

Mapeamento de áreas de inundação em três municípios
localizados na bacia do rio Itajaí

Gustavo Andrei Speckhann

Gustavo Andrei Speckhann

**MAPEAMENTO DE ÁREAS DE INUNDAÇÃO EM TRÊS
MUNICÍPIOS LOCALIZADOS NA BACIA DO RIO ITAJAÍ**

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

Orientador: Prof. Dr. Pedro Luiz Borges
Chaffe

Coorientador: Prof. Dr. Roberto Fabris
Goerl

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

Speckhann, Gustavo Andrei
MAPEAMENTO DE ÁREAS DE INUNDAÇÃO EM TRÊS MUNICÍPIOS
LOCALIZADOS NA BACIA DO RIO ITAJAÍ / Gustavo Andrei
Speckhann ; orientador, Pedro Luiz Borges Chaffe ;
coorientador, Roberto Fabris Goerl. - Florianópolis, SC,
2015.
64 p.

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

Inclui referências

1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2. Distribuição de
Extremo. 3. Inundação. 4. Bacia do Rio Itajai - Blumenau
Gaspar e Ilhota. 5. Validação cruzada - Jackknife. I.
Chaffe, Pedro Luiz Borges. II. Goerl, Roberto Fabris. III.
Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em
Engenharia Sanitária e Ambiental. IV. Título.

Gustavo Andrei Speckhann

MAPEAMENTO DE ÁREAS DE INUNDAÇÃO EM 3 MUNICÍPIOS NA BACIA DO RIO ITAJAI

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

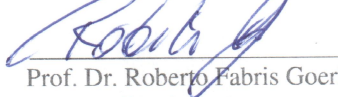
Florianópolis, 08 de julho de 2015.



Prof. Dr. Pedro Luiz Borges Chaffe

Orientador

Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

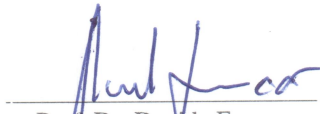


Prof. Dr. Roberto Fabris Goerl

Coorientador

Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

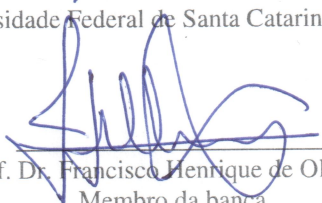
Banca Examinadora:



Prof. Dr. Davide Franco

Membro da banca

Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC



Prof. Dr. Francisco Henrique de Oliveira

Membro da banca

Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a Deus pela vida, por ser a fonte de sentido, significado e esperança.

Agradeço também aos meus pais, Valdir e Eliane, que em todos os momentos durante a minha vida colocaram muitas vezes suas vontades e realizações em segundo plano, de modo que eu pudesse ter acesso a tudo o que eles julgaram adequado para a formação do meu caráter. Sem dúvida nenhuma, grande parte desta conquista é oferecida a eles, por terem se dedicado e se esforçado tanto. Sem eles, essa etapa da minha vida não seria possível. Muito obrigado!

Agradeço a minha amada e querida esposa, Stephanie. Por toda companhia em todos os anos de namoro, por ser uma das maiores incentivadoras e auxiliadoras durante os anos de graduação. Obrigado por acreditar em mim, e por me dar o privilégio de poder dividir a minha vida ao teu lado. Agradeço por toda compreensão, dedicação e amor.

Agradeço ao meu irmão, Breno por toda amizade e companheirismo. Alguns tem a chance de apenas ter um irmão, eu tenho o privilégio de do meu irmão ser também o meu melhor amigo! Agradeço também a Rafaela, por toda amizade e apoio! Sem dúvida, vocês fizeram grande diferença na minha vida!

Agradeço em especial ao Prof. Pedro, primeiramente pela oportunidade de participar do LabHidro, pela dedicação em ajudar e pela parceria. Além de um grande professor, um amigo!

Agradeço também ao Prof. Roberto, pela amizade e pelas horas de dedicação e paciência explicando e ensinando. Muito obrigado!

Agradeço a banca, ao Prof. Davide e ao Prof. Francisco, pelas colaborações que fizeram ao meu trabalho.

Agradeço a Família Jungklaus (Raulino, Verena, Danielle e Andreas) por terem sido a extensão da minha família e por me adotarem e permitirem fazer parte da família deles. Muito obrigado por todo apoio.

Agradeço a todos os amigos da Munil. A todos que de alguma maneira, me ajudaram e me incentivaram durante os anos de graduação. A Munil foi peça chave durante todos os anos de graduação. Agradeço principalmente ao Rui, Ralflem, Rodrigo, Daniel, Andrey, Dantas, Acauã e a Taline.

Agradeço também aos amigos do LabHidro. Todas as conversas e ajudas durante esse tempo que faço parte do laboratório foram muito importantes. Agradeço em especial ao João, a Tássia, a Camyla , a Priscilla e a Debora.

Agradeço a todos os amigos que fiz ao longo do tempo de graduação, a todos os que de alguma maneira marcaram e influenciaram a minha vida de alguma maneira. Muito obrigado!

RESUMO

As inundações são fenômenos naturais que tem afetado a humanidade desde a antiguidade. O estado de Santa Catarina possui um histórico de tragédias e dificuldades devido a esse fenômeno, em especial a região do Vale do Itajaí, localizado na bacia hidrográfica do Rio Itajaí. O objetivo deste trabalho foi testar uma metodologia para mapeamento das áreas de inundação dos municípios de Blumenau, Gaspar e Ilhota. Os municípios escolhidos estão localizados no Vale do Itajaí. No presente trabalho foi realizado o estudo estatístico de vazões ou cotas máximas baseado em séries históricas. As análises estatísticas foram realizadas utilizando as distribuições de extremo Normal, Log Normal, Gumbel e Log Pearson tipo 3 – as quais foram avaliadas pelo processo de *Jackknife* de validação cruzada. Os municípios foram mapeados em áreas de alta, média ou baixa susceptibilidade a inundação de acordo com os resultados encontrados através das distribuições e do modelo HAND – *Height Above Nearest Drainage*. As distribuições de extremo empregadas apresentaram valores de correlação muito próximos de 1 e valores de Bias e Erro Padrão inferiores a 7%. Os mapas gerados com o HAND foram validados com os pontos obtidos em campo, apresentando resultados satisfatórios, pois foi possível perceber uma continuidade dos resultados ao unir o mapa dos municípios .

