos sistemas de drenagem pelo rebaixamento do nível de base regional (SILVA *et al.*, 2001). Diante disso, acredita-se que o rio Paraíba do Sul, ao drenar o piso do graben, promoveu capturas de drenagens ao longo do planalto sudeste brasileiro por meio de recuo de cabeceira, proporcionado, principalmente, pelo fato de possuir nível de base mais baixo que as bacias hidrográficas circunvizinhas e, graças a isso, maior potencial erosivo (AB'SABER, 1957; OLIVEIRA, 2010; CHEREM *et al.*, 2013; REZENDE *et al.*, 2015; SALGADO *et al.*, 2016).

Neste sentido, o presente estudo tem por objetivo analisar a morfogênese do relevo da borda oeste do Rift Continental do Sudeste do Brasil (RCSB) no divisor hidrográfico localizado na Serra da Mantiqueira que

separa as bacias hidrográficas do Paraná (Rio Grande) com a do Paraíba do Sul (Sub-bacia do Paraíba). Para tanto, serão realizadas análises morfológicas e morfométricas do relevo em bacias hidrográficas que drenam tanto para o interior do continente sobre o planalto no reverso da Serra da Mantiqueira – Bacia Hidrográfica do Rio Grande - quanto para bacias que drenam a frente escarpada da serra em direção ao RCSB - Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba. Essas análises objetivam levantar evidências de reorganização dos sistemas de drenagem, bem como, evidenciar parâmetros morfométricos que contribuem no entendimento da morfogênese do relevo em divisores hidrográficos regionais.

### Área de Estudo

A área analisada situa-se na borda oeste do RCSB, no estado de Minas Gerais, e abrange os municípios de Ibertioga, Antônio Carlos, Bias Fortes, Santa Rita de Ibitipoca, Lima Duarte, Olaria e Santana do Garambéu. A Serra da Mantiqueira constitui um imponente escarpamento regional e marca o limite oeste do Rift Continental do Sudeste do Brasil e do gráben do rio Paraíba do Sul. Constitui, também, o divisor topográfico entre as bacias hidrográficas que drenam para o rio Paraíba no gráben continental e as bacias afluentes do rio Grande no planalto mineiro (Figura 1). Na área de estudo, a frente escarpada da Serra da Mantiqueira apresenta lineamento preferencial NE-SW, com algumas variações.

Em termos geológicos, a área de estudo está inserida na Província Mantiqueira que representa uma entidade geotectônica originada durante a Orogênese Brasileira/Pan-Africana no Neoproterozoico, cuja estabilização desempenhou importante papel na aglutinação deste setor do Gondwana (HEILBRON *et al.* 2004). Esta evolução orogênica, considerada por Heilbron *et al.* (2004) como a mais nova no cenário das colagens brasileiras/pan-africanas do segmento crustal considerado, foi responsável pela deformação, metamorfismo, magmatismo e articulação dos diversos terrenos. A área de estudo situa-se a sul do Cráton de São Francisco e no Terreno Ocidental da Faixa Móvel Ribeira e as unidades geológicas representam ortognaisses Paleoproterozoicos do Complexo Mantiqueira, metassedimentos Neoproterozoicos da Megassequência Andrelândia, como os quartzitos, e granitos isotrópicos (COMIG, 2014) (Figura 2).



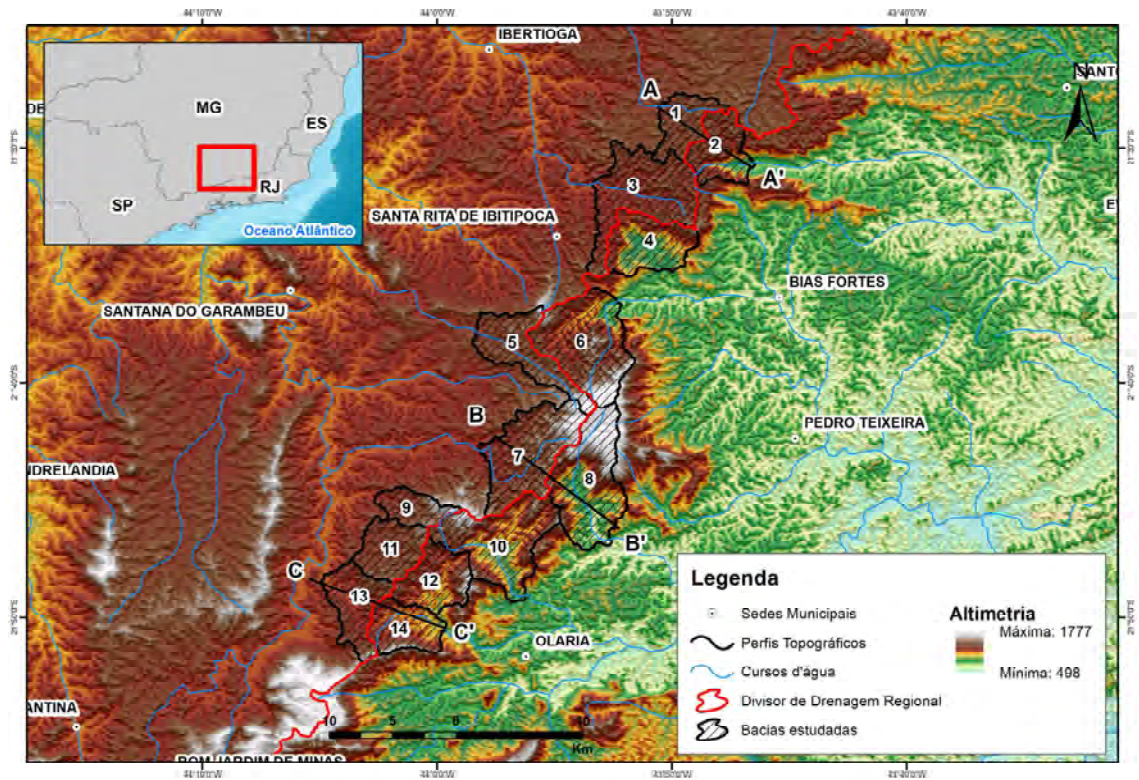


Figura 1 - Localização da área de estudo na borda oeste do RCSB, no estado de Minas Gerais, e as bacias estudadas. 1. Córrego do Teixeira; 2. Córrego Ponte Funda; 3. Rio das Elvas; 4. Ribeirão dos Almeidas; 5. Ribeirão Bandeira; 6. Rio Vermelho; 7. Ribeirão Conceição; 8. Córrego do Salto; 9. Ribeirão Retiro do Meio; 10. Ribeirão Cata Maior; 11. Ribeirão do Váú; 12. Córrego Fundo; 13. Córrego Ponte Funda; 14. Ribeirão Palmital. As bacias ímpares drenam para o interior do continente, enquanto as bacias pares drenam para o RCSB.

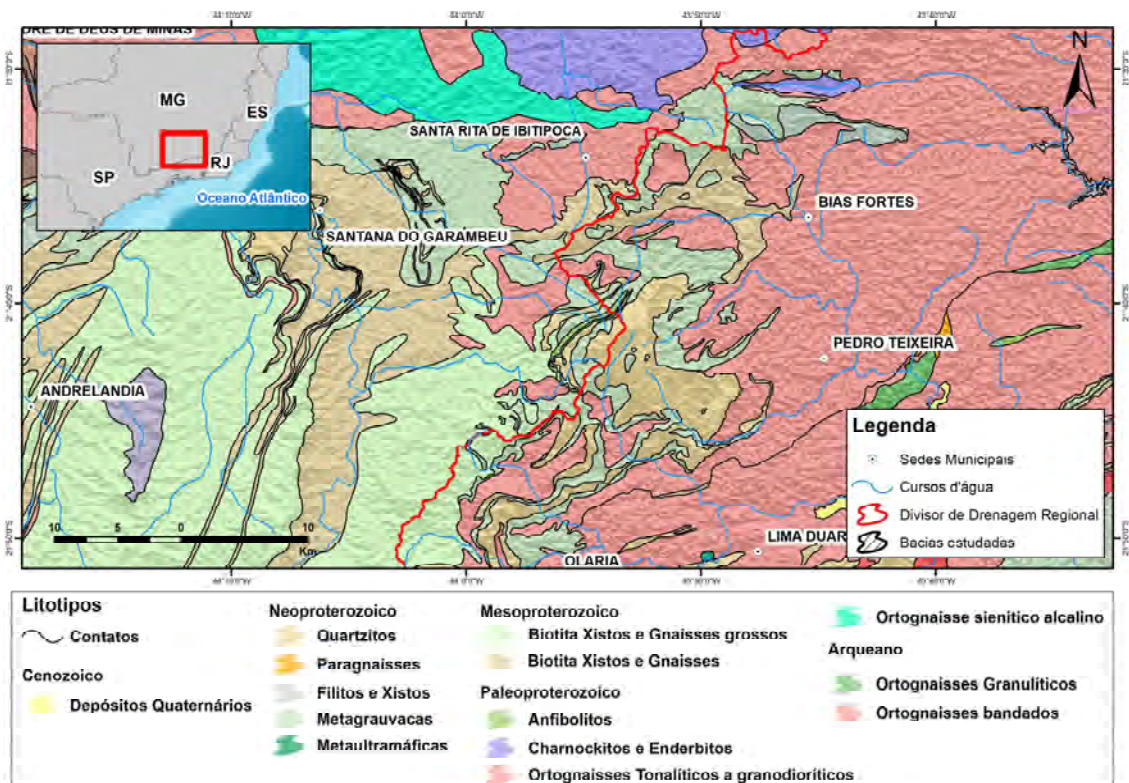


Figura 2 - Contexto Geológico da área de estudo. Fonte: COMIG, 2014.



