

Proposição de um Método para Estimar Razões Geomorfológicas em Bacias Hidrográficas: Redução de Incertezas por meio da Dispersão dos Parâmetros Morfométricos

Proposition of a Method for Estimation of Geomorphological Ratios for Watersheds: Reduction of Uncertainties by the Method of Dispersion of Morphometric Parameters

Robison Negri¹ , Heinz Dieter Oskar August Fill¹ 

¹ Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental. Av. Coronel Francisco Heráclito dos Santos, 100, Jd. das Américas, CEP 81531-980. Curitiba, PR, Brasil. (robisonnegri@gmail.com; heinzfill@yahoo.com)

Recebido em 19 de janeiro de 2023; aceito em 16 de setembro de 2025.

RESUMO

A modelagem hidrológica de bacias hidrográficas de pequeno e médio porte frequentemente depende da estimativa de razões geomorfológicas, fundamentais para parametrizações de modelos como o Hidrograma Unitário Instantâneo Geomorfológico (HUIG). No entanto, os métodos tradicionais de estimativa baseiam-se em médias agregadas, desconsiderando a dispersão natural dos dados morfométricos, o que pode induzir a incertezas significativas. Este estudo propõe um novo método para estimar razões geomorfológicas, incorporando a dispersão dos dados ao ajuste de regressão, o que proporciona maior representatividade física e estatística. Foram analisadas quatorze bacias hidrográficas com diferentes características fisiográficas, comparando-se três métodos de estimativa: média aritmética simples (**Método 1**), regressão sobre médias agregada por ordem (**Método 2**) e regressão sobre os dados dispersos (**Método 3**). Os resultados demonstram que o **Método 3** reduz a incerteza nas estimativas de RL e RA, mantendo robustez estatística, especialmente em bacias com alta variabilidade morfométrica. Conclui-se que o método proposto é mais adequado para representar a complexidade das bacias e pode melhorar significativamente a performance de modelos hidrológicos que utilizam razões geomorfológicas como entrada.

Palavras-chave: Razões geomorfológicas; Hidrograma unitário instantâneo; Incerteza; Regressão não linear; Bacia hidrográfica.

ABSTRACT

The hydrological modeling of small and medium-sized watersheds often depends on the estimation of geomorphological ratios, which are fundamental for parameterizations of models such as the Geomorphological Instantaneous Unit Hydrograph (HUIG). However, traditional estimation methods are based on aggregate means, disregarding the natural dispersion of morphometric data, which can induce significant uncertainties. This study proposes a new method to estimate geomorphological ratios, incorporating data dispersion to regression adjustment, which provides greater physical and statistical representativeness. Fourteen river basins with different physiographic characteristics were analyzed, comparing three estimation methods: simple arithmetic mean (**Method 1**), regression on means aggregated by order (**Method 2**) and regression on dispersed data (**Method 3**). The results demonstrate that **Method 3** reduces the uncertainty in the estimates of RL and RA, maintaining statistical robustness, especially in basins with high morphometric variability. It is concluded that the proposed method is more suitable to represent the complexity of the basins and can significantly improve the performance of hydrological models that use geomorphological ratios as input.

Keywords: Geomorphological ratios; Instantaneous unit hydrograph; Uncertainty; Nonlinear regression; Watershed.

INTRODUÇÃO

A utilização de modelos de previsão hidrológica é essencial para o desenvolvimento da sociedade, sobretudo devido à limitação das redes de monitoramento de vazão, particularmente em bacias de menor porte. Nesses casos, conforme Shen et al. (2020) e Bierkens et al. (2014), os processos hidrológicos podem ser simulados por métodos determinísticos, baseados em dados fisiográficos como uso e cobertura do solo, topografia, umidade, propriedades do solo e fatores climáticos regionais.

Entre os modelos propostos, destacam-se os modelos chuva-vazão parametrizados pelas características físicas da bacia (Eze e Efiang, 2010; Rawat e Mishra, 2016), evidenciando que o tempo de concentração e o comportamento do escoamento estão diretamente ligados à geomorfologia da bacia (Jung et al., 2011; Hajam et al., 2013; Sivakumar et al., 2013; Jung e Ouarda, 2015; Gaucherel et al., 2017).

O Hidrograma Unitário Instantâneo Geomorfológico (HUIG) de Rodriguez-Iturbe e Valdes (1979) explora essa dependência ao parametrizar o hidrograma em função das razões geomorfológicas (Horton, 1945; Strahler, 1957, 1964). A evolução das ciências espaciais e do geoprocessamento tem impulsionado o uso das abordagens geomorfológicas (Kumar et al., 2000; Obi Reddy et al., 2002; Moussa, 2003; Vittala et al., 2004; Chopra et al., 2005; Narendra e Nageswara, 2006; Kouli et al., 2007; Al-Saud, 2010; Dawod et al., 2011; Geena e Ballukraya, 2011; Al-Ghamdi et al., 2012; Chavan e Gadge, 2013; Soni et al., 2013; Tripathi et al., 2013; Soni, 2017; Bisht et al., 2018). Segundo Chopra et al. (2005), a precisão no HUIG depende diretamente da qualidade dos parâmetros geomorfológicos estimados.

A estimativa das razões geomorfológicas é relevante não apenas para aplicações hidrológicas, mas também para estudos de formação e desenvolvimento de bacias hidrográficas (Jain e Sinha, 2003; Okoko e Olujinmi, 2003; Ifabiyi, 2004; Pareta e Pareta, 2012; Romshoo et al., 2012; Dar et al., 2013; Vandana, 2013).

Essas razões são obtidas a partir de medições morfométricas (Strahler, 1964; Nautiyal, 1994; Soni et al., 2013; Tripathi et al., 2013; Soni, 2017; Bisht et al., 2018), usualmente a partir de bases geoespaciais como imagens de satélite e mapas topográficos (Santos et al., 2018). Inicialmente, os métodos de estimativa eram baseados em medições manuais (Schumm, 1956), com alta propensão a erros, tanto de aquisição quanto de processamento (Kaliraj e Chandrasekar, 2015; Bajracharya e Jain, 2020).

O advento de tecnologias como Sensoriamento Remoto (SR), Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e GPS (Hamdan e Khozyem, 2018) otimizou a obtenção e o tratamento dos dados geoespaciais (Sarangi et al., 2003; Vijith e Satheesh, 2006; Grohmann et al., 2007; Liu e Zhang, 2011; Rawat et al., 2012; Biron et al., 2013; Yang et al., 2014; Degetto et al., 2015; Rawat e Mishra, 2016; Wu e Lane, 2017; Sahoo e Jain, 2018).

Apesar disso, estudos voltados ao refinamento dos métodos de estimativa ainda são escassos (Schumm, 1956), com poucas iniciativas recentes, como as de Steffen et al. (2009) e Vestena e Kobiyama (2010), que discutem o impacto da escolha do método na acurácia dos modelos hidrológicos. Autores como Magesh et al. (2012), Magesh e Chandrasekar (2012), Santos e Hernandez (2013), Rigon et al. (2016) e Santos et al. (2018) também reforçam a importância de novos métodos que minimizem a incerteza.

O ajuste de curvas a dados experimentais, tema abordado neste trabalho, é crucial para a representação adequada dos fenômenos naturais (Seber e Wild, 2003; Bates e Watts, 2007). A incerteza associada à estimativa das razões geomorfológicas pode ser significativamente impactada pelo procedimento de ajuste adotado. Métodos tradicionais baseados no ajuste às médias dos resultados discretos tendem a reduzir a variabilidade dos dados, simplificando o ajuste, mas ignorando as variações internas e, assim, podendo subestimar a incerteza e introduzir viés nos parâmetros estimados, especialmente em sistemas heterogêneos (Motulsky e Christopoulos, 2004; Montgomery e Runger, 2010).

Em contrapartida, o ajuste direto aos resultados dispersos preserva a estrutura completa dos dados, permitindo uma representação mais fiel da complexidade do fenômeno, a identificação de padrões sutis e a geração de estimativas mais robustas, com intervalos de confiança mais realistas (Seber e Wild, 2003; Bates e Watts, 2007). Além disso, técnicas modernas como análise de resíduos e simulações de Monte Carlo auxiliam na propagação da incerteza e na melhoria da confiança estatística dos modelos (Montgomery e Runger, 2010).

Assim, considerando a relevância das razões geomorfológicas para a aplicação do HUIG, este estudo objetiva avaliar diferentes métodos de estimativa quanto ao processo e ao grau de incerteza. Para isso, são revisitados dois métodos mais utilizados (**Método 1** e **Método 2**) e proposto um terceiro método (**Método 3 - método de dispersão dos parâmetros morfométricos**), visando à redução da incerteza na estimativa das razões geomorfológicas representativas de bacias hidrográficas.

MATERIAIS E MÉTODOS

De maneira a atingir os objetivos propostos, a metodologia do presente artigo foi organizada em torno de três objetivos específicos:

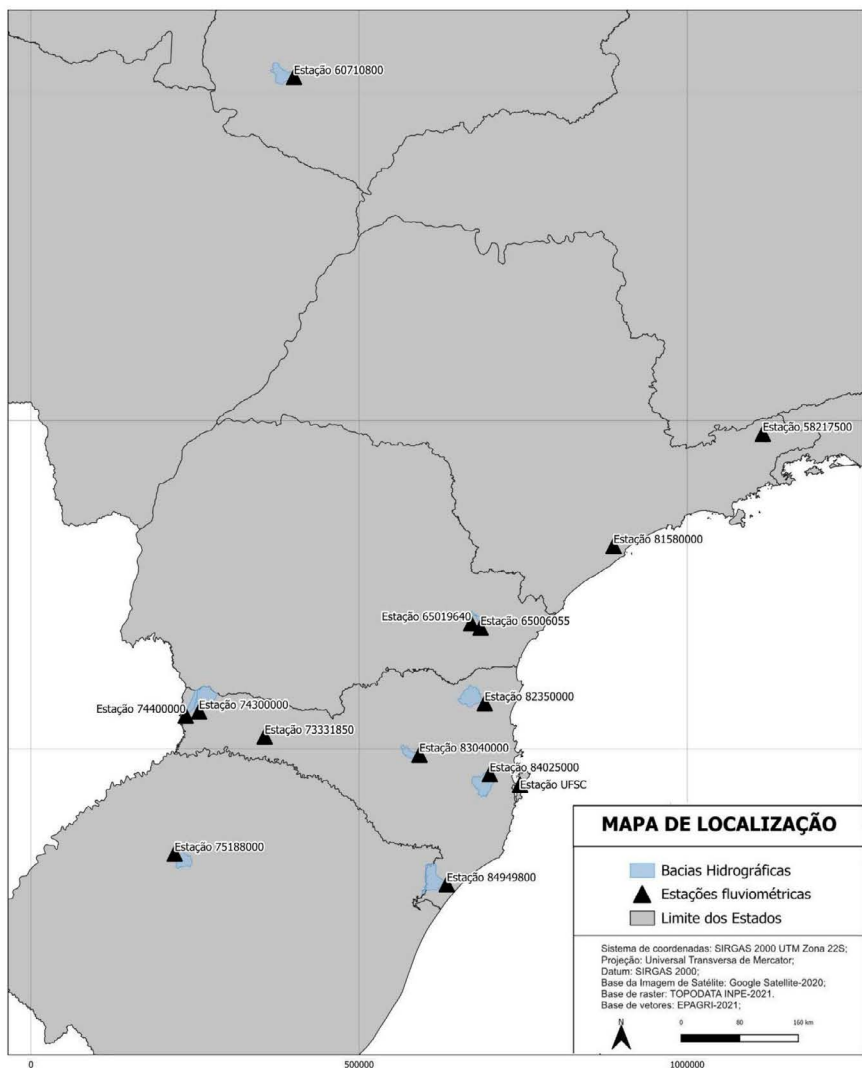
- Tratamento das informações geoespaciais de sensoriamento remoto (Modelo Digital de Elevação - MDE), com o objetivo de obter os dados morfométricos das bacias em estudo;
- Estimar as razões geomorfológicas características para as bacias estudadas, utilizando os três métodos distintos, dois usuais (**Método 1** e **2**) e um método proposto (**Método 3**);
- Realizar uma análise do grau de incerteza de cada método e de sua representatividade física.

Para tanto, foram selecionadas quatorze bacias hidrográficas, com uso predominantemente rural (menos antropizadas), localizadas em sua maioria no sul do Brasil. No processo de seleção foram considerados os seguintes requisitos:

- Existência de estações pluviométricas e fluviométricas cadastradas na ANA;
- Disponibilidade de dados *raster* para tratamento em *software* SIG;
- Variabilidade das características fisiográficas.

A localização das bacias hidrográficas selecionadas é apresentada e detalhada na Figura 1, onde são apresentados os nomes das bacias, nome do rio, sua localização e o código da estação pluviométrica e fluviométrica existente na exutória.

A primeira etapa metodológica consistiu no tratamento do MDE e obtenção dos dados morfométricos das bacias. Foram utilizadas as bases cartográficas disponibilizadas pelo projeto TOPODATA do INPE (2008), que realizou sucessivos refinamentos e correção de falhas dos



Bacia - Código da Estação	Rio e Localização	Bacia - Código da Estação	Rio e Localização
UFSC	Rio do Meio - Florianópolis - SC	Mirim Doce - 83040000	Rio Taió - Mirim Doce - SC
Piteu - 58217500	Ribeirão Palmital - Cachoeira Paulista - SP	PCH José Barasuol - 75188000	Rio Conceição - Ijuí - RS
Itariri - 81580000	Rio do Azeite - Itariri - SP	Guataparã Baixo - 74300000	Rio das Antas - Anchieta - SC
Vargem Grande - 65006055	Rio Palmital - Pinhais - PR	PCH Fazenda Velha - 60710800	Rio Ariranha - Jataí - GO
Parque Tingui - 65019640	Rio Barigui - Curitiba - PR	PCH Angelina - 84022000	Rio Tijucas - Angelina - SC
CGH Caju - 73331850	Rio Xanxerê - Xanxerê - SC	Itapocu - 82350000	Rio Itapocu - Jaraguá do Sul - SC
Salto das Flores - 74400000	Rio das Flores - Paraisópolis - SC	Ermo - 84949800	Rio Itoupava - Ermo - SC

Figura 1. Bacias analisadas e sua localização.

dados Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), fornecidos pelo US Geological Survey. A resolução espacial utilizada foi de 30 metros. O MDE resultante foi processado no *software* ARCGIS, suportado pela rotina Archydro, com discretização de drenagem de 1 km². Para a obtenção das declividades utilizou-se a ferramenta SLOPE do próprio *software* ARCGIS.

Com base nos dados cartográficos, realizou-se o delimitamento e o ordenamento dos canais, bem como a delimitação das respectivas sub-bacias contribuintes. Posteriormente, estimaram-se os comprimentos dos canais, as áreas de drenagem e as declividades médias das sub-bacias, classificando-se as informações conforme cada ordem (ω). A Figura 2 apresenta, a título de ilustração, os resultados gráficos obtidos a partir do processamento dos dados geoespaciais, referentes à estação Parque do Rio do Meio – UFSC.

A massa de dados alfanuméricos das bacias hidrográficas foi tratada com o objetivo de estimar as razões geomorfológicas, segundo dois métodos tradicionais (**Método 1** e **Método 2**), além do terceiro método proposto neste estudo (**Método 3**), denominado **método de dispersão dos parâmetros morfométricos**.

Por fim, realizou-se uma análise das variações obtidas nas razões geomorfológicas características das bacias hidrográficas, em decorrência dos métodos utilizados.

Razões geomorfológicas e seus métodos de estimação

A bacia hidrográfica é a porção da superfície terrestre responsável por coletar e conduzir o escoamento superficial, direcionando-o por sua rede de canais estruturada por suas características geomorfológicas. Strahler (1964) propôs um método, amplamente utilizado para classificar a complexidade dessa rede, baseado na hierarquização dos canais. O procedimento proposto por Strahler (1964) consiste na atribuição de um número inteiro, de ordem (ω), para cada trecho de canal delimitado entre uma nascente e uma bifurcação ou entre duas bifurcações consecutivas. Os canais representados pelos segmentos que iniciam a trajetória do escoamento a partir de uma nascente, são definidos como de 1ª ordem ($\omega = 1$). Os demais segmentos formados pela junção de dois canais com a mesma ordem (ω), passam a ser classificados pelo primeiro número inteiro imediatamente superior ao dos trechos confluentes ($\omega+1$). Quando segmentos de canais de ordens diferentes se unem, o segmento formado a jusante corresponde ao de maior ordem entre eles. Por fim, a ordem da bacia (Ω) é dada pelo rio de maior ordem contido nela, conforme ilustra a Figura 3.

Fundamentalmente há um decréscimo da quantidade de segmentos de canais pertencentes a uma ordem ω , quando comparados aos canais de ordem $\omega+1$ da mesma bacia

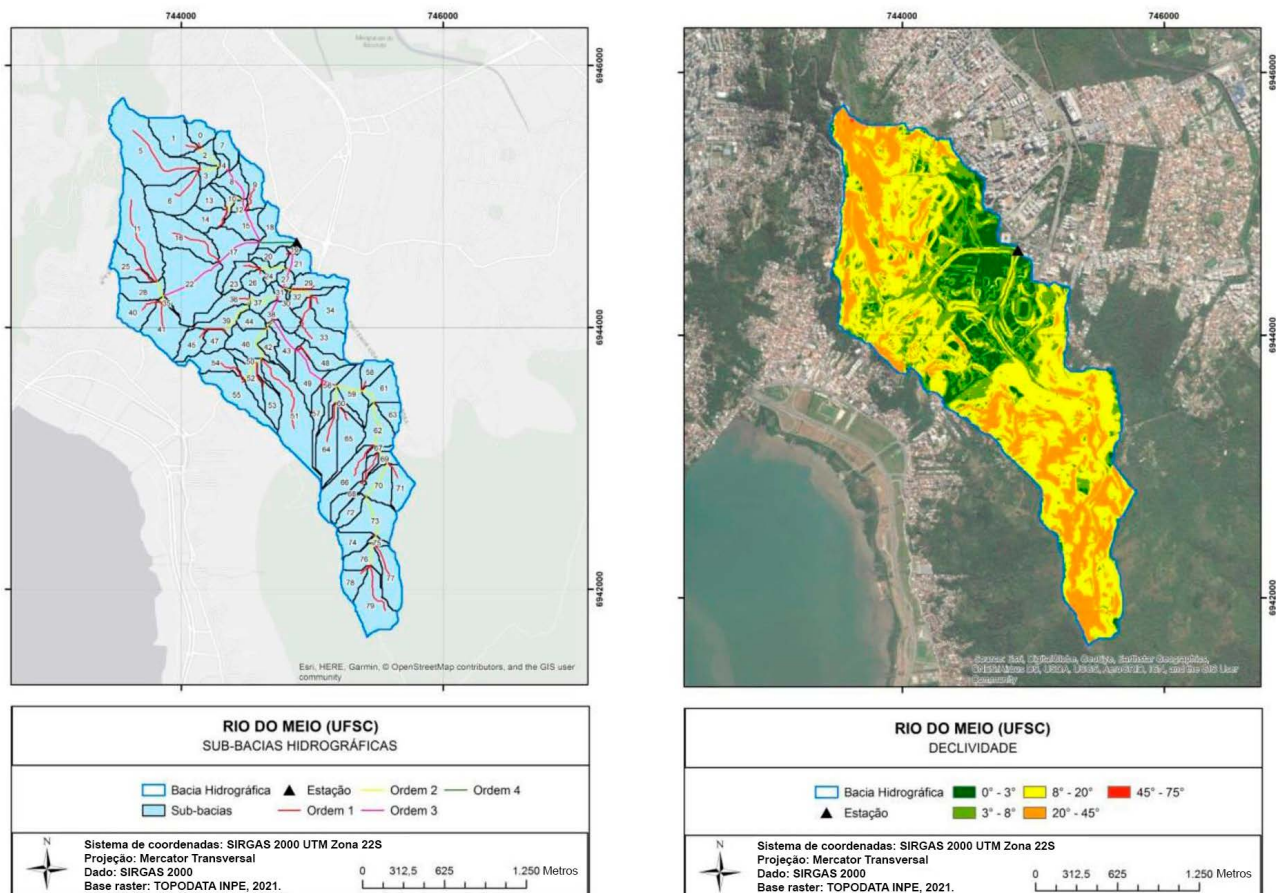


Figura 2. Processamento das informações geoespaciais da bacia – Rio do Meio – UFSC.

