

CLASSIFICAÇÃO AUTOMATIZADA DO ÍNDICE DE DISSECAÇÃO DO RELEVO PARA O ESTADO DE SÃO PAULO - BRASIL

ALEX DA SILVA SOUSA

Doutor em Geografia Física – USP

Email: alex.sousa@usp.br ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3039-830X>

LUIZ GUSTAVO MEIRA BARROS

Doutor em Geografia Física - USP

Email: luiz.barros@ufnt.edu.br ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9427-7421>

JURANDYR LUCIANO SANCHES ROSS

Prof. Dr. Titular de Geografia Física – USP

Email: juraross@usp.br ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7726-2960>

RESUMO

A utilização de modelos ambientais é de grande importância nos estudos geomorfológicos e representa uma busca por resultados mais complexos que auxiliem no zoneamento territorial e planejamento ambiental. Dentre as informações utilizadas nesses modelos ambientais, se destaca o Índice de Dissecação do Relevo, utilizado como instrumento de análise da paisagem através da produção dos Mapas de Fragilidade e de Vulnerabilidade Ambiental. Mesmo com a ampla utilização de recursos computacionais que contribuem para melhor padronização da elaboração da análise da paisagem, ainda ocorrem múltiplas formas de execução de modelos ambientais, o que ocasiona dificuldade de comparabilidade de resultados para diferentes áreas e períodos de estudo, tornando-se imprescindível a busca por um modelo de execução padronizado. Neste trabalho será demonstrado a aplicação para o Estado de São Paulo de um modelo que executa de forma automatizada a geração deste índice, utilizando o conceito de *workflow* científico com a criação de uma ferramenta através da função *ModelBuilder* do *software ArcGIS*. Esta ferramenta permite a criação de fluxos de trabalho padronizados que podem ser executados diversas vezes para diferentes locais, padronizando os procedimentos e garantindo uma maior comparabilidade entre os resultados. Os dados morfométricos de entrada da ferramenta foram obtidos a partir de dados da Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), e como dados de saída obtém-se o Entalhamento do Relevo, a Dimensão Interfluvial Média, que combinados possibilitam gerar o Índice de Dissecação do Relevo. Nesse sentido, o desenvolvimento deste modelo demonstrou efetividade, por permitir a padronização da elaboração de um dado que compõe modelos ambientais mais complexos, criando múltiplas possibilidades para a gestão territorial.

Palavras-Chaves: Índice de dissecação do relevo; fluxo de Trabalho Científico; Modelagem Ambiental

AUTOMATED CLASSIFICATION OF THE RELIEF DISSECTION INDEX FOR THE STATE OF SÃO PAULO–BRAZIL

ABSTRACT:

The use of environmental models is of great importance in geomorphological studies and represents a pursuit of more complex results that support territorial zoning and environmental planning. Among the information used in these environmental models, the Relief Dissection Index stands out as a key factor for landscape analysis. Despite the widespread use of computational tools that contribute to greater standardization in landscape analysis, multiple methods for executing environmental models still persist. This leads to difficulties in comparing results across different areas and study periods, making the search for a standardized execution model essential. This paper presents the application of an automated model for generating the Relief Dissection Index in the State of São Paulo. The model is based on the concept of a scientific workflow and was developed using the *ModelBuilder* function of the *ArcGIS software*. This tool enables the creation of standardized workflows that can be applied repeatedly in different locations, ensuring consistent procedures and improving

comparability of results. The morphometric input data for the tool were obtained from the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), and the output includes the Relief Incision and the Mean Interfluvial Dimension, which together allow for the calculation of the Relief Dissection Index. In this context, the development of this model proved to be effective, as it enables the standardization of a dataset that supports more complex environmental models, creating multiple opportunities for territorial management.

Keywords: Workflow Científico; Relief dissection index; Scientific Workflow; Environmental Modeling

1. INTRODUÇÃO

Os procedimentos de mapeamento e classificação do relevo apresentam grande desenvolvimento nas últimas décadas, principalmente em relação aos procedimentos baseadas em análises de Modelos Digitais de Terreno (MDT) e na semiautomatização e automatização de processos, permitindo a identificação de diversas feições geomorfológicas específicas para cada pesquisa. (Cignetti et al., 2025). A busca por metodologias que obtenham resultados mais precisos passa por uma combinação de diversas fontes de dados, numa combinação de análises de sensoriamento remoto, SIG, inteligência artificial, e validações de campo, que permitam uma caracterização espacial e temporal da paisagem. As aplicações são principalmente direcionadas para gestão de riscos, planejamento territorial e o desenvolvimento de modelos aplicados aos estudos ambientais com destaque para os Mapas de Fragilidade Ambiental e de Vulnerabilidade Ambiental. A modelagem, como proposta de trabalho, fornece padronização dos fenômenos e materiais pela organização dos processos, podendo subsidiar o planejamento ao prever futuras intervenções na paisagem. (Huggett, 1975, 1980, 2007; Christofolletti, 1979)

O índice de dissecação do relevo é uma das variáveis morfométricas que representa o nível de rugosidade da superfície, calcula o processo de entalhamento das drenagens, muito utilizada em diversos modelos ambientais (Tricart, 1977; Ross 1992, 1994, 2012; Crepani et al., 1996, 2001), sendo que a automatização da elaboração desta informação possibilita a utilização em modelos complexos que objetivam a análise integrada da paisagem (Ross, 2006). A aplicabilidade desse índice pode ser observada em instrumentos legais como o Zoneamento Ecológico-Econômico (ZEE) (Brasil, 2002), aplicadas em diversos estudos como o Plano de Manejo do Parque Estadual Intervales (Ross, 2008; São Paulo, 2008), a reestruturação do ZEE Costeiro e Unidades de Conservação do Estado do Ceará (Semace, 2016) e o ZEE do Estado do Paraná (Paraná, 2018).

Análises geomorfológicas podem seguir por várias possibilidades de aplicação, sendo que a elaboração de informações apresenta diversas metodologias, demandando pesquisa em campo, laboratório e geoprocessamento de dados, por isso torna-se fundamental a automatização da elaboração de informações essenciais (Vasconcelos et al, 2012; Tinós et al, 2014). A automatização da extração de elementos de relevo a partir de dados topográficos possibilita uma maior agilidade no desenvolvimento de trabalho aplicados em diversas áreas como na paisagem (Gouveia e Ross, 2019), no uso de *geomorphons* (Robaina et al, 2016; Silveira et al, 2018; Moroz-Caccia Gouveia, Ross, 2019) ou para elaboração da Fragilidade Ambiental e ou da Vulnerabilidade Ambiental (Guimarães et al, 2017).

