

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO

**Relação entre a ocorrência de inundações e
enxurradas e os índices morfométricos das sub-bacias
hidrográficas da Região Hidrográfica do Guaíba,
Rio Grande do Sul, Brasil.**

Fabiana Rauber Sirangelo

Porto Alegre
2014

Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto
Fabiana Rauber Sirangelo

**Relação entre a ocorrência de inundações e enxurradas e os
índices morfométricos das sub-bacias hidrográficas da Região
Hidrográfica do Guaíba – Rio Grande do Sul, Brasil.**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto da Universidade Federal do Rio Grande do Sul em cumprimento ao requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Sensoriamento Remoto.

Porto Alegre
2014

FABIANA RAUBER SIRANGELO

**RELAÇÃO ENTRE A OCORRÊNCIA DE INUNDAÇÕES E OS ÍNDICES
MORFOMÉTRICOS DAS SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS DA REGIÃO
HIDROGRÁFICA DO GUAÍBA - RIO GRANDE DO SUL, BRASIL.**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto da Universidade Federal do Rio Grande do Sul em cumprimento ao requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Sensoriamento Remoto.

Aprovada em 25 de Fevereiro de 2014.

Profa. Dra. Dejanira Luderitz Saldanha – PPGSR/UFRGS (Orientadora)

Prof. Dr. Laurindo Antônio Guasselli – PPGGEA/PPGSR/UFRGS (Coorientador)

Profa. Dra. Rita de Cássia Alves - UFRGS (Coordenadora do PPG e Membro da Banca)

Prof. Dr. Roberto Verdum - PPGEA/UFRGS (Membro da Banca)

Prof. Dr. Luiz Antônio Bressani – PPGEA/UFRGS (Membro da Banca)

Aos meus lindos e queridos pais, Roberto e Beatriz,
pelo exemplo, pelo incentivo, pela paciência e pela vida.

Tudo o que faço é dedicado a vocês.

AGRADECIMENTOS

A meus pais, Beatriz e Roberto, por tanto exemplo e pela força que me motiva diariamente. Agradeço infinitamente por todo o amor, toda compreensão, todo incentivo, dedicação e carinho; sempre incansáveis em seus esforços para nos proporcionar o melhor possível. Muito obrigada por deixar para mim e para o Pedro uma única missão: sermos felizes.

À Mari, por todas as roupinhas sempre lavadas, almoços deliciosos prontos, abraços e sorrisos que me acompanham desde o meu nascimento. Um dos maiores presentes da minha vida. A quem eu amo muito e também me esforço para encher de orgulho diariamente.

Ao meu orientador Laurindo, a quem não tenho palavras para agradecer. Um grande exemplo profissional, indiscutivelmente ético e dedicado em todos os momentos. Muito obrigada por todas as oportunidades, pelas orientações, pelas conversas e por mais uma etapa vencida, e outra que iniciamos agora. Minha admiração por ti é gigantesca. Muito obrigada!

A minha orientadora Dejanira, pelo incentivo e confiança. Acima de tudo pela oportunidade dada e pelos conhecimentos repassados. Sou muito grata e orgulhosa de ter realizado esta missão ao teu lado.

Super agradecimento ao Guilherme Oliveira, pelas infinitas dúvidas discutidas, conversas, gargalhadas, churrascos, vídeos do *Chapolin* e pelo companheirismo. Me espelho muito em ti, te admiro e sou muito grata por dividir contigo estes anos de Sensoriamento Remoto.

Agradecimento especial aos colegas do Laboratório de Geoprocessamento e de Análise Ambiental (LAGAM). João Gabriel, Pablo e Marcelo pela ajuda na execução de algumas etapas, e pela boa vontade e sorriso no rosto: muito obrigada. João (Mau), Ceci, Tassia e Renata: meus queridos colegas de laboratório, obrigada pelas fofocas, cafés, abraços, risadas, quartos divididos... Enfim, o trabalho dividido com vocês é muito mais divertido. Que sigamos unidos e nos apoiando, pois isso faz toda a diferença.

Ao CEPSSRM e a UFRGS pela oportunidade de realização do Mestrado. A todos os professores, secretárias, funcionários e colegas que diariamente convivi ao longo destes cinco anos, pelo ambiente de trabalho sempre agradável e cercada de amigos.

Agradeço aos professores componentes da banca examinadora: Prof. Verdum, Prof. Bressani e Prof. Rita pela disponibilidade e sugestões agregadas.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento da bolsa de mestrado, sem a qual seria impossível a realização desta dissertação.

Aos grandes amigos, tão importantes. Àqueles que divido meus bons e maus momentos: muito obrigada. Amigas de colégio, amigos de Geografia, aos amigos que a vida me deu. Muito obrigada a cada um de vocês!

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistematização dos tipos de risco a partir do processo causador.	23
Figura 2 - Gráfico da dinâmica de escoamento de enxurradas e inundações.	28
Figura 3 - Classificação dos processos hidrológicos de enchente e inundação.	29
Figura 4 - Hidrograma relacionado à vazão de áreas urbanizadas e não urbanizadas.	30
Figura 5 - Perfil transversal representativo de uma planície de inundação.	30
Figura 6 - Diferenças da representação do MDE e do MDT.	33
Figura 7 - Interferometria por radar: ondas de RADAS transmitidas e recebidas.	34
Figura 8 - Imagens de MDE com diferentes resoluções espaciais.	36
Figura 9 - Comparação entre MDE's com <i>grids</i> de diferentes resoluções.	37
Figura 10 - Faixa de atuação do micro-ondas (RADAR).	37
Figura 11 - Mapas das diferentes faixas de declividade da área territorial do município de Pedro Osório/RS pelos MDE's ASTER (a) e TOPODATA (b). Fonte: Perini et al., 2013.	40
Figura 12 - Região Hidrográfica do Guaíba, Rio Grande do Sul, Brasil.	49
Figura 13 - Mapa altimétrico da Região Hidrográfica do Guaíba.	50
Figura 14 - Densidade populacional em 2010 - RS.	51
Figura 15 - Comparativo de registros da Defesa Civil entre as décadas de 1990 e 2000.	53
Figura 16 - Total de registros da Defesa Civil do RS por ano, 1991 a 2010.	54
Figura 17 - Gráfico comparativo dos valores absolutos de ocorrência de eventos e inundação e enxurrada na Região Hidrográfica do Guaíba, para o período de 1991 a 2010.	54
Figura 18 - Mapa de inundações por município - RHG, RS. Período de 1991 a 2010.	55
Figura 19 - Mapa de enxurradas por município - RHG, RS. Período de 1991 a 2010.	55
Figura 20 - Fluxograma metodológico.	56
Figura 21 - Etapas da obtenção das redes de drenagem a partir de dados SRTM.	57
Figura 22 - Operação condicional aplicada com diferentes limiares para as células de contribuição.	58
Figura 23 - Hierarquia fluvial proposta por Strahler (1992).	59
Figura 24 - Confluência de bacias adjacentes: Baixo Jacuí.	60
Figura 25 - Gráfico de ocorrência de inundação em função da área da bacia.	61
Figura 26 - Mapa de distribuição dos episódios de inundação por município e sua relação ponderada com a área da bacia hidrográfica.	63
Figura 27 - Gráfico de valores ponderados em função da área para episódios de inundação.	64
Figura 28 - Gráfico de ocorrência de episódios de enxurrada em função da área das bacias inseridas na RHG.	64
Figura 29 - Gráfico de valores ponderados em função da área para episódios de enxurrada.	65
Figura 30 - Mapa de distribuição dos episódios de inundação e sua relação ponderada com a área da bacia hidrográfica.	66
Figura 31 - Gráficos de dispersão e índice de correlação : Área da Bacia.	67
Figura 32- Efeito de "denteamento" apresentado nos dados SRTM.	68
Figura 33 - Gráficos de dispersão e índice de correlação: Perímetro da Bacia.	69
Figura 34 - Distância vetorial do rio.	72
Figura 35 - Valores de sinuosidade para modelos com diferentes padrões.	73
Figura 36 - Gráficos e valores de correlação do parâmetro: Índice de Sinuosidade.	75
Figura 37 - Gráficos e valores de correlação do parâmetro: Relação de Bifurcação.	78

Figura 38 - Gráficos e valores de correlação do parâmetro: Gradiente de Canais.....	80
Figura 39 - Gráficos e valores de correlação do parâmetro: Índice de Circularidade.....	83
Figura 40 - Gráfico de vazão para diferentes formas de bacia hidrográfica.	84
Figura 41 - Gráficos e valores de correlação do parâmetro: Fator de Forma.	86
Figura 42 - Gráficos e valores de correlação do parâmetro: Densidade Hidrográfica.....	89
Figura 43 - Gráficos e valores de correlação do parâmetro: Densidade de Drenagem.	92
Figura 44 - Modelo teórico do perfil de talvegue.	93
Figura 45 - Gráfico comparativo dos Perfis de Talvegue.....	94
Figura 46 - Gráficos de Perfil de Talvegue.....	95
Figura 47 - Gráficos e valores de correlação do parâmetro: Razão de Relevo.....	97
Figura 48 - Mapa de Declividade da Região Hidrográfica do Guaíba.....	99
Figura 49 - Gráficos e valores de correlação do parâmetro Declividade Média da Bacia.....	101
Figura 50 - Mapa de topologia climática.....	103
Figura 51 - Mapa de Uso e Ocupação do solo da Região Hidrográfica do Guaíba.	105
Figura 52 - Gráficos e valores de correlação do parâmetro: Índice de Cobertura.	108
Figura 53 - Gráficos comparativos dos valores de Uso e Ocupação.	109
Figura 54 - Gráfico dos valores para o Tc: Kirpich, Ventura e Pasini.....	113
Figura 55 - Valores de correlação do parâmetro: Tempo de Concentração.	114

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Equações utilizadas para o cálculo das variáveis.....	46
Tabela 2 - Valores ponderados da relação entre a ocorrência de inundação e a área da bacia hidrográfica:	62
Tabela 3 - Valores ponderados da relação entre a ocorrência de enxurradas e a área das bacias hidrográficas:.....	65
Tabela 4 - Área, perímetro e comprimento do rio principal:	70
Tabela 5 - Valores de classificação do índice de sinuosidade:	73
Tabela 6 - Valores obtidos para o índice de sinuosidade.	74
Tabela 7 - Gradiente do canal principal:	79
Tabela 8 - Valores de referência para o índice de circularidade:	82
Tabela 9 - Índice de Circularidade:.....	82
Tabela 10 - Suscetibilidade a enchentes em função do fator de forma:	85
Tabela 11 - Resultados de fator de forma para a Região Hidrográfica do Guaíba:	85
Tabela 12 - Valores de densidade hidrográfica para as bacias hidrográficas da Região Hidrográfica do Guaíba:	88
Tabela 13 - Classificação para a interpretação de valores da densidade de drenagem:	90
Tabela 14 - Valores de densidade de drenagem das sub-bacias da Região Hidrográfica do Guaíba: ...	91
Tabela 15 - Valores da razão de relevo das sub-bacias da Região Hidrográfica do Guaíba:	96
Tabela 16 - Intervalos de declividade e respectivas classes de relevo:	98
Tabela 17 - Valores de declividade média das sub-bacias da Região Hidrográfica do Guaíba:.....	100
Tabela 18 - Índice de Cobertura das Bacias Hidrográficas:	106
Tabela 19 - Valores de correlação dos diferentes Usos e Ocupação:	108
Tabela 20 - Valores de tempo de concentração:	113

RESUMO

Enxurradas e inundações apresentam-se como fenômenos naturais que têm potencial de causar grandes perdas e danos à população. Estes poderiam ser reduzidos ou evitados a partir de políticas públicas de não ocupação de áreas suscetíveis ou metodologia de alerta diante da possível ocorrência destes eventos adequada. Os eventos de inundação e enxurrada são consequências de uma interação de condições físicas do terreno e de condições meteorológicas. A geomorfologia fluvial se utiliza, portanto, dos parâmetros morfométricos como ferramenta importante na descrição quantitativa das características físicas do terreno. O objetivo deste trabalho é correlacionar os dados morfométricos, extraídos a partir de dados SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) de sete bacias hidrográficas da Região Hidrográfica do Guaíba/Rio Grande do Sul, a episódios de inundação e enxurrada, considerando a incidência destes eventos no inventário pela Defesa Civil no período de 1991 a 2010. O modelo digital de elevação utilizado, o SRTM, possui resolução de 90m, de onde foram extraídas as variáveis analisadas neste estudo. Os resultados foram então correlacionados com os diferentes padrões de escoamento superficial das sete bacias hidrográficas. Buscando análises comparativas o estudo divide-se na análise areal, linear e hipsométrica de cada um dos recortes; além de uma breve descrição das características de chuva e de uso e ocupação da área de estudo. Os resultados da análise areal, em todas as suas variáveis, mostraram-se inadequados para a tentativa de relacionar a ocorrência do evento aos seus resultados. Já os resultados obtidos pelas variáveis da análise linear mostraram-se mais eficientes na identificação de áreas de enxurrada, enquanto que a análise hipsométrica reflete melhor os episódios de inundação. Este fator de erro está provavelmente associado a dois fatores distintos: a heterogeneidade das áreas trabalhadas, por vezes generalizando regiões heterogêneas, por outras vezes supervalorizando características físicas de determinadas áreas. Além disso, credita-se erro associado aos problemas de metodologia do inventário base utilizado, este apresentando falhas no que tange a possível ausência de dados ou diferenças na obtenção e classificação dos diferentes tipos de evento. A compartimentação das bacias estudadas, visando obter recortes mais precisos e homogêneos para as diferentes áreas e uma revisão e aperfeiçoamento do inventário são apresentados como sugestões futuras para o refinamento dos resultados obtidos visando encontrar correlação entre as características morfométricas do terreno e os episódios de inundação e enxurrada.

Palavras-chave: Bacia Hidrográfica; Inundação; Enxurrada; Morfometria; SRTM.

ABSTRACT

Floods and flash floods are presented as natural phenomena that have the potential to cause major damages to the population. These could be reduced or avoided from public policies of no occupation of susceptible areas or appropriate methodology warning about the possible occurrence of the events. The events of flash flooding and flood are consequences of an interaction of an interaction of physical conditions of the terrain and weather conditions. The fluvial geomorphology uses morphometric parameters as an important tool in the quantitative description of the physical characteristics of the land. The objective of this work is to correlate the morphometric data , extracted from SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) data from seven watersheds of the Guaiba River Basin / Rio Grande do Sul , the episodes of flooding and flash flood, whereas the incidence of the incidence of these events in inventory by the Civil Defense from 1991 to 2010. The digital elevation model used, the SRTM has a resolution of 90m, where from the variables analyzed in this study were extracted. The results were then correlated with different patterns of runoff from seven river basins analyzed. Seeking benchmarking study is divided into areal, linear and hypsometric analysis; and a brief description of the characteristics of rain, and use and occupation of the study area were also presented. The results of areal analysis, in all its variables, proved inadequate to the attempt to relate the occurrence of the event and its results. The results obtained by the linear analysis variables were more effective in identifying areas of flash flood, while the hypsometric analysis reflects the best episodes of flooding. This error factor is probably related to two distinct factors: the heterogeneity of areas worked, sometimes generalizing heterogeneous regions, other times overestimating physical characteristics of certain areas. Also is credited to the problems of error associated inventory methodology used base, this presenting failures regarding the possible absence of data or differences in collection and classification of different types of event. The partitioning of the basins studied , aiming at obtaining more accurate and homogeneous cutouts for the various areas and a review and improvement of the inventory are presented as suggestions for future refinement of the results aimed at finding correlations between morphometric characteristics of the terrain and episodes of flooding and flash floods.

Keywords: Hydrographic Basin; Flood; Flash Flood; Morphometry; SRTM.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	12
1.1 Objetivo Geral	15
1.2 Objetivos Específicos	15
1.3 Justificativa	16
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1 Eventos Extremos.....	20
2.2 Inundação e Enxurrada.....	26
2.3 Sensoriamento Remoto e Dados SRTM.....	32
2.4 Morfometria das Bacias Hidrográficas	40
METODOLOGIA	48
3.1 Área de Estudo	49
3.2 Materiais.....	52
3.3 Inventário.....	53
3.4 Método	56
RESULTADOS.....	61
4.1 Inundação	61
4.2 Enxurrada.....	64
4.3 Variáveis Morfométricas	67
4.3.1 Análise Linear da Bacia Hidrográfica	67
4.3.2 Análise Areal da Bacia Hidrográfica.....	78
4.3.3 Análise Hipsométrica da Bacia Hidrográfica	92
4.4 Aspectos Climáticos.....	101
4.5 Uso e Ocupação	104
4.5.1 Índice de Cobertura	105
4.6 Tempo de Concentração.....	110
4.6.1 Kirpich	111
4.6.2 Pasini.....	111
4.6.3 Ventura	112
4.7 Bacias Hidrográficas	115
4.7.1 Alto Jacuí	115
4.7.2 Baixo Jacuí.....	116
4.7.3 Caí.....	116

4.7.4 Pardo.....	117
4.7.5 Sinos.....	118
4.7.6 Taquari-Antas	118
4.7.7 Vacacaí/Vacacaí Mirim.....	119
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	121
REFERÊNCIAS	125
ANEXOS	132

INTRODUÇÃO

A ocupação humana tradicionalmente ocorre em áreas próximas aos recursos hídricos em função da necessidade de uso da água para sua sobrevivência, tanto pelo consumo quanto pela agricultura e indústria, ou como via de transporte.

Collins (2004) aponta que um bilhão de pessoas - a maioria delas entre os habitantes mais pobres do mundo - um sexto da população mundial - vivem hoje em áreas com potencial de inundação; a menos que os esforços de prevenção sejam intensificados em todo o mundo, esse número pode dobrar em duas ou mais gerações.

Episódios de inundações e enxurradas são originados por eventos climáticos extremos. Estes são de ocorrência natural e periódica em todos os ambientes fluviais (Oliveira, 2010). As oscilações comuns aos recursos hídricos, em função dos diferentes regimes de chuva, impõem problemas ao homem representados pelos eventos de estiagem ou inundações.

Os conceitos de inundação e enxurrada diferenciam-se pelo tempo de duração do escoamento hídrico e sua relação com a vazão dos rios. As inundações são, portanto, os eventos de maior duração e picos menores de vazão, também chamada de inundação gradual. Já as enxurradas são os eventos onde a vazão tem um pico brusco e tempo de duração reduzido e incremento grande na vazão, também chamadas de inundação brusca.

Apesar da naturalidade da ocorrência destes fenômenos, Brubacher et al. (2012), Kobiyama et al. (2006), Sausen & Narvaes (2013) apontam a intensificação das consequências destes eventos, causando impactos negativos, através de prejuízos materiais e humanos. Sausen & Narvaes (2013) destacam o Brasil como um dos seis países no mundo com maior incidência de eventos de inundação nos no período compreendido entre os anos 1974 e 2003. A explicação para tal aumento se deve à expansão da ocupação humana em áreas suscetíveis.

O atlas desenvolvido pela Defesa Civil aponta que somente as inundações graduais (neste trabalho conceituadas apenas como inundações) foram responsáveis, no período de 1991 a 2010, por 728.827 afetados no Estado do Rio Grande do Sul, além de 73.628 desalojados e 15 mortes (CEPED, 2011).

A partir da década de 1950 acelerou-se intensamente o processo de urbanização do País, não sendo acompanhado de políticas adequadas de desenvolvimento urbano, preocupadas em prover moradia para todos. Em função da falta de condições financeiras de grande parte da população observa-se a ocupação de terrenos menos valorizados, gerando um quadro de extrema vulnerabilidade aos eventos extremos no Brasil.

Os episódios de enxurrada e inundação apresentam-se como eventos cujas forças geram grandes perdas e danos e seu estudo busca compreender e reduzir sua intensidade e efeitos, além de gerenciar os prejuízos como medidas prioritárias de planejamento urbano.

O aumento das chuvas intensas (torrenciais) ou de longa duração, na estação chuvosa, favorece a saturação do solo a partir da absorção do excedente hídrico, provocando escorregamentos e/ou deslizamentos de encostas além dos alagamentos e das inundações. As consequências e os impactos de uma determinada quantidade de precipitação, intensa ou prolongada, vão depender das condições geomorfológicas e pedológicas do local.

Também outro fator agravante de risco, em escala local, é o expressivo aumento da superfície impermeabilizada nas cidades, ocasionando uma maior frequência e intensidade dos alagamentos e conseqüente incremento dos danos à população. A alteração na cobertura vegetal das áreas rurais também acarreta a modificação da dinâmica hídrica e é apontada como um dos fatores responsáveis pelos desastres.

A problemática enfrentada pelas populações ribeirinhas passa por uma intensificação das consequências dos eventos extremos em função da ocupação desordenada, além do pouco investimento em pesquisa para compreensão e manejo da dinâmica hídrica e da ocupação urbana.

Os estudos relacionados aos corpos fluviais por meio de parâmetros quantitativos permitem o esclarecimento de questões de gênese e de dinâmica da paisagem, tendo em vista que a rede de drenagem assume o papel de destaque na compartimentação do relevo. A morfometria geomorfológica permite a caracterização de uma região por meio de uma análise quantitativa do relevo, onde se observa a configuração espacial do conjunto de drenagens e vertentes. Com o avanço das plataformas SIG as análises morfométricas, anteriormente elaboradas de forma

manual, ganharam tempo e aplicabilidade em função da agilidade do processo e da precisão dos resultados obtidos.

Conforme Jensen (2000), a observação por meio de satélites é uma das maneiras mais efetivas e econômicas de estudar alguns fenômenos da natureza e permite coletar dados para modelar as alterações, tanto no meio natural, quanto no construído.

A utilização de dados obtidos por sensoriamento remoto substituí a escassez e, por vezes, a precariedade de dados comumente utilizados (como estações fluviométricas e pluviométricas, dados topográficos, etc.) permitindo de maneira simplificada, a implementação de medidas não estruturais no manejo e no controle das inundações. Dados obtidos por sensoriamento remoto e sistemas de informações geográficas, além de ferramentas de geoprocessamento, de modo geral, atuam como grandes aliados nestas pesquisas.

O desconhecimento das potencialidades das geotecnologias para a gestão, prevenção e mitigação dos desastres naturais evidencia a relevância deste estudo, possibilitando enfrentar com mais segurança e informação os desastres naturais e eventos extremos recorrentes.

Como as inundações são combinações únicas de condições meteorológicas e hidrológicas, Marchi et al. (2010) defendem que esforços maiores devem ser dedicados para identificar as características morfológicas específicas que afetem a suscetibilidade, sendo as variáveis morfométricas uma ferramenta poderosa na modelagem dos sistemas fluviais. A identificação de padrões de escoamento associados às formas do relevo facilita a compreensão da dinâmica e a gênese destes eventos, conseqüentemente facilitando a identificação de áreas suscetíveis e possibilitando uma redução dos danos humanos e materiais desencadeados por estes.

O trabalho inicialmente está dividido em quatro capítulos de revisão bibliográfica. O primeiro deles disserta sobre o conceito de evento extremo e a relevância da compreensão destes para o planejamento e redução de danos causados ao meio. O segundo capítulo conceitua e diferencia os tipos de escoamento e as suas variações em relação às diversas morfologias do terreno e intensidades de eventos de chuva. O terceiro capítulo aborda as características dos dados SRTM e as aplicações para esses dados, com enfoque aos estudos de extração de bacias e dados morfométricos. O quarto capítulo da revisão bibliográfica

aborda a questão geomorfológica, destacando as variáveis morfométricas relevantes na determinação das diferentes formas de escoamento do conteúdo hídrico proveniente de eventos extremos de chuva, analisando variáveis morfométricas, divididas em análises areal, linear e hipsométrica. Além disso, cruzamentos com condições climatológicas, uso e ocupação do solo e tempo de concentração foram utilizados.

Materiais e métodos detalham os procedimentos para correlacionar os dados morfométricos extraídos de dados SRTM, das sub-bacias hidrográficas do Guaíba, RS, aos dados obtidos da Defesa Civil correspondentes às inundações e enxurradas. Para finalizar são apresentados os resultados obtidos por meio das análises propostas e suas conclusões.

1.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é analisar a correlação dos dados morfométricos, extraídos a partir de dados SRTM das bacias hidrográficas da região hidrográfica do Guaíba/RS, a episódios de inundações e enxurradas inventariados para o período entre 1991 e 2010.

1.2 Objetivos Específicos

- a) Extrair as sub-bacias hidrográficas da Região Hidrográfica do Guaíba, Rio Grande do Sul, a partir de dados SRTM;
- b) Analisar a morfometria das sub-bacias com base nas características areais, lineares e hipsométricas;
- c) Espacializar o inventário da Defesa Civil dos episódios e enxurrada e inundação no período entre 1991 e 2010.
- d) Correlacionar as diferentes variáveis morfométricas das bacias hidrográficas e os dados de inundações e enxurradas da Defesa Civil inventariados;
- e) Identificar padrões de comportamento hídrico para diferentes características das bacias em relação ao escoamento.

- f) Verificar a eficiência de técnicas de geoprocessamento na abordagem morfométrica para análise de eventos extremos.

1.3 Justificativa

Dados apresentados pelo Anuário de Desastres Naturais de 2011 (BRASIL, 2012a) apontam enxurradas, inundações e alagamentos como os eventos extremos com maior potencial de óbitos, de feridos, de desabrigados, de desalojados e de desaparecidos em todo o Brasil.

De acordo com Santos (2007) avalia-se que no Brasil os desastres naturais mais comuns entre 2000 e 2007 foram: as enchentes, a seca, a erosão e os escorregamentos ou deslizamentos de terra, sendo 58% representados pelas enchentes.

No Estado do Rio Grande do Sul o quadro é semelhante, onde os desastres naturais vêm ocorrendo de forma mais frequente e com maior intensidade nos últimos anos – 2007 a 2011 - principalmente as inundações, as estiagens, os vendavais e granizo (Reis et al., 2012).

A publicação do IBGE (2005) denominada MUNIC (Pesquisa de Informações Básicas Municipais) mostra que no Brasil os maiores desastres relacionam-se às inundações, aos escorregamentos e à erosão, e que estão fortemente relacionados à degradação de áreas frágeis, potencializada pelo desmatamento e ocupação irregular.

Um marco institucional importante foi o lançamento do Plano Nacional de Gestão de Riscos e Respostas a Desastres Naturais (BRASIL, 2012), com previsão de aplicação de cerca de 19 bilhões de reais em estados e municípios para o estabelecimento das seguintes ações: prevenção, através da execução de obras estruturantes; mapeamento de áreas de risco; monitoramento e alerta; estruturação da rede nacional; socorro, assistência e reconstrução.

Cada vez mais se observa aplicação de medidas preventivas na tentativa de reduzir ou amenizar problemas relacionados às áreas que estão em situação de risco. O aumento no número de estudos acerca dos desastres naturais se deve ao número de vítimas fatais, ao acelerado crescimento urbano, à ocupação

desordenada em áreas impróprias à urbanização, além das alterações feitas no meio natural, como rede de drenagem e conformação do relevo.

De acordo com Sausen & Narvaes (2013) a maioria dos órgãos e instituições envolvidas com desastres naturais, tem observado que o dano causado pelos eventos extremos muitas vezes poderia ser prevenido, reduzido ou minimizado, se a população em geral, os tomadores de decisão, os formadores de políticas e de opinião, bem como os educadores tivessem a correta noção do que são estes eventos.

A dificuldade do acesso a terra e à moradia em áreas urbanas, associada à baixa atuação do poder público permitiu a instalação de um quadro de ocupação irregular dessas áreas, especialmente nos grandes centros urbanos. E neste contexto a degradação ambiental possui um vínculo estreito com a realidade de pobreza da população urbana e do não acesso a terra, tornando a população de baixa renda a mais vulnerável a desastres naturais (Santos 2007).

As áreas desvalorizadas do espaço urbano são as ambientalmente mais frágeis à ocupação e suscetíveis ao desenvolvimento de processos de dinâmica superficial desencadeadores de risco. Estas áreas estão comumente localizadas em encostas e em margens de arroios e são ocupadas pela parcela da população de menor poder aquisitivo que, desfavorecida pelo processo de reprodução do capital, é obrigada a se estabelecer em áreas desprovidas de condições básicas de infraestrutura e de saneamento (Reckziegel e Robaina, 2005).

Em relação às inundações, Marcelino (2007) associa a ocorrência destas a elevados índices de precipitação, somado ao desmatamento de encostas, ocupação das planícies de inundação, ao assoreamento dos rios e a impermeabilização urbana.

Tais análises auxiliam no processo de identificação de áreas de suscetibilidade e risco aos eventos de inundação, onde o risco pode ser definido como o mais sofisticado nível de avaliação de perigos, através de dois componentes mensuráveis: a magnitude do dano (definida pela vulnerabilidade) e a probabilidade do prejuízo.

A região hidrográfica do Guaíba, localizada na porção centro-leste do estado do Rio Grande do Sul, foi o recorte espacial selecionado para esta análise por contemplar bacias hidrográficas com boa distinção geográfica entre o local de ocorrência de dois tipos de eventos analisados: inundações e enxurradas, O que

possibilita analisar de maneira criteriosa, estas áreas. Além disso, esta região, que representa 30% da área do estado do Rio Grande do Sul, apresenta uma ocupação de 61% da população do estado (RIO GRANDE DO SUL, 2012).

Outro ponto relevante na determinação deste recorte decorre do fato desta área estar inteiramente localizada no estado do Rio Grande do Sul. Isso possibilita uma uniformidade das bases de dados, tanto no que tange aos dados oriundos da Defesa Civil, quanto aos dados físicos e socioeconômicos. As bacias hidrográficas contempladas neste estudo são: Alto Jacuí, Baixo Jacuí, Taquari-Antas, Vacaraí/Vacacaí Mirim, Gravataí, Guaíba, Pardo, Caí e Sinos.

As bacias hidrográficas do Gravataí e do Guaíba, originalmente componentes da Região Hidrográfica do Guaíba, foram excluídas das análises. A primeira delas em função da grande quantidade de canais artificiais alterados por obras estruturais, que acaba por modificar as condições de escoamento naturais. A segunda delas em função de que a bacia do Guaíba é um conjunto de sub-bacias com exutórios distintos, o que não permite a aplicação da metodologia proposta para as outras sete bacias, impossibilitando a realização de índices comparativos.

A escolha do problema de inundação e enxurrada, avaliado sob uma perspectiva de sensoriamento remoto, torna-se pertinente pela necessidade de avaliar riscos a partir de uma abordagem geomorfológica integrada à dinâmica do escoamento pluvial. Para isso, busca-se compreender a relação entre as inundações e enxurradas em algumas áreas associadas à dinâmica das características físicas (dados morfométricos) da bacia hidrográfica.

Para Alves e Castro (2003), a maioria dos trabalhos científicos acerca de bacias hidrográficas analisam os aspectos de forma qualitativa, o que, em geral, é insuficiente para identificar homogeneidades em relação às formas de relevo. Neste sentido, aponta-se a necessidade da aplicação de métodos quantitativos para estudos dessa natureza.

Segundo Villela e Mattos (1975) conhecer as características físicas das bacias hidrográficas, como a área de drenagem, a forma da bacia, o sistema de drenagem e as características do relevo, são de grande utilidade, pois permite determinar a variação espacial dos elementos do regime hidrológico.

Considerando a metodologia utilizada, este trabalho torna-se pertinente diante da problemática recorrente das inundações e enxurradas no Rio Grande do Sul. Entende-se que o desenvolvimento deste trabalho contribui significativamente no

que tange ao planejamento e entendimento da ocorrência destes eventos visando à redução dos prejuízos causados pelos mesmos e podendo servir de base para políticas públicas e trabalhos futuros, sendo importante também para a definição de prioridades e de tomadas de decisão em relação à prevenção destes desastres.

Este trabalho vem, portanto, auxiliar no entendimento das inundações em parte da Região Hidrográfica do Guaíba, no Rio Grande do Sul, e sua espacialização, possibilitando uma redução dos prejuízos decorrentes de tais eventos.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Eventos Extremos

Neste capítulo aborda-se, num contexto nacional e regional, a relevância e abrangência de eventos extremos e suas consequências. Além disso, os conceitos de suscetibilidade, perigo, vulnerabilidade e risco são apresentados buscando a diferenciação dos efeitos oriundos dos eventos naturais.

A atenuação dos efeitos globais gerados pelos eventos extremos, e a consequente adaptação humana a estes acontecimentos, são possivelmente os maiores desafios da humanidade no começo do século XXI. Através do progresso econômico e científico é possível buscar soluções para problemas recorrentes, objetivando um aumento no bem estar da população.

Reckziegel (2007), em seu trabalho sobre Desastres Desencadeados por Eventos Naturais no Estado do Rio Grande do Sul, apontou que no período de 1980 a 2005 foram registrados 1.258 ocorrências de desastres desencadeados por enchentes, sendo que foram homologados 571 Decretos de Situação de Emergência e 42 de Estado de Calamidade Pública.

Os episódios de inundação e alagamento têm poder de destruição do ambiente; por isso busca-se compreender e reduzir sua intensidade e efeitos negativos, além de gerenciar os danos por medidas prioritárias de planejamento.

Eventos extremos são aqueles que possuem baixa frequência de ocorrência e alta magnitude, geralmente com elevado poder de destruição e que acarretam sérios prejuízos para a sociedade. Na esfera do regime fluvial estão sempre associados aos períodos de alta pluviosidade, quando os cursos d'água drenam uma quantidade muito elevada de água (período de cheias) (Oliveira, 2010).

Marengo (2009) define os eventos extremos como grandes desvios de um estado climático moderado que possuem potencial de destruição: chuvas intensas, vendavais e furacões, além de grandes secas. De acordo ainda com o autor, estes eventos possuem como características grande intensidade, baixa frequência e dificuldade de gerenciamento de planos para atenuação dos efeitos em função de dificuldade de previsão destes.

Os conceitos de suscetibilidade, perigo, vulnerabilidade e risco têm significados distintos. Ainda existe na literatura certa confusão sobre esses conceitos que, em parte, estão ligados às atividades a que se destinam essas avaliações, mas também do ponto de vista da formação profissional de quem as está utilizando. Dessa forma buscamos trazer algumas dessas abordagens ao tratar desses temas relacionados a eventos extremos.

O risco é definido pelo Glossário de Defesa Civil (Castro, 1998) como a probabilidade de ocorrência de um acidente, desastre ou evento adverso, relacionado com a intensidade dos danos ou perdas, resultantes dos mesmos. Dessa forma, é uma medida de dano potencial ou de prejuízo econômico, expressa em termos de probabilidade estatística de ocorrência do fenômeno e de intensidade das consequências previsíveis.

O Plano Nacional de Defesa Civil (BRASIL, 2000) apresenta uma conceituação oficial para os termos relacionados ao estudo de áreas de risco, onde se define:

- Desastre: Resultados de eventos adversos, naturais ou provocados pelo homem, sobre um ecossistema vulnerável, causando danos humanos, materiais e ambientais com consequentes prejuízos econômicos e sociais;
- Ameaça: Estimativa de ocorrência e magnitude de um evento adverso, expresso em termos de probabilidade estatística de concretização do evento e da provável magnitude de sua manifestação;
- Vulnerabilidade: Condição intrínseca ao corpo ou sistema receptor que, em interação com a magnitude do evento ou acidente, caracteriza os efeitos adversos, medidos em termos de intensidade dos danos prováveis;
- Dano: Medida que define a intensidade ou severidade da lesão resultante de um acidente ou evento adverso. Se for perdido o controle sobre o risco, pode resultar em perda humana, material ou ambiental, física ou funcional;
- Risco: Medida de danos ou prejuízos potenciais, expressa em termos de probabilidade estatística de ocorrência e de intensidade ou grandezas das consequências previsíveis.

A conceituação adotada pela UN-ISDR (2009) considera desastre como uma grave perturbação do funcionamento de uma comunidade ou de uma sociedade

envolvendo perdas humanas, materiais, econômicas ou ambientais de grande extensão, cujos impactos excedem a capacidade da comunidade ou da sociedade afetada de arcar com seus próprios recursos.

Segundo Castro (1998) os desastres são quantificados em função da intensidade dos danos e prejuízos, enquanto que os eventos adversos são quantificados em termos de magnitude. Dessa forma, a intensidade de um desastre depende da interação entre a magnitude do evento adverso e o grau de vulnerabilidade do sistema afetado.

A partir destas considerações, define-se desastre como a ocorrência de um fenômeno natural, geralmente extremo, em uma área com ocupação humana, causando danos e prejuízos sociais e/ou econômicos. A ocorrência do desastre relaciona-se, dessa forma, diretamente com a ocorrência de danos à estrutura econômica e social decorrentes de eventos naturais.

Eventos com potencial de causar consequências desagradáveis são considerados "eventos adversos", também denominados perigo/*hazard* (IPT, 2004).

Augusto Filho (2001) diferencia os termos perigo e risco, correlacionando-os aos seus correspondentes da língua inglesa, onde perigo (*hazard*) é tomado como "ameaça potencial à pessoas ou bens" e risco (*risk*) expressa o perigo em termos de danos/por período de tempo, em geral à unidade monetária/ano.

Castro et al. (2005) associa perigo à noção intrínseca do evento/processo ocorrer, enquanto o risco está definido a partir de uma escala de probabilidades e graus de aceitabilidade de ocorrência, a fim de classificar os níveis de risco maiores e menores.

O risco pode ser definido como o mais sofisticado nível de avaliação de perigos, através de dois componentes mensuráveis: a magnitude do prejuízo (definida pela vulnerabilidade) e a probabilidade do prejuízo. Cerri (1993), através da sistematização apresentada no organograma a seguir (Figura 1) define as enchentes e inundações como risco ambiental natural físico hidrológico:

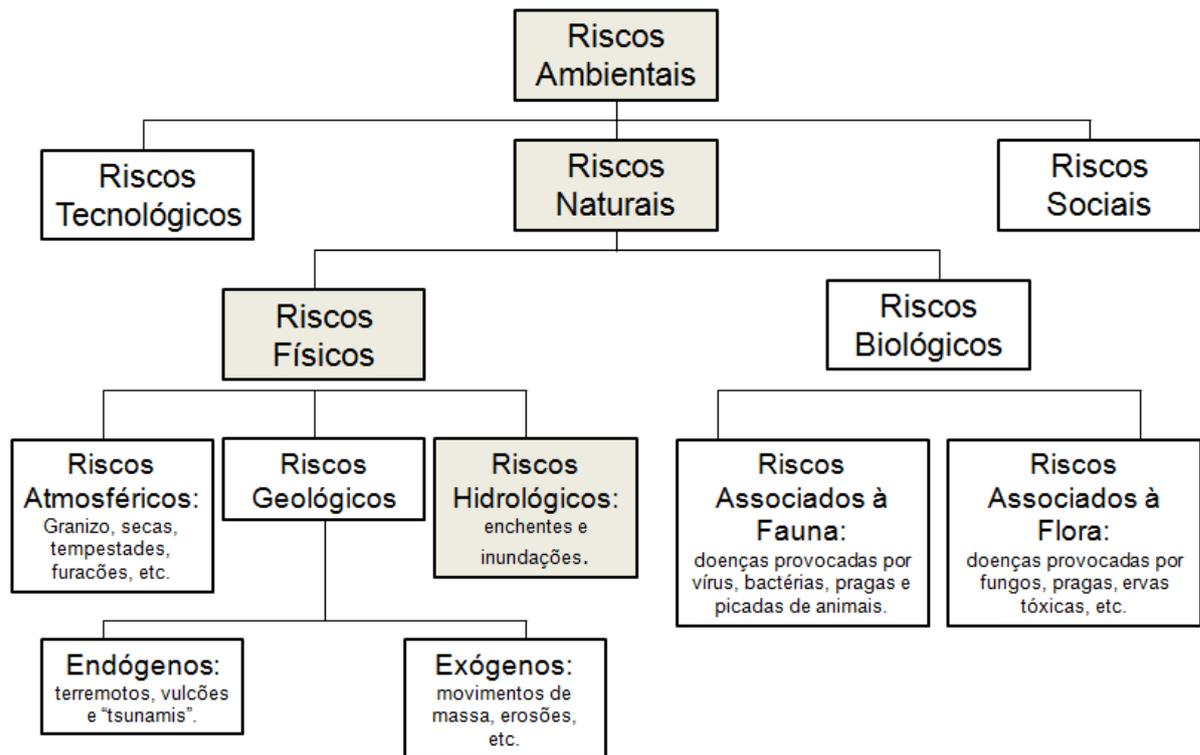


Figura 1 - Sistematização dos tipos de risco a partir do processo causador.

Fonte: Cerri (1993).

A Defesa Civil (Castro, 1998) classifica os danos causados por um desastre em três grupos: humanos, materiais e ambientais. Os danos humanos são medidos em relação ao número de afetados pelo evento, sejam desalojados, desabrigados, desaparecidos, feridos ou mortos. Os danos materiais correspondem ao número de prédios, edificações e instalações que sofrem algum tipo de dano ou destruição e são medidos em função do valor estimado para a reconstrução ou recuperação do mesmo. Os danos ambientais são medidos quantitativamente em função do volume de recursos financeiros destinados à recuperação do dano ambiental. Esses danos são estimados em população atingida, contaminação do ar, da água ou do solo, degradação ou perda de área de agricultura, desmatamento, queimada e risco de redução de biodiversidade de fauna e flora.

A atividade humana pode alterar os processos de dinâmica superficial, como é o caso dos processos erosivos acelerados e das alterações no escoamento superficial, especialmente nas áreas urbanas, potencializando a ocorrência de processos causadores de risco (Reckziegel e Robaina, 2005). Outro fator agravante é o expressivo aumento da superfície impermeabilizada nas cidades, ocasionando maior frequência e intensidade das inundações, e conseqüente incremento nos

danos à população. Alterações na cobertura vegetal das áreas rurais que acarretam a modificação da dinâmica hídrica também são apontadas como responsáveis pelos desastres.

Augusto Filho et al. (1990) apresentam uma proposta de classificação, baseada na origem, em que os riscos são divididos em atmosféricos, quando relacionados aos processos originados de agentes atuantes na atmosfera; e geológicos, quando associados a processos originados na astenosfera e hidrosfera. Os riscos geológicos são ainda divididos em endógenos e exógenos, dependendo da dinâmica a que estão relacionados, se interna ou externa. As enchentes são, portanto, classificadas como processos geológicos exógenos.