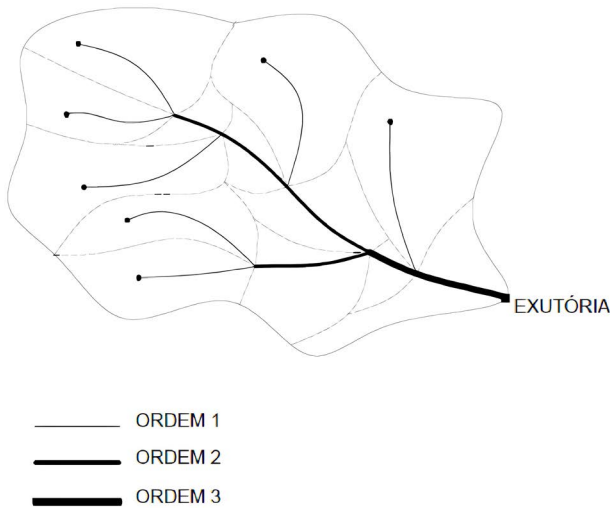


Figura 3. Representação da classificação da bacia hidrográfica.

hidrográfica. Horton (1945) demonstrou que este decréscimo relativo pode ser representado uma razão de progressão geométrica e a denominou como razão de bifurcação (R_B), conforme a equação (1). Considerando que cada conjunto de sub-bacias de ordem (ω) pode ser associado a um comprimento dos canais, área e declividade médios das sub-bacias, Schumm (1956) e Strahler (1964), aplicando o mesmo princípio Horton, propuseram razão para os comprimentos dos canais (R_L), razão das áreas (R_A) e das declividades médias (R_S) das sub-bacias, expressas pelas equações (2), (3) e (4):

$$R_{B\omega} = \frac{N_\omega}{N_{\omega+1}} \quad 1$$

$$R_{L\omega} = \frac{\bar{L}_{\omega+1}}{\bar{L}_\omega} \quad 2$$

$$R_{A\omega} = \frac{\bar{A}_{\omega+1}}{\bar{A}_\omega} \quad 3$$

$$R_{S\omega} = \frac{\bar{s}_{\omega+1}}{\bar{s}_\omega} \quad 4$$

Onde:

ω = a ordem do canal ($\omega = 1, 2, 3, \dots, \Omega$);

Ω = ordem da bacia;

N_ω = o número de canais de ordem ω ;

\bar{L}_ω = o comprimento médio de todos os canais de ordem ω ;

\bar{A}_ω = a área média de todas as sub-bacias de ordem ω ;

\bar{s}_ω = média das declividades média das sub-bacias de ordem ω .

Considerando a necessidade de propor um único conjunto de razões geomorfológicas representativas para cada bacia (R_B, R_L, R_A, R_S), dois métodos são usualmente empregados e são aqui denominados **Método 1** e **Método 2**, sendo estes apresentados na sequência.

Método de estimação 1

Este método, considera as Razões Geomorfológicas representativas da bacia iguais à média aritmética simples das razões de progressão individuais obtidas entre cada sub-bacias de ordem ω consecutivas, calculadas conforme as equações (5), (6), (7) e (8).

$$R_B = \frac{\sum_{\omega=1}^{\Omega} R_{B\omega}}{\Omega - 1} \quad 5$$

$$R_L = \frac{\sum_{\omega=1}^{\Omega} R_{L\omega}}{\Omega - 1} \quad 6$$

$$R_A = \frac{\sum_{\omega=1}^{\Omega} R_{A\omega}}{\Omega - 1} \quad 7$$

$$R_S = \frac{\sum_{\omega=1}^{\Omega} R_{S\omega}}{\Omega - 1} \quad 8$$

Onde:

ω = a ordem do canal ($\omega = 1, 2, 3, \dots, \Omega$);

Ω = ordem da bacia;

$R_{B\omega}, R_{L\omega}, R_{A\omega}$ e $R_{S\omega}$ = razão de progressão entre sub-bacias consecutivas.

Logo, este procedimento pressupõe que a evolução geomorfológica entre as ordens ocorre de forma homogênea e linear, desconsiderando a variabilidade entre as sub-bacias. Embora seja de fácil aplicação e interpretação, tal método pode induzir à subestimação ou superestimação das razões geomorfológicas em bacias, onde a distribuição dos parâmetros morfométricos apresenta elevada dispersão ou comportamento assimétrico, limitando a representatividade física das razões estimadas e aumentando significativamente a incerteza.

O valor esperado para a razão geomorfológica R_B , segundo Strahler (1964), é entre 3 e 5. Já os valores de R_A geralmente se encontram entre 3 e 6, segundo Smart (1978). Por fim, o valor de R_L apresenta-se entre 1,5 e 3,5, conforme Smart (1978). O parâmetro R_S é bastante variável e ainda pouco utilizado, no entanto, pode-se citar o trabalho Vestena e Kobiyama (2010) que obteve valor de R_S igual a 2,7 para a bacia do rio Caeté, Alfredo Wagner, SC (Tabela 1).

Método de estimação 2

Nesta metodologia as razões geomorfológicas representativas da bacia são obtidas por meio de um modelo de regressão, linear ou não linear, executado com base na média dos parâmetros morfométricos de cada ordem ω . As razões geomorfológicas R_B, R_L, R_A e R_S são estimadas com base no coeficiente potencial da função ajustada, conforme as equações (9) e (10).

$$f(\omega) = b \cdot \exp^{a\omega} \text{ sendo, } R = \exp^{|a|} \quad 9$$

ou

$$f(\omega) = b \cdot 10^{a\omega} \text{ sendo, } R = 10^{|a|} \quad 10$$

Onde:

$f(\omega)$ = parâmetros morfométricos $N_\omega, \bar{L}_\omega, \bar{A}_\omega$ e \bar{s}_ω de cada ordem de classificação ω ;

ω = a ordem da sub-bacia ($\omega = 1, 2, 3, \dots, \Omega$);

Ω = ordem da bacia;

R = razões geomorfológicas R_B, R_L, R_A e R_S ;

a = razão de progressão potencial do ajuste;

b = parâmetro complementar de ajuste do modelo, não é relevante para o estudo.

Logo, no **Método 2** prevê a aplicação de um modelo de ajuste agregando os dados morfométricos das sub-bacias de mesma ordem (ω) em sua medida de tendência central

Tabela 1. Razões Geomorfológicas obtidas por Vestena e Kobiyama (2010).

Ordem (w)	Nw	log10 Nw	Rb	Lw média	log10 Lw	R1	Sw média	log10 Sw	Rs	Área total (km²)	Aw média (km²)	log10 Aw	Ra
1°	252	2,40	4,3	718,3	2,9	1,6	0,194	-0,7	1,4	92,40	0,4	-0,4	4,4
2°	58	1,76	4,8	1126,3	3,1	1,9	0,135	-0,9	1,4	92,56	1,6	0,2	4,2
3°	12	1,08	3,0	2122,4	3,3	2,2	0,099	-1,0	2,3	80,70	6,7	0,8	4,3
4°	4	0,60	4,0	4698,9	3,7	3,3	0,042	-1,4	5,5	115,84	29,0	1,5	5,7
5°	1	0,00	-	15666,0	4,2	-	0,008	-2,1	-	163,76	163,8	2,2	-
Média	-	-	4,0	-	-	2,3	-	-	2,7	-	-	-	4,6

$\bar{M}_{\omega i}$, de acordo com a equação (11). Para cada valor independente ω , calcula-se a razão R_{ω} de progressão conforme as equações (5), (6), (7) e (8). Posteriormente, o modelo é ajustado aos pares (ω, R_{ω}) , conforme as equações (9) e (10).

$$\bar{M}_{\omega} = \frac{1}{n_{\omega}} \sum_{i=1}^{n_{\omega}} M_{\omega i} \quad 11$$

Como exemplo, apresenta-se na Figura 4 o trabalho realizado por Steffen et al. (2009), onde foi utilizado o **Método 2** para estimar as razões geomorfológica R_B , R_L e R_A . Percebe-se que o **Método 2** também reduz a capacidade do modelo em representar a variabilidade dos dados morfométricos em torno de sua medida de tendência central, podendo ser apontadas as seguintes limitações:

- As variações internas dos dados morfométricos dos grupos são negligenciadas;
- A incerteza associada ao fenômeno pode ser subestimada;
- A estimativa do parâmetro pode sofrer viés, especialmente em situações de heterogeneidade dos dados morfométricos.

Assim, embora as abordagens baseadas na média possam ser úteis para fenômenos estritamente determinísticos ou sistemas com dispersão negligenciável, ela é inadequada para contextos em que a variabilidade interna carrega significado físico relevante. Com base na análise dos resultados encontrados por Steffen et al.

(2009), para as razões geomorfológicas estimadas por meio dos **Métodos 1 e 2**, verifica-se a existência de diferenças significativas das estimativas conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2. Razões Geomorfológicas obtidas por Steffen et al. (2009).

	Rb	Rl	Ra
Método 1	4,34	1,87	1,27
Método 2	3,21	1,82	1,60

Observa-se claramente a influência do método de estimação nas razões geomorfológicas representativas da bacia, principalmente com o aumento quantitativo do número de variáveis utilizadas na estimação. Baseado neste contexto, propõe-se um refinamento metodológico no processo de estimação das razões geomorfológicas, denominado no presente artigo como **Método 3 - método de dispersão dos parâmetros morfométricos**.

Método de estimação 3 - método de dispersão dos parâmetros morfométricos

O método proposto utiliza, essencialmente, assim como no **Método 2**, um modelo de regressão linear ou não linear, para estimação das razões geomorfológicas R_B , R_L , R_A e R_s , conforme as equações (9) e (10).

No entanto, o procedimento metodológico proposto no **Método 3** prevê que o ajuste ao modelo deve ser realizado, considerando a dispersão de todos os dados morfométricos (N_{ω} , $L_{\omega i}$, $A_{\omega i}$ e $S_{\omega i}$) em função de suas respectivas ordens ω , diferentemente do **Método 2**, que opera com a média destes parâmetros (N_{ω} , \bar{L}_{ω} , \bar{A}_{ω} , e \bar{S}_{ω}).

Matematicamente, cada par $(\omega_i, M_{\omega i})$ é tratado como uma observação independente. O modelo é ajustado de forma a minimizar a função de erro sobre o conjunto completo de dados, sem agregação prévia. Formalmente, busca-se minimizar a equação (12).

$$\text{Erro Total} = \sum_{\omega, i} [M_{\omega i} - \hat{M}(\omega_i)]^2 \quad 12$$

Onde: $\hat{M}(\omega_i)$ é a função ajustada.

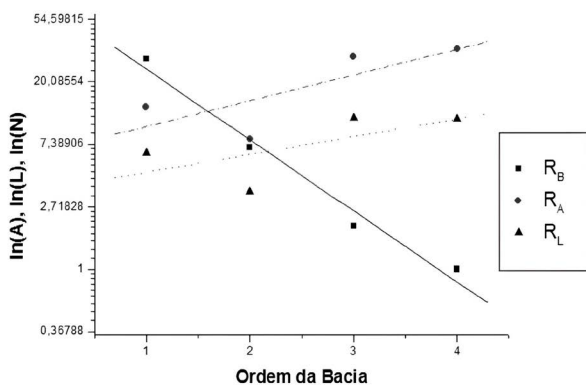


Figura 4. Aplicação do Método para Obtenção das Razões Geomorfológicas.

Essa abordagem preserva a estrutura de dispersão dos dados e permite que o modelo reconheça padrões mais sutis, como variâncias heterocedásticas, *clusters* ou tendências assimétricas. Entre suas principais vantagens, destacam-se:

- Representação mais fiel da complexidade do fenômeno estudado;
- Estimativas mais robustas dos parâmetros, com intervalos de confiança mais realistas;
- Melhor detecção de comportamentos anômalos e de relações não lineares.

Apesar de, em alguns casos, resultar em ajustes visivelmente mais "rústicos" ou com maior erro médio quadrático, essa metodologia fornece uma descrição mais completa do sistema, que é crucial para modelos preditivos e análises de sensibilidade.

Como pode-se verificar nas Figuras 8 e 9, o **Método 3** possibilita a incorporação da dispersão dos dados na estimativa das razões geomorfológicas (R_L , R_A e R_S). Já a razão de bifurcação (R_B) resulta na mesma resposta do **Método 2**.

Neste sentido, o método proposto neste trabalho, (**Método 3**) pretende contribuir para a redução da incerteza da estimativa, por meio do aumento da representatividade amostral.

Cabe observar que, neste trabalho, os resultados apresentados para o **Método 2** e **Método 3**, foram obtidos por meio de modelos de regressão não lineares, baseados na equação (9), onde aplica-se um algoritmo do tipo *Gauss-Newton*, com 200 iterações e tolerância de 0,0001.

RESULTADOS

Análise dos dados morfométricos

Os resultados da etapa de processamento do MDE de cada bacia foram organizados em suas respectivas classes tipológicas de comprimento dos canais, das áreas de contribuição e declividade média, ordenadas conforme o critério de Strahler (1964). Os resultados obtidos foram analisados e são apresentados na Figura 5 e no Anexo 1.

Pode-se observar um crescente aumento do comprimento e da área média com o aumento da ordem da sub-bacia, o que corrobora com os princípios da Lei de Horton (1945), embora tenham sido identificadas exceções com relação a área média das bacias do Itapocu, Tingui e UFSC, onde os níveis de dispersão encontrados quebram essa tendência.

Análise das razões geomorfológicas

Realizou-se a estimativa das razões geomorfológicas para todas as bacias estudadas, segundo os dois métodos utilizados nos estudos atuais (**Método 1** e **2**) e o método proposto no presente trabalho (**Método 3**). Os resultados de forma resumida são apresentados na Tabela 3.

As razões geomorfológicas de bifurcação ficaram entre 3,0 e 6,0, com limite superior maior que o proposto por Strahler (1964). Verificou-se que a rede de canais é influenciada diretamente pela declividade da bacia hidrográfica, sendo a razão de bifurcação maior quanto menor for a incli-

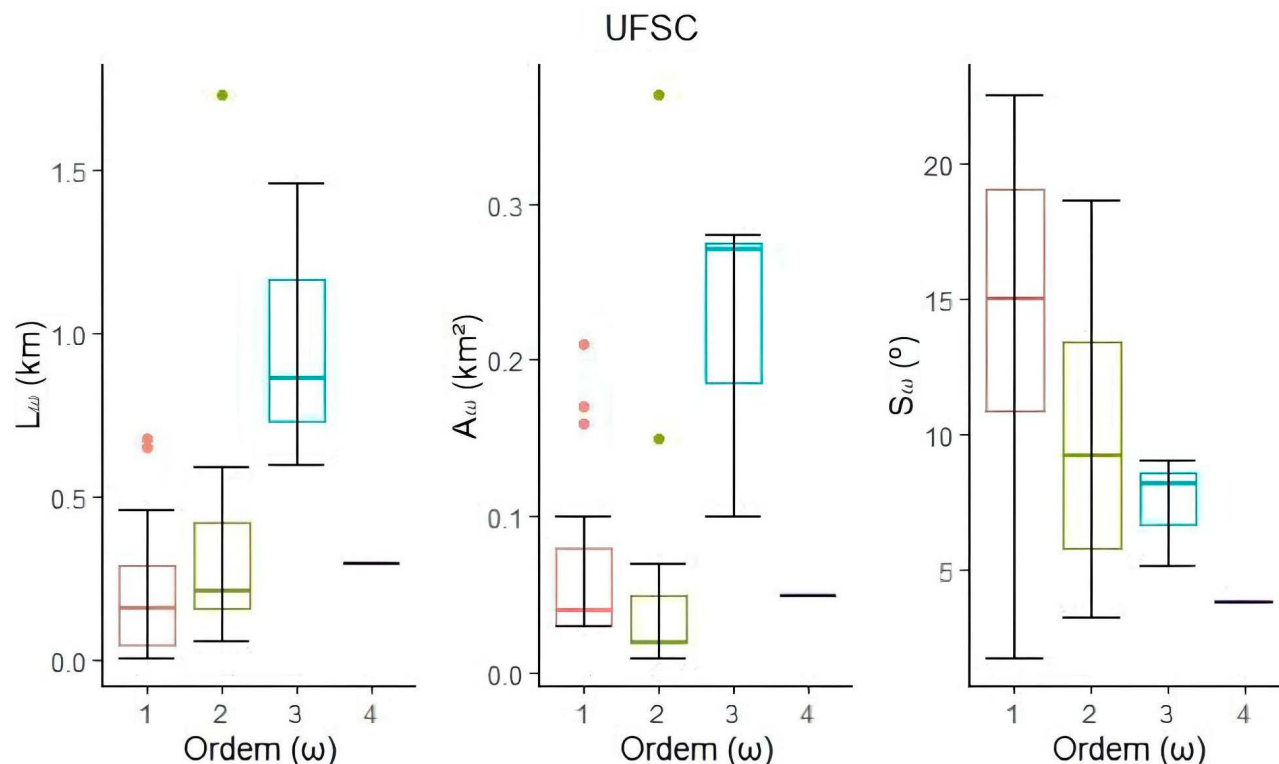


Figura 5. Análise de dispersão dos dados morfométrico da bacia hidrográfica da UFSC (continuação no Anexo 1).

