

Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica da Lagoa do Peri

Priscilla Veiga Bernardelli

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E
AMBIENTAL

**CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA DA BACIA
HIDROGRÁFICA DA LAGOA DO PERI**

PRISCILLA VEIGA BERNARDELLI

FLORIANÓPOLIS, (SC)
JULHO/2015

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Bernardelli, Priscilla Veiga
Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica da
Lagoa do Peri / Priscilla Veiga Bernardelli ; orientador,
Pedro Luiz Borges Chaffe - Florianópolis, SC, 2015.
72 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico.
Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Inclui referências

1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2. Lagoa Costeira.
3. Extração Automática de Hidrografia. 4. Parâmetros
Morfométricos. I. Chaffe, Pedro Luiz Borges. II.
Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em
Engenharia Sanitária e Ambiental. III. Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E
AMBIENTAL

**CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA DA BACIA
HIDROGRÁFICA DA LAGOA DO PERI**

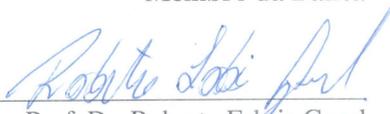
PRISCILLA VEIGA BERNARDELLI

Trabalho submetido à Banca
Examinadora como parte dos
requisitos para Conclusão do Curso de
Graduação em Engenharia Sanitária e
Ambiental–TCC II

Banca Examinadora:


Prof. Dr. Pedro Luiz Borges Chaffe
Orientador


Prof. Dr. Everton da Silva
Membro da Banca


Prof. Dr. Roberto Fabris Goerl
Membro da Banca

FLORIANÓPOLIS, (SC)
JULHO/2015

RESUMO

Caracterização morfométrica é a análise da geometria de bacias hidrográficas, e serve de ferramenta para o entendimento de questões como: tempo de concentração, estudos de nascentes e estudos de cheias. O presente trabalho consiste em realizar a caracterização morfométrica da bacia hidrográfica da Lagoa do Peri, situada na região sudeste do município de Florianópolis – SC. Foram calculados parâmetros de geometria e de drenagem nas sub-bacias delimitadas. Foi feita a análise da geração automática de hidrografia da bacia para verificar qual a influência da variação da resolução do Modelo Digital de Terreno (MDT) e das Áreas Mínimas de Contribuição na rede de drenagem extraída. Para o MDT foram gerados 4 modelos distintos nas resoluções de 1, 5, 10 e 15 metros, e para a área mínima de contribuição foram definidos 11 valores, variando-os de 0,5 a 7,0 hectares. As hidrografias geradas foram comparadas com a hidrografia original, sendo estabelecido um limite de buffer para esta comparação, e os trechos de rio excedentes a este foram categorizados como erro. A melhor rede de drenagem extraída possui valor de erro total igual a 44,88%, correspondente à resolução de 10 metros e área de 2,0 hectares. A caracterização morfométrica foi realizada com base nesta hidrografia e na hidrografia original. Os parâmetros de hierarquia fluvial, densidade de rios e densidade de drenagem apresentam pequenas diferenças entre as hidrografias, devido a divergência da ramificação destas. As Leis de Horton analisadas foram de maneira geral, validadas para as sub-bacias analisadas. Então os parâmetros morfométricos de drenagem calculados para as hidrografias se mostraram semelhantes, validando o uso de redes de drenagem extraídas automaticamente para a caracterização morfométrica.

Palavras-chave: Lagoa Costeira; Extração Automática de Hidrografia; Parâmetros Morfométricos.

ABSTRACT

Morphometric characterization is a basin geometry analysis, and it helps to understand: time of concentration, headwater characterization and inundation study. The present study performed a morphometric characterization of Lagoa do Peri watershed, localized at the southeast part of Florianópolis city. Geometrie and drainage parameters were calculated for the sub-basins delineated. Was performed an analysis of an automatic hydrography generation. It verifies how the variation of the Digital Terrain Model (DTM) resolution and the contributing area threshold modifies the generated drainage network. The DTM resolutions chosen were 1, 5, 10 and 15 meters, and the 11 contributing areas threshold chosen variate from 0,5 to 7,0 hectares. The extracted hydrographies were compared with the original one with a buffer limit, and the rivers outside this buffer were considerate as an error. The best extracted drainage network obtained a total error equal to 44,88%, corresponding to a 10 meters resolution and 2,0 hectares of area threshold. The morphometric characterization used this hydrography and the original one. The parameters river ordering system, stream frequency and drainage density presented small differences between the hydrographies, due to the divergent ramification. Horton's Laws of drainage network composition were validated in most of the analysis. So, the drainage morphometric parameters presented a similar result, showing that automatic generated hydrographies are valid for basin morphometric characterization.

Keywords: Coastal Lagoon; Automatic Hydrography Generation; Morphometric Parameters.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Modelo de Strahler de classificação de canais.....	23
Figura 2: Expressão gráfica das leis de Horton.....	26
Figura 3: Localização da bacia hidrográfica da Lagoa do Peri.....	27
Figura 4: Esquema de representação das ferramentas Flow Direction e Flow Accumulation.....	30
Figura 5: Demonstrativo da operação com <i>buffer</i> e representação dos tipos de comprimento de hidrografia. a) <i>Buffer</i> na hidrografia original, b) <i>Buffer</i> na hidrografia gerada.....	32
Figura 6: Representação das divisas das sub-bacias, no formato original (pixelado) e corrigido.....	34
Figura 7: Representação dos polígonos de área de contribuição de primeira ordem.....	37
Figura 8: Mapas dos MDTs de resolução de 1, 5, 10 e 15 metros, com a hidrografia original marcada.....	40
Figura 9: Erro de hidrografia excedente.....	41
Figura 10: Erro de hidrografia não gerada.....	41
Figura 11: Superfície 3D do erro total.....	43
Figura 12: Aproximação da superfície 3D do erro total.....	43
Figura 13: Comparação entre as hidrografias. Em azul a hidrografia original e em verde a hidrografia gerada.....	45
Figura 14: Sub-bacias delimitadas.....	46
Figura 15: Gráfico comparativo entre Área e Perímetro.....	48
Figura 16: a) Mapa de Altitude mediana das sub-bacias. b) Mapa de Declividade mediana das sub-bacias.....	49
Figura 17: Curvas hipsométricas da bacia hidrográfica, para as resoluções de 1, 5, 10 e 15 metros.....	50
Figura 18: Mapa da Hierarquia Fluvial das hidrografias.....	51
Figura 19: Mapa de Densidade de Rios das sub-bacias.....	54
Figura 20: Valores de Densidade de Drenagem das sub-bacias.....	56
Figura 21: Análise do Número de canais da sub-bacia 1. Em azul pontos da hidrografia original, e em preto pontos da hidrografia gerada. Circulados os pontos experimentais excluídos da análise de tendência.....	57
Figura 22: Análise do Comprimento médio dos rios da sub-bacia 1. Em azul pontos da hidrografia original, e em preto pontos da hidrografia gerada. Circulados os pontos experimentais excluídos da análise de tendência.....	58

Figura 23: Análise da Declividade média dos rios da sub-bacia 1. Em azul pontos da hidrografia original, e em preto pontos da hidrografia gerada. Circulados os pontos experimentais excluídos da análise de tendência.	58
Figura 24: Análise da Área média de contribuição da sub-bacia 1 Em azul pontos da hidrografia original, e em preto pontos da hidrografia gerada. Circulados os pontos experimentais excluídos da análise de tendência.	59
Figura 25: Análise do Número de canais da sub-bacia 5. Em azul pontos da hidrografia original, e em preto pontos da hidrografia gerada. Circulados os pontos experimentais excluídos da análise de tendência.	61
Figura 26: Análise do Comprimento médio dos rios da sub-bacia 5. Em azul pontos da hidrografia original, e em preto pontos da hidrografia gerada. Circulados os pontos experimentais excluídos da análise de tendência.	61
Figura 27: Análise da Declividade média dos rios da sub-bacia 5. Em azul pontos da hidrografia original, e em preto pontos da hidrografia gerada. Circulados os pontos experimentais excluídos da análise de tendência.	62
Figura 28: Análise da Área média de contribuição da sub-bacia 5 Em azul pontos da hidrografia original, e em preto pontos da hidrografia gerada. Circulados os pontos experimentais excluídos da análise de tendência.	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros morfométricos de geometria e drenagem.	36
Tabela 2: Valores do erro total. Os menores erros estão destacados em verde, e os maiores erros estão destacados em vermelho.....	42
Tabela 3: Valores dos parâmetros morfométricos de forma das sub-bacias.....	47
Tabela 4: Parâmetros Morfométricos de drenagem das sub-bacias, para as hidrografias original e gerada.	52
Tabela 5: Valores do fator Relação das variáveis analisadas nas quatro Leis de Horton, para as hidrografias original e gerada, referentes à sub-bacia 1.	59
Tabela 6: Valores do fator Relação das variáveis analisadas nas quatro Leis de Horton, para as hidrografias original e gerada, referentes à sub-bacia 5.	63

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
2. OBJETIVOS.....	16
2.1. OBJETIVO GERAL.....	16
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
3.1. BACIA HIDROGRÁFICA E SUB-BACIAS	17
3.2. UNIDADES DE CONSERVAÇÃO.....	18
3.3. LAGOAS COSTEIRAS	19
3.4. CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA DE BACIAS HIDROGRÁFICAS	20
3.4.1. Parâmetros Morfométricos de Geometria	21
3.4.2. Parâmetros Morfométricos de Drenagem.....	22
4. MATERIAIS E MÉTODOS	27
4.1. ÁREA DE ESTUDO	27
4.2. MODELO DIGITAL DE TERRENO (MDT).....	29
4.3. EXTRAÇÃO AUTOMÁTICA DA REDE DE DRENAGEM 30	
4.4. AVALIAÇÃO DOS ERROS.....	30
4.5. CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA.....	33
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	39
5.1. ANÁLISE DA GERAÇÃO AUTOMÁTICA DE HIDROGRAFIA	39
5.2. CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA DAS SUB- BACIAS	46
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	65
7. BIBLIOGRAFIA.....	67
APÊNDICE.....	71

1. INTRODUÇÃO

A análise morfométrica de bacias hidrográficas pode ser entendida em Geomorfologia como processos sistemáticos e racionais, cuja preocupação é a de “medir as formas do relevo”, ou seja, a geometria das bacias de drenagem (HORTON, 1945 *apud* SOUZA, 2005). Esta compreensão é de grande importância, pois é uma ferramenta para o entendimento das características hidrológicas existentes nessas unidades. Para Castro & Carvalho (2009), a análise morfométrica de bacias hidrográficas é um importante recurso para caracterizar e identificar a dinâmica de um sistema fluvial. Então, para compreender a relação existente entre as formas do relevo e os processos que ocorrem em uma bacia, são calculados os parâmetros morfométricos. E a comparação destes parâmetros permite a diferenciação de áreas homogêneas, auxiliando então na qualificação de alterações ambientais (ANTHONELI & THOMAZ, 2007).

As bacias hidrográficas podem ser analisadas como uma unidade geomorfológica fundamental, pelo fato de suas características governarem todo o fluxo superficial de água em seu interior (PISSARRA, 1998 *apud* TONELLO, 2005). Além disso, o entendimento da rede de drenagem de bacias é importante, pois interfere diretamente na dinâmica dos processos hidrológicos que ali ocorrem. Segundo a Política Nacional de Recursos Hídricos (BRASIL, 1997), a bacia hidrográfica é definida como uma unidade de estudo e gestão. Desta maneira, é de grande valia a compreensão do escoamento das águas de uma bacia hidrográfica para o planejamento e a gestão de ações em seu interior.

Existem nas bacias dois sistemas correlacionados: o de rede de drenagem e o de encostas. As encostas controlam o escoamento das águas, que são transportadas pelos canais até o exutório, formando então a rede de drenagem (RODRÍGUEZ-ITURBE & RINALDO, 2001). Para a obtenção das hidrografias de áreas de interesse, existem métodos automáticos de extração auxiliados por programas que se contrapõem às dificuldades existentes nos levantamentos de dados em campo. Estes métodos são executados a partir de informações de elevação da região analisada, como por exemplo as curvas de nível, e resultam em um Modelo Digital de Terreno (MDT), que por sua vez, gera os cursos de água.

A bacia hidrográfica da Lagoa do Peri, localizada no município de Florianópolis (SC), contempla a Lagoa do Peri, corpo hídrico classificado como o maior manancial de água doce do município. Devido a esta importância, esta região é categorizada desde 1981 como um Parque Municipal, pois visa preservar os remanescentes de mata atlântica e a biodiversidade da região. É neste cenário que será desenvolvido este estudo, no âmbito de realizar a caracterização morfométrica desta bacia hidrográfica. Além disso, será realizada a análise da geração automática de hidrografias, com o objetivo de verificar qual a influência da variação da resolução do Modelo Digital de Terreno e das Áreas Mínimas de Contribuição sobre os resultados de rede de drenagem gerados, e ainda, obter a melhor hidrografia gerada automaticamente.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Realizar a caracterização morfométrica da bacia hidrográfica da Lagoa do Peri.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar a análise da geração automática de hidrografia da bacia hidrográfica da Lagoa do Peri;
- Verificar como a variação da resolução do MDT e da área mínima de contribuição interfere no erro existente ao gerar automaticamente as hidrografias;
- Caracterizar morfometricamente as sub-bacias da área de estudo, com base nas hidrografias original e gerada automaticamente;
- Verificar se existe similaridade entre a hidrografia gerada e a hidrografia original, a partir da comparação dos parâmetros morfométricos obtidos.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. BACIA HIDROGRÁFICA E SUB-BACIAS

De acordo com Garcez e Alvarez (1988), o termo ciclo hidrológico faz referência ao comportamento natural da água quanto à sua ocorrência, transformação e relações com a vida humana. Ele é composto por duas fases principais, uma atmosférica e outra terrestre, e em cada uma delas ocorre o armazenamento temporário de água, o transporte e suas mudanças de estado. O ciclo hidrológico só é categorizado como um ciclo fechado quando analisado a nível global, pois os volumes evaporados em um determinado local do planeta não precipitam necessariamente nesta região. Ao considerarem-se então áreas menores de drenagem, como bacias hidrográficas, o ciclo hidrológico fica caracterizado como um ciclo aberto a nível local (TUCCI, 1997).

O ciclo hidrológico é normalmente estudado com maior interesse na fase terrestre, onde o elemento fundamental de análise é a bacia hidrográfica, que é uma área de captação natural da água proveniente da precipitação, e que faz convergir os escoamentos para um único ponto, sua exutória. A bacia hidrográfica compõe-se basicamente de um conjunto de superfícies vertentes e de uma rede de drenagem formada por cursos de água que confluem até resultar um leito único no exutório (TUCCI, 1997). Pode também ser definida como um conjunto de terras drenadas por um rio e seus afluentes, formada nas regiões mais altas do relevo por divisores de água, onde as águas das chuvas, ou escoam superficialmente formando os riachos e rios, ou infiltram no solo para formação de nascentes e do lençol freático (BARELLA, 2001 *apud* TEODORO et al., 2007).

Segundo a Política Nacional de Recursos Hídricos (BRASIL, 1997), define-se bacia hidrográfica como uma unidade de estudo e gestão. Anthoneli e Thomaz (2007) apontam as bacias hidrográficas como unidades importantes para compreender as características das formas do relevo, principalmente no que se refere aos estudos de evolução e dinâmica da superfície terrestre. Já para Tonello e Dias (2005), a bacia hidrográfica deve ser considerada como uma unidade de planejamento quando se deseja a preservação dos recursos hídricos, visto que as atividades desenvolvidas em seu interior têm influência sobre a quantidade e qualidade da água. Dessa maneira, o manejo de

bacias hidrográficas é um processo que permite formular um conjunto integrado de ações sobre o meio ambiente e sobre a estrutura social, econômica, institucional e legal da região, a fim de promover o desenvolvimento sustentável da mesma.