Jonkman & Kelman (2005) examinou um grande número de dados de eventos de enxurrada em cada continente, numa série temporal de Janeiro de 1975 a Junho de 2002, mostrando que estes eventos causaram aproximadamente 1550 ocorrências por ano. Além disso, o estudo mostrou que o maior índice de mortalidade (sendo esta a razão entre o número de mortos e o número de pessoas afetadas) é das enxurradas, dentre todos os eventos extremos.

O preço do espaço é a expressão de seu valor e o valor o torna mercadoria, sujeita à especulação imobiliária. As áreas desvalorizadas do espaço urbano são as ambientalmente mais frágeis à ocupação e susceptíveis ao desenvolvimento de processos de dinâmica superficial desencadeadores de risco. Estas áreas estão comumente localizadas em encostas e em margens de arroios e são ocupadas pela parcela da população de menor poder aquisitivo que, desfavorecida pelo processo de reprodução do capital, é obrigada a se estabelecer em áreas desprovidas de condições básicas de infraestrutura e saneamento (Reckziegel e Robaina, 2005).

Os alagamentos são, portanto, resultado de um processo de crescimento rápido e não planejado das áreas urbanas, que resulta em modificações e desestabilização dos processos naturais. No que tange aos eventos relacionados inundações e enxurradas, é necessário destacar a relação com ocupações de cidades ribeirinhas.

O aumento no número de estudos relacionando desastres naturais ao número de vítimas fatais deve-se ao acelerado crescimento urbano, à ocupação desordenada em áreas impróprias à urbanização, além das alterações feitas no meio natural, como rede de drenagem e conformação do relevo.

De acordo com Tucci e Clarke (1997) existem duas maneiras de se controlar as inundações. A primeira delas, através de medidas estruturais com obras que gerenciem o escoamento da água. A segunda, com medidas não estruturais, através de modelagens, de mapeamentos, de previsões e de planejamentos associados a tais eventos. Com este panorama busca-se desenvolver uma ferramenta de gestão, com foco na redução dos impactos sobre o bem-estar da população. Certamente os investimentos em planejamento apresentam-se insuficientes num comparativo à expansão urbana.

De acordo com Sausen & Narvaes (2013) a maioria dos órgãos e instituições envolvidas com desastres naturais, tem observado que o dano causado pelos eventos extremos muitas vezes poderia ser prevenido, reduzido ou minimizado, se a população em geral, os tomadores de decisão, os formadores de políticas e de opinião, bem como os educadores tivessem a correta noção do que são estes eventos.

Em esfera nacional, foi instituída em abril de 2012b, pelo Ministério da Integração Nacional, a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil, que apresenta como cláusulas:

- A integração das políticas de desenvolvimento urbano, saúde, meio ambiente, ordenamento territorial, mudanças climáticas, gestão de recursos hídricos, geologia, infraestrutura, educação, ciência e tecnologia e às demais políticas setoriais, tendo em vista a promoção do desenvolvimento sustentável.
- Elaboração e implantação dos Planos de Proteção e Defesa Civil nos três níveis de governo, estabelecendo metas de curto, médio e longo prazo;
- Sistema nacional de informações e monitoramento de desastres;
- Profissionalização e qualificação, em caráter permanente, dos agentes de proteção e defesa;
- Cadastro nacional de municípios com áreas suscetíveis à ocorrência de deslizamentos de grande impacto, inundações bruscas ou processos geológicos e hidrológicos correlatos;
- Inclusão, nos currículos do ensino fundamental e médio, dos princípios da proteção e da defesa civil, e a educação ambiental, entre outras.

Outro marco institucional importante foi o lançamento do Plano Nacional de Gestão de Riscos e Respostas a Desastres Naturais (2012), com previsão de aplicação de cerca de 19 bilhões de reais em estados e municípios para o estabelecimento das seguintes ações:

- Prevenção, através da execução de obras estruturantes;
- Mapeamento de áreas de risco;
- Monitoramento e Alerta, através da estruturação da rede nacional;
- Socorro, Assistência e Reconstrução.

Os impactos de diferentes condições em termos de vulnerabilidade são decisivos na realização da análise e monitoramento dos eventos. As inundações, alagamentos e deslizamentos são consequências da persistência e da intensidade de episódios de chuvas. Os alagamentos estão entre as catástrofes naturais que causam mais danos ao patrimônio e à saúde da população, elevando índices de infecções transmitidas pela água, causando eventualmente episódios de morte.

Sendo suscetibilidade o termo associado às condições do meio físico e seu potencial de ocorrência ao evento. Perigo remete às condições de possibilidade e periodicidade, sendo este um fator multiplicador, em relação ao evento. Vulnerabilidade é a variável que está associada à presença humana e seu tipo de ocupação na área analisada, está associada ao dano causado. O risco é, portanto a probabilidade de perdas e danos sociais e materiais como resultado da interação das condições de suscetibilidade, vulnerabilidade e perigo, e deve ser mensurado na esfera financeira.

2.2 Inundação e Enxurrada

A inundação apresenta-se como um dos principais eventos associados à geomorfologia conhecido da natureza. Situações onde a descarga do rio excede a capacidade do canal, extravasando as margens e alagando as regiões adjacentes, são responsáveis pela sua ocorrência.

As inundações e enxurradas são originadas por eventos climáticos extremos e constituem-se em fenômenos de ocorrência natural e periódica em todos os

ambientes fluviais (Castro, 1998; Oliveira, 2010; Marengo, 2010, Brubacher et al., 2012, Reis et al. 2012). São fenômenos naturais, em função de episódios de precipitação intensa e/ou por períodos prolongados.

De forma natural, as várzeas (margens dos rios) fazem o controle da dinâmica da água onde os solos ribeirinhos são preparados para as inundações da época de cheia, percolando boa parte da água que transborda e utilizando seus nutrientes. Os eventos de enchente decorrem do fato de que algumas destas regiões sofreram processos de urbanização, onde os arredores foram impermeabilizados, o que aumenta o volume de água a ser escoado pelo corpo hídrico. No Brasil a ocorrência de desastres naturais decorre, principalmente, deste tipo de alteração do meio ambiente.

Apesar da ocorrência destes fenômenos ser natural, diversos estudos corroboram a afirmação do aumento da frequência na qual os eventos de inundação ocorrem (Alcántara-Ayala, 2002; Kobiyama et al., 2004), causando impactos negativos na sociedade e seus prejuízos aumentados (Brubacher et al., 2012).

A fim de adaptar o meio ambiente às necessidades de ocupação o homem vem realizando alterações no meio físico, moldando-o às novas demandas e usos. Estas mudanças afetam o equilíbrio do sistema natural, elevando o potencial de risco para estas áreas.

A inundação é consequência de vários fatores que interferem na forma como a bacia hidrográfica escoar seu conteúdo hídrico e sedimentar. Toda a área a montante de uma bacia contribui com o seu volume de água na seção transversal de um rio. Os fatores naturais envolvidos nesse processo são a topografia e a natureza da drenagem à montante. As altas declividades dos cursos d'água reduzem o tempo de concentração, tempo entre o início da chuva e a ocorrência da vazão máxima em uma seção do rio, das bacias às precipitações, gerando maior vazão à jusante. Quanto maior a declividade maior a velocidade e, portanto, maior poder de destruição.

A capacidade de escoamento de um rio, ou seja, a vazão que pode escoar depende área da seção transversal, da declividade do rio, do perímetro da seção e da rugosidade do leito do rio e das margens deste. Alterações nessas características alteram o fluxo da água. Para uma mesma variação de vazão, a elevação do nível da água vai ser mais ou menos importante. Vai depender das condições físicas do curso de água, como a declividade do canal e material do leito e das margens do rio.

Trabalhos de Braud et al. (2010) e Rozalis et al. (2010), realizados na Europa, apontam a importância fundamental de relacionar os eventos com o tipo de solo e com as condições de umidade do mesmo, visto que chuvas recentes e recorrentes apresentam-se como fatores decisivos no desencadeamento destes eventos, classificando os solos como seco, encharcado ou úmido.

Tanto nas áreas montanhosas como nas áreas de colinas rebaixadas, a rugosidade topográfica permite a distinção de áreas que drenam fluxos líquidos, sólidos e solúveis para uma saída comum através de um canal ou de uma rede de canais, denominada bacia de drenagem ou bacia hidrográfica. Elas constituem uma unidade geomorfológica fundamental, onde os impulsos das chuvas acionam os processos hidrológicos e erosivos que regulam as transformações morfológicas e a evolução interna da bacia (Chorley, 1962).

Castro (2003) classifica os tipos de fluxo de acordo com seu padrão evolutivo. Divididas em inundação ou inundação gradual (adaptado para inundação, de acordo com a nomenclatura sugerida pela Defesa Civil), e inundação brusca (adaptado para enxurrada), na figura 2. As inundações são os episódios onde a água eleva-se de forma lenta e previsível, mantendo-se em situação de cheia por algum tempo, e escoando gradualmente.

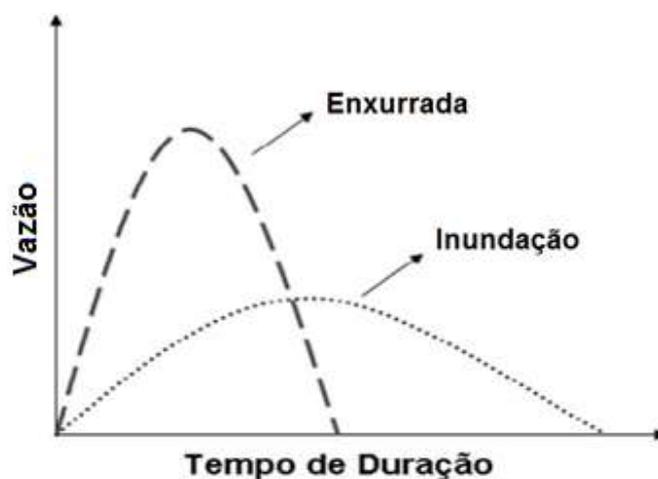


Figura 2 - Gráfico da dinâmica de escoamento de enxurradas e inundações.

Fonte: Adaptado de Kobiyama et. al (2006).

As enxurradas são provocadas por chuvas intensas e concentradas e produzem súbitas e violentas elevações dos níveis hídricos, escoando de forma rápida e intensa. Esta elevação das águas ocorre repentinamente, potencialmente

causando mortes. Muitas vezes ocorrem associadas a áreas mais íngremes e em bacias de pequeno e médio porte, no momento que a inclinação do terreno favorece e intensifica a velocidade de escoamento da água.

A convivência com os efeitos causados pelos fenômenos de cheias periódicas e graduais depende da previsibilidade de sua ocorrência, de modo a reduzir os danos recorrentes, ocorrendo catástrofes apenas em inundações excepcionais ou em função de vulnerabilidades culturais. Já as enxurradas possuem pico agudo, com crescimento e diminuição dos níveis d'água muito rápidos, com surpreendente violência, que causa danos materiais e humanos.

Tucci (2005) diferencia inundações de áreas ribeirinhas e inundações devido à urbanização. Onde das áreas ribeirinhas são naturais e ocorrem no leito maior do rio, devido à variabilidade temporal e espacial da precipitação e do escoamento na bacia hidrográfica. As inundações devido à urbanização são as que ocorrem na drenagem urbana, em consequência da impermeabilização do solo, canalização do escoamento ou da obstrução ao escoamento.

Outra proposta de classificação (IPT, 2004) considera apenas os processos hidrológicos que atuam na calha principal do rio, e divide em duas categorias: enchentes ou cheias e inundação (Figura 3). A enchente é a elevação temporária do nível da água em um canal de drenagem devido ao aumento da vazão ou descarga. Já a inundação consiste no extravasamento das águas do canal de drenagem para áreas marginais, atingindo a cota acima do nível máximo da calha principal do rio.



Figura 3 - Classificação dos processos hidrológicos de enchente e inundação.

Fonte: Adaptado de <http://arquiteturaelugar.com/>.

Tucci (1995) aponta que os efeitos principais da urbanização são o aumento da vazão máxima, a antecipação do pico e o aumento do volume do escoamento

superficial. A figura 4 apresenta o hidrograma típico de uma bacia natural e o resultante da urbanização:

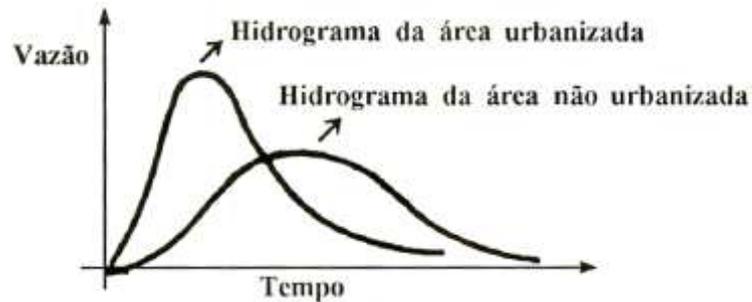


Figura 4 - Hidrograma relacionado à vazão de áreas urbanizadas e não urbanizadas.

Fonte: Cerri (1999).

Christofolletti (1981) associa geomorfologicamente a ocorrência das inundações à planícies de inundação, que é a faixa do vale fluvial composta por sedimentos aluviais, bordejando o curso da água, e periodicamente inundada pelas águas de transbordamento provenientes dos rios. Para Christofolletti (1980) os leitos fluviais são os espaços que podem ser ocupados pelo escoamento das águas no que tange o perfil transversal das planícies de inundação, separados em três tipos: leito de vazante, leito menor e leito maior periódico ou sazonal, figura 5.

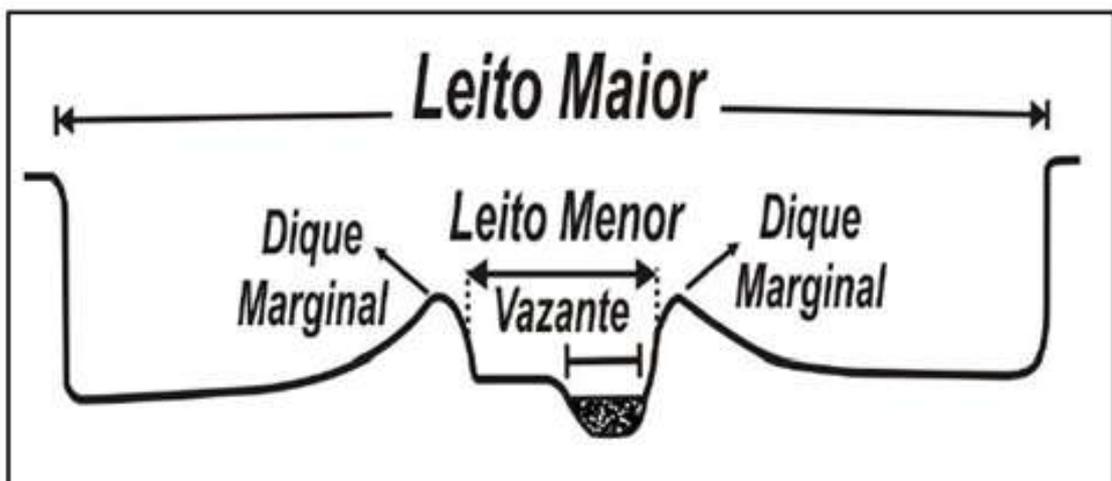


Figura 5 - Perfil transversal representativo de uma planície de inundação.

Fonte: Christofolletti (1994).

Tucci (1995) destaca que as bacias de pequeno porte apresentam maior ocorrência de enchentes potencializadas pela urbanização, embora haja exceções de casos em que a urbanização incrementa as enchentes em grandes bacias.

Marcelino et al. (2004) espacializaram e quantificaram os episódios de enxurradas no estado de Santa Catarina. Apontam que nos meses de janeiro e fevereiro observa-se uma súbita elevação na frequência de ocorrência, em função do calor associado aos altos índices de umidade, resultando em pancadas de chuva conhecidas como chuvas de verão, fortes, localizadas e de curta duração.

Oliveira (2010) realizou um estudo cujo objetivo foi espacializar e analisar as inundações na bacia hidrográfica do rio Caí (RS), a partir de séries históricas de cotas fluviométricas e modelos digitais de elevação (MDE). Faz essa análise comparando dois MDE, um a partir dos dados das cartas da DSG e o outro a partir de dados SRTM/TOPODATA. A interpretação das variáveis morfométricas, derivadas desses modelos, permitiu elaborar um mapa de referência de limites para inundações. Observou que, de modo geral, os modelos superestimaram as áreas atingidas, mas representaram satisfatoriamente os locais de maior avanço das águas.

Oliveira et al. (2012) desenvolveram um trabalho demonstrando ser possível estabelecer um conjunto de limiares de chuva capaz de identificar com boa precisão os eventos extremos com potencial à ocorrência de desastre.

Neste trabalho será utilizado o conceito sugerido pela Defesa Civil, denominado Classificação e Codificação Brasileira de Desastres (COBRADE, 2012), Anexo I, onde as inundações referem-se a "submersão de áreas fora dos limites normais de um curso de água em zonas que normalmente não se encontram submersas. O transbordamento ocorre de um modo gradual, geralmente ocasionado por chuvas prolongadas em áreas de planície". Já o conceito de enxurrada refere-se ao "escoamento superficial de alta velocidade e energia, provocado por chuvas intensas e concentradas, normalmente em pequenas bacias de relevo acidentado. Caracterizado pela elevação súbita das vazões de determinada drenagem e transbordamento brusco da calha fluvial. Apresenta grande poder destrutivo".

2.3 Sensoriamento Remoto e Dados SRTM

Sausen et al. (2009) apontam para a importância das geotecnologias, representadas principalmente pelas imagens de satélite, softwares de geoprocessamento e dados de GPS, que progredem rapidamente. A disponibilidade destas com diferentes resoluções espaciais, espectrais e temporais possibilita facilmente uma adaptação a diversos objetos de estudo.

O desconhecimento das potencialidades das geotecnologias para a gestão, prevenção e mitigação dos desastres naturais evidencia a relevância deste estudo, possibilitando enfrentar com mais segurança e informação os desastres naturais e eventos extremos recorrentes.

Esta observação pode contribuir para a melhoria da gestão dos episódios de inundação e enxurrada. Informações desta natureza são fontes valiosas para o mapeamento destas, para a previsão da mesma e até mesmo para mitigar as consequências do evento e avaliar os danos.

Muitos trabalhos vêm sendo desenvolvidos, testando metodologias para estimar vazão e transporte de sedimentos, para compreender a evolução dos padrões de drenagem e para delimitar áreas com susceptibilidade à inundação. Florenzano et al. (1988), Oliveira (2007), Oliveira e Guasselli (2008) e Perini et al. (2013) utilizam bases digitais com informações altimétricas para realizar mapeamentos da susceptibilidade de inundações em bacias hidrográficas e a extração de dados morfométricos.

A adoção dos métodos tradicionais de levantamento apresenta demora e custo muito alto para a utilização dos métodos paramétricos. No entanto, alternativas como imageamento orbital e geoprocessamento podem reduzir substancialmente estes custos, senão com a mesma qualidade dos métodos tradicionais, ao menos com um grau aceitável de concordância com aqueles (Dent & Young, 1981).

Grandezas que variam continuamente no espaço podem ser representadas graficamente através de um Modelo Numérico de Terreno (MNT). O uso de MNT's como modelos digitais de elevação (MDE's) na delimitação de bacias apresenta-se como a forma mais rápida, prática e menos subjetivas. Atualmente estão disponíveis na Internet os produtos SRTM, das fontes USGS e TOPODATA, além do produto ASTER.

Araújo et al. (2009) apontam que as novas tecnologias e produtos orbitais, como por exemplo, as imagens de Radar SRTM, possibilitam um levantamento mais rápido e detalhado de bacias hidrográficas.

Os Modelos Digitais Numéricos (MDN) podem apresentar-se de duas maneiras distintas (Figura 6) no que se refere à altimetria: os Modelos Digitais de Elevação (MDE) e os Modelos Digitais de Terreno (MDT). O SRTM representa MDE.

Os MDT devem ser reservados para os casos onde o modelo é produzido a partir de valores de altitude do nível do solo, obtidos, por exemplo, em mapas topográficos (curvas de nível), levantamento por GPS, ou por altimetria a laser.



Figura 6 - Diferenças da representação do MDE e do MDT.

A missão SRTM foi realizada para adquirir dados de altimetria de todo o globo terrestre a partir de sensores ativos (radar). Utilizou o instrumento SIR-C/X-SAR, a bordo do Ônibus Espacial Endeavour, com um arranjo projetado para coletar medidas tridimensionais da superfície terrestre através de interferometria por radar. A operação projetada e financiada pela Agência Espacial Americana (NASA), Agência Americana de Inteligência Aeroespacial (NGA), em colaboração com a Agência Espacial Italiana (ASI) e o Centro Aeroespacial Alemão (DLR).

Para tanto a nave foi munida de um mastro de 60m (*linha base*), em cujas extremidades foram instaladas antenas para as bandas C e X, conforme a figura 7 ilustra.

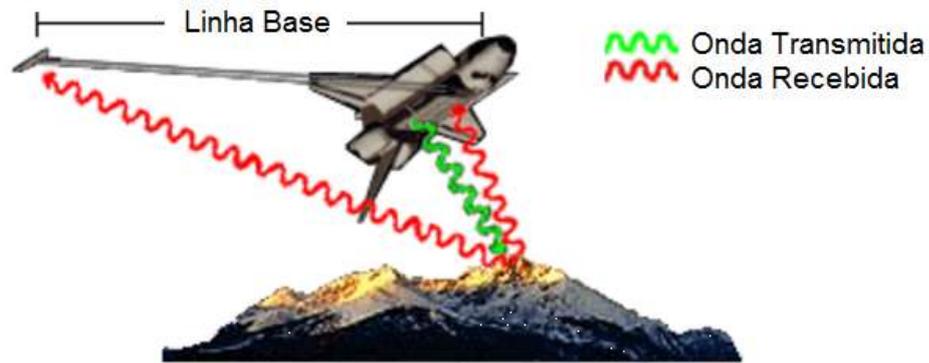


Figura 7 - Interferometria por radar: ondas de RADAS transmitidas e recebidas.

Fonte: Adaptado de NASA (2006).

O sobrevoo da SRTM ocorreu no período de 11 a 22 de fevereiro de 2000, percorrendo 16 órbitas por dia, num total de 176 órbitas. Foram coletados e processados 12TB para a formação dos Modelos Digitais de Elevação (MDE).

A elaboração do MDE foi realizada a partir do processamento dos dados continente a continente, e distribuídos pela NASA através da USGS (United States Geological Survey). A cobertura abrange 80% da área terrestre do planeta, entre latitudes 60°N e 60°S. A resolução original do mapeamento gerado é de 30 metros; porém, para a América do Sul a NASA disponibiliza os dados com resolução de 90 metros.

Para o georreferenciamento do mapeamento foram distribuídos refletores com coordenadas precisamente definidas, para a geração de uma rede de pontos de controle. O *datum* e o elipsóide de referência são WGS84, em coordenadas geográficas decimais.

As Imagens SRTM para o território do Brasil foram tratadas pela Embrapa, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, e disponibilizadas gratuitamente na internet, apresentadas com resolução espacial de 3 arcos de segundo (~90m) e resolução vertical de 1m. Valeriano (2008) aponta que toda a aquisição do SRTM foi planejada para oferecer suporte a mapeamentos em escalas entre 1:100.000 e 1:250.000.

Os modelos digitais de elevação são malhas de pontos georreferenciados onde cada pixel apresenta a informação altimétrica de onde ele está localizado, ou seja, além das coordenadas X e Y tradicionais associadas à localização geográfica do ponto, apresenta uma variável Z correspondente ao dado de elevação, representado na seguinte equação bijetora:

$$Z = f(X, Y)$$

Onde os parâmetros da equação são: X, Y: coordenadas geográficas do ponto.
Z: altura do ponto.

As formas tradicionais de utilização destes dados contemplam mapeamentos temáticos, sistemas de navegação aéreo e terrestre, planejamento de voo 3D e simulações, mapeamento de escoamento superficial, sistemas inteligentes de transportes, ortorretificação de imagens aéreas/satélite e modelagens do fluxo de água ou movimento de massa. Seu formato mais comum é *raster*, podendo também se apresentar em vetores ou pontos cotados.

Outro aspecto relevante no que diz respeito aos modelos digitais de elevação é a precisão e a exatidão. A primeira diz respeito ao grau de variação entre os resultados medidos, e o segundo diz respeito à conformidade com o valor real do terreno. Portanto o tamanho do pixel (resolução) não é a informação mais importante em relação ao modelo e sim a precisão.

A influência da vegetação na captação dos dados digitais de elevação é comumente chamada de "efeito dossel", problemática ilustrada por Valeriano et al. (2006) ao trabalhar com a região amazônica e por Guasselli e Evers (2012) ao analisar o padrão de relevo associado aos areasis.

A informação mais relevante para a qualidade do dado corresponde ao que se denomina *grid de resolução*, sendo este a distância entre cada ponto com informação altimétrica. Esta informação é muitas vezes confundida com resolução espacial de maneira equivocada, visto que o dado pode ser reamostrado para a escala desejada sem incremento/perda de informação, ou seja, o *grid* de espaçamento continuará sendo o mesmo.

A figura 8 mostra o resultado de uma reamostragem do modelo SRTM, de 90m para 4m, além de um comparativo com um modelo digital de elevação GEOElevation4, onde o *grid* de resolução apresenta 4m.

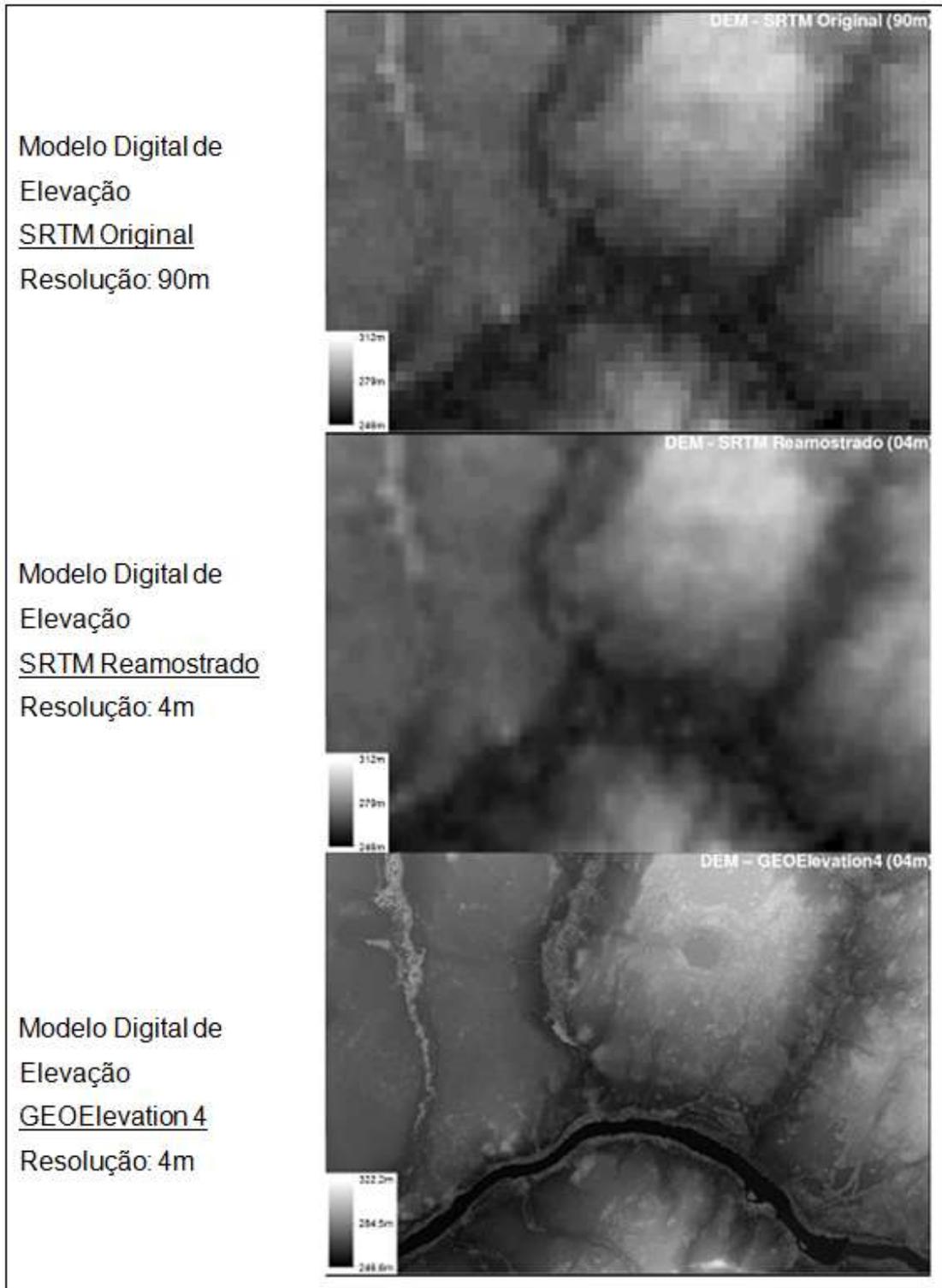


Figura 8 - Imagens de MDE com diferentes resoluções espaciais.

Fonte: Adaptado de Astrium (20013).

A figura 9 mostra, comparativamente, a qualidade dos dados de imagens com diferentes *grids* de resolução. Imagens de SRTM 3" (90m), o SRTM 1' (30m) e a imagem WorldDEM 0,4".

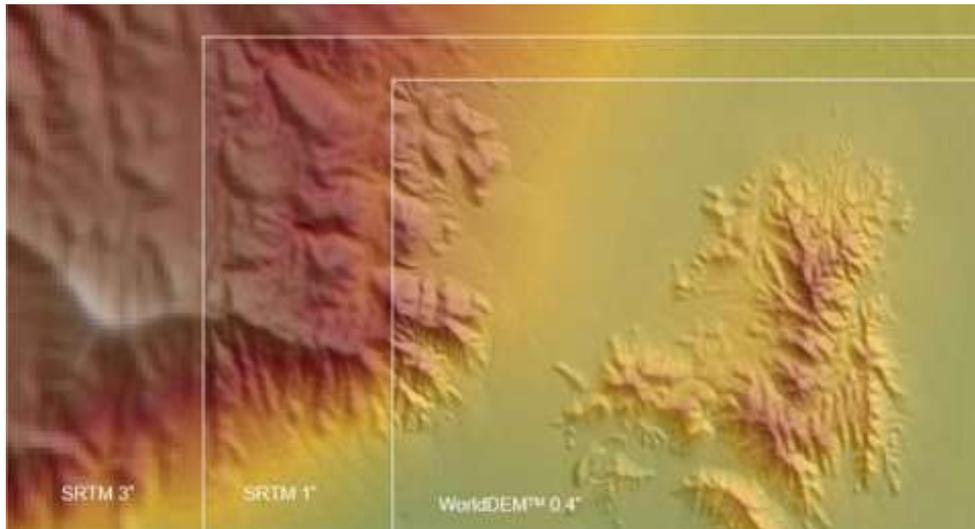


Figura 9 - Comparação entre MDE's com *grids* de diferentes resoluções.

Fonte: Astrium (2013).

No estudo e monitoramento de inundações um grande problema para obtenção de imagens a partir de sensores óticos orbitais é a cobertura de nuvens, visto que a presença delas ocasiona chuva, e conseqüentemente os eventos em questão. A solução para este problema está na utilização de dados geradas por sensores que operam na região do espectro eletromagnético das micro-ondas (Figura 10).

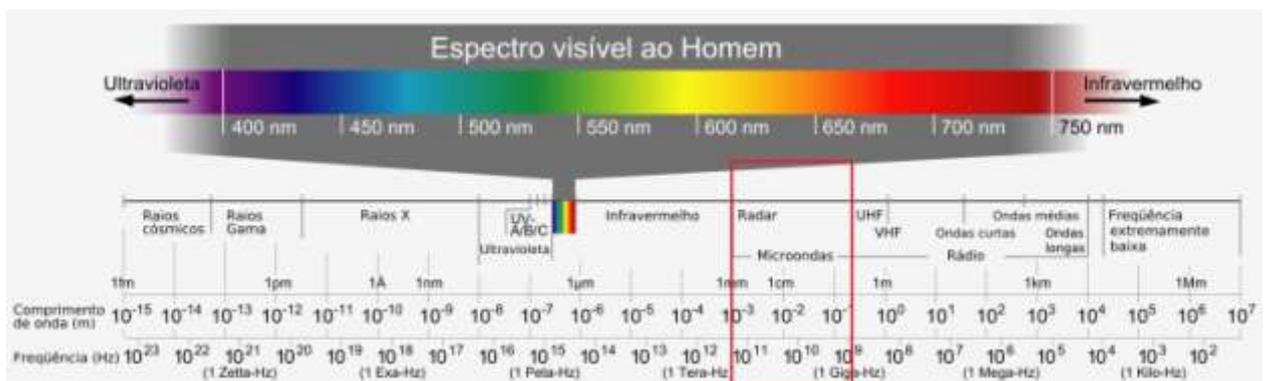


Figura 10 - Faixa de atuação do micro-ondas (RADAR).

Fonte: Sausen e Narvaes (2013).

A utilização de imagens de radar para o mapeamento de inundações apresenta-se como uma boa alternativa para a problemática da nebulosidade das imagens de satélite. Aponta, porém, que o uso de imagens de radar em detrimento das óticas, embora apresente bons resultados do ponto de vista do mapeamento estático de um determinado evento, não permite o monitoramento dinâmico do

regime fluvial, aspecto muito importante para a elaboração de medidas de previsão de inundações.

As fontes para a geração de modelos digitais de elevação mais tradicionalmente utilizadas são cartas topográficas, informações digitais de campo, pontos de GPS, pares estéreos de fotografias aéreas ou de satélite, laser scanner e interferometria SAR (*Synthetic Aperture Radar*). O resultado das técnicas empregadas na missão SRTM é a geração de Modelos Digitais de Elevação (MDE's), pois os sinais de radar são retransmitidos, por exemplo, pelo dossel das árvores, em áreas densamente florestadas e não pelo terreno subjacente.

Sausen e Narvaes (2013) explicam que desde o advento das primeiras imagens de radar, por questões militares de defesa, a sua região de atuação foi particionada por bandas, sendo que as utilizadas para fins comerciais são, por ordem de comprimento de onda, usualmente medidas em centímetros, as bandas X (2,4 cm - 3,75 cm), C (3,75 cm - 7,5 cm), L (15 cm – 30 cm) e P (77 cm – 136 cm). Além disto, as imagens são adquiridas seguindo o conceito de polarização, pois a onda eletromagnética emitida verticalmente pelo sistema sensor (emissão vertical - V), pode ser registrada em sua antena, tanto na forma vertical (polarização VV), quanto na forma horizontal (polarização VH). O mesmo conceito se aplica para a emissão e recepção horizontal (polarização HH).

Os sensores de radar possuem ainda o diferencial em relação aos sensores ópticos, que é uma geometria de observação (imageamento) de visada lateral, enquanto que no segundo as imagens são adquiridas próximas ao nadir. Esta característica se traduz em uma ampla gama de configurações, denominados como modos de aquisição, sendo que sua variação implica em diferentes faixas de imageamento (dimensão das imagens) e variação de ângulos de incidência.

O ângulo de incidência é conceituado por Jensen (2000), como o melhor descritor da relação entre o feixe de radar e a inclinação da superfície. Este ângulo varia de acordo com a largura da faixa de imageamento, sendo que sua variação é responsável pelo maior ou menor retorno da onda a antena do radar (intensidade do sinal – brilho). Todavia, isto não se traduz em perda de informação para o monitoramento de inundações, pois as superfícies inundadas e sem ondas “aparecem” na imagem como objetos escuros, devido à reflexão denominada como especular (Sausen & Narvaes, 2013).

Em rios providos de matas ciliares, estudos com imagens SRTM apresentam dificuldades de localização exata dos rios. Isso acontece em função de que os dados topográficos advindos de sensores remotos podem expressar objetos não topográficos, como árvores, edificações e antenas (Valeriano 2004, 2008).

Valeriano (2002) avaliou modelos com base na visualização de transectos, histogramas da altitude e da declividade, além de um processo que realça feições da hidrologia superficial, baseado em canais de drenagem, divisores de água e orientação das vertentes.

Aplicações estritamente dependentes diretamente dos níveis altimétricos dos divisores de água e dos canais de drenagem (como cenários de inundação, por exemplo) poderiam ser melhor supridas por modelos elaborados com interpolação linear ou outros, desde que preservem as cotas altimétricas originais (Valeriano, 2004).

Oliveira (2010) diz que mesmo com algumas limitações, os dados SRTM constituem-se num conjunto de informações altimétricas de considerável importância, tendo em vista sua ampla utilização no ambiente científico e sua fácil e rápida manipulação.

Andrades Filho et al. (2009) realizaram um estudo para averiguar a conformidade entre as drenagens extraídas automaticamente a partir dos dados SRTM da USGS, EMBRAPA e do Projeto TOPODATA; dos produtos ASTER e da drenagem da carta topográfica de Aquiduaana. Através de procedimentos de intersecção, sobreposição e obtenção de dados de densidade e análises estatísticas. Tais fontes disponibilizam os dados como produtos de diferentes processamentos digitais, o que possibilita uma apresentação das informações finais extraídas com diferenças significativas. O maior valor de conformidade ocorre entre os dados TOPODATA e USGS, e os valores mais baixos entre os dados ASTER e EMBRAPA.

Os dados SRTM foram utilizados por Barros e Cruz (2007) para análise da sua eficiência, onde foi comprovado que se enquadram adequadamente na acurácia indicada pelo PEC (Padrão de Exatidão Cartográfica) para a escala 1:100.000.

Grohmann et al. (2008) avaliaram a eficácia da utilização de dados SRTM na análise geomorfológica. Florenzano et al. (1988), Saldanha et al. (1996), Oliveira (2007), Oliveira e Guasselli (2008) Perini et al. (2013), Bangira (2013) utilizam bases

digitais com informações altimétricas para realizar mapeamentos da susceptibilidade de inundações em bacias hidrográficas e a extração de dados morfométricos.

Perini et. al. (2013) faz um comparativo da variável declividade entre diferentes MDE. Na Figura 11 observa-se a diferença expressiva de declividade nas duas imagens. O mapa de declividades obtido pelo TOPODATA (Figura 12b) tem melhor visualização de drenagem e a declividade mais suavizada em toda a área (mais acentuada na parte oeste e central do mapa). Já o mapa a partir de imagem ASTER GDEM (Figura 11a) mostra maior detalhamento da declividade mais acentuada em toda a área. Entretanto não é possível visualizar as drenagens com a mesma facilidade que na imagem TOPODATA (Figura 11b).

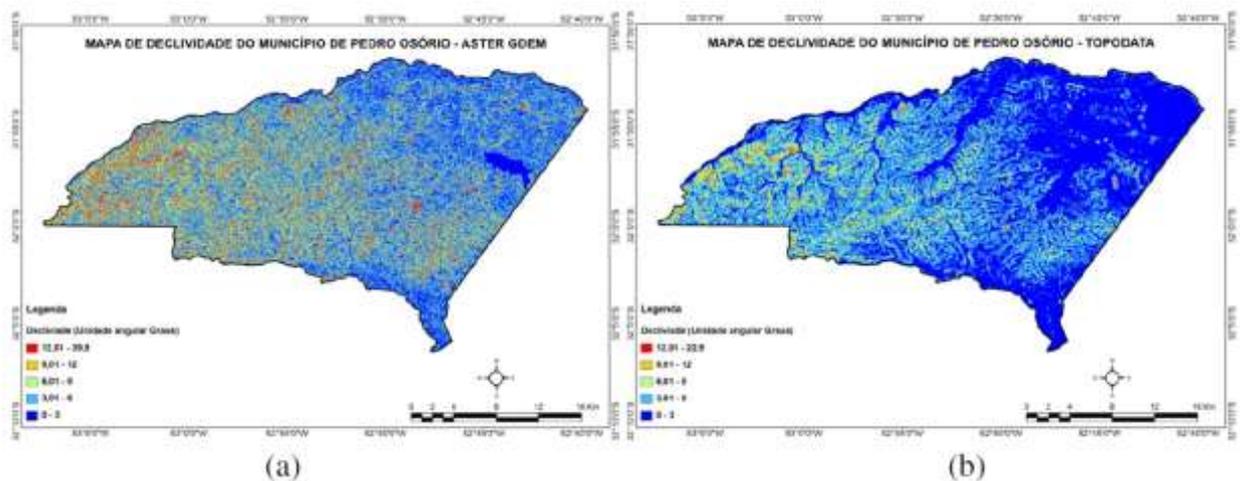


Figura 11 - Mapas das diferentes faixas de declividade da área territorial do município de Pedro Osório/RS pelos MDE's ASTER (a) e TOPODATA (b). Fonte: Perini et al., 2013.

Trentin et al. (2008) avaliaram a ocorrência de enchentes para o ano de 2007 na área de abrangência do Rio Jacuí (RS) e sua relação com a altimetria e declividade do terreno. Como resultado foi gerado um mapa, a partir do MDE, onde foi possível identificar áreas suscetíveis à ocorrência de inundação.

2.4 Morfometria das Bacias Hidrográficas

A análise morfométrica de bacias é definida pelo IBGE (2009) como o conjunto de procedimentos metodológicos que buscam a investigação e a compreensão dos componentes naturais de uma bacia hidrográfica. Os estudos relacionados aos

corpos fluviais através de parâmetros quantitativos levam ao esclarecimento de questões de gênese e dinâmica da paisagem, tendo em vista que a rede de drenagem assume papel de destaque na compartimentação do relevo. O emprego destes métodos em geomorfologia não constitui uma novidade, porém Christofolletti (1980) justifica que "devido à complexidade das variáveis implicadas no estudo geomorfológico, o conhecimento atual ainda não está em condições de propor modelos determinísticos para os fenômenos a serem atualizados. Os modelos apresentados, em sua grande maioria, são conceituais ou matemáticos, mas o desenvolvimento da experimentação, da observação e do conhecimento teórico, propicia, paulatinamente, oportunidades e fundamentos para a análise global dos problemas geomorfológicos".

