

ANÁLISE HIDROMORFOLÓGICA DA SUB-BACIA 87

Arthur da Fontoura Tschiedel¹; Karine Pickbrenner²; Francisco F. N. Marcuzzo³

RESUMO – O estudo hidromorfológico da sub-bacia hidrográfica 87 é diferenciado devido à singularidade das características geomorfológicas e da fisiografia dos seus corpos hídricos. O objetivo deste trabalho é estudar parâmetros morfológicos e hidrográficos que interferem na atividade fluviométrica das sub-bacias que constituem a sub-bacia 87. Um total de 124 municípios possui parte ou a totalidade de seus territórios na sub-bacia 87 (área total de 58.439,0 km²). Utilizaram-se imagens ASTER para o Modelo Digital de Elevação com resolução de 30 metros. Verificou-se que a maior densidade de drenagem (Dd) foi obtida pelo rio Camaquã (1,47 km.km²), o qual obteve o menor coeficiente de manutenção (Cmn), que foi de 678,3 m².m⁻¹. A menor percentagem de lagos está na sub-bacia formada pelo rio dos Sinos (0,4%), enquanto toda sub-bacia 87 obteve 19,7% da área coberta por lagos. A área de estudo apresentou diferenças contudentes nos perfis longitudinais dos principais corpos hídricos. Conclui-se também que as sub-bacias de contribuição localizadas em áreas mais planas tendem, de maneira geral, a apresentar menores índices de rugosidade e maior representatividade de grandes lagos.

ABSTRACT – The hydro-physical study of the sub-watershed 87 is different because of the uniqueness of the physiography and geomorphological characteristics of their water bodies. The objective of this work is to study morphological and hydrographic parameters that influence the activity of the fluviometric contribution of all sub-watersheds included in 87 watershed. A total of 124 municipalities have part or all of their territories in 87 watershed (total area of 58,439.0 km²). ASTER images were used for the Digital Elevation Model with a resolution of 30 meters. It was found that the higher drainage density (Dd) was obtained by the Camaquã River (1.47 km.km²), which had the lowest coefficient of maintenance (Cmn), which was 678.3 m².m⁻¹. The lowest percentage of lakes is in sub-basin formed by the Sinos River (0.4%), while all 87 sub-basin is formed by 19.7% of lakes. The studies' area showed striking differences in the longitudinal profiles of the major water bodies. It was also concluded that the areas of contribution of sub-basins located in flatter areas tend, in general, to have lower levels of roughness and greater representation of large lakes.

Palavras-chave: Lagoa dos Patos, geomorfologia, hipsometria.

¹ Acadêmico em Engenharia Ambiental, (Universidade Federal do Rio Grande do Sul) – Av. Bento Gonçalves n° 9.500 – Instituto de Pesquisas Hidráulicas – CEP 91501-970, Porto Alegre/RS. Tel. (51) 8467-8416. arthurtidel@hotmail.com

² Eng^a, M.^a, Pesquisadora em Geociências / Gerencia de Hidrologia e Gestão Territorial, CPRM/SGB (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais / Serviço Geológico do Brasil) – Rua Banco da Província, n°105 - Santa Teresa - CEP 90840-030, Porto Alegre/RS. Tel.: (51) 3406-7342. karine.pickbrenner@cprm.gov.br

³ Eng^o, Dr., Pesquisador em Geociências / Gerencia de Hidrologia e Gestão Territorial, CPRM/SGB (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais / Serviço Geológico do Brasil) – Rua Banco da Província, n°105 - Santa Teresa - CEP 90840-030, Porto Alegre/RS. Tel.: (51) 3406-7324. francisco.marcuzzo@cprm.gov.br

1 – INTRODUÇÃO

As bacias hidrográficas são definidas muitas vezes como as melhores unidades de estudo em relação à gestão de recursos hídricos, de modo a apresentarem atributos particulares que influenciam diretamente no comportamento hidrodinâmico dos corpos superficiais e subterrâneos que se encontram na área de contribuição. O conhecimento das características hipsométricas e geométricas fomentam um melhor entendimento morfométrico e, portanto, do comportamento hidrodinâmico das bacias hidrográficas, facilitando o melhor gerenciamento de sua preservação e da utilização dos recursos hídricos disponíveis.

A importância do conhecimento de características morfológicas de bacias hidrográficas é apresentada em muitos estudos para as mais diversas regiões brasileiras. Cherem *et al.* (2008) identificaram através de estudos morfológicos para a sub-bacia do Alto Rio das Velhas (MG) a divisão da sub-bacia em grupos com características homogêneas, fornecendo subsídios para futuros estudos geomorfológicos e ambientais para bacias hidrográficas de quinta ordem encontradas na região de estudo. Já Junior *et al.* (2009) apresentaram como principal vantagem advinda de estudos morfológicos em determinada bacia, a possibilidade de maior compreensão a cerca das características ambientais da região. Ainda, os mesmos autores apontam que estudos desta natureza podem ser utilizados para auxiliar na tomada de decisões e no planejamento de áreas de bacias que ainda não foram urbanizadas, contribuindo para a definição das formas de uso e ocupação de solos mais adequados ao meio físico local. Ainda, segundo Antonelli e Thomaz (2007), a combinação de diversos dados morfométricos permite a diferenciação de áreas homogêneas. Desse modo, indicadores físicos específicos podem ser determinados com o objetivo de qualificar as alterações e vulnerabilidades ambientais para regiões distintas, ainda que as mesmas se encontrem em similares áreas de contribuição para determinada sub-bacia hidrográfica.

Desse modo, partindo da alta aplicabilidade que conhecimentos hidromorfológicos apresentam para a adequada gestão de bacias hidrográficas, o presente trabalho objetiva estudar a hidromorfologia da sub-bacia 87, no Estado do Rio Grande do Sul, a fim de quantificar parâmetros populacionais e morfométricos que interferem diretamente na dinâmica da bacia.

2 - MATERIAL E MÉTODOS

Localizada na porção leste do estado do Rio Grande do Sul, a sub-bacia 87 divide-se em oito sub-bacias principais mais a sub-bacia do Baixo Jacuí, de grande peculiaridade, visto que seu divisor de águas corta o Rio Jacuí a partir da confluência com o rio Taquarí. Da totalidade, pode-se afirmar que quatro bacias são de cabeceira (sub-bacia do Rio Caí, do Rio Gravataí, do Rio dos Sinos e do Rio Camaquã). As três primeiras, somadas à sub-bacia do Baixo Jacuí são contribuintes

da sub-bacia do Lago Guaíba, que por sua vez é contribuinte (assim como a sub-bacia do Rio Camaquã) da sub-bacia Lagoa dos Patos. Ressalta-se ainda que a sub-bacia 87 apresenta outras duas sub-bacias que drenam diretamente para o Oceano Atlântico (sub-bacia do Rio Tramandaí e sub-bacia do Litoral Médio), conforme apresentado na Figura 1.