3.2. UNIDADES DE CONSERVAÇÃO

A preocupação com o meio ambiente no Brasil não é recente. Segundo Magalhães (1982), a primeira lei de proteção florestal teria sido o Regimento do Pau-Brasil, datada de 1605. Na época Imperial, José Bonifácio de Andrade e Silva sugeriu a criação de um setor administrativo responsável pelas “matas” e “bosques”, e enfatizava a necessidade de utilização moderada dos recursos naturais.

Nos tempos atuais se faz cada vez mais importante esta preservação do ambiente natural. A primeira categoria de Manejo oficialmente estabelecida no Brasil foi a de Parque Nacional, através da criação do primeiro Parque Nacional, o de Itatiaia, em 1937, com o objetivo de proteger matas primitivas, nascentes, flora e fauna da região. Com o passar dos anos, diversas outras categorias de manejo foram sendo estabelecidas por vários órgãos do setor público, como: Parque de Caça, Reserva Biológica, Estação Ecológica, Área de Proteção Ambiental, Área de Relevante Interesse Ecológico e Reserva Extrativista (ADAM, 2001). Com a criação destes conjuntos paralelos de Categorias de Manejo, gerou-se confusão de conceitos e objetivos.

Diante desta confusão, em 18 de julho de 2000 foi instituída a Lei nº 9.985, criando o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza – SNUC (BRASIL, 2000), no qual define-se como unidade de conservação: “Espaço territorial e seus recursos ambientais, incluindo as águas jurisdicionais, com características naturais relevantes, legalmente instituído pelo Poder Público, com objetivos de conservação e limites definidos, sob regime especial de administração, ao qual se aplicam garantias adequadas de proteção.” Os principais objetivos das Unidades de Conservação são: preservar a biodiversidade; preservar e restaurar a diversidade de ecossistemas naturais; incentivar o uso sustentável dos recursos naturais; proteger e recuperar recursos hídricos e edáficos; incentivar atividades de pesquisa científica; favorecer condições para educação ambiental e recreação em contato com a natureza, entre outros.

A área de estuário, a bacia hidrográfica da Lagoa do Peri, é categorizada como um Parque Municipal desde 1981, instituída pela Lei Municipal nº 1.828. O objetivo desta lei é assegurar a preservação do patrimônio natural da região, pois esta abriga os últimos remanescentes

de Mata Atlântica do município, destacando-se então como um importante ecossistema de preservação da biodiversidade (SBROGLIA; BELTRAME, 2012).

3.3. LAGOAS COSTEIRAS

De acordo com Kjerfve (1994), lagoas costeiras são corpos d'água localizados dentro do território continental, encontrados em todos os continentes, normalmente orientados paralelamente à linha da costa, separados do oceano por uma barreira ou conectados a este por um ou mais canais ou pequenas baías que permanecem abertos pelo menos intermitentemente, e que possuem profundidade que raramente ultrapassa poucos metros. Essas lagoas podem ou não estar sujeitas ao regime de marés, e a salinidade pode variar da água doce até uma condição hipersalina, dependendo do balanço hidrológico. A maioria das lagoas costeiras formou-se como resultado da elevação do nível dos oceanos, especialmente durante o Holoceno, e pela construção de barreiras costeiras por processos marinhos.

As lagoas costeiras comumente sofrem forte ação de descargas de rios, ventos, marés, precipitação, evaporação, aquecimento superficial e respondem de forma diferenciada a estas forçantes. A compreensão acerca das dinâmicas físicas, químicas, geológicas e ecológicas das lagoas são importantes no planejamento e implementação de estratégias de gerenciamento nas lagoas costeiras (KJERFVE, 1994).

Por volta de 13% das áreas costeiras em todo o planeta são ocupadas por lagoas costeiras, as quais geralmente sofrem impacto tanto por influência natural quanto antrópica (KJERFVE, 1994). No Brasil, a maioria das lagoas costeiras está concentrada nos estados do Rio de Janeiro e Rio Grande do Sul, e é nesses estados que os estudos desses ecossistemas são mais desenvolvidos (ESTEVES, 1998 *apud* HENNEMANN; PETRUCIO, 2011).

Geralmente estes corpos d'água retêm sedimentos inorgânicos e matéria orgânica servindo, portanto, como depósitos ou filtros de materiais (KJERFVE, 1994). Além disso, contribuem de maneira direta para a manutenção dos lençóis freáticos e para a estabilidade climática local e regional, sendo também considerados ecossistemas de grande importância para a preservação da biodiversidade e como reservatórios de água para o abastecimento doméstico, quando apresentam águas doces (ESTEVES, 2008).

Não obstante sua grande importância e usos múltiplos, as lagoas costeiras são consideradas um dos ecossistemas que mais sofrem impactos antrópicos. Dentre os principais impactos sofridos pelas lagoas estão: o lançamento de efluentes domésticos e/ou industriais, aterros e edificações nas margens, assoreamento da bacia hidrográfica, degradação da vegetação do entorno, introdução de espécies exóticas, dentre outros (ESTEVES, 1998 *apud* HENNEMANN; PETRUCIO, 2011).

A Lagoa do Peri, localizada na área de estudo, é um corpo hídrico com características peculiares, pois é classificada como uma lagoa costeira, mas possui grandes profundidades e não sofre influência marinha. Por ser uma lagoa de água doce, existe então nesta bacia a Estação de Tratamento de Água da Lagoa do Peri, operada pela Companhia Catarinense de Água e Saneamento (CASAN), abastecendo a população da costa leste/sul de Florianópolis. Esta lagoa é de grande importância para a região, pois além de ajudar a manter o equilíbrio do ecossistema desta bacia, ainda é considerada como o maior manancial de água do município de Florianópolis, apresentando uma elevada importância econômica.

3.4. CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA DE BACIAS HIDROGRÁFICAS

A análise morfométrica de bacias hidrográficas pode ser entendida em Geomorfologia como processos sistemáticos e racionais, cuja preocupação é a de “medir as formas do relevo”, ou seja, a geometria das bacias de drenagem (HORTON, 1945 *apud* SOUZA, 2005). As características morfométricas do padrão de drenagem e do relevo refletem algumas propriedades do terreno como infiltração e deflúvio das águas das chuvas (PISSARA et al., 2004). Visto isso, percebe-se que esta compreensão da morfometria das bacias é de grande importância, pois é uma ferramenta para o entendimento do comportamento hidrológico destas. Para Castro e Carvalho (2009), a análise morfométrica de bacias hidrográficas é um importante recurso para caracterizar e identificar a dinâmica de um sistema fluvial.

Então para compreender a relação existente entre as formas do relevo e os processos que ocorrem em uma bacia, são calculados os parâmetros morfométricos. Segundo Anthoneli e Thomaz (2007), a comparação destes parâmetros permite a diferenciação de áreas homogêneas, auxiliando então na qualificação de alterações ambientais.

Para o presente trabalho serão analisados os parâmetros morfométricos descritos a seguir. Estes foram divididos em dois grupos, entre parâmetros de geometria e parâmetros de drenagem da bacia. Esta divisão foi realizada para facilitar a análise e apresentação dos resultados.

3.4.1. Parâmetros Morfométricos de Geometria

As características de tamanho e forma de uma bacia hidrográfica interferem diretamente em seu comportamento hidrológico. Por isso, área e perímetro são variáveis indispensáveis para a compreensão das características de tamanho destas. Segundo Christofolletti (2005), a área é calculada à partir da projeção em plano horizontal da bacia hidrográfica, representando toda a região drenada pelo conjunto do sistema fluvial. Já o perímetro representa o comprimento da linha imaginária ao longo do divisor de águas (TONELLO, 2005).

Para o entendimento da forma da bacia, existe o Índice de Compacidade (K_c). Ele representa a relação entre o perímetro dessa e a circunferência de um círculo com área igual à da bacia (GARCEZ; ALVAREZ, 1988). Quanto mais irregular for a bacia, maior será o índice de compacidade, já para bacias com forma tendendo a um círculo, este coeficiente tende a 1. O Índice de Compacidade é calculado pela seguinte equação 1:

$$K_c = 0,28 * \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (1)$$

onde K_c é o índice de compacidade (adimensional), P é o perímetro da bacia (km) e A é a área da bacia (km²).

O Índice de Circularidade (I_c) é também outra maneira de se analisar a forma de uma bacia. Ele representa a relação entre a área da bacia hidrográfica e a área do círculo com circunferência igual ao perímetro da bacia. Esta variável é calculada pela equação 2:

$$I_c = \frac{12,57A}{P^2} \quad (2)$$

onde I_c é o índice de circularidade (adimensional), A é a área da bacia (km^2) e P é o perímetro da bacia (km). O valor máximo obtido pelo Índice de Circularidade é 1, e quanto mais próximo de 1, mais próxima da forma circular estará a bacia de drenagem (CHRISTOFOLETTI, 1980).

A determinação da Altitude de uma bacia hidrográfica se faz importante, pois esta variável exerce influência em fatores meteorológicos como precipitação e temperatura. A compreensão da variação destas variáveis em uma bacia pode ser analisada a partir de uma curva hipsométrica. Esta curva apresenta a área (em %) associada a cada valor de altitude existente, mostrando como esta variável se comporta (KOBAYAMA et al., 2011). A Altitude Mediana (H_m) é aquela que corresponde a 50% da área da bacia, podendo ser obtida pela curva hipsométrica.

Já a Declividade de uma bacia hidrográfica se faz importante, pois esta variável exerce influência em fatores hidrológicos como infiltração de água, umidade dos solos e escoamento superficial. A Declividade Mediana (S_m) é obtida de maneira similar à Altitude Mediana.

3.4.2. Parâmetros Morfométricos de Drenagem

Segundo Christofolletti (1980), a hierarquia fluvial consiste no processo de classificação de determinado curso de água (ou da área drenada que lhe pertence) sobre o conjunto total da bacia hidrográfica no qual se encontra. Um dos métodos existentes abordados pelo autor é o método desenvolvido por Strahler em 1952, no qual especifica que os menores canais de uma rede de drenagem, que não possuem tributários, são classificados como de primeira ordem, e que da confluência de dois canais de primeira ordem forma-se um canal de segunda ordem, podendo este receber apenas afluentes de primeira ordem. Canais de terceira ordem surgem então da confluência de dois canais de segunda ordem, e podem receber apenas afluentes de primeira ou segunda ordem, e assim sucessivamente. Este modelo de classificação pode ser visualizado pela Figura 1:

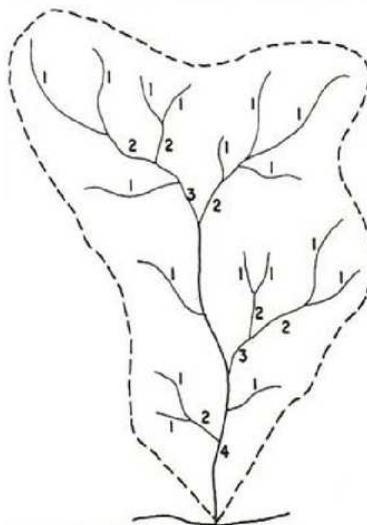


Figura 1: Modelo de Strahler de classificação de canais.

Fonte: Christofoletti, 1980.

Esta ordenação proposta por Strahler elimina o conceito de que o rio principal deve apresentar a mesma ordem ao longo de toda a sua extensão (CHRISTOFOLETTI, 1980).

A densidade fluvial é um parâmetro importante para a compreensão do comportamento de bacias hidrográficas. Existem dois tipos de densidade fluvial: a Densidade de Rios (D_r) e a Densidade de Drenagem (D_d).

Segundo Christofoletti (1980), a Densidade de Rios tem como finalidade comparar a quantidade de cursos de água existentes em uma área de tamanho padrão, como por exemplo o km^2 , e demonstra a capacidade que determinada área possui de gerar novos cursos de água. Pode ser expressa pela equação 3:

$$D_r = \frac{N}{A} \quad (3)$$

onde D_r é a densidade de rios (rio/km^2), N é o número de rios ou cursos de água e A é a área de drenagem (km^2). Para contabilizar o número de rios e utilizando a ordenação de Strahler, considera-se a quantidade de

rios de primeira ordem existente na bacia de drenagem, pois implica que todo e qualquer rio surge em uma nascente.

A Densidade de Drenagem representa a relação entre o comprimento total dos cursos de água e a área da bacia hidrográfica, com a equação 4:

$$D_d = \frac{L_t}{A} \quad (4)$$

onde D_d é a densidade de drenagem (km/ km²), L_t é o comprimento total dos cursos de água (km) e A é a área de drenagem (km²). Valores abaixo de 7,5 km/ km² representam baixa densidade de drenagem, valores entre 7,5 e 10 km/ km² representam média densidade, e acima de 10 km/ km² representam alta densidade de drenagem (CHRISTOFOLETTI, 1969 *apud* TEODORO et al., 2007).

Para o estudo de redes de drenagem, pode-se aplicar as quatro Leis de Horton para compreender o comportamento destas. A 1ª Lei de Horton (Lei do Número de canais) define a relação de bifurcação (RODRÍGUEZ-ITURBE; RINALDO, 2001), que representa a relação entre o número total de segmentos de determinada ordem, e o número total de segmentos de ordem imediatamente superior, podendo ser representada pela equação 5:

$$R_b = \frac{N_u}{N_{u+1}} \quad (5)$$

onde R_b é a relação de bifurcação (adimensional), N_u é o número de segmentos de determinada ordem e N_{u+1} é o número de segmentos de ordem imediatamente superior.

A 2ª Lei de Horton (Lei do Comprimento médio de canais) define a relação de comprimento (RODRÍGUEZ-ITURBE; RINALDO, 2001), que representa a relação entre o comprimento médio dos canais de determinada ordem, e o comprimento médio dos canais de ordem imediatamente inferior, com a equação 6:

$$R_l = \frac{Lm_u}{Lm_{u-1}} \quad (6)$$

onde R_l é a relação de comprimento (adimensional), Lm_u é o comprimento médio de canais de determinada ordem (km) e Lm_{u-1} é o comprimento médio de canais de ordem imediatamente inferior (km).

A 3ª Lei de Horton (Lei da Declividade média de canais) define a relação de declividade (KOBİYAMA et al., 2011), que representa a relação entre a declividade média dos canais de determinada ordem, e a declividade média dos canais de ordem imediatamente superior, com a equação 7:

$$R_s = \frac{Sm_u}{Sm_{u+1}} \quad (7)$$

onde R_s é a relação de declividade (adimensional), Sm_u é a declividade média de segmentos de determinada ordem (grau) e Sm_{u+1} é a declividade média de segmentos de ordem imediatamente superior (grau).

A 4ª Lei de Horton e Schumm (Lei da Área média de bacias) define a relação de área (RODRÍGUEZ-ITURBE; RINALDO, 2001), que representa a relação entre a área média das bacias de determinada ordem, e área média das bacias de ordem imediatamente inferior, com a equação 8:

$$R_A = \frac{Am_{u+1}}{Am_u} \quad (8)$$

onde R_A é a relação de área (adimensional), Am_{u+1} é a área média das bacias de determinada ordem (km²) e Am_u é a área média das bacias de ordem imediatamente inferior (km²).

As quatro relações apontadas pelas Leis de Horton podem ser representadas graficamente, em forma logarítmica (KOBİYAMA et al., 2011), como apresentado na Figura 2.

Horton observou que estas variáveis tendem a apresentar uma constância aproximada quando plotadas em gráficos logarítmicos, independentemente da bacia hidrográfica analisada. Para cada uma destas variáveis citadas, pode-se obter este valor de constância, representado pelo fator Relação. Este é obtido a partir da inclinação da melhor reta (coeficiente angular), proveniente dos pontos experimentais representantes de cada ordem, conforme indicado na equação 9:

$$a = \log R_w \quad (9)$$

onde a é o Coeficiente angular da melhor reta obtida pelo gráfico logarítmico e R_w é o fator Relação da variável plotada, onde w representa uma das quatro variáveis analisadas pelas leis.