Palavras-chave: Distribuição de Extremo, Inundação, validação cruzada –*Jackknife*, Bacia do Rio Itajaí, Ilhota, Gaspar e Blumenau.

ABSTRACT

Floods are a natural phenomenon which have affected the humanity since the ancient times. The state of Santa Catarina has a history of tragedies and difficulties due to this phenomenon, especially the region of Vale do Itajaí, located in the basin of Rio Itajaí. The objective of this study was to test a methodology for mapping of flood areas of the cities of Blumenau, Gaspar and Ilhota. The cities chosen are located in the Vale do Itajaí. At the present work, the statistical analysis of extreme flows was based on historical data. Statistical analyzes were performed using the extreme distributions Normal, Log Normal, Gumbel and Log Pearson Type 3 - which were evaluated by cross-validation process called Jackknife. The cities were mapped in areas of high, medium or low susceptibility to flooding according to the results found through distributions and the HAND model. The extreme distributions employed showed correlation values very close to 1 and the Bias Standard Error values were less than 7%. The maps generated with HAND were validated with the points obtained in the field, presenting satisfactory results, since it was possible to observe a continuity of the results by uniting the maps of the cities.

Keywords: Extreme Analysis Distribution, Inundation, Cross Validation- Jackknife, Itajai Basin, Ilhota, Gaspar e Blumenau.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Aplicação de distribuição de probabilidade sob os dados fluviométricos combinado com o modelo HAND e o Modelo digital de terreno, resultando no mapa de susceptibilidade a inundação.....	18
Figura 2- Evolução do aumento do nível de água no rio.....	21
Figura 3 – Representação simplificada de ‘n’ retiradas de elementos da amostra ao utilizar <i>Jackknife</i>	25
Figura 4- Etapas para a correção e geração de um MDT hidrologicamente consistente. Modificado de Nobre et al. 2011.	26
Figura 5- Procedimento para o cálculo do HAND. Modificado do Nobre et al. 2011.	27
Figura 6 - Localização dos municípios selecionados	29
Figura 7 – Dados diários de vazão ou cota para os municípios de Blumenau (a), Gaspar (b) e Ilhota(c).....	31
Figura 8 – Vazões Máximas estação Gaspar.....	32
Figura 9 – Máximas anuais de vazão para os municípios de Blumenau (a), Gaspar 1 (b), Gaspar 2 (c) e Ilhota (d).	33
Figura 10- Cota x Vazão município de Blumenau.	34
Figura 11 – Cota x Vazão município de Ilhota.....	34
Figura 12 - Distribuições de Extremo aplicadas para os municípios de Blumenau (a), Gaspar 1(b), Gaspar 2 (c) e Ilhota (d).....	39
Figura 13 - Conjunto de valores obtidos com <i>Jackknife</i> , (diagramas de caixa) e os valores de correlação obtidos sem <i>Jackknife</i> (representados por x) aplicadas para os municípios de Blumenau (a), Gaspar 1(b), Gaspar 2 (c) e Ilhota (d). No diagrama de caixa, a caixa central é delimitada pelo primeiro quartil (Q_1) e o terceiro quartil (Q_3), onde $IQR = Q_3 - Q_1$. A linha vermelha no interior da caixa representa a mediana, a haste superior se estende até $Q_3 + 1,5IQR$ e a haste inferior até $Q_1 - 1,5IQR$. Os valores não compreendidos nos limites estabelecidos são considerados <i>outliers</i> (representados por +).....	40
Figura 14 - Cálculo do coeficiente de correlação aplicadas para os municípios de Blumenau(a), Gaspar 1(b), Gaspar 2 (c) e Ilhota (d).	41
Figura 15 –Mapa de susceptibilidade a inundação Blumenau.	45
Figura 16 – Mapa de susceptibilidade a inundação Gaspar.....	46
Figura 17 – Mapa de susceptibilidade a inundação Ilhota.....	47
Figura 18- Mapa de susceptibilidade a inundação para Blumenau , Gaspar e Ilhota	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Informações sobre o conjunto de barragens construídas para amenizar o impacto das cheias na Bacia do Rio Itajai.	30
Tabela 2- Tabela das estações selecionadas para análise de distribuição de extremo.....	30
Tabela 3- Classificação da susceptibilidade a inundação.....	38
Tabela 4 - Valores do coeficiente de correlação entre os dados observados em relação aos dados calculados com as distribuições.....	41
Tabela 5- Valores de <i>Bias</i> para cada uma das distribuições aplicadas para cada uma das cidades	42
Tabela 6 - Valores de Erro Padrão para cada uma das distribuições aplicadas para cada uma das cidades.....	43
Tabela 7- Valores do fatiamento da cota para cada município.....	44

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1. Objetivos.....	19
1.1.1. Objetivo geral.....	19
1.1.2. Objetivos específicos.....	19
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1. Enchentes.....	21
2.2. Aleatoriedade dos dados hidrológicos.....	22
2.3. Distribuições de Extremo para eventos hidrológicos	22
2.3.1. Avaliação de desempenho das distribuições	24
2.4. HAND – <i>Height Above Nearest Drainage</i>	25
3. MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1. Área de estudo	29
3.2. Dados de cota e vazão	30
3.3. Cálculo das Distribuições de Extremos	34
3.3.1. Escolha da Distribuição e análise	36
3.4. Elaboração dos mapas de susceptibilidade a inundação.....	37
4. RESULTADOS	39
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	49
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50
APÊNDICE A	54
APÊNDICE B	59
ANEXO A	62

1. INTRODUÇÃO

As inundações são fenômenos naturais que afetam a vida da humanidade desde a antiguidade (TUNG, 2002). O estado de Santa Catarina têm sofrido com esse fenômeno, que tem gerado danos e perdas, tanto em termos materiais e de infraestrutura, como em termos de vidas. Durante o período entre 1980 e 2010, ocorreram 1257 casos de inundações bruscas no estado de Santa Catarina (MARCELINO et al., 2014). Estima-se que as inundações bruscas em conjunto com escorregamentos, durante o período de 2000-2010, resultaram em um total de 154 mortes e 58.323 pessoas desabrigadas.