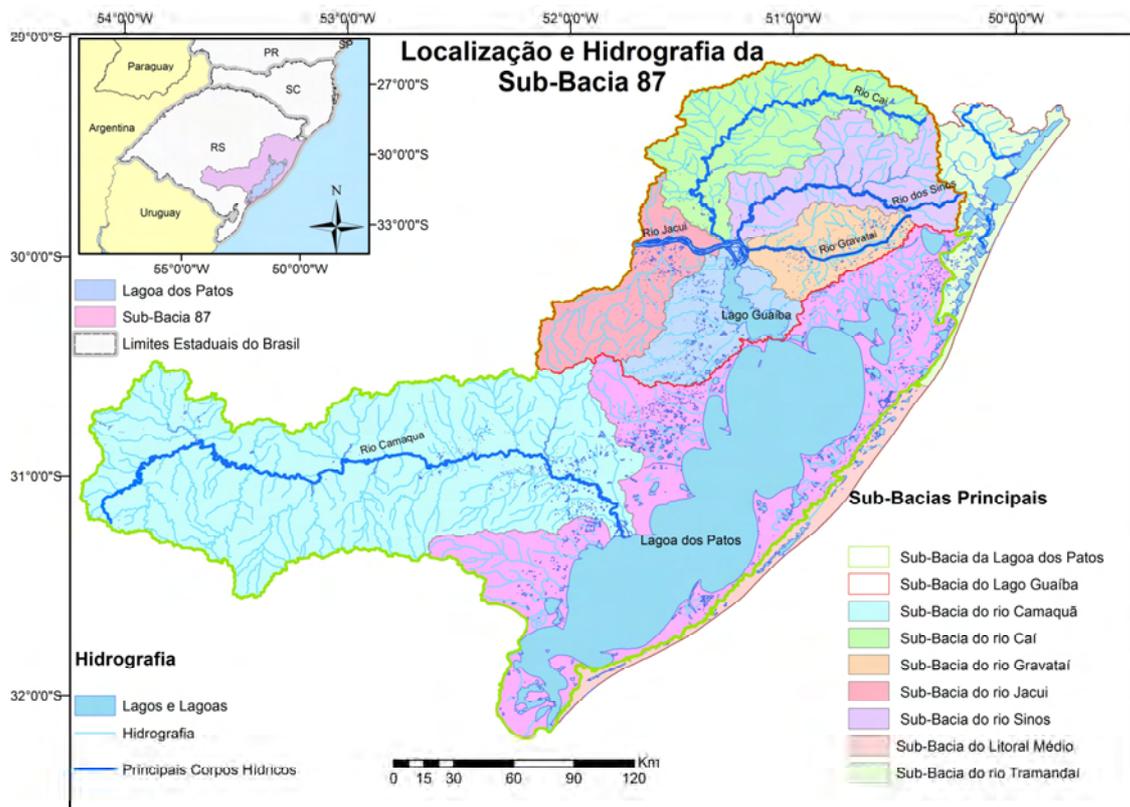


Figura 1 - Hidrografia com os principais cursos d'água da sub-bacia 87.

As informações hidrográficas utilizadas neste estudo partiram do trabalho desenvolvido por Hasenack (2010), que vetorizou a hidrografia das cartas do exército para todo o Estado do Rio Grande do Sul, de modo que estes corpos hídricos, vetorizados em escala 1:50.000 em formato *shapefile*, são os melhores e mais representativos da realidade do estado até o presente momento. Entretanto, devido à dificuldade de visualização da hidrografia em tal escala, fez-se necessário utilizar *shapefiles* de menor detalhamento para representar os corpos hídricos principais. Utilizou-se portanto o produto cartográfico fornecido pela Agência Nacional de Águas, em 1:1.000.000 para representar a hidrografia da sub-bacia 87. Ainda, toda a base cartográfica utilizada neste estudo foi obtida através dos trabalhos desenvolvidos pela CPRM⁴ (2010) e FEPAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente.

⁴ CPRM/SGB (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais / Serviço Geológico do Brasil – Empresa Pública de Pesquisa do Ministério de Minas e Energia)

2.1 - Divisão territorial municipal, população e clima da sub-bacia 87

A sub-bacia 87 contempla um total de 82 municípios que contam com 100% da área inserida na bacia. Ainda 42 municípios são interceptados pelo divisor de águas desta unidade territorial, totalizando, portanto, 124 municípios pertencentes à sub-bacia 87. Considera-se, entretanto que dentre estes, são contabilizados 10 municípios com menos de 5% de área inserida na bacia, somando 36,2 km² que, comparados à área total (58.439,0 km²), contabilizam apenas 0,062% do território.

Quadro 1 – Relação dos municípios inseridos na sub-bacia 87 quanto à área.

Descrição	Número de Municípios
Municípios com 100% da área inserida na sub-bacia	82
Municípios com área entre 75% e 100% inserida na sub-bacia	10
Municípios com área entre 50% e 75% inserida na sub-bacia	10
Municípios com área entre 25% e 50% inserida na sub-bacia	9
Municípios com área entre 5% e 25% inserida na sub-bacia	3
Municípios com menos de 5% da área inserida na sub-bacia	10

Dentre as unidades municipais inseridas na sub-bacia 87, Canguçu, mesmo apresentando apenas 73% de sua área inserida na bacia, destaca-se como o município com maior representação interna, com um total de 2.575 km² inseridos no território, representando 4,4% do território da sub-bacia 87. Antagonicamente, o município de Esteio, localizado na região metropolitana de Porto Alegre é o menor em área territorial, com apenas 22,7 km², representando 0,04% do território da sub-bacia 87.

Levando em consideração os habitantes residentes na bacia, tomou-se como necessidade inerente ao levantamento das características da mesma, o cálculo da densidade populacional de cada município. Para tal, utilizaram-se os dados levantados pelo último censo IBGE (2010) e técnicas de geoprocessamento através do programa ArcGis 10 aliados à base cartográfica fornecida pela FEPAM, de modo que na contagem populacional da sub-bacia 87 considerou-se que 90% da população de cada município estão concentradas na zona urbana. Ainda, a estimativa da população residente da sub-bacia em cada um dos 42 municípios que são cortados pelo divisor de águas baseou-se na proporcionalidade de áreas urbanas e rurais inseridas na sub-bacia em relação às áreas urbanas e rurais totais de cada município (equações 1 e 2). Ressalta-se que, para algumas áreas, não foram encontrados dados a respeito de zonas urbanas. Para efeitos de cálculo, considerou-se que cada município de fronteira enquadrado nessas características conta apenas com a população rural (equação 3). Ainda, para os municípios que se encontram totalmente inseridos na bacia, 100% da população foi considerada na estimativa. As equações utilizadas neste levantamento se encontram abaixo:

$$Pop.u.f = Pop.t \times T \times \frac{Au.b}{Au.t} \quad (1)$$

Em que, $Pop.u.f$ é a população urbana em municípios de fronteira (hab) que contam com informações de zonas urbanas, $Pop.t$ é a população total do município (hab), T é a taxa de população residente nas zonas urbanas (90%), $Au.b$ é a área urbana do município inserida na Bacia, $Au.t$ é a área urbana total do município, considerando apenas os limites municipais, calculada por geoprocessamento (km²).

$$Pop.r.f = Pop.t \times (1 - T) \times \left(\frac{(Am.b) - (Au.b)}{(Am.t) - (Au.t)} \right) \quad (2)$$

Em que, $Pop.r.f$ é a população rural em municípios de fronteira para regiões com informações a respeito de zonas urbanas (hab), $Pop.t$ é a população total do município (hab), T é a taxa de população residente nas zonas urbanas (90%), $Am.b$ é a área do município inserida na sub-bacia (km²), $Au.b$ é a área urbana do município inserida na sub-bacia (km²), $Am.t$ é a área municipal total do município, considerando apenas os limites municipais (km²) e $Au.t$, que representa a área urbana total, levando em consideração tanto a que se encontra dentro da sub-bacia como a que se encontra fora da bacia.

$$Pop.a.r.f = Pop.t \times \frac{Am.b}{Am.t} \quad (3)$$

Em que, $Pop.a.r.f$ é a população apenas rural em municípios de fronteira (hab) calculada para os casos onde não há dados de zonas urbanas, $Pop.t$ é a população total do município (hab), $Am.b$ é a área urbana do município inserida na sub-bacia (km²) e $Am.t$ é a área municipal total do município, considerando apenas os limites municipais (km²).

Desse modo, estima-se que a sub-bacia 87 conta com um total de 5.253.774 habitantes residentes, considerando-se que 90% da população municipal estão concentradas nas zonas urbanas. O município mais populoso da sub-bacia é o de Esteio, com 2.918 hab.(km²)⁻¹, de modo que Porto Alegre aparece em seguida com 2.852 hab.(km²)⁻¹. O município menos populoso da sub-bacia é o de Lavras do Sul, que conta com 53% de sua extensão territorial inserida na sub-bacia e 3 hab.(km²)⁻¹. Considerando apenas os municípios totalmente inseridos na bacia, o menos populoso passa a ser Mostardas, que conta com 6 hab.(km²)⁻¹.