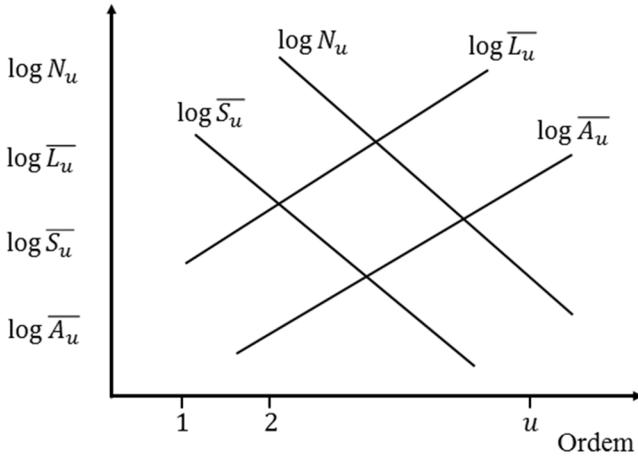


Figura 2: Expressão gráfica das leis de Horton.
(Adaptado de Kobiyama et al., 2011.)

Segundo Rodríguez-Iturbe & Rinaldo (2001), o valor mais representativo para R_b é igual a 4, variando geralmente entre 3 e 5. Para R_l , este valor é igual a 2, variando geralmente entre 1,5 e 3,5. Já para R_a , o valor mais representativo é igual a 5.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica da Lagoa do Peri está situada na parte sul do Brasil, estado de Santa Catarina, na região sudeste do município de Florianópolis com as coordenadas $27^{\circ} 44'$ de latitude Sul e $48^{\circ} 31'$ de longitude Oeste (Figura 3). Apresenta a área de $19,4 \text{ km}^2$, e nela esta situada a Lagoa do Peri, com uma área superficial de $5,7 \text{ km}^2$, representando 30% da área total da bacia. A bacia é composta por morros cobertos por Floresta Ombrófila Densa, e ainda por restinga típica de vegetação litorânea, que separa a lagoa do oceano atlântico (SILVA, 2000). As maiores altitudes situam-se ao longo da crista que contorna a bacia e estão representadas pelo Morro da Chapada (440 m), Morro da Tapera (383 m), Morro da Boa Vista (367 m) e Morro do Peri (334 m).

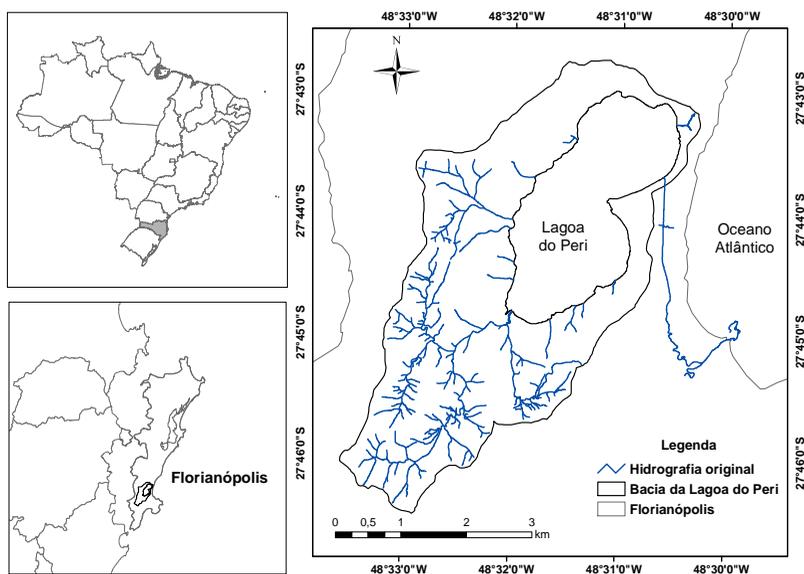


Figura 3: Localização da bacia hidrográfica da Lagoa do Peri.

Segundo Cabral (1999) a comunicação da lagoa com o Oceano Atlântico efetua-se através de um canal extravasor conhecido por rio

Sangradouro, que desemboca entre as praias do Matadeiro e da Armação. O rio Cachoeira Grande possui uma extensão de 1.7 km, nasce a uma altitude de 280 m e apresenta uma declividade média de 20 cm/m, drenando uma área de 1.66 km². O rio Ribeirão Grande, por sua vez, nasce a 285 m de altitude, possui uma extensão de 4.6 km e declividade média de 12 cm/m e drena uma área de 6.98 km² (SANTOS et al. 1989; LAPOLLI et al. 1993). Existem duas cachoeiras na bacia, situadas no rio Cachoeira Grandes e no rio Ribeirão Grande, ambas resultante da diferença de nível no leito dos rios (TONETTA et al, 2013).

A Lagoa do Peri apresenta um perímetro de 11,1 km, comprimento máximo efetivo de 4 km, largura máxima efetiva de 1,54 km para o setor norte e 1,87 km para o setor sul (OLIVEIRA, 2002). Ela possui esse nome devido a uma espécie de junco conhecido vulgarmente por “peri” ou “piri” que se desenvolve nas margens da lagoa (CABRAL, 1999).

Além disso, ela é classificada como uma lagoa costeira, devido principalmente à sua posição em relação à linha da costa e a sua origem geológica. A profundidade da lagoa aumenta de oeste para leste e seu ponto mais profundo atinge aproximadamente 11 metros, variando em média de 2 a 4 metros (HENNEMANN; PETRUCIO, 2011; SILVA et al, 2014). Em relação ao mar a Lagoa do Peri está entre 2 e 3 metros acima do nível relativo do mar, não sofrendo influencia das marés, mantendo suas águas livres de salinidade (CARUSO, 1983). Ela difere da maioria das lagoas costeiras, que são rasas e sofrem influência marinha (KJERFVE,1994), sendo também considerada como o principal manancial de água doce do município (SILVA et al, 2014).

Visto que a Lagoa do Peri é uma lagoa costeira de água doce, existe então na bacia a Estação de Tratamento de Água da Lagoa do Peri, operada pela Companhia Catarinense de Água e Saneamento (CASAN), abastecendo a população da costa leste/sul de Florianópolis. Além disso, a bacia hidrográfica da lagoa do Peri apresenta grande importância para a região, pois abriga os últimos remanescentes de Mata Atlântica do município, destacando-se então como um importante ecossistema de preservação da biodiversidade (SBROGLIA; BELTRAME, 2012). Devido a esta importância, desde 1981 foi criado pela Lei Municipal nº 1.828 o Parque Municipal da Lagoa do Peri, com o objetivo de proteger o manancial, preservar o patrimônio natural da região, e propiciar o desenvolvimento de atividades de lazer e recreação.

4.2. MODELO DIGITAL DE TERRENO (MDT)

O Modelo Digital de Terreno (MDT) é a representação de uma superfície contínua, onde é gerado um raster com informações de elevação para todas as células do modelo (SCHWANGHART; KUHN, 2009). Para isto, cria-se previamente um mapa com células em formato triangular (*TIN - Triangulated Irregular Network*) a partir das curvas de nível da região, com o auxílio da ferramenta *Create TIN* do software ArcGIS. Esta ferramenta cria uma série de triângulos conectados, e se faz muito útil para representar a modelagem de uma região. Feito isto, juntamente com a ferramenta *TIN to Raster*, esta superfície é transformada em um Modelo Digital de Terreno no formato raster.

Para que as curvas de nível possam ser trabalhadas corretamente, deve-se ter conhecimento sobre a escala cartográfica em que elas se encontram. Esta informação é importante, pois interfere na resolução espacial mais adequada que os produtos derivados destas curvas devem apresentar. O presente estudo utilizou curvas de nível com equidistância de 10 metros, porém não há certeza na escala em que elas foram geradas. Mas segundo Richardus (1973), em relevos com declividade elevada ($\alpha=45^\circ$), a escala cartográfica mais utilizada para este intervalo entre as curvas de nível, é de 1:25.000. Visto isso, adotou-se para este estudo, que as curvas de nível se encontram nesta escala.

O erro máximo associado à manipulação das curvas de nível pode ser determinado multiplicando-se a escala cartográfica das mesmas, pelo valor de acuidade visual, igual a 0,0002. Com isto, para a escala 1:25.000 obtém-se o erro máximo igual a 5 metros, portanto a menor resolução admitida para o MDT proveniente destas curvas é de 5 metros. Então para o desenvolvimento deste trabalho optou-se por gerar quatro MDTs distintos, a fim de observar como a variação desta resolução interfere nas hidrografias extraídas. Os tamanhos de célula escolhidos foram de 1, 5, 10 e 15 metros.

Os MDTs foram reconicionados usando como base a delimitação já existente de hidrografia da bacia. Para isto utilizou-se a ferramenta *DEM Reconditioning*, uma adaptação do método *Agree*, resultando em um MDT com a hidrografia de base marcada em seu raster (ZHAO et al., 2009). Essa marcação serve como guia para as células do mapa, auxiliando então na extração das redes de drenagem.

4.3. EXTRAÇÃO AUTOMÁTICA DA REDE DE DRENAGEM

A partir do MDT reconicionado, extraiu-se a rede de drenagem da bacia. Para isto, foi utilizada a ferramenta *Flow Direction*, que usa um algoritmo de oito direções para definir o sentido de fluxo de água que cada célula do raster apresentará, adotando por conseguinte aquele que apresentar o maior valor de declividade dentre os oito calculados. Em seguida, foi utilizada a ferramenta *Flow Accumulation*, que é baseada no modelo gerado pela ferramenta de direção de fluxo, e gera um raster representando o acúmulo das células de fluxo que existe em cada célula analisada (SCHWANGHART; KUHN, 2009). Estas ferramentas estão representadas na Figura 4:

MDE			Direção de Fluxo			Acúmulo de fluxo		
20	20	20				0	0	0
20	18	19				0	4	0
19	18	17				0	1	8

Figura 4: Esquema de representação das ferramentas *Flow Direction* e *Flow Accumulation*.

A extração das redes de drenagem foi feita com a ferramenta *Stream Definition* e realizada nas diferentes resoluções dos MDTs gerados. Ao aplicar esta ferramenta, pode-se definir qual a área mínima de contribuição que será considerada para ser gerado um curso de água. Quanto menor a área mínima de contribuição, mais densa é a hidrografia que se forma. Para este estudo foram extraídas 11 redes de drenagem em cada resolução de MDT, totalizando 44 hidrografias geradas. A área mínima de contribuição aplicada em cada MDT seguiu uma lógica de diminuição de restrição, sendo adotados os seguintes valores: 7,0; 6,0; 5,0; 4,0; 3,0; 2,5; 2,0; 1,5; 1,0; 0,75 e 0,50 hectares.

4.4. AVALIAÇÃO DOS ERROS

Na análise feita nas redes de drenagem extraídas, pode-se perceber que conforme a área mínima de contribuição é variada, e por consequência a densidade de cursos de água, o erro associado à geração destes também varia. Quanto mais densa é a hidrografia, maior é a

probabilidade de trechos serem gerados de forma demasiada. Porém, quanto mais densa ela for, mais ela consegue se equiparar à hidrografia original, que é utilizada como parâmetro de comparação neste estudo. Visto isso, foram definidos dois tipos de erros existentes ao gerar-se uma hidrografia: a) aquele que representa o conjunto de trechos que são gerados em demasia (Erro de hidrografia excedente), e b) aquele que representa o conjunto de trechos da hidrografia original que não conseguiram ser alcançados pela hidrografia gerada (Erro de hidrografia não gerada).

Para que as redes de drenagem possam ser trabalhadas com maior facilidade nesta situação, as hidrografias foram alteradas do formato raster (células) para shapefile (linhas). Devido a dificuldade de comparar a sobreposição de linhas, com o auxílio da ferramenta *Buffer* foi estabelecida uma região limite, que determina se os trechos gerados de hidrografia são considerados corretos ou como um erro. O valor definido para o *buffer* foi de 20 metros, visto que o menor erro possível para o MDT de células 15x15 é de 15 metros. Além disso, realizando-se uma análise visual entre o *buffer* e as hidrografias, pôde-se perceber que este limite de 20 metros é adequado para esta comparação.

Aplicou-se a ferramenta *Buffer* tanto na hidrografia original quanto nas hidrografias geradas. Isto faz com que nas operações de comparação das hidrografias, as linhas situadas dentro deste *buffer* sejam consideradas corretas, e as demais, situadas fora do mesmo, sejam consideradas como um erro. Desta forma, comparando-se as hidrografias: original com *buffer* e as geradas (Figura 5a), por meio da ferramenta *Erase*, obtém-se o comprimento de hidrografia excedente (linha representada em vermelho na figura a); e por meio da ferramenta *Clip*, obtém-se o comprimento de hidrografia gerada de acordo com a hidrografia original (linha representada em verde na figura a). De forma contrária, comparando-se a hidrografia original com as hidrografias geradas com *buffer* (Figura 5b), por meio da ferramenta *Erase*, obtém-se o comprimento de hidrografia original que não conseguiu ser alcançado pela hidrografia gerada, sendo então chamado de hidrografia não gerada (linha representada em azul na figura b).

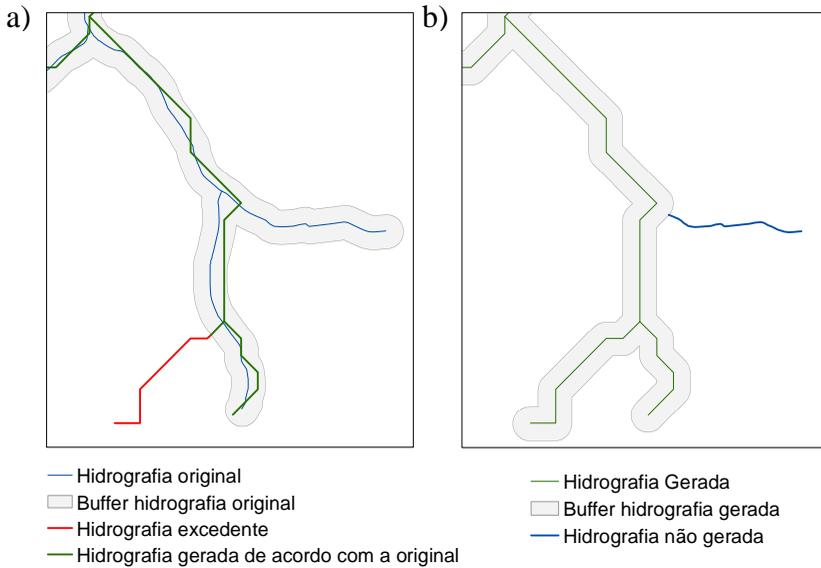


Figura 5: Demonstrativo da operação com *buffer* e representação dos tipos de comprimento de hidrografia. a) *Buffer* na hidrografia original, b) *Buffer* na hidrografia gerada.

Desta forma, são gerados 44 valores de comprimento de hidrografia excedente, e 44 valores de comprimento de hidrografia não gerada. Para o cálculo dos erros, foi feita a relação desses valores com o comprimento da hidrografia original, conforme demonstrado nas equações a seguir:

$$E_e = \frac{L_e}{L_o} * 100 \quad (10)$$

$$E_g = \frac{L_g}{L_o} * 100 \quad (11)$$

onde, E_e é o erro de hidrografia excedente (%), L_e é o comprimento de hidrografia excedente (km), L_o é o comprimento de hidrografia original (km), E_g é o erro de hidrografia não gerada (%) e L_g é o comprimento de hidrografia não gerada (km).

Para uma visão global do processo pode-se analisar de maneira conjunta os erros de hidrografia excedente e não gerada, a partir da soma destes valores, obtendo por fim o erro total ao gerar a rede de drenagem.

4.5. CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA

A bacia hidrográfica da Lagoa do Peri foi delimitada manualmente com auxílio do software ArcGIS. Esta delimitação consiste em traçar à mão livre um polígono sobre as curvas de nível a partir de um ponto de exutório, desenhando assim os divisores de água do terreno.