O objetivo deste trabalho é a apresentação de um modelo que possibilita a obtenção do índice de dissecação do relevo através de uma ferramenta de fácil acesso, e permite o uso desta variável em modelos ambientais complexos, sendo demonstrado como se extrair de forma automatizada o índice de dissecação do relevo a partir de informações topográficas e limites de bacias hidrográficas. Para isso, pretende-se demonstrar uma forma de gerar informações de maneira padronizada, com pouca ou nenhuma modificação nos

procedimentos, tornando os resultados comparáveis com alto grau de confiabilidade em comparação com os modelos de análise tradicionais. Assim, embora as técnicas automatizadas já ofereçam ganhos operacionais, seu pleno potencial só será alcançado com o desenvolvimento de *frameworks* mais completos, capazes de unir escala, precisão e interpretação processual do relevo. Pesquisas nessa direção são essenciais para modernizar a cartografia geomorfológica e ampliar sua utilidade científica e prática.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A automatização do índice de dissecação do relevo, utilizado para auxiliar a compartimentação do relevo nos trabalhos do Projeto RadamBrasil (BRASIL, 1976-1987) e do Estado de São Paulo (Ross, Moroz, 1996) possibilita o uso desta informação para metodologias de classificação da paisagem como a Fragilidade Ambiental de Ross (1994, 2012) e a Vulnerabilidade Ambiental de Crepani et al. (1996, 2001) conforme demonstrado por Sousa (2024) e amplamente utilizadas em trabalhos técnicos e científicos. O processo de automatização parte da elaboração de um fluxo de tarefas baseado no proposto por Guimarães et al. (2017) e que envolve uma série de geoprocessos desenvolvidos com o apoio de um Sistema de Informações Geográfico (SIG).

Como dados de entrada foram utilizados um modelo digital do terreno (MDT) elaborado através de dados de radar e a delimitação das bacias hidrográficas para a área em estudo, informações essas representativas do relevo. O dado de radar utilizado foi o disponibilizado pelo programa SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) através de missões espaciais realizadas no ano de 2000 (NASA, 2013), produzido através de interferometria em bandas X e C (pequeno comprimento de onda), resultando em Modelo Digital de Elevação (MDE) com resolução de 30 m, e inicialmente distribuídos de forma reamostrada em resolução de 90 m (Farr et al, 2007).

O tratamento de grande quantidade de dados e seu processamento é um dos elementos mais importantes para o desenvolvimento no século XXI através da noção de *e-Science* (Hine, 2006), constituindo novo paradigma de pesquisas científicas (Cordeiro et al, 2013) em que o processamento de grande quantidade de dados ocorre por meio do uso de computadores em praticamente todas as etapas da produção da pesquisa científica. Para padronizar e automatizar a geração destas informações utiliza-se como base o conceito de Workflow Científico, uma modelização para o fluxo de trabalho realizado através de uma sistematização através de fluxograma de trabalhos, sendo considerados um padrão de apresentação científica (Taylor et al. 2006; Ewa et al., 2009). A partir disto, estabelece-se as etapas, programas utilizados e processamentos de dados que são necessários para a realização de pesquisa científica e a padronização de resultados (Deelman et al. 2009). Trata-se do desenvolvimento de um sistema em que os procedimentos são sempre aplicados da mesma forma, com pouca ou nenhuma interferência do pesquisador, o que torna os resultados obtidos a partir deste sistema comparáveis entre si (Braghetto & Cordeiro, 2014).

O modelo apresentado padroniza a forma como os dados de entrada devem ser utilizados, os processamentos envolvidos e o formato dos dados de saída. Neste sentido, a aplicação do modelo se deu no Estado de São Paulo, sendo possível utilizar a ferramenta em outras áreas desde que se tenha uma adequada delimitação das bacias hidrográficas.

O procedimento adotado foi dividido em quatro etapas. 1. Obtenção, tratamento e preparação do MDE (Modelo Digital de Elevação) e do limite das bacias hidrográficas; 2. Produção do dado de grau de entalhamento dos vales; 3. Produção do dado de dimensão interfluvial média; 4. Elaboração do índice de dissecação do relevo, e análise dos dados a partir dos intervalos apresentados na proposta de Ross (1992, 1994).

2.1 software e dados de entrada

Para o desenvolvimento do *workflow* científico foi utilizado o *software ArcGIS 10.3*, um Sistema de Informações Geográficas (SIG) que possui uma série de ferramentas que permitem a edição de dados geoespaciais. Uma das funções que o software possui é chamada *ModelBuilder*. De acordo com a definição da *ESRI* em seu *website* (2021), empresa responsável pelo *ArcGIS*, o *ModelBuilder* é utilizado para criar, editar e gerenciar modelos. E por modelos entende-se os fluxos de trabalho (*workflows*) que consiste em uma sequência de ferramentas encadeadas, na qual os dados de entrada da ferramenta subsequente, são os dados de saída da ferramenta antecedente. A aplicação do *ModelBuilder* funciona como uma linguagem de programação visual para criação de fluxos de trabalho.

Com os fluxos de trabalho desenvolvidos a partir desta ferramenta e tendo como entrada os dados de radar do SRTM e os limites de sub-bacias elaborado para todo o Estado de São Paulo pela Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo (São Paulo, 2013), foram criados fluxo de trabalho para criação do índice de dissecação do relevo. O índice de dissecação é composto a partir da elaboração das informações intermediárias de “Entalhamento do Relevo” e “Dimensão Média dos Interflúvios”, e os procedimentos para sua geração serão apresentados a seguir.

2.2 Entalhamento do Relevo

O grau de entalhamento do relevo, ou seja, a altura que um determinado padrão de formas de relevo ou tipos de modelados, possui entre seu topo e a área fluvial, é um importante parâmetro morfométrico para obtenção da dissecação do relevo. Esta informação é importante pois quanto maior o entalhamento, mais o relevo fica suscetível as ações de erosão por ação gravitacional, e quanto menor o entalhamento menor é a área de ação gravitacional, e o relevo fica menos suscetível a processos erosivos gravitacionais.

Os dados de entrada desta ferramenta são o SRTM bruto extrapolando os limites da área de estudo e o arquivo *shapefile* com o limite da área em estudo, no caso o limite do Estado de São Paulo. Como dado de saída, se obtém um arquivo no formato *raster* com os valores de entalhamento de vale *pixel a pixel* com resolução aproximada de 30 metros, no sistema de coordenadas geográfica SIRGAS 2000.

A seguir o passo a passo da ferramenta conforme desenvolvido por SOUSA (2024):

(a) - Reprojeta-se o Modelo Digital do Terreno (SRTM) e o Limite da área de interesse para SIRGAS 2000 Geográfica;

(b) - Gera-se um *Buffer* do Limite da área de interesse com 2 Km para recortar o SRTM com uma margem de segurança para os processamentos;

(c) – Utiliza-se a ferramenta “*Fill*” para preencher as imperfeições do Modelo Digital do Terreno (áreas de reservatórios de água, por exemplo). Este dado é utilizado em 3 outros

processos. Primeiro ele é multiplicado por (-1) para ser convertido em valores negativos (c1), obtendo-se, assim, um modelo digital do terreno com valores invertidos;

(d) – O dado da etapa (c1) é utilizado como entrada para a ferramenta “*Flow Direction*” onde é definido a direção do fluxo no MDT invertido;

(e) – A partir do dado da etapa (d) é utilizada a ferramenta “*Sink*” cuja finalidade é diferenciar as áreas mais profundas, mas, como a ferramenta está sendo utilizada no MDT com valores invertidos, na prática são diferenciadas as áreas mais elevadas. Essas áreas são convertidas para o formato vetorial de pontos e são associados a estes pontos os valores do dado gerado na etapa (c), fornecendo assim os valores originais da altitude. Paralelamente a partir do dado