A caracterização climatológica da sub-bacia é dada de acordo com os métodos descritos por Köppen (1936) *apud* Peel (2007), um sistema de classificação global de todos tipos climáticos muito utilizada em estudos geográficos, climatológicos e ecológicos. O clima da sub-bacia 87 é composto unicamente pelo tipo Cfa, subdivisão da classificação geral Cf, que representa climas temperados (ou temperado quente), com estações de Verão e Inverno bem definidas e climas

mesotérmicos. Ainda, a classificação Cf resulta de regiões com clima úmido, onde a precipitação é bem distribuída em todos os meses do ano, com inexistência de estação seca definida. O clima Cfa é dotado de todas as características da classificação Cf, entretanto apresenta temperatura média no mês mais quente superior a 22°C.

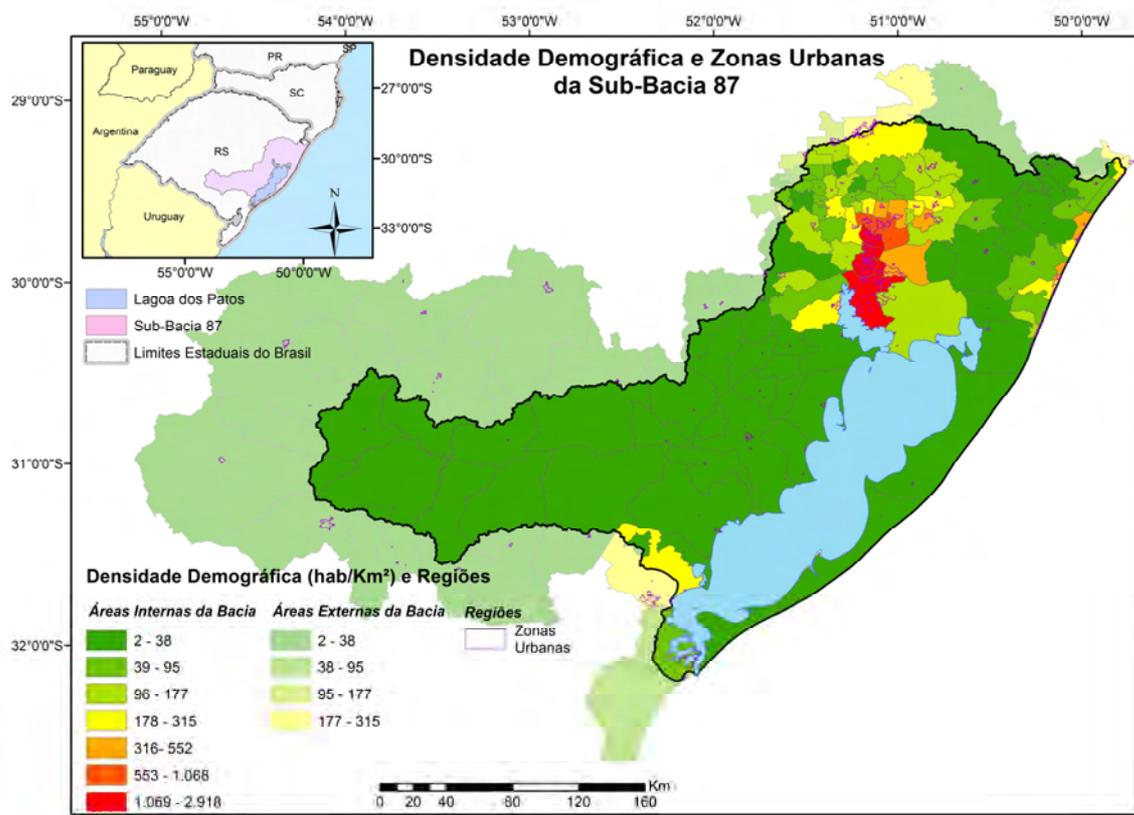


Figura 2 - Densidade de habitantes por quilômetro quadrado, clima e localização da sub-bacia 87.

2.2 - Vegetação e Uso do Solo

A caracterização da sub-bacia 87 quanto à vegetação e ao uso do solo é apresentada na Figura 3, onde são discretizados as áreas referentes às zonas edificadas, e regiões agrícolas ou potencialmente agrícolas. A estepe é a formação que predomina na bacia, representando em torno de 35% de sua extensão territorial. Posteriormente observam-se áreas de formações pioneiras cobrindo 29% da área da bacia. Observa-se ainda a pequena área Florestal que a sub-bacia possui, de modo que as áreas de Floresta Estacional Decidual, Semidecidual e Floresta Ombrófila Mista somam apenas 10 % da área da bacia.

Ressalta-se que as atividades agrícolas são muito representativas no quesito uso do solo da bacia, de modo que em torno de 50% da extensão territorial da mesma apresenta atividades agrícolas associadas com áreas de vegetação secundária e áreas de tensão ecológica.

Em relação aos biomas existentes na bacia, é constatado que 16% da extensão territorial se encontram em regiões de Mata Atlântica, ao norte da sub-bacia justamente no início do planalto

Sul-Rio-Grandense. A parcela restante da sub-bacia (84%) se encontra sob o bioma Pampa, composto basicamente de gramíneas, herbáceas e algumas árvores de pequeno porte.

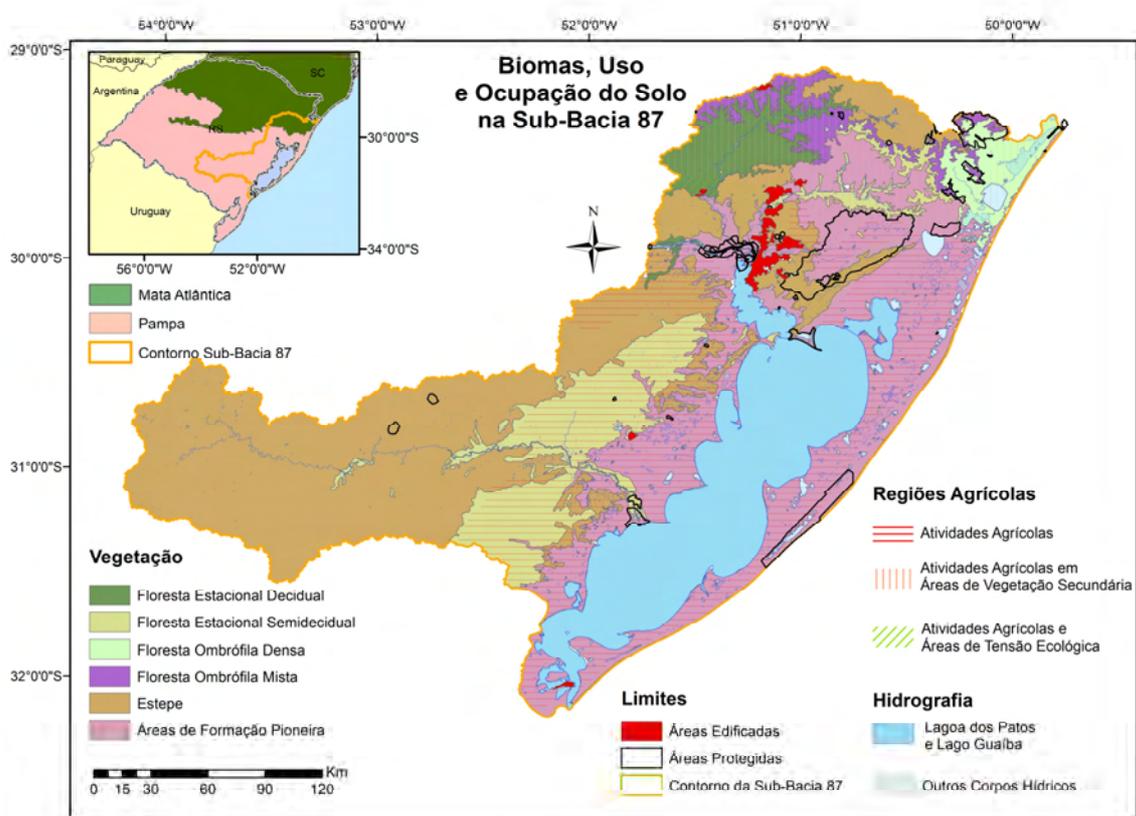


Figura 3 – Biomass, uso e ocupação do solo da sub-bacia 87.