Devido à sua geologia complexa, o relevo apresenta feições geomorfológicas distintas, influenciadas pelas estruturas geológicas e pela erosão diferencial dos litotipos da região. O relevo compreende o alinhamento escarpado e montanhoso da Serra da Mantiqueira, circundado por modelado de relevo mais suave, representados por morros ondulados e forte ondulados (BENTO & RODRIGUES, 2013). Pode-se perceber

que os conjuntos compostos pelos resistentes quartzitos correspondem aos picos mais elevados, podendo atingir 1.784 metros de altitude, como o Pico da Lombada, fato que evidencia o controle geológico na morfogênese do relevo (figuras 1 e 2). O alinhamento escarpado é bastante marcante na área de estudo e delimita a transição de relevo do planalto elevado no reverso da Mantiqueira para as colinas e morros da frente escarpada (Figura 3).

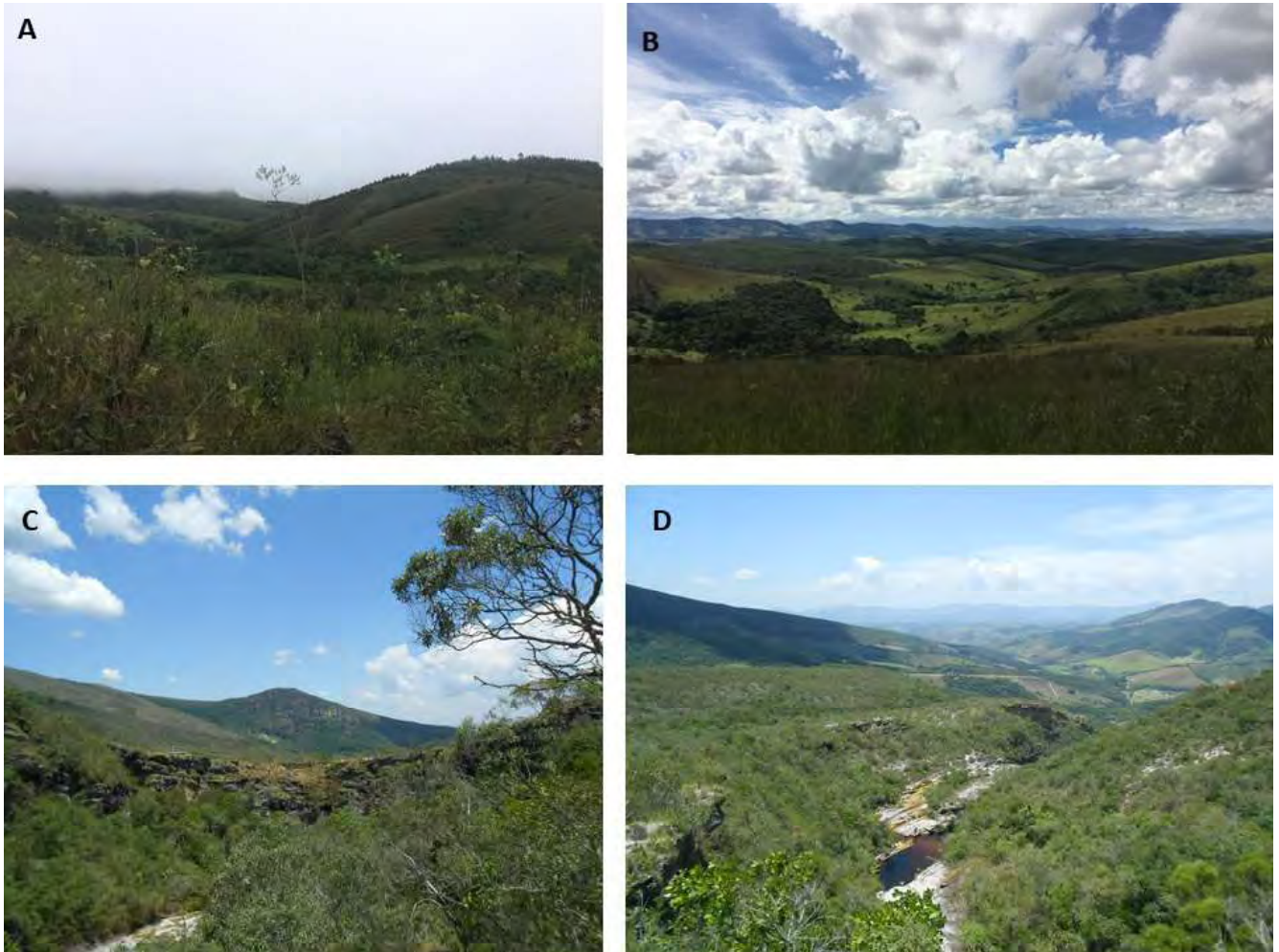


Figura 3 - Aspectos do relevo no planalto interiorano no reverso (A e B) e na frente escarpada da Serra da Mantiqueira (C e D).

Em relação aos solos da região, os mais comuns são os Neossolos Litólicos, Cambissolos Háplicos e Húmicos, Latossolos Vermelho-Amarelos, bem como, ocorrências pontuais de Organossolos (OLIVEIRA, 2016). A área de estudo situa-se no domínio da Mata Atlântica composta por diferentes tipos vegetacionais e apresenta fisionomias florestais, arbustivas, campestres e antrópicas. São identificadas formações florestais de Floresta Ombrófila Densa Aluvial, Floresta Ombrófila Densa Montana e Floresta Ombrófila Densa Alto-Mon-

tana e fragmentos de Floresta Estacional Semidecidual (VALENTE *et al.*, 2011). Entretanto, boa parte da vegetação natural já foi substituída por pastagens e demais usos agrícolas.

### **Procedimentos Metodológicos**

Utilizou-se como base para a realização do trabalho o levantamento de informações bibliográficas, análises em ambiente SIG, trabalhos de campo e elaboração

de mapas. Os procedimentos para extração dos dados morfométricos foram realizados utilizando o software *ArcGIS* 10.1, assim como os mapas apresentados no presente artigo.

Os procedimentos para os mapeamentos foram elaborados a partir da base cartográfica do IBGE na escala de 1:50.000 para a região. Neste sentido, foram utilizadas as cartas topográficas inseridas na área de estudo, totalizando quatro, sendo elas: Ibertioga, Bias Fortes, Lima Duarte e Bom Jardim de Minas. As cartas topográficas foram utilizadas na delimitação das bacias estudadas e possibilitaram a identificação de feições morfológicas relacionadas a processos de reorganização de sistemas de drenagem e evolução do relevo, tais como: divisores rebaixados, cotovelos de drenagem e vales superdimensionados.

Além da base cartográfica do IBGE, foi utilizada imagem de radar SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) do projeto TOPODATA (VALERIANO & ROSSETI, 2012). A partir da imagem SRTM foram extraídas informações altimétricas e derivados dados morfométricos, como: anomalias de drenagem, lineamentos estruturais, índice de rugosidade e *Stream Power Index (SPI)*.

Com base nos dados SRTM, foram elaborados três perfis topográficos transversais através dos dados do SRTM (Figura 1), assim como, sete perfis longitudinais do talvegue dos rios principais das bacias estudadas. Além disso, foram traçados os lineamentos estruturais utilizando-se o software *ArcGis* 10.1 e gerada roseta de orientação dos mesmos no software *OpenStereo* 0.1.2 para avaliar o controle estrutural regional. Foram extraídas as orientações dos canais de 1ª e 2ª ordem da área de estudo para correlação com os resultados obtidos dos lineamentos estruturais. A análise destes dados possibilita identificar possíveis controles estruturais nos sistemas de drenagem na área de estudo.

Para a identificação das anomalias de drenagem utilizou-se a ferramenta *Knickpoint Finder* (QUEIROZ et al., 2014; SALAMUNI et al., 2013) que se baseia no índice de Hack (HACK, 1973) ou índice RDE para a identificação de anomalias de drenagem ao longo do perfil longitudinal dos rios. Os dados obtidos são pontos de anomalias de 1ª e 2ª ordem, definidos como corredeiras e quedas d'água respectivamente. Por fim, foi elaborado mapa de densidade de *knickpoints* para melhor visualização dos dados.

O Stream Power Index (SPI) indica o potencial erosivo dos canais de determinada área através da interpolação dos dados de declividade e acumulação do fluxo de drenagem (CHEN & YU, 2011; ZHANG et al., 2015). O SPI foi elaborado por Danielson (2013) cujos valores são obtidos através da seguinte equação:

$$SPI = \ln ("Acumulação"+0.001)*("Declividade"/100)+0.001$$

onde:

SPI = Stream Power Index; "Acumulação": Raster de Fluxo acumulado da drenagem; "Declividade": Raster de declividade.