A ocorrência de fenômenos naturais extremos pode também ser sinônimo de grandes prejuízos econômicos, principalmente quando associados a locais densamente habitados – em especial, grandes centros urbanos.

Somente no ano de 2008 (o qual fora um ano excepcional, pois na região da Grande Florianópolis, as chuvas acumuladas para o mês de Novembro atingiram aproximadamente 270% acima da média esperada) os valores envolvidos na remediação e recuperação dos estragos ocasionados pelos fenômenos naturais foram de R\$ 5.338.477.610 (HERRMANN, 2014).

Blumenau, Gaspar e Ilhota municípios localizados em sequência na bacia e que se desenvolveram as margens do rio Itajaí, apresentam muitos relatos históricos do poder destrutivo das inundações.

Em virtude das inundações serem um fenômeno natural e do potencial de dano associado ao fenômeno, várias são as tentativas de prever sua ocorrência e mitigar os seus danos. Um dos métodos mais comuns utilizado para previsão inundações é o uso de modelos hidráulicos. No entanto, existe uma tendência de automatizar o processo de mapeamento através do Sistema de Informações Geográficas (SIG), fato esse que tem propiciado o desenvolvimento de mapas de inundação, gerando informações espacialmente mais precisas (NODOLF et al., 2008; SAVAGE et al., 2014).

Existem basicamente 2 tipos de modelos comumente utilizados em hidrologia que podem ser aplicados ao mapeamento de inundações. Os modelos hidrológicos – os quais são representações matemáticas do comportamento dos sistemas hídricos (FAN & COLLISCHONN, 2014), e os modelos hidráulicos – os quais buscam utilizar os conhecimentos de precipitação sobre a bacia, de

modo que se consiga simular a propagação da onda de cheia. Saraiva et al., (2010), afirmam que existe uma crescente demanda em aplicar modelos hidrológicos, principalmente para bacias onde os dados fluviométricos são incipientes.

De acordo com Merwade et al., (2008), a modelagem de inundações envolve a estimativa de picos de vazão de registros de chuva (modelagem hidrológica), estimar a elevação da superfície de água (modelagem hidráulica) e a comparar os resultados obtidos para um modelo de terreno, de modo que se obtenha a área inundada. No entanto, o método mais comumente empregado na predição de inundações é o uso de modelos hidráulicos (SAVAGE et al., 2014).

O mapeamento de inundações é o processo que define em um mapa a área coberta por água em um evento de inundação. O mesmo pode também ser feito utilizando modelo digital do terreno (MDT) onde o objetivo consiste em comparar o nível do rio com as alturas do relevo e ver até onde os níveis de água vão atingir o relevo (MERWADE et al., 2008).

Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo testar uma metodologia no mapeamento de susceptibilidade a inundação que combina as informações relativas ao relevo, juntamente com a aplicação de distribuições de probabilidade para eventos extremos (Figura 1).

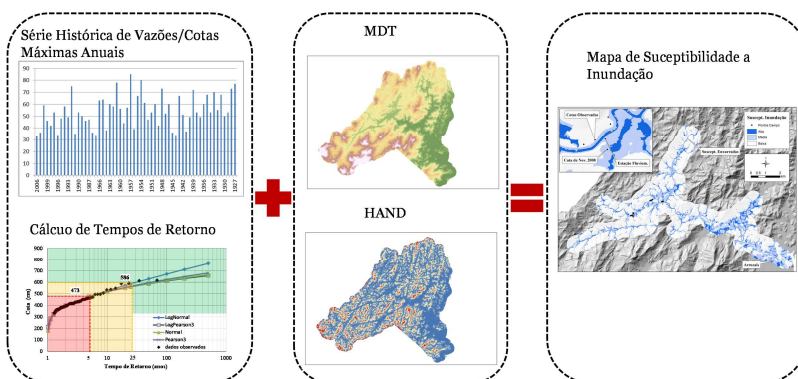


Figura 1- Aplicação de distribuição de probabilidade sob os dados fluviométricos combinado com o modelo HAND e o Modelo digital do terreno, resultando no mapa de susceptibilidade a inundação.

Essa metodologia é composta da união de dois procedimentos. O primeiro consiste em realizar o estudo estatístico de vazões extremas baseada nos registros históricos de vazões ou cotas. Posteriormente, aplicar os resultados das distribuições de extremo em conjunto com o modelo HAND – *Height Above Nearest Drainage* de modo a realizar os cortes no modelo digital de terreno e assim classificar as áreas dos municípios escolhidos (Blumenau, Gaspar e Ilhota) como alto, médio ou baixo grau de susceptibilidade a inundação.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo geral

O objetivo deste trabalho foi testar uma metodologia para mapeamento das áreas de inundação dos municípios de Blumenau, Gaspar e Ilhota.

1.1.2. Objetivos específicos

- Análise dos eventos de cheia que atingem os municípios de Blumenau, Gaspar e Ilhota.
- Utilizar a metodologia *Jackknife* para avaliar a robustez das distribuições escolhidas.
- Elaborar mapas de susceptibilidade à inundação para os municípios de Blumenau, Gaspar e Ilhota.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. ENCHENTES

As enchentes podem ser definidas como uma dada vazão máxima em uma certa seção fluvial com capacidade de ultrapassar o leito menor podendo assim causar prejuízos materiais (Figura 2 - B) (FERNANDES et al, 2013). Quando as enchentes atingem magnitudes que extravasam a calha do rio, então, dá-se o nome de inundação (Figura 2- C). As inundações são um caso particular das enchentes, aonde o aumento do nível do rio excede a vazão normal e ocorre o transbordamento de água sobre as áreas mais próximas do rio. A Figura 2 apresenta a evolução do aumento do nível do rio, aonde inicialmente tem-se uma vazão em nível médio (A), com o passar do tempo atinge-se o estágio de enchente (B) e posteriormente após o rio extrapolar a calha do rio, considera-se inundação.