147

(d) são geradas bacias hidrográficas através da ferramenta “*Basin*”. As bacias hidrográficas são convertidas para o formato polígono, e é efetuada uma análise para avaliar se há intersecção das bacias geradas com os pontos gerados através da ferramenta “*Sink*” para que se possa efetuar a correlação das informações dos limites das bacias hidrográficas com os valores de altitude. As bacias hidrográficas que não apresentam intersecção com os pontos são mescladas com outras que apresentam, através da ferramenta “*Eliminate*”, para que desta forma todas as bacias hidrográficas tenham valores de altitude máxima definido;

(f) – O dado de pontos gerado na etapa (e) com os valores originais de altitude do MDT é convertido para o formato *raster*;

(g) – O dado da etapa (f) juntamente com as bacias hidrográficas da etapa (e) são utilizadas como entrada na ferramenta “*Zonal Statistic*” para determinar dentre os valores encontrados para cada bacia hidrográfica, o que for de maior valor. Com isso gera-se um *raster* com o limite da bacia e o valor do ponto mais alto encontrado neste limite;

(h) – O dado da etapa (g) é subtraído do dado da etapa (c), obtendo-se assim o valor de entalhamento dos vales. O dado da etapa (g) apresenta o limite da bacia hidrográfica com o ponto mais alto obtido através da etapa (e), e o dado da etapa (c) apresenta a altitude do terreno. Como resultado, o dado da etapa (h) apresenta a diferença de valores entre o ponto mais alto da bacia hidrográfica em relação a altitude do terreno. Assim se obtém para cada pixel de 30 metros, onde cada célula possui 900 m², o valor de entalhamento do vale;

(i) – O dado da etapa (h) é reclassificado para atender as metodologias da Fragilidade Ambiental de Ross (Ross, 1994, 2012) e da Vulnerabilidade Ambiental de Crepani (Crepani et al., 1996, 2001).

2.3 Dimensão Interfluvial Média ou Amplitude Interfluvial

A Dimensão Interfluvial Média é o parâmetro morfométrico em que se calcula a extensão média dos interflúvios. Esta informação é elaborada para indicar a extensão média das bacias hidrográficas em análise. Quanto mais extensa a dimensão do interflúvio, menos suscetível a área fica a processos erosivos, quanto menos extensa a dimensão do interflúvio, mais suscetível a área fica a processos erosivos.

Para a geração da dimensão interfluvial média foi desenvolvida uma ferramenta no *ModelBuilder* que possui como dado de entrada o limite das sub-bacias hidrográficas obtidas a partir da base da Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo (São Paulo, 2013) convertida para formato *raster* e fornece como dado de saída o arquivo no formato *raster* com as informações de dimensão interfluvial média, pixel a pixel, em uma resolução aproximada de 30 metros.

A seguir o descritivo do passo a passo da ferramenta conforme desenvolvido por SOUSA (2024):

(a) - A primeira etapa (a) consiste em converter o arquivo das sub-bacias hidrográficas do formato *raster* para o formato vetorial de polígonos no sistema de projeção Sirgas 2000 Geográfica;

(b) – Em seguida o dado é convertido do formato vetorial de polígono para o formato vetorial de linha;

(c) – A partir do dado vetorial de linhas, cria-se a distância Euclidiana baseada no limite da bacia hidrográfica. Quanto mais distante da linha, maior o valor, quanto mais próximo, menor o valor;

(d) - Converte os valores para números inteiros em metros, que representam as distâncias das bordas da bacia hidrográfica. Como o dado estava no sistema de coordenadas geográficas, para se obter o valor inteiro em metros foi preciso multiplicar os valores por uma constante para a conversão, e o valor utilizado foi 107.015. Esse valor foi obtido comparando os resultados gerados pelo dado em Projeção UTM com o dado em Coordenadas Geográficas. Adotou-se este procedimento para não restringir a ferramenta ficar limitada a um fuso específico;

(e) - Transforma os valores inteiros em negativo, assim o valor menor representa o ponto mais distante das bordas dos limites da bacia hidrográfica;

(f) – A ferramenta “*Flow Direction*” é utilizada no dado de distâncias euclidiana em valores inteiros negativos (e), e cria um dado onde os valores menores representam a estimativa do centro matemático da bacia hidrográfica;

(g) – “*Sink*” é a ferramenta que gera um arquivo *raster* que determina e diferencia a partir do dado de “*Flow Direction*” (f) as áreas de menor valor. Essas áreas são os pontos mais distantes dos limites da bacia hidrográfica, e assim a estimativa dos pontos centrais da bacia hidrográfica, informação essa que ajuda a determinar a dimensão do interflúvio;

(h) – A informação do dado anterior (g) é convertida de *raster* para feição vetorial de ponto, e a ele é adicionado um campo na tabela de atributos onde são inseridos os valores de distância euclidiana inteiro (d). Esse valor representa a distância do ponto em questão em relação as bordas da bacia hidrográfica. Em seguida é criado um outro campo na tabela de

atributos onde o valor deste primeiro campo é multiplicado por dois. Desta forma se obtém o valor da dimensão do interflúvio em cada ponto central obtido na etapa (g);

(i) - Em seguida os pontos (h) são convertidos para um arquivo *raster* que apresenta o valor da dimensão do interflúvio. Esse dado é juntado ao limite das bacias hidrográficas (i) através da ferramenta “*Zonal Statistic*” onde se obtém uma média dos pontos de dimensão interfluvial. Com isso se tem uma média dos valores de dimensão interfluvial para cada bacia hidrográfica (j);

(j) - O arquivo apresenta as bacias hidrográficas com a média de valores de dimensão interfluvial em um arquivo *raster* com resolução espacial de 30 metros, onde cada célula possui 900 m²;

(l) – o dado é reclassificado para atender as metodologias da fragilidade ambiental e da vulnerabilidade ambiental respectivamente de Ross (Ross, 1994, 2012) e de Crepani (Crepani et al., 1996, 2001).

Para o Estado de São Paulo está disponível o dado das sub-bacias hidrográficas geradas pela Secretaria do Meio Ambiente (São Paulo, 2013), mas, em sua proposta, Guimarães (Guimarães et al., 2017) propõe o uso de sub-bacias hidrográficas geradas de forma automática. Uma forma de gerar estas bacias automaticamente é através da ferramenta *r.watershed* do software QGIS. Esta ferramenta permite a geração dos dados de sub-bacias a partir do SRTM, e isso possibilita a geração do Índice de Dissecação do Relevo para qualquer lugar do mundo, pois é necessário apenas o SRTM, que está disponível para todas as áreas do globo terrestre. Outra possibilidade é a utilização dos dados de otobacias da ANA (ANA, 2017), em sua tese de doutorado, Sousa (2024) demonstrou que os resultados não ficam satisfatórios, quando se trata dados de um determinado território com várias bacias hidrográficas simultaneamente. Fica mais eficiente quando os dados são tratados através da matriz de dissecação do relevo aplicada para o conjunto do território.