## Resultados e Discussões

### Perfis Topográficos e Longitudinais

Ao analisar os perfis topográficos (figuras 4 e 5) pode-se afirmar que, para as bacias interioranas, o relevo apresenta baixa amplitude, aproximadamente 200 metros, entre os topos e os fundos de vale. As médias altimétricas não apresentam variações significativas. Em contrapartida, os setores do perfil associadas às bacias que drenam para o RCSB possuem amplitude de relevo considerável, variando entre 1.250m e 750m.

Na porção NW os perfis possuem morfologias típicas de planalto com gradiente de relevo suave e os vales das bacias interioranas situam-se, aproximadamente, à 1.100m de altitude (Figura 4). Em direção para SE, os perfis apresentam relevo escarpado no degrau topográfico, próximo aos divisores de drenagem. A transição para a porção escarpada indica nível de base mais baixo e, por isso, o gradiente topográfico é maior podendo atingir 500m de diferença entre os topos e fundos de vale.

Os divisores topográficos de drenagem situam-se à montante da frente escarpada da Serra da Mantiqueira, incorporando áreas planálticas para as bacias que drenam ainda para o gráben do Paraíba do Sul (figuras 4 e 5). Esta configuração, onde a bacia que drena o piso inferior do degrau no relevo incorpora áreas do planalto – piso superior – foi observada em quase todos os estudos que investigaram os grandes divisores hidrográficos do sul e sudeste do Brasil e constituem bons indicativos de capturas fluviais e rearranjos da rede de drenagem (CHEREM et al., 2012; SALGADO et al., 2012, 2016; REZENDE et al., 2013; SORDI et al., 2015).

Paralelamente, a análise dos perfis longitudinais dos rios investigados (Figura 5) demonstra que para as drenagens situadas no planalto interiorano, o perfil se comporta de maneira uniforme, sem variações altimétricas significativas. Contudo, as bacias afluentes do rio Paraíbauna, em direção ao RCSB, possuem variações altimétricas significativas, indicando a ocorrência de anomalias de drenagem associadas à *knickpoints*.

Nota-se que as bacias do RCSB apresentam patamares elevados, em altitudes semelhantes às bacias interioranas, em contato direto com rupturas abruptas no perfil longitudinal. Esta característica marca a transição entre patamares elevados e as frentes escarpadas do relevo. O córrego do Salto e o rio Vermelho são as bacias que possuem as maiores rupturas no perfil longitudinal do rio, com aproximadamente 300m e 200m, respectivamente.

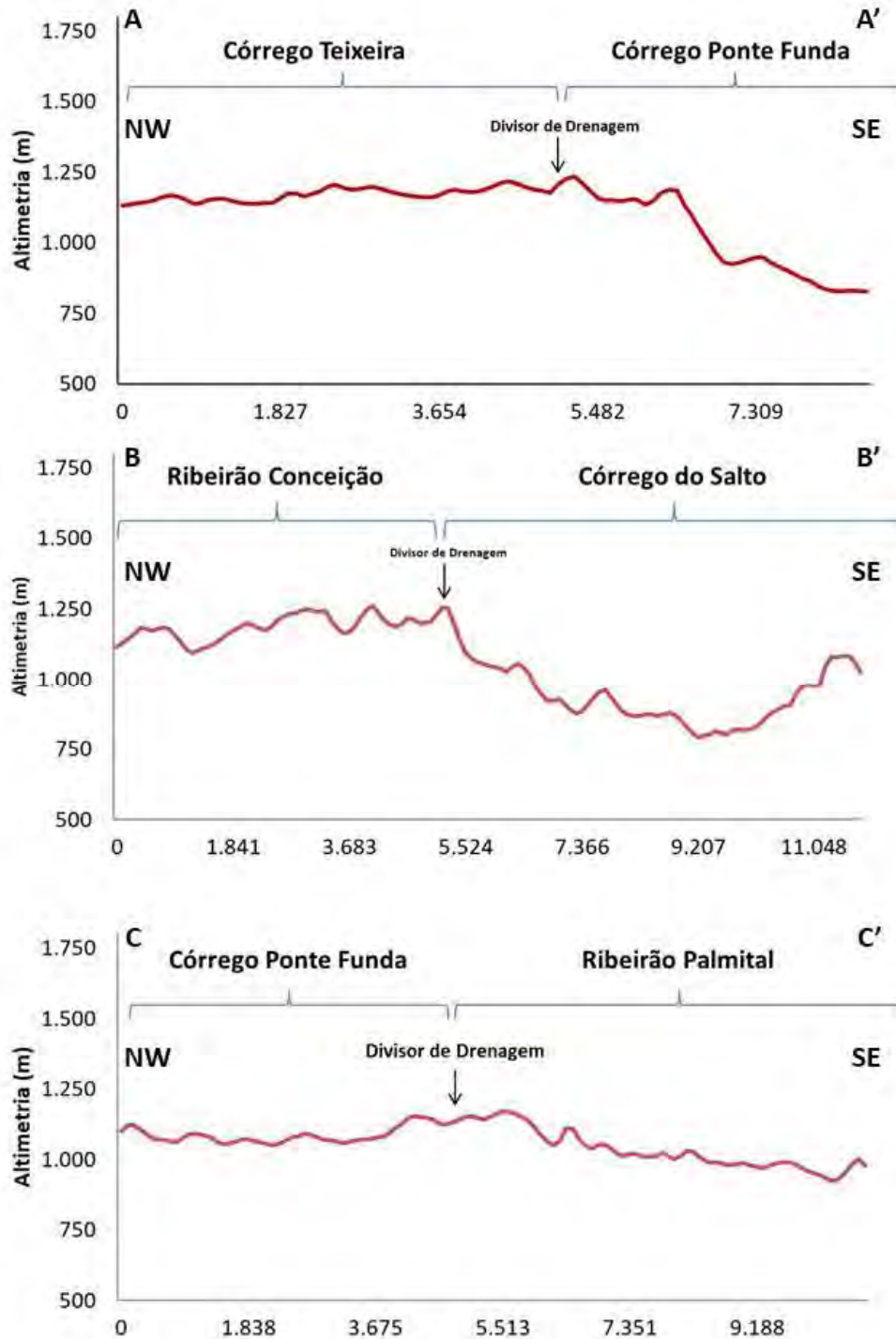


Figura 4 - Perfis topográficos elaborados na área de estudo.

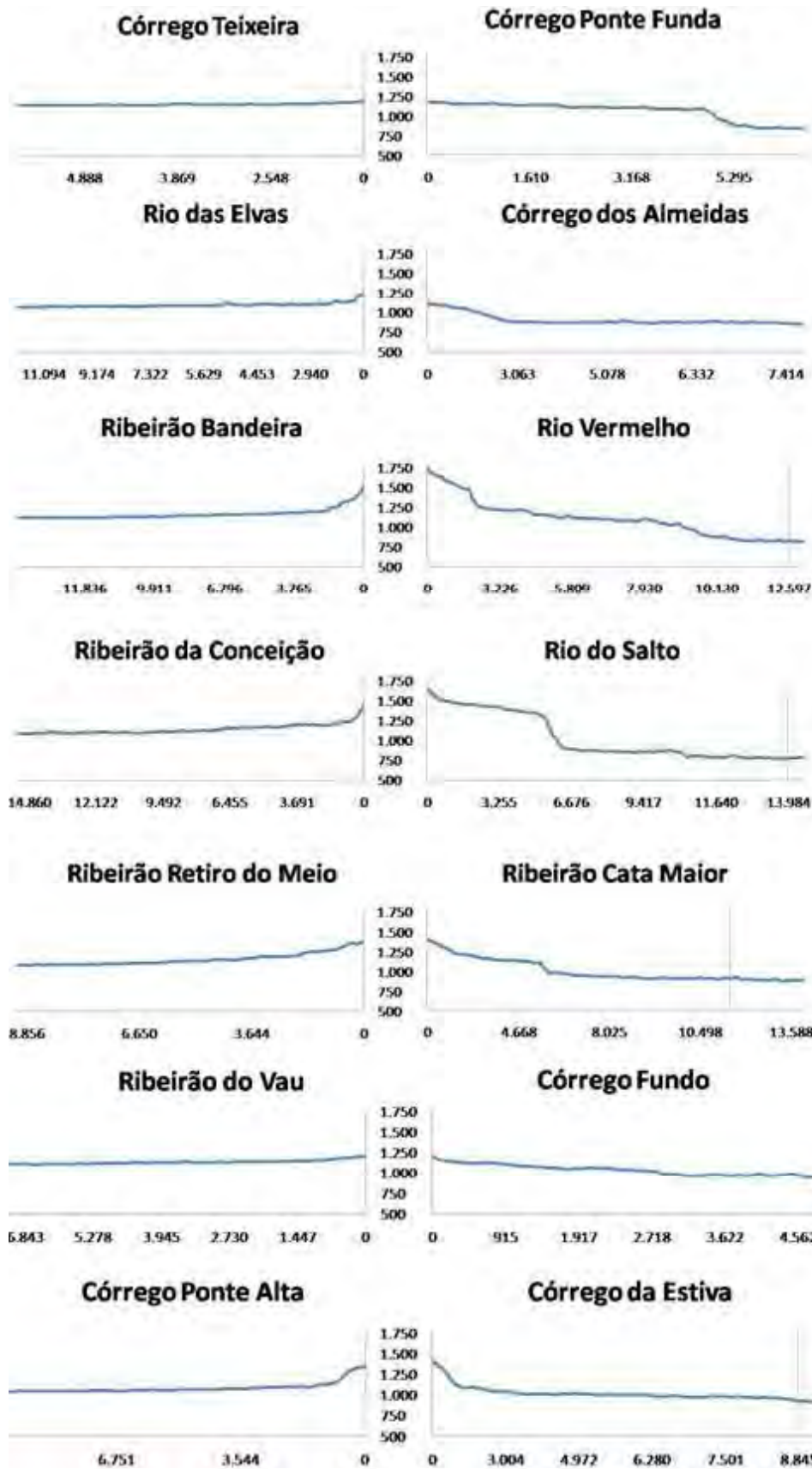


Figura 5 - Perfis longitudinais dos rios principais das bacias estudadas. Os perfis da parte esquerda estão associados às bacias que drenagem para o interior, enquanto os perfis da direita drenam para o RCSB.