Tabela 3. Razões geomorfológicas das bacias estudadas segundo os três métodos

	Método 1				Método 2				Método 3				
	μ	CV	Int. Conf. 95% p/ μ	β	CV	Int. Conf. 95% p/ β	β	CV	Int. Conf. 95% p/ β	β	CV	Int. Conf. 95% p/ β	
UFSC	RB	3,46	12%	3,07	3,86	1%	3,91	3,71	1%	3,53	3,71	1%	3,91
	RL	1,58	72%	0,47	2,69	293%	*	1,15	293%	*	1,55	27%	1,22
	RA	1,51	99%	0,05	2,96	500%	*	1,09	500%	*	1,39	38%	1,05
	RS	0,64	27%	0,47	0,81	22%	2,33	1,47	22%	1,07	1,44	36%	1,98
PITEU	RB	3,50	61%	1,10	5,90	15%	*	4,48	15%	1,01	4,48	15%	*
	RL	3,37	103%	-	7,31	40%	*	4,24	40%	*	2,93	22%	1,82
	RA	3,99	119%	-	9,36	53%	*	4,81	53%	*	2,41	28%	1,35
	RS	0,80	24%	0,58	1,02	36%	*	1,31	36%	*	1,39	97%	10,20
ITARIRI	RB	2,92	54%	1,36	4,48	16%	4,68	4,15	16%	3,61	4,15	16%	4,68
	RL	1,51	28%	1,10	1,92	20%	1,07	1,38	20%	1,95	1,45	27%	1,17
	RA	1,27	3%	1,23	1,31	4%	1,21	1,27	4%	1,32	1,27	42%	1,00
	RS	0,84	33%	0,57	1,11	69%	2,04	1,16	69%	1,34	1,07	78%	1,20
VARGEM GRANDE	RB	6,50	76%	0,90	12,10	24%	*	5,47	24%	2,28	5,47	24%	*
	RL	3,85	70%	0,78	6,92	29%	*	2,34	29%	*	3,52	9%	2,87
	RA	3,10	64%	0,86	5,34	32%	*	2,09	32%	*	2,75	9%	2,28
	RS	0,75	12%	0,65	0,85	18%	3,40	1,32	18%	1,42	1,12	93%	1,43
PARQUE TINGUI	RB	3,61	39%	2,24	4,98	3%	5,17	4,31	3%	3,71	4,31	3%	5,17
	RL	2,19	55%	1,01	3,37	28%	1,07	1,83	28%	*	2,06	9%	1,82
	RA	2,17	55%	0,99	3,35	15%	1,58	2,49	15%	*	1,95	8%	1,72
	RS	0,99	21%	0,78	1,20	992%	1,26	1,01	992%	1,25	1,05	117%	1,07
CGH CAJU	RB	3,70	68%	1,23	6,17	16%	3,63	3,13	16%	2,63	3,13	16%	3,63
	RL	1,95	32%	1,33	2,57	25%	1,08	1,69	25%	*	1,90	8%	1,72
	RA	1,78	53%	0,86	2,70	32%	1,07	1,59	32%	*	1,70	11%	1,50
	RS	1,22	31%	0,85	1,59	48%	1,29	1,24	48%	2,49	1,11	82%	1,12
SALTO DAS FLORES	RB	4,47	29%	3,21	5,73	1%	5,95	5,36	1%	4,87	5,36	1%	5,95
	RL	3,04	7%	2,83	3,25	2%	2,65	2,92	2%	3,24	3,01	6%	2,66
	RA	2,32	29%	1,66	2,98	6%	1,94	2,36	6%	3,07	2,32	7%	2,07
	RS	1,01	15%	0,86	1,16	295%	1,21	1,01	295%	1,17	1,03	114%	1,11

*Impossível estimar através do método estatístico utilizado.

Tabela 3. Razões geomorfológicas das bacias estudadas segundo os três métodos (continuação)

	Método 1				Método 2				Método 3				
	μ	CV	Int. Conf. 95% p/ μ	β	CV	Int. Conf. 95% p/ β	β	CV	Int. Conf. 95% p/ β	β	CV	Int. Conf. 95% p/ β	
MIRIM DOCE	RB	4,35	7%	4,05	4,65	4,54	0%	4,65	2,86	4,54	0%	4,65	2,86
	RL	3,47	69%	1,12	5,82	5,14	18%	*	*	3,19	5%	2,81	3,73
	RA	2,95	78%	0,71	5,19	4,73	18%	*	*	2,67	6%	2,35	3,07
	RS	0,97	44%	0,55	1,39	1,04	315%	1,97	1,72	1,21	45%	1,49	1,03
PCH JOSÉ BARASUOL	RB	3,75	36%	2,57	4,93	3,16	7%	3,42	2,91	3,16	7%	3,42	2,91
	RL	1,92	26%	1,48	2,36	1,62	22%	1,25	2,46	1,91	6%	1,78	2,06
	RA	1,61	29%	1,20	2,02	1,55	20%	1,23	2,16	1,62	8%	1,50	1,74
	RS	1,09	17%	0,92	1,26	1,02	167%	1,10	1,15	1,09	36%	1,02	1,15
PCH FAZENDA VELHA	RB	3,80	36%	2,60	5,00	4,73	1%	4,94	4,53	4,73	1%	4,94	4,53
	RL	2,14	70%	0,83	3,45	1,41	86%	*	*	1,85	5%	1,74	1,95
	RA	1,94	70%	0,76	3,12	1,39	91%	*	*	1,77	6%	1,66	1,88
	RS	1,11	10%	1,01	1,21	1,14	15%	1,07	1,21	1,15	14%	1,11	1,20
ITAPOCU	RB	3,32	20%	2,73	3,90	4,09	3%	4,69	3,63	4,09	3%	4,69	3,63
	RL	2,31	55%	1,19	3,43	2,26	28%	1,31	*	1,89	5%	1,77	2,02
	RA	2,36	78%	0,74	3,97	2,21	36%	1,13	*	1,52	8%	1,56	1,80
	RS	1,13	24%	0,89	1,37	1,07	111%	1,39	1,18	1,03	120%	1,04	1,09
GUATAPARÁ BAIXO	RB	4,10	31%	2,99	5,21	5,16	1%	5,47	4,90	5,16	1%	5,47	4,90
	RL	2,50	37%	1,68	3,32	1,92	13%	1,54	2,65	2,36	2%	2,27	2,44
	RA	2,12	50%	1,18	3,06	1,78	14%	1,45	2,38	2,04	3%	1,97	2,12
	RS	1,04	8%	0,97	1,11	1,09	21%	1,03	1,15	1,05	84%	1,04	1,13
PCH ANGELINA	RB	4,12	37%	2,78	5,46	4,81	1%	5,17	4,53	4,81	1%	5,17	4,53
	RL	2,33	80%	0,70	3,96	1,29	165%	*	*	1,87	6%	1,76	1,99
	RA	2,09	87%	0,49	3,69	1,27	177%	*	*	1,75	6%	1,65	1,86
	RS	1,02	10%	0,93	1,11	1,07	26%	1,01	1,13	1,03	61%	1,01	1,07
ERMO	RB	3,21	23%	2,62	3,80	5,26	4%	6,36	4,48	5,26	4%	6,36	4,48
	RL	1,64	45%	1,05	2,23	1,21	56%	1,06	1,69	1,57	7%	1,49	1,66
	RA	1,35	56%	0,75	1,95	1,13	83%	1,14	1,52	1,40	10%	1,32	1,48
	RS	0,66	47%	0,41	0,91	1,43	30%	2,05	1,13	1,26	41%	1,56	1,08

*Impossível estimar através do método estatístico utilizado.

nação da bacia hidrográfica, comportamento esperado pois, conforme Negri e Fill (2023), quanto maior a declividade da bacia, maior sua densidade de drenagem.

O comportamento das razões geomorfológicas de comprimento e área foi inverso ao da razão geomorfológica de bifurcações, sendo menores quanto menor a declividade média da bacia e seus valores variaram entre 1,0 e 5,0, para ambas as razões geomorfológicas, sendo semelhantes aos valores encontrados por Smart (1978).

As razões geomorfológicas de declividade apresentaram resultados bem homogêneos, em torno de 1,0, sendo possível concluir que as Leis Horton, não se aplicam com eficiência para a caracterização do comportamento de variação das declividades médias das sub-bacias, entre as ordens das sub-bacias.

DISCUSSÃO

Verificou-se que os padrões de dispersão dos dados morfométricos variaram de acordo a ordem de classificação das sub-bacias (ω), corroborando com a tese de que a estimação das razões geomorfológica, baseada unicamente na média, conforme o método de Horton (1945) (**Método 1**) ou conforme o método utilizado por Steffen et al. (2009) (**Método 2**), pode não representar suficientemente este comportamento. Na Figura 6, elaborada com base nos dados morfométrico da sub-bacias de ordem 1,0 da UFSC, pode-se observar que isso ocorre devido a assimetria dos dados de comprimento dos rios e da área de contribuição das sub-bacias. Isto é, a dispersão dos dados em cada ordem ω afeta os resultados do modelo de regressão, conforme proposto por Fontana e Pumi (2015). Nos **Métodos 1** e **2**, esta dispersão amostral não é introduzida no modelo.

As curvas dos ajustes dos **Métodos 2** e **3**, para cada bacia, são apresentadas nas Figuras 7, 8 e 9 e nos Anexos 2, 3 e 4, com os intervalos de confiança de 95% (linha verde tracejada) e de predição (linha preta tracejada).

Na Figura 6 é possível identificar a tendência de progressão geométrica decrescente do número de bifurcações, sendo a razão de bifurcação muito bem representada pela

técnica de regressão simples não-linear (**Método 2**), utilizada por diversos autores, tais como Mesa (2006), Steffen et al. (2009), Vestena e Kobiyama (2010) e Kaliraj e Chandrasekar (2015). Somente para a bacia de Vargem Grande os resultados foram menos satisfatórios, o que aparentemente foi devido à qualidade dos dados geoespaciais. Cabe ressaltar que, para a estimação das razões de bifurcação, os **Métodos 2** e **3** apresentam resultados idênticos. Na Figura 10, é apresentada a comparação dos resultados obtidos para a estimação do R_B de cada bacia para o **Método 1** e para os **Métodos 2** e **3** (idênticos), onde identificou-se que o **Método 1**, resultou em razões de bifurcação menores que as encontradas nos **Métodos 2** e **3**, para todas as bacias, bem como maior incerteza na estimação.

Nos gráficos de regressão (Figuras 7 e 8) verifica-se o comportamento crescente dos comprimentos médios dos canais e das áreas médias de contribuição em relação a ordem das sub-bacias. Também é possível observar-se que o ajuste do **Método 3** acompanhou melhor a dispersão dos dados, enquanto o **Método 2** tendeu a superestimar ou subestimar o comportamento real dos parâmetros.

Na Figura 11 é apresentada a comparação dos resultados obtidos para a estimação do R_L de cada bacia. Os resultados encontrados variaram entre 1,0 e 5,0, sendo observada maior proximidade dos valores obtidos entre os **Métodos 1** e **3**. O **Método 3** foi o que apresentou nova-

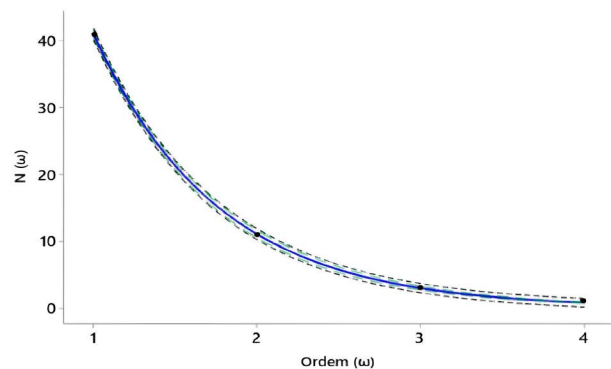


Figura 7. Regressões das razões de bifurcação da bacia da UFSC (continuação no Anexo 2).

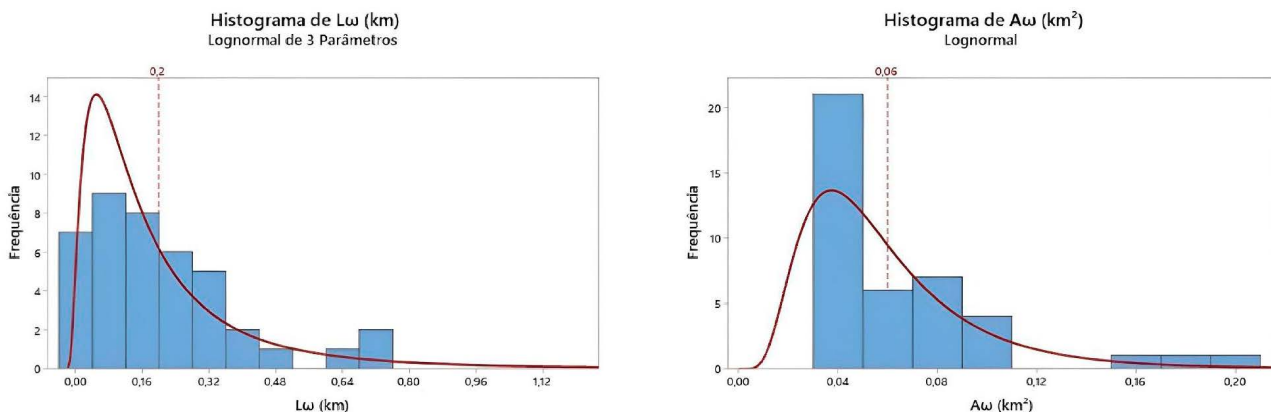


Figura 6. Análise de dispersão para Bacia da UFSC – $\omega = 1,0$.

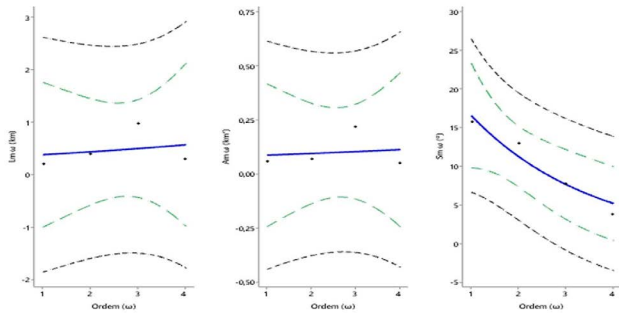


Figura 8. Regressões das razões do comprimento, área e declividades pelo Método 2 da bacia da UFSC (continuação no Anexo 3).

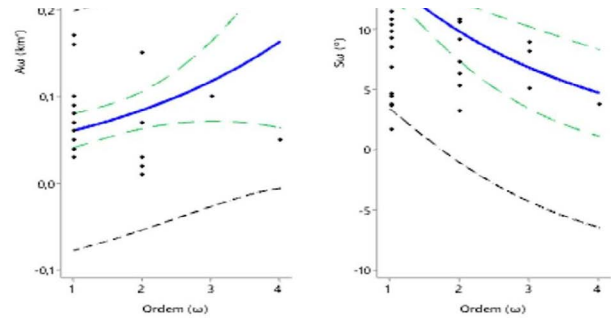


Figura 9. Regressões das razões do comprimento, área e declividades pelo Método 3 da bacia da UFSC (continuação no Anexo 4).

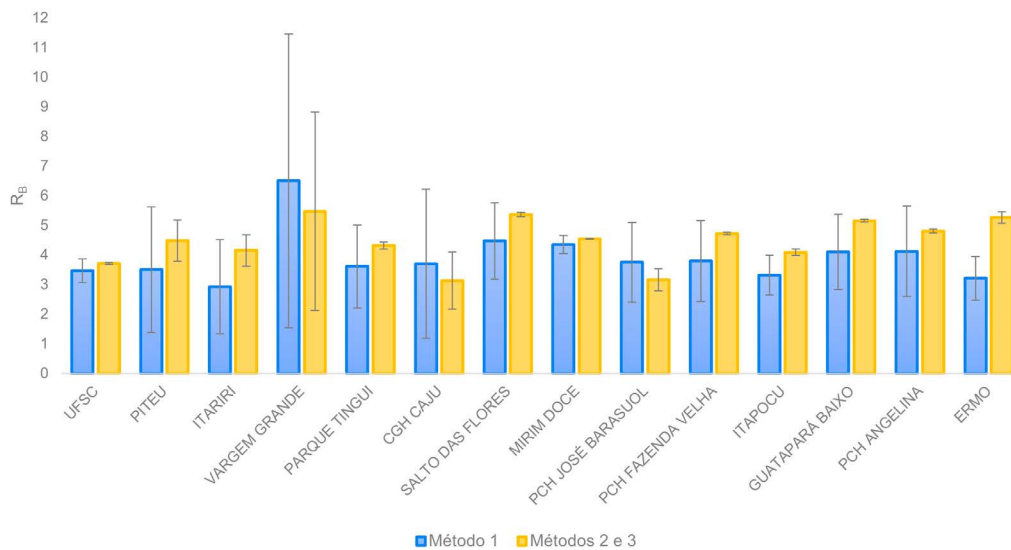


Figura 10. Análise das razões de bifurcação das bacias.

mente menor amplitude no intervalo de confiança (95%), apresentando, também, menor incerteza de estimação.

A comparação da estimativa do R_A de cada bacia é apresentada na Figura 12, sendo o comportamento muito similar ao encontrado para o R_L . O **Método 3** caracterizou-se pela menor amplitude no intervalo de confiança (95%). Seus resultados ficaram também entre 1,0 e 5,0.

Portanto, para as razões de comprimento dos canais R_L e área das sub-bacias R_A , o **Método 3** apresentou melhor resultado para todas as bacias (menores coeficientes de variação e intervalos de confiança mais estreitos), evidenciando maior precisão na estimativa dos parâmetros, principalmente por incorporar a dispersão dos dados morfométricos, ajustando-se a curva, tanto para suas medidas de tendência central, quanto para sua dispersão amostral.

Tais resultados convergem com as observações de Steffen et al. (2009) e Vestena e Kobiyama (2010), que já recomendavam a utilização do **Método 2**, identificando a necessidade de melhorias ao método de estimação proposto nos anos 50. Com a força computacional disponível atualmente, simplificações na estimação, como as do **Método 1**, não se justificam.

Uma ressalva a ser feita é quando a exutória das sub-bacia de maior ordem encontra-se muito próxima de uma bifur-

cação. Neste caso, o comprimento médio e a área média obtidos para a sub-bacia de maior ordem não são representativas de suas características morfométricas reais. Observou-se que isso influencia significativamente a estimação das razões geomorfológicas de comprimento e área. Dessa forma, para estes casos, recomenda-se a estimação das razões geomorfológicas utilizando o comprimento e área total da sub-bacia, desconsiderando-se a posição da exutória.