2.4 Dissecação do Relevo (rugosidade topográfica)

Para consolidar os dados dos Graus de Dissecação do Relevo, (também conhecida por rugosidade topográfica) a partir do Entalhamento dos Vales e Dimensão Interfluvial Média foram utilizados os parâmetros da Tabela 1 para a Fragilidade Ambiental, e os parâmetros da Tabela 2 para a Vulnerabilidade Ambiental, que são respectivamente largamente desenvolvidas para estudos aplicados para projetos de planejamento ambiental territorial. Neste trabalho, foi efetuada uma ferramenta no “*ModelBuilder*” apenas para somar os dados e padronizar sua execução. Os dados de Entalhamento do Relevo foram classificados em dezenas, de 10 a 50, onde 10 seria a fragilidade/vulnerabilidade mais baixa e 50 a mais alta. Os dados de Dimensão Interfluvial Média foram classificados em cinco unidades de 1 a 5, onde 1 é a fragilidade/vulnerabilidade ambiental mais baixa e 5 a mais alta. Ambos os dados estão no formato *raster* com células/pixel de aproximadamente 30 metros. Esses dois arquivos foram somados, assim os locais que apresentaram valor 11 possuem fragilidade/vulnerabilidade baixa tanto para o entalhamento, quanto para a dimensão do interflúvio, e os locais que apresentaram valor 55 possuem altos valores de fragilidade/vulnerabilidade para as duas variáveis. O primeiro número se refere a Fragilidade

Ambiental ou Vulnerabilidade Ambiental do Entalhamento do Vale, enquanto o segundo apresenta a classificação da Dimensão interfluvial média.

Tabela 1: Matriz da Dissecação do Relevo e respectivas Classes de Fragilidade para escalas médias e pequenas. Fonte: Adaptado de Ross (1992-1994-2012)

Graus de Entalhamento de Vales (m)	Fragilidade	Densidade de Drenagem ou Dimensão Interfluvial Média (m)				
		> 3.750	1.750 a 3.750	750 a 1.750	250 a 750	< 250
		Muito Fraca	Fraca	Média	Forte	Muito Forte
< 20	Muito Fraca	11	12	13	14	15
20 a 40	Fraca	21	22	23	24	25
40 a 80	Médio	31	32	33	34	35
80 a 160	Forte	41	42	43	44	45
> 160	Muito Forte	51	52	53	54	55

150

Tabela 2: Matriz da Dissecação do Relevo e respectivas Classes de Vulnerabilidade para escalas médias e pequenas. Fonte: Adaptado de Crepani et al (1996-2001)

Amplitude Altimétrica (m)	Vulnerabilidade	Amplitude Interfluvial (m)				
		> 5.000	2.000 a 5.000	750 a 2.000	250 a 750	< 250
		1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
< 20	1,0	11	12	13	14	15
20 a 40	1,5	21	22	23	24	25
40 a 80	2,0	31	32	33	34	35
80 a 160	2,5	41	42	43	44	45
> 160	3,0	51	52	53	54	55

Para melhor compreensão a Tabela 3 demonstra a associação das cores com a classe de Fragilidade/Vulnerabilidade.

Tabela 3: Atribuição de pesos de Fragilidade e Vulnerabilidade conforme as cores, a partir das matrizes de dissecação do relevo. Elaborado pelo autor.

Cor	Fragilidade	Vulnerabilidade	Entalhamento do Relevo	Dimensão Interfluvial
Verde Escuro	Muito Fraca	1,0	10	1
Verde Claro	Fraca	1,5	20	2
Amarelo	Média	2,0	30	3
Laranja	Forte	2,5	40	4
Vermelho	Muito Forte	3,0	50	5

Estas ponderações de muito fraca a muito forte (tabela 3) estabelecidas a partir das matrizes de Dissecação do Relevo (ou rugosidade topográfica) relativa a fragilidade ambiental de Ross (1994-2012, e vulnerabilidade ambiental de Crepani et alii (1996-2001) se aplicam para os estudos voltados para projetos de Planejamento Ambiental Territorial,

ZEE-Zoneamentos Ecológico-Econômicos, Planos Diretores Municipais, Planos de Gestão de Unidades de Conservação, Planos de Gestão de Bacias Hidrográficas entre outros.

3. RESULTADOS: PRODUTOS GERADOS

A pesquisa resultou no desenvolvimento de uma ferramenta que permitiu a elaboração do índice de dissecação do relevo para todo o Estado de São Paulo conforme o proposto por Guimarães (Guimarães et al., 2017), e que possibilita a geração do índice de dissecação de relevo para qualquer área, desde que se utilizem dados SRTM e a delimitação de sub-bacias hidrográficas.

Para o seu desenvolvimento foram integradas uma série de ferramentas do *software ArcGIS* que resultaram em três ferramentas distintas. Uma para a geração do entalhamento do relevo, outra para a dimensão interfluvial e uma terceira mais simples para a geração do índice de dissecação do relevo através do uso dos dois dados anteriores como entrada. Foi possível integrar todas as etapas e elaborar apenas uma única ferramenta, criando assim um modelo que gera os três dados citados: entalhamento do relevo, dimensão interfluvial e índice de dissecação do relevo.

A figura 3 apresenta o resultado do grau de entalhamento do relevo conforme as classes estabelecidas nas tabelas 1 e 2.

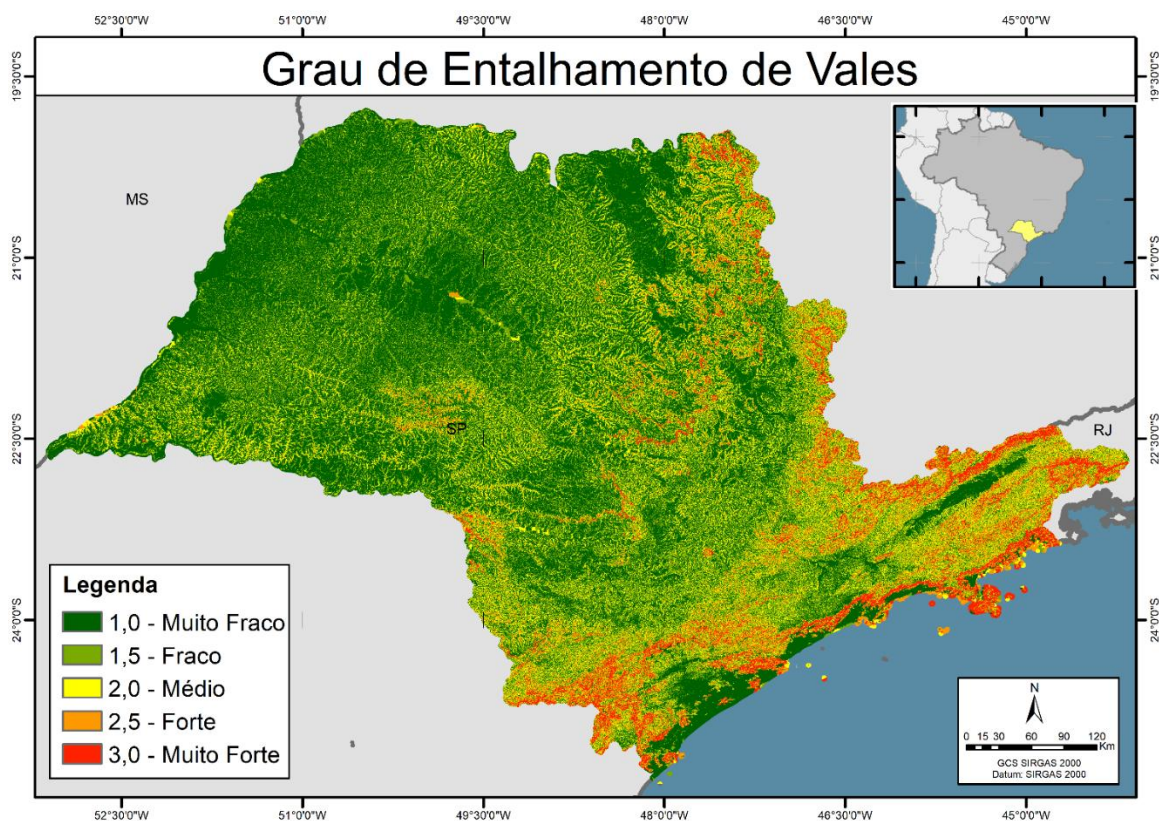


Figura 3: Entalhamento do Relevo, conforme Matriz de Dissecação. Elaborado pelo autor.