Para a delimitação das sub-bacias foi utilizado o método automático de delimitação de bacias. Utilizando como base o raster de direção de fluxo (*Flow Direction*), foram aplicadas as seguintes ferramentas:

a) *Stream Segmentation*, que gera um raster com a hidrografia segmentada em cursos de água com identificação única para cada segmento;

b) *Catchment Grid Delineation*, que gera um raster com a delimitação da área de contribuição de cada segmento de rio delineado pela ferramenta anterior;

c) *Catchment Polygon Processing*, que gera polígonos provindos desta delimitação das áreas de contribuição;

d) *Adjoint Catchment Processing*, para cada segmento que não seja nascente, é gerado um polígono que representa a soma das áreas de contribuição até este trecho;

e) *Batch Watershed Delineation*, delimita as bacias associadas a exutórios pré-selecionados.

As sub-bacias foram delimitadas a partir de exutórios pré-definidos. Estes foram baseados na hidrografia original, e situados nos pontos em que os rios encontram a Lagoa do Peri. As hidrografias geradas foram descartadas para a definição dos exutórios, pois apresentam ramificações indesejáveis e isso resultaria em um número demasiado de sub-bacias. Além disso, algumas regiões da bacia da Lagoa do Peri não foram incluídas em sub-bacias. Isto se justifica pois ao redor da lagoa existem áreas de encosta (regiões norte-noroeste e sudeste da bacia), e áreas majoritariamente planas (região leste da bacia) que geram apenas escoamento superficial, sem formar rios. Devido ao

fato de que a delimitação destas sub-bacias servirá para a caracterização morfométrica, tanto dos aspectos de drenagem quanto de forma, as regiões sem a presença de rios foram desconsideradas para esta análise.

Por serem provenientes de um raster, as sub-bacias geradas têm sua delimitação de divisores de água em formato pixelado. Isto interfere principalmente nos valores de perímetro associados às sub-bacias, visto que este formato pixelado aumenta o valor desta variável. Além disso, esta delimitação automática difere da delimitação manual realizada para a bacia como um todo, havendo sobreposição de divisas entre a delimitação das sub-bacias e da bacia da Lagoa do Peri. A fim de que estes problemas não ocorram, os polígonos das sub-bacias foram corrigidos de forma manual, sendo ajustados os divisores de água de acordo com as curvas de nível. Esta correção pode ser verificada na Figura 6 a seguir, na qual é representada a delimitação das sub-bacias com formato pixelado e também o corrigido.

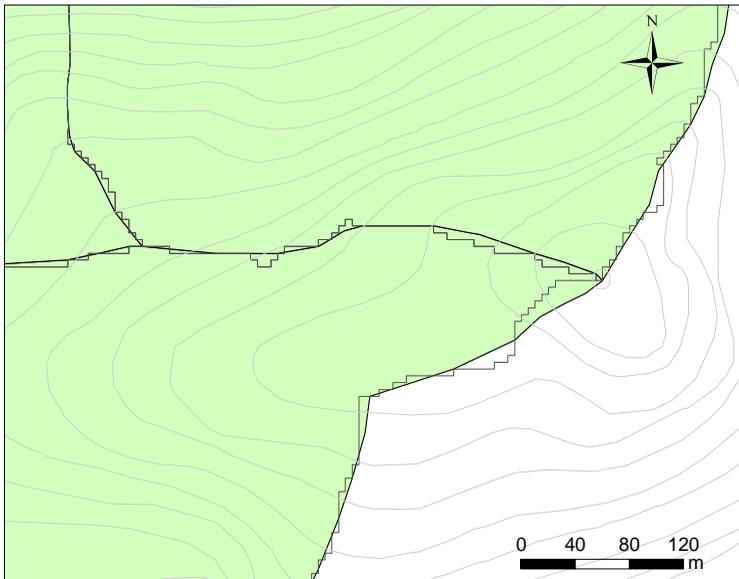


Figura 6: Representação das divisas das sub-bacias, no formato original (pixelado) e corrigido.

Os parâmetros morfométricos para análise de geometria foram calculados para todas as sub-bacias delimitadas. Dentre os parâmetros morfométricos de drenagem, apenas as variáveis Hierarquia Fluvial, Densidade de Rios e Densidade de Drenagem foram calculadas para

todas as sub-bacias. As variáveis relacionadas às Leis de Horton foram analisadas apenas para as duas maiores sub-bacias dimensionadas, visto que somente nestes casos a ordenação dos rios se mostrou coerente para esta análise. Os parâmetros morfométricos calculados podem ser visualizados na Tabela 1.

Para o cálculo dos parâmetros de drenagem, foram consideradas duas hidrografias: a original; e a gerada com menor valor de erro total, explicada no ítem 4.4 - Avaliação dos erros. Com isto, foram obtidos dois valores diferentes para cada parâmetro calculado. Estes servirão de comparação nos resultados, possibilitando verificar se a hidrografia gerada apresenta características semelhantes à hidrografia original, tida como base para o modelo efetuado.

O cálculo da Hierarquia Fluvial foi feito de forma diferente entre as hidrografias original e gerada. No caso da hidrografia original, por não haver o MDT que a gerou, esta análise foi realizada manualmente. Já para a hidrografia gerada, a Hierarquia Fluvial foi determinada a partir da ferramenta *Stream Order*, com base no modelo de direção de fluxo.

As quatro Leis de Horton se baseiam nesta ordenação de rios, e são analisados os seguintes parâmetros: Número de canais, Comprimento médio dos rios, Declividade média dos rios e Área média de contribuição. No caso da hidrografia original a delimitação das áreas de contribuição de cada ordem foi feita manualmente, e para a hidrografia gerada os polígonos foram obtidos pela ferramenta *Catchment Polygon Processing*. Estes polígonos não foram corrigidos em sua delimitação, sendo então mantido o seu formato pixelado, e ainda, a sobreposição entre as divisas da área de contribuição e da bacia da Lagoa do Peri (Figura 7).

Além disso, analisando-se a hidrografia gerada, pode-se perceber que algumas sub-bacias possuem mais do que um rio em seu interior. Isto ocorre pois esta hidrografia apresenta em algumas regiões uma densidade de cursos de água superior àquela encontrada na hidrografia original. Nestes casos, para a determinação da hierarquia fluvial e dos demais parâmetros de interesse, eliminou-se o rio que destoava da delimitação esperada para a região, mantendo-se o cálculo dos parâmetros como apresentado anteriormente.

Tabela 1: Parâmetros morfométricos de geometria e drenagem.

	Parâmetro	Abreviação	Equação	Unidade
Geometria	Índice de Compacidade	K_c	$K_c = 0,28 * \frac{P}{\sqrt{A}}$	-
	Índice de Circularidade	I_c	$I_c = \frac{12,57A}{P^2}$	-
	Declividade Mediana	D_m	-	grau
	Altitude Mediana	H_m	-	m
	Área	A	-	km ²
	Perímetro	P	-	km
Drenagem	Hierarquia Fluvial	-	-	
	Densidade de Rios	D_r	$D_r = \frac{N}{A}$	rio/km ²
	Densidade de Drenagem	D_d	$D_d = \frac{L_t}{A}$	km/km ²
	Relação de Bifurcação	R_b	$R_b = \frac{N_u}{N_{u+1}}$	-
	Relação de Comprimento	R_l	$R_l = \frac{Lm_u}{Lm_{u-1}}$	-
	Relação de Declividade	R_s	$R_s = \frac{Sm_u}{Sm_{u+1}}$	-
	Relação de Área	R_A	$R_A = \frac{Am_{u+1}}{Am_u}$	-

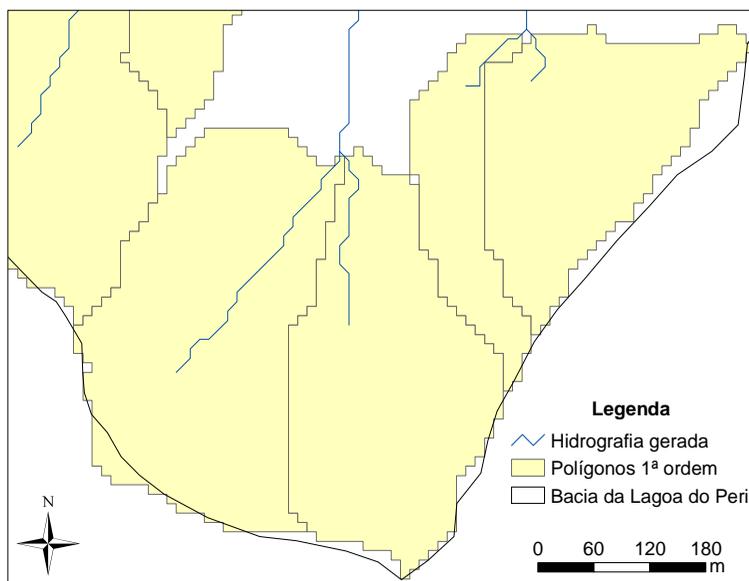


Figura 7: Representação dos polígonos de área de contribuição de primeira ordem.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. ANÁLISE DA GERAÇÃO AUTOMÁTICA DE HIDROGRAFIA

A seguir são apresentados os quatro MDTs gerados em diferentes resoluções para este estudo. A Figura 8 representa as resoluções de 1, 5, 10 e 15 metros. Estes modelos possuem a hidrografia original marcada em seus rasters, para que as redes de drenagem extraídas tendam a apresentar este traçado. A bacia possui um relevo montanhoso, com altitude máxima de 440 metros, localizada na região leste. A altitude é mínima ao nível da Lagoa do Peri, sendo este o corpo receptor das águas da bacia.

Os valores de erro de hidrografia excedente podem ser visualizados na Figura 9. A distribuição dos pontos mostra que quanto menor for a área mínima de contribuição escolhida, maior será o erro associado a esta variável, por consequência do aumento da densidade da rede de drenagem. Em áreas de contribuição abaixo de 1,0 hectare, podem-se perceber erros superiores a 100%. A resolução de MDT 15 metros em uma área de contribuição de 0,5 hectare, apresenta um valor máximo de erro igual a 216,41%. Isto ocorre porque nestes casos o comprimento de hidrografia gerada excedente é superior ao comprimento total da hidrografia original, fato que justifica estes valores estarem acima de 100%.

De mesmo modo, os valores de erro de hidrografia não gerada podem ser visualizados na Figura 10. A distribuição dos pontos mostra que quanto menor for a área mínima de contribuição escolhida, menor será o erro associado a esta variável, chegando a um valor mínimo de 2,79% na resolução de MDT de 5 metros e área de contribuição de 0,5 hectare. Dentre os MDTs analisados, a resolução de 1 metro foi a que menos alcançou a demarcação da hidrografia original, apresentando o maior erro em todos os pontos de área de acúmulo.

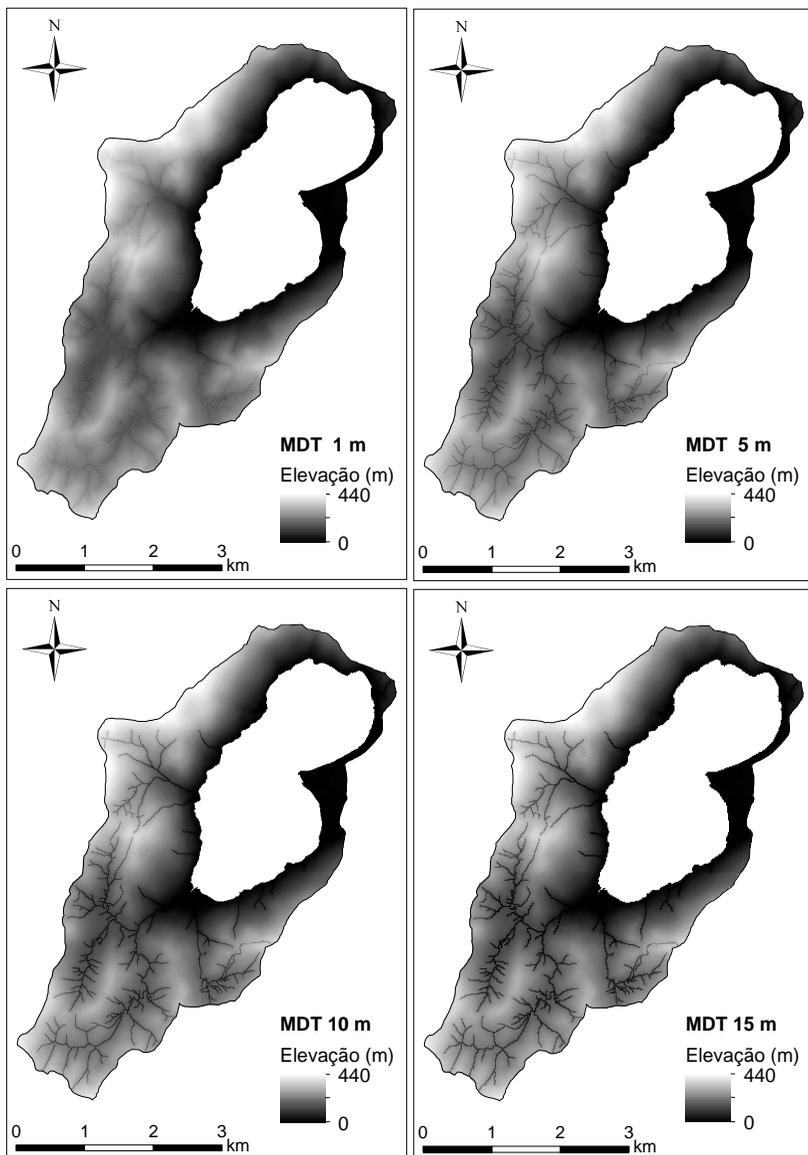


Figura 8: Mapas dos MDTs de resolução de 1, 5, 10 e 15 metros, com a hidrografia original marcada.

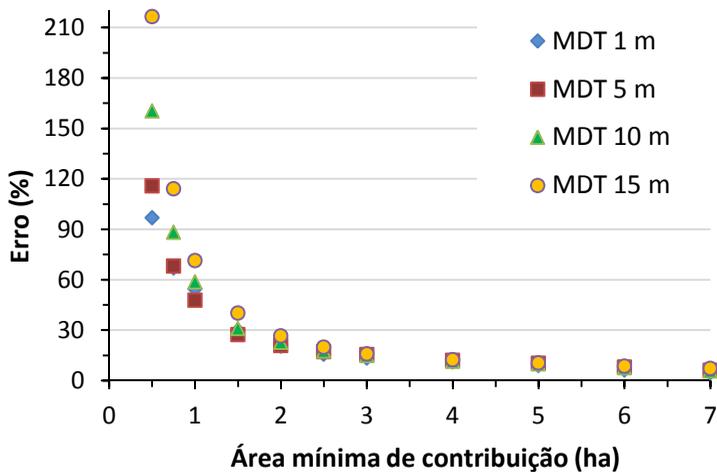


Figura 9: Erro de hidrografia excedente.

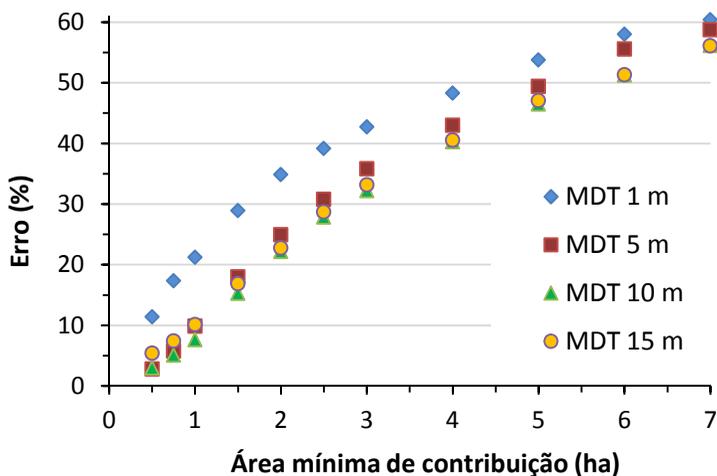


Figura 10: Erro de hidrografia não gerada.