Por fim, as razões geomorfológicas R_s apresentaram valores próximos a 1,0 para a maioria das bacias, com tendência variável, ora crescente, ora decrescente e horizontal. Isso sugere que a razão das declividades médias não segue uma progressão geométrica típica, distinguindo-se das demais razões geomorfológicas estudadas. Verificou-se que o comportamento da variação da média das declividades médias, entre as classes de sub-bacias de ordem ω , pode ser bem representada por uma aproximação linear, sendo a declividade média da bacia, obtida de forma trivial a partir do MDE, suficiente para representá-la. De toda maneira, os **Métodos 1 e 3**, se mostraram mais eficientes para a estimação da razão das declividades médias (R_s), como pode ser observado na Figura 13.

Por tanto, de forma análoga a Vestena e Kobiyama (2010), verificou-se que as Leis de Horton (1945) não são

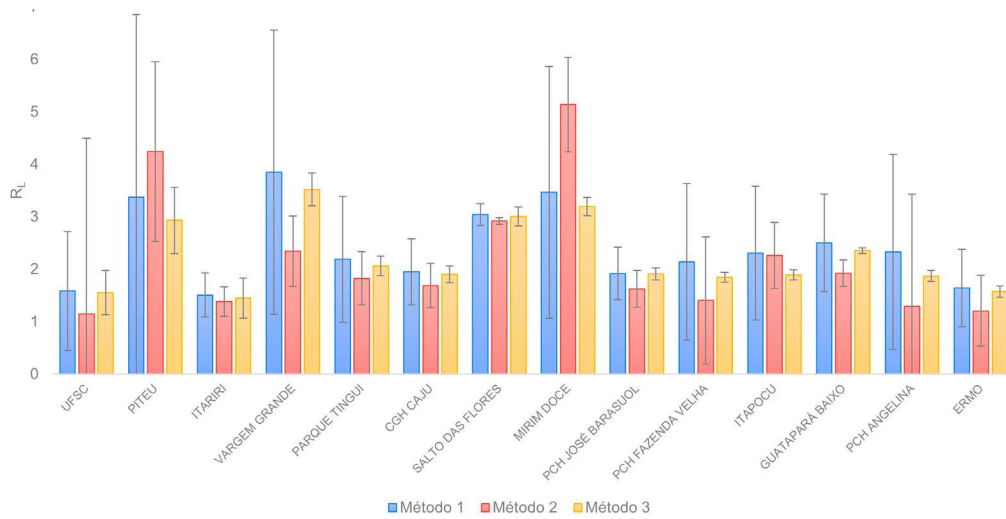


Figura 11. Análise das razões do comprimento das bacias.

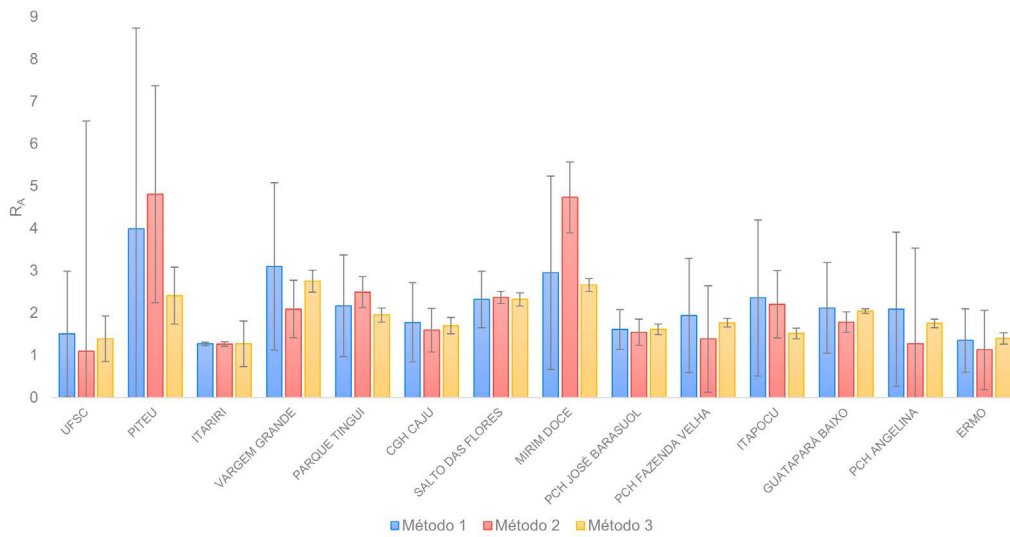


Figura 12. Análise das razões da área das bacias.

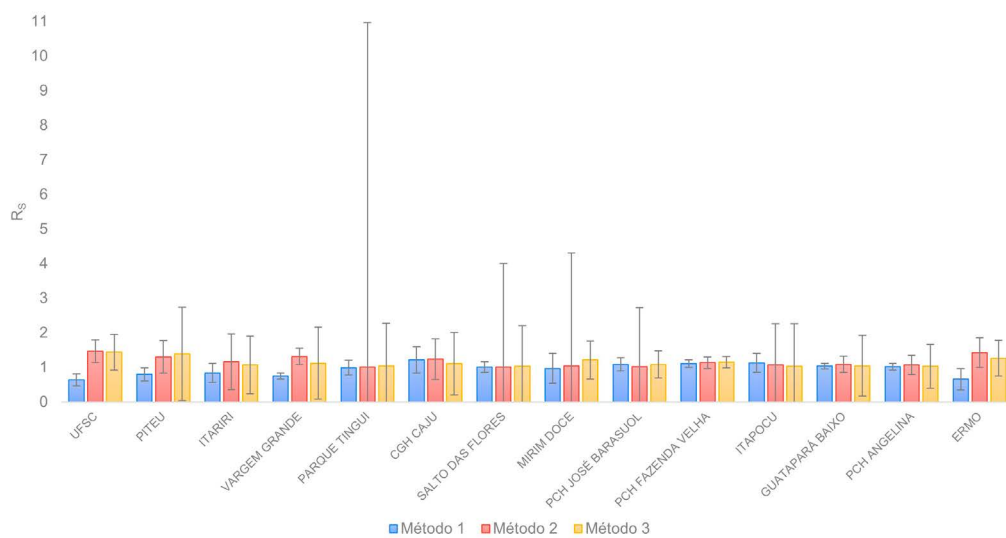


Figura 13. Análise das razões da declividade média das bacias.

suficientes para explicar a variabilidade das declividades médias entre as sub-bacias. A constante de proporcionalidade (R_s) não apresenta um sentido único em sua tendência, como ocorre para as outras razões geomorfológicas. Como exemplo, o comportamento das declividades médias das sub-bacias Tingui, CGH Caju, Mirim Doce, PCH Fazenda Velha, Itapocu, Guatapar Baixo e PCH Angelina apresentou tendência de progressão crescente, já as sub-bacias da UFSC, Piteu, Itariri, Vargem Grande, Salto Flores e Ermo apresentaram tendência de progressão decrescente e as sub-bacias da PCH José Barasuol não apresentaram coeficiente angular significativo.

Relacionando o perfil hipsométrico das bacias estudadas com os resultados obtidos para o R_s nota-se que estes parâmetros podem ser associados a concavidade ou convexidade das bacias. Dessa forma, a tendência da razão de declividade (R_s) pode ser útil para classificar a bacia como côncava, convexa ou uniforme, conforme ilustrado conceitualmente nas Figuras 14, 15 e 16.

Por fim, a estimativa dos parâmetros médios característicos de cada ordem (ω) parametriza o HUIG, e pode ser realizada por meio das equaes (13), (14), (15) e (16), utilizando as razões estimadas pelo **Método 3**.

$$N_\omega = R_B^{(\Omega - \omega)} \tag{13}$$

$$\bar{L}_\omega = \bar{L}_\Omega R_L^{(\omega - \Omega)} \tag{14}$$

$$\bar{A}_\omega = \bar{A}_\Omega R_A^{(\omega - \Omega)} \tag{15}$$

$$\bar{S}_\omega = \bar{S}_\Omega R_S^{(\omega - \Omega)} \tag{16}$$

Onde:

ω = a ordem do canal ($\omega = 1, 2, 3, \dots, \Omega$);

Ω = a ordem da bacia;

N_ω = o número de canais de ordem ω ;

\bar{L}_ω = o comprimento médio de todos os canais de ordem ω ;

\bar{A}_ω = a área média de todas as sub-bacias de ordem ω ;

\bar{S}_ω = média a declividade média das sub-bacias de ordem ω .

Cabe ressaltar algumas consideraes práticas:

- A equao (13) mostrou-se bem eficiente para a descrio do comportamento das bifurcaes dos cursos d'água das bacias, pois a progressão geométrica, Lei de Horton,  bem aderente ao modelo;
- As equaes (14) e (15) podem apresentar distores nos resultados, a depender da localizao relativa da exutória na sub-bacia de maior ordem (Ω);
- A razão de declividade, representada na equao (16), pode ser utilizada para representar a tendência do gradiente das declividades das sub-bacias de menor ordem para as de maior ordem, podendo indicar a predominância côncava, convexa ou uniforme da bacia.

De modo geral, a aplicao do **Método 3** demonstrou ganhos claros em termos de:

- **Reduo do erro quadrático médio;**
- **Menor distoro para bacias com alta dispersão dos dados** (por exemplo, UFSC, Parque Tingui, Itapocu);
- **Maior robustez estatística**, com intervalos de confiança mais compactos mesmo em bacias com variabilidade elevada (por exemplo, Piteu e Vargem Grande).

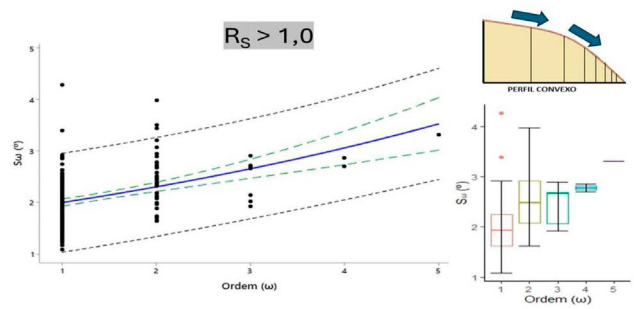


Figura 14. Representao esquemática do comportamento das razões de declividade média e a representao do perfil médio da bacia – PCH Fazenda Velha.

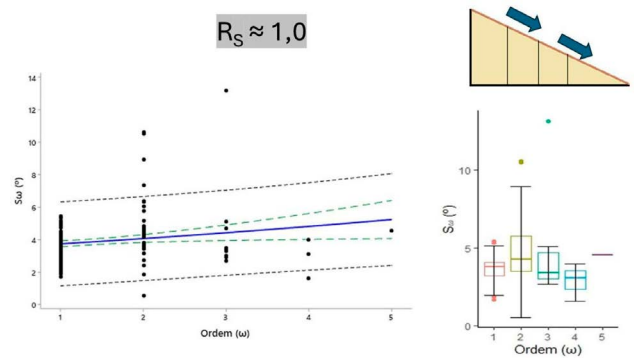


Figura 15. Representao esquemática do comportamento das razões de declividade média e a representao do perfil médio da bacia – PCH José Barasuol.

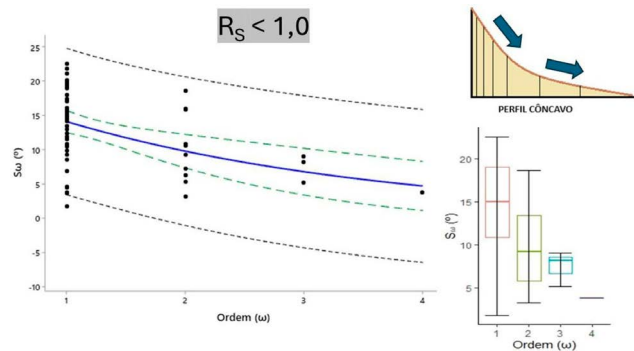


Figura 16. Representao esquemática do comportamento das razões de declividade média e a representao do perfil médio da bacia – UFSC.

CONCLUSÕES

A estimativa das razões geomorfológicas constitui um elemento essencial na parametrizao de modelos hidrológicos baseados nas características físicas de bacias hidrográficas. A comparao entre três métodos de cálculo — dois amplamente consolidados na literatura e um novo, proposto neste estudo — permitiu identificar avanços relevantes para a reduo das incertezas associadas  modelagem dessas razões.

A principal inovao metodológica apresentada no método reside na incorporao da dispersão dos dados

morfométricos individuais no ajuste de regressão, configurando um avanço significativo em relação às abordagens tradicionais, que se apoiam exclusivamente em estatísticas agregadas. Ao preservar a variabilidade estrutural dos dados, o **Método 3** proporciona estimativas mais robustas e maior aderência aos comportamentos naturais das bacias, especialmente em contextos de heterogeneidades espacial e funcional entre sub-bacias de diferentes ordens.

Verificou-se que a razão de bifurcação (R_b) mantém estabilidade entre os métodos, refletindo a solidez da estrutura hierárquica da rede de drenagem. O número de bifurcações das bacias hidrográficas é adequadamente representado pela Lei de Horton, sendo recomendada sua estimativa, sobretudo para bacias de ordem superior a três, por meio de métodos de regressão (**Métodos 2 e 3**), que permitem melhor ajustes à razão de progressão geométrica.

Para as razões de comprimento (R_L) e de área (R_A), o método proposto demonstrou desempenho superior ao capturar nuances do comportamento hidrológico que se perdem quando se utilizam médias simples. Dessa forma, devido à melhor representação da dispersão dos parâmetros fisiográficos, recomenda-se a adoção do **Método 3**, pois ele permite incorporar essa variabilidade na estimativa das razões de progressão geométrica, aumentando significativamente a precisão dos resultados.

No caso da razão de declividade (R_s), observou-se que sua variabilidade não segue um padrão de progressão geométrica, evidenciando a necessidade de análises específicas, mais alinhadas à morfologia hipsométrica da bacia. Ainda assim, este parâmetro pode ser utilizado como indicador para a caracterização da tendência hipsométrica, permitindo classificá-la, conforme o valor obtido, como côncava, convexa ou uniforme.

A relevância prática do **Método 3** torna-se evidente ao proporcionar intervalos de confiança mais estreitos e menor coeficiente de variação, mesmo em bacias com elevado grau de assimetria ou dispersão. Além disso, os resultados reforçam a viabilidade de sua aplicação em modelos como o Hidrograma Unitário Instantâneo Geomorfológico (HUIG), ampliando as possibilidades de uso em estudos que exijam elevada confiabilidade na estimativa de parâmetros geomorfológicos.

Conclui-se, portanto, que este estudo não apenas reafirma a importância das razões geomorfológicas na modelagem hidrológica, mas também apresenta uma abordagem metodológica mais sensível à complexidade dos sistemas naturais, com potencial de aplicação abrangente na engenharia de recursos hídricos.

REFERÊNCIAS

- Al-Ghamdi, K. A., Elzahrany, R. A., Mirza, M. N., Dawod, G. M. (2012). Impacts of urban growth on flood hazards in Makkah City, Saudi Arabia. *International Journal of Water Resources and Environmental Engineering*, 4(2), 23-34. Disponível em: https://academicjournals.org/article/article1379509325_Al-Ghamdi%20et%20al.pdf. Acesso em: 20 fev. 2024.
- Al-Saud, M. (2010). Assessment of flood hazard of Jeddah area 2009, Saudi Arabia. *Journal of Water Resource and Protection*, 2, 839-847. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2010.29099>
- Bajracharya, P., Jain, S. (2020). Estimation of watershed width function: a statistical approach using LiDAR data. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 34, 1997-2011. <https://doi.org/10.1007/s00477-020-01846-5>
- Bates, D. M., Watts, D. G. (2007). *Nonlinear Regression Analysis and Its Applications*. New York: Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470316757>
- Bierkens, M. F. P., Bell, V. A., Burek, P., Chaney, N., Condon, L., David, C., Roo, A. D., Doell, P., Drost, N., Famili-Etti, J. S., Flörke, M., Gochis, D. J., Houser, P., Hut, R., Keune, J., Kollet, S., Maxwell, R., Reager, J. T., Samaniego, L., Wood, E. F. (2014). Hyper-resolution global hydrological modelling: What is next? *Hydrological Processes*, 29, 310-320. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/303205772_Hyper-resolution_global_hydrological_modelling_What_is_next. Acesso em: 20 fev. 2024.
- Biron, P. M., Choné, G., Buffin-Bélanger, T., Demers, S., Olsen, T. (2013). Improvement of Streams Hydro-geomorphological Assessment Using LiDAR DEMs. *Earth Surf Process Landf*, 38(15), 1808-1821. <https://doi.org/10.1002/esp.3425>
- Bisht, S., Chaudhry, S., Sharma, S., Soni, S. (2018). Assessment of flash flood hazard zonation through geospatial technique in high altitude Himalayan watershed, Himachal Pradesh India. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 12, 35-47. <https://doi.org/10.1016/j.rsa-se.2018.09.001>
- Chavan, V. T., Gadge, P. S. (2013). Morphometric Analysis of Junana Mini Watershed Nandgoan (Kh.), Dist. Amravati, Maharashtra Using GIS. *International Journal of Science, Environment and Technology*, 2(5), 1072-1079. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/230757411_Morphometric_Analysis_at_Miniwatershed_Level_using_GIS. Acesso em: 20 fev. 2024.
- Chopra, R., Dhiman, R. D., Sharma, P. K. (2005). Morphometric Analysis Of Sub-Watersheds In Gurdaspur District, Punjab Using Remote Sensing And Gis Techniques. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 33(4), 531-539. <https://doi.org/10.1007/BF02990738>
- Dar, R. A., Chandra, R., Romshoo, S. A. (2013). Morphotectonic and lithostratigraphic analysis of intermontane Karewa basin of Kashmir Himalayas, India. *Journal of Mountain Science*, 10(1), 731-741. <https://doi.org/10.1007/s11629-013-2494-y>
- Dawod, G. M., Mirza, M. N., Khalid, A., Al-Ghamdi, K. A. (2011). GIS-based spatial mapping of flash flood hazard in Makkah City, Saudi Arabia. *Journal of Geographic Information System*, 3, 217-223. <https://doi.org/10.4236/jgis.2011.33019>