A figura 4 apresenta a Dimensão Interfluvial Média para todo o Estado de São Paulo conforme estabelecido na Tabela 1 e a figura 5 a Amplitude Interfluvial conforme estabelecido na Tabela 2.

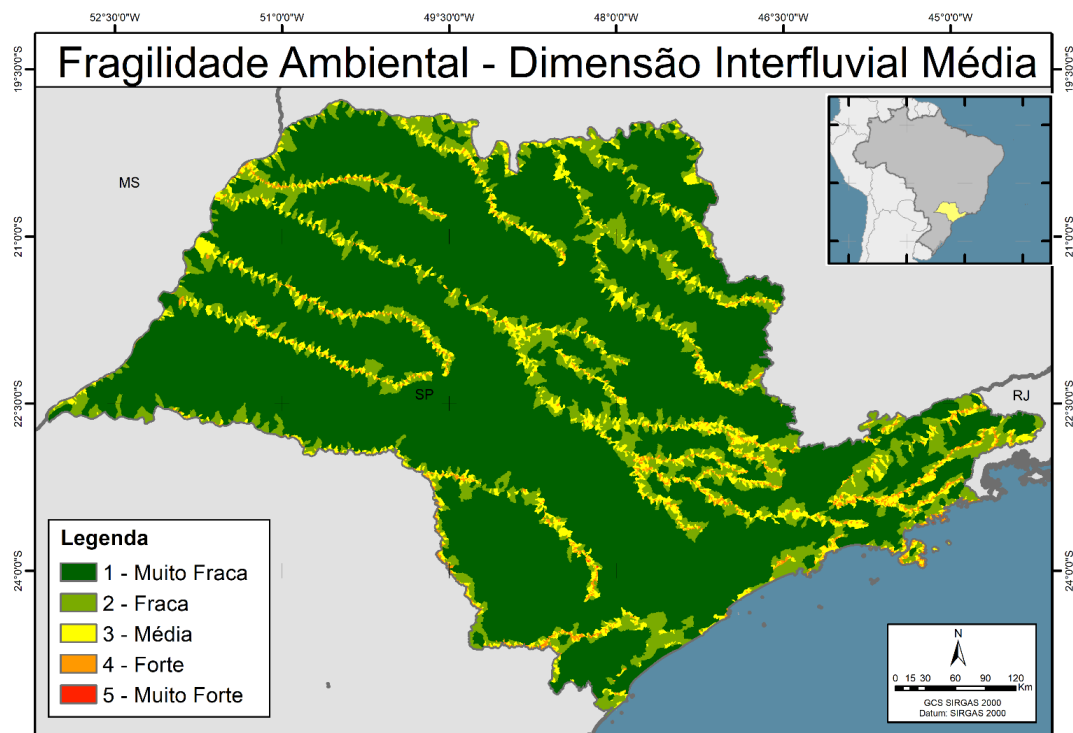


Figura 4: Dimensão Interfluvial Média, conforme Matriz de Dissecação. Elaborado pelo autor.

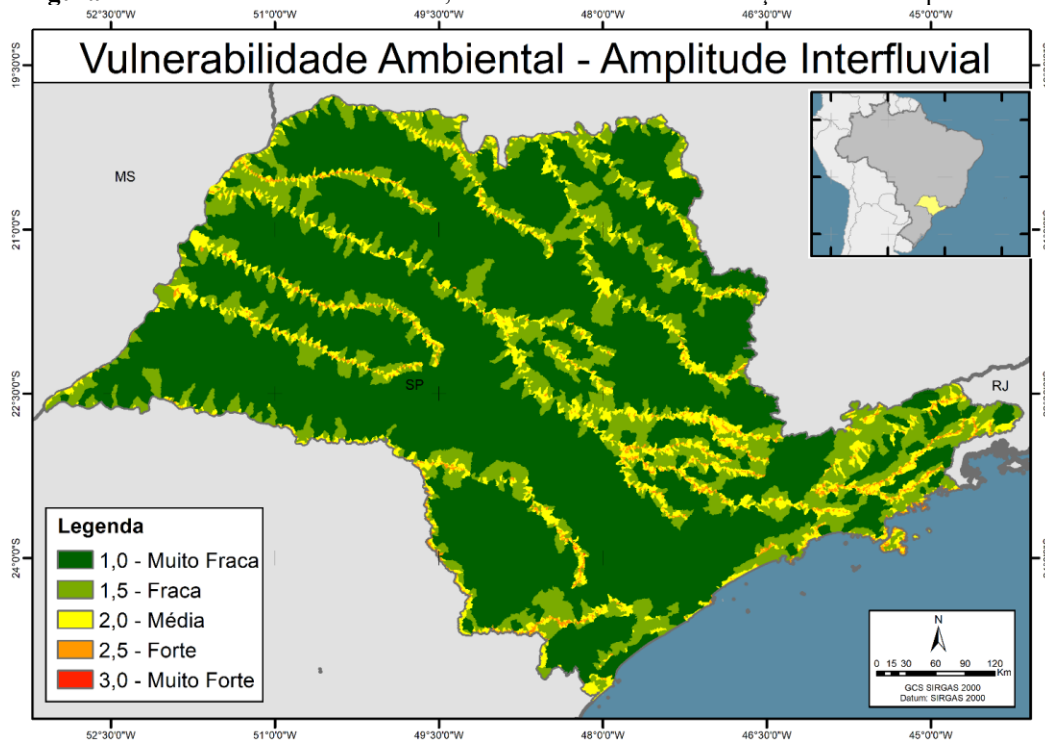


Figura 5: Amplitude Interfluvial, conforme Matriz de Dissecação. Elaborado pelo autor.

A Figura 6 apresenta o Grau de Dissecação do Relevo para a Fragilidade Ambiental para o Estado de São Paulo, conforme estabelecido na Tabela 1 e a Figura 7 o Grau de Dissecação do Relevo para a Vulnerabilidade Ambiental para o Estado de São Paulo, conforme estabelecido na Tabela 2.