2.3 - Modelo Digital de Elevação (MDE) Utilizado

No presente trabalho foram utilizados dados de altimetria obtidos através do instrumento ASTER (Advanced SpaceBorne Thermal Emission and Reflection Radiomete), do satélite TERRA, lançado pela NASA em 1999 como parte do programa Earth Observing System EOS. Este instrumento é responsável por captar dados espaciais de resolução de 15 a 90 metros no espectro do visível, infra-vermelho próximo, Infra-vermelho curto e Infravermelho Termal.

O sensor ASTER apresenta alta resolução espacial, espectral e radiométrica, possuindo um radiômetro de imagens de 15 bandas. A separação espectral é completada através de filtros de passagem de banda discretos e dicróicos, de modo que cada subsistema opera numa região espectral diferente, possuindo seu próprio telescópio. No âmbito deste artigo, a resolução espacial dos dados utilizados permitiu a geração de um Modelo Digital de Elevação com 30 metros de resolução (Figura 4).

Canela é o município com 100% da área inserida na sub-bacia que apresenta a maior altitude média, com 682 metros. Em contra partida, o município de Capão da Canoa é o que apresenta menor altimetria, com 5,4 metros de altitude média.

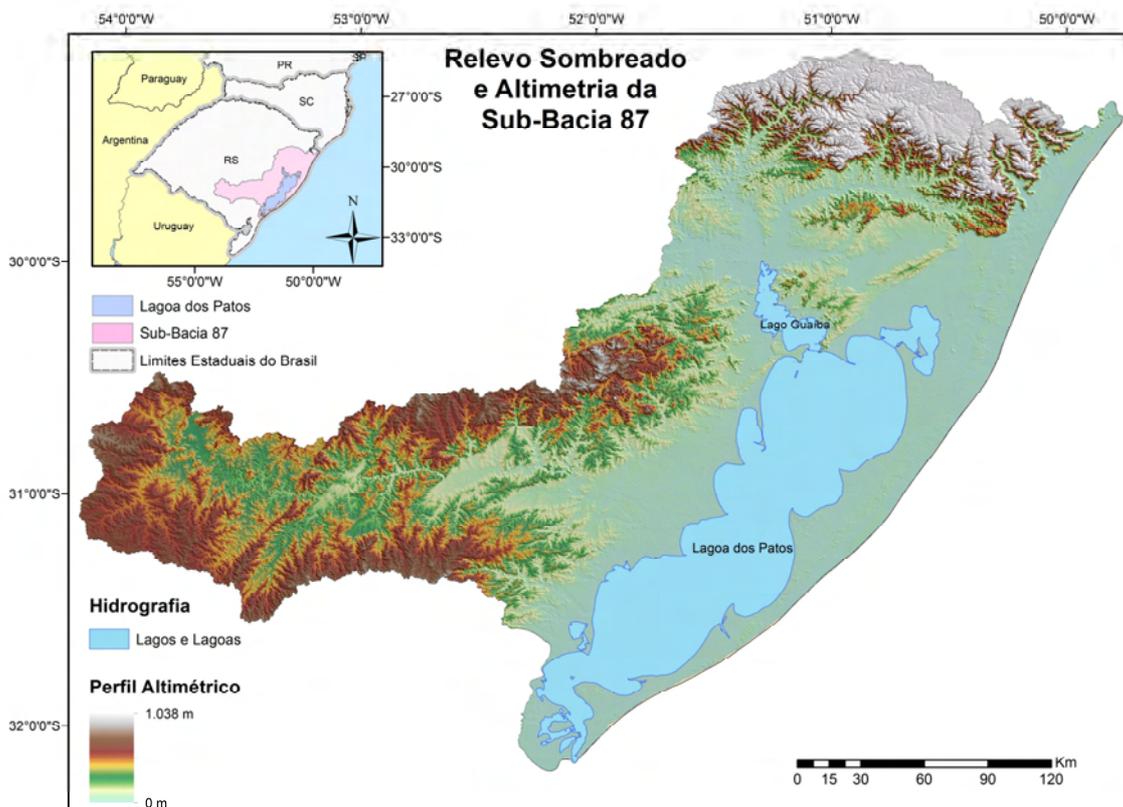


Figura 4 – Relevo sombreado e altimetria da sub-bacia 87.

2.4 - Metodologia para o estudo de linearidade da bacia

2.4.1 – Comprimento do canal principal

É a distância que se estende ao longo do curso d'água desde a nascente principal até a foz. Este cálculo foi realizado para as 6 maiores sub-bacias pertencente à sub-bacia 87, através da seleção e quantificação do comprimento do corpo hídrico via técnicas de geoprocessamento.

2.4.2 – Equivalente vetorial do Canal Principal (eV)

O equivalente vetorial representa o comprimento de cada segmento fluvial de determinada ordem, em linha reta, que se estende do nascimento ao término do referido canal. O cálculo do equivalente vetorial do curso d'água principal tem um valor interpretativo, pois resulta de seu confronto com o índice do comprimento, buscando auxiliar na descrição de um corpo hídrico quanto sua sinuosidade.

2.4.3 – Índice de sinuosidade (Is)

O índice de sinuosidade é a relação entre a distância da foz do rio e a nascente mais distante (equivalente vetorial), medida em linha reta (Ev), e o comprimento do canal principal (L). O índice de sinuosidade possui classes, divididas conforme o Quadro 2.

$$I_s = \frac{100(L - eV)}{L} \quad (4)$$

Quadro 2 - Índices de sinuosidade divididos por classes.

Classe	Descrição	Limites (%)
I	Muito reto	<20
II	Reto	20 a 29
III	Divagante	30 a 39,9
IV	Sinuoso	40 a 49,95
V	Muito sinuoso	>50

2.5 - Metodologia para o estudo de área da bacia

2.5.1 – Área e Perímetro da sub-bacia (A)

Tanto o cálculo da área como do perímetro de cada sub-bacia de interesse passam pela determinação do corpo hídrico principal e pela escolha do ponto exutório desejado. No caso específico deste estudo foram considerados aqueles localizados na confluência dos grandes rios constituintes da sub-bacia 87.

Desse modo, as áreas das bacias mencionadas no Quadro 3 foram calculadas através do pacote de extensão *ArcHydro 2.0* que agrega ao programa ArcGis10 ferramentas de modelagem de bacias que permitem a determinação de linhas de fluxos, direção de escoamentos e cálculo de áreas de contribuição para quaisquer regiões, utilizando como entrada apenas Modelos Digitais de Elevação. Desse modo, através da determinação das áreas de contribuição para cada corpo hídrico estudado foram processados os perímetros (km) e as áreas (km²) via análise em ArcGis10.

Para o caso específico da sub-bacia do Litoral Médio, devido as suas características fisiográficas como sub-bacia de drenagem direta ao Oceano Atlântico em grande parte de sua extensão, a determinação de um corpo hídrico principal é dificultada pela grande quantidade de pontos exutórios que esta sub-bacia possui. Desse modo esta sub-bacia é delimitada indiretamente, como a área litorânea não drenante para a sub-bacia da Lagoa dos Patos.

Quadro 3 – Relação dos principais corpos hídricos considerados e suas confluências principais.