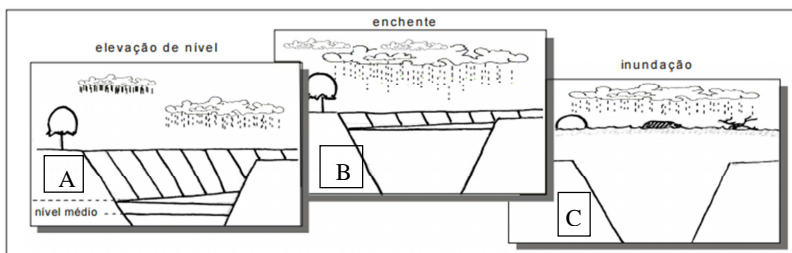


Figura 2- Evolução do aumento do nível de água no rio.
Modificado KOBAYAMA et al. (2006).

As enchentes urbanas, são decorrência de dois processos, os quais podem ocorrer de modo independente ou em conjunto. Enchentes em áreas ribeirinhas – as quais são enchentes naturais e que afetam a população que ocupa os leitos dos rios devido a falta de planejamento do uso do solo; e/ou a urbanização – enchentes provocadas pela urbanização (TUCCI, 1993).

Pode-se perceber que o aumento da urbanização, aliada ao crescimento populacional em conjunto com a falta de estrutura dos municípios, corrobora para que as cidades sejam cada vez mais atingidas pelas inundações.

2.2. ALEATORIEDADE DOS DADOS HIDROLÓGICOS

Para prever e amenizar as inundações, é importante compreender que os processos hidrológicos estão sujeitos a uma variabilidade considerável. Hirsch et al. (1992), citam que existem três razões principais para a dificuldade em se prever e explicar as variáveis hidrológicas. 1) A aleatoriedade das variáveis hidrológicas, 2) o erro de amostragem nas medições e 3) a compreensão equivocada dos processos hidrológicos.

O primeiro ponto é devido a inerente aleatoriedade dos processos e do próprio ciclo hidrológico. O segundo aspecto abordado é o erro de amostragem, pois em hidrologia as amostras e os dados coletados são apenas uma parte muito pequena de uma população amostral. Um exemplo é a precipitação, onde os volumes observados em uma determinada parte da bacia não necessariamente representam com adequadamente a característica da bacia como um todo, uma vez que o volume de precipitado na cabeceira da bacia pode ser bem diferente do que acontece nas demais partes da bacia. O terceiro ponto é o resultado da compreensão incorreta dos processos hidrológicos envolvidos, o que demonstra que mesmo ao diminuir/eliminar os erros na coleta dos dados, ainda assim haverá erros na estimativa/previsão, uma vez que esse erro está associado à má interpretação dos resultados obtidos e das conclusões retiradas.

Hirsch et al. (1992) apontam que antes mesmo de iniciar os estudos estatísticos, o hidrólogo deve se dedicar a compreender os processos hidrológicos da forma mais profunda possível antes de iniciar o uso de métodos estatísticos.

2.3. DISTRIBUIÇÕES DE EXTREMO PARA EVENTOS HIDROLÓGICOS

Um dos eixos da quantificação do perigo e da avaliação de risco é a análise de frequências extremas, sendo o objetivo principal da análise de frequência estimar a distribuição de alguma variável ambiental (RENARD et al., 2013).

No estudo de vazões extremas, o procedimento geralmente adotado consiste em submeter à série de dados coletados à uma análise estatística, procurando assim enquadrar a série dentro de uma distribuição de extremo, de modo que por meio de critérios de comparação, as distribuições aplicadas sejam analisadas e proceda-se a escolha da distribuição mais adequada para a série em questão.

Devido a grande quantidade de aplicações das análises de frequência, muitos países elaboraram manuais de recomendação em como realizar as análises de frequência de dados hidrológicos, do modo mais adequado (RENARD et al., 2013). Alguns dos países que já possuem esses guias de análise de frequência de vazão são: Estados Unidos da América [*Interagency Advisory Committee on Water Data*, 1982], Suíça [SPREAFICO et al., 2003], Reino Unido [Reed et al., 1999] e Austrália [*Institution for Engineers Australia*, 1987].

Um dos desafios na análise de estatística de vazões, é encontrar uma distribuição de extremo que possa se ajustar razoavelmente bem aos dados medidos, e assim estimar os parâmetros da distribuição para obter as estimativas de risco que apresentem resultados satisfatoriamente acurados (STEDINGER, VOGEL & FOUFOULA-GEORGIU, 1992). Usualmente, evita-se utilizar valores de tempo de retorno superiores a duas vezes o tamanho da série de dados. As distribuições mais comumente utilizadas em hidrologia são: Normal, Log Normal, Gumbel, Weibull, Pearson tipo 3, Log Pearson tipo 3. (STEDINGER, VOGEL & FOUFOULA-GEORGIU, 1992).

A distribuição Normal é umas das distribuições mais comumente aplicadas em hidrologia, principalmente em fenômenos que possuem comportamento bem definido – variável que flutua de forma simétrica em torno de um valor central, como por exemplo: média anual de vazão, ou carga anual de poluentes (NAGHETTINI & PINTO, 2007). A distribuição Normal possui como parâmetros, média (μ) e o desvio padrão (σ).