A água tem um papel de ligar fenômenos atmosféricos e a litosfera, interferindo em todas as formas de vida da Terra, a partir da interação com os elementos de drenagem. Seu papel principal é como agente modelador do relevo da superfície terrestre. A geomorfologia fluvial engloba o estudo destes corpos d'água e das bacias hidrográficas. A caracterização morfométrica destas consiste na descrição de fatores topográficos e geomorfológicos na geração de escoamentos e na determinação de coeficientes definidores de forma, drenagem, declividade da bacia, entre outros.

Lima (2012) sintetizou o avanço da utilização das técnicas de morfometria:

"Segundo Christofolletti (1969), as análises morfométricas em bacias de drenagem obtiveram um grande prestígio no fim do século XIX, sendo deixadas de lado apenas após a disseminação das publicações de William Morris Davis. A morfometria acaba por ressurgir no pós-guerra com a publicação de Robert Horton (1945), que procurou estabelecer leis de desenvolvimento dos rios e de suas bacias. O trabalho de Horton marca uma nova fase nos estudos morfométricos uma vez que apresenta inúmeras abordagens quantitativas para o estudo dos cursos d'água. Seguindo os passos de Horton, inúmeros autores passaram a dar destaque para os parâmetros e índices morfométricos de drenagem. Entre eles, destaca-se Strahler (1952) que propôs uma metodologia de hierarquização de canais fluviais utilizada até os dias atuais, difundindo o conceito de ordem para estudar e comparar separadamente os canais componentes de uma bacia".

Christofolletti (1969) salienta que estudos envolvendo análise da rede hidrográfica podem levar à compreensão e à elucidação de numerosas questões

geomorfológicas, pois os cursos d'água constituem o processo morfogenético dos mais ativos na esculturação da paisagem. Neste mesmo trabalho apresentou uma síntese geral dos variados aspectos de análise morfométrica, reunindo índices e parâmetros importantes para a realização de um estudo analítico das bacias hidrográficas.

A bacia hidrográfica é o objeto de estudo, onde seus elementos são a rede de drenagem e o arranjo das vertentes. Os atributos destas variáveis, quando correlacionados entre si, geram parâmetros morfométricos. Chorley (1962) debate em seu artigo sobre a bacia de drenagem como unidade geomorfológica discute a escala de aplicação das descrições de geometria do terreno. Para o mesmo autor a bacia hidrográfica é como uma folha, e os rios as veias desta. Horton definiu então que a bacia hidrográfica é uma unidade importante para a aplicação e análise dos parâmetros morfométricos em função de sua topografia e hidráulica autônomas. A bacia hidrográfica apresenta-se adequada visto que é limitada e normalmente de fácil definição a partir de seus limites topográficos.

As formas de relevo são resultado da interação entre processos tectônicos, pedogênicos e intempéricos dos materiais rochosos envolvidos. As formas de relevo existem porque foram esculpidas pela ação de processos. A bacia de drenagem tem papel fundamental na evolução do relevo, uma vez que os cursos de água constituem importantes modeladores da paisagem.

De acordo com Oliveira (2010) e Tucci (2005) as inundações são eventos que ocorrem naturalmente em todos os ambientes fluviais, sendo importantes na manutenção da dinâmica hidrológica e dos processos geomorfológicos. Trata-se de fenômenos de alta complexidade, pois envolvem toda a rede de drenagem contribuinte, que é composta de diversos cursos d'água com características muito distintas (profundidade, largura, declividade, etc.).

Christofolletti (1980) define geomorfologia: "como a ciência que estuda as formas de relevo. As formas representam a expressão espacial de uma superfície, compondo as diferentes configurações de paisagem morfológica. É o seu aspecto visível, a sua configuração, que caracteriza o modelado topográfico de uma área". As formas de relevo somente existem porque foram esculpidas pela ação de processos. A bacia de drenagem tem papel fundamental na evolução do relevo, uma vez que os cursos de água constituem importantes modeladores da paisagem.

Ainda de acordo com Christofolletti, (1969) foi Robert E. Horton o pioneiro nos estudos relativos à interpretação quantitativa das bacias hidrográficas, dando partida a uma nova fase da morfometria através da proposição de inúmeros aspectos de abordagem analítica para os cursos d'água.

A geomorfologia fluvial estuda os processos e as formas relacionadas com o escoamento dos rios. Todos os acontecimentos que ocorrem na bacia de drenagem (condições climáticas, cobertura vegetal, litologia...) repercutem, direta ou indiretamente nos rios.

O relevo de uma bacia tem forte influência sobre os fatores hidrológicos, pois a velocidade do escoamento superficial e conseqüentemente o tempo de concentração são determinados pela inclinação do terreno. A declividade média de uma bacia hidrográfica tem elevada importância no escoamento superficial da água, dentre outros processos.

A inundação é consequência de vários fatores que interferem na forma como a bacia hidrográfica escoar seu conteúdo hídrico e sedimentar. Toda a área a montante de uma bacia contribui com o seu volume de água na seção transversal de um rio.

Rodda (1969) divide as características hidrográficas de controle de inundação e enxurrada em transitórias e permanentes. As características transientes são as chuvas, a evaporação, a infiltração e a capacidade de armazenamento hídrico do solo; as características permanentes são referentes ao canal, vegetação, declividade, seção transversal do rio e a rugosidade. As características de densidade e ordem dos rios. Além das características da bacia referentes a forma, tamanho, aspecto, relações de altimetria e declividade.

Importante observar que em 1969, Rodda considerava algumas características permanentes, e que hoje se trabalha com uma variabilidade, como por exemplo, a variável vegetação.

Os fatores naturais envolvidos nesse processo são a topografia e a natureza da drenagem à montante. As altas declividades dos cursos d'água reduzem o tempo de resposta (tempo entre o início da chuva e a ocorrência da vazão máxima em uma seção do rio) das bacias às precipitações, o que gera maior vazão à jusante do corpo hídrico. Quanto maior a declividade maior a velocidade e, portanto, maior poder de destruição.

Para Alves e Castro (2003), a maioria dos trabalhos científicos à cerca de bacias hidrográficas analisam os aspectos de forma de maneira qualitativa, o que,

em geral, é insuficiente para identificar as homogeneidades e padrões comuns em relação às formas de relevo. Assim aponta a necessidade da aplicação de métodos quantitativos para estudos dessa natureza. A análise das características morfométricas das bacias hidrográficas é importante para um melhor entendimento da dinâmica natural. Cardoso et. al. 2006 e Freire, 2013 realizaram trabalhos acerca desta temática.

Souza et al. (2013) realizaram uma caracterização morfométrica e delimitaram a bacia hidrográfica do Córrego Samambaia - GO, a partir de dados SRTM e dos parâmetros de coeficiente de compacidade, índice de circularidade, fator de forma, densidade de drenagem e tempo de concentração. O uso das geotecnologias com o MDE SRTM e o SIG possibilitou um levantamento rápido e detalhado da bacia hidrográfica.

Santos et al. (2012) utilizaram em seu trabalho para a interpretação de dados da análise morfométrica parâmetros de densidade de drenagem, densidade hidrográfica, índice de sinuosidade, coeficiente de manutenção, gradiente de canais, índice de circularidade e relação de relevo. Definiram os parâmetros utilizados com base dos trabalhos de Christofolletti (1980) e Alves e Castro (2003) demonstrando os melhores resultados significativos para o entendimento e análise da área em questão.

Já Brubacher et al. (2011) utilizaram a área, a amplitude altimétrica, a distância, o índice de circularidade, o índice de sinuosidade e avaliaram a influência dessas variáveis nas enchentes em cada sub-bacia e no exutório da bacia do rio dos Sinos / RS.

Hermuche (2003) associou em seu trabalho "Processamento digital de imagens morfométricas para subsidiar o mapeamento pedológico", os dados morfométricos às classes de solo, alcançando com sucesso os objetivos propostos. O que permitiu realizar um levantamento pedológico da bacia preliminar, onde foi possível distinguir as classes do solo. Este estudo concluiu que o tipo de solo está diretamente ligado às características do relevo.

Marchi et al. (2010) realizaram um estudo de caracterização de eventos de enxurradas em termos climáticos e da morfologia das bacia hidrográficas. Os autores defendem que as condições de relevo são determinantes para promover a concentração de fluxo ao longo das drenagens, o que resulta em descarga elevada,

favorecendo os eventos de inundação em bacias hidrográficas com altas declividades.

Estes mesmos autores analisaram as características morfométricas das bacias estudadas, analisando duas relações morfológicas específicas que consideram afetar a suscetibilidade à inundação: a declividade da bacia em relação ao tamanho da mesma, e o comprimento do canal principal em relação ao tamanho da bacia.

A relação de relevo considera o relevo da bacia e o comprimento total da mesma, a partir da diferença de elevação dos pontos mais altos e mais baixos na bacia, e o comprimento do canal principal. Sendo este um número adimensional que é amplamente utilizado na comparação de bacias hidrográficas (Schumm, 1956,1963).

Tonello et al. (2006) utilizaram a análise morfométrica de uma bacia em Minas Gerais para confirmar que a morfometria diferenciada entre as sub-bacias indicam um provável comportamento hidrológico também diferenciado.

Os parâmetros morfométricos utilizados neste trabalho referentes à análise linear, areal e hipsométrico, além do índice de cobertura do solo por bacia hidrográfica. Este trabalho irá considerar as variáveis morfométricas apresentadas na tabela 1.

Tabela 1 - Equações utilizadas para o cálculo das variáveis.

Variável	Equação	Definição	Fonte
Análise Linear da Bacia Hidrográfica			
Tamanho do Rio Principal	L	Distância que se estende ao longo do curso d'água desde a desembocadura até determinada nascente.	-
Índice de Sinuosidade	$Is = \frac{L}{dv}$	Razão encontrada do comprimento real do canal principal da bacia, calculado por uma medida longitudinal, com a medida em linha reta da distância da nascente à foz.	Schumm, 1963.
Relação de Bifurcação	$Rb = \frac{Nu}{Nu'}$	Relação entre o número total de canais de certa ordem e o número total de canais de ordem imediatamente superior.	Horton, 1945.
Análise Areal da Bacia Hidrográfica			
Gradiente dos Canais	$Gc = H_{máx} - H_{min}$	Relação entre a diferença máxima de altitude ente o ponto de origem e ponto de deságue.	Horton, 1945.
Índice de Circularidad e	$C = \frac{A}{Ac}$	Relação entre a área da bacia e a área de um círculo de mesmo perímetro.	Miller, 1953.
Fator de Forma	$Kf = \frac{A}{L^2}$	Relação entre a área da bacia e o quadrado de seu comprimento axial.	Vilela e Matos, 1975.
Densidade Hidrográfica	$Dh = \frac{N}{A}$	Relação existente entre o número de rios ou cursos d'água e a área da bacia hidrográfica.	Horton, 1945.
Densidade de Drenagem	$Dd = \frac{Et}{A}$	Comparar o comprimento dos canais drenados em uma área padrão.	Horton, 1945.

Análise Hipsométrica da Bacia Hidrográfica			
Razão de Relevo	$Rr = \frac{Hm}{Lh}$	Relação entre a amplitude altimétrica máxima de uma bacia e a maior extensão da referida bacia, paralelamente à linha principal de drenagem.	Schumm, 1956.
Declividade Média	$S = \frac{H \uparrow - H \downarrow}{L}$	Trata-se da declividade média da bacia hidrográfica, calculada a partir da sua diferença de cotas dividido pelo comprimento do rio principal (L).	Vilela e Matos, 1975.
Índice de Cobertura da Bacia Hidrográfica			
Índice de Cobertura do Solo (ICMS)	$Ics = \Sigma FCU$	Para a obtenção deste índice foram convencionados os seguintes valores para cada classe de cobertura do solo: % floresta: 1; % campo: 0,5; %urbano: 0,1.	-
Tempo de Concentração			
Tempo de Concentração Ventura	$tc = 240 \sqrt{\frac{A.L}{H}}$	Intervalo de tempo, a partir do início de uma precipitação, necessário para que toda a bacia hidrográfica contribua para o escoamento superficial no seu exutório.	Mata-Lima et al, 2007.
Tempo de Concentração Kirpich	$tc = (0,87 \frac{L^3}{H})^{0,385}$		Kirpich, 1940.
Tempo de Concentração Pasini	$tc = 0,108 \frac{\sqrt[3]{A.L}}{\sqrt{I}}$		Mata-Lima et al. 2007.

METODOLOGIA

Para o desenvolvimento dessa dissertação foram utilizados parâmetros recorrentes na literatura e adaptados para a extração através da modelagem digital de elevação e Sistema de Informações Geográficas. A obtenção dos parâmetros morfométricos e das áreas de bacias hidrográficas, utilizando métodos analógicos, demandam um trabalho árduo e custoso. A utilização de recursos de SIG e de sensoriamento remoto apresentaram-se eficientes, rápidos e com baixo custo.

A metodologia empregada nesse trabalho parte da obtenção de atributos referentes ao terreno, à rede de drenagem e suas análises morfométricas.

Segundo Chow et al. (1988) os fatores que influenciam o escoamento podem ser separados em dois grupos: os climáticos e os fisiográficos. Neste trabalho serão trabalhadas as características fisiográficas das bacias, classificados como geométricas (forma, tamanho, declividade, entre outras) e de uso e ocupação. A mensuração dos canais, da área e dos dados morfométricos da bacia foram feitos a partir de imagens SRTM. Com relação aos fatores climáticos foi realizada uma breve análise dos dados apresentados por Rossato (2010), a partir de um novo mapa de tipologias climáticas para o RS.

Christofolletti (1980) trabalha com a ideia de que "as técnicas estatísticas possuem importância em muitos estágios da pesquisa, fornecendo as bases para a amostragem, a fim de analisarem a significância dos dados e estabelecer as correlações. É sintomático, também, que a análise e a experimentação dos estudos geomorfológicos se façam aplicando princípios e conceitos admitidos em outras ciências, fazendo com que ela se integre definitivamente no movimento científico interdisciplinar da nossa época".

Diante disso, torna-se pertinente a avaliação da correlação entre as variáveis morfométricas aqui trabalhadas, a fim de identificar quais parâmetros possuem associação com os eventos de enxurrada e inundação. O coeficiente de correlação mede a dependência linear entre as variáveis e utiliza a equação apresentada a seguir. O valor calculado é sempre um número entre -1 e 1 (Magalhães, 2011).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{obs})(y_i - y_{obs})}{\sqrt{[\sum (x_i - x_{obs})^2][\sum (y_i - y_{obs})^2]}}$$

3.1 Área de Estudo

A utilização de bacias hidrográficas como recorte tem sido adotada como unidade básica para estudos ambientais. Para isto, foram selecionadas as sub-bacias hidrográficas que compõe a Região Hidrográfica do Guaíba (Figura 12), localizada na porção centro-leste do estado do Rio Grande do Sul, sul do Brasil. Este recorte representa a única região hidrográfica inteiramente localizada nos limites do Estado.

Em função do alto grau de alteração apresentado pelas bacias do Gravataí esta bacia foi subtraída do estudo, visto que seus resultados não podem ser considerados válidos, visto a artificialização da drenagem apresentada na bacia. Além disso, a bacia hidrográfica do Lago Guaíba também foi subtraída, em função de que geomorfologicamente apresenta-se como um conjunto de sub-bacias, com exutórios independentes, impossibilitando a aplicação da metodologia proposta e utilizada nas outras bacias hidrográficas trabalhadas.

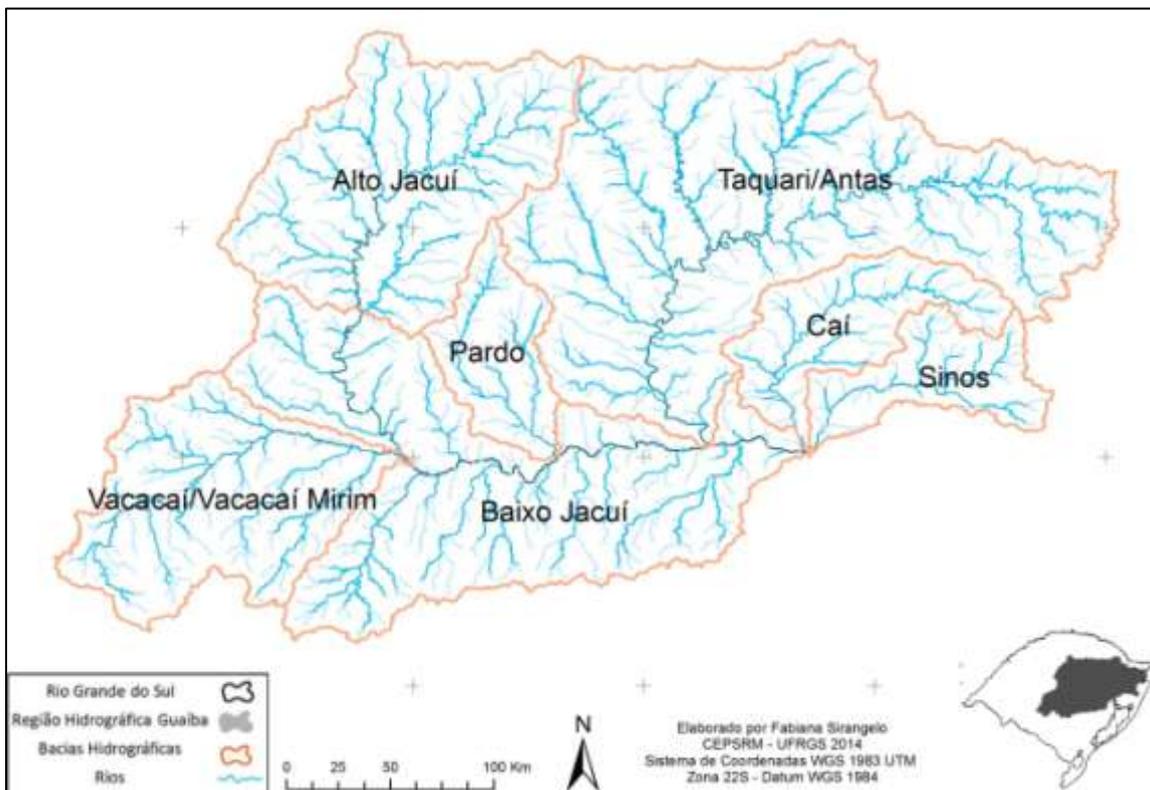


Figura 12 - Região Hidrográfica do Guaíba, Rio Grande do Sul, Brasil.

A Lei 10.350/94 (RIO GRANDE DO SUL, 1994) estabelece a divisão do Estado em 3 Regiões Hidrográficas: Bacia do Guaíba, Bacia do Rio Uruguai e Bacias Litorâneas. A Região Hidrográfica do Guaíba foi dividida em sete bacias, são elas: Alto Jacuí, Baixo Jacuí, Caí, Gravataí, Guaíba, Pardo, Sinos, Taquari/Antas e Vacacai/Vacacai Mirim.

Situa-se na região nordeste do RS, entre os paralelos 28° S e 31°S e os meridianos 50°W e 54° W, abrangendo uma área de 84.763,54 Km² correspondente a 30% da área total do Estado. Formada pelo território parcial ou total de 251 municípios, com uma população de 5.869.265 habitantes, o que representa 61% da população do Estado (RIO GRANDE DO SUL, 2012).

Abrange, ao norte, o Planalto da Bacia do Paraná, onde se localizam as cotas altimétricas mais elevadas do estado, a Depressão Periférica, com as menores altitudes, e ao sul o Planalto Sul-rio-grandense (Escudo Sul-rio-grandense). Esta grande variação de altitudes é observada na figura 13.

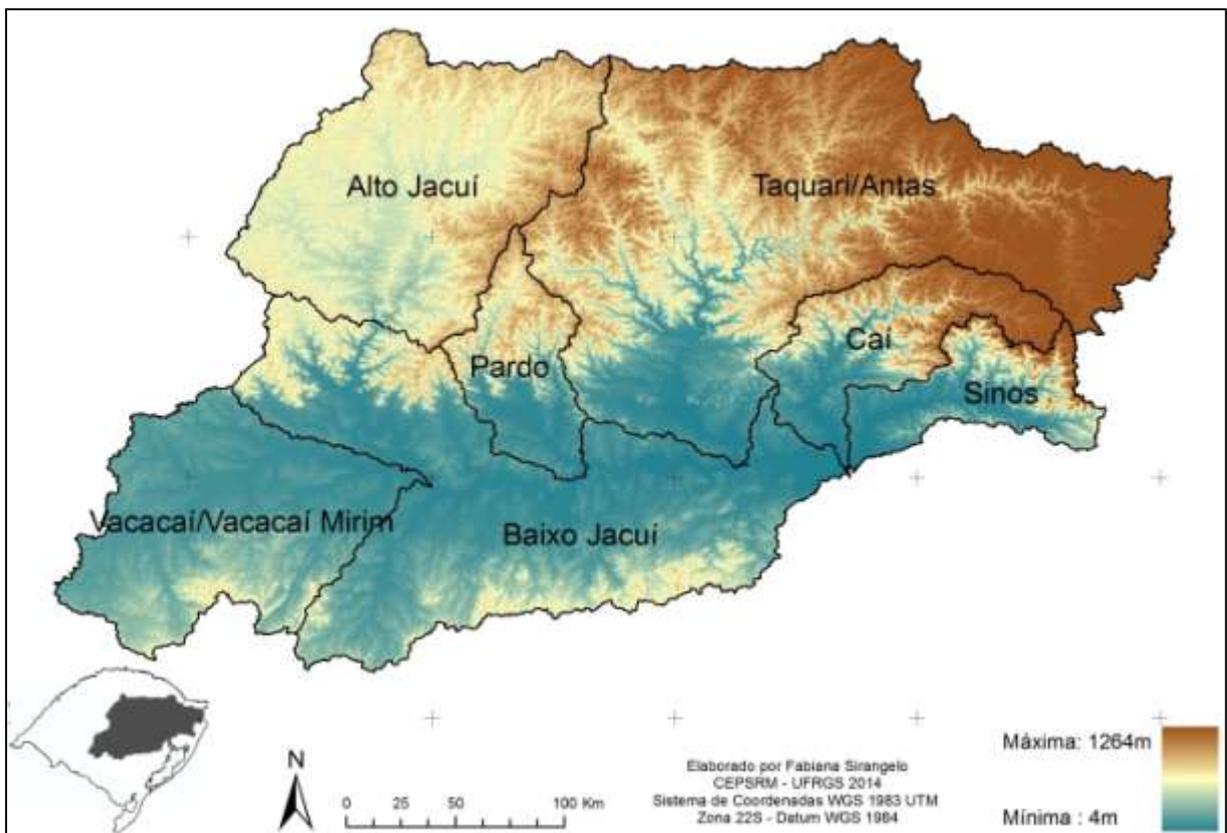


Figura 13 - Mapa altimétrico da Região Hidrográfica do Guaíba.

As formações vegetais originalmente existentes são a Floresta Ombrófila Mista (Floresta com Araucária), a Floresta Estacional e as Savanas (Campos). Grande parte desta vegetação foi suprimida ou alterada, restando áreas remanescentes nas encostas íngremes dos vales, especialmente dos rios Taquari/Antas e Jacuí.

Nesta porção do estado é possível também observar, a partir do inventário da Defesa Civil, uma maior concentração dos eventos a serem analisados: inundações e enxurradas. Além disso, observa-se uma maior concentração de população (Figura 14) e renda, em relação às outras regiões do estado.

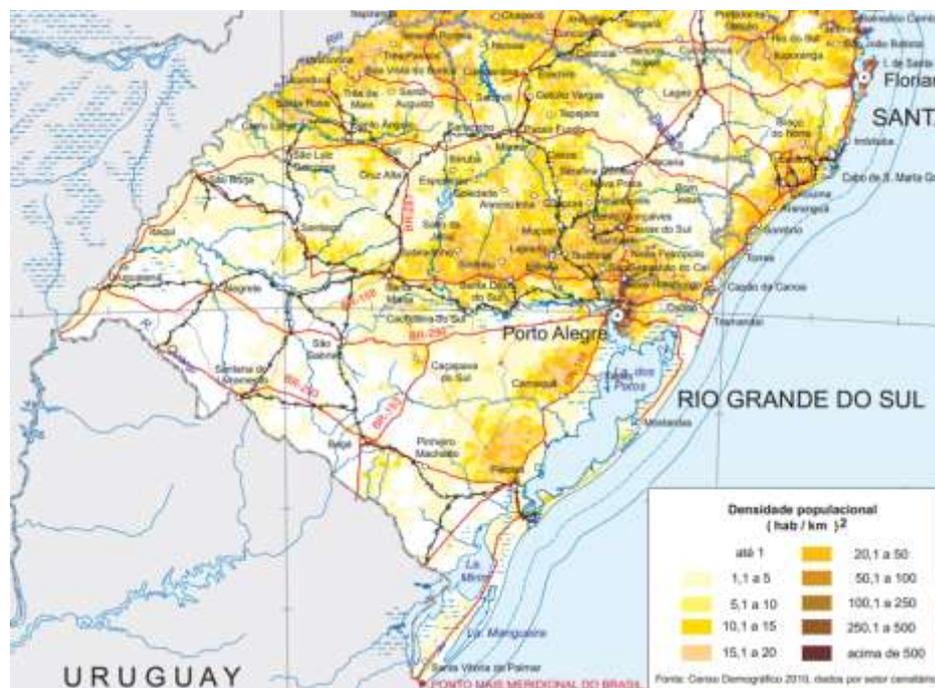


Figura 14 - Densidade populacional em 2010 - RS.

Fonte: IBGE (2010).

Para fins de estudo comparativo entre as variáveis morfométricas e a ocorrência de eventos de inundação e enxurrada as alterações antrópicas realizadas na região podem acarretar em resultados não condizentes com a realidade, como é o caso da bacia do Gravataí. Esta região é conhecida por apresentar formas muito modificadas, em decorrência da tentativa de compensar as distribuições dos fluxos de água muito problemáticos no que tange a ocupação urbana.

A bacia do Lago Guaíba também se apresenta inadequada, visto que não apresenta um rio principal; esta bacia na verdade é a união de muitas sub-bacias com pontos exutórios distintos, o que impossibilita a comparação dos valores obtidos através da metodologia proposta para este trabalho.

A partir disso definiu-se que a área de estudo, para fins comparativos, terá a subtração das bacias hidrográficas do Gravataí e do Lago Guaíba, resultando este estudo na comparação dos valores obtidos para as diferentes variáveis morfométricas das bacias: Alto Jacuí, Caí, Sinos, Baixo Jacuí, Vacacaí/Vacacaí Mirim e Taquari/Antas e Pardo. Sendo que a bacia do Baixo Jacuí considera a área das bacias contribuintes no seu cálculo.

3.2 Materiais

A fim de avaliar a suscetibilidade a eventos de inundação e enxurrada a partir da morfometria da bacia em sua totalidade, foi efetuada uma seleção dos principais fatores/variáveis relacionada a estes eventos, que por sua vez foram calculados e correlacionados para a devida caracterização.

No Atlas gerado pelo CEPED (2011) é descrito que não há unanimidade na distinção dos tipos de inundação. Diversas vezes inundações graduais (inundações) são registradas como inundações bruscas (enxurradas) e vice-versa. Isto nem sempre é devido à falta de conhecimento, mas à dificuldade de identificação do fenômenos em campo e à ambiguidade das definições existentes. Além dos problemas tipicamente conceituais e etimológicos, algumas características comportamentais são similares para ambas às inundações (Kobiyama et al. 2006).

Ressalta que é muito comum a confusão entre a classificação do evento adverso entre inundações bruscas e graduais (CASTRO, 2003). Dependendo da interpretação no momento, a história dos desastres pode ser modificada e até distorcida. Assim, para construir um histórico mais próximo à realidade, é necessário descrever as ocorrências o mais precisamente possível (GOERL et al. 2009).

Para a construção dos mapas a partir do inventário utilizado, passaremos a considerar dois tipos de eventos: enxurradas e inundações; conseqüentemente a quantificação é feita em cima da tabela previamente construída, sem entrar no mérito da confiabilidade do dado e da correspondência entre o evento descrito e suas características reais.

3.3 Inventário

Os dados de ocorrência dos eventos analisados foram obtidos através da Defesa Civil, em uma série histórica de 1991-2010 para o estado do Rio Grande do Sul, inventariados no documento Atlas Brasileiro de Desastres Naturais 1991 a 2010: volume Rio Grande do Sul (CEPED, 2011).

A metodologia utilizada pelo Atlas foi de compilar diversos dados históricos nesta série espaço-temporal. Algumas fragilidades na elaboração do produto final foram apontadas, como: ausência de unidades e campos padronizados para as informações documentadas; ausência de sistema de coleta sistêmica e armazenamento dos dados; dificuldades na interpretação do tipo de desastre pelos responsáveis pela emissão dos documentos; dificuldade de consolidação, transparência e acesso aos dados.

É possível observar um significativo aumento no número de registros (Figura 15), a cada ano, o que pode estar relacionado à evolução dos órgãos de Defesa Civil. Este incremento no número de ocorrências é observado especialmente no período posterior ao formulário AVADAN, o registro oficial de desastres naturais do Brasil feito pela Defesa Civil. Acredita-se que pode haver carência de informações sobre alguns desastres ocorridos anteriormente a 2001. O gráfico da figura 16 mostra o aumento no número de registros a cada ano, para os eventos extremos no Rio Grande do Sul. Já o gráfico apresentado na figura 17 mostra, subdivididos por bacia hidrográfica, a ocorrência de episódios de inundação e enxurrada.

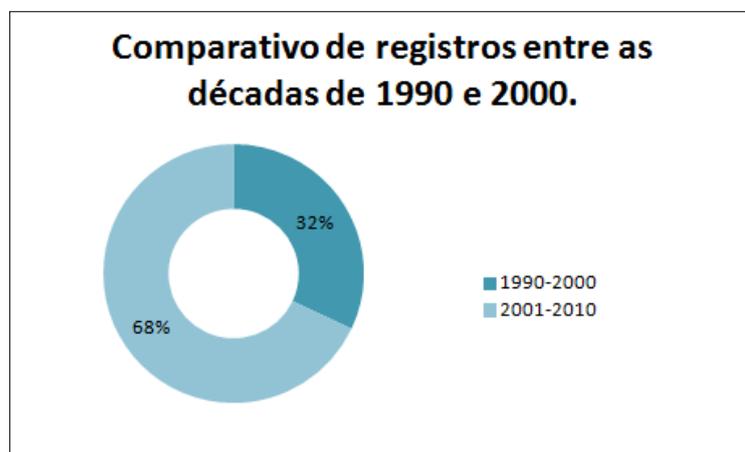


Figura 15 - Comparativo de registros da Defesa Civil entre as décadas de 1990 e 2000.

Fonte: Documentos oficiais do Estado do Rio Grande do Sul, 2011.



Figura 16 - Total de registros da Defesa Civil do RS por ano, 1991 a 2010.

Fonte: Documentos oficiais do Estado do Rio Grande do Sul, 2011.

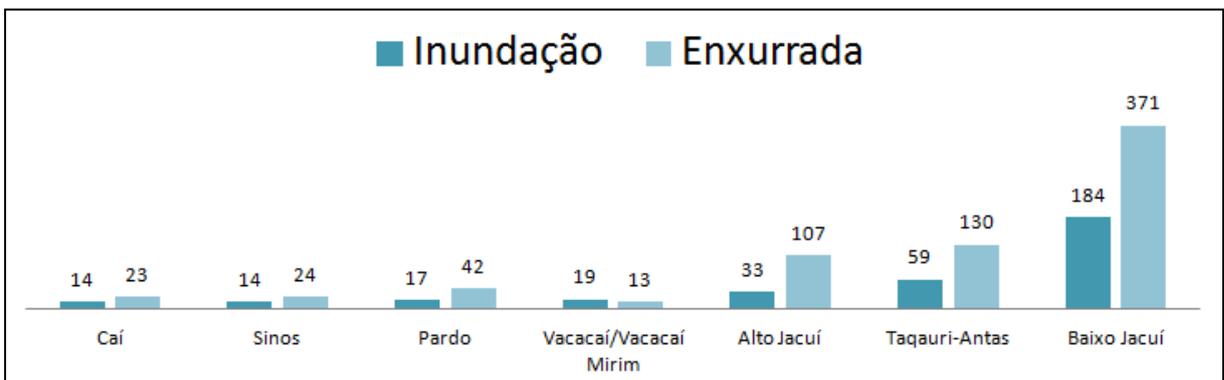


Figura 17 - Gráfico comparativo dos valores absolutos de ocorrência de eventos e inundação e enxurrada na Região Hidrográfica do Guaíba, para o período de 1991 a 2010.

Estes dados de ocorrência foram filtrados e mapeados separadamente, e estão apresentados respectivamente nas figuras 18 e 19, com o número de eventos por município neste período. Observa-se uma distribuição espacial bem clara, quando comparados às questões altimétricas, que os eventos de inundação estão principalmente associados às áreas de planície, enquanto que os eventos de enxurrada apresentam-se localizados nas áreas de médias e altas vertentes da Região Hidrográfica do Guaíba.

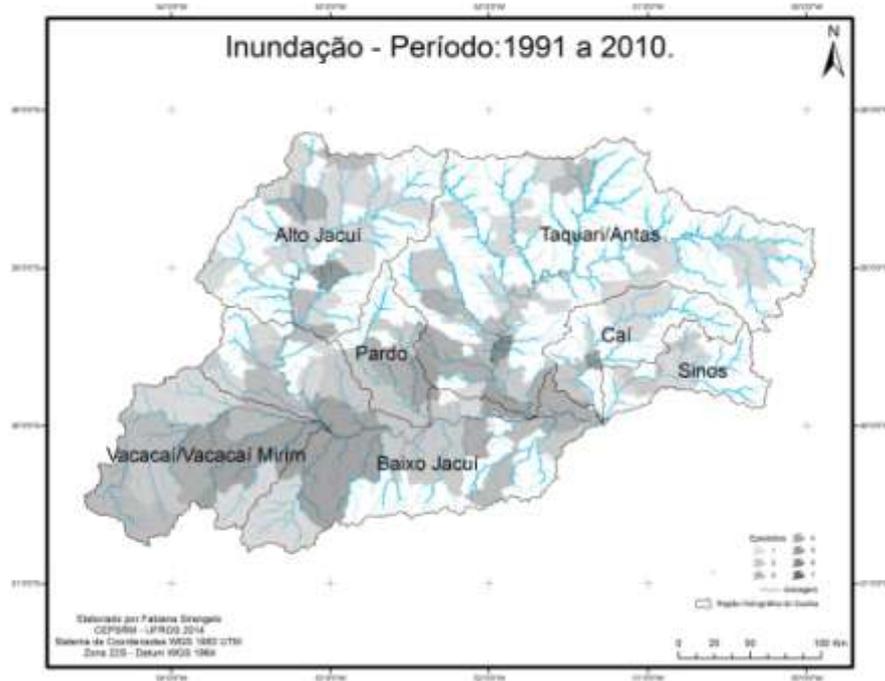


Figura 18 - Mapa de inundações por município - RHG, RS. Período de 1991 a 2010.

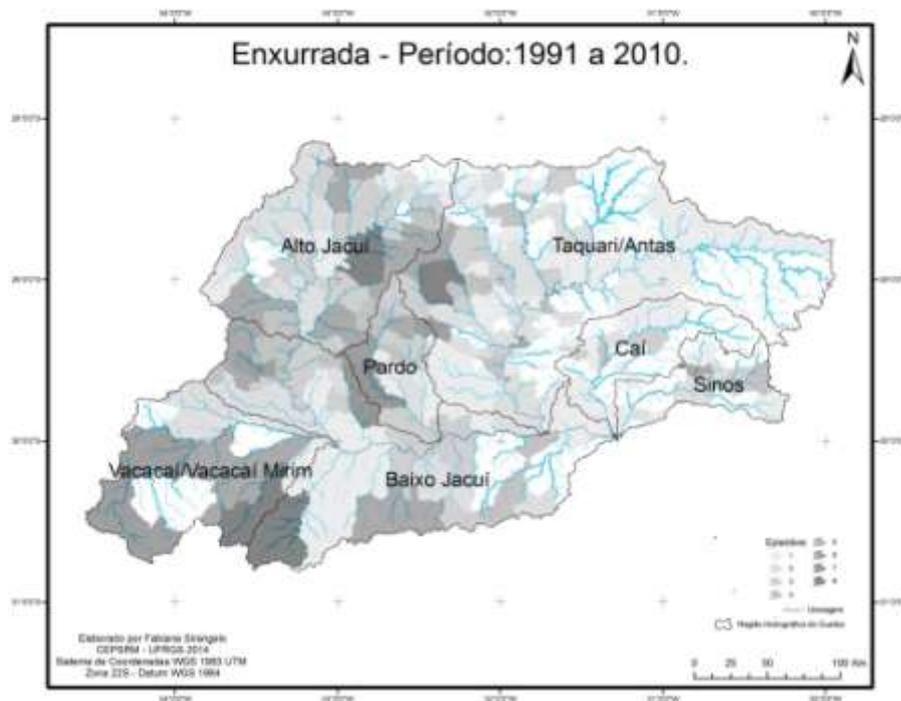


Figura 19 - Mapa de enxurradas por município - RHG, RS. Período de 1991 a 2010.

3.4 Método

O fluxograma, apresentado na figura 20, representa as diferentes etapas do trabalho, a metodologia proposta e executada, além dos dados necessários para a realização dos objetivos previamente estabelecidos neste projeto.

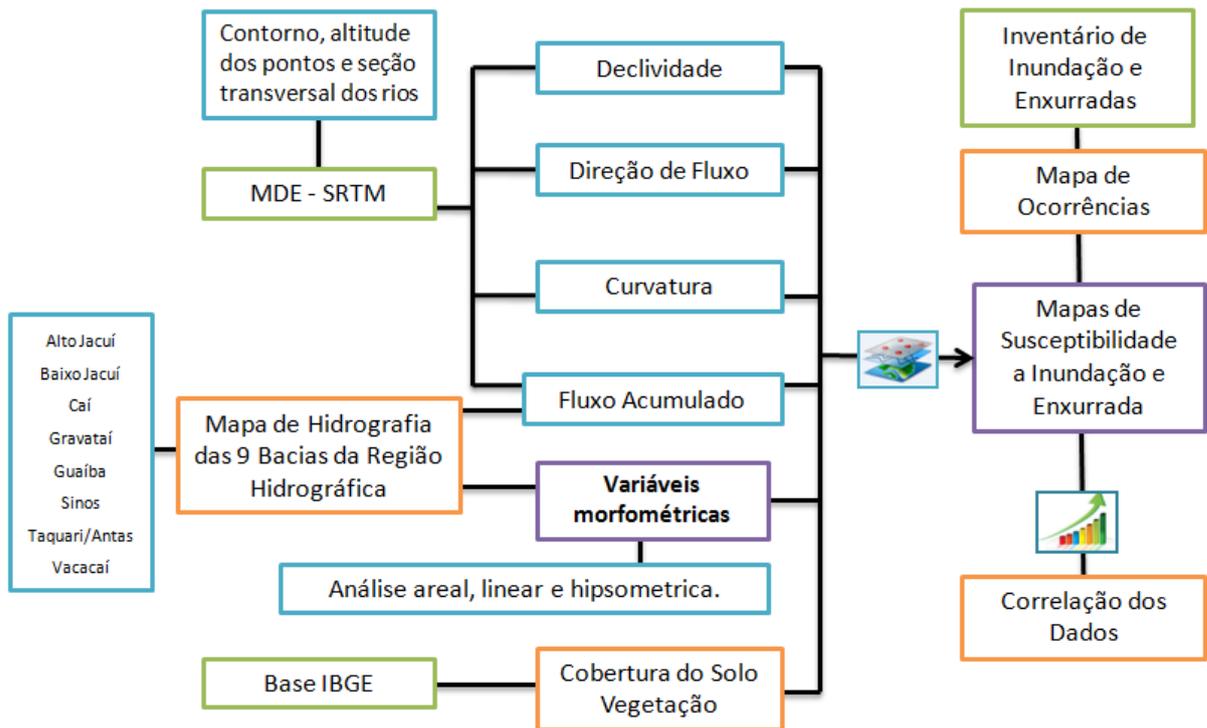


Figura 20 - Fluxograma metodológico.

Como primeira etapa dos procedimentos executados para tal análise, foram delimitadas as áreas das bacias hidrográficas. Neste processo automático, em SIG, é utilizada uma estrutura numérica de dados correspondente à distribuição espacial da altitude e da superfície do terreno, denominada MDE. Hott & Furtado (2005) descreveram uma metodologia para a determinação automática de parâmetros morfométricos das bacias hidrográficas. A metodologia utilizada é a mesma descrita por Mageh (2012), onde a extração da drenagem é realizada a partir de modelos digitais de elevação é baseada na gravidade, o que quer dizer que a água vai escoar das maiores altitudes para as menores.

A partir dos dados SRTM foram realizados processamentos para a extração das bacias hidrográficas e suas redes de drenagem. Barros et al. (2005) testaram a eficiência e acurácia dos dados altimétricos SRTM apontando que são dados de

qualidade bastante boa, apresentando valores pequenos de erro padrão ao se considerar as grandezas envolvidas.

Através da extensão do software *ArcGis*, aplicativo *ArcMap*, barra de ferramentas *Hidrology* foram feitos processamentos de preenchimento da superfície raster (*fill*) para remoção de pequenas imperfeições, direções de fluxo (*flow direction*) e fluxo acumulado (*flow acumulation*) considerando o mosaico de imagens SRTM para o Rio Grande do Sul.

As direções de fluxo utilizaram o método proposto por Jenson & Domingues (1988), que utiliza a lógica da maior declividade, dando uma direção de fluxo para cada pixel do modelo (janela 3x3).

Posteriormente, foi gerada uma grade com áreas acumuladas de drenagem, onde cada pixel recebe um valor correspondente à soma das áreas dos pixels que deságuam nele.

A partir disso foram localizados os pontos de foz de cada sub-bacia, seguido do comando *Snap Pour Point*. O comando *Watershed* permite a delimitação da bacia, seguido do comando *Raster to Features* para a transformação em polígono.