Na Tabela 2 são apresentados os valores de erro total das hidrografias geradas, associados aos respectivos valores de resolução de

MDT e área de acúmulo. O menor erro total obtido é de 44,88%, correspondente à resolução de 10 metros e área de contribuição de 2,0 hectares. Esta resolução de MDT é a que, de maneira geral, apresenta a melhor resposta ao gerar as hidrografias, e na faixa de 7,0 a 2,0 hectares, possui os menores valores de erro total (destacado em verde na Tabela 2). De forma contrária, a resolução de 1 metro é a que apresenta as piores respostas ao gerar as hidrografias, e na faixa de 7,0 a 1,5 hectare, possui os maiores valores de erro total (destacado em vermelho na Tabela 2). Porém o maior erro total obtido é de 221,82%, correspondente à resolução de 15 metros e área de contribuição de 0,5 hectare.

Tabela 2: Valores do erro total. Os menores erros estão destacados em verde, e os maiores erros estão destacados em vermelho.

Área mínima de acúmulo (ha)	Resolução do Modelo Digital de Terreno			
	1 m	5 m	10 m	15 m
7,0	64,90	64,82	61,80	63,42
6,0	64,17	63,59	58,94	59,91
5,0	62,66	59,62	56,41	57,52
4,0	59,26	54,90	51,76	53,01
3,0	56,07	51,31	47,13	48,93
2,5	54,84	48,04	45,46	48,50
2,0	55,32	45,68	44,88	49,36
1,5	58,78	45,33	46,26	57,03
1,0	75,68	57,61	66,34	81,57
0,75	84,24	73,94	93,31	121,41
0,50	108,27	118,56	163,27	221,82

A superfície 3D apresentada na Figura 11 e Figura 12 a seguir demonstra a distribuição dos valores de erro total associados às hidrografias geradas. Nos eixos do gráfico são representadas as variáveis: Resolução de MDT (m), Área mínima de contribuição (ha) e o Erro total (%).

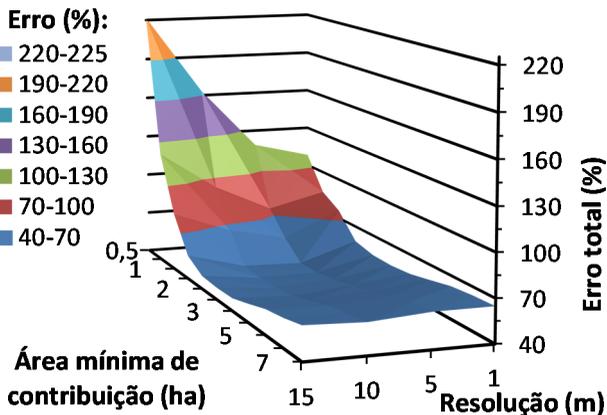


Figura 11: Superfície 3D do erro total.

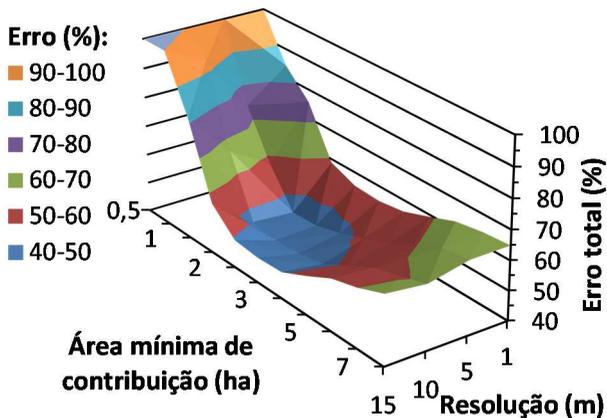


Figura 12: Aproximação da superfície 3D do erro total.

Percebe-se que nos menores valores de área de contribuição, existe uma influência demasiada do erro de hidrografia excedente na contabilização do erro total, o que justifica o pico máximo de 221,82% (Figura 11). A Figura 12 representa os mesmos dados, mas com ênfase nos valores de erro até 100%. Com isto, fica nítida a tendência que a superfície segue ao serem modificadas as variáveis analisadas. A faixa

central do eixo da área de contribuição (3,0 a 1,5 hectares) é a região ideal para gerar as hidrografias, pois assim não são contabilizados de forma demasiada no cálculo do erro total, os erros de hidrografias excedentes e não gerada.

Para o MDT, os erros variam de acordo com a resolução utilizada, mas fica claro pelo delineado da superfície que a resolução de 1 metro é a que apresenta os maiores erros. Isto pode ser justificado pois esta resolução foge do tamanho de célula adequado para os MDTs provindos das curvas de nível com espaçamento de 10 metros utilizadas neste estudo. Visto que o erro máximo associado à escala destas é de 5 metros, a resolução mínima adequada para um MDT neste caso é de 5 metros. Com isto, o MDT de 1 metro por estar fora dos padrões ideais para esta análise, mostrou-se como a resolução mais inadequada para a extração da rede de drenagem da bacia da Lagoa do Peri.

Ao gerar o MDT, o programa ArcGIS interpreta os valores de altitude incorporados nas curvas de nível e os interpola, definindo quais são os valores mais adequados de altitude para estarem agregados a cada célula do modelo. Ao variar a resolução do modelo e o tamanho destas células, interfere-se no valor de altitude inserido em cada uma, e por consequência nas ferramentas de fluxo (Flow Direction e Flow Accumulation), que irão guiar a geração das hidrografias. Visto isso, em relação à extração da rede de drenagem, pode-se perceber que os erros existentes ao gerar as hidrografias variam de MDT para MDT, demonstrando como esta interpolação inicial dos valores de altitude pode interferir na qualidade do resultado da hidrografia gerada.

A hidrografia extraída com menor erro total (resolução de MDT de 10 metros e área de contribuição de 2,0 hectares) foi selecionada para servir como base para a caracterização morfométrica das sub-bacias da área de estudo. A Figura 13 a seguir apresenta a comparação entre a hidrografia original e esta hidrografia gerada. Pode-se perceber que de maneira geral, a hidrografia original possui uma densidade maior do que aquela encontrada na hidrografia gerada. E ainda, nas áreas de encosta da bacia, a hidrografia gerada possui cursos de água que não são demonstrados na hidrografia original. Isto ocorre pois o software utilizado para gerar os cursos de água não consegue diferenciar o que é rio e o que é escoamento superficial que predomina nas encostas.

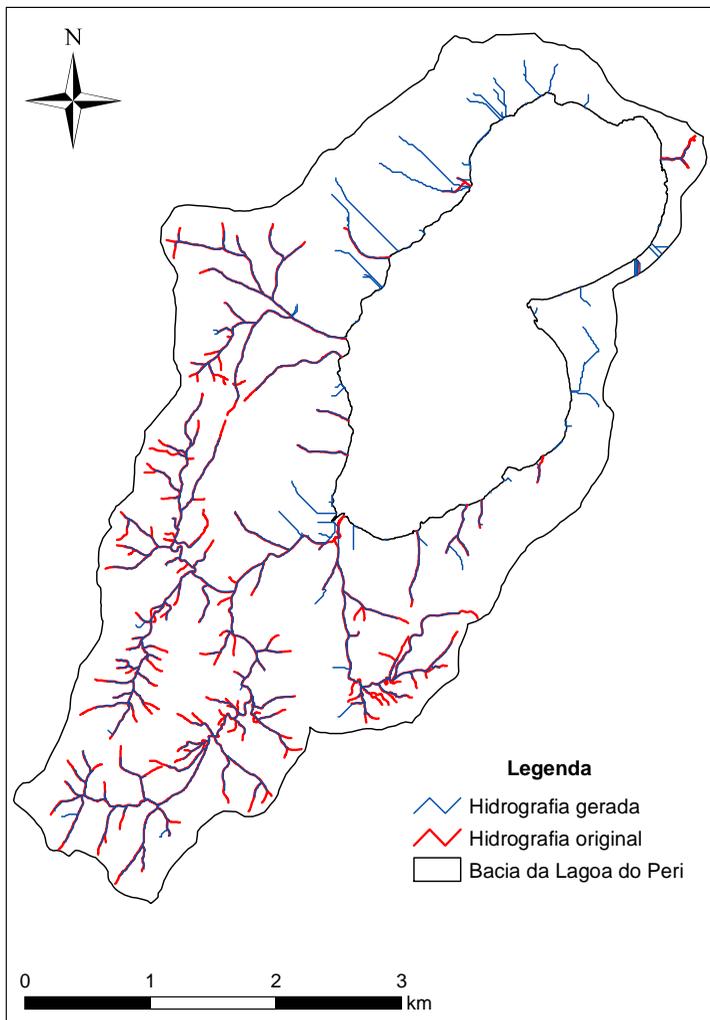


Figura 13: Comparação entre as hidrografias. Em azul a hidrografia original e em verde a hidrografia gerada.

5.2. CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA DAS SUB-BACIAS

A Figura 14 a seguir apresenta o resultado das sub-bacias delimitadas. Ao todo foram extraídas 12 sub-bacias, e estas foram enumeradas conforme indicado abaixo.

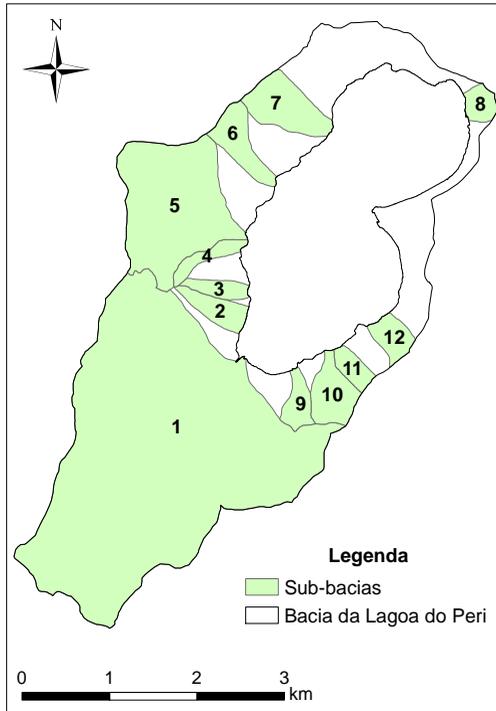


Figura 14: Sub-bacias delimitadas.

Os parâmetros morfométricos de geometria calculados para as sub-bacias estão demonstrados na Tabela 3 a seguir. As sub-bacias 1 e 5 são as maiores unidades extraídas, possuindo uma área igual a 7,17 e 1,61 km², respectivamente. As menores sub-bacias possuem uma área de 0,13 km², sendo elas as de numeração 3, 8 e 11. O menor perímetro obtido é igual a 1,39 km, referente à sub-bacia 8, e de modo contrário, o maior perímetro é igual a 13,05 km, referente à sub-bacia 1.

Tabela 3: Valores dos parâmetros morfométricos de forma das sub-bacias.

Bacia	Área (km²)	P (km)	K_c	I_c	H_m (m)	S_m (grau)
1	7,17	13,05	1,36	0,53	192	16
2	0,20	2,18	1,37	0,53	127	20
3	0,13	1,85	1,45	0,47	135	22
4	0,14	2,24	1,70	0,34	195	19
5	1,61	5,83	1,29	0,59	268	18
6	0,29	2,72	1,40	0,50	317	20
7	0,44	2,78	1,18	0,71	218	22
8	0,13	1,39	1,09	0,83	35	12
9	0,16	1,91	1,33	0,56	153	22
10	0,31	2,40	1,21	0,67	173	22
11	0,13	1,51	1,18	0,71	117	22
12	0,18	1,75	1,17	0,72	92	18

Onde P é o Perímetro (km), K_c é o Índice de Compacidade, I_c é o Índice de Circularidade, H_m é a Altitude mediana (m) e S_m é a Declividade mediana (grau).

A Figura 15 representa a comparação entre as variáveis área e perímetro, analisando-se o resultado de todas as sub-bacias. Pode-se perceber que os pontos seguem a tendência de uma função polinomial de segunda ordem, e o valor elevado obtido para R^2 demonstra uma forte correlação dos pontos com esta linha de tendência. Isto mostra que independente do tamanho ou forma da sub-bacia analisada, todas elas apresentaram a relação área e perímetro seguindo a mesma tendência.

Para os Índices de Compacidade e de Circularidade, a sub-bacia 8 possui os valores 1,09 e 0,83 respectivamente. Dentre todos os valores apresentados destas variáveis, estes dois são os que mais tendem a 1, demonstrando que esta sub-bacia é a que possui o formato mais circular. Isto demonstra que esta sub-bacia está mais susceptível a inundações do que as demais.

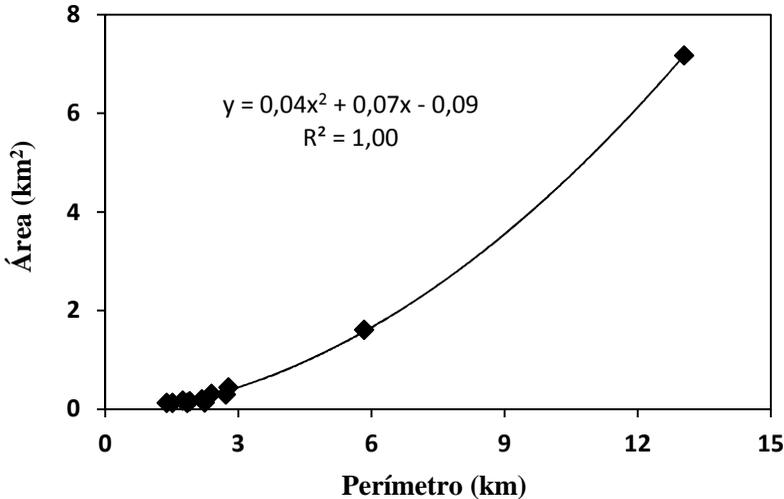


Figura 15: Gráfico comparativo entre Área e Perímetro.

Analisando-se a Altitude mediana, a sub-bacia 6 é a que apresenta o maior valor, sendo este igual a 317 metros. A menor Altitude mediana é encontrada na sub-bacia 12, sendo igual a 92 metros. Para a análise da Declividade mediana, as inclinações das sub-bacias variam de 16 a 22 graus. As unidades 3, 7, 9, 10 e 11 possuem o mesmo valor de declividade mediana, igual a 22 graus. Estas duas variáveis estão representadas na Figura 16. Pela análise do mapa de declividade mediana, pode-se perceber que as regiões norte, noroeste e sudeste localizadas ao redor da lagoa são mais declives, demonstrando as áreas de encosta da bacia. Estas áreas por serem mais íngrimes, apresentam uma maior velocidade de escoamento superficial, fato que interfere na infiltração de água no solo e pode propiciar a erosão deste.

A Figura 17 a seguir apresenta o gráfico com as curvas hipsométricas da bacia. Estas curvas demonstram em porcentagem, a área que possui altitude superior a determinada elevação analisada. Neste estão plotados os pontos referentes às quatro resoluções geradas de MDT. Pode-se perceber que a variação desta resolução não interferiu nos valores de elevação da bacia, pois as quatro curvas são iguais, estando sobrepostas no gráfico.