No entanto, muitos processos hidrológicos não são normalmente distribuídos, e para muitos casos, para variáveis com valores não negativos, o log dos seus valores apresenta distribuição normal. Os parâmetros também continuam sendo média e desvio padrão. A distribuição Log Normal é geralmente aplicada em casos onde a variável é oriunda de um processo de multiplicação (STEDINGER, VOGEL & FOUFOULA-GEORGIU, 1992).

A distribuição de Gumbel é a mais empregada na análise de variáveis hidrológicas, como por exemplo, no estudo de vazões de enchente (NAGHETTINI & PINTO, 2007). Gumbel também se caracteriza por apresentar média e desvio padrão como parâmetros, no entanto, o coeficiente de assimetria é fixado em 1,1396.

O *United States Geological Survey* (USGS), sugere que a distribuição Log Pearson Tipo 3 (LP3) é a distribuição estatística mais recomendada para o estudo de vazões extremas (NAGHETTINI &

PINTO, 2007). A distribuição apresenta grande aplicabilidade devido ao bom ajuste aos dados medidos e a fácil utilização (McCUEEN, 1941).

2.3.1. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DAS DISTRIBUIÇÕES

Além da análise dos dados hidrológicos por meio de diferentes distribuições, é preciso avaliar a confiabilidade dos resultados obtidos por meio das distribuições. Uma das maneiras para avaliar o desempenho das análises de frequência, é calcular *bias* e RMSE (*Root-Mean-Square Error*) Renard et al., (2013).

Neste trabalho, a verificação do desempenho das distribuições empregadas foi feito por meio do cálculo de *Bias* e Erro Padrão, os quais foram obtidos por meio de um processo de validação cruzada, denominado *Jackknife*.

O conceito principal deste método de validação consiste em retirar um elemento da amostra por vez (Figura 3 – Etapa 1), com os elementos restantes procede-se o tratamento estatístico de interesse – exemplo: média, desvio padrão ou variância, armazenando o resultado obtido (Figura 3 – Etapa 2).

Posteriormente, o dado retirado, é reinserido na amostra, e procede-se a retirada de outro elemento da amostra - aplicando o tratamento estatístico de interesse após cada nova retirada. Depois de cada amostra ter sido retirada uma vez do conjunto de dados, utiliza-se os valores armazenados para calcular *Bias* e o Erro Padrão do procedimento estatístico aplicado (Figura 3 – Etapa 3 e 4)

No cenário brasileiro, vários autores na área de hidrologia utilizaram *Jackknife* para avaliar a robustez e a confiabilidade nos resultados obtidos. Costa & Naghettini (2012) aplicaram *Jackknife* para avaliar o desempenho de modelos regionais. Saraiva, Fernandes & Naghettini (2011) utilizaram *Jackknife* para avaliar e quantificar as incertezas. Wolff, Duarte & Mingoti (2014), utilizaram a validação cruzada para auxiliar na estimativa da precipitação média anual, e Pinheiro & Naghettini (2010) aplicaram *Jackknife* para avaliar a confiabilidade dos resultados de regionalização.

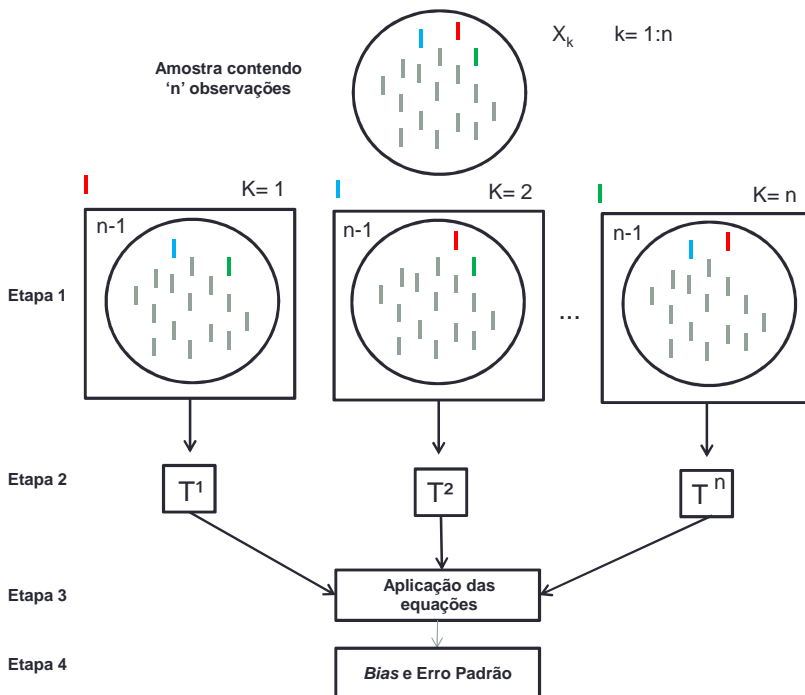


Figura 3 – Representação simplificada de 'n' retiradas de elementos da amostra ao utilizar *Jackknife*.

2.4. HAND – HEIGHT ABOVE NEAREST DRAINAGE

Em virtude da maior disponibilidade e da qualidade dos dados topográficos, os Modelos Digitais de Terreno (MDT) vem sendo mais utilizados em estudos hidrológicos relacionados ao mapeamento de áreas susceptíveis a inundação. Em contrapartida, a utilização de MDT para estimar as áreas mais susceptíveis a inundação surgem como uma alternativa interessante devido à pouca disponibilidade de dados fluviométricos.

Um dos modelos que pode ser aplicado para o mapeamento de áreas propensas a inundação é o HAND - *Height Above Nearest Drainage* (RENNÓ et al, 2008; NOBRE et al, 2011;). O HAND é um modelo que converte o modelo digital de terreno (MDT), levando em consideração a diferença de altitude do terreno e a altitude da rede de drenagem mais próxima.

Para a execução do modelo são necessários um MDT hidrológicamente consistente - onde os eventuais pontos de obstrução de fluxo no MDT (*sinks*) sejam preenchidos; direção de fluxo calculada para cada célula; e a rede de drenagem (RENNÓ et al., 2008).