O processo de delimitação automática das bacias hidrográficas e das redes de drenagem foi gerado a partir das etapas apresentadas na figura 21.

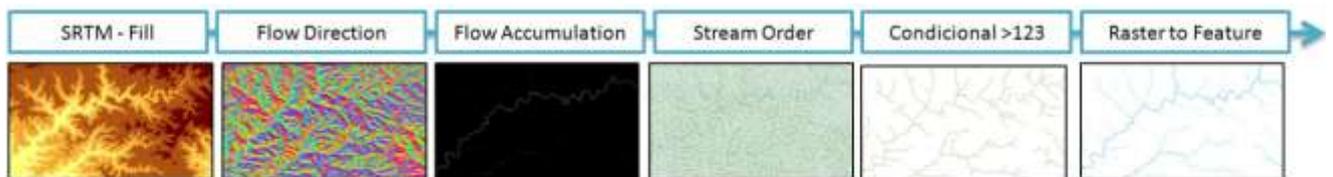


Figura 21 - Etapas da obtenção das redes de drenagem a partir de dados SRTM.

Para a delimitação da rede de drenagem vários valores de *mínimo celular de contribuição de fluxo* para a definição de uma célula de drenagem, conforme apresentado na figura 22. A operação Condicional, com "value < 123", seleciona apenas os pixels que apresentam fluxo acumulado compatível a 10km² de área drenada. Este limiar foi determinado em função do *grid* de da escala de resolução das imagens SRTM (90m) visando um resultado das drenagens mais próximo possível do real.

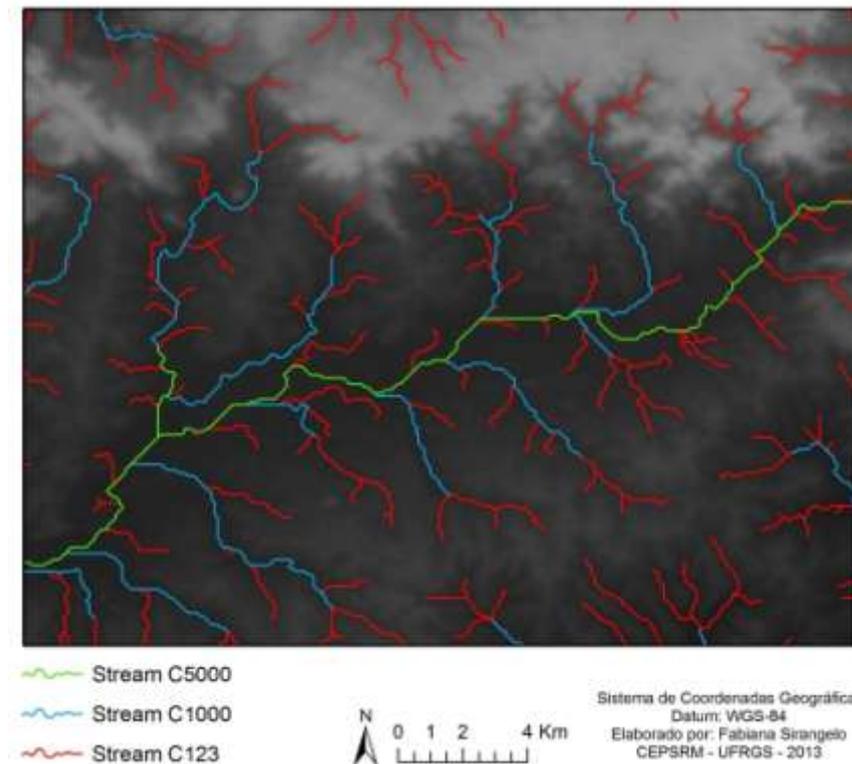


Figura 22 - Operação condicional aplicada com diferentes limiares para as células de contribuição.

Com a finalidade de facilitar e tornar mais objetivo os estudos morfométricos (análise linear, areal e hipsométrica) sobre as bacias hidrográficas se define uma hierarquia da rede fluvial em relação aos demais rios. A fim de estabelecer um ordenamento hierarquizado da rede de canais que drenam uma bacia, alguns geomorfólogos e hidrólogos propuseram critérios de hierarquização de bacias. Dentre os critérios mais utilizados destaca-se o de Strahler (1992).

O critério consiste em reconhecer que toda a rede está formada por segmentos de canais individuais, onde usando números inteiros se designa os segmentos em termos de ordem de magnitude dentro de uma hierarquia. Cada canal não ramificado, que não recebe nenhum afluente, é classificado como canal de primeira ordem. A confluência de dois canais de primeira ordem produz um segmento qualquer de segunda ordem; a união de dois segmentos de segunda ordem produz um segmento de terceira ordem, e assim por diante. Quando dois rios de diferentes ordens se unem prevalece a maior ordem (Strahler, 1992), conforme exemplificado na figura 23.

A hierarquização dos canais possibilita um melhor entendimento da estrutura e arranjo dos sistemas de drenagem da bacia. Facilita a identificação das cabeceiras

de drenagem, e em consequência a articulação espacial do escoamento. No caso de alterações físicas em parte da bacia é possível deduzir a localização das consequências hidrológicas desta bacia.

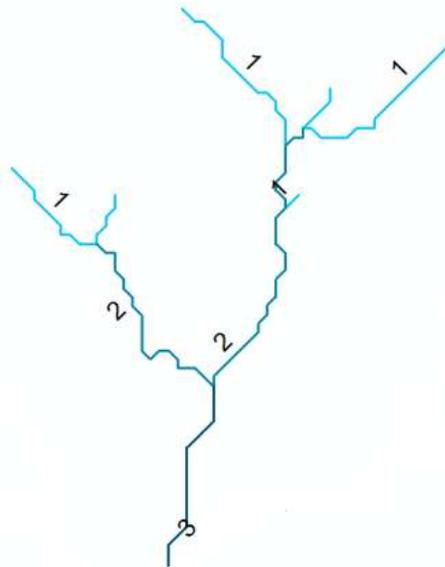


Figura 23 - Hierarquia fluvial proposta por Strahler (1992).

A hidrografia mapeada e a drenagem numérica, bem como o limite da bacia foram representadas no formato vetorial, e utilizadas para a determinação de diversos parâmetros. A análise morfométrica da bacia inicia-se pela ordenação dos canais fluviais, cujas medições necessárias são efetuadas ao longo das linhas de escoamento. A partir de então se processam os aspectos lineares, areais e hipsométricos (Christofolletti, 1980).

Além disso, é importante destacar que das bacias hidrográficas trabalhadas, a bacia hidrográfica do Baixo Jacuí é a única que tem outras bacias contribuindo com aporte de água de outras 4 sub-bacias: Pardo, Alto Jacuí, Taquari-Antas e Vacacaí/Vacacaí Mirim. A partir disso salienta-se a importância de considerar que os rios desta bacia acabam por escoar também os rios das bacias periféricas, de acordo com a figura 24:

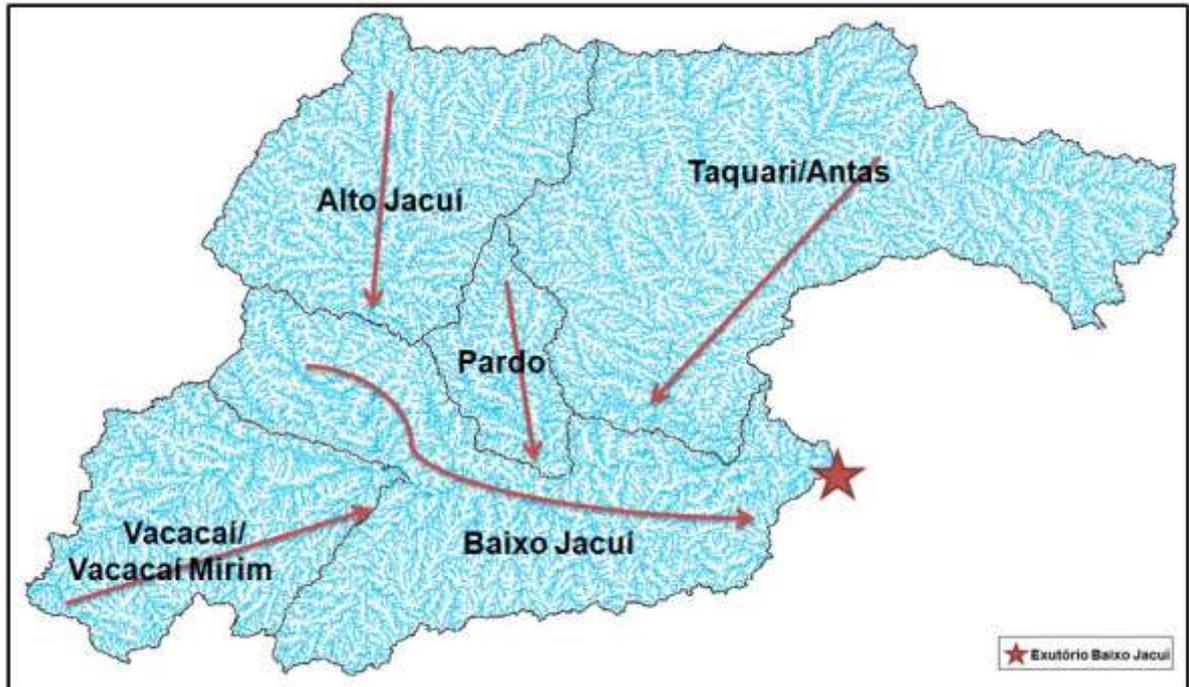


Figura 24 - Confluência de bacias adjacentes: Baixo Jacuí.

Naturalmente, portanto, os valores absolutos obtidos no inventário de ocorrência dos eventos de inundação e enxurrada apresentam-se muito maiores quando analisada a bacia do Baixo Jacuí.

RESULTADOS

4.1 Inundação

Em decorrência do fato de que as bacias hidrográficas estudadas apresentam diferenças significativas no que diz respeito à sua área, é natural que exista uma tendência das maiores bacias apresentarem maiores valores de ocorrências dos eventos analisados, sendo o coeficiente de correlação obtido pelas duas variáveis de 0,99. Este dado é evidenciado pelos gráficos apresentado na figura 25, onde se observa que o número de ocorrências para eventos de inundação cresce proporcionalmente em relação ao tamanho da bacia analisada:

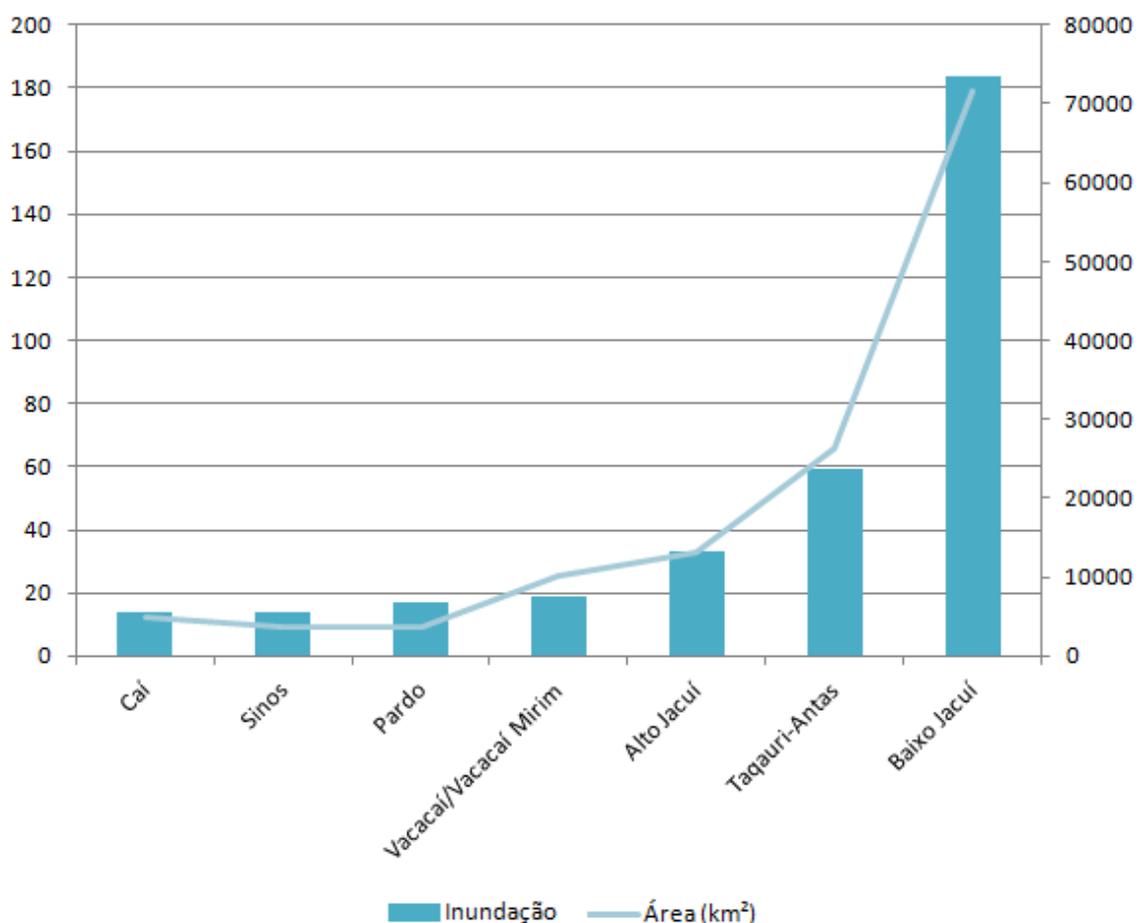


Figura 25 - Gráfico de ocorrência de inundação em função da área da bacia.

Buscando ponderar estas diferenças foi desenvolvida uma metodologia onde se buscou a quantidade de eventos proporcionalmente ao tamanho da bacia, reduzindo os efeitos da influência da área e valorizando a incidência e importância real dos eventos para a bacia analisada. Para isso foi utilizada a equação apresentada a seguir:

$$\text{Valor Ponderado} = \frac{\text{Ocorrências (\%)}}{\text{Área (\%)}}$$

O desenvolvimento desta metodologia trabalha com a ideia de buscar para uma unidade padrão de área (%) a importância dos eventos analisados. Ou seja, bacias com mais ocorrências observadas numa mesma área apresentarão valores "ponderados" maiores do que as bacias com menos ocorrências para a mesma área analisada. Para isso foi atribuído um peso a cada bacia, de acordo com sua proporção em relação ao total da Região Hidrográfica. Este valor obtido é adimensional e apresenta uma hierarquia de importância dos eventos, diferenciados entre inundações e enxurradas. A tabela 2 apresenta os valores ponderados obtidos para cada uma das sete bacias analisadas:

Tabela 2 - Valores ponderados da relação entre a ocorrência de inundação e a área da bacia hidrográfica:

Bacia Hidrográfica	% Inundação	Valor Ponderado
Alto Jacuí	15,56	0,95
Baixo Jacuí	86,79	0,97
Caí	6,60	1,06
Pardo	8,01	1,75
Sinos	6,60	1,43
Taquari-Antas	27,83	0,84
Vacacaí/Vacacaí Mirim	8,96	0,71

O gráfico a seguir mostra a distribuição ponderada do eventos de inundação (Figura 26). Nesta nova caracterização da incidência dos eventos em função da área

se observa que as bacias do Pardo e do Sinos ganham destaque, indicando que nestas bacias existe uma grande ocorrência de inundações quando comparada à ocorrência destes eventos nas bacias com valores menores, como Vacacaí e Taquari-Antas.

O mapa da figura 26 mostra uma distribuição espacial dos valores ponderados para os eventos de inundações, de acordo com o inventário disponibilizado pela Defesa Civil, associado aos círculos que representam a importância dos eventos de inundações para as respectivas bacias hidrográficas. Nesta visualização é importante salientar que em algumas regiões, como a bacia do Vacacaí/Vacacaí Mirim os municípios apresentam áreas maiores, o que pode provocar uma impressão visual da existência de muitos eventos por área, porém a análise da tabela de valores torna-se pertinentes para avaliar o real número de episódios por bacia.

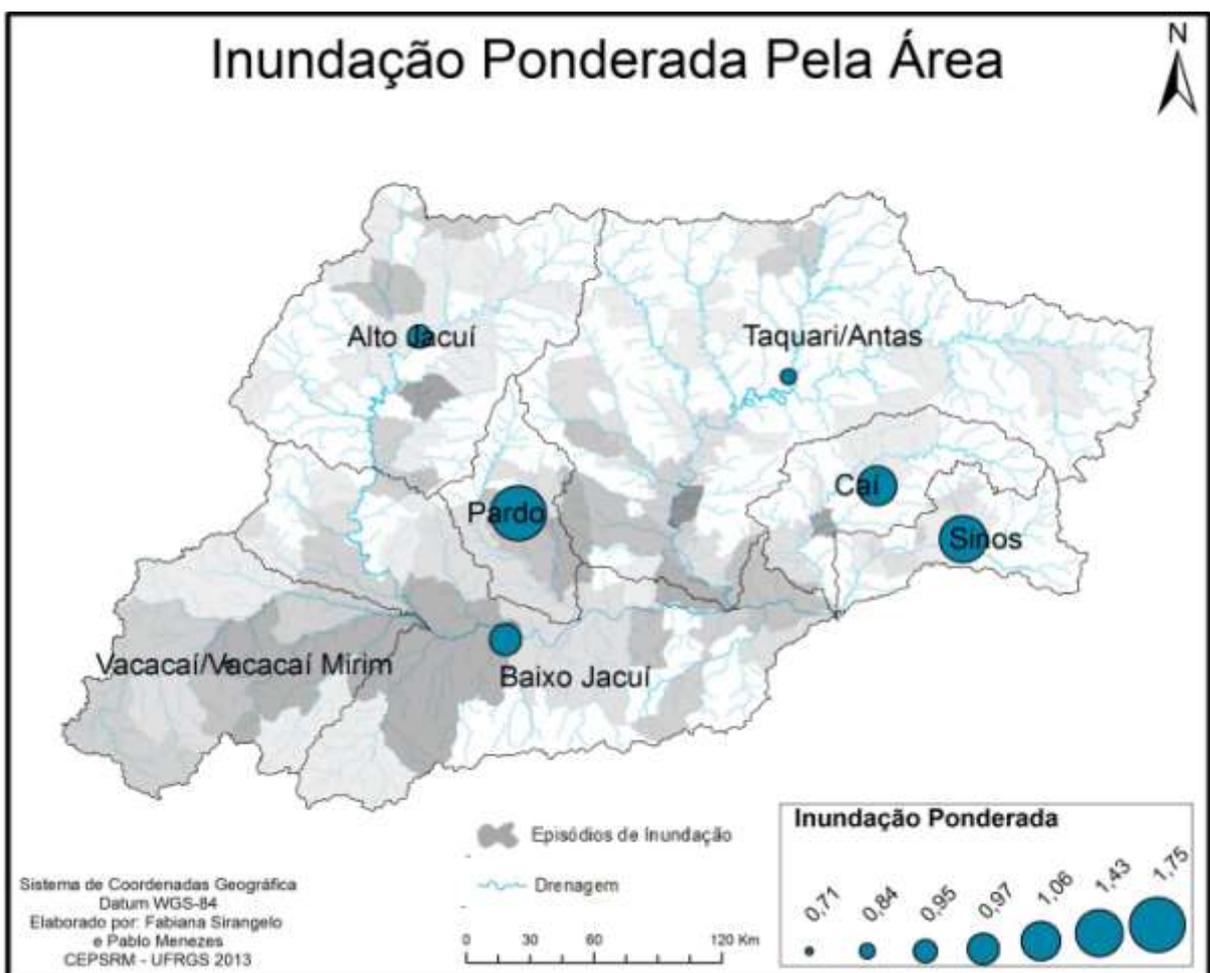


Figura 26 - Mapa de distribuição dos episódios de inundação por município e sua relação ponderada com a área da bacia hidrográfica.

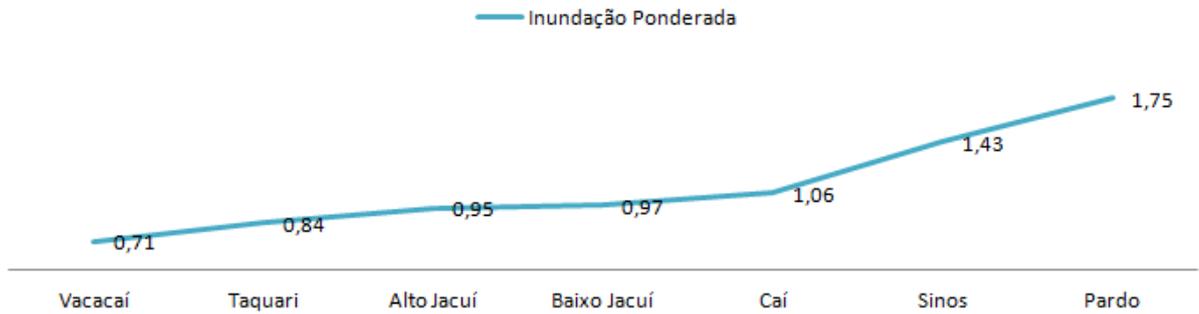


Figura 27 - Gráfico de valores ponderados em função da área para episódios de inundação.

4.2 Enxurrada

De acordo com o inventário disponibilizado pela Defesa Civil, em relação às enxurradas é possível observar que existe uma concentração de ocorrências nas bacias do Taquari/Antas e do Baixo Jacuí, e uma baixa ocorrência de eventos nas bacias do Sinos e do Caí, em valores absolutos (Figura 28).

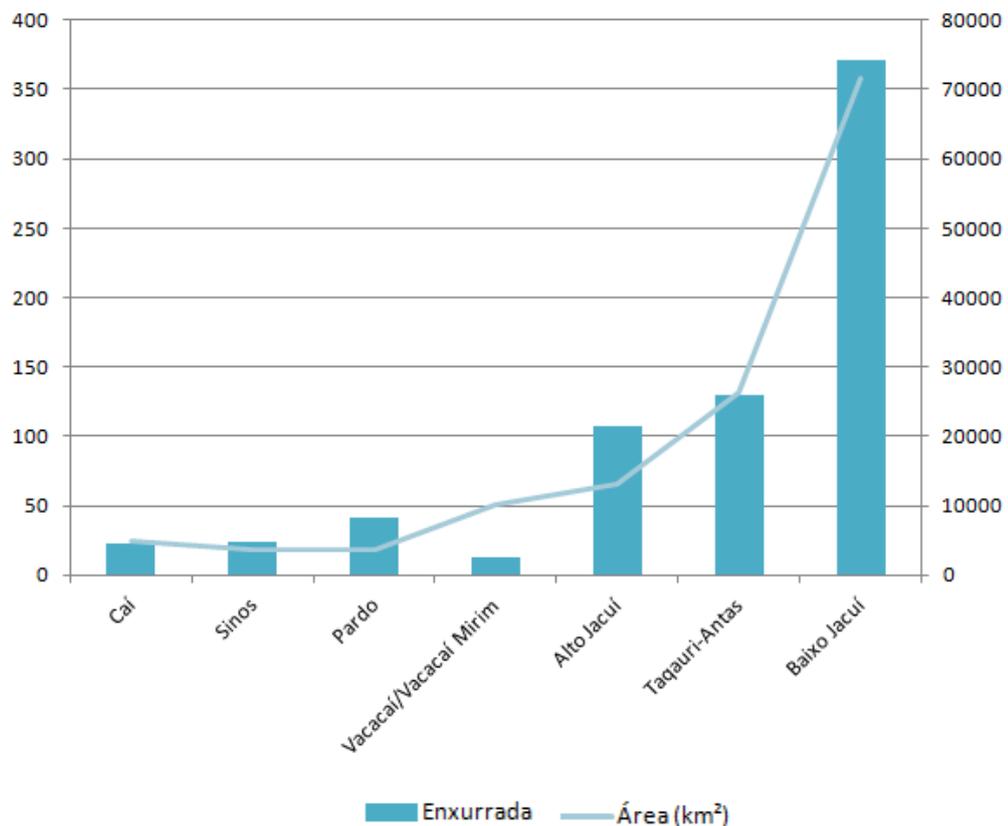


Figura 28 - Gráfico de ocorrência de episódios de enxurrada em função da área das bacias inseridas na RHG.

No caso dos eventos de enxurrada, a correlação com a área da bacia não é tão acentuada como nos casos de inundação, em função especialmente da bacia do Vacacaí/Vacacaí Mirim que apesar de sua considerável área apresenta poucos episódios de ocorrência de enxurrada. Novamente foi aplicada a metodologia da ponderação do número de eventos de enxurrada por bacia hidrográfica, em função de sua área. Os resultados estão apresentados na Tabela 3. Esta redistribuição dos valores de importância das bacias quando considerados os eventos de enxurradas evidencia que, novamente, a bacia do Pardo apresenta-se destacada, enquanto que a bacia do Vacacaí/Vacacaí Mirim apresenta baixíssima relevância. O reordenamento está visualmente apresentado na figura 29.

Tabela 3 - Valores ponderados da relação entre a ocorrência de enxurradas e a área das bacias hidrográficas:

Bacia Hidrográfica	% Enxurrada	Valor Ponderado
Alto Jacuí	25,59	1,57
Baixo Jacuí	88,75	0,99
Caí	5,50	0,89
Pardo	10,04	2,20
Sinos	5,74	1,24
Taquari-Antas	31,10	0,94
Vacacaí	3,11	0,24

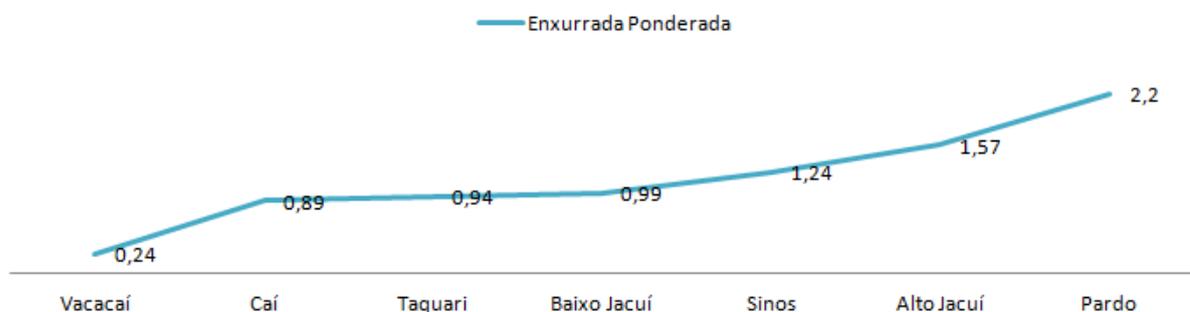


Figura 29 - Gráfico de valores ponderados em função da área para episódios de enxurrada.

A figura 30 espacializa através dos círculos os valores ponderados dos episódios de enxurrada para cada uma das bacias analisadas. Segundo Jonkman &

Kelman (2005), os bancos de dados globais apresentam algumas limitações em comum, devido às diferenças regionais, que estão associadas às características geofísicas e socioeconômicas, à qualificação e experiência das instituições responsáveis pela prevenção e resposta aos desastres, à disponibilidade e acurácia de dados demográficos e à ausência ou omissão de registros decorrentes de pressões políticas. Por isso, este trabalho também se presta a sugerir a eficiência do inventário apresentado.

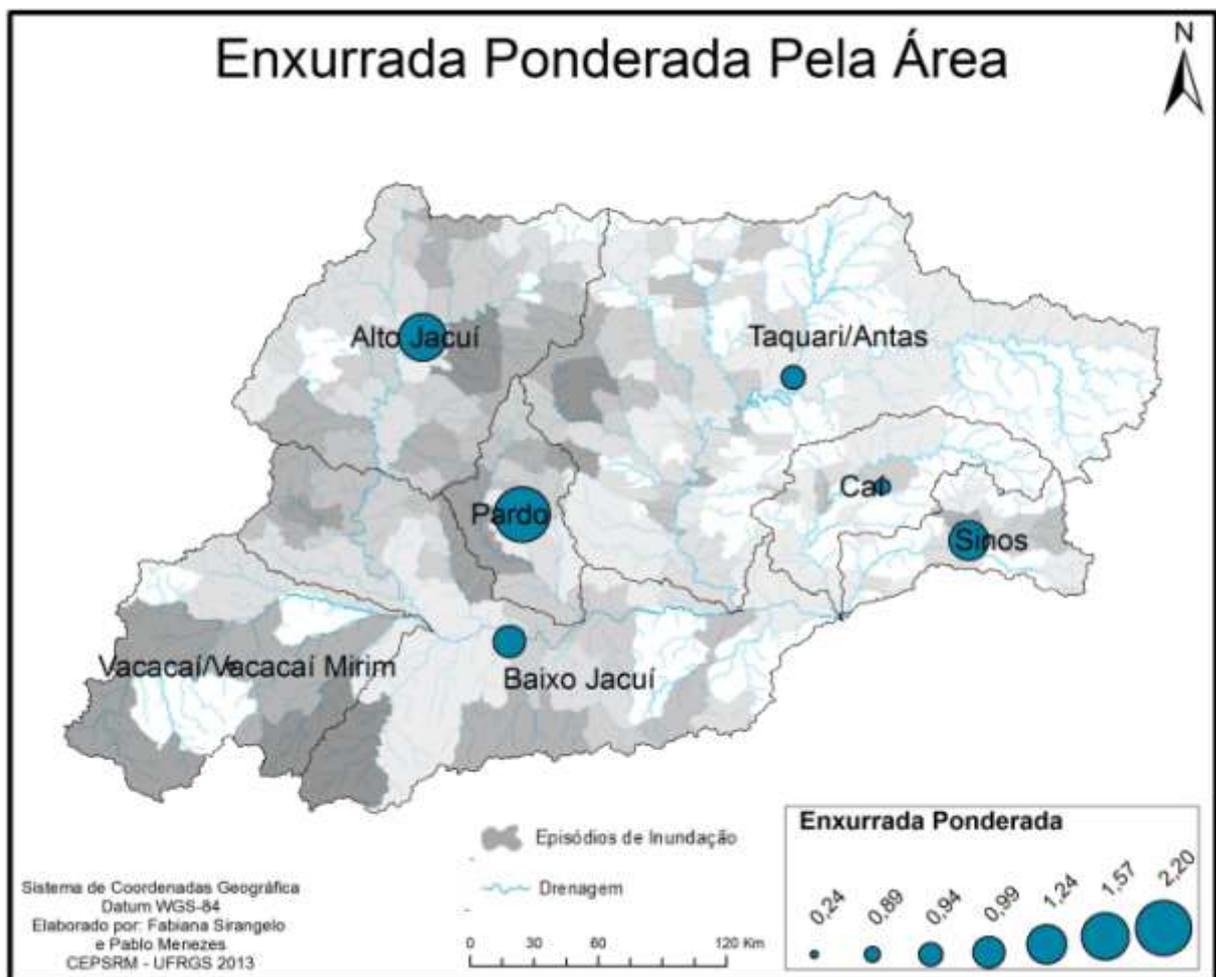


Figura 30 - Mapa de distribuição dos episódios de inundação e sua relação ponderada com a área da bacia hidrográfica.

Os gráficos de dispersão e os valores obtidos de índice de correlação entre a área das bacias e os valores ponderados pela área estão apresentados na figura 31. Conforme anteriormente observado, os valores não ponderados apresentam valores de correlação muito próximos de 1, que indicam quase linearmente a relação entre maiores áreas e maior número de eventos. Porém quando ponderados os valores,

se observa que as bacias menores tendem, mesmo que com índice de correlação baixos. O valor de $-0,352$ aponta que as menores bacias apresentam maior importância na ocorrência dos eventos de inundação. Para os eventos de enxurrada este valor passa para $-0,201$.

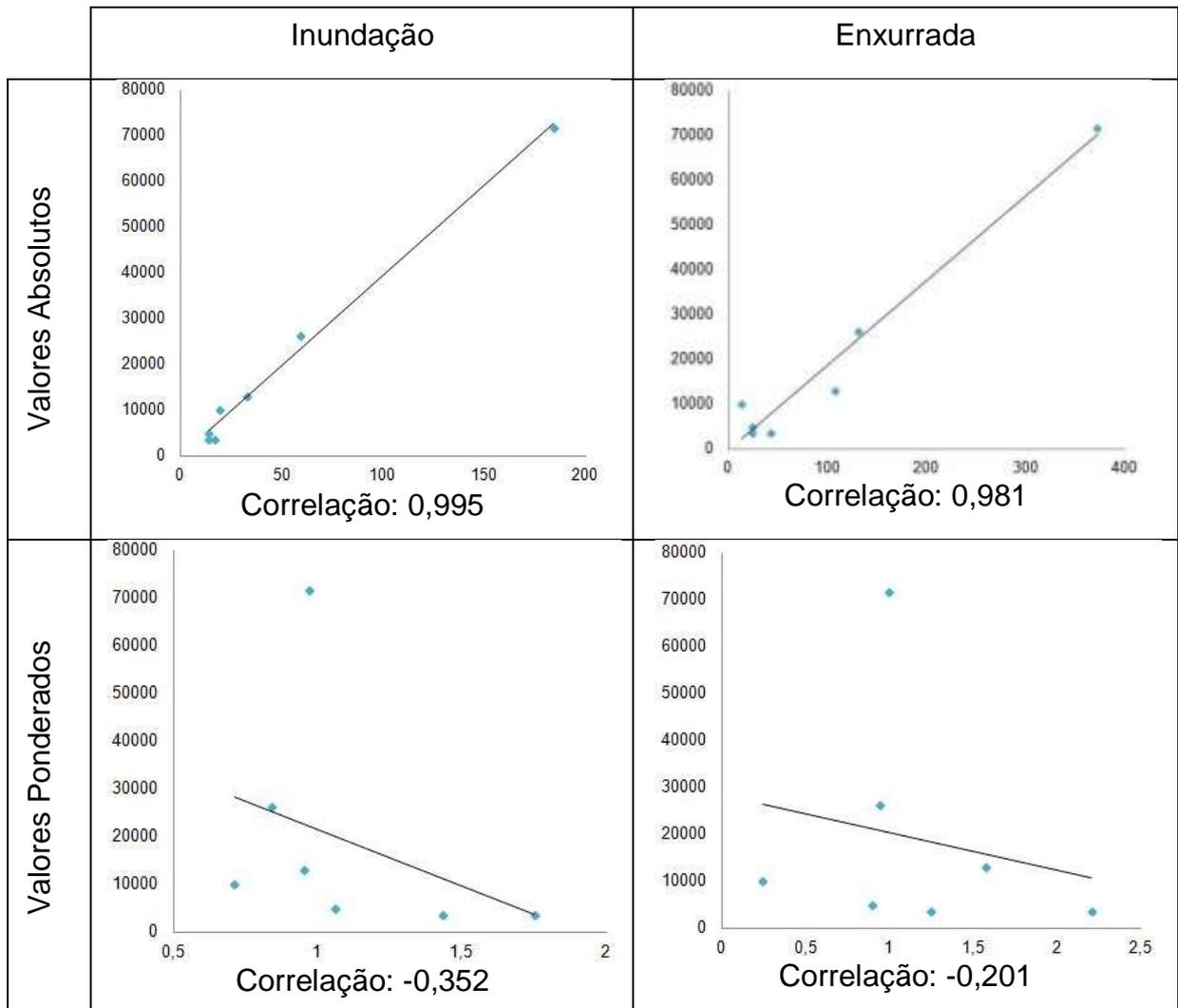


Figura 31 - Gráficos de dispersão e índice de correlação: Área da Bacia.

4.3 Variáveis Morfométricas

4.3.1 Análise Linear da Bacia Hidrográfica

A utilização dos dados SRTM para a extração de variáveis morfométricas é considerado fator facilitador em função da praticidade na obtenção dos dados e da aplicabilidade e comunicação com os softwares utilizados.

É importante frisar que alguns dos valores obtidos podem ser superestimados ou subestimados, em função da escala de trabalho. A partir do pixel com resolução de 90m, por exemplo, é possível que o cálculo do perímetro apresente problemas, que dependendo da escala de trabalho podem prejudicar o resultado final, em função do problema de denteamento gerado nos limites das áreas trabalhadas, conforme mostra a figura 32:

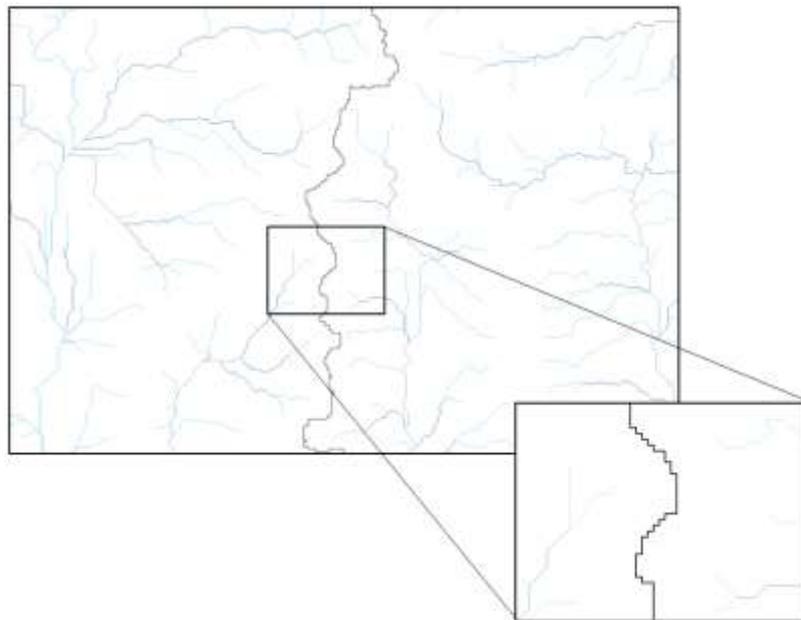


Figura 32- Efeito de "denteamento" apresentado nos dados SRTM.

O mesmo ocorre para todos os cálculos lineares e areais aplicados neste trabalho, porém considera-se que os benefícios da utilização dos dados SRTM compensam o problema levantado. Além disso, para escala de trabalhos regionais estas possíveis alterações são consideradas desprezíveis, especialmente no que tange a análise comparativa, visto que todos os valores obtidos partem da mesma base de dados e apresentarão a mesma margem de erro associada ao denteamento dos pixels.

Os valores obtidos para o índice de correlação quando comparados ao perímetro das bacias hidrográficas estão apresentados na figura 33 e seguem a lógica dos valores obtidos para a área da bacia. Quando correlacionados, o perímetro da bacia aos valores absolutos de ocorrência dos dois eventos observa-se índices elevados, novamente bem próximos a 1. Porém, ao se analisar os valores ponderados, se observa um valor satisfatório que diz respeito aos eventos de

inundação ponderados, o que indica que quanto menor for o perímetro da bacia analisada maior será a incidência de eventos de inundação. Este resultado corrobora a literatura, que diz que bacias menores tendem a apresentar padrões homogêneos de chuvas, e conseqüentemente são mais sujeitas a inundações.

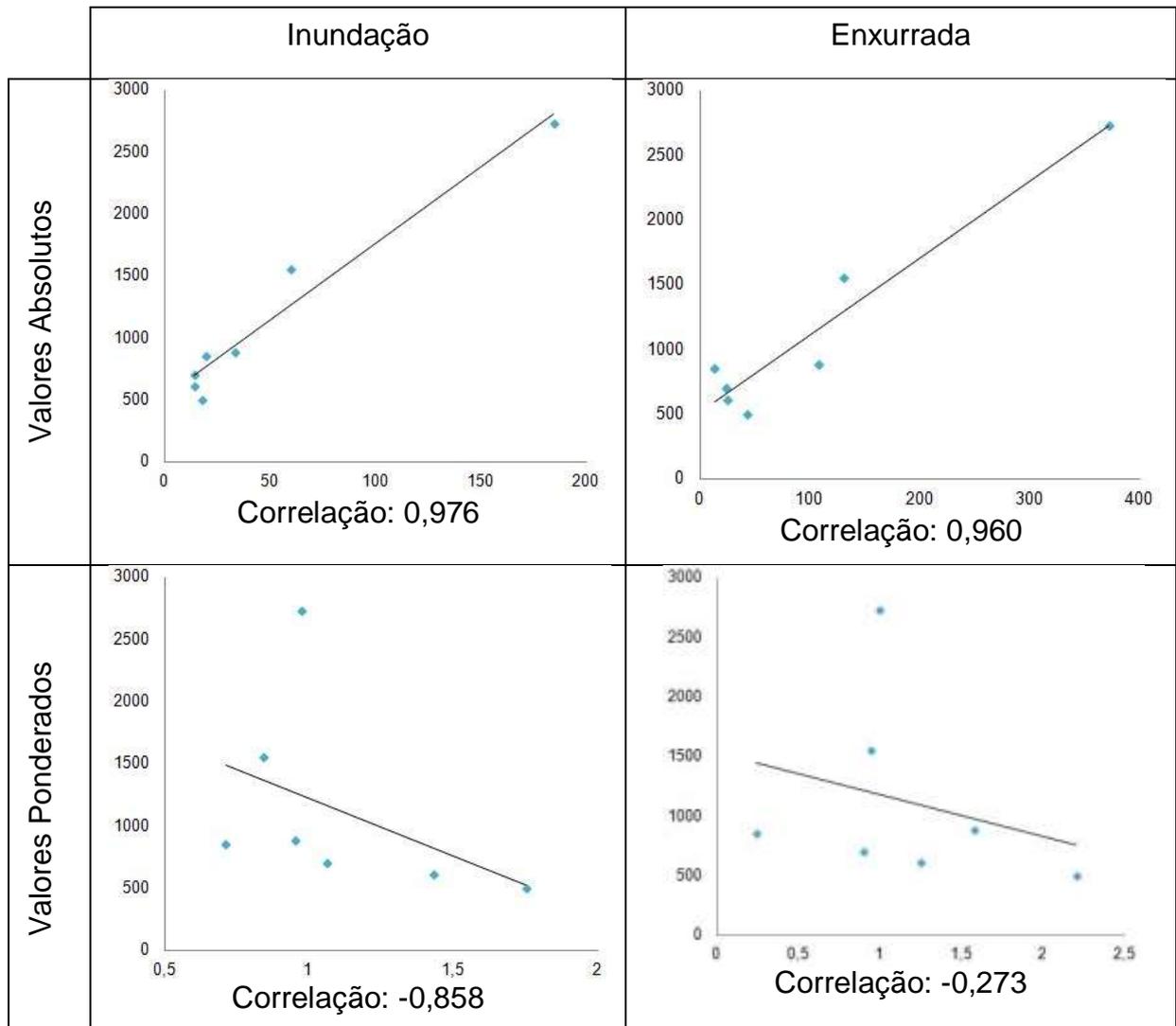


Figura 33 - Gráficos de dispersão e índice de correlação: Perímetro da Bacia.