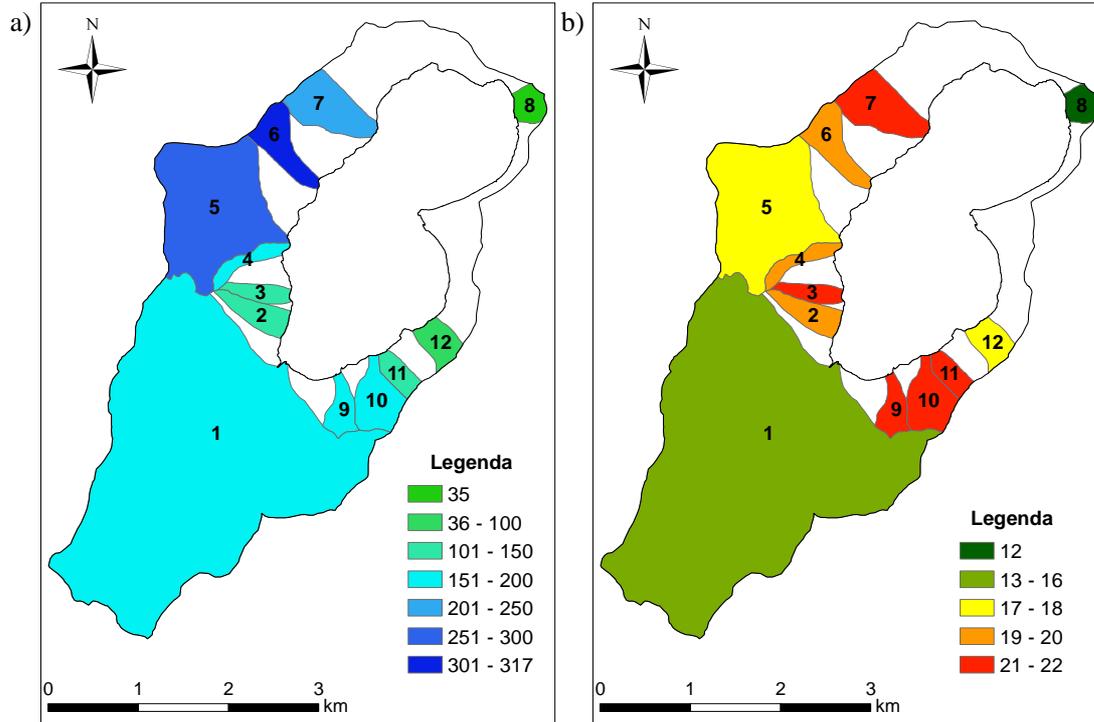


Figura 16: a) Mapa de Altitude mediana das sub-bacias. b) Mapa de Declividade mediana das sub-bacias.

A amplitude altimétrica é de 440 metros, o que indica que a bacia possui relevo acidentado. Nesse contexto, apenas 20% da área analisada possui elevação acima de 250 metros. Ou seja, os 80% de células restantes possuem elevação abaixo deste valor, mostrando o fato de a altitude mediana, referente a 50% das células analisadas, ser igual a 178 metros.

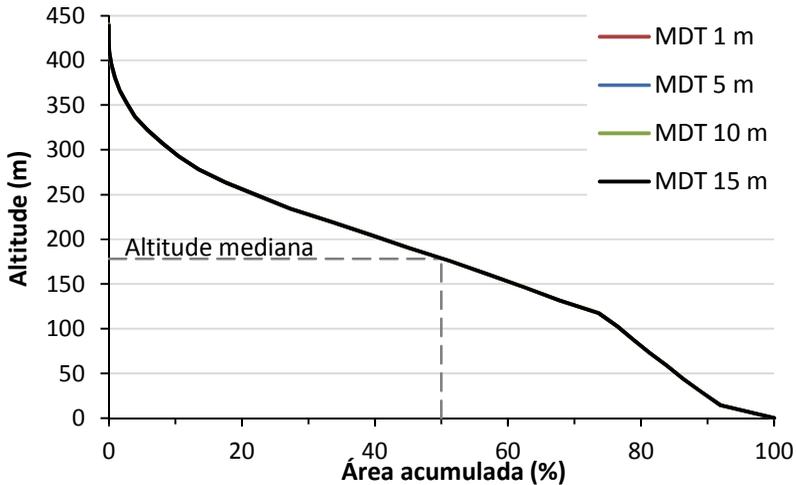


Figura 17: Curvas hipsométricas da bacia hidrográfica, para as resoluções de 1, 5, 10 e 15 metros.

A Figura 18 a seguir representa o resultado da Hierarquia Fluvial, calculada para as hidrografias original e gerada. Devido ao fato de as duas hidrografias analisadas possuírem ramificações diferentes, o resultado de ordenação destas também possui uma resposta diferente.

A sub-bacia 1 é classificada como de 5ª ordem, representando a maior ordenação. A sub-bacia 5 é classificada como de 4ª ordem, e as demais variam entre 1ª e 2ª ordem. Estas unidades 1 e 5 por apresentarem maior ramificação, possuem uma rede de drenagem mais densa se comparada às outras sub-bacias.

A Tabela 4 apresenta o resultado dos parâmetros morfométricos de drenagem calculados para todas as sub-bacias, tanto para a hidrografia original quanto a gerada.

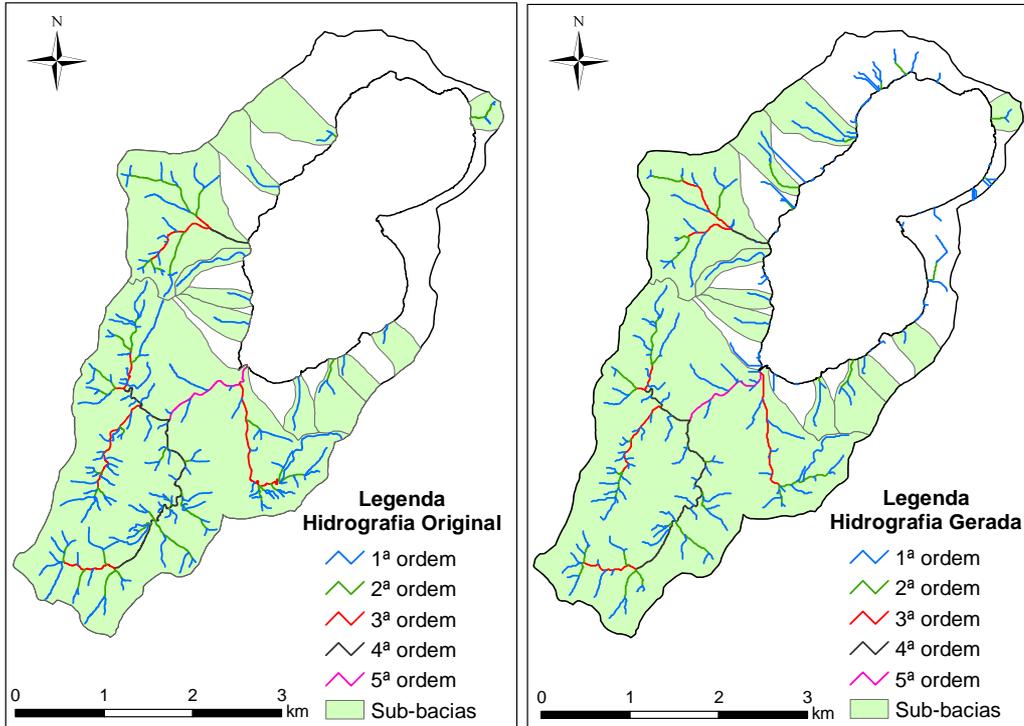


Figura 18: Mapa da Hierarquia Fluvial das hidrografias.

Tabela 4: Parâmetros Morfométricos de drenagem das sub-bacias, para as hidrografias original e gerada.

Bacia		L	Ord.	Canais 1ª ord.	Dr	%	Dd	%
1	HO	38,18	5	121	16,88		5,32	
	HG	30,95	5	96	13,39	-21	4,32	-19
2	HO	0,46	1	1	5,02		2,28	
	HG	0,44	1	1	5,02	0	2,19	-4
3	HO	0,29	1	1	7,86		2,28	
	HG	0,28	1	1	7,86	0	2,22	-3
4	HO	1,00	1	1	7,34		7,36	
	HG	0,85	1	1	7,34	0	6,23	-15
5	HO	7,24	4	22	13,66		4,50	
	HG	6,42	4	19	11,80	-14	3,99	-11
6	HO	0,53	1	1	3,39		1,81	
	HG	0,84	2	2	6,78	100	2,86	58
7	HO	0,34	2	2	4,57		0,77	
	HG	1,59	2	3	6,85	50	3,63	371
8	HO	0,51	2	3	23,55		4,00	
	HG	0,36	2	2	15,70	-33	2,79	-30
9	HO	0,65	1	1	6,20		4,06	
	HG	0,68	2	2	12,39	100	4,22	4
10	HO	0,63	2	2	6,51		2,04	
	HG	0,88	2	3	9,77	50	2,88	41
11	HO	0,24	1	1	7,74		1,85	
	HG	0,22	1	1	7,74	0	1,72	-7
12	HO	0,23	1	1	5,70		1,33	
	HG	0,15	1	1	5,70	0	0,88	-34

Onde *HO* é a Hidrografia Original, *HG* é a Hidrografia Gerada, *L* é o Comprimento total dos cursos de água (km), *Dr* é a Densidade de Rios (rio/km²), *Dd* é a Densidade de Drenagem (km/km²) e % representa a diferença das variáveis entre as hidrografias.

Analisando-se a ordenação das sub-bacias, para as duas maiores unidades a ordenação continua a mesma, independente da hidrografia

analisada. Já para as demais sub-bacias, esta ordenação difere entre as hidrografias. Aquelas unidades situadas em áreas de encosta possuem uma hidrografia gerada mais densa que a hidrografia original.

Para o Número de canais de primeira ordem, apenas 5 das 12 sub-bacias possuem o mesmo valor tanto para a hidrografia original quanto para a gerada. Na sub-bacia 1 este valor destoa de forma significativa. Para a hidrografia original o número de canais contabilizados é de 121, enquanto que para a hidrografia gerada este valor é de 96. Isto ocorre devido à diferença de ramificação das redes de drenagem. Nas demais sub-bacias em que este valor é diferenciado, isto ocorre devido a maior densidade da hidrografia gerada nas áreas de encosta, justificativa semelhante à diferença de ordenação destas unidades.

A análise do Número de canais de 1ª ordem é importante pois este valor interfere no resultado da Densidade de Rios. Com isso, pode-se perceber que nas sub-bacias em que o número de canais é diferente para as hidrografias, o valor de Densidade de Rios também é. Esta variável está associada à frequência de ocorrência de rios por unidade de área. A unidade 8 possui o maior valor desta variável, sendo igual a 23,55 rios/km². Este é assim significativo pois esta sub-bacia possui uma área pequena, elevando assim o valor de densidade, por serem variáveis inversamente proporcionais. O menor valor é de 3,39 rios/km², referente à sub-bacia 6. Ambos os valores são resultantes da hidrografia original. Analisando-se a coluna de porcentagens de Densidade de Rios, é possível visualizar a diferença dos resultados entre as hidrografias. As sub-bacias 6 e 9 possuem a maior diferença, sendo ela igual a 100%, demonstrando que o valor para a hidrografia gerada é o dobro daquele observado para a hidrografia original. A comparação entre os valores de Densidade de Rios obtidos para as hidrografias, pode ser observada na Figura 19.

Analisando-se o Comprimento total dos rios, as sub-bacias 1 e 5 possuem os maiores valores para esta variável, sendo iguais a 38,18 e 7,24 km respectivamente, ambos resultantes da hidrografia original. A sub-bacia 12 possui o menor comprimento, sendo este igual a 0,15 km, resultante da hidrografia gerada. A variável Densidade de Drenagem depende do Comprimento total dos rios, e visto que em todas as sub-bacias estes valores de comprimento destoam entre as hidrografias analisadas, os valores de Densidade de Drenagem variam também.

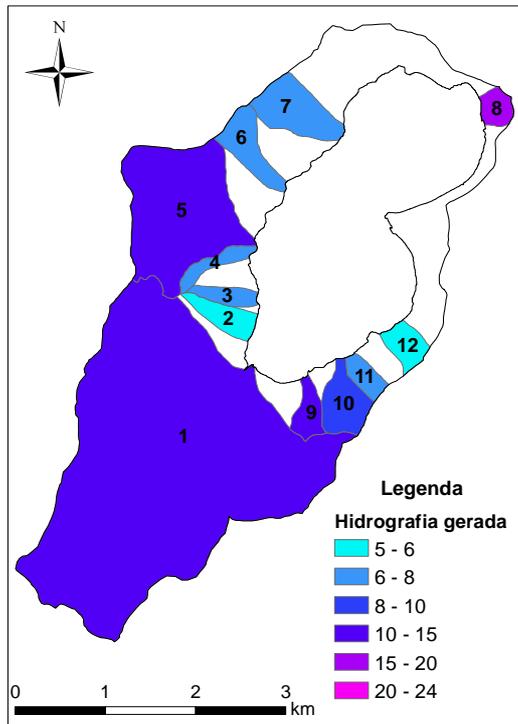
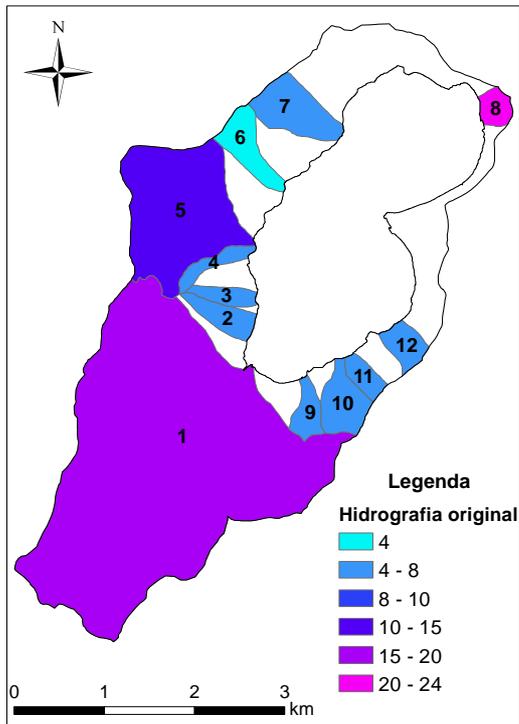


Figura 19: Mapa de Densidade de Rios das sub-bacias.

Esta variável está associada com o tipo de solo e com a infiltração existente em determinada região, pois em locais onde a infiltração é dificultada, a possibilidade de se formarem cursos de água é maior, apresentando valores mais elevados de densidade de drenagem.

A sub-bacia 4 possui o maior valor para esta variável, igual a 7,36 km/km², resultante da hidrografia original. E de forma contrária, a sub-bacia 7 possui o menor valor de densidade de drenagem, igual a 0,77 km/km², também resultante da hidrografia original. Comparando estes valores com a classificação apontada por Christofolletti (1969), por estarem abaixo de 7,5 km/km², todas as sub-bacias analisadas possuem baixa densidade de drenagem. Analisando-se a coluna de porcentagens de Densidade de Drenagem, é possível visualizar a diferença dos resultados entre as hidrografias. A sub-bacia 7 possui a maior diferença, sendo ela igual a 371%, demonstrando que o valor para a hidrografia gerada é elevado se comparado àquele observado para a hidrografia original. A comparação entre os valores de Densidade de Drenagem obtidos para as hidrografias, pode ser observada na Figura 20.

As quatro Leis de Horton foram calculadas para as sub-bacias 1 e 5, por representarem as maiores sub-bacias delimitadas. Com estas leis, foram analisadas as seguintes variáveis: Número de canais, Comprimento médio dos canais, Área média de contribuição, e Declividade média dos canais, todos eles em função de cada ordem existente nas sub-bacias. Estes valores obtidos estão representados no Apêndice.

Foram gerados gráficos logarítmicos para cada variável das Leis de Horton. Esta análise foi feita em duplicata, tanto para a hidrografia original (representação em azul nos gráficos), quanto para a melhor hidrografia gerada (representação em preto nos gráficos), possibilitando então a comparação do resultado das duas. Para cada série de dados foi obtida a linha de tendência, bem como a equação e o R². Na avaliação dos pontos, pode-se perceber que os valores associados à última ordem analisada foram desconsiderados do cálculo da linha de tendência. Estes pontos, por representarem o último trecho da sub-bacia em questão, podem destoar dos demais. Por isso, estes se encontram circulos nos gráficos, para representar sua exclusão da análise e evitar que interfiram no resultado de tendência obtido.