Para realizar a correção do MDT e assim calcular as direções de fluxo, o primeiro passo consiste em delimitar os *sinks* (locais onde o fluxo está obstruído) e posteriormente a esse passo, determinar as cotas que estiverem apresentando obstrução para serem corrigidas, de modo que o fluxo possa prosseguir até a exutória (Figura 4).

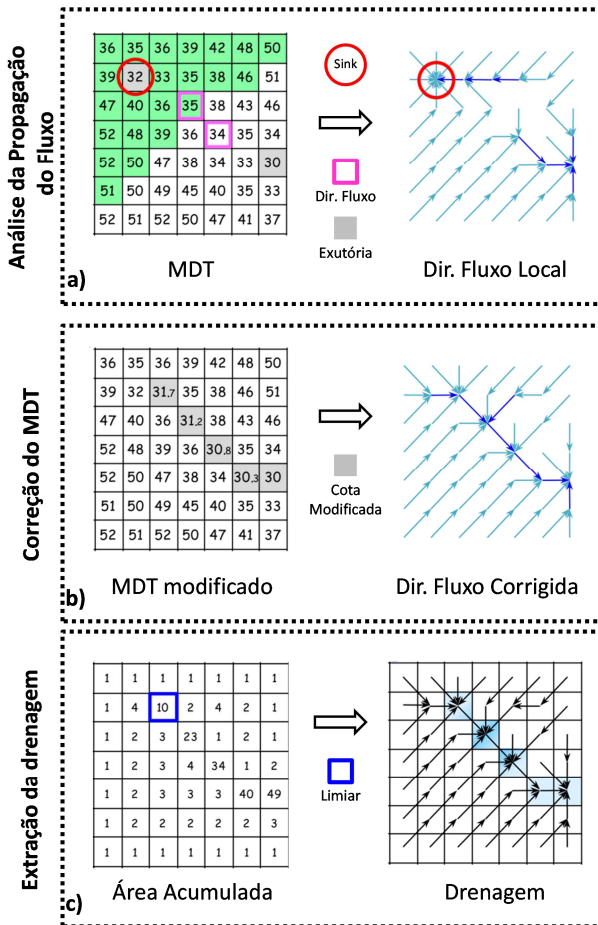


Figura 4- Etapas para a correção e geração de um MDT hidrológicamente consistente. Modificado de Nobre et al. 2011.

O processo de eliminação das áreas planas e dos *sinks* (possíveis locais onde o fluxo ficaria acumulado) é similar ao sugerido por O'Callaghan and Mark(1984) e Jenson & Domingue (1988). Concluída a etapa da correção de fluxo, tem-se a determinação da rede de drenagem, a qual é dependente da área mínima necessária para iniciar o escoamento (Montgomery & Dietrich, 1998), onde quanto menor a quantidade de células necessárias para gerar o escoamento, maior será a densidade da rede de drenagem gerada.

Após este procedimento, tem-se o MDT corrigido e as áreas de contribuição locais corrigidas, e portanto, o modelo digital de terreno pode ser considerado hidrológicamente adequado.

As fluxos calculados, juntamente com a rede de drenagem, são utilizadas para gerar o mapa da drenagem, o qual o modelo utiliza para produzir a superfície normalizada (NOBRE et al., 2011). A Figura 5 apresenta um esquema simplificado da normalização da altimetria, aonde ao final tem-se o resultado do modelo HAND.

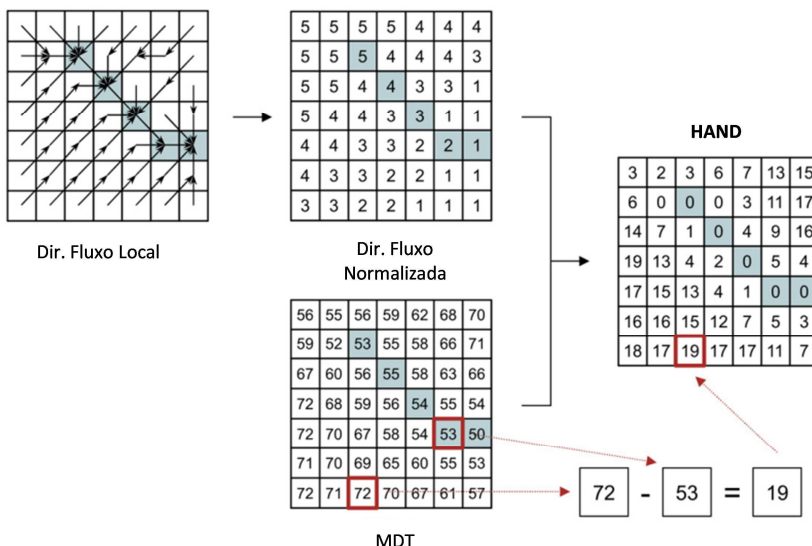


Figura 5- Procedimento para o cálculo do HAND. Modificado do Nobre et al. 2011.

Estudos com a utilização do modelo HAND já foram empregados em: Grão-Ducado de Luxemburgo, em uma bacia de 82 km², com precipitação anual de 850 mm e elevação variando de 195m a

352m (S. GHARARI et al, 2011;) e na Reserva Cueiras, na Amazônia central, no baixo rio Negro, localizado 80 km ao Noroeste de Manaus, onde a precipitação anual é de 2.442 mm, o clima é tropical de monções, com umidade relativa próxima a 84% e temperatura média de 26°C (CUARTAS et al., 2012).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada na região Sul do Brasil, no estado de Santa Catarina. Os municípios selecionados foram Blumenau, Gaspar e Ilhota (Figura 6). Um dos critérios de seleção foi a ocorrência de inundações, a qual tem se repetido nos últimos anos e o fato de todos os municípios estarem na mesma bacia e apresentarem 1 rio em comum, o rio Itajaí-Açu. Estima-se que somente em Blumenau, desde 1852 foram registrados 77 eventos com cota superior a 8 m (Frank & Pinheiro, 2003).