4.3.1.1 Tamanho do Rio Principal (L)

Etapa posterior a hierarquização das drenagens, a metodologia adotada para a determinação do rio principal calcula a distância que se estende ao longo do curso d'água desde a desembocadura até determinada nascente.

Neste trabalho, portanto, para a definição do rio principal se utiliza que "em cada bifurcação, optar pelo ligamento de maior magnitude" (valores de "flow accumulation" maiores). Christofletti (1980) defende que este critério é prático em

vista do funcionamento hidrológico da bacia. Outros critérios podem ser utilizados, apresentando diferenças pequenas em relação ao resultado final, porém significativos no que tange as pequenas bacias hidrográficas.

Os valores obtidos para cada uma das bacias hidrográficas estão apresentados na tabela 6, onde se destaca o Baixo Jacuí. Para o cálculo do tamanho do Rio Jacuí foi considerada a nascente do rio, seguindo pela bacia contribuinte do Alto Jacuí, totalizando uma extensão de 650 km até o exutório (Tabela 4).

Tabela 4 - Área, perímetro e comprimento do rio principal:

Bacia Hidrográfica	Área (km ²)	Perímetro (km)	Rio Principal (km)
Alto Jacuí	13073	886	284
Baixo Jacuí	71619	2726	650
Caí	4956	707	237
Pardo	3662	500	187
Sinos	3707	616	160
Taquari/Antas	26359	1559	579
Vacacaí	10046	851	271

Os gráficos de dispersão, figura 29, refletem a relação entre o comprimento do rio principal e a ocorrência de inundações e enxurradas, a partir dos valores absolutos disponibilizados pela Defesa Civil e também relacionados aos valores ponderados, em função da área de cada bacia, para cada tipo de evento.

Em relação ao tamanho do rio principal os resultados apresentaram alto grau de correlação entre o número de ocorrência por bacia, para ambos os eventos analisados, sendo de 0,857 para inundações e 0,856 para enxurradas.

Esse grau de correlação corrobora com a proposta de que rios maiores estão inseridos em bacias de áreas maiores, o que acarreta em um grande número de eventos contabilizados, porém sem representar a real importância deste no que define as características da bacia. Este problema é bem ilustrado com o exemplo da bacia do Taquari/Antas para o caso das inundações, que apresenta um comprimento do rio principal com grande extensão e registros de ocorrências significativos, porém não pode ser considerada a bacia com mais suscetibilidade a inundações; ocupando

posição intermediária quando considerados os valores de ocorrência ponderados pela área.

Para os valores ponderados pela área, os índices de correlação apresentaram-se muito baixos e inversos ao esperado. Os valores de correlação apresentaram-se negativos, indicando que quanto menor o tamanho do rio principal mais relevantes são as ocorrências de inundações (-0,522) e enxurradas (-0,293) para as bacia analisadas.

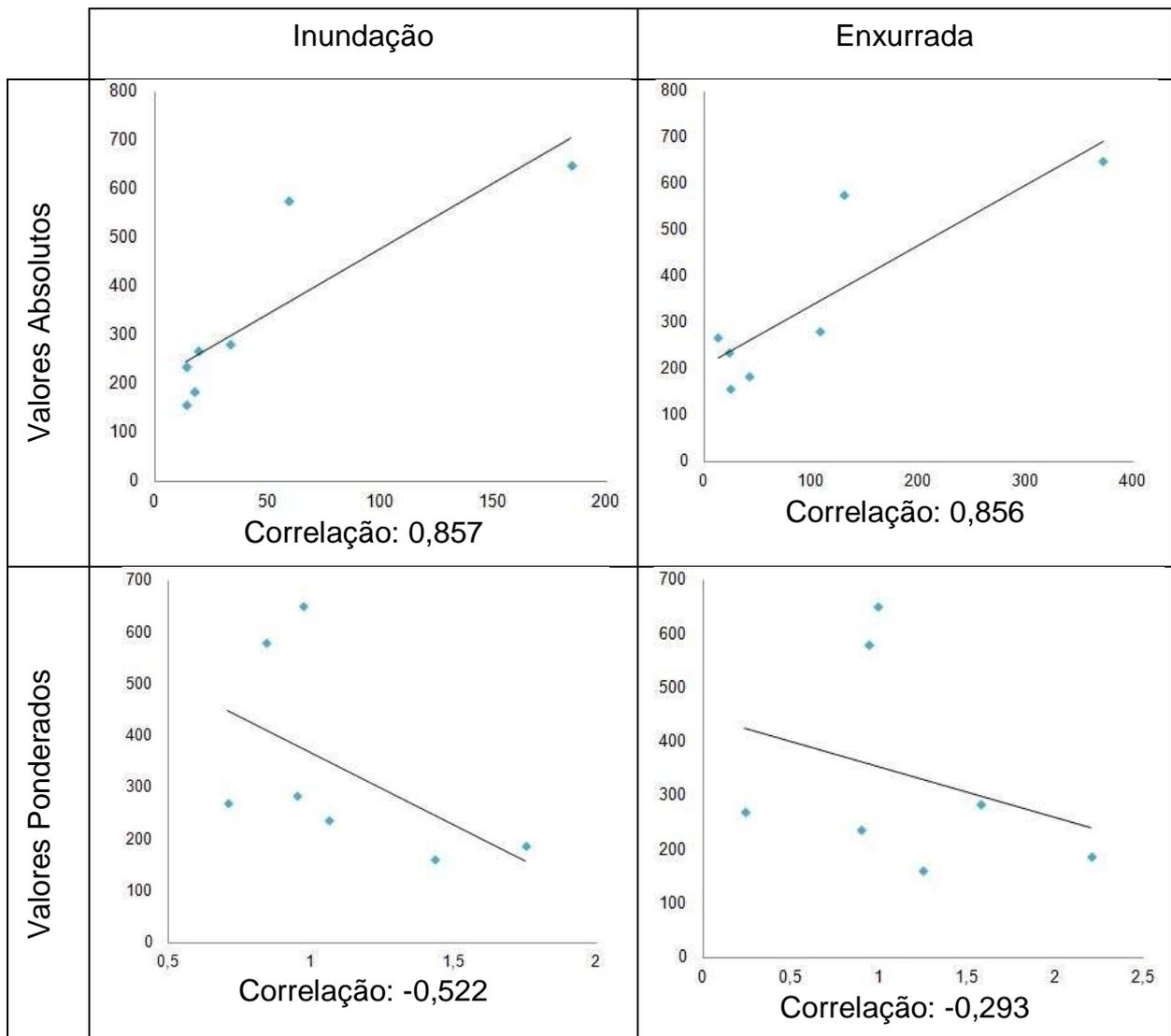


Figura 29: Gráficos de dispersão e índice de correlação: Tamanho do Rio Principal.

4.3.1.2 Índice de Sinuosidade - Is

O índice de sinuosidade (I_s) é a razão encontrada do comprimento do canal principal da bacia (L), calculado por uma medida longitudinal ou distância vetorial

(dv), com a medida em linha reta da distância da nascente à foz. A equação utilizada é apresentada a seguir:

$$Is = \frac{L}{dv}$$

O critério de medição da distância vetorial está ilustrado na figura 34, onde se calcula a partir de uma linha reta paralela ao eixo do rio principal:



Figura 34 - Distância vetorial do rio.

A sinuosidade dos canais é influenciada pela carga de sedimentos, pela compartimentação geomorfológica, estruturação geológica e pela declividade dos canais (Lana, 2001). Alves e Castro (2003) relatam que o este índice indica o grau de sinuosidade do canal, podendo ser encaixado ou divagante. Quanto maior for seu valor, menor a velocidade do escoamento.

Valores próximos a 1 indicam que o canal tende a ser retilíneo. Já os valores superiores a 2 sugerem canais tortuosos. Os valores intermediários indicam formas transicionais, regulares e irregulares (Tabela 5).

Tabela 5 - Valores de classificação do índice de sinuosidade:

Índice de Sinuosidade	Interpretação
Igual a 1,0	Canal tende a ser retilíneo
Valores Intermediários	Sinuoso.
Maior que 2,0	Canais tortuosos.

A figura 35 mostra os valores de sinuosidade correspondentes aos diferentes modelos ilustrados, com o primeiro tendendo a ser retilíneo, o segundo classificado como sinuoso e o terceiro representando um rio tortuoso.

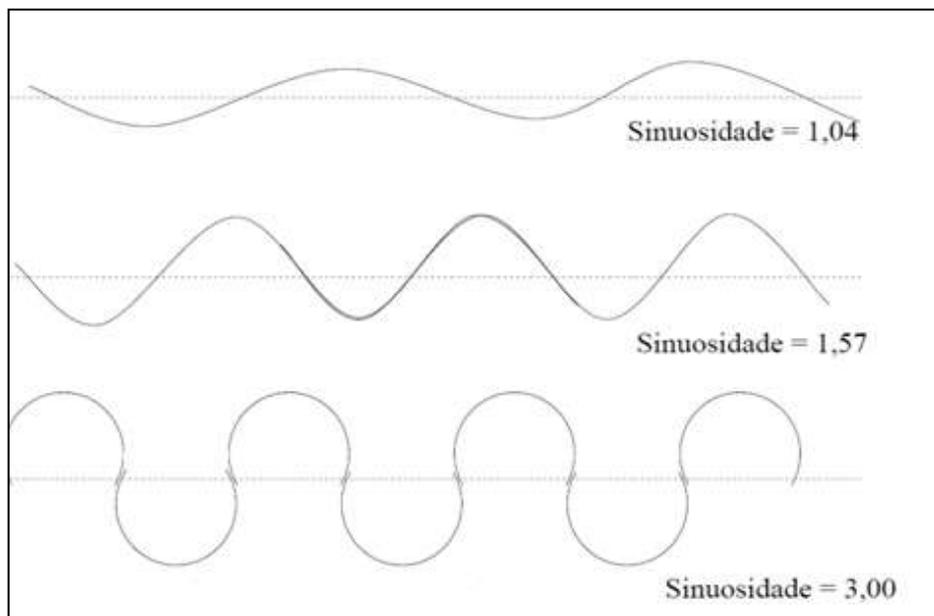


Figura 35 - Valores de sinuosidade para modelos com diferentes padrões.

Os resultados obtidos pela análise morfométricas das sete bacias hidrográficas estão apresentados na Tabela 6, onde se observa que os canais principais estão classificados em sua maioria como tortuosos, com destaque para as bacias do Taquari/Antas e do Baixo Jacuí.

Tabela 6 - Valores obtidos para o índice de sinuosidade.

Bacia Hidrográfica	Índice de Sinuosidade	Interpretação
Alto Jacuí	1,86	Sinuoso
Baixo Jacuí	3,08	Tortuoso
Caí	2,12	Tortuoso
Pardo	1,58	Levemente Sinuoso
Sinos	1,46	Levemente Sinuoso
Taquari/Antas	3,09	Tortuoso
Vacacaí	2,09	Tortuoso

Importante salientar que, especialmente para o cálculo da bacia do Baixo Jacuí, a metodologia proposta de utilizar o comprimento axial apresenta problemas, dada a disposição das bacias contribuintes em relação ao rio principal, apontando valores de sinuosidade muito altos, embora o padrão do rio não seja condizente com o alto valor obtido com a aplicação da fórmula.

Valores maiores indicam menor velocidade de escoamento. Esta afirmação determina que os valores de correlação esperados sejam positivos.

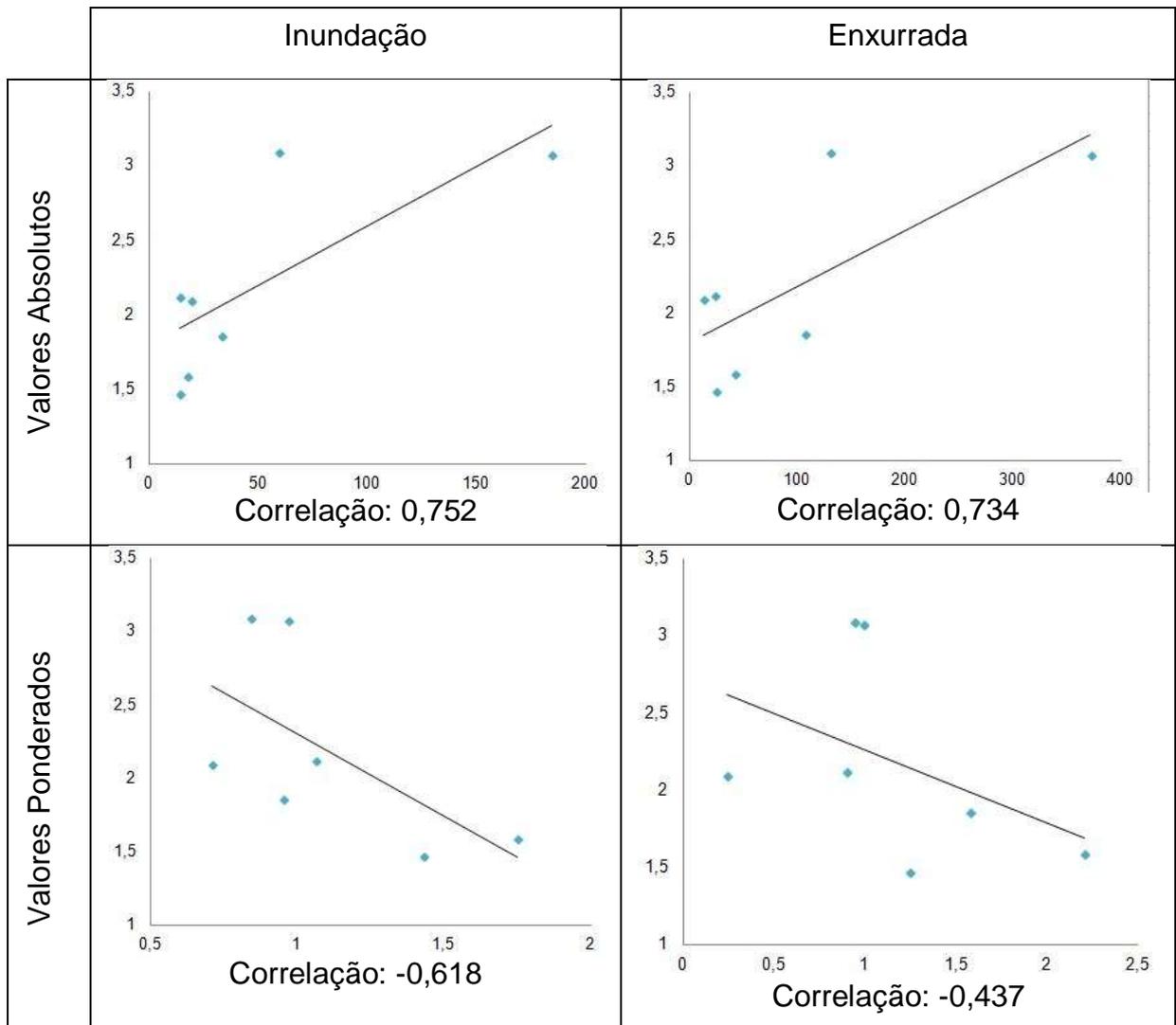


Figura 36 - Gráficos e valores de correlação do parâmetro: Índice de Sinuosidade.

Da mesma forma que para comprimento do rio principal, o coeficiente de correlação obtido em comparação aos valores dos dados diretamente obtidos da Defesa Civil apresentou-se mais elevado do que coeficiente de correlação obtido com os valores ponderados pela área.

Os valores de correlação obtidos para os valores absolutos indicam que rios mais sinuosos apresentam tendência à ocorrência de inundações e enxurradas, com índices de 0,752 e 0,734 respectivamente.

Quando analisados os resultados ponderados pela área foram obtidos índices de correlação negativos, de -0,618 para inundações e -0,437 para enxurradas, sendo estes inversamente proporcionais aos valores esperados, visto que nos

pontos de sinuosidade a velocidade de escoamento cai, provocando um acúmulo de água nestes pontos.

4.3.1.3 Relação de Bifurcação (Rb)

Definida por Horton (1945) como a relação entre o número total de canais de certa ordem e o número total de canais de ordem imediatamente superior, e seu resultado nunca pode ser inferior a 2. A equação a seguir mostra o cálculo da relação de bifurcação:

$$Rb = \frac{Nu}{Nu'}$$

Onde Nu é o número de segmentos de determinada ordem e Nu' é o número de segmentos de ordem imediatamente superior. Grandes variações dos valores de relação de bifurcação sugerem se tratar de bacias não equilibradas. Quanto maior a Rb média maior é o grau de ramificação da rede de drenagem de uma bacia e, portanto, maior a tendência para picos de cheia.

França (1968) observou em estudo de drenagens em unidades de solo que a relação variou de acordo com a natureza do solo, mostrando que o comportamento hidrológico é influenciado pela mesma. Razões de ramificação mais altas foram observados para solos menos permeáveis, enquanto os valores mais baixos estavam associados a solos menos permeáveis.

Segundo Strahler (1964) a relação de bifurcação varia normalmente entre 3,0 e 5,0. Este valor é adimensional, e tende a apresentar valores homogêneos, variando pouco de região para região. Os valores muito altos deste índice estão associados a regiões de vales rochosos e escarpados.

Para cada uma das bacias foi obtido o índice de bifurcação entre cada uma das ordens da hierarquia fluvial, e logo calculada a média destes valores. Em relação aos resultados, a média da relação de bifurcação apresentou valores maiores correlacionados aos eventos de enxurrada do que aos de inundação.

Alto Jacuí - Média: 4,15

Ordem	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a	8 ^a
Nº Rios	3923	810	175	34	7	3	1	-
Rb	-	4,48	4,62	5,14	4,84	3,5	2,33	-

Baixo Jacuí - Média: 4,15

Ordem	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a	8 ^a
Nº Rios	20816	4469	972	205	44	14	4	1
Rb	-	4,65	4,59	4,52	4,65	3,14	3,5	4

Caí - Média: 4,27

Ordem	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a	8 ^a
Nº Rios	1344	293	64	14	3	1	-	-
Rb	-	4,58	4,57	4,57	4,66	3	-	-

Pardo - Média: 4,27

Ordem	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a	8 ^a
Nº Rios	1107	247	53	10	2	1	-	-
Rb	-	4,48	4,60	5,30	5	2	-	-

Sinós - Média: 3,82

Ordem	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a	8 ^a
Nº Rios	1017	229	51	13	3	1	-	-
Rb	-	4,44	4,49	3,92	3,25	3	-	-

Taquari-Antas - Média: 4,42

Ordem	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a	8 ^a
Nº Rios	7356	1545	330	70	16	4	1	-
Rb	-	4,76	4,68	4,71	4,37	4	4	-

Vacacaí/Vacacaí Mirim - Média: 3,95

Ordem	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a	8 ^a
Nº Rios	2959	650	156	39	11	2	1	-
Rb	-	4,55	4,16	4	3,54	5,50	2	-

Os valores de correlação com a relação de bifurcação por bacia apresentam valores muito baixos, próximos de zero. Este resultado sugere que não existe relação alguma entre as variáveis analisadas, conforme é possível observar nos gráficos da Figura 37.

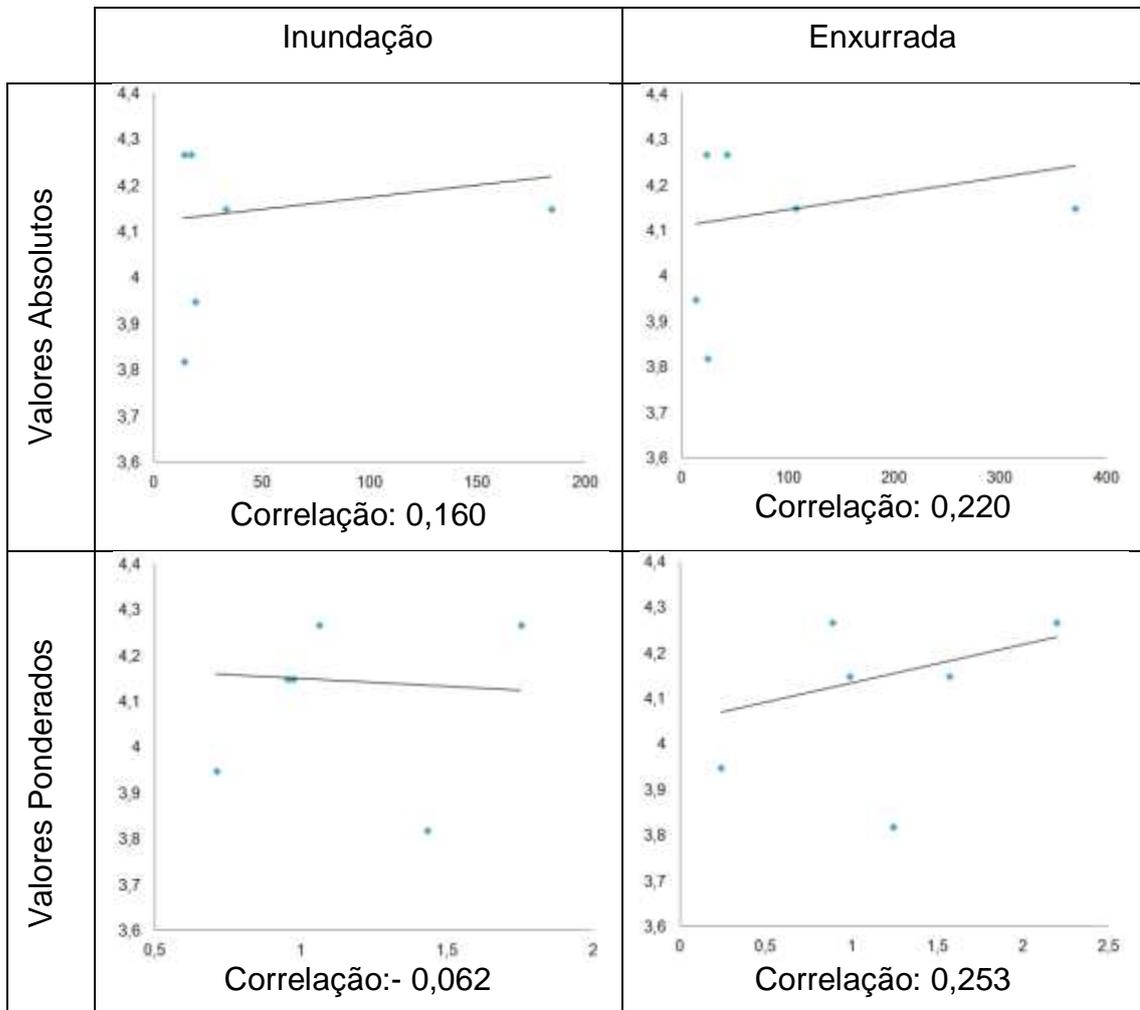


Figura 37 - Gráficos e valores de correlação do parâmetro: Relação de Bifurcação.

4.3.2 Análise Areal da Bacia Hidrográfica

São os índices obtidos através de medições planimétricas e lineares. A área serve como variável básica para análise, combinada a outras variáveis. O comprimento da bacia estabelece relação com a forma da bacia, que associado às variáveis de área e perímetro permite evidenciar uma maior diversidade de ambientes. Área da bacia (A) compreende toda a área drenada pelo sistema fluvial.

4.3.2.1 Gradiente dos Canais

É a relação entre a diferença máxima de altitude entre o ponto de origem do canal e o ponto de foz, e o comprimento do respectivo segmento fluvial. A sua finalidade é indicar a declividade dos cursos d'água, no caso para o rio principal. Este parâmetro reflete o potencial de energia do canal fluvial, onde quanto maior for o gradiente maior é o potencial de transporte do rio. A tabela 7 mostra os valores obtidos para cada uma das sete bacias hidrográficas analisadas:

Tabela 7 - Gradiente do canal principal:

Bacia Hidrográfica	Gradiente do Canal
Alto Jacuí	2,42
Baixo Jacuí	1,93
Caí	4,32
Pardo	3,82
Sinos	6,15
Taquari/Antas	2,16
Vacacaí	0,62

A distribuição espacial deste parâmetro está intimamente ligada às condições de topografia da região estudada, onde se observa que as bacias localizadas na porção nordeste apresentam os maiores valores para o gradiente, enquanto que as bacias localizadas próximas a Depressão Central do RS apresentam valores baixos deste gradiente. Os valores apontados na correlação deste parâmetro e dos eventos analisados estão apresentados na Figura 38.

Os resultados esperados, de acordo com a teoria anteriormente descrita, devem apontar um índice de correlação positivo. Para os valores absolutos obtidos a partir do inventário isto não ocorre, porém quando ponderados em função da área da bacia hidrográfica é possível observar um resultado bem satisfatório para os eventos de inundação.

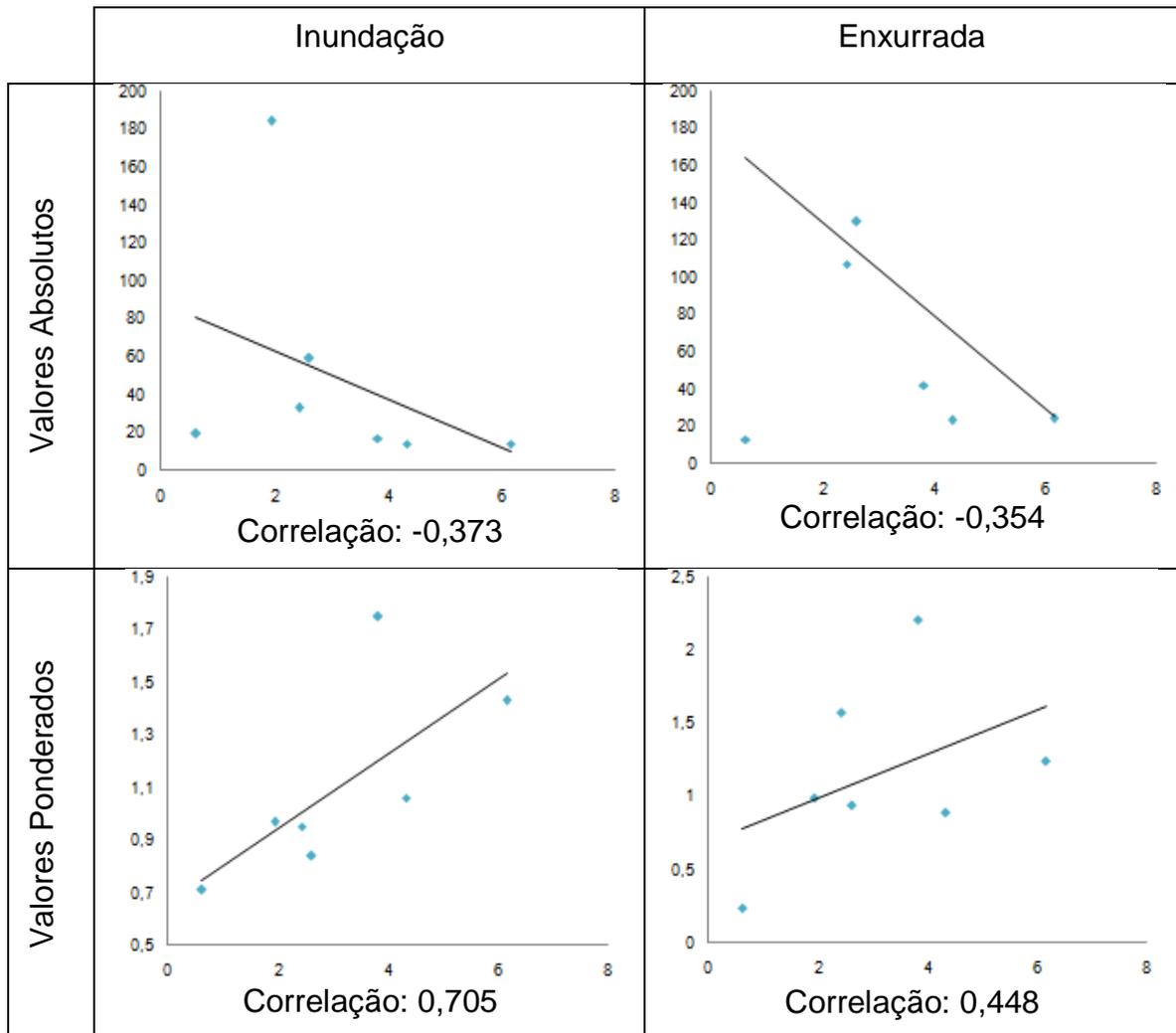


Figura 38 - Gráficos e valores de correlação do parâmetro: Gradiente de Canais.

Além disso, o comprimento da rampa (ou seja, a extensão do rio) é tão importante quanto o declive, em função de que ao longo do percurso do rio a velocidade de escoamento vai aumentando progressivamente. As relações entre este índice e os episódios de inundação e enxurrada possuem também relação com as características da calha do rio, o que não está considerado neste estudo, dada a impossibilidade da obtenção destas características através da metodologia utilizada de sensoriamento remoto.

Para esta variável é possível que uma subdivisão do rio principal, em trechos mais uniformes, possivelmente venha a apresentar coeficientes de correlação bem mais consistentes, além das características do perfil transversal a longo do leito do rio.

4.3.2.4 Forma da Bacia

É uma das características da bacia mais difíceis de serem expressas em termos quantitativos. Ela tem efeito sobre o comportamento hidrológico da bacia, como por exemplo, no tempo de concentração (T_c).

4.3.2.4.1 Índice de Circularidade - C

Proposto por Miller (1953) e citado por Strahler (1958) - apresenta a relação entre a área total da bacia e a área do círculo de mesmo perímetro. O valor máximo encontrado é 1,0, quando o perímetro da bacia corresponder ao perímetro do círculo.

$$C = \frac{A}{A_c}$$

Índice de Circularidade (C) onde A- área da bacia considerada; A_c - área do círculo de perímetro igual ao da bacia considerada.

O índice de circularidade tem a finalidade de comparar a forma da bacia em relação à de um círculo, considerado como a expansão areal melhor relacionada com o escoamento fluvial (Christofolletti, 1970). Em princípio podemos considerar que quanto maior for o referido índice, a concentração das águas carregadas pelos afluentes será mais rápida, e as cheias têm a possibilidade de serem mais brutais e diferenciadas.

Salienta-se que bacias com forma circular, apresentam maiores possibilidades de chuvas intensas ocorrerem simultaneamente em toda a sua extensão, concentrando grande volume de água no tributário principal.

A partir disso então os valores de correlação devem ser positivos, indicando que quando maior for o índice de circularidade da bacia maior é tendência de eventos de inundação e enxurrada ocorrerem. A tabela 8 mostra os valores esperados para cada forma de bacia:

Tabela 8 - Valores de referência para o índice de circularidade:

Índice de Circularidade	Interpretação
< 0,51	Bacia alongada, favorecendo o escoamento.
0,51	Escoamento moderado.
> 0,51	Bacia circular, favorecendo os processos de inundação.

A tabela 9 apresenta os índices obtidos para as sete bacias analisadas e a respectiva interpretação para tais valores.

Tabela 9 - Índice de Circularidade:

Bacia Hidrográfica	Índice de Circularidade	Interpretação
Alto Jacuí	0,208	Bacia alongada.
Baixo Jacuí	0,121	Bacia alongada.
Caí	0,124	Bacia alongada.
Pardo	0,183	Bacia alongada.
Sinos	0,122	Bacia alongada.
Taquari-Antas	0,136	Bacia alongada.
Vacacaí	0,179	Bacia alongada.

Todas as sete bacias analisadas apresentam valores de índice de circularidade extremamente baixos, sugerindo nessas áreas a característica de bacias alongadas, favorecendo o escoamento fluvial.

Este índice possivelmente se aplica a bacias com rios de menores ordens, visto que as grandes bacias podem apresentar diversas direções de seus contribuintes, gerando uma área que tende a torna-se menos circular em função dos “leques” de suas cabeceiras.

Em função de este trabalho apresentar uma proposta comparativa, e não com viés descritivo, em relação ao comportamento das bacias hidrográficas, foram calculadas as correlações do índice de circularidade e a ocorrência dos eventos de inundação e enxurrada, apresentados na figura 39.

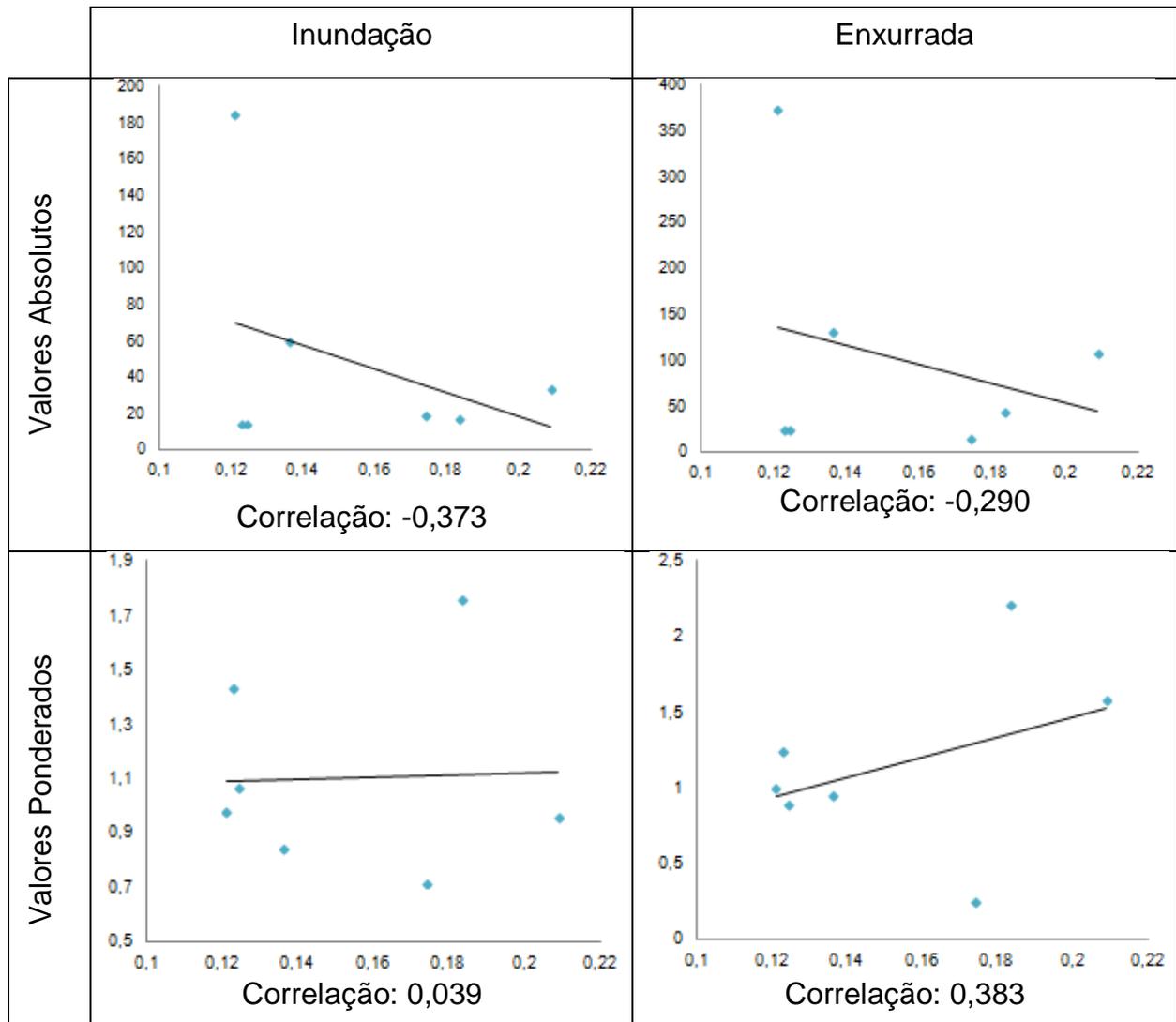


Figura 39 - Gráficos e valores de correlação do parâmetro: Índice de Circularidade.

Estes resultados ilustram bem o comportamento do escoamento diferenciado entre os eventos analisados, quando correlacionados aos valores ponderados pela área. Para os eventos de inundação, que não estão diretamente associados a velocidades de concentração do excedente hídrico, com padrão de comportamento gradual, o índice de correlação encontrado pode ser considerado inexistente. Enquanto que quando correlacionado com os episódios de enxurrada, onde existe uma concentração veloz do excedente hídrico provocando uma inundação brusca, o

valor de correlação apresentou-se coerente, com 0,383 para os eventos de enxurrada ponderada pela área.

4.3.2.4.2 Fator de Forma - Kf

É a relação entre a área da bacia e o quadrado de seu comprimento axial. Mede-se o comprimento axial da bacia (L) quando se segue o curso d'água mais longo desde a foz até a cabeceira mais distante.

$$Kf = \frac{A}{L^2}$$

A figura a seguir mostra o comportamento da vazão em função do tempo, num comparativo da influência da forma da bacia no seu comportamento hidrológico: a) bacia compacta ou arredondada; b) bacia alongada ou elíptica; c) bacia ramificada (Figura 40).

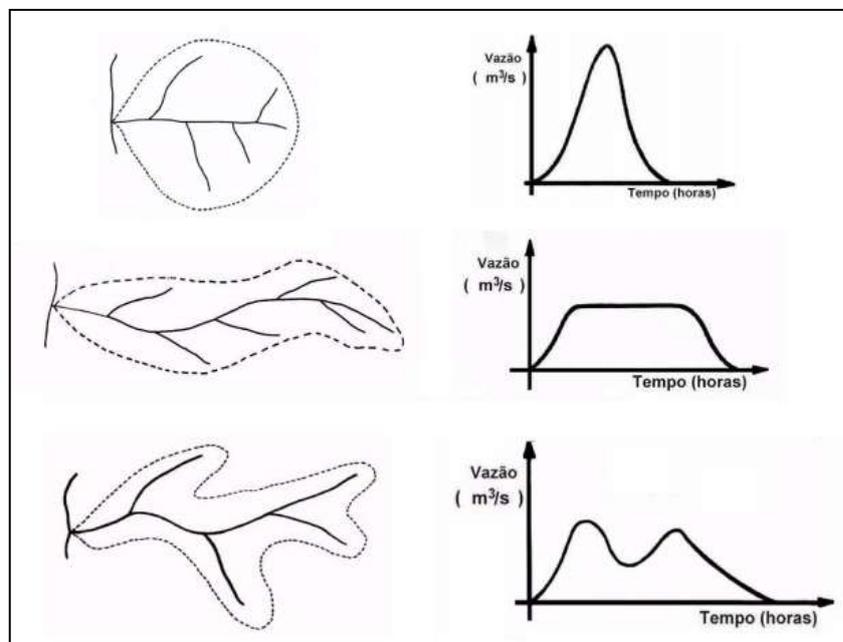


Figura 40 - Gráfico de vazão para diferentes formas de bacia hidrográfica.

Fonte: Silva, 2011.

Uma bacia com fator de forma baixo é menos sujeita a enchentes que outra de mesmo tamanho, porém com maior fator de forma. Isso se deve ao fato de que em uma bacia estreita e longa, com fator de forma baixo, há menos possibilidade de ocorrência de chuvas intensas cobrindo simultaneamente toda sua extensão.

A Tabela 10 apresenta os valores de referência para este parâmetro comparativo, enquanto que a Tabela 11 apresenta os valores obtidos para as sete bacias hidrográficas analisadas:

Tabela 10 - Suscetibilidade a enchentes em função do fator de forma:

Fator de Forma	Interpretação
1,0 - 0,75	Sujeito a enchentes.
0,75 - 0,50	Tendência mediana.
< 0,50	Menor tendência a enchentes.