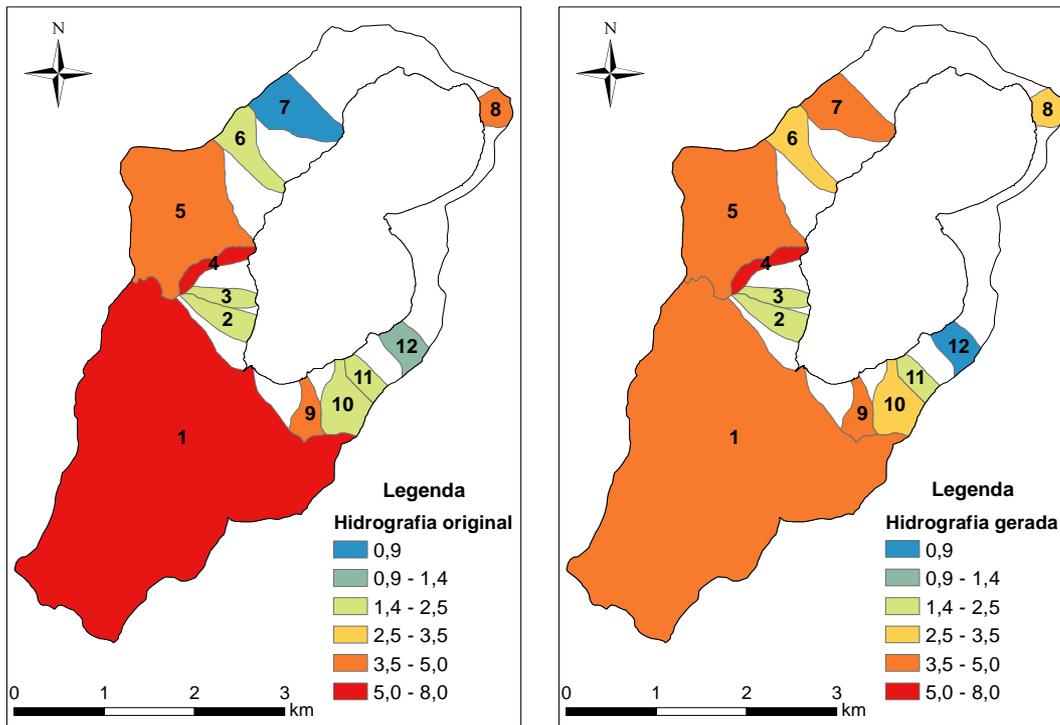


Figura 20: Valores de Densidade de Drenagem das sub-bacias.

As figuras a seguir apresentam os gráficos da análise da sub-bacia 1. A Figura 21 demonstra o gráfico dos pontos para a variável de Número de canais. Neste, ambas as hidrografias seguem a tendência decrescente esperada para esta variável, e ainda, o valor de R^2 elevado para os dois casos demonstra uma forte correlação entre os pontos e a reta traçada. A variável de Comprimento médio esta representada no gráfico da Figura 22. Pode-se perceber que a hidrografia gerada obteve uma resposta muito similar à hidrografia original, e que ambas seguem a tendência crescente esperada para esta variável.

A Figura 23 representa o gráfico dos pontos de Declividade média. Pode-se perceber que a tendência decrescente para esta variável é alcançada por ambas as hidrografias, e os valores de R^2 obtidos demonstram média correlação entre os pontos e a reta traçada. A variável de Área média está representada no gráfico da Figura 24. Pode-se perceber que ambas as hidrografias apresentaram um resultado similar, seguindo a tendência crescente esperada para esta variável. Os valores de R^2 são elevados, demonstrando forte correlação entre os pontos e a reta traçada.

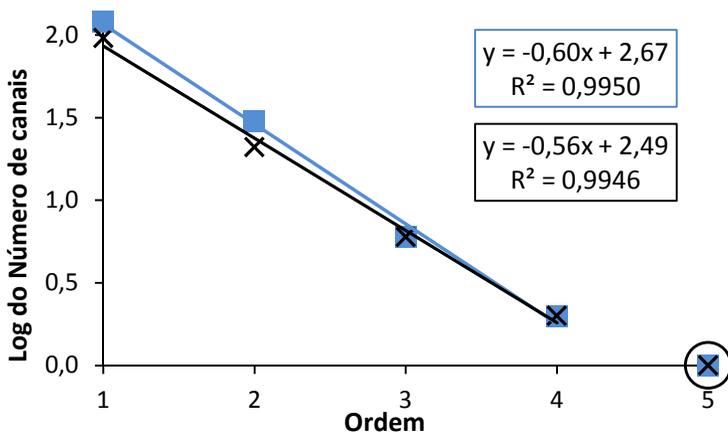


Figura 21: Análise do Número de canais da sub-bacia 1. Em azul pontos da hidrografia original, e em preto pontos da hidrografia gerada. Circulados os pontos experimentais excluídos da análise de tendência.

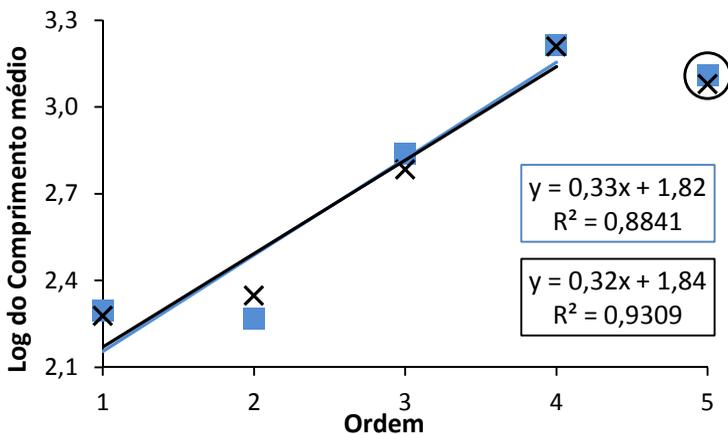


Figura 22: Análise do Comprimento médio dos rios da sub-bacia 1. Em azul pontos da hidrografia original, e em preto pontos da hidrografia gerada. Circulados os pontos experimentais excluídos da análise de tendência.

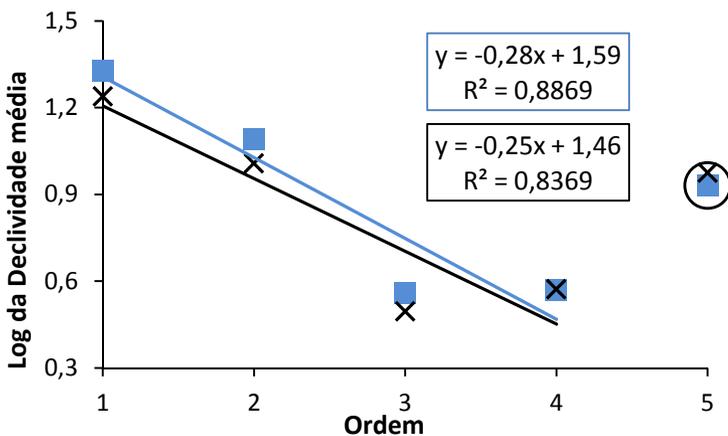


Figura 23: Análise da Declividade média dos rios da sub-bacia 1. Em azul pontos da hidrografia original, e em preto pontos da hidrografia gerada. Circulados os pontos experimentais excluídos da análise de tendência.

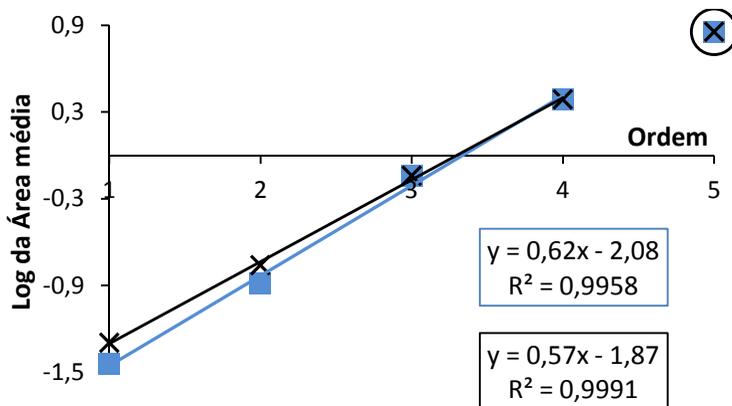


Figura 24: Análise da Área média de contribuição da sub-bacia 1 Em azul pontos da hidrografia original, e em preto pontos da hidrografia gerada. Circulados os pontos experimentais excluídos da análise de tendência.

A Tabela 5 a seguir apresenta os valores do fator Relação calculados para as quatro variáveis das Leis de Horton, referentes às hidrografias original e gerada da sub-bacia 1. Estes foram obtidos a partir dos coeficientes angulares das equações de melhor reta, apresentadas nos gráficos anteriores.

Tabela 5: Valores do fator Relação das variáveis analisadas nas quatro Leis de Horton, para as hidrografias original e gerada, referentes à sub-bacia 1.

Variável analisada		a	R_w
Número de canais	HO	0,60	3,98
	HG	0,56	3,63
Comprimento médio	HO	0,33	2,14
	HG	0,32	2,09
Declividade média	HO	0,28	1,91
	HG	0,25	1,78
Área média	HO	0,62	4,17
	HG	0,57	3,72

Onde a é o coeficiente angular; R_w é o fator Relação; HO é a Hidrografia Original e HG é a Hidrografia Gerada.

Segundo Rodríguez-Iturbe e Rinaldo (2001), o valor mais representativo para a Relação de Bifurcação (R_b) é igual a 4; para a Relação de Comprimento (R_l) este valor é igual a 2; e para a Relação de Área (R_a) este valor é igual a 5. Com isso, a partir desta tabela pode-se perceber que os valores obtidos tanto para R_b quanto para R_l , seguem estes parâmetros representativos. Para R_a , este valor é diferente para as hidrografias analisadas, sendo a hidrografia original a que melhor se aproxima do valor mais representativo para esta relação. E para R_s , os valores obtidos para ambas hidrografias são próximos de 2. Isto indica que para estas variáveis, os pontos analisados seguem de maneira geral, uma variação proporcional entre as ordens analisadas, confirmando a interpretação de Horton em suas leis, para a constância destas variáveis.

As figuras a seguir apresentam os gráficos da análise da sub-bacia 5. A Figura 25 demonstra o gráfico dos pontos para a variável de Número de canais. Pode-se perceber que a hidrografia gerada obteve uma resposta muito similar à hidrografia original, e que ambas seguem a tendência decrescente esperada para esta variável. Os valores de R^2 são elevados, demonstrando forte correlação entre os pontos e a reta traçada.

A variável de Comprimento médio esta representada no gráfico da Figura 26. Pode-se perceber que a tendência crescente para esta variável é alcançada por ambas as hidrografias, e para os valores de R^2 obtidos, aquele referente à hidrografia gerada apresentou maior correlação entre os pontos e a reta traçada.

A Figura 27 demonstra o gráfico dos pontos para a variável de Declividade média. Para a hidrografia original, pode-se perceber que a tendência decrescente esperada para esta variável foi seguida, e o R^2 desta reta apresenta média correlação. Já para a hidrografia gerada, a melhor reta traçada não possui uma tendência decrescente, mas praticamente horizontal, e ainda, o valor de R^2 obtido, igual a 0,0005, é muito baixo. Isto demonstra que para esta variável e para esta hidrografia, os pontos experimentais não seguem a tendência decrescente esperada, e ainda, que os valores de declividade obtidos para as diferentes ordens se mantiveram praticamente constantes. A variável de Área média está representada no gráfico da Figura 28. Pode-se perceber que ambas as hidrografias apresentaram um resultado similar, seguindo a tendência crescente esperada para esta variável. Os valores de R^2 são elevados, demonstrando forte correlação entre os pontos e a reta traçada.

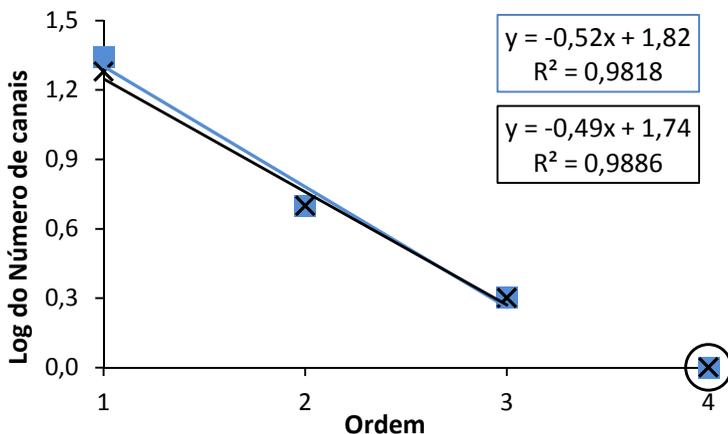


Figura 25: Análise do Número de canais da sub-bacia 5. Em azul pontos da hidrografia original, e em preto pontos da hidrografia gerada. Circulados os pontos experimentais excluídos da análise de tendência.

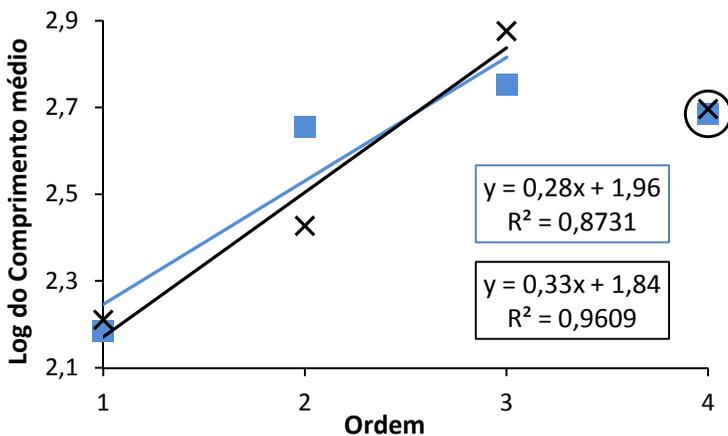


Figura 26: Análise do Comprimento médio dos rios da sub-bacia 5. Em azul pontos da hidrografia original, e em preto pontos da hidrografia gerada. Circulados os pontos experimentais excluídos da análise de tendência.

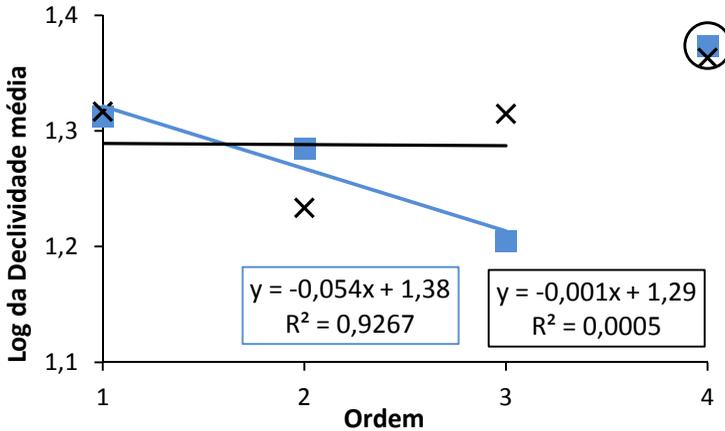


Figura 27: Análise da Declividade média dos rios da sub-bacia 5. Em azul pontos da hidrografia original, e em preto pontos da hidrografia gerada. Circulados os pontos experimentais excluídos da análise de tendência.

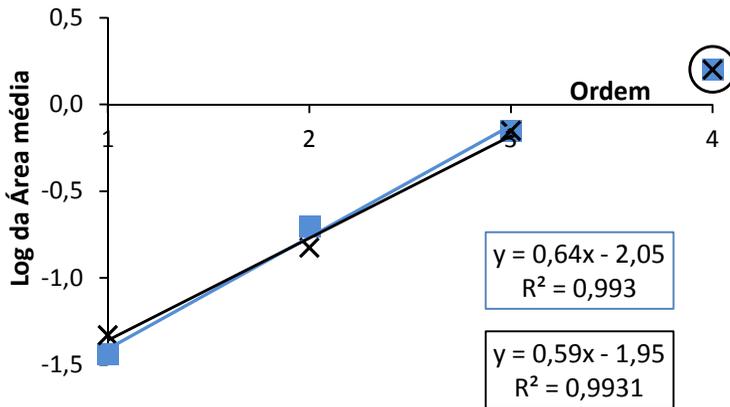


Figura 28: Análise da Área média de contribuição da sub-bacia 5. Em azul pontos da hidrografia original, e em preto pontos da hidrografia gerada. Circulados os pontos experimentais excluídos da análise de tendência.