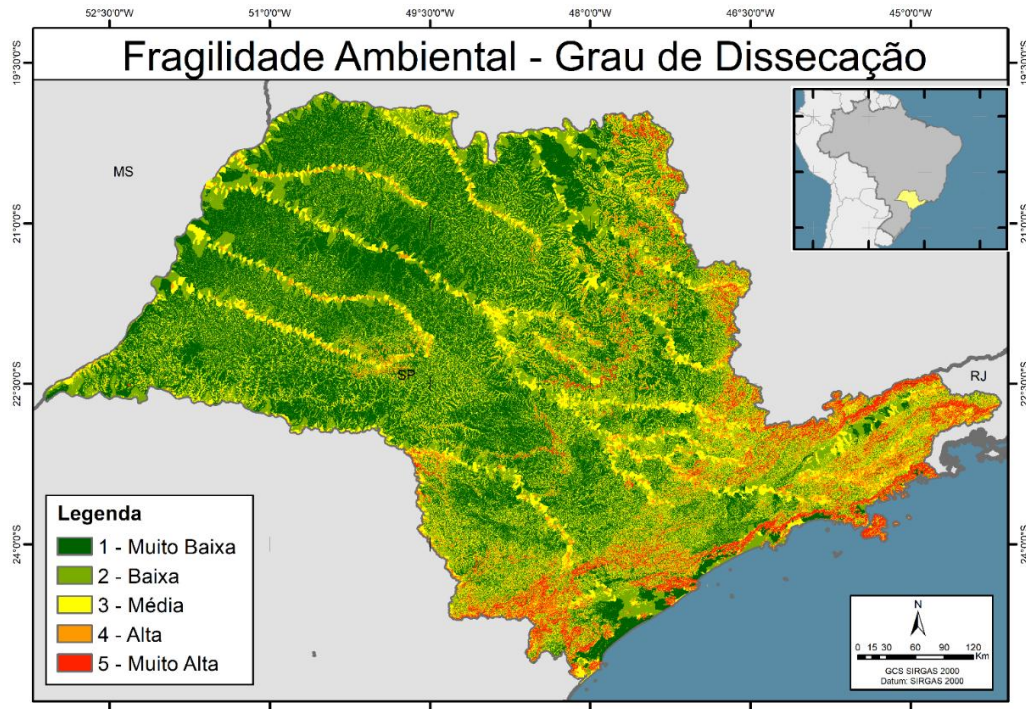


Figura 6: Grau de Dissecação do Relevo baseado na Fragilidade Ambiental (Ross, 1994, 2012). Elaborado pelo autor.

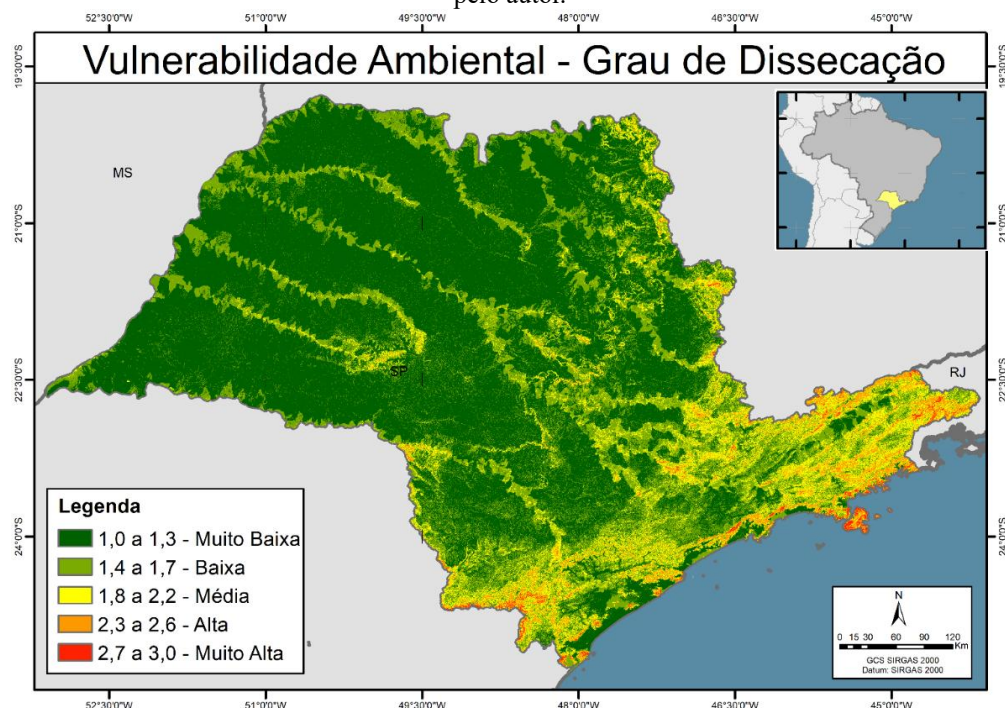


Figura 7: Grau de Dissecação do Relevo baseado na Vulnerabilidade Ambiental (Crepani et Alii, 1996, 2001). Elaborado pelo autor.

A Figura 8 demonstra uma síntese dos resultados obtidos para o Estado de São Paulo a partir da utilização do instrumental desenvolvido. A Figura 8 (a) demonstra o resultado do entalhamento do relevo. A Figura 8 (b) a Dimensão Interfluvial classificado conforme os intervalos definidos para a Fragilidade Ambiental. A Figura 8 (c) a Dimensão Interfluvial classificado conforme os intervalos definidos para a Vulnerabilidade Ambiental. A Figura 8 (d) o resultado obtido para a Dissecação do Relevo da Fragilidade Ambiental e a Figura 8 (e) o resultado obtido para a Dissecação do Relevo da Vulnerabilidade Ambiental.

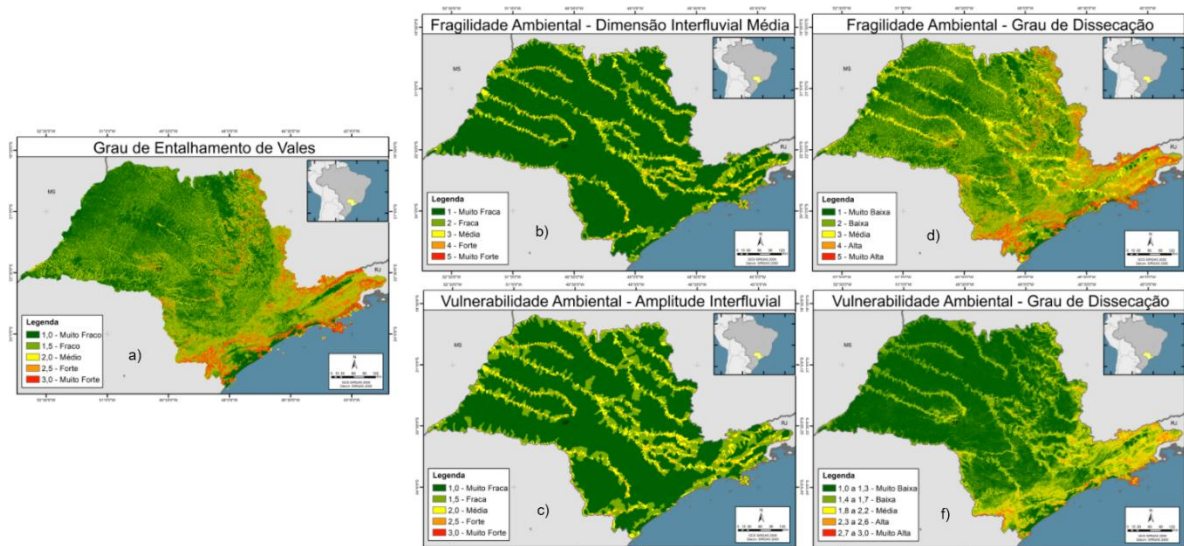


Figura 8: (a) Entalhamento do Relevo; (b) Dimensão Interfluvial Fragilidade; (c) Amplitude Interfluvial Vulnerabilidade; (d) Grau de Dissecação do Relevo Fragilidade; (e) Grau de Dissecação do Relevo Vulnerabilidade. Elaborado pelo autor.