Os perfis longitudinais das bacias que drenam para o RCSB possuem níveis de base suspensos, que marcam os degraus topográficos da paisagem e que, em sua maioria, são representados por cachoeiras de elevadas dimensões. A presença de degraus topográficos ou níveis de base indicam mudanças na dinâmica erosiva dos canais de drenagem e marcam a presença de trechos suspensos dos rios. Apesar disso, as bacias do córrego Fundo e o ribeirão Palmital não apresentam morfologias associadas à níveis de base ou *knickpoints* (Figura 5) e, neste trecho, estão no mesmo nível topográfico dos seus pares de bacia que drenam para o planalto interiorano. Esta característica indica que o rio ainda apresenta características de quando era ajustado ao antigo nível de base.

O comportamento dos perfis longitudinais reflete os resultados identificados nos perfis topográficos. As bacias do reverso da Serra da Mantiqueira, drenam sobre relevos planálticos e de baixa amplitude altimétrica, com isso, o perfil longitudinal dos rios apresenta, em sua maioria, feição côncava sem rupturas significativas. Já as bacias em direção ao gráben do Paraíba do Sul, drenam sobre setores planálticas de baixa amplitude de relevo, até atingirem as frentes escarpadas da Serra da Mantiqueira e cair para o piso inferior do degrau topográfico.

### **Índice RDE e Densidade de Knickpoints**

Os resultados obtidos com os índices RDE dos canais de drenagem possibilitaram indicar a ocorrência de anomalias nos perfis longitudinais, consideradas como *knickpoints*. A formação dos mesmos pode estar relacionada com mudança litológica ou condicionante estrutural e pode ser representado por trechos de corredeiras e cachoeiras ao longo do canal. Ao todo, foram identificados 2.462 *knickpoints*, sendo que aproximadamente 38% encontram-se nas bacias interioranas e 62% situam-se nas bacias que drenam para o gráben do Paraíba do Sul (Figura 6). Além disso, pode-se perceber que a densidade de *knickpoints* é maior nas bacias voltadas para o RCSB do que nas bacias interioranas.

Os *knickpoints* identificados foram classificados em 1ª ordem e 2ª ordem, associados à corredeiras e cachoeiras, respectivamente. Na área de estudo, predominam *knickpoints* de 2ª ordem (1.933) associados às rupturas de declive nas escarpas da Serra da Manti-

queira representadas por cachoeiras. Já os *knickpoints* de primeira ordem, situam-se, prioritariamente, na porção do planalto interiorano, pois abrangem relevo de menor amplitude altimétrica e perfis longitudinais mais ajustados ao nível de base do rio Grande.

Pode-se perceber que a densidade dos *knickpoints* é maior próximo ao divisor hidrográfico regional entre as drenagens do rio Paraíbuna e rio Grande (Figura 6). A densidade também é maior nas bacias que drenam para o gráben do Paraíba do Sul, principalmente, no contato entre a frente escarpada da Serra da Mantiqueira e os planaltos elevados que foram capturados. Este comportamento foi observado por Sordi *et al.* (2015), ao identificar maior densidade de *knickpoints* em bacias hidrográficas que drenam para o piso inferior do degrau no relevo na Serra do Mar no estado de Santa Catarina.

### **Lineamentos Estruturais e Orientação da Rede de Drenagem**

Os lineamentos estruturais são identificados em toda área de estudo, tendo sua densidade elevada em vários setores da mesma. A maior densidade de lineamentos pode ser encontrada na porção noroeste da área de estudo dentro dos limites da bacia do rio Elvas afluente do rio Grande. Na porção sudeste da área de estudo, também é possível observar elevada concentração de lineamentos estruturais associadas à bacia do rio Paraíbuna (Figura 7). Em alguns trechos, a frente escarpada da Serra da Mantiqueira apresenta densidade de lineamentos elevada, principalmente, na bacia do córrego Vermelho e ribeirão Palmital. Ao longo do divisor hidrográfico das bacias do rio Paraíbuna e do rio Grande, apenas a porção norte apresenta densidade de lineamentos elevada.

A orientação preferencial dos lineamentos da área de estudo é N50W seguido pelas direções N40W e N50E, sendo os lineamentos N-S e W-L os menos representativos. As rosetas de orientação dos lineamentos das bacias hidrográficas do rio Paraíbuna e do rio Grande são muito semelhantes no que tange às orientações preferenciais. Ambas apresentam a direção N50W como a mais representativa, variando muito pouco nas direções secundárias. Na região hidrográfica do rio Paraíbuna, a segunda direção mais representativa é N50E, enquanto que as bacias afluentes do rio Grande apresentam a direção N40W (Figura 7).

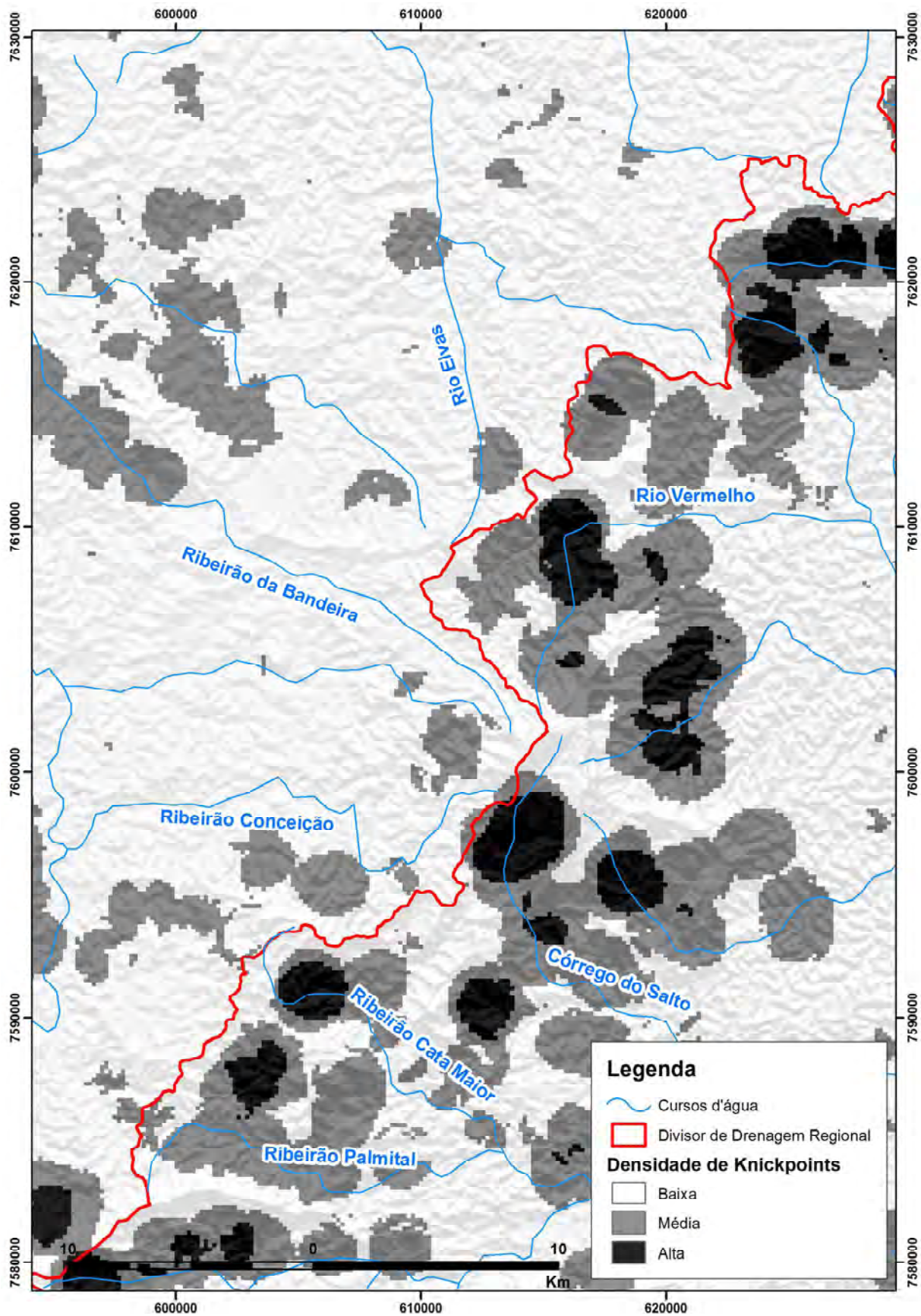


Figura 6 - Densidade de knickpoints identificados na área de estudo por meio da ferramenta Knickpoint Finder.