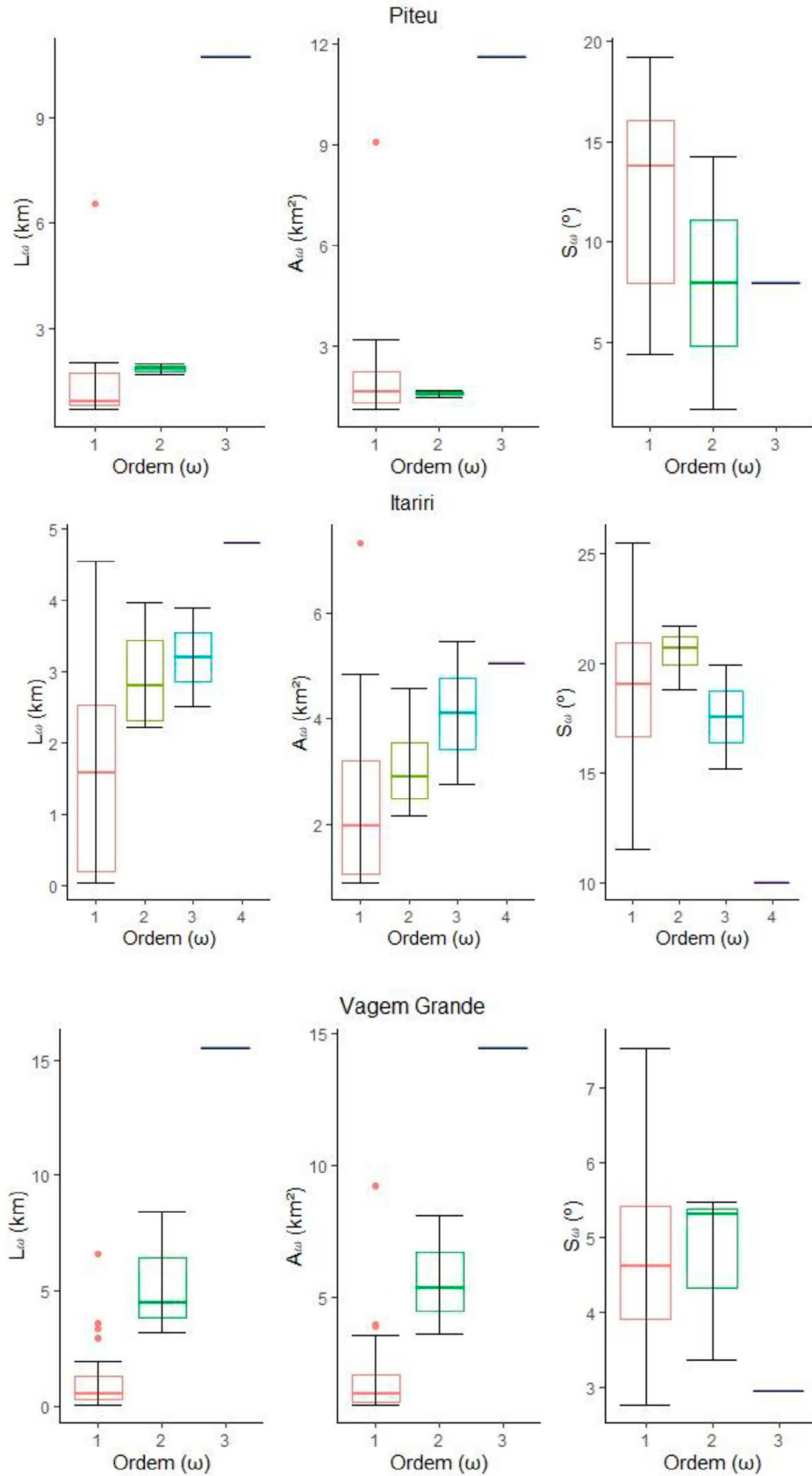
- Degetto, M., Gregoretti, C., Bernard, M. (2015). Comparative analysis of the differences between using LiDAR and contour-based DEMs for hydrological modeling of runoff generating debris flows in the Dolomites. *Frontiers in Earth Science*, 3(21). <https://doi.org/10.3389/feart.2015.00021>
- Eze, E. B., Joel, E. (2010). Morphometric parameters of the Calabar River Basin: implication for hydrologic processes. *Journal of Geography and Geology*, 2(1), 19-26. <https://doi.org/10.5539/jgg.v2n1p18>
- Fontana, G. T., Pumi, G. (2015) *Regressão Linear Robusta: O Método de TELBS e uma Aplicação a Dados de e-Commerce*. Trabalho de Conclusão de Curso. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Matemática, Departamento de Estatística. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/133722/000986118.pdf?sequence>. Acessado em: 09 abr. 2024.
- Gauchere, C., Frelat, R., Salomon, L., Rouy, B., Pandey, N., Cudenec, C. (2017). Regional Watershed Characterization and Classification With River Network Analyses. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(13), 2068-2081. <https://doi.org/10.1002/esp.4172>
- Geena, G. B., Ballukraya, P. N. (2011). Morphometric analysis of Korattalayar River Basin, Tamil Nadu, India: a GIS approach. *International journal of Geomatics and Geosciences*, 2(2), 383-391. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Morphometric-analysis-of-Korattalayar-River-basin%2C/3250cb1ac135075af70800c9d6b857de576cff57>. Acessado em: 20 fev. 2024.
- Grohmann, C. H., Riccomini, C., Alves, F. M. (2007). Srtm-Based Morphotectonic Analysis Of The Poços De Caldas Alkaline Massif, Southeastern Brazil. *Computers & Geosciences*, 33, 10-19. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2006.05.002>
- Hajam, R. A., Hamid, A., Dar, N. A., Bhat, S. U. (2013). Morphometric Analysis Of Vishav Drainage Basin Using Geo-Spatial Technology (GST). *International Research Journal of Geology and Mining*, 3(3), 136-146. Disponível em: <https://www.interestjournals.org/abstract/morphometric-analysis-of-vishav-drainage-basin-using-geospatial-technology-gst-16671.html>. Acessado em: 20 fev. 2024.
- Hamdan, A., Khozyem, H. (2018). Morphometric, Statistical, and Hazard Analyses Using ASTER Data and GIS Technique of WADI El-Mathula Watershed, Qena, Egypt. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(722). <https://doi.org/10.1007/s12517-018-4068-3>
- Horton, R. E. (1945). Erosional Development Of Streams And Their Drainage Basins: Hydrophysical Approach To Quantitative Morphology. *Bulletin of the Geological Society of America*, 56, 275-370. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1945\)56\[275:EDOSAT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56[275:EDOSAT]2.0.CO;2)
- Ifabiyi, I. P. A. (2004). A Reduced Rank Model Of Drainage Basin Response To Runoff In Upper Kaduna Catchment Of Northern Nigeria. *Geo-Studies Forum*, 2(1), 109-117.
- INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (2008). *Projeto TOPODATA, Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil*. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/topodata/>. Acessado em 13 ag. 2025.
- Jain, V., Sinha, R. (2003). Derivation of Unit Hydrograph From GIUH Analysis For A Himalayan River. *Water Resources Management*, 17, 355-375. <https://doi.org/10.1023/A:1025884903120>
- Jung, K., Niemann, J. D., Huang, X. (2011). Under what conditions do parallel river networks occur? *Geomorphology*, 132(3-4), 260-271. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.05.014>
- Jung, K., Ouarda, T. B. M. J. (2015). Analysis and Classification of Channel Network Types For Intermittent Streams In The United Arab Emirates And Oman. *Journal of Civil & Environmental Engineering*, 5(5). <https://doi.org/10.4172/2165-784X.1000183>
- Kaliraj, S., Chandrasekar, N. (2015). Morphometric Analysis of the River Thamirabarani sub-basin in Kanyakumari District, South West Coast of Tamil Nadu, India, using remote sensing and GIS. *Environmental Earth Sciences*, 73, 7375-7401. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3914-1>
- Kouli, M., Vallianatos, F., Soupios, P., Alexakis, D. (2007). GIS-based morphometric analysis of two major watersheds, Western Crete, Greece. *Journal of Environmental Hydrology*, 15(1), 1-17. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/234073211_Gis-based_morphometric_analysis_of_two_major_watersheds_Western_Crete_Greece. Acessado em: 03 out. 2025.
- Kumar, R., Kumar, S., Lohni, A. K., Neema, R. K., Singh, A. D. (2000). Evaluation of Geomorphological Characteristics of a Catchment Using GIS. *GIS India*, 9(3), 13-17. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/267271380_Evaluation_of_geomorphological_characteristics_of_a_catchment_using_GIS. Acesso em: 20 fev. 2024.
- Liu, X., Zhang, Z. (2011). Drainage Network Extraction Using LiDAR Derived DEM in Volcanic Plains. *Area*, 43(1), 42-52. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4762.2010.00955.x>
- Magesh, N. S., Chandrasekar, N. (2012). GIS Model-based Morphometric Evaluation of Tamiraparani Subbasin, Tirunelveli District, Tamil Nadu, India. *Arabian Journal of Geosciences*, 7, 131-141. <https://doi.org/10.1007/s12517-012-0742-z>
- Magesh, N. S., Chandrasekar, N., Kaliraj, S. (2012). A GIS Based Automated Extraction Tool for the Analysis of Basin Morphometry. *Bonfring International Journal of Industrial Engineering and Management Science*. 2. 32-35. Disponível em: https://www.academia.edu/6522632/A_GIS_based_Automated_Extraction_Tool_for_the_Analysis_of_Basin_Morphometry. Acessado em: 20 fev. 2024.
- Mesa, L. M. (2006). Morphometric Analysis of a Subtropical Andean basin (Tucuman, Argentina). *Environmental Geology*, 50, 235-242. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0297-y>

- Montgomery, D. C., Runger, G. C. (2010). *Applied Statistics and Probability for Engineers* (5th ed.). New York: Wiley. Disponível em: <https://selvyblog.wordpress.com/wp-content/uploads/2015/10/buku-stat-montgomery-5.pdf>. Acessado em: 03 out. 2025.
- Motulsky, H., Christopoulos, A. (2004). *Fitting Models to Biological Data Using Linear and Nonlinear Regression: A Practical Guide to Curve Fitting*. Oxford: Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/oso/9780195171792.001.0001>
- Moussa, R. (2003). On Morphometric Properties of Basins, Scale Effects and Hydrological Response. *Hydrological Processes*, 17, 33-58. <https://doi.org/10.1002/hyp.1114>
- Narendra, K., Nageswara, R. K. (2006). Morphometry of the Meghadrigedda Watershed, Visakhapatnam District, Andhra Pradesh using GIS and Resourcesat data. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 34, 101-110. <https://doi.org/10.1007/BF02991815>
- Nautiyal, M. D. (1994). Morphometric Analysis of a Drainage Basin, District Dehradun, Uttar Pradesh. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 22(4), 251-261. <https://doi.org/10.1007/BF03026526>
- Negri, R., Fill, H. (2023) Caracterização física de 14 bacias hidrográficas brasileiras: proposição do indicador da declividade média dos rios e do coeficiente de suscetibilidade de enchentes. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 28. <https://doi.org/10.1590/S1413-415220220194>
- Obi Reddy, G. P., Maji, A. K., Gajbhiye, K. S. (2002). GIS for Morphometric Analysis of Drainage Basins. *GIS Índia*, 11, 9-14. Disponível em: <https://krishi.icar.gov.in/jspui/bitstream/123456789/36214/1/GIS%20for%20Morphometric%20Analysis%20of%20River%20basins.pdf>. Acessado em: 20 fev. 2024.
- Okoko, E. E., Olujinmi, J. A. B. (2003). The Role of Geomorphic Features in Urban Flooding: the Case of Ala River in Akure, Nigeria. *International Journal of Environmental Issues*, 1(1), 192-201.
- Pareta, K., Pareta, U. (2012). Quantitative Geomorphological Analysis of a Watershed of a Ravi River Basin, H.P. India. *International Journal of Remote Sensing and GIS*, 1(1), 41-56. Disponível em: https://prod-qt-images.s3.amazonaws.com/indiawaterportal/import/sites/default/files/iwp2/quantitative_geomorphological_analysis_of_a_watershed_of_ravi_river_basin_himachal_pradesh_india_international_journal_of_remote_sensing_and_gis_2012.pdf. Acessado em: 20 fev. 2024.
- Rawat, K. S., Mishra, A. K. (2016). Evaluation of Relief Aspects Morphometric Parameters Derived from Different Sources of DEMs and Its Effects Over Time of Concentration of Runoff (tc). *Earth Science Informatics*, 9, 409-424. <https://doi.org/10.1007/s12145-016-0261-7>
- Rawat, K. S., Mishra, A. K., Tripathi, V. K. (2012). Hydro-morphometrical Analyses of Sub-himalyan Region in Relation to Small Hydro-electric Power. *Arabian Journal of Geosciences*, 6(8), 2889-2899. <https://doi.org/10.1007/s12517-012-0586-6>
- Rigon, R., Bancheri, M., Formetta, G., e Lavenne, A. (2016). The Geomorphological Unit Hydrograph from a Historical-critical Perspective. *Earth Surface Processes and Landforms*, 41(1), 27-37. <https://doi.org/10.1002/esp.3855>
- Rodriguez-Iturbe, I., Valdés, J. B. (1979). The Geomorphologic Structure Of Hydrologic Response. *Water Resources Research*, 15(6), 1409-1420. <https://doi.org/10.1029/WR015i006p01409>
- Romshoo, S. A., Bhat, S. A., Rashid, I. (2012). Geoinformatics for Assessing the Morphometric Control on Hydrological Response at Watershed Scale in the Upper Indus Basin. *Journal of Earth System Science*, 12(3), 659-686. <https://doi.org/10.1007/s12040-012-0192-8>
- Sahoo, R., Jain, V. (2018). Sensitivity of Drainage Morphometry Based Hydrological Response (GIUH) of a River Basin to the Spatial Resolution of DEM Data. *Computers & Geosciences*, 111, 78-86. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2017.10.001>
- Santos, G. O., Hernandez, F. B. T. (2013). Uso do Solo e Monitoramento dos Recursos Hídricos no Córrego do Ipê, Ilha Solteira, SP. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 17(1), 60-68. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013000100009>
- Santos, G. O., Silva, A. A., Braz, A. R. C., Carneiro, F. M. (2018). Morphometric characterization of hydrographic bodies inserted in the Municipality of Rio Verde, Goiás, as a tool for urban and agricultural planning. *Geografia Ensino & Pesquisa*, 22(17), 01-13. <https://doi.org/10.5902/2236499426572>
- Sarangi, A., Madramootoo, C. A., Enright, P. (2003). *Desenvolvimento de Interface de Usuário em ArcGIS para Estimativa de Geomorfologia de Bacias Hidrográficas*. CSAE/SCGR 2003 Meeting, Paper, 3, 120-130.
- Schumm, S. A. (1956). Evolution of Drainage Systems and Slopes in Badlands at Perth Amboy, New Jersey. *Geological Society of America Bulletin*, 67(5), 597-646. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1956\)67\[597:EODSAS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1956)67[597:EODSAS]2.0.CO;2)
- Seber, G. A. F., Wild, C. J. (2003). *Nonlinear Regression*. Hoboken: Wiley-Interscience. <https://doi.org/10.1002/0471725315>
- Shen, Y., Liu, D., Yin, J., Xiong, L., Liu, P. (2020). Integrating Hybrid Runoff Generation Mechanism Into Variable Infiltration Capacity Model to Facilitate Hydrological Simulations. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 34, 2139-2157. <https://doi.org/10.1007/s00477-020-01878-x>

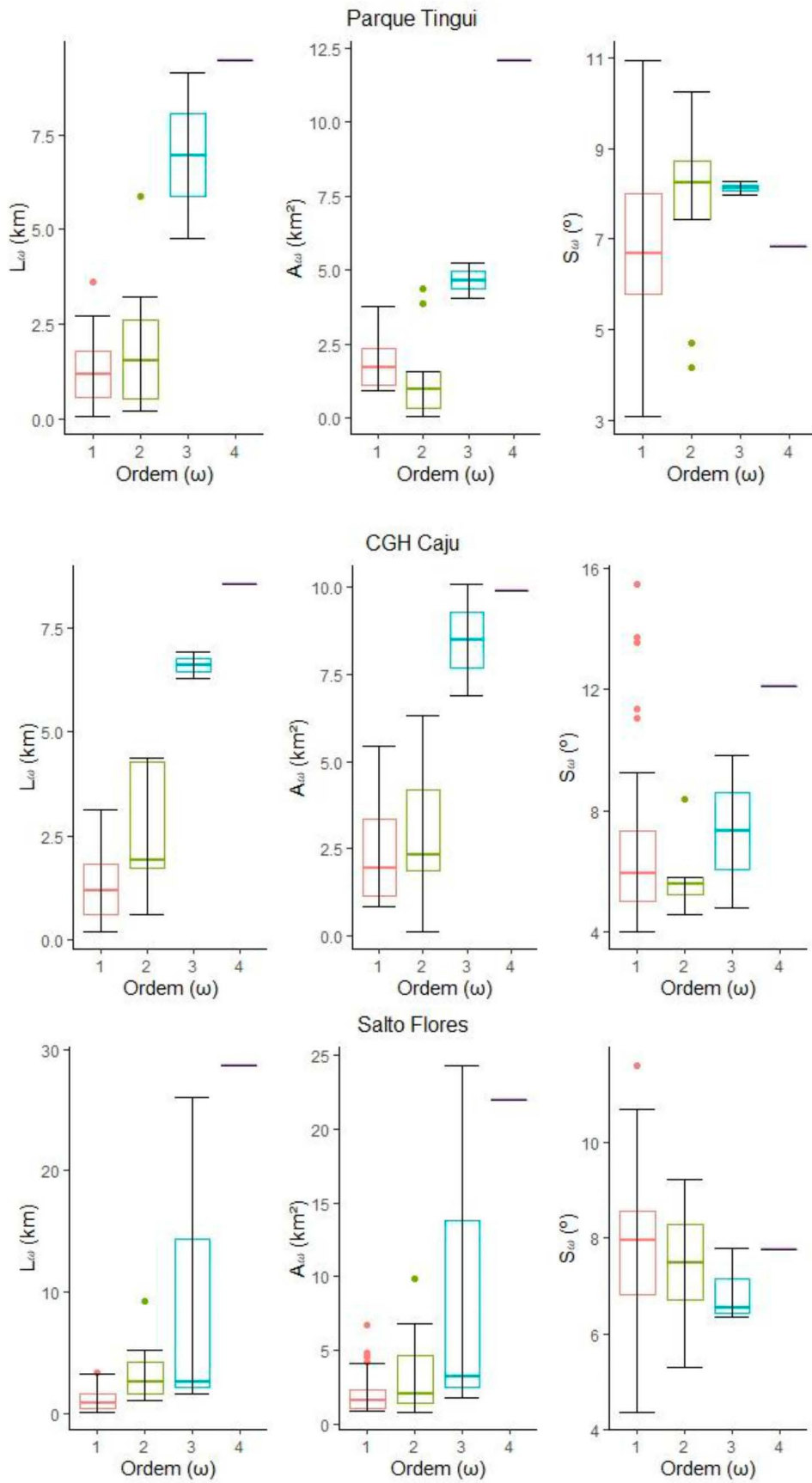
- Sivakumar, B., Singh, V. P., Berndtsson, R., Khan, S. K. (2013). Catchment Classification Framework in Hydrology: Challenges and Directions. *Journal of Hydrologic Engineering*, 20(1). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000837](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000837)
- Smart, J.S. (1978), The analysis of drainage network composition, *Earth Surface Processes*, 3, 129-171. Disponível em: <https://pdodds.w3.uvm.edu/files/papers/others/1978/smart1978a.pdf>. Acessado em: 09 abr. 2024.
- Soni, S. K., Tripathi, S., Maurya, A. K. (2013). GIS Based Morphometric Characterization of Mini-watershed—Rachhar Nala of Anuppur District Madhya Pradesh. *International Journal of Advanced Technology and Engineering Research*, 3(3), 32-38. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/303880422_GIS_BASED_MORPHOMETRIC_CHARACTERIZATION_OF_MINI_WATERSHED_-RACHHAR_NALA_OF_ANUPPUR_DISTRICT_MADHYA_PRADESH. Acessado em: 20 fev. 2024.
- Soni, S. (2017). Assessment of Morphometric Characteristics of Chakrar Watershed in Madhya Pradesh, India Using Geospatial Technique. *Applied Water Science*. <https://doi.org/10.1007/s13201-016-0395-2>
- Steffen, J. L., Andrade, A. C. De Souza, Alves Sobrinho, T., Oliveira, P. T. S., Rodrigues, D. B. B. (2009) Hidrograma unitário instantâneo geomorfológico aplicado a bacias desprovidas de dados hidrológicos. *Geociências*, 28 (3) 247-254. Disponível em: <https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/geociencias/article/view/3510/3199>. Acessado em: 09 abr. 2024.
- Strahler, A. N. (1957). Quantitative Analysis of Watershed Geomorphology. *EOS, Transactions American Geophysical Union*, 38, 913-920. <https://doi.org/10.1029/TR038i006p00913>
- Strahler, A. N. (1964). Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. In: Chow VT (ed) *Handbook of applied hydrology*. New York: McGraw Hill Book Company, Section, 4-11.
- Tripathi, S., Soni, S. K., Maurya, A. K. (2013). Morphometric Characterization & Prioritization of Sub-watersheds of Seoni River in Madhya Pradesh, Through Remote Sensing & GIS Technique. *Int. J. Remote Sens. Geosci.*, 2(3), 46-54. Disponível em: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:130869449>. Acessado em: 20 fev. 2024.
- Vandana, M. (2013). Morphometric analysis and watershed prioritization: a case study of Kabani River Basin, Wayanad District, Kerala, India. *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*, 42(2), 211-222. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/332186957_Morphometric_analysis_and_watershed_prioritisation_A_case_study_of_Kabani_river_basin_Wayanad_District_Kerala_India. Acessado em: 20 fev. 2024.
- Vestena, L. R., Kobiyama, M.. (2010). A geometria fractal da rede de drenagem da bacia hidrográfica do Caeté, Alfredo Wagner-SC. *Revista Árvore*, 34(4), 661-668. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622010000400010>
- Vijith, H., Satheesh, R. (2006). GIS Based Morphometric Analysis of Two Major Upland Sub Watersheds of Menachil River in Kerala. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 34, 181-185. <https://doi.org/10.1007/BF02991823>
- Vittala, S. S., Govindaiah, S., Honne Gowda, H. (2004). Morphometric Analysis of Sub-watersheds in the Pavagada Area of Tumkur District, South India Using Remote Sensing and GIS Techniques. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 32(4), 351-362. <https://doi.org/10.1007/BF03030860>
- Wu, Q., Lane, C. R. (2017). Delineating Wetland Catchments and Modeling Hydrologic Connectivity Using LiDAR Data and Aerial Imagery. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(7), 3579-3595. <https://doi.org/10.5194/hess-21-3579-2017>
- Yang, P., Ames, D. P., Fonseca, A., Anderson, D., Shrestha, R., Glenn, N. F., Cao, Y. (2014). What is the Effect of LiDAR-derived DEM Resolution on Large-scale Watershed Model Results? *Environmental Modelling & Software*, 58, 48-57. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.04.005>