Em sua tese de doutorado Sousa (2024) efetuou testes onde utilizou o dado de sub-bacias gerado de maneira automática através de uma ferramenta do software QGIS e utilizando os dados de otobacias da Agência Nacional das Águas (ANA, 2017). Porém nos testes efetuados os resultados não foram satisfatórios.

As informações resultantes desta ferramenta podem ser utilizadas como dados de entrada para diversos modelos ambientais. Desde os mais clássicos (Crepani et al., 1996, 2001; Ross, 1994, 2012) baseados na Ecodinâmica (Tricart, 1977) conforme demonstrado por Sousa (2024), até novas proposições de modelos baseados em algoritmos de inteligência artificial. Atualmente há grande crescimento nas propostas de produção de análise cartográfica do índice de dissecação do relevo através do ambiente SIG. Souza et al (2017) propõe o Índice Global de dissecação do relevo baseado em outras informações, destacando-se: o índice de Hack (Hack, 1973) e o índice de densidade de drenagem (Horton, 1945). Importantes aplicações desse tipo de informação são aplicadas globalmente, com importantes contribuições como Luo et al. (2016), Berila (2021).

O modelo desenvolvido permitiu a geração do Índice de Dissecação do Relevo para todo o Estado de São Paulo, visto que há um dado oficial com a delimitação das sub-bacias para todo o Estado (São Paulo, 2013). Com avanços na automatização da delimitação das sub-bacias, será possível a sua utilização para qualquer área. Importante observar que os

produtos gerados não são adequados para utilização em trabalhos de escala de detalhe, mas sim para trabalhos com análises da paisagem em escala regional (1:100.000).

4. CONCLUSÕES

Avanços como estes são importantes pois tornam acessíveis dados e informações cuja elaboração costuma ser laboriosa. O uso de recursos computacionais para o desenvolvimento de modelos ambientais se torna cada vez mais imprescindível. A grande quantidade de dados gerados diariamente cria a necessidade de análises cada vez mais ágeis e que possibilitem uma gestão territorial dinâmica.

Para isso torna-se necessário avanços como este, possibilitados pelo uso de workflows. Conclui-se que o artigo contribui com os seguintes pontos:

- Facilitar a geração de um dado que costuma ser muito laborioso. Com alguns ajustes no modelo é possível adaptá-lo para aplicação em outras áreas. A automatização de procedimentos é algo que demanda um grande tempo para ser concluída, mas quando feita permite um ganho de tempo para outras atividades e estudos.
- Possibilidade de novos avanços com o uso desta informação gerada como dado de entrada em modelos complexos. Possibilidade de avanço nas modelagens atuais, e criação de novas proposições de análise da paisagem.
- Avanços nos estudos de Planejamento Ambiental e Territorial. Possibilidade de automatizar outros processos e tornar o planejamento mais acessível, e o monitoramento territorial dinâmico.

A continuidade da automatização de procedimentos como este permitirá uma abordagem mais atual aos estudos ambientais e territoriais, mesmo utilizando modelos mais tradicionais.

5. REFERÊNCIAS

AB'SABER, A. N. **As altas Superfícies de Aplainamento do Brasil Sudeste**. Revista das Faculdades Campineiras, v. 1, n. 4, p. 60-67, 1954.

AB'SABER, A. N. **Regiões de Circundenudação Pós-Cretácea, no Planalto Brasileiro**. Boletim Paulista de Geografia, n. 1, p. 3-21, 1949. Disponível em: <https://publicacoes.agb.org.br/boletim-paulista/article/view/1419>.

ANA (Agência Nacional de Águas). **Base Hidrográfica Ottocodificada Multiescalas 2012**. Mapa Digital, 2017. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/b228d007-6d68-46e5-b30d-a1e191b2b21f>. Acesso em: ago. 2024.

BERILA, A.; FLORIM, I. **Determination of dissection index (DI) using GIS & RS techniques: a case study on Drenica river basin**. Folia Geographica, v. 63, n. 1, p. 5-18, 2021.

BIGARELLA, J. J.; HERRMANN, M. L. O.; SANTOS, G. F. dos; MENDONÇA, M.; SALAMUNI, E.; SUGUIO, K. **Estrutura e Origem das Paisagens Tropicais e Subtropicais**. v. 3: processos erosivos, vertentes, movimentos de massa, atividade endógena,

superfícies de erosão, compartimentação do relevo, depósitos correlativos e ambientes fluviais. Florianópolis: UFSC, 2004.

BRAGHETTO, K. R.; CORDEIRO, D. **Introdução à Modelagem e Execução de Workflows Científicos**. In: Atualizações em Informática. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, 2014. p. 1-40.

BRASIL. Decreto n. 4.297, de 10 de julho de 2002. **Critérios para o Zoneamento Ecológico-Econômico do Brasil**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2002.

CHRISTOFOLETTI, A. **Análise de Sistemas em Geografia**. São Paulo: Hucitec, 1979.

CIGNETTI, M.; GODONE, D.; FERRARI TRECATI, D.; BALDO, M. **New Paradigms for Geomorphological Mapping: A Multi-Source Approach for Landscape Characterization**. Remote Sensing, v. 17, n. 4, p. 581, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs17040581>.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S. DE; HERNANDEZ FILHO, P.; FLORENZANO, T. G.; DUARTE, V. **Uso de sensoriamento remoto no zoneamento ecológico-econômico**. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 8., 1996, Salvador. Anais... Salvador: INPE, 1996. p. 129-135.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S. DE; HERNANDEZ FILHO, P.; FLORENZANO, T. G.; DUARTE, V.; BARBOSA, C. C. F. **Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento Aplicados ao Zoneamento Ecológico-Econômico e ao Ordenamento Territorial**. São José dos Campos: SAE/INPE, 2001. 103 p. (INPE-8454-RPQ/722). DOI: <https://doi.org/INPE-8454-RPQ/722>.

EWA, D.; DENNIS, G.; MATTHEW, S.; IAN, T. **Workflows and e-Science: An overview of workflow system features and capabilities**. Future Generation Computer Systems, v. 25, n. 5, p. 528-540, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.future.2008.06.012>.

ESRI. **What is ModelBuilder?** 2021. Disponível em: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/analyze/modelbuilder/what-is-modelbuilder.htm>.

FARR, T. G. et al. **The Shuttle Radar Topography Mission**. Reviews of Geophysics, v. 45, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1029/2005RG000183>.

GUIMARÃES, F. S.; CORDEIRO, C. M.; BUENO, G. T.; CARVALHO, V. L. M.; NERO, M. A. **Uma proposta para automatização do índice de dissecação do relevo**. Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 18, n. 1, p. 155-167, 2017. DOI: <https://doi.org/10.20502/rbg.v18i1.1163>.