Na região da Serra da Mantiqueira, outros estudos demonstram o controle estrutural do relevo às zonas de cisalhamento regionais reativadas durante os eventos de rifteamento continental com direção predominante para NE-SW (NETO, 2017). Silva (2004) enfatiza que, para a região do Parque Estadual de Ibitipoca, o tectonismo de idade Plio-Pleistocênica exerceu influência estrutural no relevo, com direções NE-SW e E-W de direções preferenciais de lineamento. Ao correlacionar os lineamentos estruturais com os segmentos de drenagem, Neto (2017) identificou que os rios com direções preferenciais para NE-SW estão submetidos ao controle de estruturas reativadas, enquanto que os rios que drenam na direção NW-SE estão associados a orientação de drenagem invertida a partir do basculamento que soergueu a Mantiqueira. Neste sentido, a predominância dos lineamentos NW na área de estudo, podem estar associados a este evento.

As rosetas de orientação dos canais de 1ª e 2ª ordem na área de estudo, indicam predomínio de canais para a

direção do quadrante NW, contudo, com boa representação de canais voltados para NE (Figura 8). Ao analisar os eixos de canais na área de estudo, nota-se a direção N60W como a mais representativa, contudo, as direções N50W e N70W também apresentam valores elevados de frequência. Apesar disso, também se observa frequências representativas para as direções N70E, N80E e N20E (Figura 8). Os canais afluentes do rio Paraíba do Sul apresentam orientação preferencial para N50W, seguido pelas direções N70W e N20E. Já os afluentes do rio Grande que drenam sobre o planalto interiorano possuem direção preferencial N20W, além das direções N60W e N30W (Figura 8). Neste sentido, pode-se dizer que na área de estudo ocorre controle estrutural na orientação dos canais de drenagem, sendo corroborados pela análise das rosetas de lineamentos e eixos, com direção preferencial para NW. Este comportamento é mais evidenciado nos afluentes do rio Paraíbauna, pois possuem a mesma direção predominante que os lineamentos estruturais, N50W.

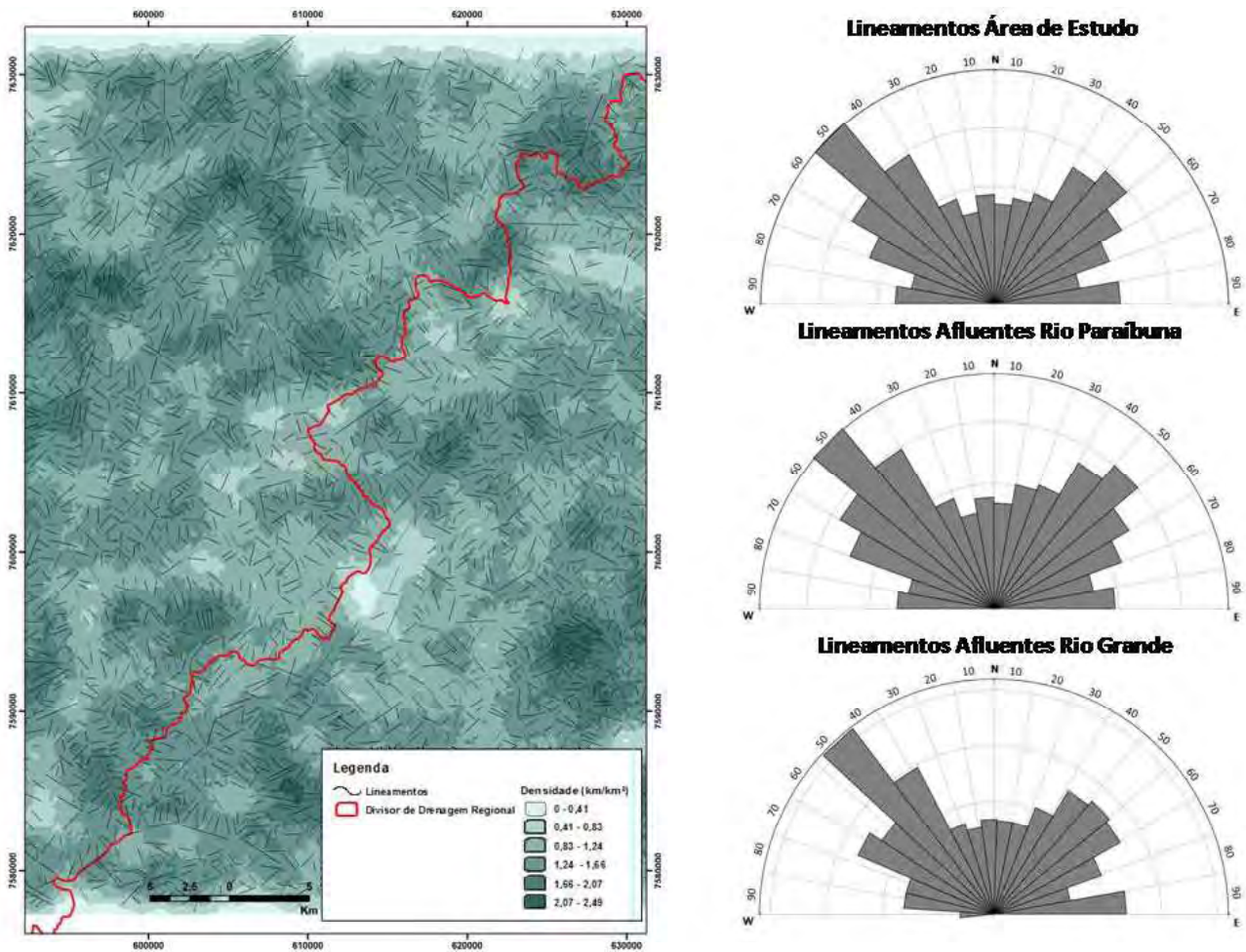


Figura 7 - Densidade de lineamentos e roseta de orientação da área de estudo.

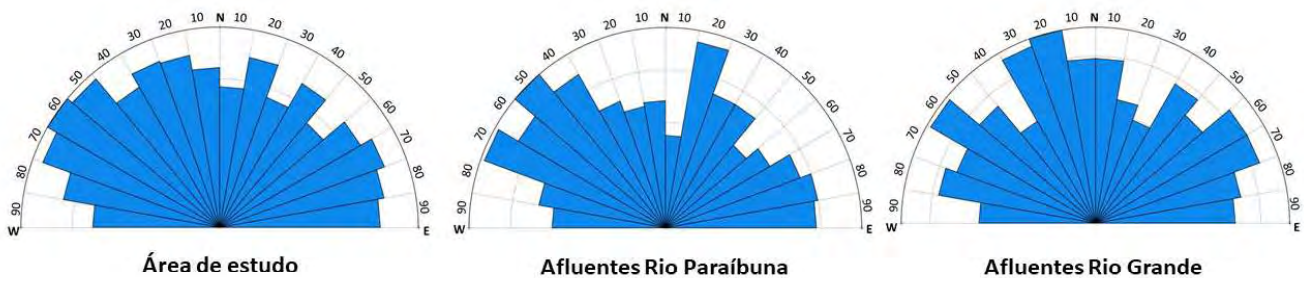


Figura 8 - Roseta de Orientação dos canais de 1ª e 2ª ordem na área de estudo.

**Stream Power Index (SPI)**

Em termos morfométricos, as taxas máximas e mínimas de SPI apresentaram mudanças significativas nos valores entre as bacias, contudo, o valor médio das bacias se manteve semelhante (Figura 9). Os valores médios variaram entre -0,08 para o rio Elvas e 0,08 para o córrego do Salto. A taxa de SPI mais elevada foi identificada na bacia do Rio Vermelho (8,69), enquanto a bacia do córrego do Salto apresentou o valor mais baixo (-11,96) (Figura 9). Logo, em sua maioria, as bacias que drenam para o RCSB apresentam os valores máximos mais elevados em relação às bacias do planalto interiorano. Para as bacias do RCSB as

taxas de SPI máximas variam entre 8,69 e 2,23, e nas bacias do planalto interiorano variam entre 4,65 e 1,03. Os valores mínimos também apresentam esta característica, tendo taxas mínimas mais elevadas para as bacias do RCSB, variando entre -5,55 e -11,96, enquanto que as bacias do planalto interiorano variam entre -2,92 e -7,86 (Figura 9). Ao comparar as taxas de SPI entre os pares de bacia apresentados na Figura 1, as bacias do RCSB apresentam valores mais elevados do que as bacias interioranas em todos os casos. Este comportamento aponta para um maior potencial erosivo nas bacias que drenam frentes escarpadas do que nas bacias situadas nos planaltos superiores com morfologia mais suave.