Bacia	Corpo Hídrico Principal	Confluência Principal
Sub-bacia do Rio Jacuí	Rio Jacuí	Lago Guaíba
Sub-bacia do Rio dos Sinos	Rio dos Sinos	Lago Guaíba
Sub-bacia do Rio Caí	Rio Caí	Lago Guaíba
Sub-bacia do Rio Gravataí	Rio Gravataí	Lago Guaíba
Sub-bacia do Rio Camaquã	Rio Camaquã	Lagoa dos Patos
Sub-bacia do Rio Tramandaí	Rio Tramandaí	Oceano Atlântico
Sub-bacia do Lago Guaíba	Lago Guaíba	Lagoa dos Patos
Sub-bacia do Lagoa dos Patos	Lagoa dos Patos	Oceano Atlântico
Sub-bacia do Litoral Médio	Inexistente	Oceano Atlântico

2.5.2 – Coeficiente de Compacidade (K_c)

O Coeficiente de Compacidade de uma bacia hidrográfica K_c é um índice relacionado à suscetibilidade de ocorrência de inundações nas partes mais baixas de determinada bacia. É definido pela relação entre o perímetro da sub-bacia e o perímetro de círculo de igual área. Desse modo, o valor deve ser sempre maior que a unidade, uma vez que o círculo é a figura geométrica de menor perímetro para uma dada área. Valores próximos da unidade representam, portanto, bacias compactas que tendem a concentrar o escoamento de maneira intensa, sendo mais suscetíveis a inundações. Índices próximos de dois já são considerados altos.

$$K_c = \frac{Per}{2\pi\sqrt{A/\pi}} \quad (5)$$

Em que, K_c é o coeficiente de compacidade da bacia; Per é o perímetro (km) e A é a área da bacia (km²).

2.5.3 – Fator de Forma (K_f)

O fator de forma de uma bacia hidrográfica K_f é definido pela relação entre a largura média da sub-bacia e seu comprimento axial. Bacias alongadas tendem a apresentar pequenos valores de fator de forma, sendo, portanto, menos suscetíveis a inundações, uma vez que seja menos provável que chuvas intensas cubram toda a sua extensão.

$$K_f = \frac{A}{L^2} \quad (6)$$

Em que, L (km) é o comprimento do curso d'água principal acrescida da distância da sua nascente ao divisor topográfico, enquanto que A é a área da sub-bacia (km²).

2.5.6 – Densidade de drenagem (Dd)

A densidade de drenagem correlaciona o comprimento total dos canais de escoamento com a área da sub-bacia hidrográfica. A densidade de drenagem foi inicialmente definida por Horton (1945) *apud* Christofolletti (1980), podendo ser calculada pela equação 7.

$$Dd = \frac{Lt}{A} \quad (7)$$

Em que, Dd é a densidade da drenagem, Lt é o comprimento total dos canais (km), A é a área da sub-bacia (km²). Ressalta-se que a *shape* de hidrografia utilizada neste estudo fez parte do levantamento realizado por Hasenack (2010), onde todas as feições hidrográficas contidas nas cartas do exército do Rio Grande do Sul foram digitalizadas em escala 1:50.000.

2.5.7 – Extensão do percurso superficial (*Eps*)

Representa a distância média percorrida pelas enxurradas entre o interflúvio e o canal permanente, correspondendo a uma das variáveis independentes mais importantes que afeta tanto o desenvolvimento hidrológico como fisiográfico das bacias de drenagem. Durante a evolução do sistema de drenagem, a extensão do percurso superficial está ajustada ao tamanho apropriado relacionado com as bacias de primeira ordem, sendo aproximadamente igual à metade do recíproco valor da densidade de drenagem.

$$Eps = \frac{1}{2Dd} \quad (8)$$

Em que, *Eps* representa a extensão do percurso superficial; *Dd* é o valor da densidade de drenagem.

2.5.8 – Coeficiente de manutenção (*Cmn*)

Proposto por S. A. Schumm (1956), esse índice tem a finalidade de fornecer a área mínima necessária para a manutenção de um metro de canal de escoamento. O referido autor considera-o como um dos valores numéricos mais importantes para a caracterização do sistema de drenagem, podendo ser calculado através equação 9. Ressalta-se que este índice está diretamente relacionado com a escala utilizada para a determinação da densidade de drenagem.

$$Cmn = \frac{1}{Dd} \times 1000 \quad (9)$$

Em que, *Cmn* é o coeficiente de manutenção ($m.m^{-2}$), *Dd* é o valor da densidade de drenagem ($km.km^{-2}$).

2.6 - Metodologia para o estudo hipsométrico da bacia

2.6.1 – Declividade Média (*Dm*) das sub-bacias e Comportamento Geral da sub-bacia 87

As sub-bacias constituintes da região de estudo foram quantificadas em termos das suas declividades médias através da função *zonal statistics* do ArcGis10 aplicado ao mapa de declividades elaborado. As declividades médias estão relacionadas diretamente com o perfil topográfico da bacia, de modo que quanto mais próxima da unidade, menores são os declives e os gradientes altimétricos de determinada bacia.

O comportamento geral da sub-bacia 87 foi analisado de modo a se determinar as declividades médias encontradas, visando à classificação do relevo em: (i) plano, (ii) suavemente ondulado, (iii) ondulado, (iv) fortemente ondulado, (v) montanhoso e (vi) fortemente montanhoso.

Para isso utilizou-se a ferramenta *slope* do programa ArcGis10 a partir do MDE mencionado anteriormente. Após a obtenção do mapa de declividades processaram-se os dados obtidos visando o agrupamento dos valores em determinadas faixas conhecidas, e à classificação do relevo da sub-bacia 87.

2.6.2 – Perfil dos Rios Principais e Relação das Estações Fluviométricas

A declividade dos canais principais de cada uma das 6 sub-bacias mencionadas anteriormente foi calculada via geoprocessamento através do programa ArcGis10. A metodologia de cálculo baseou-se na extração dos valores de altimetria e comprimento acumulado dos rios através da ferramenta *Profile Graph*, utilizando como entrada o Modelo Digital de Elevação e os mesmos arquivos vetoriais considerados para a determinação do comprimento dos corpos hídricos.

Ainda, após a extração dos valores de altimetria e comprimento acumulado no sentido nascente – foz, os dados foram processados de modo a garantir que pontos mais a jusante sempre tenham valores altimétricos inferiores do que pontos mais a montante.

Uma vez determinado o perfil altimétrico dos canais principais das sub-bacias estudadas, foram adicionadas as localizações relativas a determinadas Estações Fluviométricas, de modo a disponibilizar informações a respeito da localização das estações em relação ao perfil altimétrico de cada corpo hídrico analisado.

2.6.3 – Coeficiente de Massividade (C_{ms}) e o Coeficiente Orográfico (C_o)

O Coeficiente de Massividade representa a divisão da altitude média (hm) da sub-bacia pela área superficial da sub-bacia (A). Este índice busca, através da relação dada, caracterizar a sub-bacia quanto a distribuição de terras baixas e altas, de modo que índices inferiores a 0,5 correspondem a bacias com distribuição maior de terras baixas (Borsato, 2005). Já o coeficiente orográfico é obtido através da multiplicação entre a altitude média da sub-bacia e o coeficiente de massividade. Esta relação tende a variar de acordo com o coeficiente de massividade.

$$C_{ms} = \frac{hm}{A} \quad (10)$$

$$C_o = hm \times C_{ms} \quad (11)$$

2.6.4 – Amplitude Altimétrica (H_m), Índice de Rugosidade (I_r) e Relação de relevo (R_r)

A amplitude altimétrica corresponde à diferença entre a altitude da região mais alta e da região mais baixa da bacia. Este conceito é também denominado de “relevo máximo da bacia”. Enquanto isso, o Índice de Rugosidade combina os conceitos de declividade média e densidade de drenagem de cada bacia. O intuito principal da determinação deste índice é realizar uma comparação geral das

XI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste

possibilidades potenciais de degradação por erosão dos corpos hídricos das bacias. Nesse sentido, altos índices representam, em análise prévia, alto potencial de degradação dos leitos dos rios por erosão das margens, uma vez associadas características como densas redes de drenagem a perfis muito acidentados. Enquanto isso, a relação de relevo considera a relação existente entre a amplitude altimétrica da sub-bacia e a maior extensão da referida bacia, medida paralelamente à principal linha de drenagem. A relação do relevo (R_r) pode ser calculada dividindo a amplitude topográfica máxima (H_m) pela raiz quadrada da área da sub-bacia (A).

$$H_m = P_1 - P_2 \quad (12)$$

$$I_r = D_d \times D_m \quad (13)$$

$$R_r = \frac{H_m}{\sqrt{A}} \quad (14)$$

Em que, P_1 é o ponto mais alto (m), P_2 é o ponto mais baixo (m) da sub-bacia hidrográfica, D_d é a Densidade de Drenagem (km.km^{-2}), D_m é a Declividade Média (%), I_r é o índice de rugosidade (km.km^{-2}) de cada sub-bacia e R_r é a relação de relevo (m.km^{-1}).