Tabela 11 - Resultados de fator de forma para a Região Hidrográfica do Guaíba:

Bacia Hidrográfica	Fator de Forma	Interpretação
Alto Jacuí	0,55	Mediana
Baixo Jacuí	0,16	Baixa
Caí	0,39	Baixa
Pardo	0,26	Baixa
Sinos	0,30	Baixa
Taquari/Antas	0,74	Mediana/Alta
Vacacaí	0,59	Mediana

Este resultado deveria apresentar valores de correlação positivos, dado que bacias com maior fator de forma estão mais sujeitas e enchentes do que as bacias com menores valores. O que se pode observar, tanto para o inventário absoluto quando para os valores de ocorrência ponderados pela área, é exatamente o contrário, onde quanto maior o fator de forma observado menos eventos de

inundação e enxurrada ocorrem. A Figura 41 apresenta os gráficos de dispersão e os valores obtidos para o índice de correlação:

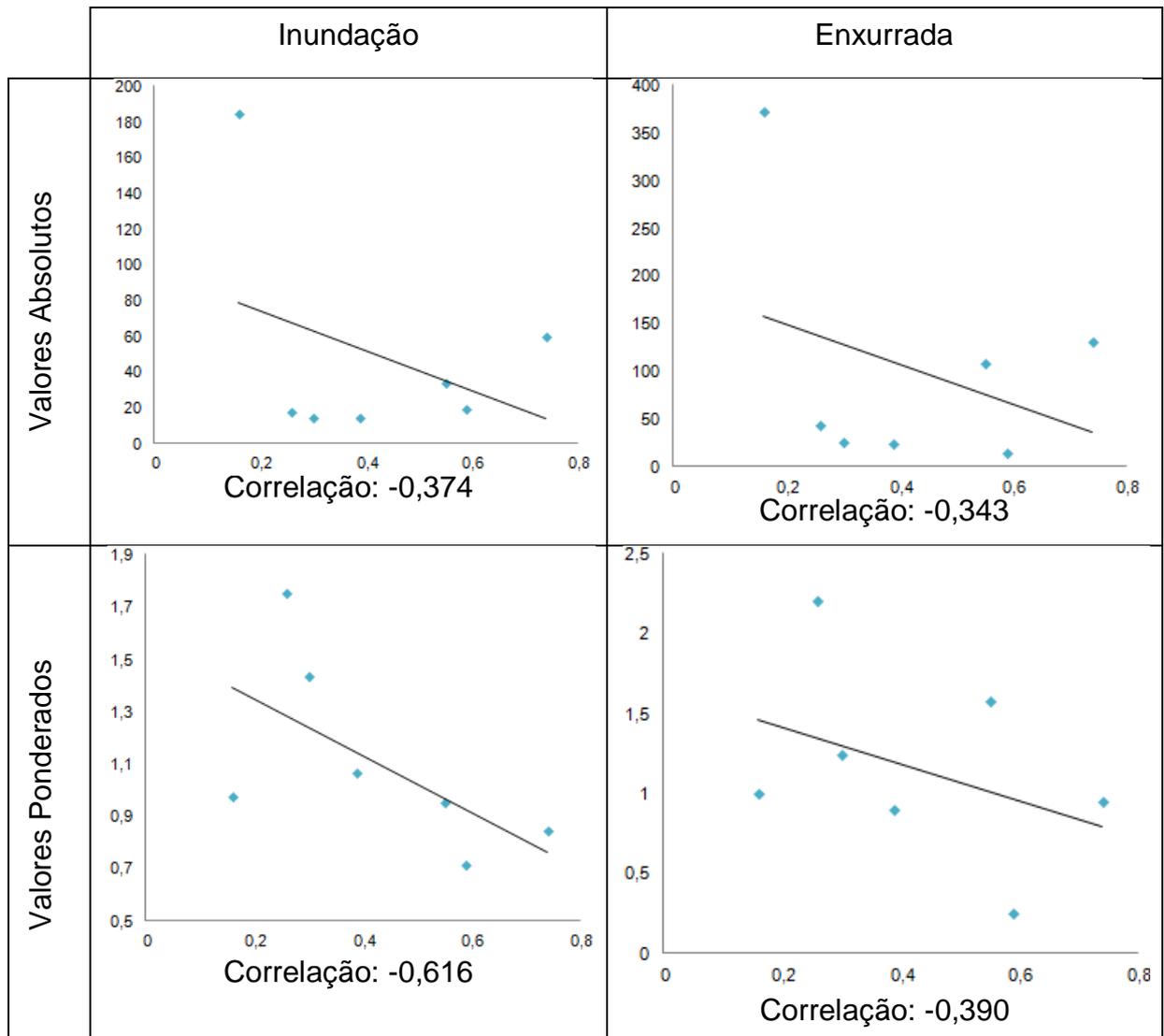


Figura 41 - Gráficos e valores de correlação do parâmetro: Fator de Forma.

Os valores encontrados, negativos, mostram que este parâmetro morfométrico não deve ser utilizado na caracterização de bacias com suscetibilidade aos eventos analisados.

4.3.2.5 Densidade de Cursos D'Água

Apresenta a relação existente entre o número de cursos d'água e a área da bacia hidrográfica. Sua finalidade é comparar o número e a frequência de cursos existentes em uma área.

4.3.2.5.1 Densidade Hidrográfica – Dh

Definida por Horton (1945) com a denominação de frequência de rios. É a relação existente entre o número de rios ou cursos d'água e a área da bacia hidrográfica. A finalidade deste índice é comparar a frequência ou a quantidade de cursos d'água existentes em uma área de tamanho padrão, por exemplo, o km². Horton definiu que número de rios é a soma total de todas as parcelas concernentes aos números de segmentos de cada ordem.

$$Dh = \frac{N}{A}$$

Dh = densidade dos rios; N= número total de rios ou cursos d'água; A = área da bacia.

Christofolletti (1980) considera a densidade hidrográfica uma variável de grande importância por representar o comportamento hidrológico de uma determinada área em um de seus aspectos fundamentais, que é a capacidade de gerar novos cursos de água. A Tabela 12 mostra os valores obtidos, e a Figura 42 os gráficos de dispersão e seus coeficientes de correlação obtidos.

Tabela 12 - Valores de densidade hidrográfica para as bacias hidrográficas da Região Hidrográfica do Guaíba:

Bacia Hidrográfica	Densidade Hidrográfica
Alto Jacuí	0,297
Baixo Jacuí	0,288
Caí	0,270
Pardo	0,30
Sinos	0,272
Taquari/Antas	0,287
Vacacaí	0,292

Os valores esperados para esta variável são positivos, dado que uma maior quantidade de cursos d'água sugere que exista uma menor permeabilidade do solo, gerando então escoamento superficial elevado quando comparado à bacias com densidades hidrográficas menores. Os índices de correlação encontrados são considerados muito baixos, próximos de zero, provavelmente em função da importância de que outros fatores vão exercer na geração destes tipos de episódios, como pluviosidade, pedologia, geomorfologia, entre outros. Sendo este parâmetro pouco relevante quando observado isoladamente.

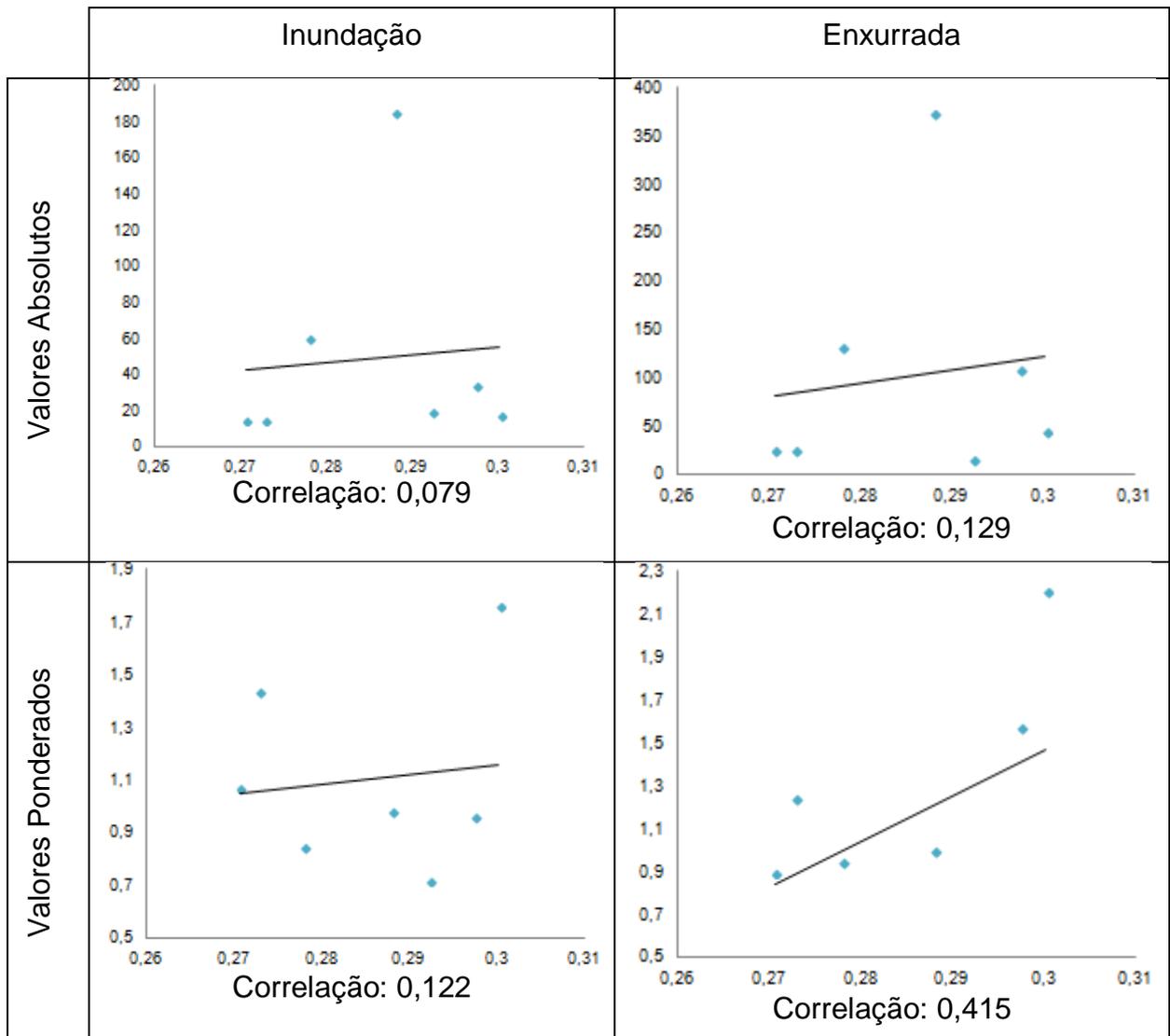


Figura 42 - Gráficos e valores de correlação do parâmetro: Densidade Hidrográfica.

Apenas quando correlacionada com os valores ponderados de enxurrada o índice apresentou correlação de 0,415, que pode ser considerado indicativo. A variável de densidade hidrográfica, embora expresse a quantidade de rios por unidade de área mostrou-se não representativa como requisito de identificação e diferenciação das bacias com tendência aos processos de inundação e enxurrada. Os valores do coeficiente encontrados são muito baixos para estabelecer qualquer tipo de correlação.

4.3.2.5.2 Densidade de Drenagem - Dd

Definida por Horton (1945) como o índice que relaciona o comprimento total dos canais com a área da bacia hidrográfica, sendo eles intermitentes ou perenes. A finalidade deste índice é de comparar o comprimento dos canais drenados em uma área padrão, por exemplo, o km². A partir deste índice é possível conhecer o potencial da bacia em relação ao seu escoamento superficial, o que leva ao conhecimento da intensidade dos processos erosivos de esculturação dos canais.

A densidade de drenagem (Dd) é a razão entre a extensão total dos canais (Et) e a área (A).

$$Dd = \frac{Et}{A}$$

Strahler diz que: "À medida que aumenta o valor numérico da densidade há diminuição quase proporcional do tamanho dos componentes fluviais das bacias de drenagem". Áreas densamente drenadas tendem a ter processos erosivos mais intensos e por isso merecem mais atenção com relação as suas práticas de manejo e conservação de mata ciliar. A seguir a tabela 13 de valores proposta por Christofolletti (1969):

Tabela 13 - Classificação para a interpretação de valores da densidade de drenagem:

Densidade de Drenagem	Interpretação
Menor que 7,5	Baixa
Entre 7,5 e 10,0	Média
Maior que 10,0	Alta

Christofolletti (1980) aponta a densidade de drenagem com um dado que expressa o grau de dissecação do relevo correlacionado com o número de canais que compõem a rede de drenagem, sendo uma variável que cria possibilidades de se levantar o grau de interferência de variáveis climáticas sobre a área estudada, relacionadas aos diferentes substratos rochosos, relevo e cobertura vegetal, proporcionando um maior ou menor escoamento superficial e conseqüentemente diferentes graus de infiltração. O mesmo autor aponta que o cálculo da densidade é

importante para o estudo das bacias hidrográficas porque apresenta relação inversa ao comprimento dos rios. Em escala métrica temos os seguintes dados médios (km/km²) na tabela 14.

Tabela 14 - Valores de densidade de drenagem das sub-bacias da Região Hidrográfica do Guaíba:

Bacia Hidrográfica	Densidade de Drenagem	Classe
Alto Jacuí	7,59	Média
Baixo Jacuí	7,79	Média
Caí	7,35	Baixa
Pardo	7,84	Média
Sinos	7,42	Baixa
Taquari/Antas	7,52	Média
Vacacaí	8,23	Média

Quando analisado o parâmetro da Densidade de Drenagem é esperado que os valores maiores de ocorrência dos eventos estejam associados a também valores maiores de Dd, portanto um índice de correlação positivo, tendendo a 1. Os valores e os gráficos de dispersão estão apresentados na figura 43.

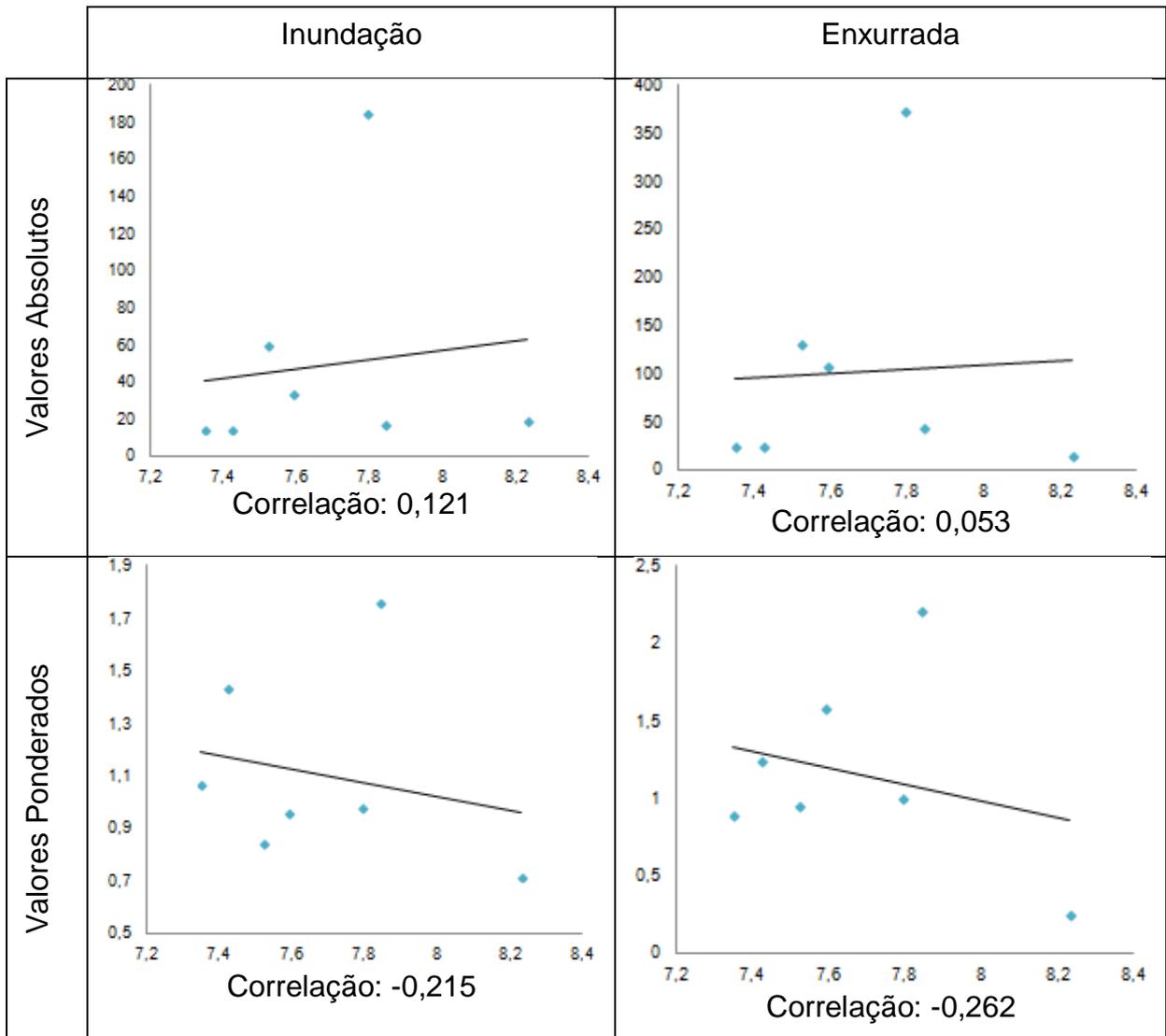


Figura 43 - Gráficos e valores de correlação do parâmetro: Densidade de Drenagem.

Os resultados obtidos, bem como os de densidade hidrográfica, apresentam-se quase nulos, bem próximos de zero. Este índice é apontado por Christofolletti com o responsável por indicar o potencial energético da bacia, onde valores maiores apresentam processos mais intensos, porém não condizente com o observado para as bacias analisadas neste estudo.

4.3.3 Análise Hipsométrica da Bacia Hidrográfica

4.3.3.1 Perfil do Talvegue

Esta análise é a representação visual da relação entre a altimetria e o comprimento de determinado curso d'água. Segundo Christofolletti (1980) o perfil característico é côncavo com declividades maiores em direção da nascente, suavizando em direção ao nível de base. Tal morfologia é considerada para rios em equilíbrio, assumindo que há relação de igualdade entre a atuação da erosão, do transporte e da deposição.

Burnett e Schumm apresentaram a metodologia para tal que consiste em plotar o desnível altimétrico entre os pontos extremos do vale no eixo das ordenadas e a distância em linha reta no eixo das abscissas, eliminando o efeito da sinuosidade do canal. Em seguida sobrepõe-se ao perfil a linha de melhor ajuste, que simula o perfil de equilíbrio, evidenciando áreas em subsidência e soerguimento. O modelo está ilustrado na Figura 44:

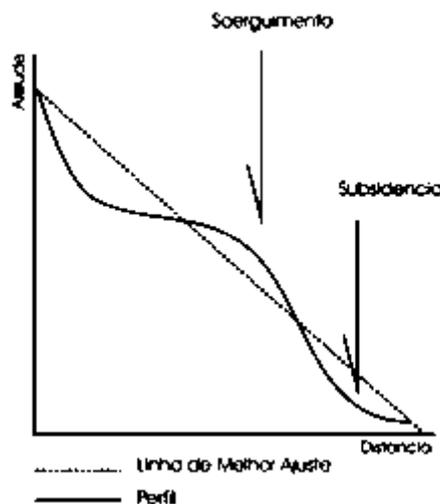


Figura 44 - Modelo teórico do perfil de talvegue.

Fonte: Caretta, 2006.

Por meio deste perfil aplicado a um curso d'água pode-se inferir também o comportamento deste gradiente ao longo do canal fluvial, da cabeceira a foz (CHRISTOFOLETTI, 1980).

A figura 45 apresenta um comparativo dos perfis dos sete rios principais analisados nesse trabalho, onde no eixo X está representado o comprimento em metros do mesmo, e no eixo Y estão apontadas as cotas altimétricas, também em metros, correspondentes.

Christofolletti (1981) após abordar o desenvolvimento histórico sobre o entendimento do perfil longitudinal dos cursos d'água ressalta que o perfil típico apresenta uma curva parabólica côncava e declividades maiores em direção à nascente e menor em direção à desembocadura. Os cursos de água que apresentam tal morfologia são considerados em equilíbrio (igualdade entre a atuação da erosão, do transporte e da deposição). A utilização do termo "equilíbrio" para tal característica pode ser questionada no que tange a desconsideração das condições de solo, vegetação urbanização e pluviométricas da região analisada.

A Figura 46 mostra os perfis separadamente, associados a sua linha de melhor ajuste.

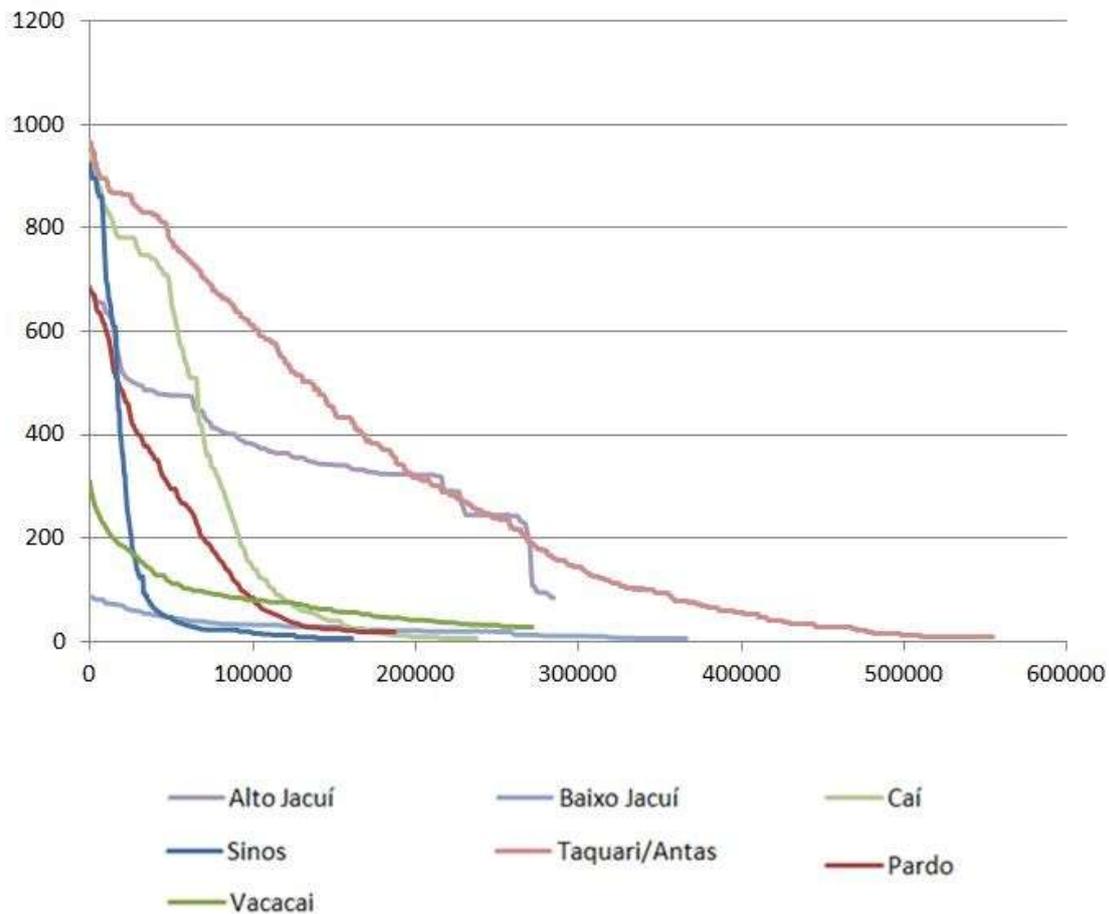


Figura 45 - Gráfico comparativo dos Perfis de Talvegue.

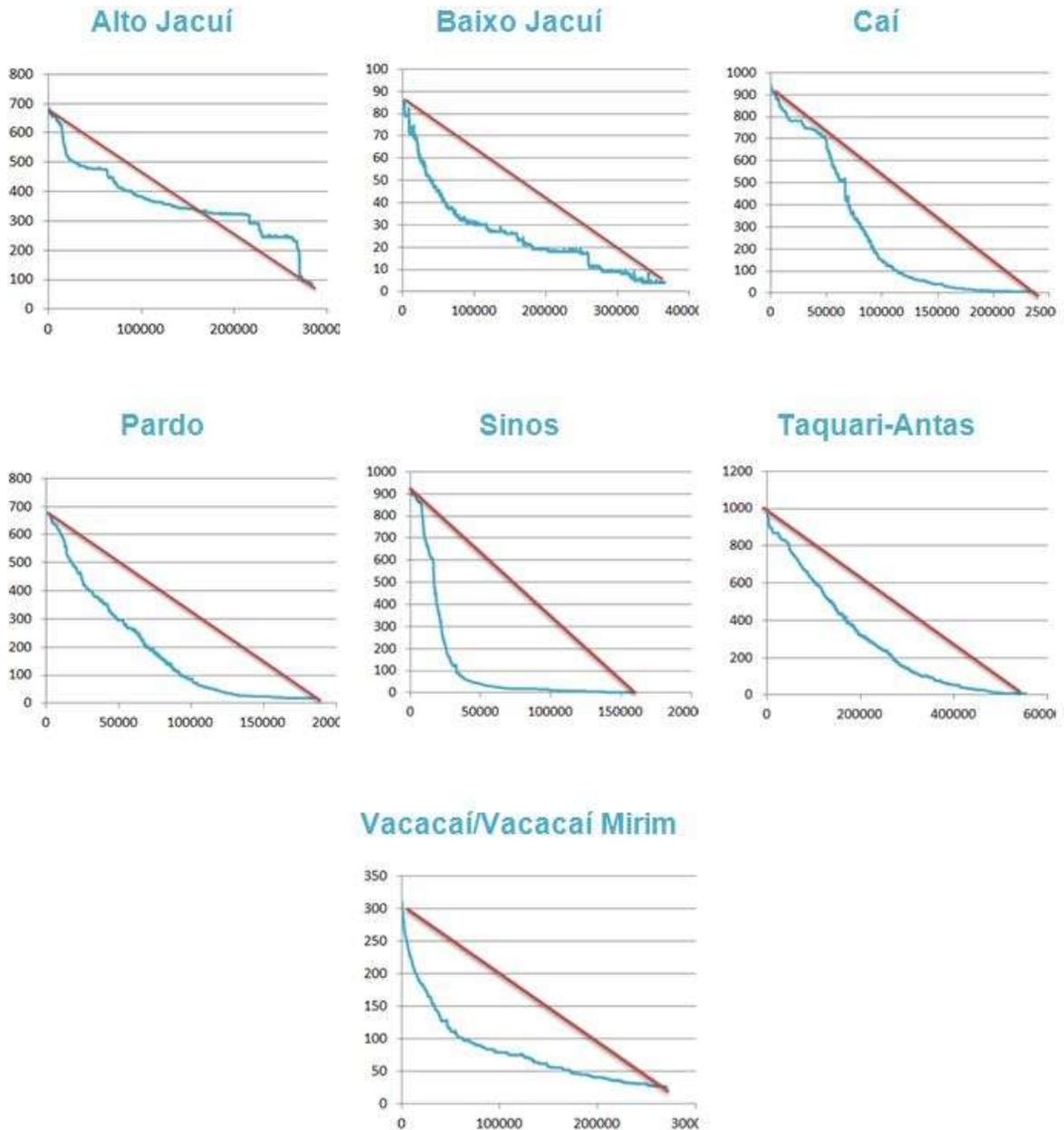


Figura 46 - Gráficos de Perfil de Talvegue.

Em uma tentativa de classificar os rios entre os mais equilibrados poderíamos apontar o Caí, com padrões diversos de declividade ao longo do seu leito. O Rio Jacuí, na sua porção a montante, foi o único dos seis rios analisados a apresentar soerguimento em relação à sua linha de melhor ajuste, enquanto que o Taquari/Antas é o mais próximo dela.

4.3.3.2 Razão de Relevô

A razão de relevo (Rr) foi inicialmente apresentada por Schumm (1956), considerando o relacionamento existente entre a amplitude altimétrica máxima (Hm) de uma bacia e a maior extensão da referida bacia (Lh), paralelamente à linha principal de drenagem. Os valores obtidos estão apresentados na tabela 15 e podem ser definida pela fórmula:

$$Rr = \frac{Hm}{Lh}$$

Tabela 15 - Valores da razão de relevo das sub-bacias da Região Hidrográfica do Guaíba:

Bacia Hidrográfica	Razão de Relevo
Alto Jacuí	2,418
Baixo Jacuí	2,574
Caí	4,320
Pardo	3,821
Sinos	6,125
Taquari/Antas	2,167
Vacacaí	1,604

Podendo também ser considerada a média da declividade do rio principal, o valor esperado para bacias com instabilidade do seu escoamento hídrico e suscetibilidade aos eventos de inundação e enxurrada, apontaria maior suscetibilidade para os maiores valores. A figura 47 apresenta o coeficiente de correlação obtido, tanto para os eventos de inundação quando os eventos de enxurrada, além dos gráficos de dispersão para ilustrar a distribuição dos dados:

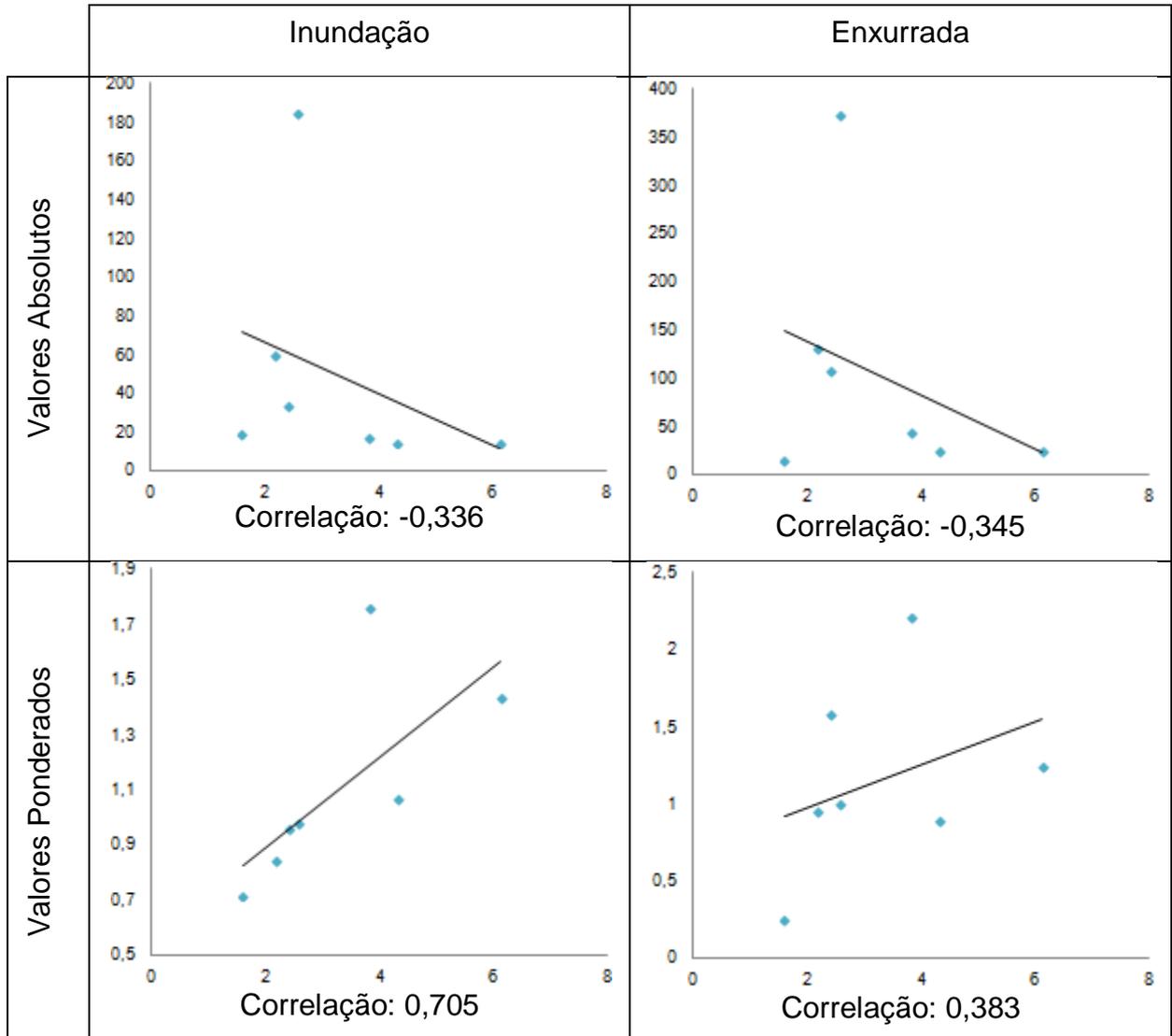


Figura 47 - Gráficos e valores de correlação do parâmetro: Razão de Relevância.

Em relação aos valores obtidos diretamente junto ao inventário apresentado pelo Atlas do CEPED (2011) existe novamente uma inversão dos valores esperados, visto que, por exemplo, em relação às inundações e enxurradas, o coeficiente de correlação é de -0,336 e -0,345, respectivamente. Para este parâmetro os valores esperados devem ser positivos.

Já quando comparados aos valores ponderados para as ocorrências, este coeficiente de correlação apresenta-se mais coerente, porém com valores de 0,705 pra as inundações e 0,383 para enxurradas.

4.3.3.4 Declividade

Para o cálculo da declividade média é feito um somatório de nº de ocorrências de pixels em cada classe de declividade. Na sequência é calculada a declividade média dos pixels para cada classe. A terceira etapa consiste em multiplicar o número de pixels de cada classe pela média deles, obtendo-se assim o valor médio da declividade de todos os pixels. Para a fusão de todas as classes e obtenção do parâmetro em relação a toda bacia hidrográfica é feita uma divisão da somatória das médias e dividido pela somatória dos pixels existentes, conforme a equação apresentada a seguir:

$$D_m = \frac{\sum \text{Média da Declividade}}{\sum \text{Número de Ocorrências}}$$

Machado (2010) descreve a declividade média como o parâmetro morfométrico mais importante no diagnóstico físico e na gestão dos recursos hídricos. A partir da declividade média da bacia é possível avaliar a suscetibilidade promovida pelo escoamento hídrico superficial. Declividades médias quando comparadas apresentam valores mais altos para as bacias com maior suscetibilidade aos eventos analisados. Os valores de referência utilizados estão apresentados na tabela 16, com valores sugeridos pela EMBRAPA (1979).

Tabela 16 - Intervalos de declividade e respectivas classes de relevo:

Intervalo (%)	Classe
0-3	Plano
3-8	Suave Ondulado
8-20	Ondulado
20-45	Fortemente Ondulado
45-75	Montanhoso
>75	Fortemente Montanhoso

O mapa apresentado na figura 48 ilustra as declividades distribuídas por classes, onde as parcelas mais azuladas correspondem às maiores declividades, também chamadas de fortemente ondulado/montanhoso, e as parcelas laranjas correspondem às parcelas da região hidrográfica do Guaíba com características mais planas ou suavemente onduladas:

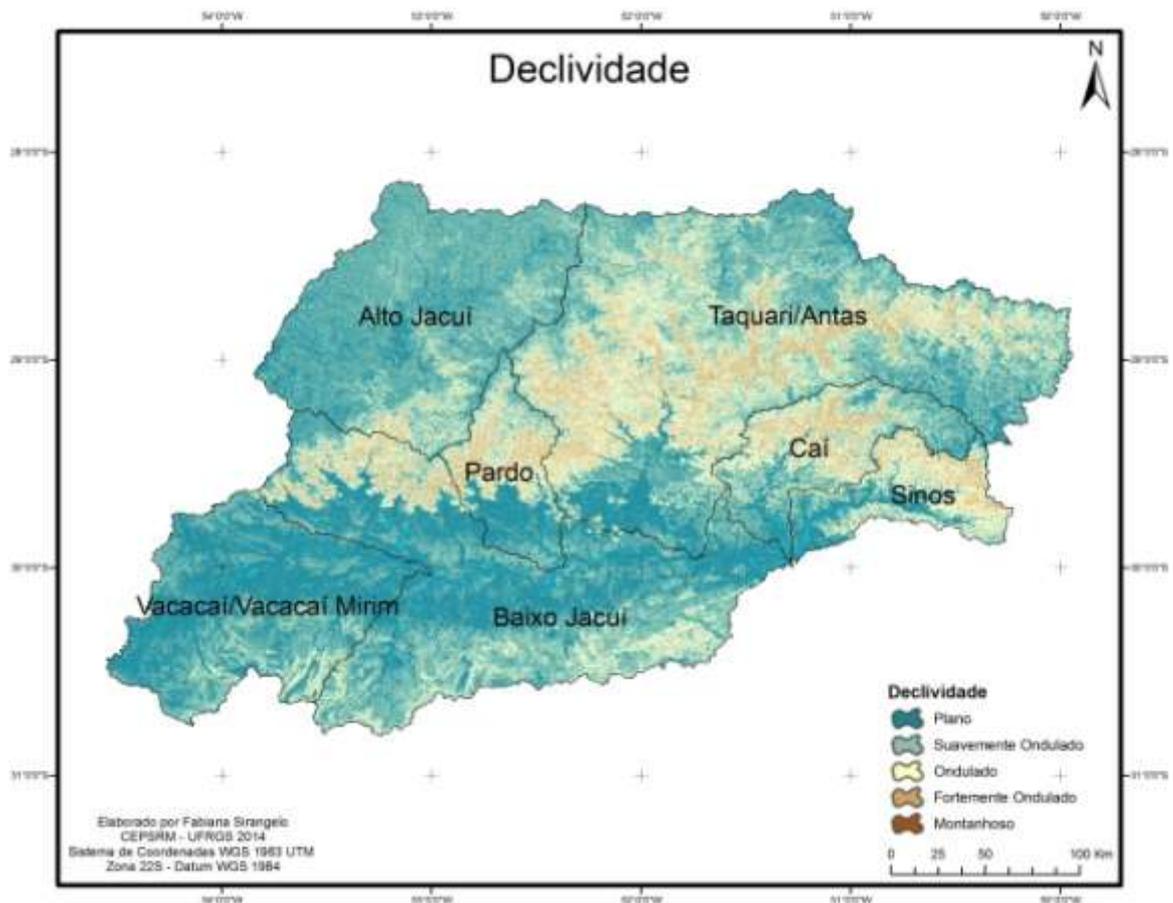


Figura 48 - Mapa de Declividade da Região Hidrográfica do Guaíba.

A tabela 17 mostra os valores médios obtidos para cada uma das sete bacias apresentadas, de acordo com a metodologia comentada anteriormente. Quanto maior a declividade de um terreno, maior é a velocidade de escoamento, e portanto, maior as perspectivas de picos de enchentes. Esta variável depende também da quantidade e tipo de cobertura vegetal e da capacidade de infiltração da água no solo. As bacias do Caí, Sinos, Pardo e Taquari/Antas apresentaram os maiores

valores, enquanto que as bacias do Vacacaí/Vacacaí Mirim apresenta declividade média quase plana.

Tabela 17 - Valores de declividade média das sub-bacias da Região Hidrográfica do Guaíba:

Bacia Hidrográfica	Declividade Média
Alto Jacuí	4,28
Baixo Jacuí	6,05
Caí	9,18
Pardo	8,53
Sinos	9,35
Taquari/Antas	8,72
Vacacaí	2,82

Os valores de correlação obtidos e a distribuição dos gráficos de dispersão estão apresentados na figura 49, onde é possível observar que o coeficiente de correlação obtido entre o número de ocorrências de inundação ponderadas pela área e a declividade média das bacias apresentou correlação positiva de 0,593 apontando que quanto maior a declividade média da bacia maior é a tendência dela apresentar episódios de inundação, independentemente da área da bacia hidrográfica em questão. Com coeficientes de correlação um pouco mais baixos, porém ainda significante, os episódios de enxurradas ponderados pela área apresentaram valores de 0,383.

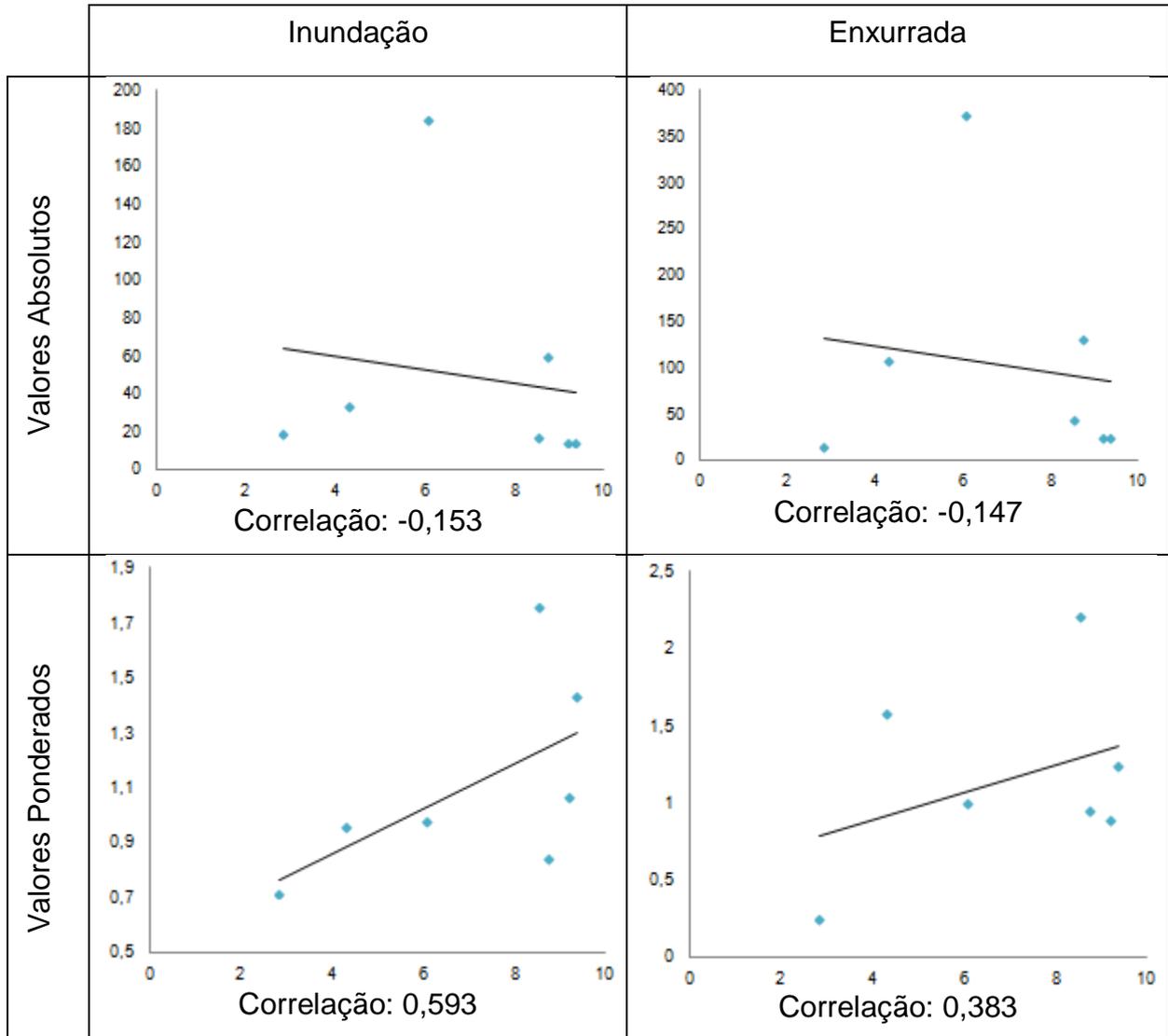


Figura 49 - Gráficos e valores de correlação do parâmetro Declividade Média da Bacia.

4.4 Aspectos Climáticos

Para a análise dos aspectos climáticos foi utilizado como base o mapa de tipologia climática gerado por Rossato (2011)I, e adaptado para ilustrar o recorte das sete sub-bacias analisadas neste trabalho (Figura 50).