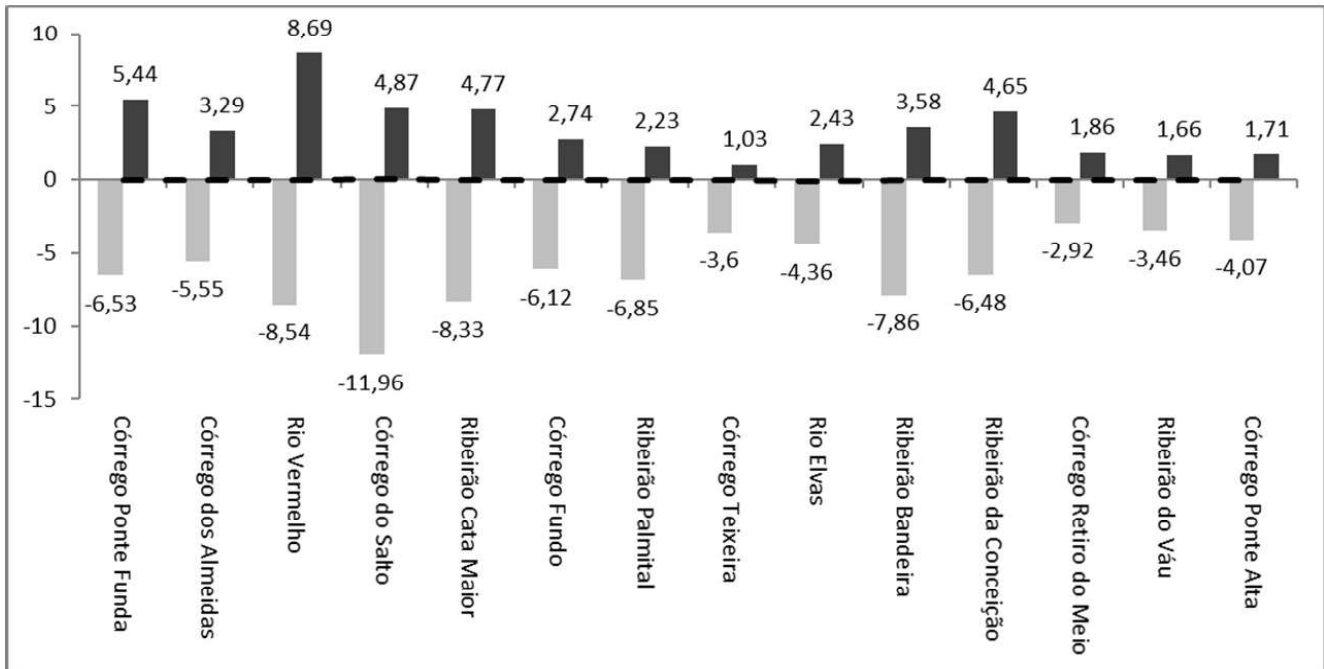


Figura 9 - Valores de Stream Power Index (SPI) das bacias estudadas. As 7 primeiras bacias da esquerda para direita drenam para o RCSB e as outras 7 drenam para o planalto interiorano. A barra preta indica valores máximos, a barra cinza os valores mínimos e a linha indica os valores médios para cada bacia.



Nota-se uma diminuição dos valores máximos de SPI para as bacias do RCSB de norte para sul, sendo o córrego Fundo e o ribeirão Palmital os valores mais baixos (Figura 9). Isto pode ser explicado através dos dados dos perfis longitudinais, uma vez que estes rios não apresentam rupturas significativas ao longo do perfil. Além disso, as cotas altimétricas destas bacias estão muito próximas dos seus pares interioranos, indicando que apesar de estarem associadas ao nível de base do graben, ainda apresentam morfologias relacionadas ao planalto interiorano. Logo, deduz-se uma expansão da frente de dissecação nesta região no sentido norte-sul.

#### **Análise morfológica e integração dos resultados**

Por sua vez, a análise da rede de drenagem demonstrou feições geomorfológicas típicas de anomalias, tais como cotovelos, e a ocorrência de capturas fluviais. Foram identificados divisores rebaixados entre as bacias analisadas que são caracterizados por divisores topográficos com aspecto plano, bem como, a presença de vales superdimensionados em cotas topográficas elevadas (Figura 10). Estas feições indicam processos de reorganização fluvial por meio de capturas de drenagem, que ao capturar rio adjacentes, promovem mudança na direção do segmento do rio, formando um cotovelo, bem como, a formação de um divisor rebaixado e um vale superdimensionado.

Na área de estudo, foram identificadas anomalias do tipo cotovelos de drenagem, prioritariamente, nas bacias que drenam para o RCSB, assim como, as feições de capturas fluviais (Figura 10). Ambas as feições se situam nas áreas próximas às cabeceiras e divisores, inseridas ou próximas, aos planaltos que foram incorporados pelas bacias do RCSB. Foram identificados vales superdimensionados – alvéolos – em todas as bacias, com exceção do ribeirão Retiro do Meio, que drenam para o planalto interiorano e próximos aos divisores com as bacias do RCSB. Já os divisores rebaixados foram identificados ao longo de todo o divisor hidrográfico da área de estudo, onde todos os pares de bacia apresentam esta morfologia em seus divisores (Figura 10). A partir da identificação e análise das feições morfológicas, foram delimitadas áreas que possivelmente foram capturadas e incorporadas às bacias afluentes do rio Paraíbauna (Figura 11). Estas áreas constituíam as bacias interioranas e foram capturadas pelo maior poder erosivo das bacias que drenam o piso inferior do graben, principalmente pela diferença do nível de base

dos rios. Diante disso, pode-se perceber o recuo erosivo que estas bacias exercem sobre a escarpa da Serra da Mantiqueira e, conseqüentemente, capturam setores das bacias interioranas.

O conjunto de análises acima apresentadas aponta para o fato de que os afluentes da bacia hidrográfica do Rio Paraíbauna apresentam maior agressividade no processo de dissecação do relevo do que aqueles que drenam as terras altas da Serra da Mantiqueira em direção ao Rio Grande. Este fato é comprovado não só pelos perfis topográficos (Figuras 4 e 5), mas também pelos valores de SPI (Figura 9), pela quantidade e densidade de *knickpoints* (Figura 6) e pelas feições morfológicas de reordenamento de drenagem identificados na área de estudo (Figura 10). Este processo independe do substrato litológico, pois ocorre tanto em áreas granítica-gnáissicas, quanto em áreas sustentadas pelos resistentes quartzitos (Figura 2).

As análises realizadas comprovam ainda que essa maior agressividade faz com que a escarpa e o degrau no relevo que marcam o limite da Bacia Hidrográfica do Paraná com a do Paraíba do Sul, recue em direção ao interior continental na área do limite entre o Rio Grande (principal formador do Rio Paraná) com o Rio Paraíbauna. Este recuo explica a razão de partes consideráveis das bacias capturadas pelo rio Paraíbauna, ainda apresentarem amplitudes de relevo e morfologia semelhante àquelas que drenam para o Rio Grande, garantidas ainda pelos *knickpoints* em forma de cachoeira já voltados para a escarpa da Serra da Mantiqueira (Figura 11).

Desta forma, pode-se afirmar que a área investigada possui comportamento erosivo e evolução do divisor hidrográfico muito semelhante ao encontrado nas áreas que lhes são adjacentes e que foram pesquisadas por Cherem *et al.* (2013) e Rezende *et al.* (2013), respectivamente bacias hidrográficas do Rio Pomba e do Rio Preto. Sendo assim, abre-se a necessidade de no futuro se investigar as semelhanças e diferenças entre esses três setores do escarpamento e do degrau no relevo que delimitam as bacias hidrográficas do Paraíba do Sul com Paraná. Afirma-se isso, pois essas semelhanças e diferenças tendem a refletir a evolução geomorfológica resultante da dinâmica tectônica dos blocos que compõe o RCSB, bem como podem ajudar a elucidar elementos da morfogênese deste importante elemento tectônico do sudeste brasileiro.