GOUVEIA, I. C. M. C.; ROSS, J. L. S. **Fragilidade Ambiental: uma Proposta de Aplicação de Geomorphons para a Variável Relevô**. Revista do Departamento de Geografia, v. 37, p. 123-136, 2019. DOI: <https://doi.org/10.11606/rdg.v37i0.151030>.

HACK, J. T. **Stream-profile analysis and stream-gradient index**. Journal of Research of the United States Geological Survey, v. 1, n. 4, p. 421-429, 1973.

HINE, C. M. **New Infrastructures for Knowledge Production: Understanding E-Science**. Hershey: Information Science Publishing, 2006.

HORTON, R. E. **Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology**. Bulletin of the Geological Society of America, v. 56, p. 275-370, 1945. DOI: <https://doi.org/10.1130/0016-7606>.

HUGGETT, R. J. **Systems Analysis in Geography**. Oxford: Clarendon Press, 1980.

HUGGETT, R. J. **Soil landscape systems: a model of soil genesis**. Geoderma, v. 13, p. 1-22, 1975.

HUGGETT, R. J. **A history of the systems approach in geomorphology**. Géomorphologie: relief, processus, environnement, v. 13, n. 2, 2007. DOI: <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.1031>.

JOLY, F. **Ponto de vista sobre a Geomorfologia**. Annales de Géographie, n. 86, 1977. Tradução: RODRIGUES, C.; CREMM, A. B.; CANDLEZ, M. C. – DG – FFLCH-USP, 1994.

KING, L. C. **Canons of landscape evolution**. Bulletin of the Geological Society of America, v. 64, n. 7, p. 721-732, 1953. DOI: <https://doi.org/10.1130/0016-7606>.

KING, L. C. **A Geomorfologia do Brasil Oriental**. Revista Brasileira de Geografia, v. 18, n. 2, p. 147-266, 1956.

LUO, W. et al. **Spatial association between dissection density and environmental factors over the entire conterminous United States**. Geophysical Research Letters, v. 43, n. 2, p. 692-700, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1002/2015GL066941>.

NASA (National Aeronautics and Space Administration). **The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)**, 2009. Disponível em: <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>.

ORME, A. R. **Denudation, planation, and cyclicity: myths, models, and reality**. In: SHRODER, J.; ORME, A. R.; SACK, D. (Eds.). Treatise on Geomorphology. v. 1: The Foundations of Geomorphology. San Diego: Academic Press, 2013. p. 205-232. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00012-9>.

PARANÁ. **Zoneamento Ecológico-Econômico do estado do Paraná**, 2018. Disponível em: <http://www.iat.pr.gov.br/Pagina/Zoneamento-Ecologico-Economico-ZEE>.

PENCK, W. Morphological Analysis of Landforms: A Contribution to Physical Geology. Tradução: HELLA CZECH; CATHERINE C. BOSWELL. Londres: Macmillan, 1953.

ROSS, J. L. S. **O registro cartográfico dos fatos geomórficos e a questão da taxonomia do relevo.** Revista do Departamento de Geografia, n. 6, p. 17-30, 1992.

ROSS, J. L. S. **Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais antropizados.** Revista do Departamento de Geografia, v. 8, p. 63-74, 1994. DOI: <https://doi.org/10.7154/RDG.1994.0008.0006>.

ROSS, J. L. S. **Geomorfologia e Geografia Aplicadas à Gestão Territorial: Teoria e Metodologia para o Planejamento Ambiental.** Tese (Livres Docência) – FFLCH/USP, São Paulo, 2001. 322 p.

ROSS, J. L. S. **Suporte da Geomorfologia Aplicada: Os Táxons e a Cartografia do Relevo (Palestra).** In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 4., 2002, São Luís. Anais... São Luís, 2002. Disponível em: <http://lsie.unb.br/ugb/sinageos/detalhe/7>.

ROSS, J. L. S. et al. **Geomorfologia.** In: FURLAN, S. A.; LEITE, S. A. Plano de Manejo do Parque Estadual Intervales. São Paulo: Fundação Florestal, 2008. p. 165-186. Disponível em: http://www.fflorestal.sp.gov.br/media/uploads/planosmanejo/PEIntervales/1.%20Volume%20Principal/cad%202_DIAGNOSTICO%20E%20AVALIACAO/pag165_186GEOMORFOLOGIA.pdf.

ROSS, J. L. S. **Landforms and environmental planning: potentialities and fragilities.** Revista do Departamento de Geografia, Volume Especial 30 Anos, p. 38-51, 2012. DOI: <https://doi.org/10.7154/RDG.2012.0112.0003>.

ROSS, J. L. S. **Ecogeografia do Brasil: subsídios para planejamento ambiental.** São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

ROSS, J. L. S.; GOUVEIA, I. C. M. C. **A taxonomia do relevo e a cartografia geomorfológica regional.** In: CARVALHO JÚNIOR, O. A. et al. (Orgs.). Revisões de Literatura da Geomorfologia Brasileira. Brasília: Universidade de Brasília, 2022. p. 705-736.

SÃO PAULO. **Plano de Manejo: Parque Estadual Intervales.** São Paulo: Fundação Florestal, 2008.

SÃO PAULO. **Limite das Sub-Bacias Hidrográficas do Estado de São Paulo,** escala 1:50.000 (Adaptado). Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, 2013.

SEMACE (Superintendência Estadual do Meio Ambiente). **Reestruturação e atualização do mapeamento do projeto Zoneamento Ecológico-Econômico do Ceará – zona costeira e unidades de conservação costeiras. Relatório final de caracterização ambiental e dos mapeamentos,** 2016. Disponível em: <https://www.semace.ce.gov.br/zoneamento-ecologico-economico>.

SOUSA, A. S. **Workflow científico aplicado à modelos ambientais: automatização das classificações ecodinâmicas e análise espaço-temporal.** Tese (Doutorado) – DG/FFLCH/USP, São Paulo, 2024. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/8/8135/tde-18022025-121027/pt-br.php>.

SOUZA, F. E.; FONSECA, B.; COELHO, F. **Compartimentação do relevo baseada em parâmetros morfométricos: uma proposta de índice global de dissecação do relevo.** In: Congresso Nacional de Geografia Física, 1., 2017, Campinas. Anais... Campinas, 2017. p. 1-12. DOI: <https://doi.org/10.20396/sbgfa.v1i2017.2085>.

TAYLOR, I. J.; DEELMAN, E.; GANNON, D. B.; SHIELDS, M. **Workflows for e-Science: Scientific Workflows for Grids.** Londres: Springer, 2006.

THOMAS, M. F. **Geomorphology in the Tropics: A Study of Weathering and Denudation in Low Latitudes.** Chichester: Wiley, 1994.

TINÓS, T. M. et al. **Aplicação e avaliação de metodologia de classificação automática de formas de relevo.** *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 15, n. 3, 2014. DOI: <https://doi.org/10.20502/rbg.v15i3.455>.

TRICART, J. **Ecodinâmica.** Rio de Janeiro: IBGE, 1977.

VASCONCELOS, V. et al. **Sistema de classificação geomorfométrica baseado em uma arquitetura sequencial em duas etapas: árvore de decisão e classificador espectral, no parque nacional serra da canastra.** *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 13, n. 2, 2012. DOI: <https://doi.org/10.20502/rbg.v13i2.248>.