3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos basearam-se nas equações e metodologias apresentadas anteriormente, muitas vezes utilizadas não só para a determinação das características da sub-bacia 87 como um todo, mas também para caracterizar as sub-bacias principais comentadas anteriormente. Ressalta-se entretanto que a sub-bacia 87 apresenta muitas peculiaridades que impedem a determinação de alguns índices para as sub-bacias do Baixo Jacuí, do Lago Guaíba e da Lagoa dos Patos. Isso ocorre porque a sub-bacia 87, nos limites propostos por Otto Pfafstetter (1989), desconsidera a contribuição das áreas referentes aos rios Jacuí (como um todo) e Taquari, corpos hídricos principais das Sub-Bacias 85 e 86, respectivamente. Desse modo, todos os índices que devem ser calculados através de dados de comprimentos dos corpos hídricos principais não foram considerados para estas sub-bacias. Entretanto, todos os outros que não levam em consideração o comprimento do canal principal foram calculados, ressaltando-se que os mesmos são válidos apenas para as respectivas áreas inseridas na delimitação da sub-bacia 87 proposta por Otto Pfafstetter. Assim, as bacias marcadas com (*) apresentam resultados considerados como satisfatórios apenas para as regiões inseridas na área da sub-bacia 87 proposta por Pfafstetter, de modo que estes resultados devem ser analisados com cuidado, pois não são representativos de toda a área de contribuição das sub-bacias respectivas. Ainda, seguem outras constatações que devem ser observadas no âmbito deste estudo.

- (i) O rio Jacuí, bem como sua bacia respectiva, são cortados pelo “divisor de águas” da sub-bacia 87, de forma que a área de contribuição para este corpo hídrico não é representativo da realidade;
- (ii) A sub-bacia do Litoral Médio não apresenta corpo hídrico principal, devido as suas características morfológicas. Além disso não possui um único ponto exutório, pois toda a sub-bacia drena diretamente para o oceano;

3.1 - Análise linear da rede hidrográfica da sub-bacia 87

3.1.1 - Análise dos comprimentos, equivalentes vetoriais e índices de sinuosidade dos canais principais

A Tabela 1 apresenta a descrição quanto à sinuosidade de cada canal principal inserido na sub-bacia 87, de acordo com a equação 4.

Tabela 1 - Índices de sinuosidade divididos por classes da sub-bacia 87.

Corpo Hídrico	Comprimentos (km)	Equivalente Vetorial (km)	Índice de Sinuosidade	Descrição
Rio Caí	262	104	60,3%	Muito Sinuoso
Rio dos Sinos	205	99	51,7%	Muito Sinuoso
Rio Gravataí	95	72	24,2%	Reto
Rio Camaquã	461	220	52,3%	Muito Sinuoso
Rio Tramandaí	126	74	41,3%	Sinuoso

3.2 - Análise areal da sub-bacia 87

3.2.1 – Determinação da Área de contribuição, Perímetro da Bacia, Coeficiente de Compacidade e Fator de Forma

Conforme apresentado no Quadro 3, as áreas de drenagem para cada sub-bacia foram quantificadas levando em consideração o ponto exutório localizado na confluência de dois corpos hídricos, com exceção às sub-bacias do Litoral Médio, do Rio Tramandaí e da Lagoa dos Patos. Os resultados advindos da quantificação da área de drenagem, somados ao comprimento do canal principal e do perímetro da sub-bacia permitiram o cálculo do coeficiente de compacidade e do fator de forma de cada sub-bacia.

Tabela 2 – Análise areal da sub-bacia 87.

Nome da sub-bacia	Área de Drenagem (km ²)	Perímetro (km)	Coefficiente de Compacidade (K _c)	Fator de Forma (K _f)
Bacia do Rio Caí	4.975,8	528,0	2,11	0,07
Bacia do Rio dos Sinos	3.687,1	465,4	2,16	0,09
Bacia do Rio Gravataí	2.043,1	250,0	1,56	0,23
Bacia do Rio Camaquã	17.587,6	952,8	2,03	0,08
Bacia do Rio Tramandaí	2.883,1	483,2	2,54	0,18
Bacia do Litoral Médio*	1.404,5	594,9	-	-
Bacia do Lago Guaíba*	16.647,6	803,5	-	-
Bacia da Lagoa dos Patos*	54.151,4	1.796,5	-	-
Sub-bacia 87	58.439,0	1.741,70	2,03	-

Desse modo, partindo dos conceitos anteriormente vistos para estes índices, a análise dos valores obtidos nos permite inferir que a sub-bacia do Rio Gravataí é a que apresenta maior tendência de concentração do escoamento em seu exutório (alto K_f e baixo K_c), quando comparada com as demais, o que poderia indicar maiores probabilidades de ocorrência de inundações nesta região, considerando uma análise unicamente geométrica. De maneira análoga, a sub-bacia do Rio Tramandaí apresentaria menor suscetibilidade à concentração de escoamento em seu exutório.

3.2.2 – Densidade de Drenagem, Extensão do Percorso Superficial e Coeficiente de Manutenção

A densidade de drenagem foi calculada para todas as sub-bacias que compõe a sub-bacia 87, através da hidrografia vetorizada das cartas do exército em escala 1:50.000, conforme descrito anteriormente. Tucci (2004) ressalta que a determinação da densidade de drenagem está fortemente relacionada com a escala da hidrografia utilizada como entrada no método, portanto os resultados obtidos são válidos apenas para uma análise realizada no âmbito da escala utilizada.

O método utilizado partiu da quantificação do comprimento total da drenagem para cada região de interesse, incluindo-se os perímetros de lagos e lagoas pertencentes a cada região e excluindo-se os leitos duplicados dos canais principais de cada sub-bacia.

Ainda, foram calculadas as extensões dos percursos superficiais e os coeficientes de manutenção para cada região de estudo. Entretanto, para que se pudesse realizar uma análise mais criteriosa do coeficiente de manutenção de cada bacia, realizou-se a estimativa da representatividade das áreas referentes aos grandes corpos hídricos como lagos e lagoas frente à área de drenagem total.

A partir desta análise, percebe-se a que a grande discrepância dos valores de áreas para a manutenção de um metro de canal nas bacias litorâneas está ligada diretamente à quantidade de lagos e lagoas inseridas nas áreas de contribuição. A significativa presença de lagos e lagoas frente

à área total de drenagem da sub-bacia acabam resultando em baixos valores relativos à densidade de drenagem, mesmo para regiões muito irrigadas.

Tabela 3 – Determinação de índices areais da sub-bacia 87.