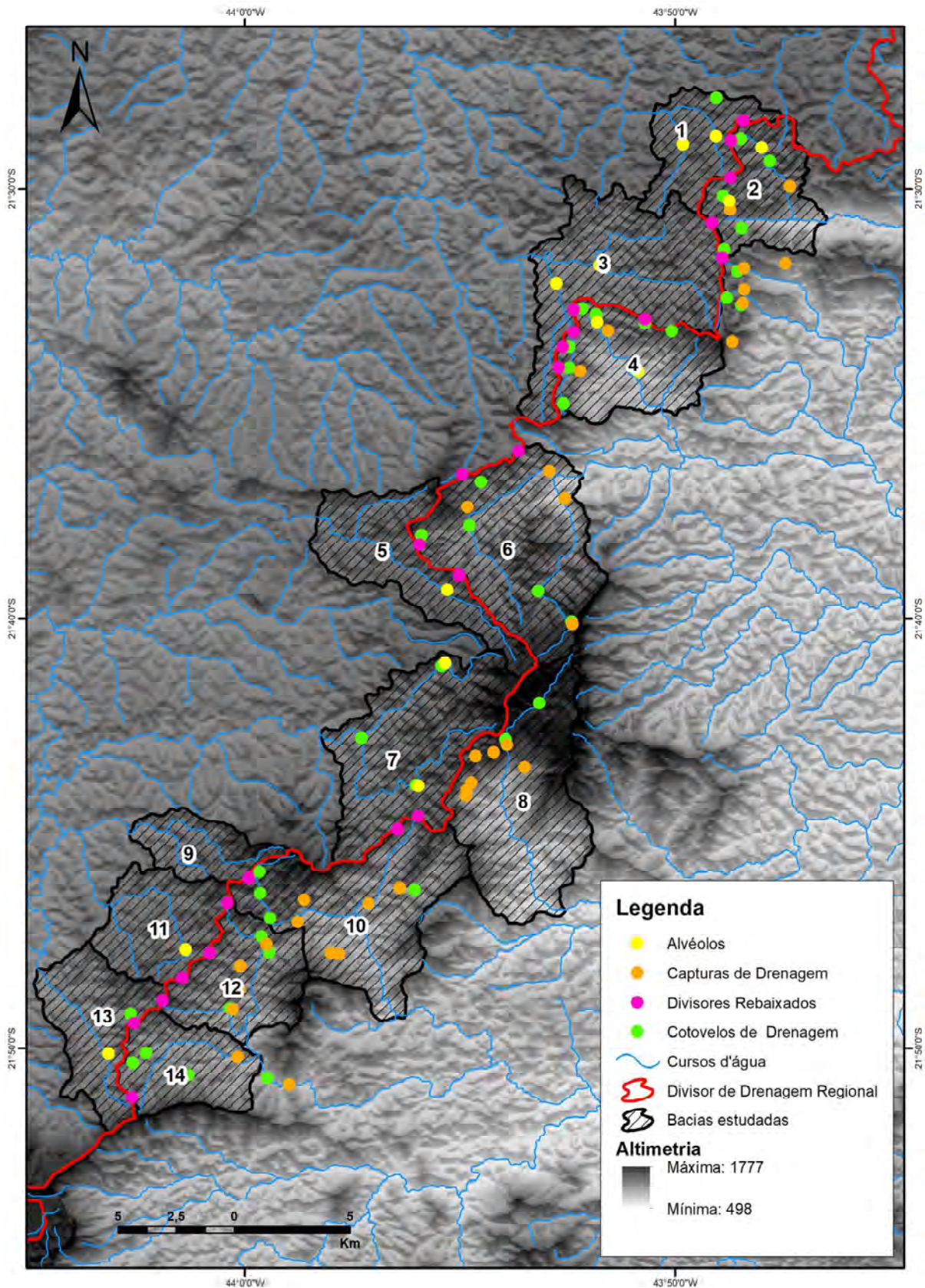


Figura 10 - Feições morfológicas de reordenamento dos sistemas de drenagem na borda oeste do RCSB. 1. Córrego do Teixeira; 2. Córrego Ponte Funda; 3. Rio das Elvas; 4. Ribeirão dos Almeidas; 5. Ribeirão Bandeira; 6. Rio Vermelho; 7. Ribeirão Conceição; 8. Córrego do Salto; 9. Ribeirão Retiro do Meio; 10. Ribeirão Cata Maior; 11. Ribeirão do Váú; 12. Córrego Fundo; 13. Córrego Ponte Funda; 14. Ribeirão Palmital.



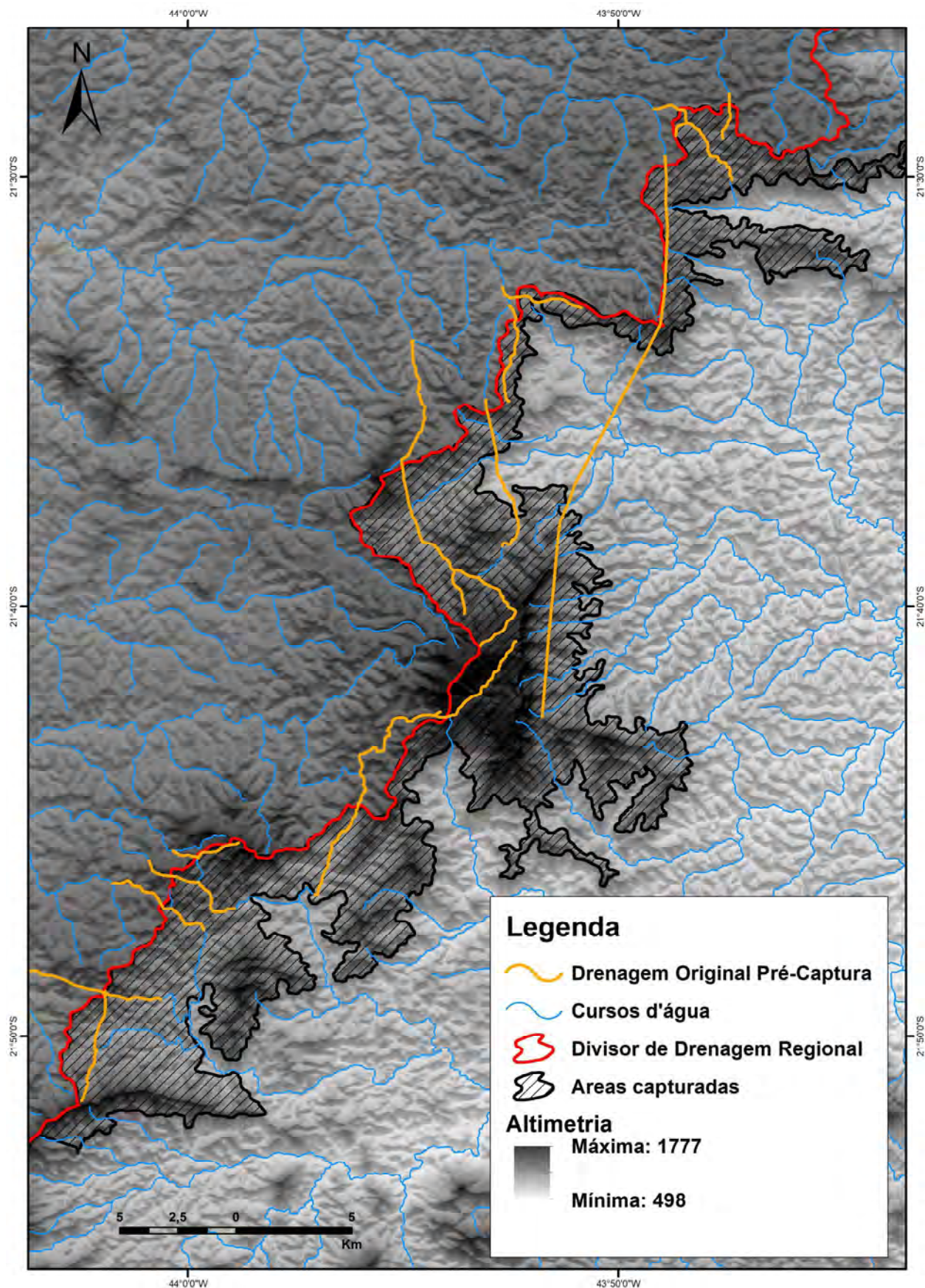


Figura 11 - Áreas planálticas capturadas pelos rios que drenam para o graben do Paraíba do Sul.

## Considerações Finais

A análise dos perfis topográficos e longitudinais indicam que as bacias interioranas estão ajustadas aos níveis de base mais altos, tendo assim um relevo mais suave de baixa amplitude e sem rupturas abruptas nos eixos de drenagem. Já as bacias afluentes do rio Paraíba, voltadas para o RCSB, apresentam gradientes topográficos mais acentuados, devido ao nível de base mais rebaixado e seus divisores estarem localizados em porções suspensas a montante da escarpa da Serra da Mantiqueira. Estas características indicam morfologias de planaltos capturados pela frente erosiva das bacias voltadas ao RCSB, fazendo com áreas planálticas reorganizem seu sistema de drenagem para bacias adjacentes. Este comportamento é evidenciado pelos perfis longitudinais das bacias afluentes do rio Paraíba.

Soma-se a isso, os dados do índice RDE indicam maior densidade de *knickpoints* nas bacias do RCSB e, com isso, atribui maior controle litológico e/ou estrutural na evolução do relevo. As taxas de SPI demonstraram maior potencial erosivo dos canais voltados para o RCSB, bem como, uma provável expansão da frente de dissecação nesta região no sentido de norte para sul.

Por fim, os cotovelos, os vales superdimensionados e as demais morfologias típicas de captura fluvial, indicam, indubitavelmente, que consideráveis áreas do planalto interior que drenavam para o Rio Grande foram capturadas por cursos fluviais que descem o degrau no relevo e se dirigem para o Rio Paraíba do Sul. Sendo assim, os resultados aqui apresentados, demonstram, assim como Rezende *et al.* (2015) e Cherem *et al.* (2012), processos de expansão da rede de drenagens sobre planaltos escalonados através de mecanismos capturas de drenagem. Logo, a morfogênese do relevo na borda oeste do RCSB se deu a partir da reorganização da rede de drenagem em função da mudança de nível de base imposto pelo processo de rifteamento que induziu um input erosivo e iniciou o processo de dissecação ainda em andamento do antigo planalto por meio de erosão remontante e capturas fluviais.

## Agradecimentos

Agradecemos ao Projeto CAPES COFECUB 869/15 pelo apoio.