A Tabela 6 a seguir apresenta os valores do fator Relação calculados para as quatro variáveis das Leis de Horton, referentes às hidrografias original e gerada da sub-bacia 5. Estes foram obtidos a partir dos coeficientes angulares das equações de melhor reta, apresentadas nos gráficos anteriores.

Tabela 6: Valores do fator Relação das variáveis analisadas nas quatro Leis de Horton, para as hidrografias original e gerada, referentes à sub-bacia 5.

Variável analisada		a	R_w
Número de canais	HO	0,520	3,31
	HG	0,490	3,09
Comprimento médio	HO	0,280	1,91
	HG	0,330	2,14
Declividade média	HO	0,054	1,13
	HG	0,001	1,00
Área média	HO	0,640	4,37
	HG	0,590	3,89

Onde a é o coeficiente angular; R_w é o fator Relação; HO é a Hidrografia Original e HG é a Hidrografia Gerada.

A partir desta tabela pode-se perceber que os resultados obtidos para R_b e R_l provenientes das duas hidrografias analisadas, são próximos dos valores de referência abordados anteriormente. Isto indica que para estas variáveis, os pontos experimentais variaram de maneira proporcional entre as ordens analisadas, afirmando a interpretação de Horton sobre a constância destas variáveis. Para R_a , este valor é diferente para as hidrografias analisadas, sendo a hidrografia original a que melhor se aproxima do valor mais representativo para esta relação. E para R_s , os valores obtidos para ambas as hidrografias são próximos de 1.

As leis de Horton demonstram que na análise de qualquer uma das quatro variáveis, quando plotadas em gráficos logarítmicos seus resultados tendem a apresentar uma constância aproximada em seu comportamento, independentemente da bacia hidrográfica analisada. Porém isto não é uma regra, visto que não existe maneira de se prever perfeitamente o comportamento da natureza, mas sim, apenas uma lógica de comportamento que muitas vezes se repete para as bacias. Para as duas sub-bacias analisadas, de maneira geral, esta constância foi visualizada para as variáveis observadas.

Na análise dos gráficos, ao serem obtidas as linhas de tendência e os valores de R^2 , consegue-se observar como os pontos seguem a tendência crescente ou decrescente que se espera para a variável

analisada, e o quanto eles se correlacionam com a melhor reta. Este valor de R^2 não ser elevado, não necessariamente significa que os pontos não seguem a tendência da variável, mas sim que alguma ordem analisada destoa da tendência das demais, influenciando assim no valor do R^2 . E isso mostra que a bacia possui alguma particularidade em seu comportamento hidrológico, que faz com que na resposta desta ordem, essa tendência não seja visualizada.

No caso das duas sub-bacias analisadas, mesmo havendo esta divergência da tendência nos pontos de algumas ordens, de maneira geral, os gráficos demonstram que os valores convergiram para o resultado de tendência esperado, apontado por Horton. E ainda, pôde-se perceber que a hidrografia gerada se comportou de maneira similar à hidrografia original, demonstrando a mesma tendência na análise das Leis de Horton.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

No presente estudo foi realizada a análise de geração automática de hidrografia, auxiliada por um software de geoprocessamento. Com base nos resultados, percebe-se que a variação da Resolução do MDT e da Área mínima de contribuição interferiu no erro associado à geração das hidrografias. Analisando-se a superfície do erro total é possível visualizar que a faixa de área de contribuição mais adequada para gerar as hidrografias neste caso está entre os valores de 3,0 e 1,5 hectares, pois nela não estão inseridos de forma demasiada os erros de hidrografia excedente e não gerada. Já a análise dos MDTs mostra que a resolução de 10 metros é a que apresenta de maneira geral os menores valores de erro total, sendo esta a mais indicada para aplicação nesta bacia. Com isto, a hidrografia com menor erro total, gerada a partir do MDT com resolução de 10 metros e área de contribuição de 2 hectares, foi considerada como a melhor hidrografia gerada, e utilizada para o cálculo dos parâmetros morfométricos.

Por conseguinte, a bacia hidrográfica em questão foi dividida em 12 sub-bacias, e estas serviram como base para a análise da caracterização morfométrica. Os parâmetros de geometria analisados possibilitam a análise dos aspectos de forma, altitude e declividade das sub-bacias, sendo uma ferramenta importante para a compreensão do escoamento superficial destas unidades. Os parâmetros de drenagem analisados para as duas hidrografias servem como ferramenta para a compreensão do comportamento hidrológico da bacia.

Além disso, foram analisadas as quatro Leis de Horton nas hidrografias. A partir dos gráficos logarítmicos plotados, pode-se perceber que os pontos associados às ordens, obtiveram de maneira geral, uma distribuição similar àquela apontada por Horton. Em seus estudos ele demonstra que as relações entre as ordens das bacias variam proporcionalmente, o que justifica o fator relação tender ao mesmo valor, independente da bacia analisada. As relações de bifurcação, comprimento e área obtiveram um resultado igual ao valor mais representativo apontado pela bibliografia, mostrando que esta tendência se encaixa para a bacia analisada.

Analisando-se as hidrografias com base nos resultados da caracterização morfométrica, pode-se perceber que a ramificação das mesmas é diferenciada, principalmente nas regiões de encosta. Isto interfere no resultando de ordenação e nos comprimentos, que interfere

por sua vez nas análises de drenagem das sub-bacias. Porém, essa diferença não é acentuada na maioria dos casos. E ainda, com base nos gráficos das leis de Horton, as duas hidrografias possuem pontos experimentais similares na maioria dos gráficos. Com isto, colclui-se que a melhor hidrografia gerada para esta bacia, apresenta um comportamento similar à hidrografia original. Com isso, os parâmetros morfométricos de drenagem calculados para as hidrografias se mostraram semelhantes, validando o uso de redes de drenagem extraídas automaticamente para a caracterização morfométrica.

Além disso, os resultados alcançados com esta metodologia de geração automática de hidrografia foram satisfatórios, pois apontam quais são os melhores valores de área de contribuição e resolução de MDT para gerar hidrografias na bacia em questão. Porém este modelo aplicado pode ser melhorado, gerando valores menores de erro. Para isto, pode-se utilizar curvas de nível com menor espaçamento e melhor resolução, e uma hidrografia de base mais precisa, interferindo então nos cursos de água gerados pelo software e no erro resultante.

Para a caracterização morfométrica, seria interessante extrair a rede de drenagem para cada sub-bacia, ao invés de extrair para a bacia como um todo. Com isto, pode-se associar as respectivas áreas de contribuição aos parâmetros morfométricos calculados para cada sub-bacia, e verificar se existe correlação entre eles.

7. BIBLIOGRAFIA

ADAM, J. I. **Gestão Ambiental do Parque Municipal da Lagoa do Peri numa perspectiva de desenvolvimento sustentável**. 2001. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

ANTONELI, V.; THOMAZ, E. L. **Caracterização do meio físico da bacia do Arroio Boa Vista**. Revista Caminhos da Geografia, v.8, n.21, p.46-58, 2007.

BRASIL. **Lei nº 9.433**, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L9433.htm Acesso em: 12 de julho de 2015.

BRASIL. **Lei nº 9.985**, de 18 de julho de 2000. Regulamenta o art. 225, § 1o, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/CCIVIL_03/leis/L9985.htm Acesso em: 12 de julho de 2015.

CABRAL, L. O. **Bacia da Lagoa do Peri: Sobre as Dimensões da Paisagem e seu valor**. Florianópolis: UFSC/CFH, 246 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Santa Catarina, 1999.

CARUSO, M. M. L. **O desmatamento na Ilha de Santa Catarina de 1500 aos dias atuais**. Florianópolis, UFSC, 160p. 1983.

Castilhos, J. A. **Estudo Evolutivo, Sedimentológico e Morfodinâmico da Planície Costeira e Praia da Armação - Ilha de Santa Catarina, SC**. Florianópolis: UFSC/CFH, Dissertação (Mestrado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Santa Catarina, 1995.

CASTRO, S. B.; CARVALHO, T. M. **Análise morfométrica e geomorfologia da bacia hidrográfica do rio Turvo - GO, através de**

técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento. Scientia Plena, v. 5, n. 2, 025401, 2009.

CHRISTOFOLETTI, A. **A análise morfométrica de bacias hidrográficas.** Rev. Geomorfol, Campinas, v.18, n.9, p.35-64, 1969.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia** (2ª ed.). São Paulo: Edgard Blucher, 1980.

ESRI. **ArcGIS Help Library.** 2012. Disponível em: http://help.arcgis.com/en/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/Welcome_to_the_ArcGIS_Help_Library/00r90000001n000000/ Acesso em: 16 nov. 2014.

ESTEVES, F. A.; CALIMAN, A.; SANTANGELO, J. M.; GUARIENTO, R. D.; FARJALLA, V. F.; BOZELLI, R. L. **Neotropical coastal lagoons: an appraisal of their biodiversity, functionings, threats and conservation management.** Brazilian Journal of Biology, 68(4), p.967–981, 2008.

FLORENZANO, T. G. **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais.** São Paulo: Oficina de Texto, 2008.

GARCEZ, L. N.; ALVAREZ, G. A. **Hidrologia** (2. ed.). São Paulo: Edgard Blücher, 1988.

HENNEMANN, M. C.; PETRUCIO, M. M. **Spatial and temporal dynamic of trophic relevant parameters in a subtropical coastal lagoon in Brazil.** Environ Monit Assess, Florianópolis, p.347-361, 2011.

KJERFVE, B. **Coastal Lagoons.** In: Kjerfve, B. (ed.), Coastal Lagoon Processes, p. 1–8. Amsterdam: Elsevier Science, 1994.

KOBIYAMA, M.; GRISON, F.; MOTA, A. A. **Curso de capacitação em hidrologia e hidrometria para conservação de mananciais (3ª edição).** Laboratório de Hidrologia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

LAPOLLI, E. M.; MOREIRA, J. C., ZARDO, S. M.; VIEIRA, V. F. **Carta dos Elementos do Meio Ambiente - Parque da Lagoa do Peri.** Florianópolis, 1993.

PISSARA, T.C.T.; POLITANO, W.; FERRAUDO, A.S. **Avaliação de características morfométricas na relação solo-superfície da bacia hidrográfica do córrego Rico.** Rev. Bras. Ciências do Solo, Viçosa, n.28, p297-305, 2004.

RICHARDUS, P. **The precision of contour lines and contour intervals of large- and medium-scale maps.** Photogrammetria, Amsterdam, 29, p.81-107, 1973.

RODRÍGUEZ-ITURBE, I.; RINALDO, A. **Fractal river basins: chance and self-organization.** Cambridge University Press, Cambridge, 547p, 2001.

OLIVEIRA, J.S. **Análise sedimentar em zonas costeiras: subsídio ao diagnóstico ambiental da Lagoa do Peri - Ilha de Santa Catarina – SC.** UFSC/CFH, 169 f. Dissertação (Mestre em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.

Santos, G. F.; Silva, J. T. N.; Mendonça, M.; Veado, R. W. V. **Análise ambiental da lagoa do Peri.** Geosul, 8: p.101-123, 1989.

SBROGLIA, R. M.; BELTRAME, A. V. **O zoneamento, conflitos e recategorização do Parque Municipal da Lagoa do Peri, Florianópolis/SC.** Bol. Geogr., Maringá, v. 30, n. 1, p.5-18, 2012.

SCHWANGHART, W.; KUHN, N.J. **TopoToolbox: A set of Matlab functions for topographic analysis.** Environmental Modelling & Software 25, pp. 770 – 781, 2009.

SIKORA, W.B.; KJERFVE, B. **Factors influencing the salinity of Lake Pontchartrain, Louisiana, a shallow coastal lagoon: analysis of a long-term data set.** Estuaries 8 (2A): p.170-180, 1985.

SILVA, A.A.S. **Parque Municipal da Lagoa do Peri: subsídios para o gerenciamento ambiental.** Florianópolis: UFSC/CTC, 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina, 2000.

SILVA, A.L.L.; PLAGIOSA, P.R.; PETRUCIO, M.M. **Inter- and intra-guild patterns of food resource utilization by chironomid larvae in a subtropical coastal lagoon.** *Limnology*, v. 15 (1), p. 1-12, 2014.

SOUZA, C. R. de G. **Susceptibilidade morfométrica de bacias de drenagem ao desenvolvimento de inundações em áreas costeiras.** *Revista Brasileira de Geomorfologia*, n. 1, p.45-61, 2005.

TEODORO, V. L.; TEIXEIRA, D.; COSTA, D.J.; FULLER, B.B. **O conceito da bacia hidrográfica e a importância da caracterização morfométrica para o entendimento da dinâmica ambiental local.** *Revista Uniara*, n. 20, 2007.

TONELLO, K. C.; DIAS H. C. **Análise Hidroambiental da Bacia Hidrográfica da Cachoeira das Pombas, Guanhães.** Viçosa, Minas Gerais: Universidade Federal de Viçosa, 2005.

TONETTA, D.; PETRUCIO, MM.; SILVA, RL. Temporal variation in phytoplankton community in a freshwater coastal lake of southern Brazil. *Acta Limnol. Bras.*, Rio Claro, v. 25, n. 1, 2013.

TUCCI, C. E. *Hidrologia: Ciência e Aplicação* (4ª ed.). Porto Alegre, Rio Grande do Sul: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1997.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada.** São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 245p, 1975.

ZHAO, G.; GAO, J.; TIAN, P.; TIAN, K. **Comparison of two different methods for determining flow direction in catchment hydrological modeling.** *Water Science and Engineering* 2(4), pp. 1 – 15, 2009.

APÊNDICE

Representação das variáveis Número de canais (B), Comprimento médio dos canais (L_m), Declividade média dos canais (S_m) e Área média das bacias (A_m), juntamente com os respectivos valores logarítmicos.

Sub-bacia 1: Hidrografia Original

Ord.	B	Log	L_m	Log	S_m	Log	A_m	Log
1	121	2,08	197,65	2,30	21,19	1,33	0,04	-1,44
2	30	1,48	185,02	2,27	12,32	1,09	0,13	-0,89
3	6	0,78	691,31	2,84	3,64	0,56	0,72	-0,14
4	2	0,30	1643,92	3,22	3,73	0,57	2,44	0,39
5	1	0,00	1283,19	3,11	8,52	0,93	7,16	0,85

Sub-bacia 1: Hidrografia Gerada

Ord.	B	Log	L_m	Log	S_m	Log	A_m	Log
1	96,00	1,98	189,52	2,28	17,34	1,24	0,05	-1,30
2	21,00	1,32	222,56	2,35	10,18	1,01	0,17	-0,76
3	6,00	0,78	607,85	2,78	3,13	0,50	0,72	-0,14
4	2,00	0,30	1619,76	3,21	3,73	0,57	2,44	0,39
5	1,00	0,00	1198,50	3,08	9,43	0,97	7,16	0,85

Sub-bacia 5: Hidrografia Original

Ord.	B	Log	L_m	Log	S_m	Log	A_m	Log
1	22	1,34	152,72	2,18	20,54	1,31	0,04	-1,44
2	5	0,70	453,32	2,66	19,27	1,28	0,20	-0,70
3	2	0,30	566,29	2,75	16,01	1,20	0,70	-0,15
4	1	0,00	484,17	2,68	23,64	1,37	1,59	0,20

Sub-bacia 5: Hidrografia Gerada

Ord.	B	Log	L_m	Log	S_m	Log	A_m	Log
1	19	1,28	162,17	2,21	20,73	1,32	0,05	-1,33
2	5	0,70	267,04	2,43	17,12	1,23	0,15	-0,83
3	2	0,30	751,64	2,88	20,63	1,31	0,70	-0,15
4	1	0,00	497,11	2,70	23,07	1,36	1,59	0,20