Nome da sub-bacia	L (km)	Dd (km.km ²)	Eps (km)	Cmn (m ² .m ⁻¹)	Área de Lagos (km ²)	% de Lagos na sub-bacia,
Bacia do Rio Caí	5.511,7	1,11	0,45	902,7	28,1	0,6%
Bacia do Rio dos Sinos	3.693,2	1,00	0,50	998,3	13,5	0,4%
Bacia do Rio Gravataí	2.425,0	1,19	0,42	842,5	17,0	0,8%
Bacia do Rio Camaquã	25.927,1	1,47	0,34	678,3	92,9	0,5%
Bacia do Baixo Jacuí*	3.849,2	1,28	0,39	781,0	56,4	1,9%
Bacia do Rio Tramandaí	2.048,4	0,71	0,70	1.407,4	444,2	15,4%
Bacia do Litoral Médio*	315,2	0,22	2,23	4455,8	94,0	6,7%
Bacia do Lago Guaíba*	19.257,3	1,16	0,43	864,4	661,5	4,0%
Bacia da Lagoa dos Patos*	56.409,4	1,04	0,48	959,9	10.978,4	20,3%
Sub-bacia 87	58.773,0	1,01	0,50	994,32	11.518,96	19,7%

3.3 - Análise e estudo hipsométrico da sub-bacia 87

A análise da hipsometria da sub-bacia 87 foi realizada visando-se obter tanto o estudo integrado de toda a região como também informações acerca do perfil longitudinal de cada um dos corpos hídricos principais elencados no Quadro 3, relacionados às estações apresentadas no Quadro 4, através de um índice representativo de cada estação. Cabe ressaltar, que somente realizou-se a avaliação considerando as estações potencias ao estudo de Regionalização de Vazões, projeto em desenvolvimento na CPRM e no qual se insere o estudo fisiográfico apresentado neste artigo.

Quadro 4 – Relação de estações estudadas.

Nome da Estação	Código	Índice	Curso d'agua	Município	Lat	Long
					WGS84	
Passo do Caçõo	87590000	1	Rio Camaquã	Bagé	-30,96	-53,49
Passo das Carretas	87670000	2	Rio Camaquã	Santana da Boa Vista	-30,97	-53,05
Porto Taruma	87700000	3	Rio Camaquã	Piratini	-30,93	-52,95
Passo do Marinheiro	87730001	4	Rio Camaquã	Encruzilhada do Sul	-30,90	-52,83
Passo da Guarda	87820000	5	Rio Camaquã	Encruzilhada do Sul	-30,91	-52,46
Passo são José	87840000	6	Rio Camaquã	Amaral Ferrador	-30,88	-52,25
Passo do Mendonça	87905000	7	Rio Camaquã	Cristal	-31,01	-52,05
Passo do Blang	87050001	8	Rio Caí	São Francisco de Paula	-29,32	-50,62
Nova Palmira	87160000	9	Rio Caí	Caxias do Sul	-29,34	-51,19
Barca do Caí	87170000	10	Rio Caí	São Sebastião do Caí	-29,59	-51,38
Itati	87310000	11	Rio Três Forquilhas	Osório	-29,51	-50,09
Barra do João Pedro – M	87317060	12	Rio João Pedro	Xangri-lá	-29,77	-50,09
Taquara - Montante	87374000	13	Rio dos Sinos	Taquara	-29,72	-50,73
Campo Bom	87380000	14	Rio dos Sinos	Campo Bom	-29,70	-51,05
Passo das Canoas - Aux	87399000	15	Rio Gravataí	Gravataí	-29,96	-50,98

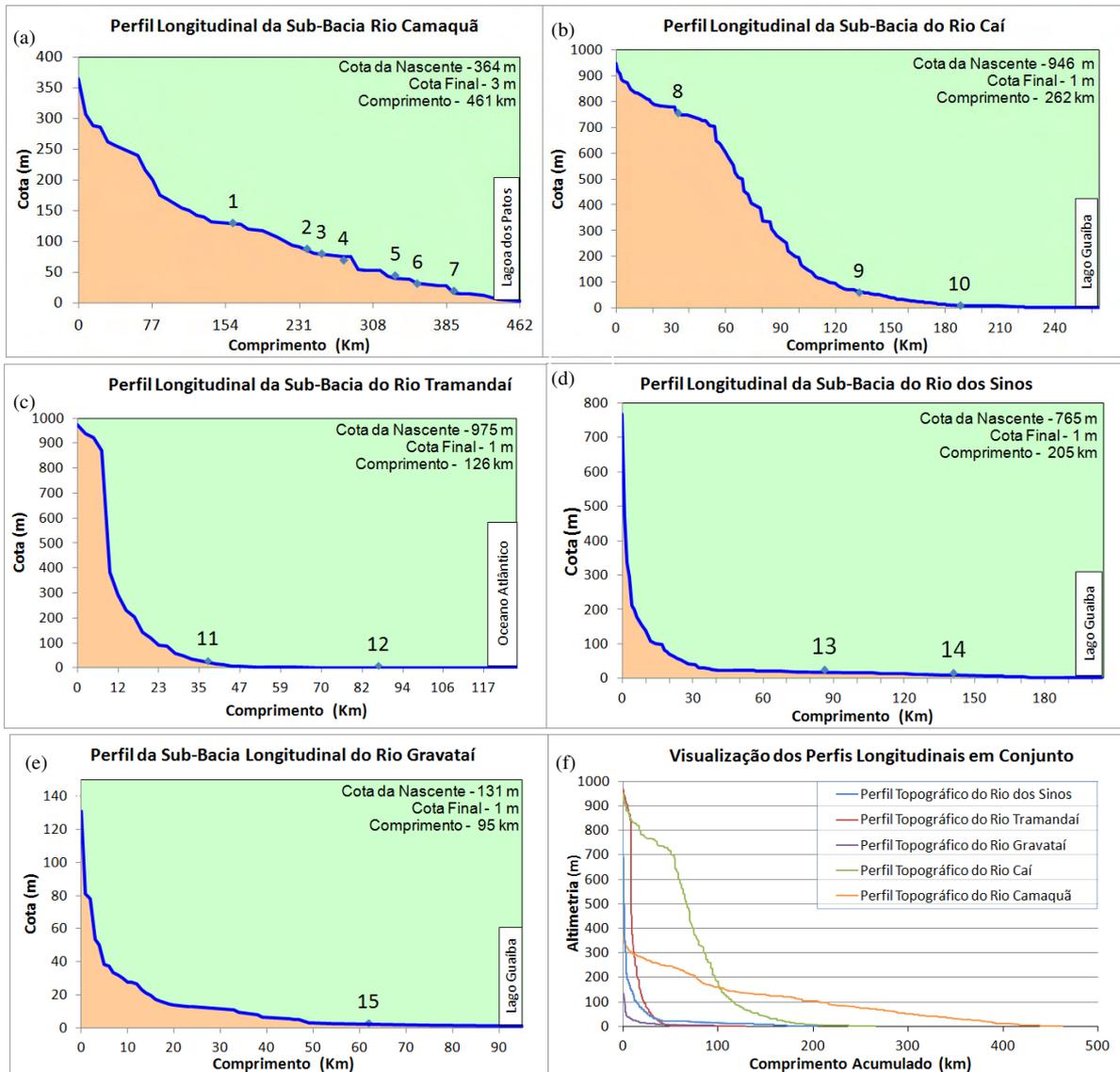


Figura 5 – Perfis longitudinais dos cursos principais da sub-bacia 87 e localização das estações.

Isto justifica a ausência de algumas estações instaladas recentemente nas áreas de estudo, bem como a presença de estações desativadas. Observa-se que as escalas de cada perfil longitudinal apresentados na Figura 5 são diferenciadas, com a exceção à Figura 5(f), em que são comparados todos os resultados em escala padronizada.

3.3.1 – Comportamento Geral e Declividade Média da sub-bacia 87

Conforme metodologia apresentada no item 2.6.1, a classificação geral do relevo da sub-bacia 87 aponta que mais de 70% de sua área é considerada como “Plana” ou “Suavemente Ondulada”, conforme apresentado na Figura 6.