## Referências Bibliográficas

- AB'SABER, A. N. O problema das conexões antigas e da separação da drenagem do Paraíba e do Tietê. **Geomorfologia**. São Paulo, Instituto de Geografia da USP, p. 38-49. 1957.
- ASMUS, H.E. & FERRARI, A.L. **Hipótese sobre a causa do tectonismo cenozoico na região sudeste do Brasil**. *Projeto REMAC*, 4, p.75-88. 1978.
- BENTO, L. C. M.; RODRIGUES, S. C. Aspectos geológico-geomorfológicos do Parque Estadual do Ibitipoca/MG: base para o entendimento do seu geopatrimônio. **Sociedade. & Natureza**, Uberlândia, 25 (2): 379-394. 2013.
- BISHOP, P. Drainage rearrangement by river capture, beheading and diversion. **Progress in Physical Geography**, v.19, n.4, p.449-473.1995.
- CHEN, C. Y. & YU, F. C. Morphometric analysis of debris flow and their source area using GIS. **Geomorphology** 129, p. 387-397. 2011.
- CHEREM, L. F. S.; VARAJÃO, C. A. C.; BRAUCHER, R.; BOURLÉS, D.; SALGADO, A. A.; VARAJÃO, A. C. Long-term Evolution of Denudational Escarpments in Southeastern Brazil. **Geomorphology**. v. 173-4. p. 118-27. 2012.
- CHEREM, L. F. S.; VARAJÃO, C. A. C.; MAGALHÃES JÚNIOR, A. P.; VARAJÃO, A. F. D. C.; SALGADO, A. A. R.; OLIVEIRA, L. A. F.; BERTOLINI, W. Z. O papel das capturas fluviais na morfodinâmica das bordas interplanálticas do sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 14, p. 299-308, 2013.
- CHRISTOFOLETTI, A. Considerações sobre o nível de base, rupturas de declive, capturas fluviais e morfogênese do perfil longitudinal. **Geografia**, 2 (4), p. 81-102. 1977.
- DANIELSON, T. Utilizing a High Resolution Digital Elevation Model (DEM) to Develop a Stream Power Index (SPI) for the Gilmore Creek Watershed in Winona County, Minnesota. **Papers in Resource Analysis**. Volume 15, 11 pp. Saint Mary's University of Minnesota University Central Services Press. 2013.
- COMPANHIA MINERADORA DE MINAS GERAIS (CODEMIG); COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (BRASIL). **Mapa geológico do estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: CPRM, 2014.
- FERRARI, A.L. **Evolução tectônica do Gráben da Guanabara**. Tese (Doutorado), Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.p.412. 2001.



- HACK, J.T., 1973. Stream-Profile Analysis and Stream-Gradient Index. **US Geol. Surv. J. Res.** 1 (4), 421–429.
- HEILBRON, M., PEDROSA-SOARES, A. C., CAMPOS NETO, M. C., SILVA, L. C., TROUW, R.A.J.; JANASI, V. A., Província Mantiqueira. In: MANTESSO-NETO, V. BARTORELLI, A., CARNEIRO, C. D. R. e BRITO-NEVES, B. B., Orgs. **Geologia do Continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. São Paulo, Ed. Beca, p.203-236. 2004
- HEILBRON, M.; MOHRIAK, W.; VALERIANO, C. M.; MILANI, E.; ALMEIDA J. C. H.; TUPINAMBÁ, M. From collision to extension: the roots of the south-eastern continental margin of Brazil. In: TALWANI & MOHRIAK (eds). **Atlantic Rifts and Continental Margins**. American Geophysical Union, Geophysical Monograph Series, 115:1-34. 2000.
- JENNESS, J. S. Calculating landscape surface area from digital elevation models. **Wildlife Society Bulletin** 32, 829-839. 2004.
- MARENT, B. R.; SALGADO, A. A. R.; SANTOS, L. J. C. Modelos de evolução do relevo de margens passivas em regiões com grande escarpamento. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.14, n.2, (Abr-Jun) p.235-240, 2013.
- NETO, R. M. O Horst da Mantiqueira Meridional: Proposta de Compartimentação Morfoestrutural para sua Porção Mineira. **Revista Brasileira de Geomorfologia**. São Paulo, v.18, n.3, (Jul-Set) p.561-577, 2017.
- OLIVEIRA, D. Capturas fluviais como evidências da evolução do relevo: Uma revisão bibliográfica. **Revista do Departamento de Geografia**, 20, 37-50. 2010.
- OLIVEIRA, C. S. **Estudo dos Geossistemas das Critas Quartzíticas da Mantiqueira Meridional: A Paisagem em Perspectiva Multiescalar**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Juiz de Fora, Programa de Pós-Graduação em Geografia. 131p. 2016.
- 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. C.; SALGADO, A. A. R.; SILVA, J. R.; BOURLÈS, D.; BRAUCHER, R.; LÉANNI, L. Fatores Controladores da Evolução do Relevo no Flanco NNW do Rift Continental do Sudeste do Brasil: Uma Análise Baseada na Mensuração dos Processos Denudacionais de Longo-termo. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.14, n.2, (Abr-Jun) p.221-234, 2013.
- 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
- RICCOMINI, C.; GROHMANN, C. H.; SANT'ANNA, L. G.; HIRUMA, S. T. A Captura das Cabeceiras do Rio Tietê pelo Rio Paraíba do Sul. In: MONDENSEI-GAUTTIERI, M. C.; BARTORELLI, A. CARNEIRO, C. R. LISBOA, M. B. A. L. **A Obra de Aziz Nacib Ab'Sáber**. São Paulo: Beca-BALL edições, 2010.
- RILEY, S. J.; DEGLORIA, S. D.; ELLIOT, R. A Terrain Ruggedness Index that quantifies topographic heterogeneity. **Intermountain journal of sciences**, Vol. 5, Nº 1-4. 1999.
- SALAMUNI, E.; NASCIMENTO, E. R.; SILVA, P. A. H.; QUEIROZ, G. L. SILVA, G. 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.; SOBRINHO, L.C.; CHEREM, L. F.; VARAJÃO, C. A. C.; VARAJÃO, C. A. C.; BOURLÈS, DIDIER L.; BRAUCHER, R.; MARENT, B. R. Estudo da evolução da escarpa entre as bacias do Doce/Paraná em Minas Gerais através da quantificação das taxas de desnudação. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 13, n. 2, p. 213-222, 2012.
- SALGADO, A. A. R., MARENT, B. R., CHEREM, L. F. S., BOURLÈS, D., SANTOS, L. J. C., BRAUCHER, R., BARRETO, H. N. Denudation and retreat of the Serra do Mar escarpment in southern Brazil derived from in situ-produced <sup>10</sup>Be concentration in river sediment. **Earth Surface Process and Landforms** 39:311–319. 2014.
- SALGADO, A. A. R., REZENDE, E. A., BOURLÈS, D., BRAUCHER, R., DA SILVA, J. R., GARCIA, R. A., Relief evolution of the continental rift of Southeast Brazil revealed by in situ-produced <sup>10</sup>Be concentrations in river-borne sediments. **Journal of South America Earth Science**. 67: 89–99. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2016.02.002>. 2016.
- SILVA, S. M. da. **Carstificação em rochas siliciclásticas: estudo de caso da Serra do Ibitipoca, MG**. 143 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Belo Horizonte, Belo Horizonte. 2004.
- 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 (Rio de Janeiro)**, v. 29, p. 210-224. 2006.
- SILVA, T. M.; SANTOS, B. P. Sistemas de Drenagem e Evolução

- da Paisagem. **Revista Geogr. Acadêmica** v.4, n.1, 5-19. 2010.
- SORDI, M. V., SALGADO, A. A. R., PAISANI, J. C. Evolução do relevo em áreas de tríplice divisor de águas regional - o caso do Planalto de Santa Catarina: análise da rede hidrográfica. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, 16 (3):435–447. 2015a
- SORDI, M. V., SALGADO, A. A. R., PAISANI, J. C. Evolução do relevo em áreas de tríplice divisor de águas regional - o caso do Planalto de Santa Catarina: análise morfoestrutural. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, 16 (4):579–592. 2015b.
- SUMMERFIELD, M. A. **Global Geomorphology: An introduction to the Study of Landforms**. Longman Scientific & Technical, p.537.1991.
- VALENTE, A. S. M.; GARCIA, P. O.; SALIMENA, F. R. G.; OLIVEIRA-FILHO, A. T. Composição, estrutura e similaridade florística da Floresta Atlântica, na Serra Negra, Rio Preto-MG. **Rodriguésia**, v. 62, n. 2, p. 321-340. 2011.
- VALERIANO, M. M.; ROSSETTI, D. F. Topodata: Brazilian full coverage refinement of SRTM data. **Applied Geography**, v. 32, p.300-309, 2012.
- ZALÁN, P. V.; OLIVEIRA, J. A. B. Origem e evolução estrutural do Sistema de Riftes Cenozóicos do Sudeste do Brasil. **Boletim de Geociências Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 13, n. 2, p. 269-300, maio/nov. 2005.
- ZHANG, H. Y.; SHI, Z. H.; GUO, M. H. Linking watershed geomorphic characteristics to sediment yield: Evidence from the Loess Plateau of China. **Geomorphology** 234, p. 19-27. 2015.