Anexo 1 - Dados Morfométricos

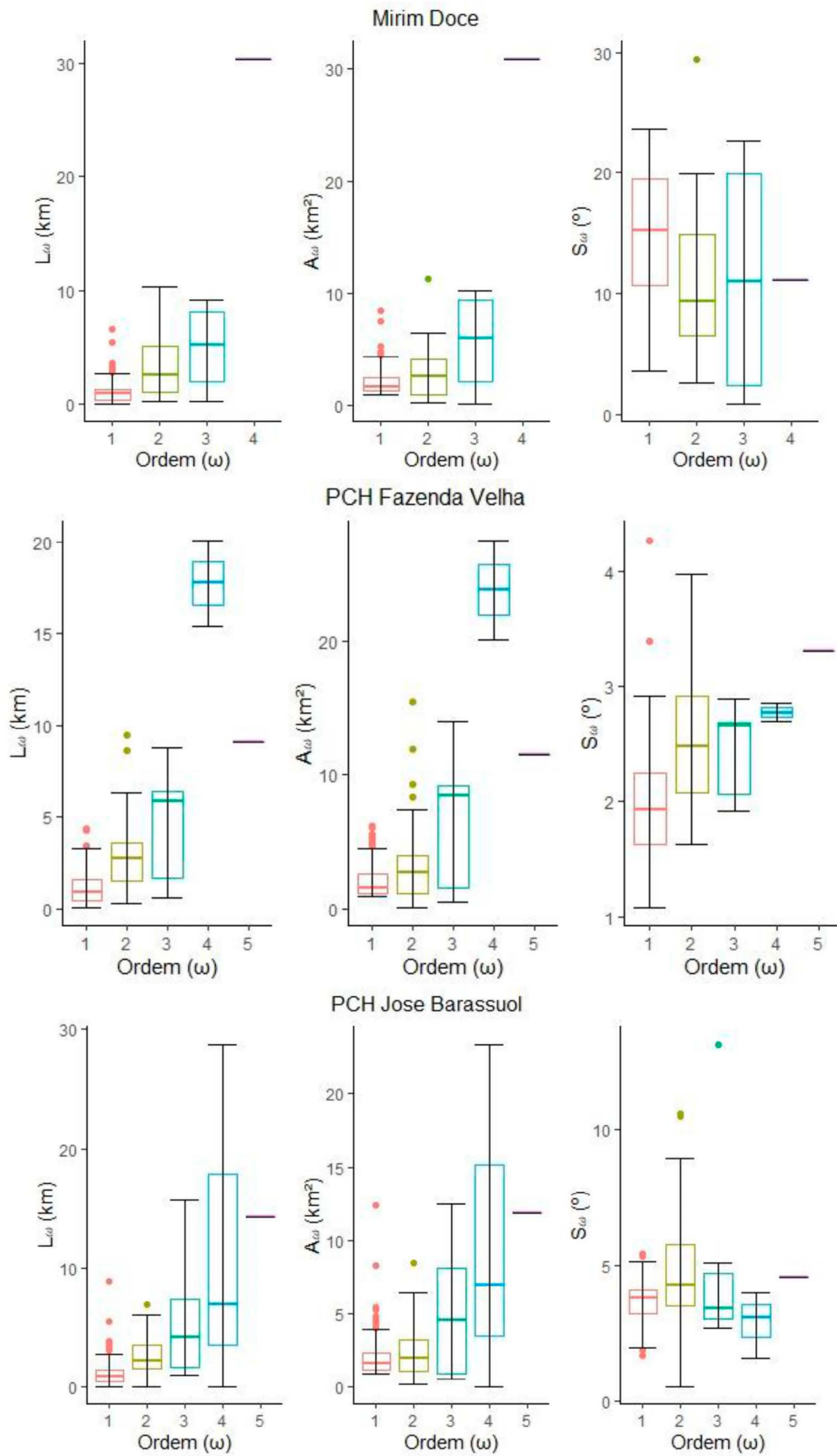
1 - A



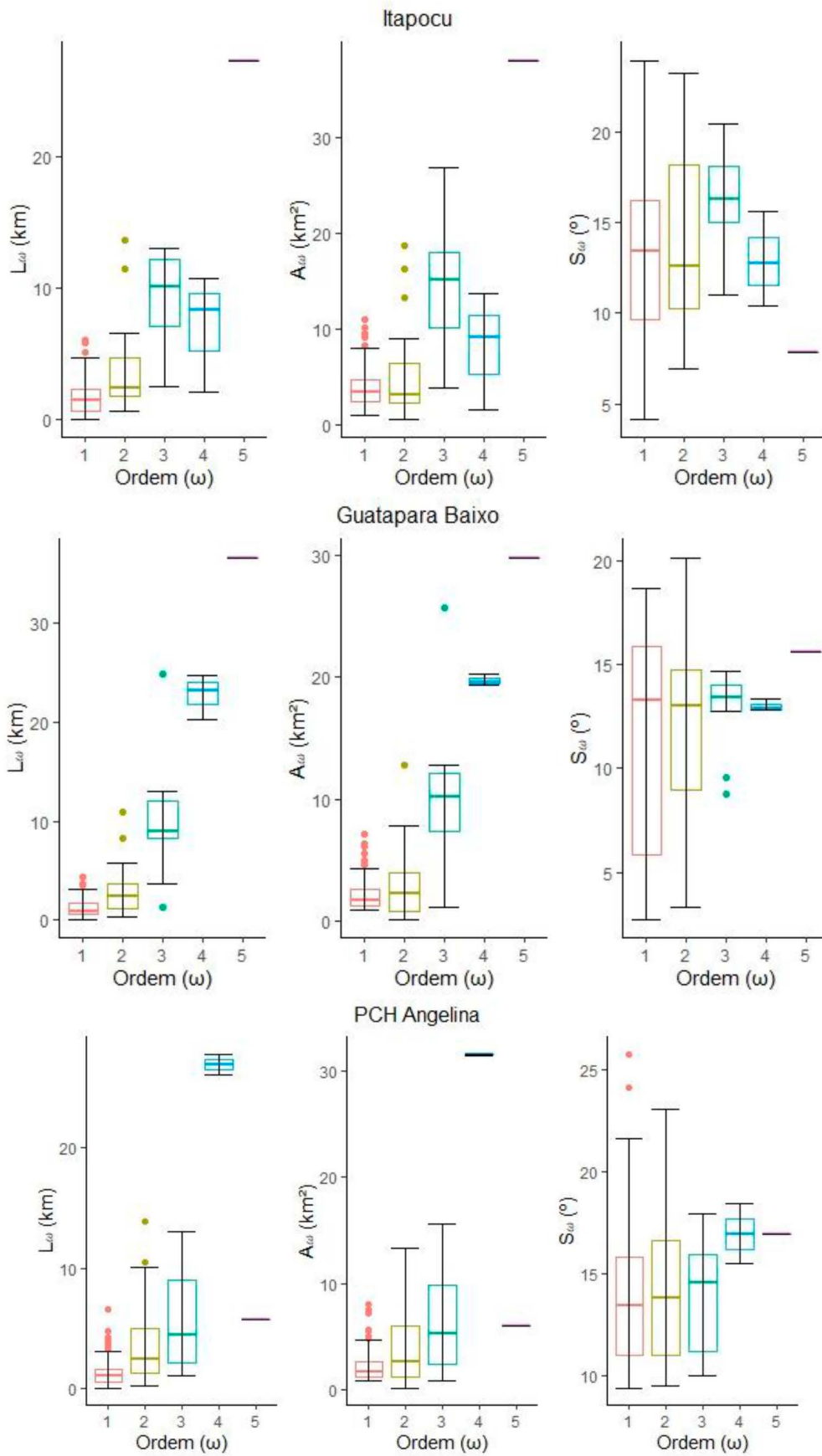
1 - B



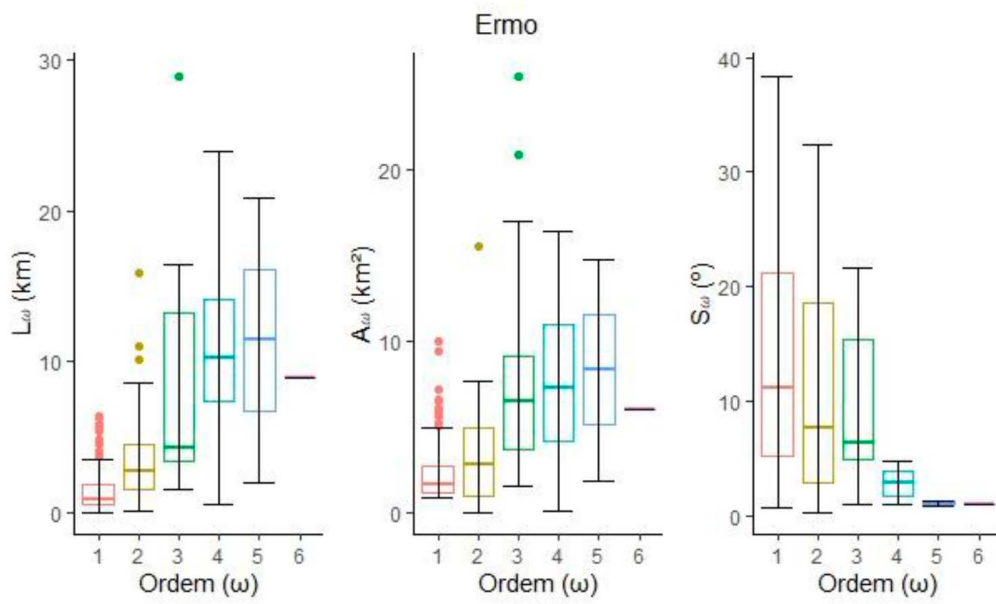
1 - C



1 - D

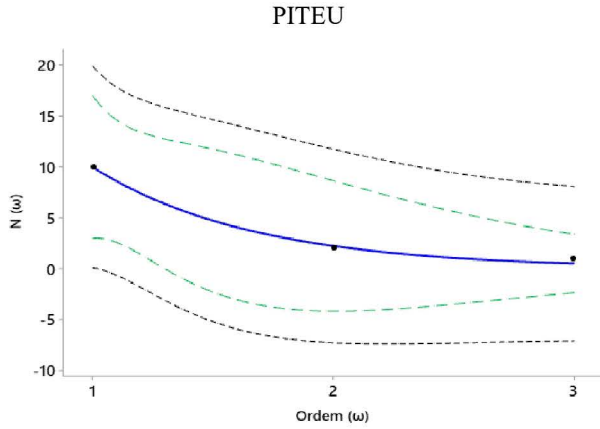


1 - E

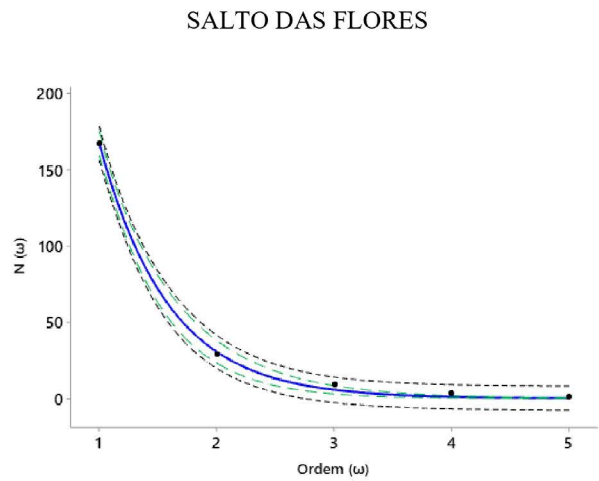
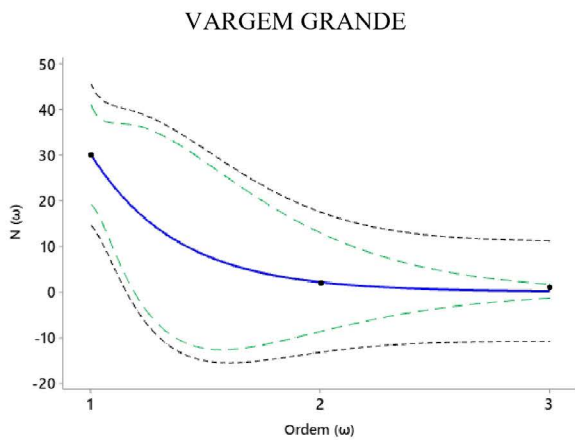
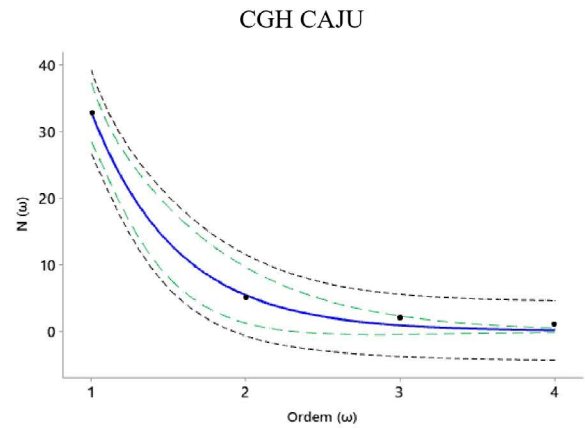
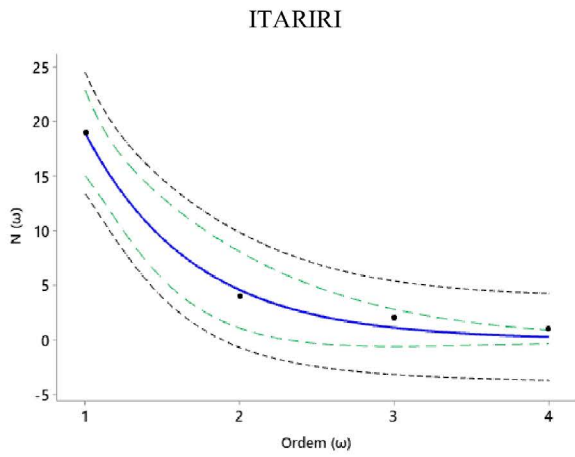
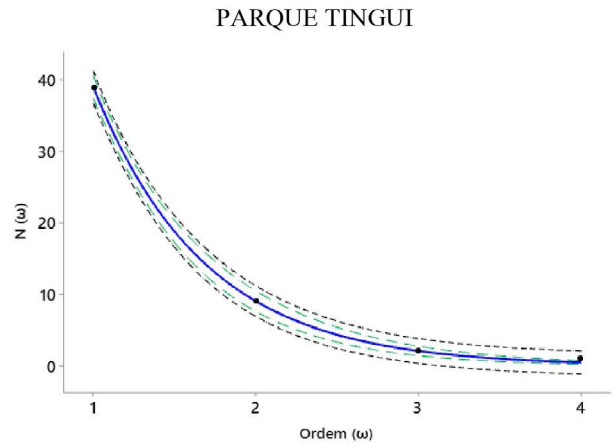