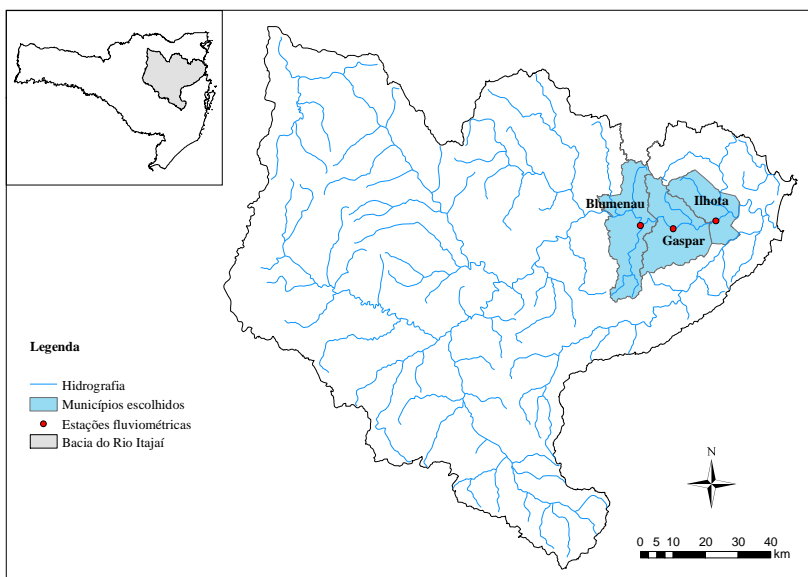


Figura 6 - Localização dos municípios selecionados

A bacia estudada, conta também com a instalação de 3 barragens (Sul, Norte e Oeste) as quais foram construídas de modo a reduzir os impactos das ondas de cheia na bacia. A Tabela 1 apresenta as informações sobre as barragens.

Tabela 1 – Informações sobre o conjunto de barragens construídas para amenizar o impacto das cheias na Bacia do Rio Itajai.

	Barragem Sul	Barragem Norte	Barragem Oeste
Localização	Ituporanga	José Boiteux	Taió
Ano de início de operação	1976	1992	1973

3.2. DADOS DE COTA E VAZÃO

Os dados fluviométricos utilizados foram obtidos por meio do sistema de informação hidrológica (HidroWeb) da Agência Nacional de Águas (ANA). A Tabela 2 apresenta a quantidade de dados disponíveis nos municípios escolhidos para o estudo.

Tabela 2- Tabela das estações selecionadas para análise de distribuição de extremo

Estação	Quantidade de dados	Período de anos	Tipo de dado
Blumenau	65	1939-2005	Vazão
Gaspar	58	1927-1966 e 1985-2006	Cota
Ilhota	18	1989-2006	Vazão

No presente trabalho, foi dada prioridade para os dados de vazão, quando estes não estavam disponíveis foram utilizados os dados de cota. Nas estações Blumenau e Ilhota, foram utilizados os dados de vazão e cota e na estação Gaspar somente dados de cota.

Quando ocorria da estação apresentar a presença de dados de vazão e de cota, utilizou-se os registros de cota para comparar ou validar eventuais resultados extremos de vazão, verificando se fazia sentido naquela data uma vazão ou cota tão elevada, ou se o dado em questão era somente um erro de digitação. Nota-se que este procedimento não foi realizado na estação do município de Gaspar por não possuir registros de vazão. Dessa forma, quando identificado um valor de cota muito acima dos valores rotineiros, uma investigação em inventários e jornais era iniciada de modo a legitimar o valor da cota, ou simplesmente compreender como um equívoco na série de dados.

O primeiro passo na análise dos dados fluviométricos, foi a visualização dos dados de vazões e cotas de cada estação (Figura 7). Percebeu-se que os dados da estação Gaspar (Figura 7b), apresentaram

uma mudança no padrão, pois pode-se perceber a existência de um degrau nos registros de cota da estação Gaspar.

Na Estação Ilhota, Figura 7 (c), a influência das barragens não é clara em virtude da estação não apresentar dados superiores a 20 anos, o que acaba não refletindo a influência dos reservatórios no regime de vazões uma vez que a maior parte das barragens foi construída antes de 1989.

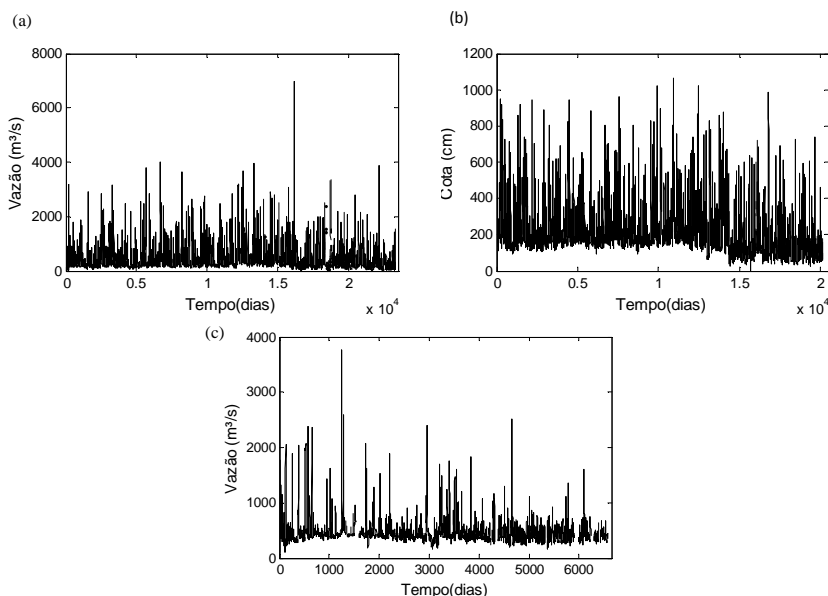


Figura 7 – Dados diários de vazão ou cota para os municípios de Blumenau (a), Gaspar (b) e Ilhota(c).