Na região mais baixa da Região Hidrográfica do Guaíba, abrangendo a parcela mais ao sul da bacia do Baixo Jacuí e praticamente a totalidade da bacia do Vacacaí/Vacacaí Mirim, existe uma quantidade menor de precipitação ocorrendo, com variações de 1.200 mm/ano a 1.500 mm/ano. Estas chuvas têm como característica cerca de 6-9 dias por mês.

Conforme vai se elevando as cotas altimétricas em direção a nordeste, também há um incremento na média anual de chuva destas regiões e também de dias de chuva por mês. As cabeceiras das bacias do Caí, Sinos e Taquari/Antas têm uma média anual de precipitação de 1700-2000 mm, bem distribuídas ao longo do ano, sendo a região com a maior quantidade de dias de chuva por mês.

As áreas intermediárias, classificadas nos Climas Subtropical II e III, abrangendo as bacias do Alto Jacuí, Pardo, Gravataí, Guaíba, a porção norte da bacia do Baixo Jacuí, e as regiões a jusante das bacias do Taquari/Antas, Caí e Sinos têm medias anuais de precipitação entre 1.500 mm/ano e 1.800 mm/ano, mantendo o comportamento de transição entre a região do Clima Subtropical I (pouco úmido) e da região do Clima Subtropical IV (muito úmido).

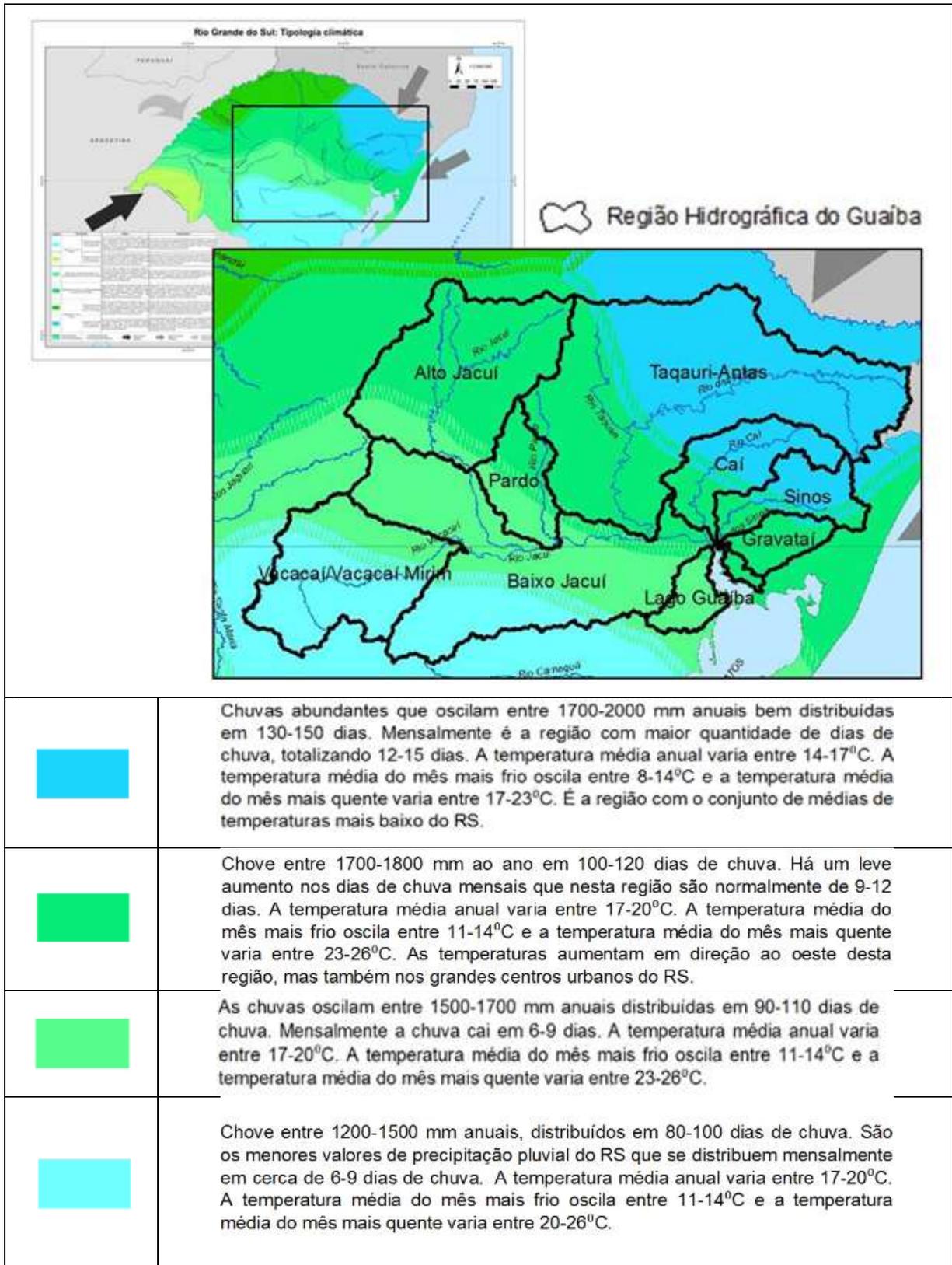


Figura 50 - Mapa de topologia climática.

Fonte: Modificado de Rossato (2011).

4.5 Uso e Ocupação

Christofoletti diz que o aumento da capacidade de infiltração de determinada área acarreta na diminuição no escoamento superficial e na densidade de drenagem, o que reflete na diminuição da declividade das vertentes.

Conforme a extensão da bacia aumenta, passa a predominar o tempo em que o deflúvio superficial percorre através de leitos definidos nos cursos d'água, onde o tipo de solo e a vegetação menor influência do que a forma destes cursos (BRASIL, 2005).

Ainda de acordo com BRASIL (2005) "como nas bacias maiores, com áreas maiores que 8 km², o deflúvio superficial escoar na maior parte do tempo através de canais ou canalículos erodidos no solo pela própria passagem da água, e com isso a textura superficial do solo, a permeabilidade e a cobertura vegetal, têm efeito cada vez menos pronunciado sobre o tempo de concentração".

A literatura repetidamente reforça a importância do uso e cobertura do solo e sua relação com a capacidade de infiltração e escoamento das águas de uma bacia. A presença ou ausência de cada classe pode ser determinante num maior acúmulo de água superficial.

A avaliação simplificada desta variável para a área de estudo foi realizada a partir da base vetorial do IBGE de uso e ocupação do Rio Grande do Sul. As classes, originalmente mais variadas, foram compiladas e reclassificadas em 4 grandes grupos: área urbana, recursos hídricos/captação de água, florestas e silvicultura e vegetação campestre e lavouras.

O resultado desta nova classificação, aplicado ao recorte da área de estudo, está apresentado na Figura 51:

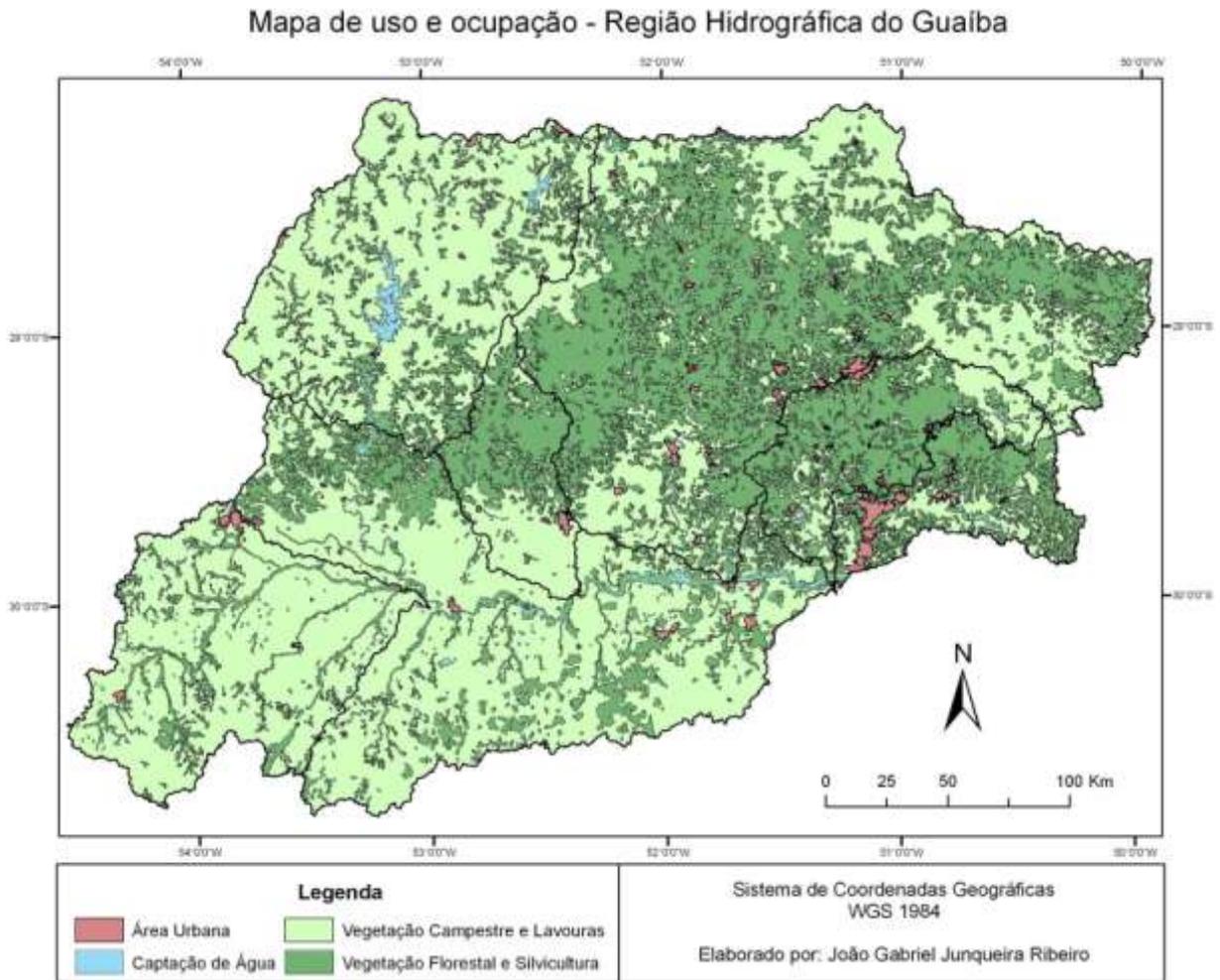


Figura 51 - Mapa de Uso e Ocupação do solo da Região Hidrográfica do Guaíba.

4.5.1 Índice de Cobertura

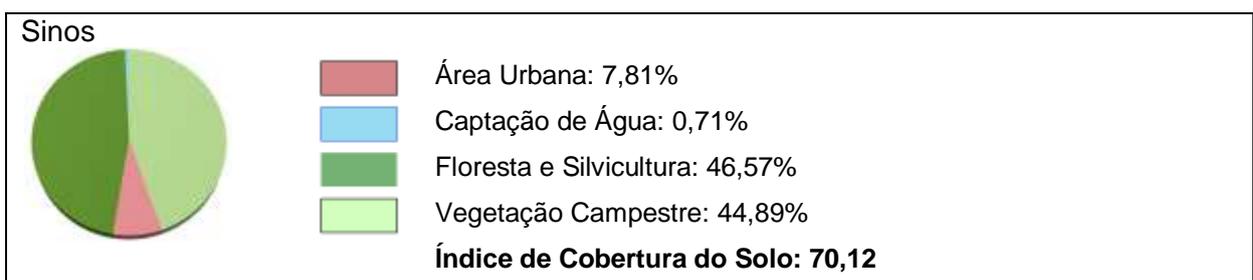
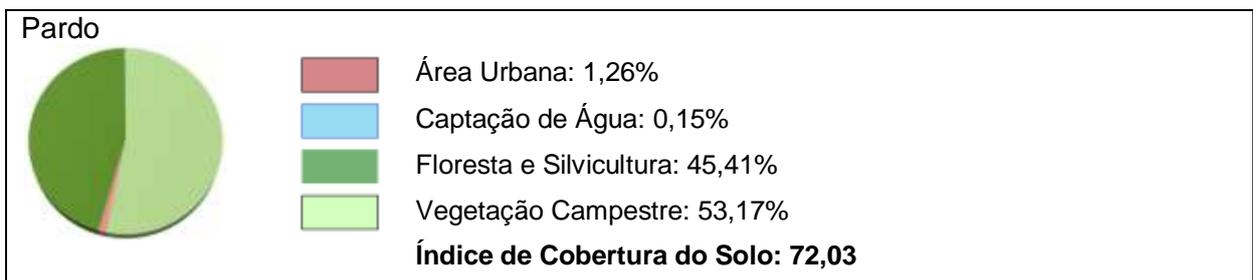
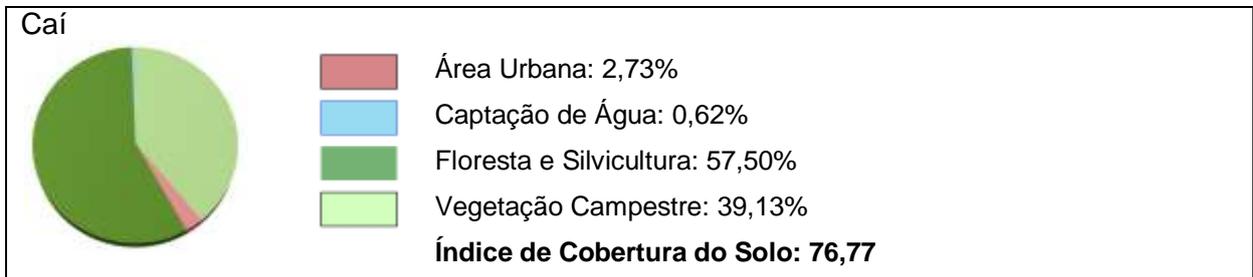
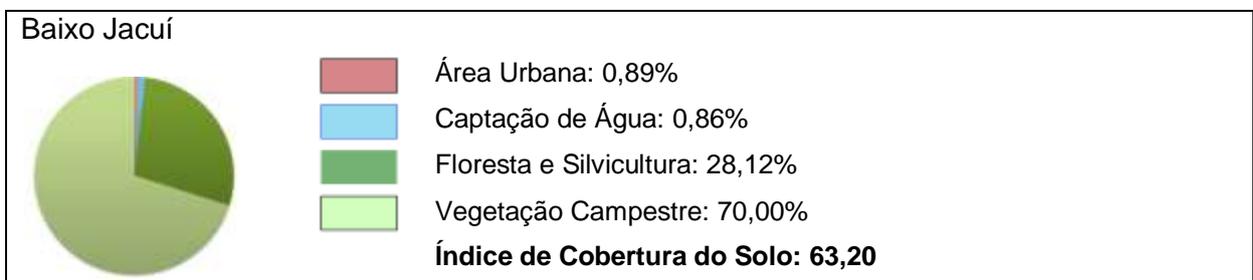
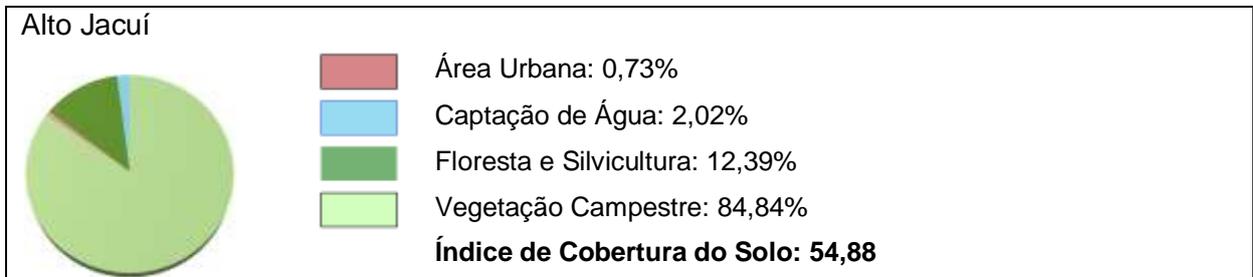
Em termos comparativos foi realizada uma ponderação, associando pesos para cada uma das classes, em função do seu comportamento frente ao escoamento superficial. A classe floresta assume peso 1; a classe campestre e lavoura assume peso 0,5; e a classe das áreas urbanizadas assume peso 0,1. A partir disso é calculado o valor de cada bacia utilizando-se a fórmula a seguir:

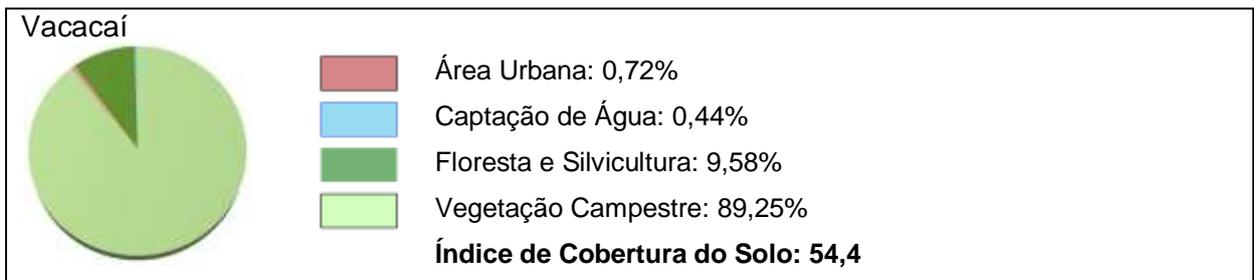
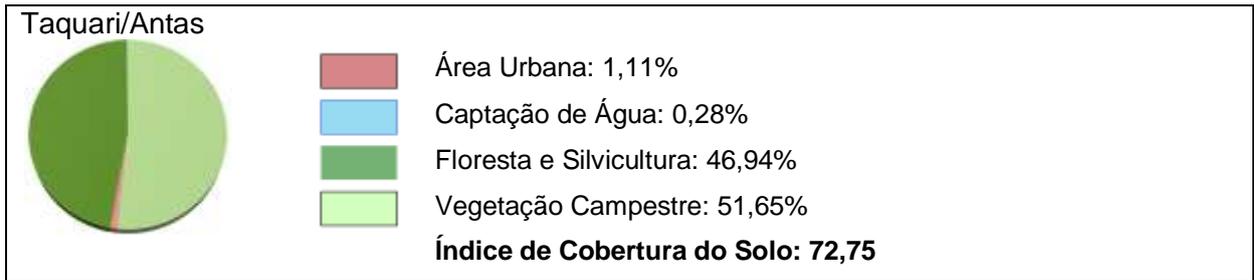
$$Ics = \Sigma(F.1)(C.0,5)(U.0,1)$$

Onde: F é o percentual de áreas de florestas e silvicultura; C é percentual de áreas de vegetação campestre e lavouras; U é o percentual de áreas urbanas. A

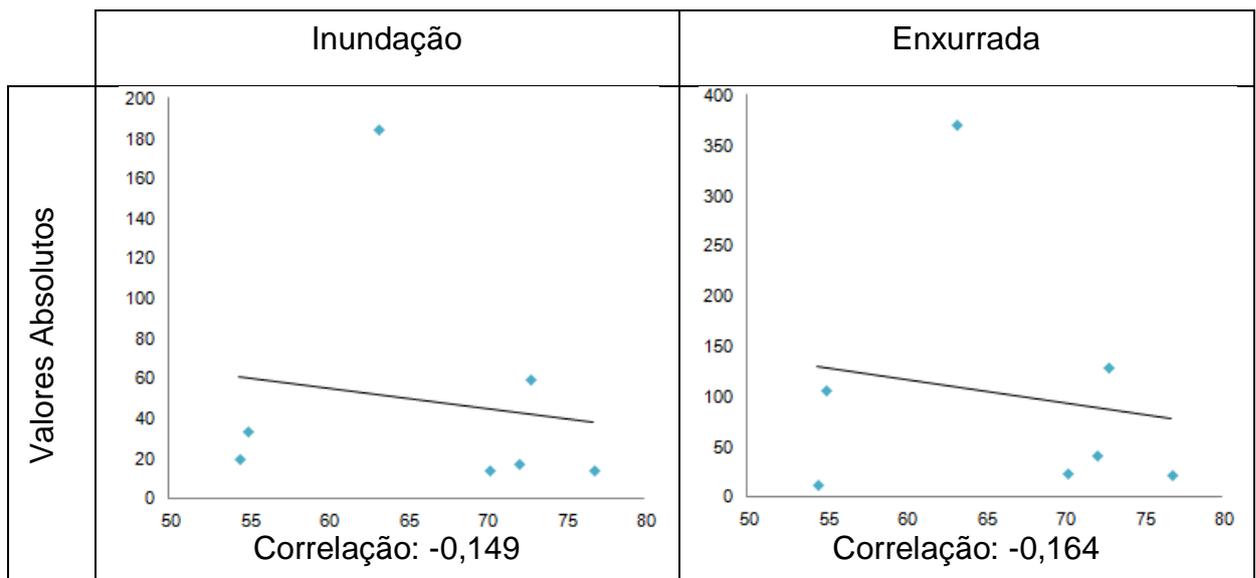
tabela 18 apresenta os valores percentuais de cada uso, além do índice de cobertura do solo calculado para cada bacia hidrográfica analisada.

Tabela 18 - Índice de Cobertura das Bacias Hidrográficas:





Os valores de correlação entre os índices de cobertura e a ocorrência dos eventos foram positivos para as análises dos valores ponderados, o que indica que quanto maior o grau de impermeabilização das classes analisadas maior é a tendência à ocorrência dos eventos de inundação e enxurrada. O coeficiente de correlação encontrado foi significativamente maior para os episódios de inundação ponderados em função da área da bacia, os valores estão apresentados na figura 52.



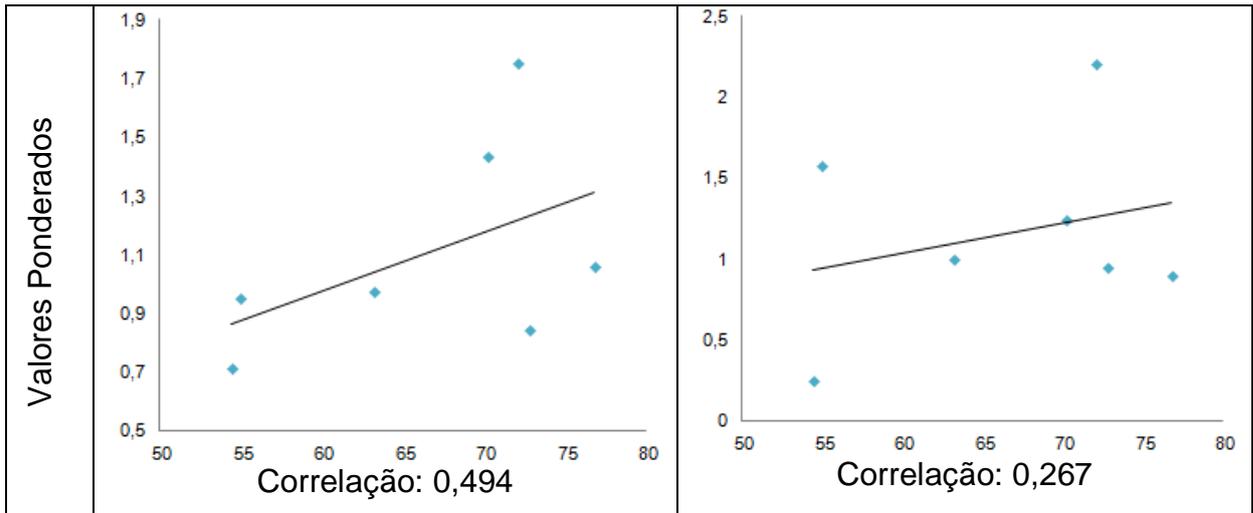


Figura 52 - Gráficos e valores de correlação do parâmetro: Índice de Cobertura.

A seguir estão apresentados os valores (Figura 53) de ocorrências de cada uma das classes em função do seu comportamento em relação ao escoamento superficial e seus índices de correlação individualmente apresentados na tabela 19.

Tabela 19 - Valores de correlação dos diferentes Usos e Ocupação:

	Urbano	Água	Floresta	Lavoura
Inundação Absoluta	-0,31845	0,104	-0,361	0,201
Inundação Ponderada	0,4395	-0,265	0,51	-0,532
Enxurrada Absoluta	-0,3467	0,210	-0,187	0,214
Enxurrada Ponderada	0,057	0,130	0,267	-0,264

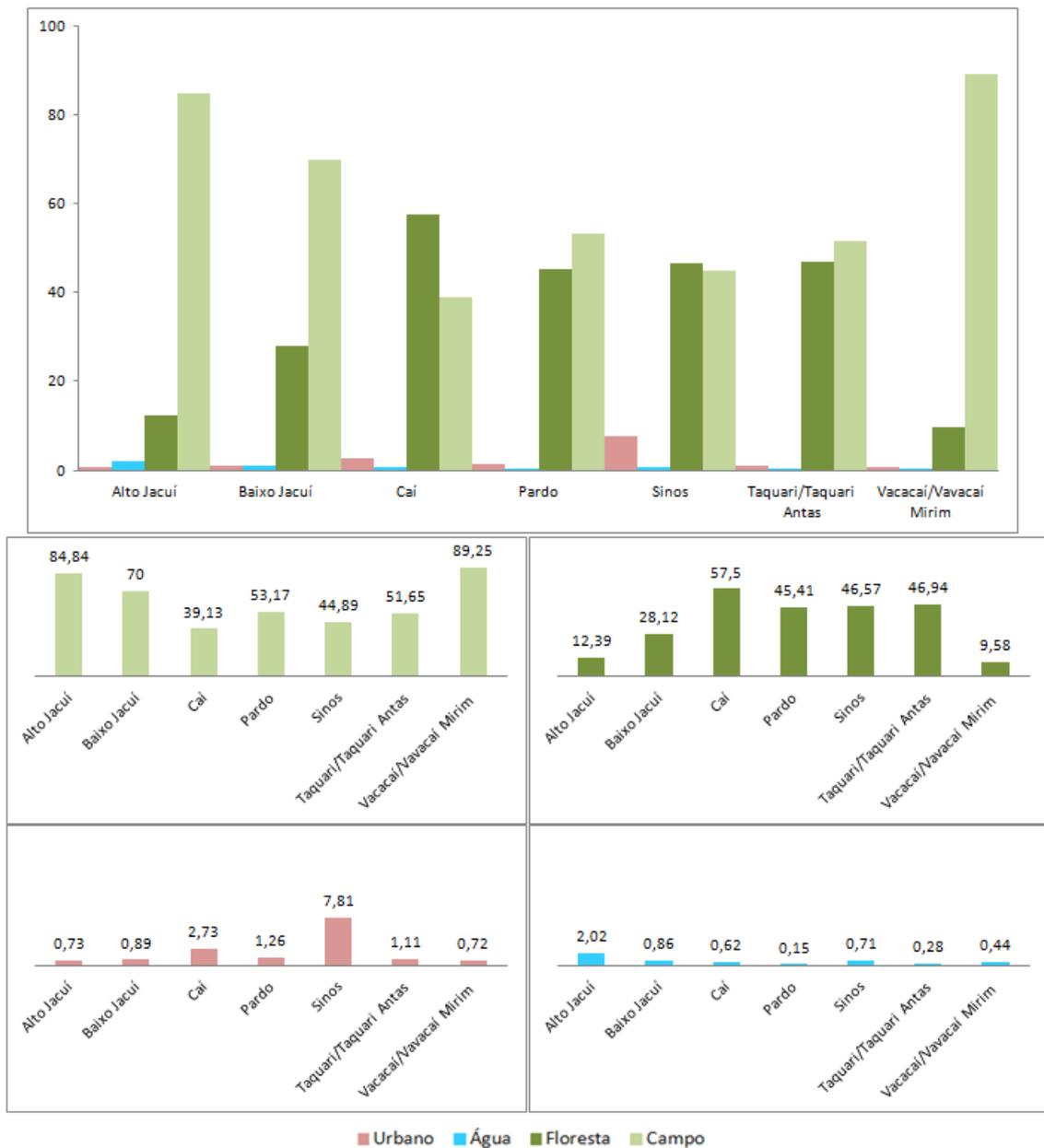


Figura 53 - Gráficos comparativos dos valores de Uso e Ocupação.

Os valores encontrados mostram, em geral, valores de correlação bem baixos quando analisados classe a classe. Dois resultados chamam a atenção. O primeiro deles relacionado aos valores de correlação em relação ao uso Urbano. A presença de área urbana, teoricamente apresentaria um acréscimo na ocorrência destes eventos, o que é observado com destaque para os eventos de inundação ponderada pela área, e com menor significância para os eventos de enxurrada.

. Além disso, se observa que a parcela floresta está diretamente relacionada à ocorrência de inundações, com valor de correlação de 0,51, esta apresentando comportamento contrário ao esperado e descrito na literatura.

4.6 Tempo de Concentração

O tempo de concentração (T_c) é definido como o tempo necessário para que toda a área da bacia contribua para o escoamento superficial num determinado ponto de controle. Pode também ser definido como o tempo necessário para que uma gota de água caída no ponto hidráulicamente mais afastado da bacia atinja a secção considerada.

Martins (2000) aponta que o tempo de concentração é considerado uma característica constante da bacia, sendo independente das características das chuvas. Por definição, ele pode ser entendido como o intervalo de tempo, a partir do início de uma precipitação, necessário para que toda a bacia hidrográfica contribua para o escoamento superficial no seu exutório, ou seja, é o tempo gasto para que o ponto mais remoto (em tempo de viagem, e não necessariamente em termos de distância) contribua para o escoamento superficial.

Importante salientar que o tempo de concentração não considera as condições prévias de saturação do solo da bacia, e que as condições pluviométricas anteriores são determinantes no potencial de escoamento do excedente hídrico, onde em episódios de muita chuva o solo passa a apresentar condições que dificultam a percolação e absorção da água pelo solo. Outro momento, com longos períodos de estiagem apresentam condições favoráveis de absorção, sendo assim necessária uma quantidade muito maior de chuva para que ocorra excedente hídrico desencadeador dos eventos analisados.

O cálculo do tempo de concentração (T_c) aparece como uma importante ferramenta hidrológica, uma vez que é bastante empregado na estimativa de vazões máximas e mais recentemente, de maneira indireta, na minimização e mitigação das consequências de desastres naturais, como inundações.

Existem numerosas fórmulas empíricas para calcular o tempo de concentração em função do comprimento do rio principal, diferença de altitude e eventualmente da área da bacia. A maioria dessas fórmulas é restrita a áreas pequenas.

O Manual de Hidrologia Básica para Estruturas de Drenagem (BRASIL, 2005) testou a eficiência destas equações para diferentes tamanhos. A equação de Kirpich

é aceita a aplicação para bacias de diferentes tamanhos, embora apresente velocidades muito altas quando comparadas com outras fórmulas. Para os testes realizados com Ventura é aceita a aplicação a qualquer tamanho de bacia.

Em decorrência do objetivo deste trabalho ser numa esfera comparativa entre bacias, foram utilizadas três diferentes equações para o cálculo do tempo de concentração. Os valores de Tc obtidos por estas equações diferem consideravelmente entre si.

4.6.1 Kirpich

Uma das formulações empíricas mais usuais em estudos desta natureza é o método de Kirpich, que embora só seja aplicável a bacias hidrográficas muito pequenas (KIRPICH, 1940), na prática, é muitas vezes usado para bacias com um único fluxo principal.

$$tc = \left(0,87 \frac{L^3}{H}\right)^{0,385}$$

tc - tempo de concentração;

H - diferença de altitude (m);

L - comprimento do rio principal (km).

Esta equação foi desenvolvida para utilização em bacias rurais com canais bem definidos, porém vem sendo amplamente utilizada por diversos autores. Este fato evidencia-se pelo fato de que normalmente ela fornece valores menores para o tempo de concentração, o que resulta numa intensidade de chuva maior, por consequência, uma maior vazão de cheia.

4.6.2 Pasini

Formulação desenvolvida por MATA-LIMA et al, (2007), apresentando - segundo o DNIT (BRASIL, 2005) - bons resultados para as bacias com áreas entre 0,03 e 3476km².

$$tc = 0,108 \frac{\sqrt[3]{A \cdot L}}{\sqrt[2]{I}}$$

- tc - tempo de concentração (h);
 A - área da bacia (km²);
 L - comprimento do rio principal (km);
 I - declividade média do rio principal (m/m).

4.6.3 Ventura

A École Nationale des Ponts et Chaussées (França) recomenda o método Ventura, que utiliza, além da área da bacia, a diferença de cotas entre o ponto mais afastado e a seção de referência da mesma (IEP, 2001). Ventura utiliza a seguinte equação:

$$tc = 240 \sqrt{\frac{A \cdot L}{H}}$$

Onde: tc - tempo de concentração; A - área da bacia (km²); H - diferença de altitude (m); L - comprimento do rio principal (km).

Os resultados encontrados para o tempo de concentração, nas três diferentes metodologias anteriormente propostas, estão apresentados na tabela 20, em horas. No gráfico apresentado na figura 54 é possível observar que apesar da diferença significativa dos resultados obtidos, especialmente pelo método Kirpich quando comparados aos obtidos por Pasini e Ventura, a proporcionalidade dos valores para cada bacia é mantida. Em termos de resultado bruto, com finalidade de análise individual, um estudo mais aprofundado deve ser realizado a fim de identificar qual o melhor método de análise quando consideradas as características de uso e dimensões da bacia. Dado o objetivo deste estudo, com cunho comparativo, os valores em si não são considerados, e sim a proporção dos resultados em relação à ocorrência dos eventos de inundação e enxurrada.

Tabela 20 - Valores de tempo de concentração:

Bacia Hidrográfica	Kirpich (h)	Pasini (h)	Ventura (h)
Alto Jacuí	52	340	294
Baixo Jacuí	107	882	768
Caí	36	173	135
Pardo	31	154	123
Sinos	23	104	84
Taquari-Antas	94	575	441
Vacacaí	59	376	316

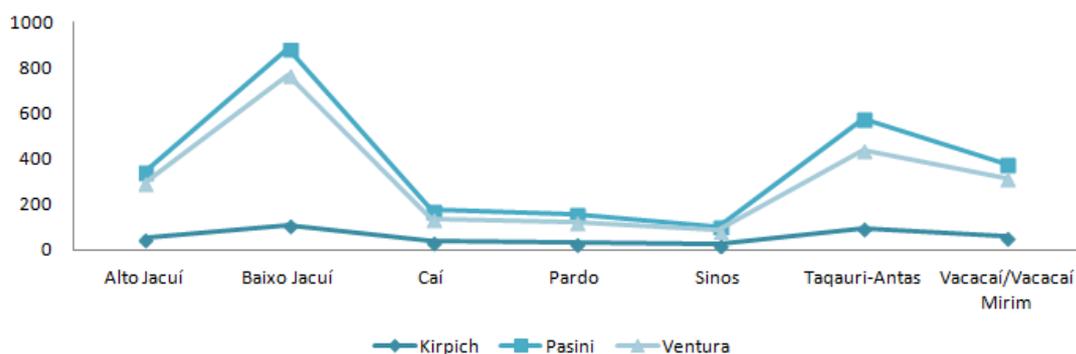


Figura 54 - Gráfico dos valores para o Tc: Kirpich, Ventura e Pasini.

O tempo de concentração mostrou-se adequado para este tipo de comparação, em função principalmente de que seu cálculo, utilizando como base toda a bacia hidrográfica. Quando correlacionados com os valores absolutos, os índices de correlação apresentaram valores elevados, porém inversamente proporcionais aos esperados. São esperados para os eventos de enxurrada uma maior ocorrência quando o tempo de concentração for menor, enquanto que para as inundações este tempo de concentração deve ser um pouco mais lento, porém ainda assim com correlação negativa. Os índices observados estão apresentados na figura 55:

	Inundação	Enxurrada	Inundação Ponderada	Enxurrada Ponderada
Kirpich	Correlação: 0,834	Correlação: 0,827	Correlação: -0,616	Correlação: -0,373
Ventura	Correlação: 0,936	Correlação: 0,936	Correlação: -0,541	Correlação: -0,323
Pasini	Correlação: 0,919	Correlação: 0,907	Correlação: -0,559	Correlação: -0,337

Figura 55 - Valores de correlação do parâmetro: Tempo de Concentração.

A metodologia de ponderação do número de ocorrência dos eventos em função da área da bacia hidrográfica apresentou-se coerente para a análise da correlação com o tempo de concentração. Os valores negativos para os eventos de inundação ponderada, abaixo de -0,5 mostram que é possível estabelecer correlação entre as variáveis, onde, quanto menor for o tempo de concentração da bacia mais suscetível é aos eventos de inundação. Já para os eventos de enxurrada esta correlação perde força (embora ainda significativa) muito possivelmente em função do fato de que são eventos com fatores mais locais de influência, e a escala de trabalho acaba mascarando as reais suscetibilidades.

4.7 Bacias Hidrográficas

Nesta etapa dos resultados é apresentada uma análise de cada bacia hidrográfica e suas diferentes variáveis morfométricas, numa tentativa de integrar os diferentes resultados.

Teodoro (2007) diz que "a caracterização morfométrica de uma bacia hidrográfica é um dos primeiros e mais comuns procedimentos executados em análises hidrológicas ou ambientais, e tem como objetivo elucidar as várias questões relacionadas com o entendimento da dinâmica ambiental local e regional". Segundo o autor cabe lembrar que nenhum índice morfométrico, isoladamente, deve ser entendido como capaz de simplificar a complexa dinâmica da bacia, a qual inclusive tem magnitude temporal.

4.7.1 Alto Jacuí

A bacia do Alto Jacuí é descrita como uma bacia de primeira ordem, a qual apresenta perímetro total de 886,94km, e área total de 13.073km². O comprimento do seu canal principal é de 284 km e é classificado como sinuoso por apresentar índice de sinuosidade de 1,86.

Os valores para os parâmetros morfométricos encontrados foram: de 7,59 densidade de drenagem, considerada um valor intermediário; 0,297 de densidade hidrográfica; 0,55 de fator de forma e 0,208 de índice de circularidade.

A diferença máxima de altitude medida nesta bacia é de 688 metros e o comprimento total dos seus canais é de 9927 km. A razão de relevo calculada foi de 2,41 e sua declividade média é de 4,28°, classificando seu relevo como suavemente ondulado. Esta bacia foi a única a apresentar padrão de soerguimento no perfil de talvegue do seu rio principal, o que indica diferentes fases de ajuste dos níveis energéticos de transporte deste rio.

Em relação ao padrão de escoamento superficial é uma bacia com características de médio-alta relevância no que tange os eventos de inundação e enxurrada, embora em termos absolutos apresente valores elevados de ocorrência por município no período analisado. Quando ponderado pela área de sua bacia, que

é considerada extensa no padrão comparativo, esta bacia continua tendo graus elevados de importância para ambos os tipos de eventos.

As chuvas da bacia do Alto Jacuí são de características intermediárias quando comparada às outras oito bacias analisadas; de clima subtropical III, com precipitações média anuais de 1.500 mm a 1.800 mm. Com relação ao uso e ocupação do solo apresenta um padrão que destaca a fração lavoura, com 84% de sua área.

4.7.2 Baixo Jacuí

A bacia do Baixo Jacuí é descrita como uma bacia de segunda ordem, recebendo águas das bacias do Vacacaí/Vacacaí Mirim, do Taquari/Antas, do Pardo e do Alto Jacuí. Apresenta perímetro total de 2726,83km, e área total de 76.619km². O comprimento do seu canal principal é de 650 km e é classificado como sinuoso por apresentar índice de sinuosidade de 3,08.

Os valores para os parâmetros morfométricos encontrados foram: de 7,59 densidade de drenagem; 0,288 de densidade hidrográfica; 0,16 de fator de forma e 0,121 de índice de circularidade.

A diferença máxima de altitude medida nesta bacia é de 1260 metros e o comprimento total dos seus canais é de 55827 km. A razão de relevo calculada foi de 2,57 e sua declividade média é de 6,05°, classificando seu relevo como ondulado.

As chuvas da bacia do Alto Jacuí são de características amenas quando comparada a outras oito bacias analisadas; localizada na zona de transição do clima subtropical III, com precipitações média anuais de 1.200mm a 1.500mm. Com relação ao uso e ocupação do solo apresenta um padrão que destaca a fração lavoura, com 70% de sua área e o padrão floresta com 28%.

4.7.3 Caí

A bacia do Caí é descrita como sendo uma bacia de primeira ordem, apresenta perímetro total de 707 km, e área total de 4.956km². O comprimento do seu canal principal é de 237 km e é classificado como tortuoso por apresentar índice de sinuosidade de 2,12.

Os valores para os parâmetros morfométricos encontrados foram: de 7,35 densidade de drenagem; 0,270 de densidade hidrográfica; 0,39 de fator de forma e 0,124 de índice de circularidade.

A diferença máxima de altitude medida nesta bacia é de 1025 metros e o comprimento total dos seus canais é de 237 km. A razão de relevo calculada foi de 4,32 e sua declividade média é de $9,18^\circ$, classificando seu relevo como ondulado.

Em relação ao padrão de escoamento superficial é uma bacia com características de média relevância no que tange os eventos de inundação e enxurrada em termos absolutos. Quando estes valores são ponderados em função da sua área a bacia ganha destaque na importância dos eventos de inundação. O mesmo, porém com menor relevância ocorre para os eventos de enxurrada.

As cabeceiras das bacias do Caí têm uma média anual de precipitação de 1700-2000 mm, bem distribuídas ao longo do ano, sendo a região com o maior quantidade de dias de chuva por mês. Com relação ao uso e ocupação do solo apresenta um padrão que destaca a fração de floresta, com 57% da sua área,

4.7.4 Pardo

A bacia do Pardo é descrita como sendo uma bacia de primeira ordem, apresenta perímetro total de 500 km, e área total de 3.662km². O comprimento do seu canal principal é de 187 km e é classificado como levemente sinuoso por apresentar índice de sinuosidade de 1,58.

Os valores para os parâmetros morfométricos encontrados foram: de 7,84 densidade de drenagem; 0,300 de densidade hidrográfica; 0,26 de fator de forma e 0,183 de índice de circularidade.