Anexo 2 - Estimação RB

2 - A

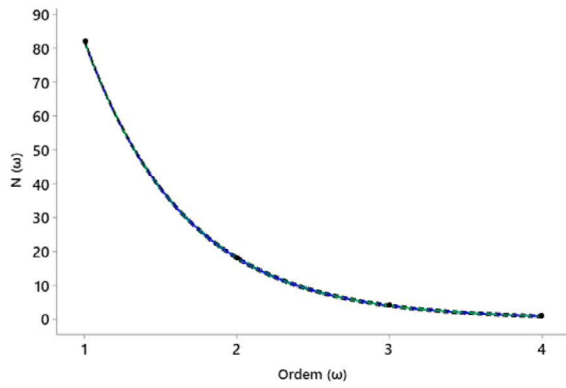


2 - B



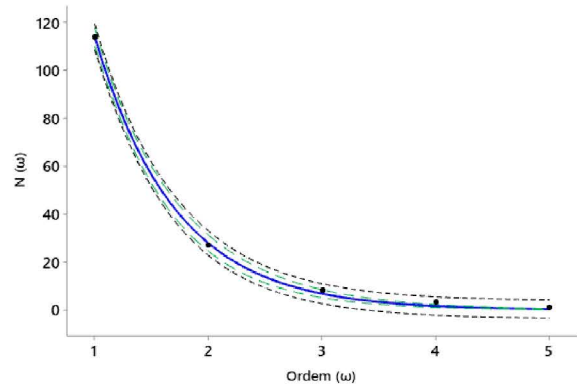
2 - C

MIRIM DOCE

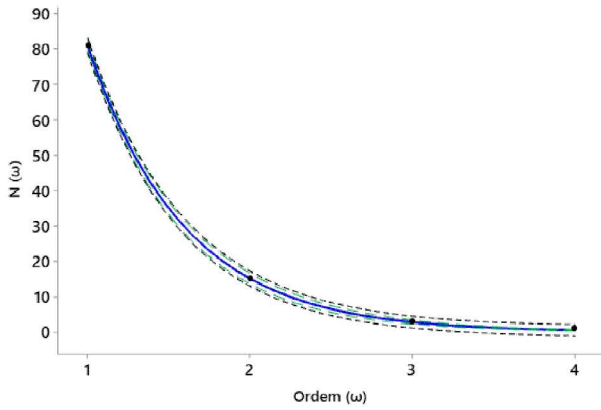


2 - D

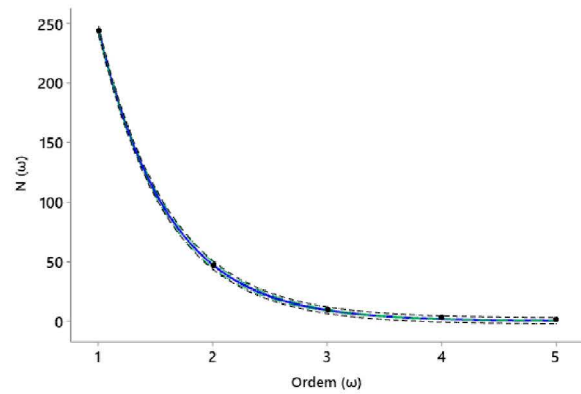
ITAPOCU



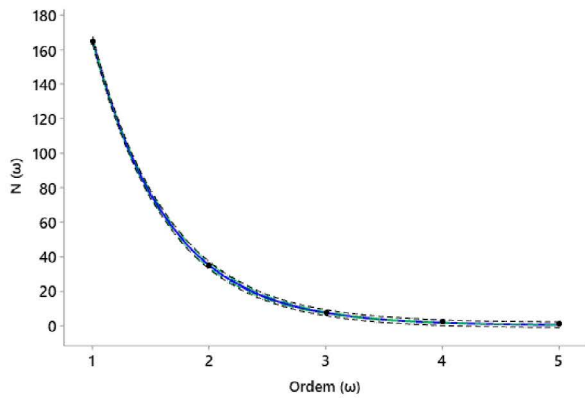
PCH JOSÉ BARASUOL



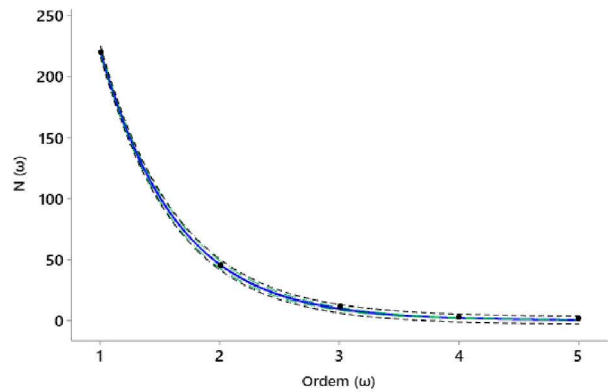
GUATAPARÁ BAIXO



FAZENDA VELHA

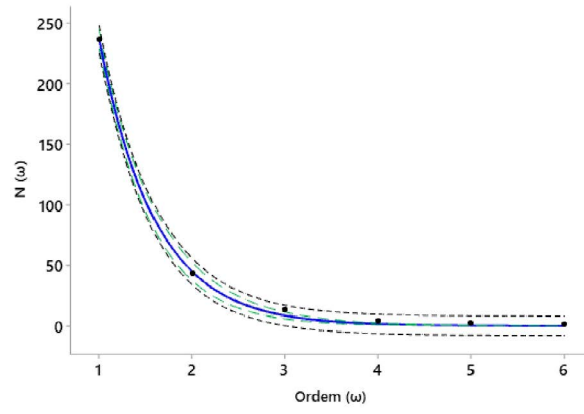


PCH ANGELINA



2 - E

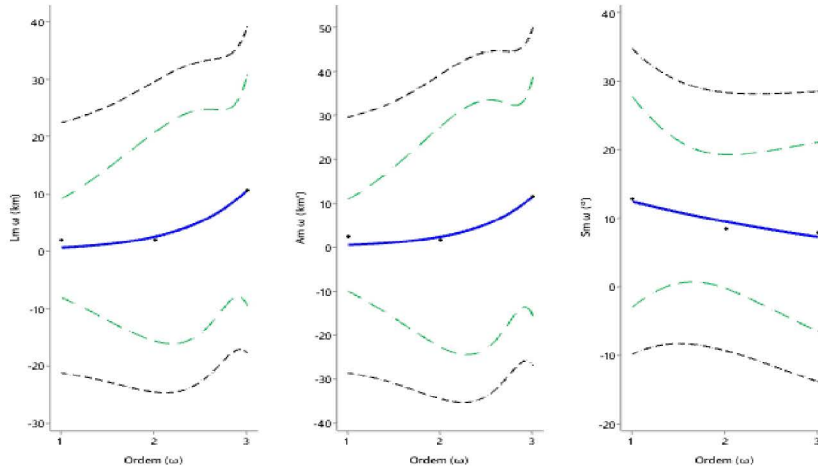
ERMO



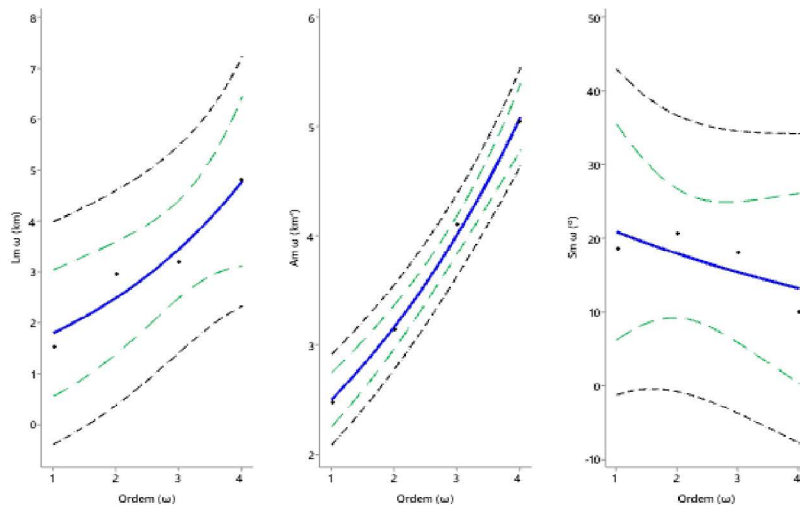
Anexo 3 - Estimação RL, RA e RS – Pelo Método 2