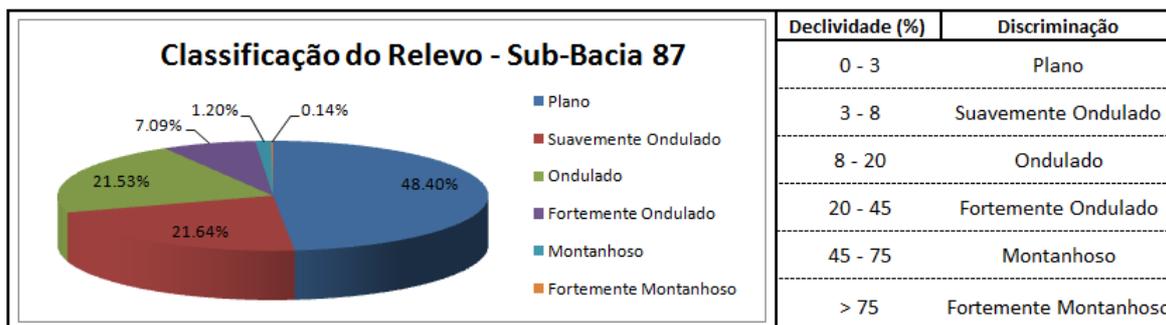


Figura 6 – Classificação geral do relevo da sub-bacia 87.

3.3.2 – Coeficiente de Massividade, Coeficiente Orográfico, Amplitude Altimétrica, Relação de Relevo e Índice de Rugosidade

A sub-bacia 87 apresenta grande heterogeneidade em relação a maior parte dos índices avaliados neste item, com exceção ao Coeficiente de Massividade. Percebe-se que a sub-bacia do Rio Caí é a que apresenta o maior Coeficiente Orográfico, devido aos maiores valores de altitude média e do Coeficiente de Massividade.

Tabela 4 – Índices Hipsométricos da sub-bacia 87.

Sub-bacia	A (km ²)	Hm (m)	hm (m)	Dd (km.km ⁻²)	Dm (%)	Cms (m.km ⁻²)	Co (m ² .km ⁻²)	Rr (m.km ⁻¹)	Ir (km.km ⁻²)
Rio Caí	4.975,7	1.030	452,2	1,11	16,17	0,09	41,10	14,60	17,91
Rio dos Sinos	3.687,0	992		1,00	16,74	0,07	18,29	16,34	16,77
Rio Gravataí	2.043,0	382	54,7	1,19	4,58	0,03	1,46	8,45	5,43
Rio Camaquã	17.587,6	576	221,4	1,47	8,17	0,01	2,79	4,34	12,04
Baixo Jacuí*	3.006,3	587	143,4	1,28	8,28	0,05	6,84	10,71	10,60
Litoral Norte	2.883,0	1.038	211,9	0,71	13,46	0,07	15,57	19,33	9,56
Litoral Médio*	1.404,4	101	10,6	0,22	1,46	0,01	0,08	2,70	0,33
Lago Guaíba*	16.647,5	1.030	235,2	1,16	11,58	0,01	3,32	7,98	13,40
Lagoa dos Patos*	54.151,4	1.032	151,7	1,04	-	0,00	0,42	4,43	-
Sub-bacia 87	58.439,0	1.038	151,3	1,01	-	0,00	0,39	4,29	-

Nota-se também, através da análise do Índice de Rugosidade, que esta mesma sub-bacia também apresentaria maior suscetibilidade à degradação por erosão nos leitos de seus rios⁵ do que bacias como a do Litoral Médio, por exemplo. Ainda, valores altos relacionados à Relação de Relevo, como da sub-bacia do Litoral Norte, resultam da alta amplitude altimétrica restrita à pequena área de contribuição que tem a bacia.

⁵ Este tipo de análise deve ser realizada com cuidado, visto que a degradação de corpos hídricos ocasionada pela erosão leva em consideração diversos outros fatores, como tipo de solo e presença de mata ciliar.

4 – CONCLUSÕES

Em síntese, verificou-se que os estudos hidromorfológicos aplicados à sub-bacia 87 possibilitaram uma melhor compreensão acerca das similaridades e diferenças existentes entre as principais sub-bacias inseridas na região de estudo. Algumas características distintas, relacionadas a algumas variáveis, foram observadas entre cada sub-bacia que compõe a sub-bacia 87. Foi possível observar a existência de diferenças substanciais nos perfis longitudinais dos principais corpos hídricos, bem como a amplitude altimétrica elevada em bacias de pequena área de drenagem, como é o caso da sub-bacia do rio Tramandaí. É possível, ainda, efetuar o agrupamento de regiões quanto à altimetria média e a representatividade da hidrografia nas áreas de drenagem, visto que as bacias localizadas em áreas mais planas tendem, de maneira geral, a apresentar menores índices de rugosidade e maior representatividade de grandes lagos.

O índice referente à densidade de drenagem, em escala de 1:50.000, permitiu a comparação de maneira integrada de todas as regiões que contemplam a sub-bacia 87, de modo que foram observadas diferenças de até 50% em regiões com distintos perfis altimétricos, concentrações populacionais e uso e ocupação do solo (caso encontrado na análise entre as sub-bacias do rio Camaquã e do rio dos Sinos).

Em resumo, este estudo permitiu a determinação de índices importantes para a caracterização hidromorfológica e populacional da sub-bacia 87, fornecendo, desse modo, subsídios para trabalhos futuros no âmbito da caracterização, comparação e gestão das regiões de interesse.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTONELI, V; THOMAZ, E.L. (2007). “*Caracterização do meio físico da bacia do Arroio Boa Vista, Guamiranga-PR*”. Rev. Caminhos da Geografia, Uberlândia, v.8, n.21, p 46-58.

BIBLIOTECA DIGITAL, Fundação Estadual de Proteção Ambiental – Rio Grande do Sul. Disponível em < http://www.fepam.rs.gov.br/biblioteca/geo/bases_geo.asp > Acesso em 06/2012.

BORSATO, F.H. (2005). “*Caracterização física das bacias de drenagem do município de Maringá e os postos de combustíveis como potenciais poluidores*”. Dissertação (Mestrado em Geografia). Universidade Estadual de Maringá . Maringá– PR.

CHEREM, S. L. F. (2008). *Análise Morfológica da Bacia do Alto Rio das Velhas*. Belo Horizonte: UFMG, 2008, 111 p. Tese (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – MG.

CHRISTOFOLETTI, A. (1980). *Geomorfologia*. 2 ed., Edgard Blucher, São Paulo, SP. 188 p.

- CPRM (2010). Geodiversidades do Estado do Rio Grande do Sul. Rio Grande do Sul: DVD-ROM.
- HASENACK, H.; WEBER, E. (2010). “*Base cartográfica vetorial contínua do Rio Grande do Sul - escala 1:50.000.*” UFRGS-IB-Centro de Ecologia. Porto Alegre - RS. 1 DVD-ROM (Série Geoprocessamento, 3).
- HORTON, R.E. (1945). “*Erosional development of streams their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology*” in Bulletin of the Geological Society of America, Colorado, v. 56, pp. 275-370.
- IBGE. (2010). “*Dados do Censo 2010 publicados dia 04/11/2010*”. Disponível em < <http://www.sidra.ibge.gov.br/cd/cd2010univentorno.asp> > Acesso 05/2012.
- JUNIOR, F.P.; MELO, O.A.G; SOUZA, M. L.; GASPARETO, N. L. (2009). “*Caracterização Hidromorfológica da Bacia do Córrego Pinhalzinho Segundo – Umuarama-Pr*” em Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, Viçosa – MG.
- KÖPPEN, W. (1936): Das geographische System der Klimate, in: Handbuch der Klimatologie, edited by: Köppen, W. and Geiger, G., 1. C. Gebr, Borntraeger, 1–44.
- PEEL, M.C.; FINLAYSON, B.L. & MCMAHON, T.A. (2007), *Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification*, Hydrol. Earth Syst. Sci., 11, 1633-1644.
- PFAFSTETTER, O. (1989). “*Classificação de bacias hidrográficas: metodologia de codificação*”. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Obras de Saneamento (DNOS), 1989. p.19. Manuscrito não publicado.
- TUCCI, M. C. E. (2004). *Hidrologia – Ciência e Aplicação*, UFRGS/ABRH, 3ª Edição – Porto Alegre - RS.