A diferença máxima de altitude medida nesta bacia é de 715 metros e o comprimento total dos seus canais é de 2.873km. A razão de relevo calculada foi de 3,82 e sua declividade média é de $8,53^\circ$, classificando seu relevo como ondulado.

Em relação ao padrão de escoamento superficial é uma bacia com características de média relevância no que tange os eventos de inundação e enxurrada em termos absolutos. Porém quando ponderadas as ocorrências em função da área é possível observar um comportamento de grande escoamento

superficial nesta bacia, despontando como a bacia com maior importância e ocorrência em função de sua área.

As chuvas da bacia do Pardo são de características intermediárias quando comparada às outras oito bacias analisadas; de clima subtropical III, com precipitações média anuais de 1.500mm a 1.800mm. Com relação ao uso e ocupação do solo apresenta um padrão de equilíbrio na distribuição dos seus diferentes tipos de uso.

4.7.5 Sinos

A bacia do Sinos é descrita como sendo uma bacia de primeira ordem, apresenta perímetro total de 616 km, e área total de 3.707km². O comprimento do seu canal principal é de 160 km e é classificado como levemente sinuoso por apresentar índice de sinuosidade de 1,46.

Os valores para os parâmetros morfométricos encontrados foram: de 7,42 densidade de drenagem, 0,272 de densidade hidrográfica; 0,3 de fator de forma e 0,122 de índice de circularidade.

A diferença máxima de altitude medida nesta bacia é de 984 metros e o comprimento total dos seus canais é de 2752 km. A razão de relevo calculada foi de 6,12, sendo este o maior valor encontrado dentre as bacias analisadas, e sua declividade média é de 9,35°, classificando seu relevo como ondulado.

Em relação ao padrão de escoamento superficial é uma bacia com características de médio-baixa relevância no que tange os eventos de inundação e enxurrada em termos absolutos. Porém quando ponderadas as ocorrências em função da área é possível observar um comportamento de grande escoamento superficial nesta bacia, despontando como uma bacia de grau de importância elevado na análise destes eventos, especialmente para as inundações.

As cabeceiras da bacia do Sinos têm uma média anual de precipitação de 1700-2000 mm, bem distribuídas ao longo do ano, sendo a região com o maior quantidade de dias de chuva por mês. Com relação ao uso e ocupação do solo apresenta um padrão que destaca a fração floresta com 46% da área.

4.7.6 Taquari-Antas

A bacia do Taquari-Antas é descrita como sendo uma bacia de primeira ordem, apresenta perímetro total de 1.559km, e área total de 26.359km². O comprimento do seu canal principal é de 579 km e é classificado como tortuoso por apresentar o maior índice de sinuosidade dentre as bacias analisadas, com valor de 3,09.

Os valores para os parâmetros morfométricos encontrados foram: de 7,52 densidade de drenagem, considerada um valor intermediário; 0,278 de densidade hidrográfica; 0,74 de fator de forma e 0,136 de índice de circularidade.

A diferença máxima de altitude medida nesta bacia é de 1256 metros e o comprimento total dos seus canais é de 19.833km. A razão de relevo calculada foi de 2,16 e sua declividade média é de 8,72^o, classificando seu relevo como ondulado.

Em relação ao padrão de escoamento superficial é uma bacia com características de alta relevância e número de ocorrência para ambos os eventos expressivos. Este destaque deve-se especialmente ao tamanho da bacia, e consequente abrangência de muitos municípios, o que acaba por superestimar a real importância dos eventos de inundação e enxurrada nesta bacia quando comparada às outras. A ponderação feita em função da área mostra que os eventos de inundação possuem média relevância no padrão de escoamento da bacia, e são um pouco superiores ao padrão de enxurradas para a mesma.

Pode-se também observar que o maior número de casos de inundações e enxurradas está localizados na foz da bacia. Isso se dá em decorrência do fato de que o comprimento da rampa, representado pelo rio principal, com extensões de destaque, aumenta a velocidade de escoamento progressivamente,

As cabeceiras da bacia do Taquari/Antas têm uma média anual de precipitação de 1700-2000 mm, bem distribuídas ao longo do ano, sendo a região com o maior quantidade de dias de chuva por mês. Com relação ao uso e ocupação do solo apresenta um padrão que destaca a fração floresta com 45% da área.

4.7.7 Vacacaí/Vacacaí Mirim

A bacia do Vacacaí/Vacacaí Mirim é descrita como sendo uma bacia de primeira ordem, apresenta perímetro total de 851 km, e área total de 10.046km². O

comprimento do seu canal principal é de 271 km e é classificado como tortuoso por apresentar índice de sinuosidade de 2,09.

Os valores para os parâmetros morfométricos encontrados foram: de 8,23 densidade de drenagem; 0,292 de densidade hidrográfica; 0,59 de fator de forma e 0,179 de índice de circularidade.

A diferença máxima de altitude medida nesta bacia é de 435 metros e o comprimento total dos seus canais é de 8.270km. A razão de relevo calculada foi de 1,6 (menor dentre os valores analisados) e sua declividade média é de 2,82°, classificando seu relevo como plano.

Em relação ao padrão de escoamento superficial é uma bacia com características de baixo-média relevância, com ocorrências esparsas, porém numerosas quando observada a extensão completa da bacia em questão. Quando realizada a ponderação pela área, estes episódios acabam tornando-se irrelevantes do padrão de escoamento característico da bacia analisada,

As chuvas da bacia do Vacacaí/Vacacaí Mirim são de características amenas quando comparada a outras oito bacias analisadas; localizada na zona de transição do clima subtropical III, com precipitações média anuais de 1.200mm a 1.500mm. Com relação ao uso e ocupação do solo apresenta um padrão que destaca a fração lavoura, com 89% de sua área.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

É possível, a partir dos resultados gerados por esse trabalho, identificar que a suscetibilidade a inundações e enxurradas é determinada por uma soma de fatores geomorfológicos e de uso e ocupação, e não apenas associada a apenas um dos parâmetros analisados. Ao passo que as análises, quando realizadas de maneira integrada, apresentam relação com a ocorrência observada destes eventos, devendo ser considerados aspectos pedológicos, geológicos e pluviométricos para uma modelagem eficiente.

A intensificação dos eventos de inundação e enxurrada, e especialmente dos seus efeitos adversos, desencadeiam uma grande necessidade de compreensão da dinâmica desses processos, além do manejo necessário para reduzir ou evitar os danos.

É possível observar que, dada a gênese do processo de inundação ser diferente dos fatores que desencadeiam os eventos de enxurrada, alguns resultados refletem melhor determinado evento. Os resultados da análise areal, em todas as suas variáveis, mostraram-se inadequados para a tentativa de relacionar a ocorrência do evento aos seus resultados. Já os resultados obtidos pelas variáveis da análise linear mostraram-se mais eficientes na identificação de áreas de enxurrada, enquanto que a análise hipsométrica reflete melhor os episódios de inundação.

As variáveis analisadas linearmente apresentam melhores índices de correlação com os valores absolutos inventariados, enquanto que para as análises areais e hipsométricas os melhores resultados apresentados são quando correlacionados aos valores de ocorrência ponderados pela área da bacia.

Isto sugere que os eventos de enxurrada têm seu comportamento mais relacionado à topografia do terreno e sua geomorfologia em escala local, enquanto que os eventos de inundação refletem características em nível de sub-bacia.

Os valores encontrados para as variáveis de índice de sinuosidade, relação de bifurcação e fator de forma mostram que estes parâmetros morfométricos não devem ser utilizados na caracterização de bacias com suscetibilidade aos eventos analisados. Esta incompatibilidade com os valores esperados provavelmente se deve à importância de que outros fatores vão exercer na geração destes tipos de

episódios, como pluviosidade, pedologia, geomorfologia, entre outros. Sendo este parâmetro pouco relevante quando observado isoladamente.

A correlação obtida para as variáveis do gradiente de canais, razão de relevo e declividade média apresentaram os resultados esperados quando correlacionados aos eventos de inundação e enxurrada. As variáveis de densidade de drenagem e densidade hidrográfica, embora coerentes apresentaram-se muito baixos. O índice de circularidade é a variável com melhor resultado apresentado para diferenciar áreas suscetíveis a inundações e enxurradas.

Além disso, é importante salientar a subjetividade e margem de erro no que tange o inventário disponibilizado pela Defesa Civil, o que se acredita ser um dos fatores responsável pela incoerência dos resultados encontrados, aqueles que se apresentam inversamente proporcional ao esperado de acordo com a literatura.

A não padronização, tanto da qualificação das equipes responsáveis pelos registros, quanto da eficiência do registro, nos diferentes municípios, pode gerar uma grande diferença entre os valores reais e os valores contabilizados para os eventos. Em função de o cadastro do evento depender de sedes municipais da Defesa Civil é possível inferir que, dada à incompatibilidade dos resultados obtidos pela extração das variáveis morfométricas em relação aos valores esperados, existe uma superestimação da ocorrência dos eventos em determinadas bacias e uma subestimação em outras.

Diante desses fatos, é fundamental a criação e a manutenção de grandes bancos de dados que possam oferecer condições para melhor compreender o comportamento dos desastres naturais e suas respectivas consequências. Sabe-se que os bancos de dados apresentam algumas limitações e lacunas, e que poderiam servir como um poderoso instrumento de gerenciamento, que poderá auxiliar significativamente os tomadores de decisão. Nos bancos de dados avaliados, apesar da diferença nas escalas de atuação, foram identificados erros similares, como de omissão, inserção, tipologia e quantificação. Esses erros podem ser solucionados com investimento na fiscalização e capacitação de técnicos.

Além das possíveis falhas e lacunas do inventário analisado, a comparação de variáveis morfométricas demanda algum grau de homogeneidade no que diz respeito às características físicas de cada unidade. Bacias hidrográficas muito grandes, como a do Taquari-Antas acabam por disfarçar/ocultar a relevância de determinada variação altimétrica, ou concentrações de áreas urbanas, em função da

sua grande extensão. Ao passo que as bacias pequenas estão sujeitas a responderem estatisticamente de modo diferente do que se observa na natureza, em função de dentro de um mesmo recorte espacial apresentar um padrão muito semelhante no que diz respeito à sua morfometria.

Quanto ao recorte geográfico utilizado, a subdivisão da bacia hidrográfica apresentou-se demasiadamente generalista na análise morfométrica de suas características. Em função de uma heterogeneidade observada nos padrões geomorfológicos e de uso e ocupação das diferentes bacias é possível afirmar que as variáveis morfométricas calculadas apresentam valores médios e generalizados, enquanto que os dados utilizados na correlação têm natureza pontual, a nível municipal, portanto em escala local. Sugere-se, a fim de aprofundar a investigação nesta relação proposta neste trabalho, que se trabalhe com bacias mais homogêneas, ou seja, com características física semelhantes em escala regional; outra alternativa é que se faça uma compartimentação do recorte atual, visando que a unidade de trabalho passe a ser da ordem de sub-bacias.

A problemática inversa também ocorre ao passo que bacias muito extensas têm uma tendência de estar subdivididas em uma quantidade maior de municípios, o que dificulta a comparação entre os eventos contabilizados por unidade administrativa.

Considera-se, portanto, que nenhum dos índices, isoladamente, é capaz de simplificar a dinâmica da bacia, porém que a combinação e análise de alguns resultados pode inferir uma maior ou menor tendência da bacia estar suscetível aos eventos de enxurrada ou inundação.

Os fatores desencadeadores destes processos são resultado de uma combinação de características, físicas, meteorológicas e de ocupação que torna o local suscetível ou não à ocorrência de eventos extremos. A análise integrada destes fatores mostrou-se fundamental na interpretação dos resultados obtidos, ficando como sugestão para trabalhos posteriores.

Apesar de a Região Hidrográfica do Guaíba representar 30% da área total do estado do RS e 61% da população do estado, a escala de sub-bacia para este recorte espacial mostrou-se inadequada em termos amostrais, dado que suas heterogeneidades estão sujeitas à variações muito pequenas quando comparadas, por vezes insignificantes. A ampliação da área de estudo, extrapolando a Região Hidrográfica, ou a compartimentação das sub-bacias torna-se interessante numa

tentativa de validar os dados neste trabalho obtidos, a fim de identificar a possibilidade de associação entre os baixos valores de correlação e a escala de trabalho utilizada.

Este trabalho apresentou relevância no que tange a utilização de dados estatísticos fornecendo base para amostragem. Alguns dos parâmetros analisados não possuem relação direta com os eventos analisados, porém tratando-se de um estudo de comparação de diferentes sistemas estes são representativos quanto à descrição e quantificação dos sistemas fluviais, mesmo que incompatíveis com os valores esperados.

Com relação à eficiência e confiabilidade dos dados SRTM, os resultados mostraram-se eficientes e de fácil manipulação, agregando velocidade e eficácia aos resultados obtidos a partir destes aplicados ao geoprocessamento. Como etapas futuras de trabalho se sugere fazer estas correlações considerando o ponto de foz da bacia sendo o ponto de ocorrência do evento registrado, a fim de minimizar as generalizações decorrentes da heterogeneidade das bacias.

REFERÊNCIAS

- ALCÁNTARA-AYALA, I. - **Geomorphology, natural hazard, vulnerability and prevention of natural disasters developing countries**. Geomorphology, v.47, p.107-124. 2002.
- ALVES, J.M.P.; CASTRO, P.T.A. - **Influência de feições geológicas na morfologia da bacia do rio Tanque (MG) baseada no estudo de parâmetros morfométricos e análise de padrões de lineamentos**. Revista Brasileira de Geociências, v. 33, n. 2, p. 117-127, 2003.
- ANDRADES FILHO, C.O.; ZANI, H.; GRADELLA, F.S. - **Compatibilidade da rede de drenagem obtida através de dados SRTM, ASTER e carta topográfica DSG: estudo de caso no Pantanal de Aquidauana**. In: 2º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, 2009, Corumbá, MS. Anais. São José dos Campos: Embrapa Informática Agropecuária/INPE, 2009.
- ARAÚJO, E.P.de; TELES, M.G.L.; LAGO, W.J. S. - **Delimitação das bacias hidrográficas da Ilha do Maranhão a partir de dados SRTM**. In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, 25 – 30 abril 2009, Anais... INPE, v. 1, p. 4631 – 4638. 2009.
- ASTRIUM - **GeoElevation: Modelos Digitais a partir de Imagens óticas e de radar**. Acessado em: <<http://mundogeo.com/webinar/geoelevation/geoelevation.pdf>> 2013.
- AUGUSTO FILHO, O.; CERRI, L.E.S. & AMENOMORI, C.J. - **Riscos geológicos: aspectos conceituais**. In: 1º Simpósio Latino-Americano Sobre Risco Geológico Urbano, 1990, São Paulo. Anais. São Paulo: ABGE, 1990.
- AUGUSTO FILHO, O. - **Carta de Risco de Escorregamentos Quantificada em Ambiente de SIG como Subsídio para Planos de Seguro em Áreas Urbanas: um ensaio em Caraguatatuba (SP)**. Pós-Graduação em Geociências. UNESP, Rio Claro. Brasil. 2001.
- BANGIRA, T. - **Mapping of flash flood potential areas in the Western Cape (South Africa) using remote sensing and in situ data**. February, 2013.
- BARROS, R.S.; CRUZ, C.B.M.; REIS, R.B.; COSTRA JR., N.A. - **Avaliação do modelo digital de elevação do SRTM na ortorretificação da imagem Landsat 7 - Área de aplicação: Angra dos Reis - RJ**. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12, 2005, Goiânia. Anais. São José dos Campos: INPE, p. 3997-4004. 2005.
- BARROS, R.S.; CRUZ, C.B.M. - **Avaliação da altimetria do modelo digital de elevação do SRTM**. XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - INPE, Florianópolis, Brasil, 2007.
- BRASIL - MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL - **Plano Nacional de Defesa Civil**. Brasília: Secretaria de Defesa Civil, 57p, 2000.
- BRASIL - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação do Instituto de Pesquisas Rodoviárias - **Manual de Hidrologia Básica para Estruturas de Drenagem**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2005.
- BRASIL - MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL - Secretaria Nacional de Defesa Civil. Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres. **Anuário brasileiro de desastres naturais: 2011** / Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres. - Brasília: CENAD, 2012a.
- BRASIL - **Lei nº 12.608, de abril de 2012**. Política Nacional de Proteção e Defesa Civil. Disponível em http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12608.htm. 2012b.
- BRASIL - **Plano Nacional de Gestão de Riscos e Prevenção a Desastres Naturais**. 2012.
- BRUBACHER, J.P.; OLIVEIRA, G.G.; GUASSELLI, L.A. - **Identificação e análise de eventos extremos de precipitação na bacia hidrográfica do rio dos Sinos/RS**. In: Congresso Brasileiro sobre Desastres Naturais, Rio Claro. Anais... 2012. p. 1-10, CD-ROM. 2012.

BRAUD, I.; ROUX, H.; ANQUETIN, S.; MAUBOURGUET, M.M.; MANUS, C.; VIALLET, P.; DARTUS, D. - **The use of distributed hydrological models for the Gard 2002 flash flood event: Analysis of associated hydrological processes.** Journal of Hydrology 394. Pg 162-181. 2010.

CARDOSO, A. C.; DIAS, H. C. T.; SOARES, C. P. B.; MARTINS, S. V. - **Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do rio Debossan, Nova Friburgo, RJ.** Revista Árvore, v. 30, n. 2, p. 241-248, 2006.

CARETTA, A.R. - **Análise Morfométrica da Bacia do Ribeirão Bom Jesus, Alto Rio Pardo SP/MG.** In: VI - Simpósio Nacional de Geomorfologia, Goiânia. Anais, v.1 p. 185. 2006.

CASTRO, A.L.C. - **Glossário de defesa civil, estudos de riscos e medicina de desastres.** 2.ed. Brasília: Ministério do Planejamento e Orçamento, Brasil. 1998.

CASTRO, A.L.C. - **Manual de desastres: desastres naturais.** Brasília: Ministério da Integração Nacional, 2003.

CASTRO, C.M.; PEIXOTO, M.N.O.; PIRES DO RIO, G.A. - **Riscos ambientais e geografia: conceituações, abordagens e escalas.** Anu. Inst. Geociências. Vol.28, n.2, pp. 11-30. ISSN 0101-9759. 2005.

CERRI, L.E. da S. - **Riscos Geológicos associados a escorregamentos: uma proposta para prevenção de acidentes.** 1993. 197p. Tese (Doutorado em Geociências) -Universidade Estadual de São Paulo, Rio Claro, 1993.

CERRI, L.E. da S. - **Riscos geológicos urbanos.** In: CHASSOT, Attico & CAMPOS, Heraldo (Orgs.). Ciências da Terra e Meio Ambiente: Diálogo para (inter)ações no Planeta. São Leopoldo: Ed. UNISINOS, p. 47-73. 1999.

CEPED UFSC – **Atlas brasileiro de desastres naturais 1991 a 2010. Volume Rio Grande do Sul.** Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres. Florianópolis, 2011.

CHORLEY, R.J. - **Geomorphology and general systems theory.** United States Geological Survey Professional Paper, 500-B, 10 p. 1962.

CHOW, V.T.; MAIDMENT, D.; AND MAYS, L. W. - **Applied Hydrology.** McGraw Hill, 1988.

CHRISTOFOLETTI, A. - **Análise morfométrica de bacias hidrográficas no Planalto de Poços de Caldas.** 375pg. Tese (Livre Docência) – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1970.

CHRISTOFOLETTI, A. - **Geomorfologia** - São Paulo: Edgard Blücher, 1980.

CHRISTOFOLETTI, A. - **Geomorfologia Fluvial.** v1. São Paulo: Edgard Blücher, 1981.

CHRISTOFOLETTI, A. - **Análise morfométrica de bacias hidrográficas.** Notícia Geomorfológica, v. 9, n.18, p. 35-64, 1969.

CHRISTOFOLETTI, A - **Aplicabilidade do conhecimento geomorfológico nos processos de planejamento.** In: Guerra & Cunha (Orgs.). Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos. 1 ed. Rio de Janeiro: Editora Bertrand Brasil. p. 415-440. 1994.

COBRADE - **Classificação e Codificação Brasileira de Desastres.** 2012.

COLLINS, T. - **Disaster Risk for Floods: 1980 - 2000.** United Nations University. Tokyo: 2004.

DENT, D.; YOUNG, A. - **Soil Survey and Land Evaluation.** London: George Allen & Unwin (Ed.), 1981.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Súmula da 10. Reunião Técnica de Levantamento de Solos**. Rio de Janeiro. 83p. (Embrapa-SNLCS. Micelânea, 1).1979.

FLORENZANO, T.G. et al. - **Utilização de dados TM-Landsat para o mapeamento de áreas submetidas à inundação na Bacia do Rio Parnaíba**. São José dos Campos, INPE, 1988.

FREIRE, A.J.; LAGE, G.B.; CHISTÓFARO, C. - **Comparação entre parâmetros morfométricos de bacias hidrográficas geradas por dados SRTM e ASTER GDEM: estudo de caso para bacias do Vale do Jequitinhonha-MG**. Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil. INPE. 2013.

GOERL, R.F.; KOBIYAMA, M.; CORREA, G.P.; ROCHA, H.L.; GIGLIO, J.N. - **Desastre hidrológico resultante das chuvas intensas em Rio dos Cedros – SC**. In XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (Campo Grande: 2009), Campo Grande, ABRH, Anais, 19p, 2009.

GROHMANN, C.H.; RICCOMINI, C.; STEINER, S.S. - **Aplicação de modelos de elevação SRTM em geomorfologia**. Revista de Geografia Acadêmica, v.2 n. 2, p. 73-83, 2008.

GUASSELLI, L.A.; Evers, H. - **Relação entre paleodrenagens/valões e a ocorrência de areais no sudoeste do RS**. In: SUERTEGARAY, D.M.A.; SILVA, L.A.P.; GUASSELLI, L.A. (Org.). Arenização natureza socializada. 1ed.Porto Alegre: Compasso Lugar-Cultura e Imprensa livre, v. 1, p. 227-244. 2012.

HERMUCHE, P.M.; GUIMARÃES, R.F.; CARVALHO, A.P.F.; MARTINS, E.S.; FUKS, S.D.; CARVALHO JÚNIOR, O.A. - **Processamento digital de imagens morfométricas para subsidiar o mapeamento pedológico**. Anais XI SBSR, Belo Horizonte, Brasil. INPE, 2003.

HORTON, R.E. - **Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology**. Geological Society of America Bulletin, v. 56, p. 807-813, 1945.

HOTT, M.C.; FURTADO, A.L.S. - **Metodologia para a determinação automática de parâmetros morfométricos de bacias hidrográficas**. Embrapa Monitoramento por Satélite. Documentos, 43. 2005.

IBGE - **MUNIC: Pesquisa de Informações Básicas Municipais** - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro. 2005.

IBGE - **Manual técnico de Geomorfologia** / IBGE, Coordenação de Recursos naturais e Estudos Ambientais. - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2. ed. - Rio de Janeiro: IBGE, 2009.

IBGE - **Mapa de Densidade Demográfica 2010** - Base Cartográfica elaborada pela Coordenação de Cartografia - Base Setor Censitário 2010.

IEP - **Manual de drenagem superficial em vias de comunicação**. Lisboa: Instituto das Estradas de Portugal (IEP), 2001.

IPT - **Material de Treinamento de Técnicos Municipais para o Mapeamento e Gerenciamento de Áreas Urbanas com Risco de Escorregamento, Enchentes e Inundações**. Ministério das Cidades, Brasil. 2004.

JENSEN, J. R. - **Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective**. 2nd Edition, 2000.

JENSON, S.K.; & DOMINGUE, J.O. - **Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis**. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, v. 54, n. 11, p. 1593-1600, 1988.

JONKMAN, S.N. & KELMAN, I. - **An Analysis of Causes and Circumstances of Flood Disaster Deaths**. Disasters, vol. 29, no. 1 (March), pp. 75-97. 2005.

KOBIYAMA, M.; CHECCHIA, T.; SILVA, R. V.; SCHRÖDER, P. H.; GRANDO, A.; REGINATTO, G. M. P. - **Papel da comunidade e da universidade no gerenciamento de desastres naturais**. In: Simpósio Brasileiro de Desastres Naturais, 1. Florianópolis. Anais... Florianópolis: GEDN/UFSC, p.834-846 (CDROM). 2004.

KOBIYAMA M.; MENDONÇA M.; MORENO D.A.; MARCELINO I.P.V.O.; MARCELINO E.V.; GONÇALVES E.F.; BRAZETTI L.P.; GOERL R.F.; MOLLERI G.S.F.; RUDORF, F.M. - **Prevenção de desastres naturais conceitos básicos**. Florianópolis – SC. 1ª Edição. Editora Organic Trading, 2006.

LANA, C.E.; ALVES, J.M. de P.; CASTRO, P. de T.A. - **Análise morfométrica da bacia do Rio do Tanque, MG** – Brasil. Rev. Esc. Minas, Ouro Preto, v. 54, n. 2. 2001.

LIMA, C.S. - **A aplicação de técnicas morfométricas na análise morfoestrutural da Bacia do Rio Siriji, Zona da Mata Norte, PE** - Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2012.

MACHADO, P. J. O. (Org.) - **Diagnóstico físico-ambiental da bacia hidrográfica do córrego São Pedro: um exercício acadêmico de gestão dos recursos hídricos**. Ubá: Ed.Geographica, consultoria, estudos e projetos ambientais Ltda. 2010.

MAGALHÃES, M.N.; LIMA, A.C.P. - **Noções de probabilidade e estatística**. 7ª edição, São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2011.

MAGESH, N.S.; CHANDRASEKAR, N.; KALIRAJ, S. - **A GIS based automated extraction tool for the analyses of basin morphometry**. Bonfring Internation Journal of Industrial Engineering and Menagement Science. Vol2. Special Issue. July, 2012.

MARCELINO, E.V.; GOERL, R.F.; RUDDORF, F.M.- **Distribuição espaço-temporal de inundações bruscas em Santa Catarina (Período de 1980-2003)**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE DESASTRES NATURAIS, 1. Florianópolis. 2004.

MARCELINO, E.V.; NUNES, L.H.; KOBIYAMA, M. - **Mapeamento de risco de desastres naturais do estado de Santa Catarina**. Caminhos de Geografia, v. 8, n. 17, p. 72-84, 2006.

MARCELINO, E.V. - **Desastres Naturais e Geotecnologias: conceitos básicos**. INPE. Santa Maria, 2007.

MARCHI, L.; BORGA, M.; PRECISO, E.; GAUME, E. - **Characterization of selected extreme flash floods in Europe and implications for flood risk management**. Journal of Hydrology 394. Pg 118-133. 2010.

MARENGO, J.A. - **Mudanças climáticas e eventos extremos no Brasil**. Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável – FBDS. Disponível em: <<http://www.fbds.org.br/fbds/IMG/pdf/doc-504.pdf>>. Acesso em: 25 julho 2013. 2010.

MARENGO, J.A. - **Mudanças climáticas, condições meteorológicas extremas e eventos climáticos no Brasil**, p. 4- 19. In: Mudanças climáticas e eventos extremos no Brasil. P. 1-76. Patrocinado por LLOYD'S. Disponível em: <http://www.fbds.org.br/fbds/IMG/pdf/doc-504.pdf>. Acessado em 30 de março de 2012. 2009.

MARTINS, F.J.P. - **Dimensionamento Hidrológico e Hidráulico de Passagens Inferiores Rodoviárias para Águas Pluviais**. Universidade de Coimbra, Faculdade de Ciências e Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil. Março, 2000.

MILLER, J.P. - **High mountain streams; effects of geology of channel characteristics and bed material: Memoir - New Mexico**. Buereau of Mines and Mineral Resources, 53p. 1958.

MATA-LIMA, H.; VARGAS, H.; CARVALHO, J.; GONÇALVES, G.; CAETANO, H.; MARQUES, A.; RAMINHOS, C. - **Comportamento hidrológico de bacias hidrográficas: integração de métodos e aplicação a um estudo de caso**. REM: Revista Escola de Minas, Ouro Preto, 60(3): 525-536, jul. set. 2007.

NASA'S JET PROPULSION LAB. - **Shuttle Radar Topografa Mission**. Disponível em: <<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>>. Acesso em 03/01/2014. 2006.

OLIVEIRA, G.G. - **Mapa de Suscetibilidade a inundações da sub-bacia do Arroio da Areia/RS**. Trabalho de graduação (Bacharelado em Geografia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Porto Alegre, 2007.

OLIVEIRA G.G. - **Modelos para Previsão, espacialização e análise das áreas inundáveis na bacia hidrográfica do Rio Caí, RS**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

OLIVEIRA, G.G., GUASSELLI, L.A. - **Comparaçõ de métodos para elaboração de mapa de suscetibilidade a inundações - Sub-bacia do Arroio da Areia, Porto Alegre/RS**. Anais VII Simpósio Nacional de Geomorfologia - SINAGEO, Belo Horizonte, 2008.

OLIVEIRA, G. G.; BRUBACHER, J. P.; QUEVEDO, R. P.; GUASSELLI, L. A. - **Limiares de chuva para a ocorrência de desastres na bacia hidrográfica do rio dos Sinos, RS**. In: XVII Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2012, Gramado - RS. Anais XVII Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2012. p. 1-5.

PERINI, A.B.; MARCUZZO, F.F.N.; Silva, D.R.A. - **Modelos Digitais de Elevação no mapeamento de suscetibilidade de inundação no município de Pedro Osório/RS**. Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil. INPE. 2013.

RECKZIEGEL, B.W.; ROBAINA, L.E.S. - **Riscos geológicos-geomorfológicos: revisão conceitual**. Ciência e Natura, UFSM, 27 (2): pg. 65-83. 2005.

RECKZIEGEL, B.W. - **Levantamento dos desastres desencadeados por eventos naturais adversos no Estado do Rio Grande do Sul no período e 1980 a 2005**. Dissertação de mestrado em Geografia. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 161p, vol. 1, 2007.

REIS, J.T; MADRUGA, R.A; NARVAES, I.S; LIMA JUNIOR, E.R; SAUSEN, T.M. - **Avaliação dos desastres naturais ocorridos no Rio Grande do Sul de 2007 a 2011**. Congresso Brasileiro Sobre Desastres Naturais. Rio Claro, SP - Brasil. 2012.

RIO GRANDE DO SUL - **Lei nº 10.350, de 30 de dezembro de 1994**. Institui o Sistema Estadual de Recursos Hídricos, regulamentando o artigo 171 da Constituição Estadual do Rio Grande do Sul. Diário Oficial (do Estado do Rio Grande do Sul), Porto Alegre, 31 dez, 1994.

RIO GRANDE DO SUL - **Relatório anual sobre a situação dos recursos hídricos no estado do Rio Grande do Sul - Ano 2009/2010**. Secretaria do Meio Ambiente - Departamento de Recursos Hídricos. Porto Alegre, 2012.

ROODA, J.C. - **The Flood Hydrograph**. In: Water, earth and man, R.J Chorley. 405-418. London, 1969.

ROSSATO, M.S. - **Os climas do Rio Grande do Sul: variabilidade, tendências e tipologia**. UFRGS, 2011.

ROZALIS, S.; MORIN, E.; YAIR, Y.; PRICE, C. - **Flash flood prediction using an uncalibrates hydrological model and radar rainfall data in a Mediterranean watershed under changing hydrological conditions**. Journal of Hydrology 394. Pg 245-255. 2010.

RASERA, G. & CAMPOS, C.R.J. - **Análise Sazonal das regiões do Rio Grande do Sul atingidas por eventos severos gerados por SCM no período de 2004 a 2008**. Anuário do Instituto de Geociência - UFRJ, Pg. 61-69. Volume 36-2/2013.

SALDANHA, D.L. et. al. - **Mapeamento e avaliação das áreas inundáveis do Rio dos Sinos através da utilização de imagens TM-Landsat 5**. In: Revista de Geografia da UNESP, v.13. São Paulo, Editora UNESP. 1996.

SANTOS, R.F. (Org.) - **Vulnerabilidade Ambiental: desastres naturais ou fenômenos induzidos?** – Brasília: MMA. 192 p. 2007.

SANTOS, D.A.R.; MORAIS, F. de - **Análise morfométrica da bacia hidrográfica do Rio Lago Verde como subsídio à compartimentação do relevo da região de Lago da Confusão - TO**. Revista Geonorte, Edição Especial V.3, N.4, p. 617-629, 2012.

SAUSEN, T. M.; FERREIRA, C. C.; ARAUJO JUNIOR, M.; HANSEN, M.A.F.; PARDI LACRUZ, M.S.; SAITO, S.M. - **Ciclone extratropical ocorrido em 2 e 3 de maio de 2008 em Santa Catarina e Rio Grande do Sul: gênese, danos e avaliação com o auxílio de geotecnologias**. Relatório Técnico. São José dos Campos: INPE, 171p. 2009.

SAUSEN, T. M. & NARVAES, I.S. - **Desastres naturais e geotecnologias: inundação - Caderno didático nº7**. INPE, Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. São José dos Campos, 2013.

SCHUMM, S.A. - **Evolution of drainage systems and slopes in badlands of Perth Amboy**. Geological Society of America Bulletin, n. 67, p. 597- 646, 1956.

SCHUMM, S.A. - **Disparity between present rates of denudation and orogeny**, US Geological Survey Professional Paper 454, 13. 1963.

SILVA, R.C. - **Análise Morfométrica e Hidrológica das bacias hidrográficas do Córrego Teixeiras, Ribeirão das Rosas e Ribeirão Yung, afluentes do Rio Paraíba, Município de Juiz de Fora/MG**. Juiz de Fora, MG, Brasil. 2011.

SOUZA, R.M.; FORMIGA, K.T.M.; VEIGA, A.M. - **Caracterização morfométrica e delimitação da bacia hidrográfica do Córrego Samabaia - GO a partir de dados do SRTM**. Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil. INPE, 2013.

STRAHLER, A.N. - **Hypsometric (area-altitude) analysis and erosional topography**. Geological Society of America Bulletin, v. 63, p. 1117-1142, 1952.

STRAHLER, A.N. - **Geologia Física**. Barcelona: Omega, 1992.

TEODORO, V.L.I.; TEIXEIRA, D.; COSTA, D.J.L.; FULLER, B.B. - **O conceito de bacia hidrográfica e a importância da caracterização morfométrica para o entendimento da dinâmica ambiental local**. Disponível em <http://www.uniara.com.br/revistauniara/pdf/20/RevUniara20_11.pdf>. Acesso em 03 dezembro 13. 2007.

TONELLO, K.C.; DIAS, H.C.T.; SOUZA, A.L.; ALVARES, C.A.; RIBEIRO, S.; LEITE, F.P. - **Morfometria da Bacia Hidrográfica da Cachoeira das Pombas, Guanhões – MG**. Revista Árvore, v.30, n.5, p.849-857, 2006.

TRENTIN, C.B. et. al. - **Análise da ocorrência de enchentes na área de abrangência do Rio Jacuí/RS com a utilização de imagens MODIS e dados SRTM**. INPE. Geodesastres. Brasil. 2008.

TUCCI, C.E.M., - **Enchentes Urbanas**, in: Drenagem Urbana, cap. 1. Editora da Universidade, ABRH. 1995.

TUCCI, C.E.M.; CLARKE, R.T. - **Impacto das mudanças da cobertura vegetal no escoamento: revisão**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 1997.

TUCCI, C.E.M. - **Curso de Gestão das Inundações Urbanas**. 2005.

UN-ISDR - International Strategy for Disaster Reduction. **Terminology on Disaster Risk Reduction**. 2009. Disponível em: <http://unisdr.org/files/7817_UNISDRTerminologyEnglish.pdf>. Acesso em: 25 junho 2013.

VALERIANO, M.M. - **Modelos digitais de elevação de micro bacias elaborados com krigagem**. São José dos Campos, SP: INPE: Coordenação de Ensino, Documentação e Programas Especiais (INPE-9364-RPQ/736). 54pg. 2002.

VALERIANO, M.M. - **Modelo digital de elevação com dados SRTM disponíveis para a América do Sul**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 72. 2004.

VALERIANO, M.M.; KUPLICH, T.M.; STORINO, M.; AMARAL, B.D.; MENDES JR, J.N.; LIMA, D.J. - **Modeling small watersheds in Brazilian Amazônia with SRTM- 90m data**. Computers e Geosciences, v. 32, n. 8, p.1169-1181, 2006.

VALERIANO, M. M. - **Dados topográficos**. In: Teresa G. Florenzano. (Org.). Geomorfologia - conceitos e tecnologias atuais. Cap. 3, p. 72-104. 1 ed. São Paulo: Oficina de textos, 2008.

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

ANEXOS

CLASSIFICAÇÃO E CODIFICAÇÃO BRASILEIRA DE DESASTRES (COBRADE)

CATEGORIA	GRUPO	SUBGRUPO	TIPO	SUBTIPO	COBRADE
1. NATURAL	1. GEOLÓGICO	1. Terremoto	1. Tremor de terra	0	1.1.1.1.0
			2. Tsunami	0	1.1.1.2.0
		2. Emissão vulcânica	0	0	1.1.2.0.0
		3. Movimento de massa	1. Quedas, Tombamentos e rolamentos.	1. Blocos	1.1.3.1.1
				2. Lascas	1.1.3.1.2
				3. Matacões	1.1.3.1.3
				4. Lajes	1.1.3.1.4
			2. Deslizamentos	1. Deslizamentos de	1.1.3.2.1
			3. Corridas de Massa	1. Solo/Lama	1.1.3.3.1
			2. Rocha/Detrimento	1.1.3.3.2	
		4. Subsidiências e colapsos	0	1.1.3.4.0	
		4. Erosão	1. Erosão Costeira/Marinha	0	1.1.4.1.0
			2. Erosão de Margem Fluvial	0	1.1.4.2.0
	3. Erosão Continental		1. Laminar	1.1.4.3.1	
			2. Ravinas	1.1.4.3.2	
		3. Boçorocas	1.1.4.3.3		
	2. HIDROLÓGICO	1. Inundações	0	1.2.1.0.0	
		2. Enxurradas	0	1.2.2.0.0	
		3. Alagamentos	0	1.2.3.0.0	
	3. METEOROLÓGICO	1. Sistemas de Grande Escala/Escala Regional	1. Ciclones	1. Ventos Costeiros (Mobilidade de Dunas)	1.3.1.1.1
				2. Marés de Tempestade	1.3.1.1.2
			2. Frentes Frias/Zonas de	0	1.3.1.2.0
		2. Tempestades	1. Tempestade Local/Convectiva	1. Tornados	1.3.2.1.1
				2. Tempestade de	1.3.2.1.2
				3. Granizo	1.3.2.1.3
				4. Chuvas Intensas	1.3.2.1.4
				5. Vendaval	1.3.2.1.5
		3. Temperaturas Extremas	1. Onda de Calor	0	1.3.3.1.0
			2. Onda de Frio	1. Friagem	1.3.3.2.1
	2. Geadas			1.3.3.2.2	
	4. CLIMATOLÓGICO	1. Seca	1. Estiagem	0	1.4.1.1.0
			2. Seca	0	1.4.1.2.0
			3. Incêndio Florestal	1. Incêndios em Parques, Áreas de Proteção Ambiental e Áreas de Preservação Permanente Nacionais	1.4.1.3.1
2. Incêndios em áreas não protegidas, com reflexos na qualidade do ar				1.4.1.3.2	
4. Baixa Umidade do Ar			0	1.4.1.4.0	
5. BIOLÓGICO	1. Epidemias	1. Doenças infecciosas virais	0	1.5.1.1.0	
		2. Doenças infecciosas	0	1.5.1.2.0	
		3. Doenças infecciosas	0	1.5.1.3.0	
		4. Doenças infecciosas fúngicas	0	1.5.1.4.0	
	2. Infestações/Pragas	1. Infestações de animais	0	1.5.2.1.0	
		2. Infestações de algas	1. Marés vermelhas	1.5.2.2.1	
			2. Ciano bactérias	1.5.2.2.2	
			0	1.5.2.3.0	

CATEGORIA	GRUPO	SUBGRUPO	TIPO	SUBTIPO	COBRADE	
2. TECNOLÓGICO	1. Desastres Relacionados a Substâncias radioativas	1. Desastres siderais	1. Queda de satélite	0	2.1.1.1.0	
		2. Desastres com substâncias e equipamentos radioativos de uso em	1. Fontes radioativas em	0	2.1.2.1.0	
		3. Desastres relacionados com riscos de intensa poluição ambiental	1. Outras fontes de liberação de radionuclídeos para o meio ambiente	0	2.1.3.1.0	
	2. Desastres Relacionados a Produtos Perigosos	1. Desastres em plantas e distritos industriais, parques e armazenamentos	1. Liberação de produtos químicos para a atmosfera causada por explosão ou	0	2.2.1.1.0	
			2. Desastres relacionados à contaminação da água	1. Liberação de produtos químicos nos sistemas de	0	2.2.2.2.0
		3. Desastres Relacionados a	2. Derramamento de produtos químicos em ambiente lacustre,	0	2.2.4.1.0	
			4. Desastres relacionados a transporte de produtos perigosos	1. Liberação produtos químicos e contaminação		0
		3. Desastres Relacionados a	1. Transporte rodoviário	1. Transporte rodoviário	0	2.2.4.2.0
				2. Transporte ferroviário	0	2.2.4.3.0
				3. Transporte aéreo	0	2.2.4.4.0
				4. Transporte dutoviário	0	2.2.4.5.0
				5. Transporte marítimo	0	2.2.4.6.0
				6. Transporte aquaviário	0	2.3.1.1.0
	4. Desastres relacionados a	1. Colapso de	1. Incêndios em plantas e distritos industriais	0	2.3.1.2.0	
			2. Incêndios em	0	2.4.1.0.0	
	5. Desastres relacionados a transporte de passageiros e cargas	2. Rompimento/colapso de	2. Transporte	0	2.4.2.0.0	
			1. Transporte rodoviário	0	2.5.1.0.0	
		3. Transporte aéreo	2. Transporte	0	2.5.2.0.0	
			3. Transporte aéreo	0	2.5.3.0.0	
			4. Transporte marítimo	0	2.5.4.0.0	
		5. Transporte aquaviário	0	2.5.5.0.0		