3 - A

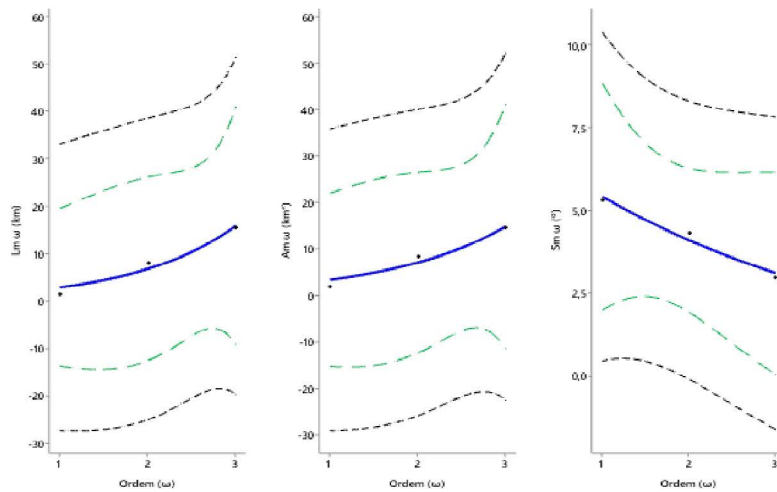
PITEU



ITARIRI

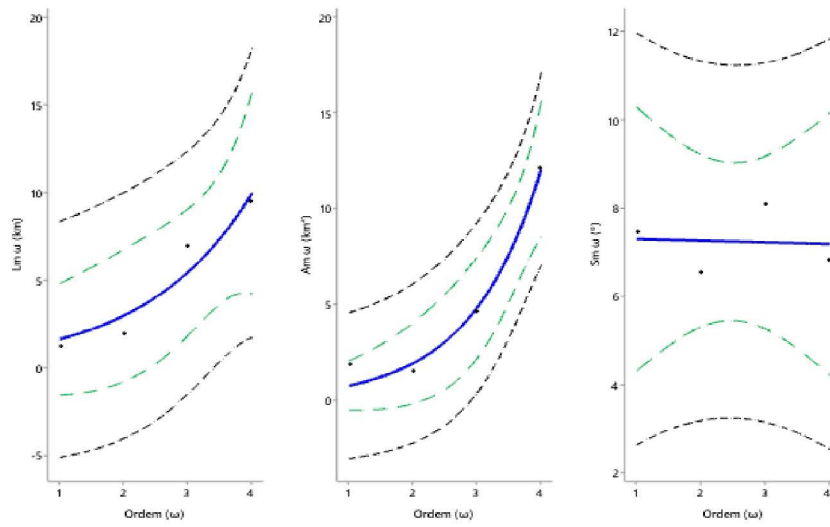


VARGEM GRANDE

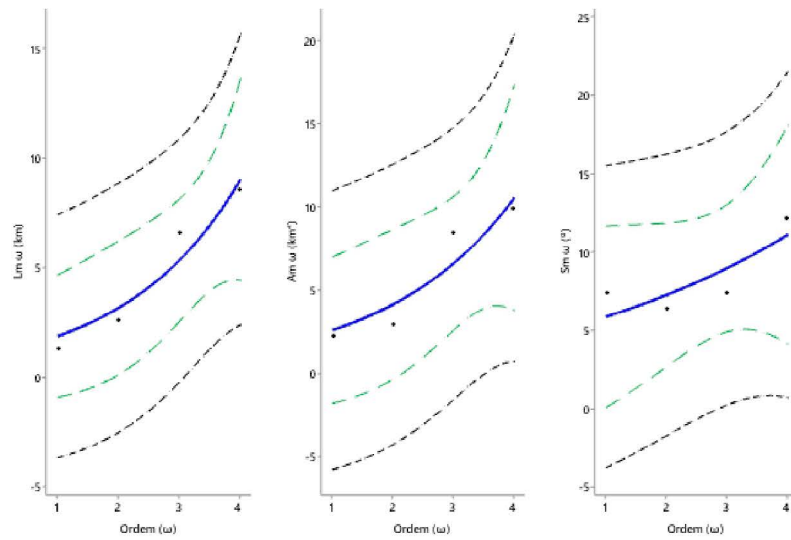


3 - B

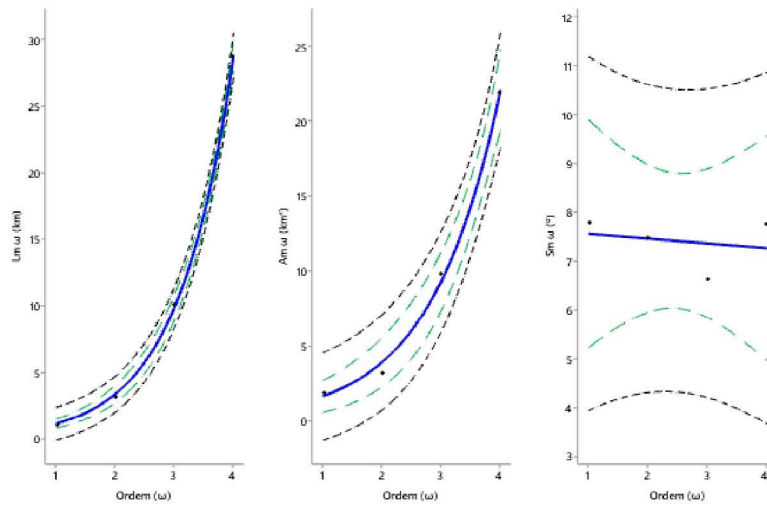
PARQUE TINGUI



CGH CAJU

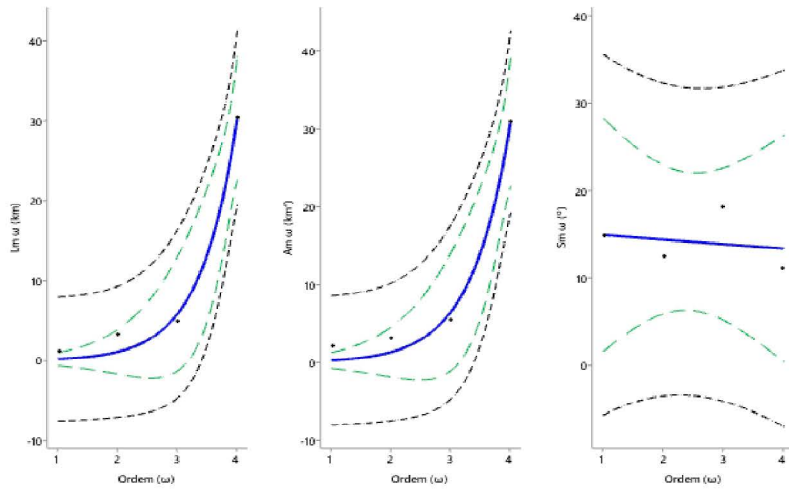


SALTO DAS FLORES

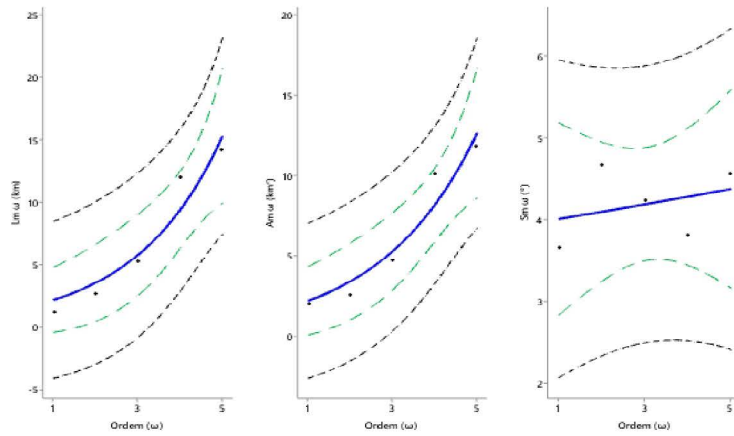


3 - C

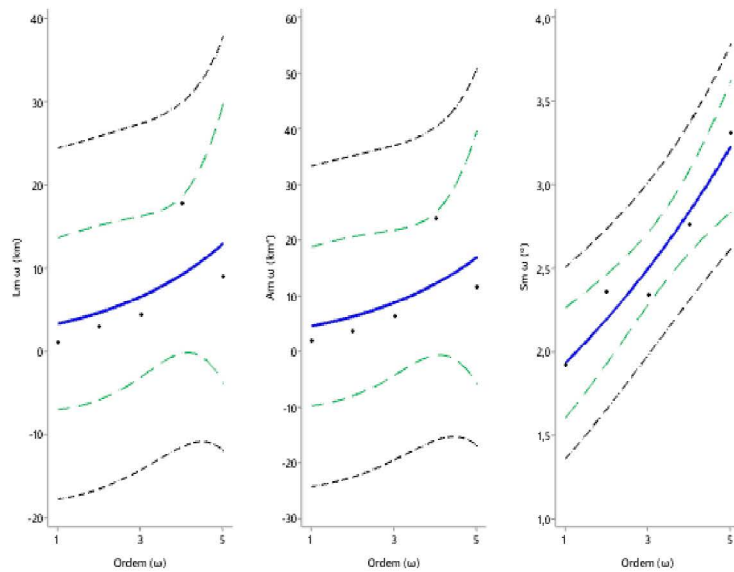
MIRIM DOCE



PCH JOSÉ BARASUOL

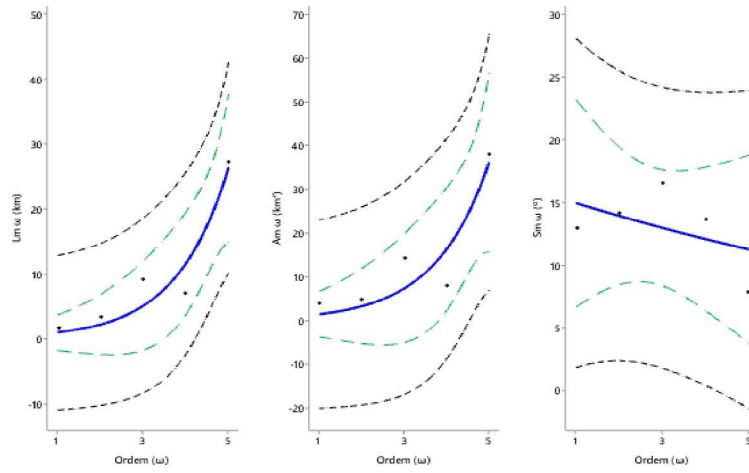


FAZENDA VELHA

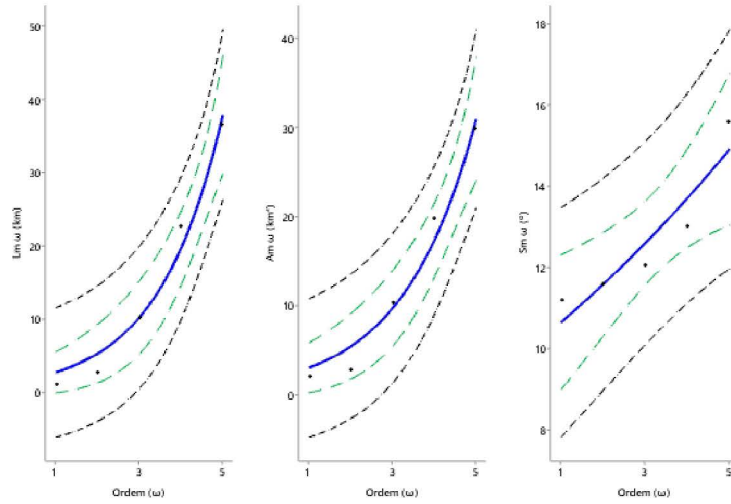


3 - D

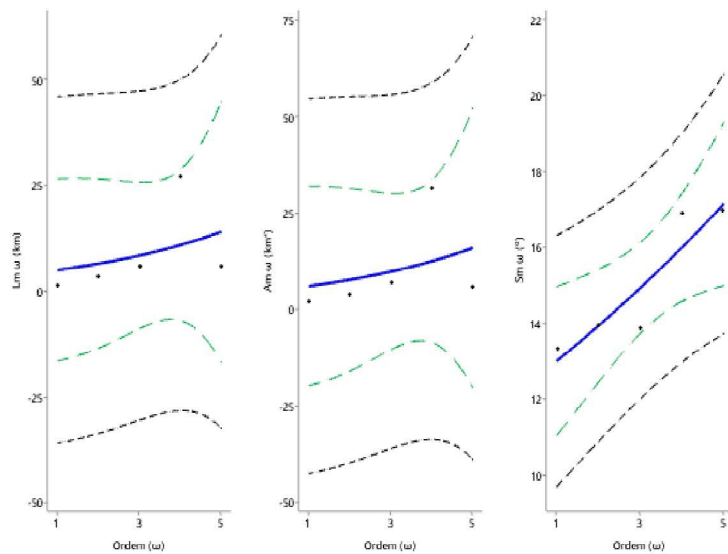
ITAPOCU



GUATAPARÁ BAIXO

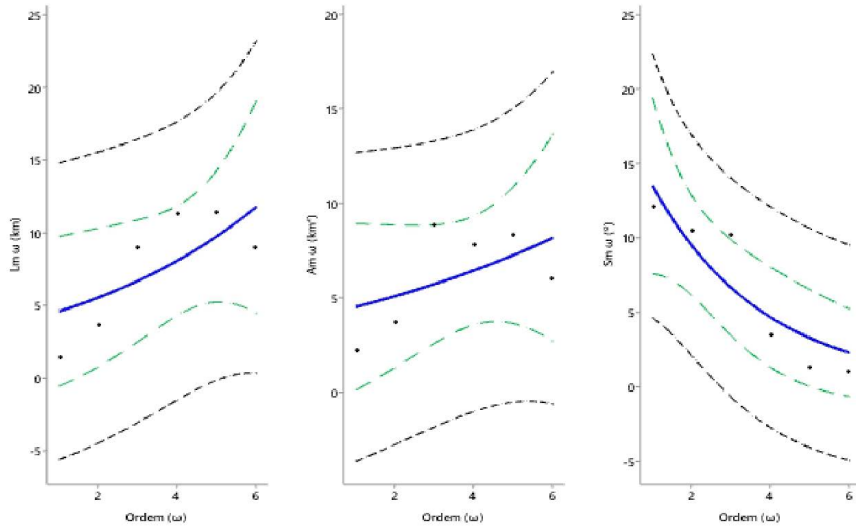


PCH ANGELINA



3 - E

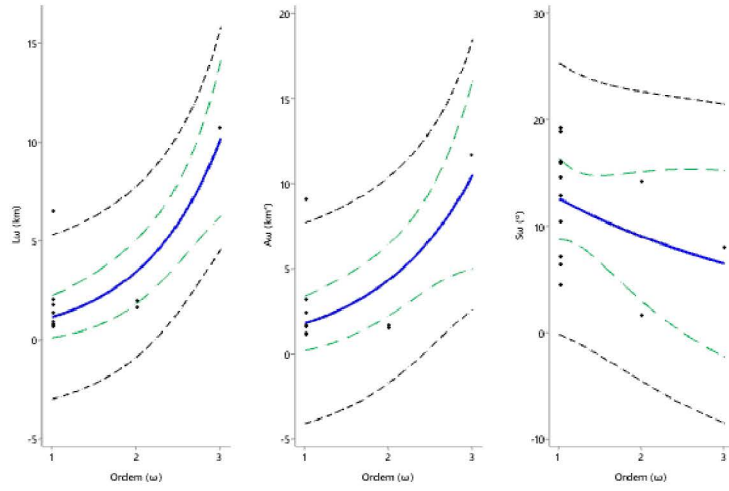
ERMO



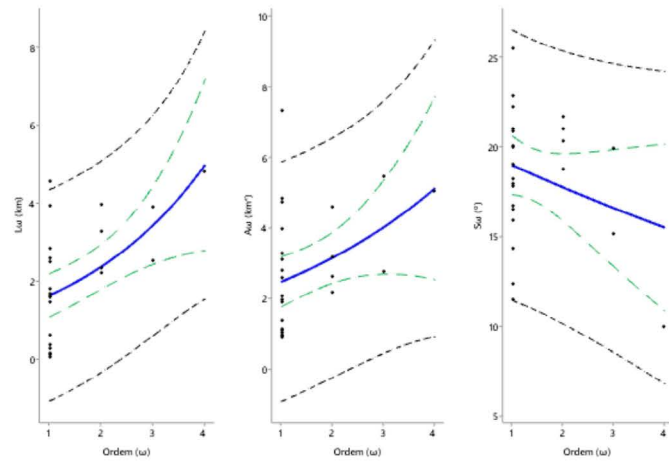
Anexo 4 - Estimação RL, RA e RS – Pelo Método 3

4 - A

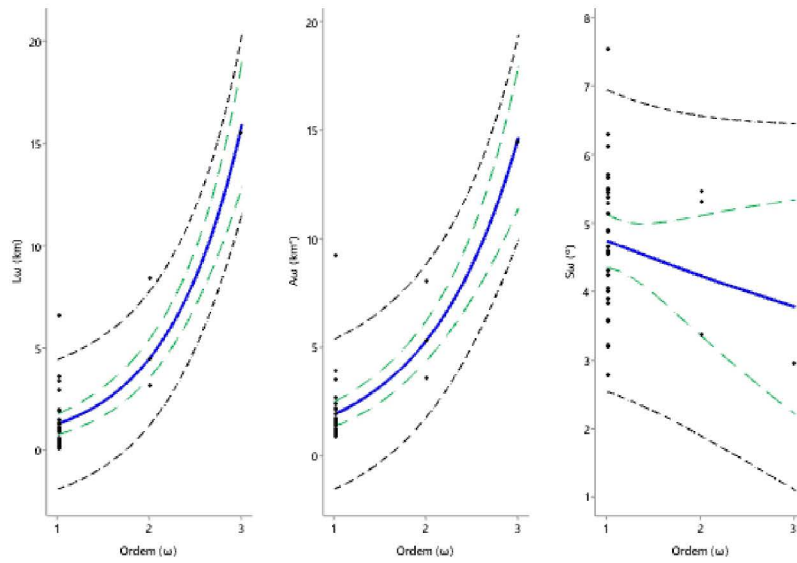
PITEU



ITARIRI

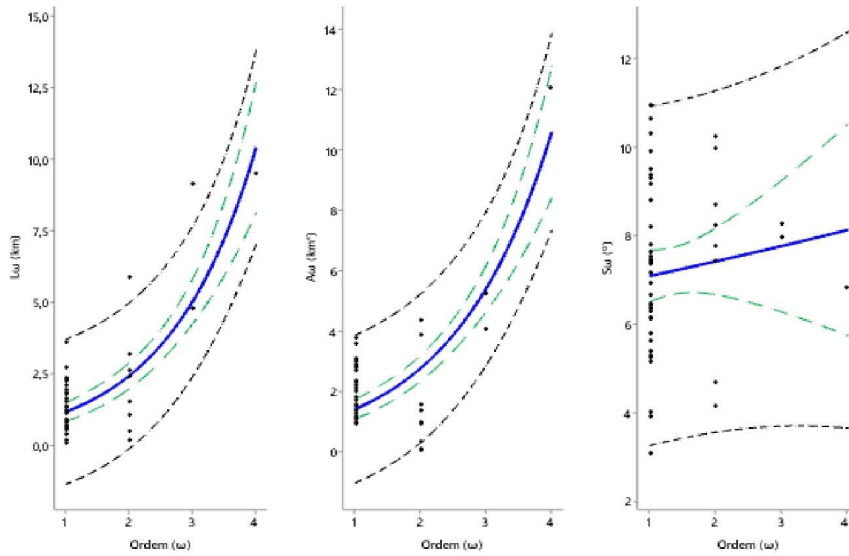


VARGEM GRANDE

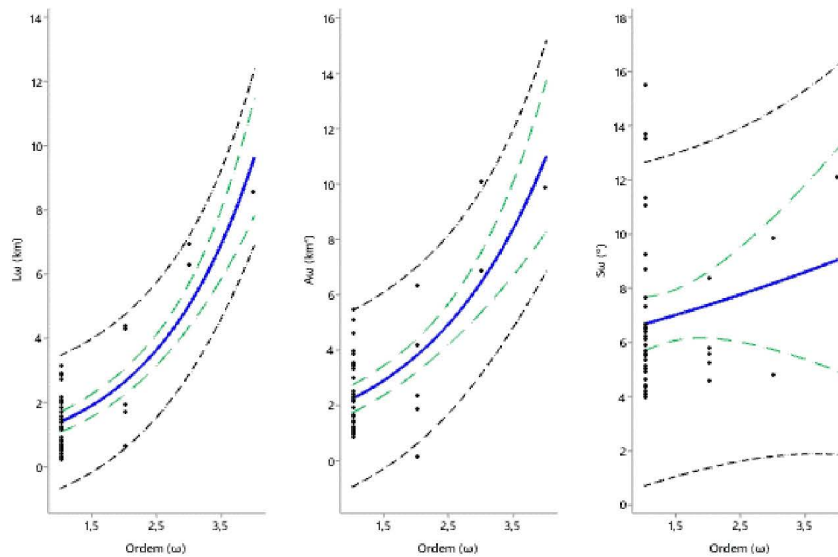


4 - B

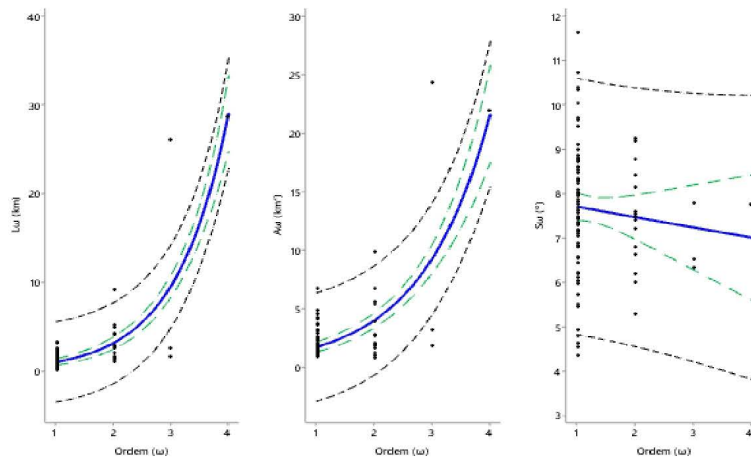
PARQUE TINGUI



CGH CAJU

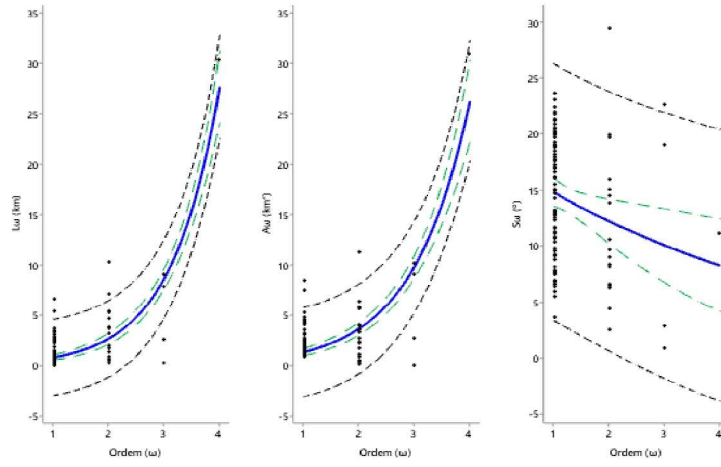


SALTO DAS FLORES

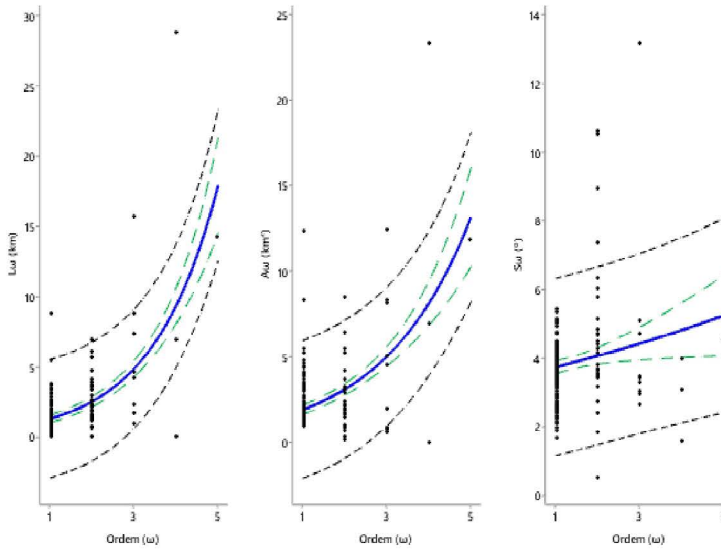


4 - C

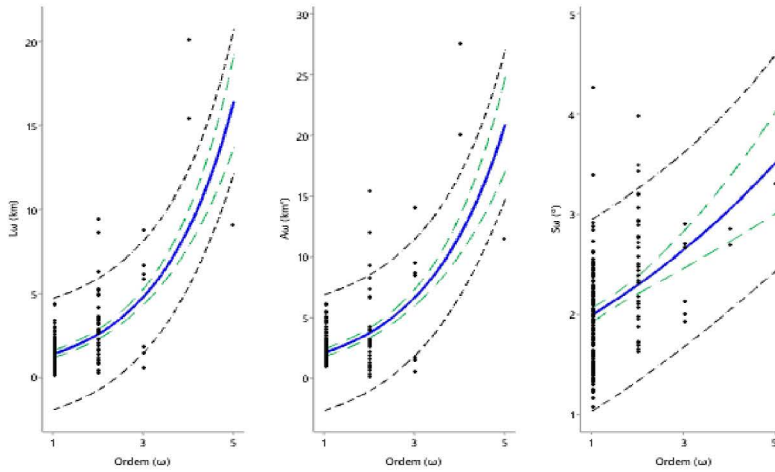
MIRIM DOCE



PCH JOSÉ BARASUOL

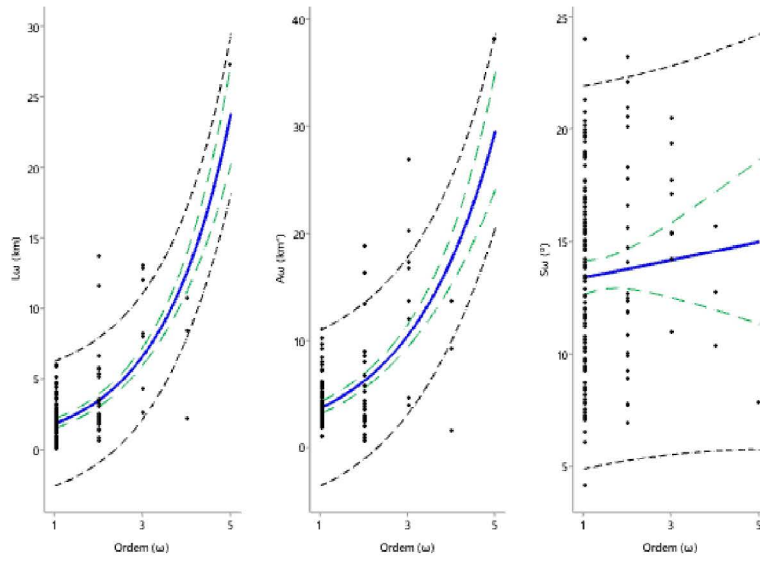


FAZENDA VELHA

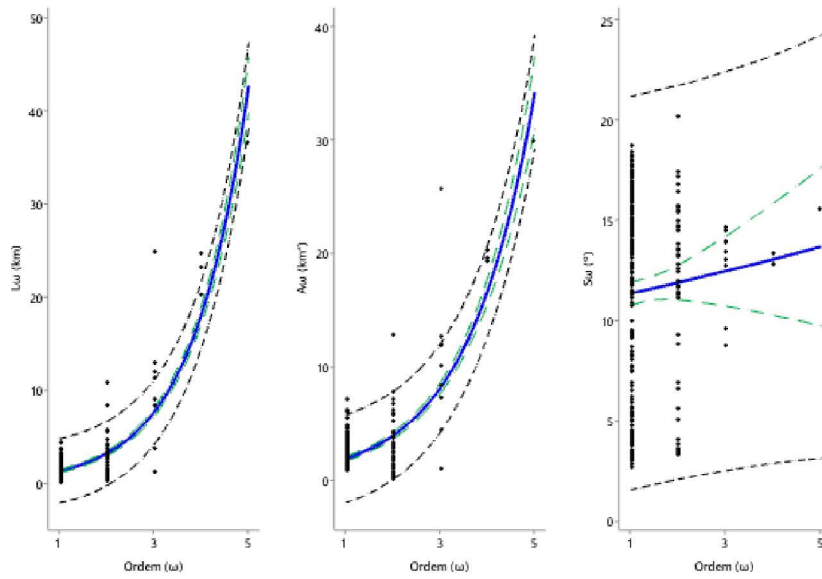


4 - D

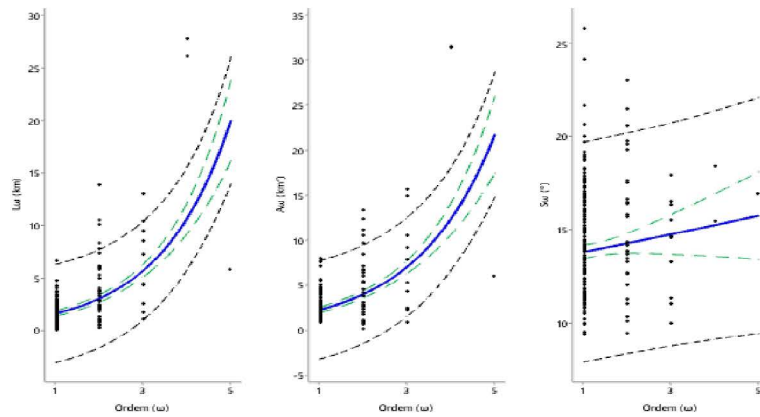
ITAPOCU



GUATAPARÁ BAIXO



PCH ANGELINA



4 - E

ERMO