O próximo passo para compreender melhor o comportamento das séries de dados, foi analisar os valores das máximas, médias e mínimas mensais das estações. Por meio destas análises, foi possível identificar que os municípios escolhidos sofrem influência das barragens construídas para amortizar os efeitos das enchentes na bacia, destacando-se, principalmente a influência do reservatório Norte.

Ao realizar uma análise mais detalhada dos dados de máximas anuais de Gaspar (Figura 8), pode-se perceber que a estação de Gaspar possui uma falta de dados entre 1967-1984 e que os dados anteriores e posteriores a essa falha, apresentam diferença no comportamento da série de cotas. O degrau comentado anteriormente, ao observar o gráfico de vazões máximas anuais, fica ainda mais evidente. Os picos de vazões

entre 1927-1966 possuem valores próximos de 10 metros, e os valores encontrados para o período de 1985-2006 apresentam valores inferiores a 8 metros.

Portanto, na realização das análises de extremo, decidiu-se separar os dados de Gaspar em 2 blocos. Gaspar 1- referente aos dados de 1927 a 1966, e Gaspar 2 referente aos anos de 1985 a 2006.

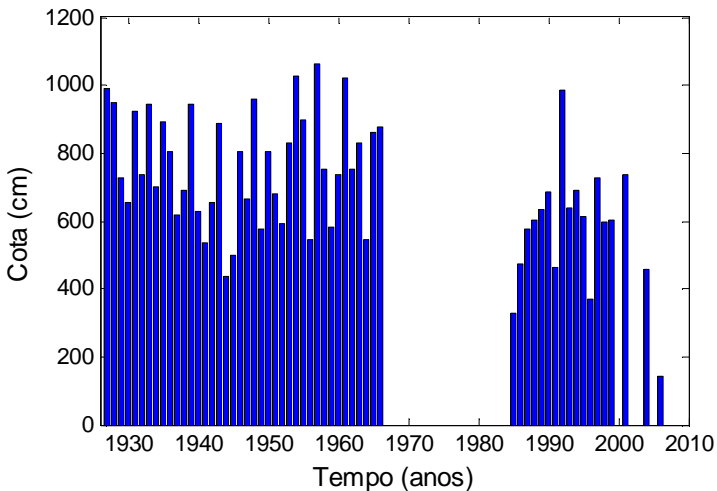


Figura 8 – Vazões Máximas estação Gaspar

A estação Blumenau apresentou redução das cotas máximas anuais principalmente após a construção da barragem Norte, localizada no município de José Boiteux. No entanto, este comportamento não é observado com clareza ao analisar as vazões máximas anuais (Figura 9 - a).

A estação Ilhota (Figura 9d), por possuir registro de dados a partir de 1988 – as barragem Sul e Oeste já estavam em operação e a barragem Norte, maior barragem das 3 construídas, iniciou a operação em 1992, portanto, a influência na redução das cotas e vazões também não é notória quanto em Gaspar.

Todavia, como o município encontra-se localizado a jusante dos municípios de Blumenau e Gaspar, pode-se inferir que Ilhota também sofreu influência na redução das cotas em virtude da amortização das ondas de cheia ocasionadas pelas barragens construídas a montante na bacia.

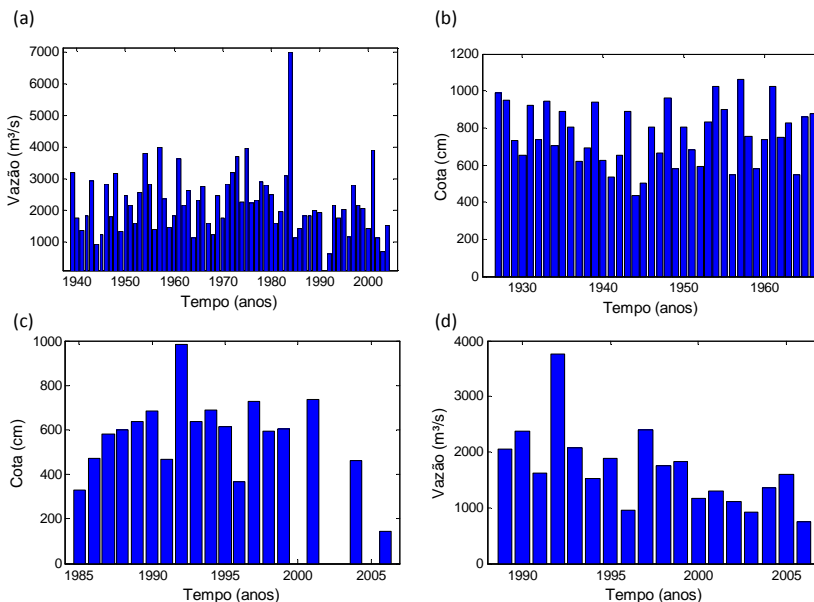


Figura 9 – Máximas anuais de vazão para os municípios de Blumenau (a), Gaspar 1 (b), Gaspar 2 (c) e Ilhota (d).

Outro quesito analisado em relação aos dados das estações, foram as curvas de cota x vazão, as quais para os municípios de Ilhota e Blumenau (Figura 10 e Figura 11, respectivamente), foram obtidas através das linhas de tendência dos dados de vazões máximas anuais e cotas máximas anuais.

A estação Ilhota, por possuir um registro histórico recente (18 anos de dados), apresenta uma curva chave representada por uma equação linear - única. Já no caso da estação Blumenau, pode-se perceber a presença de duas linhas de tendência para a curva cota x vazão, onde a primeira de 1939-1983 e a segunda de 1984-2004. Um dos fatores que acarretam na presença de mais de uma linha de tendência, são as mudanças na secção do canal de medição, e/ou as alterações na bacia. Em razão disso, a equação escolhida, foi a curva elaborada com os dados dos anos de 1984-2004.

As curvas chave foram obtidas foram utilizadas para converter os valores de vazões calculados por meio das distribuições em valores de cota e assim utilizar esses valores para realizar o fatiamento do MDT resultante do modelo HAND.

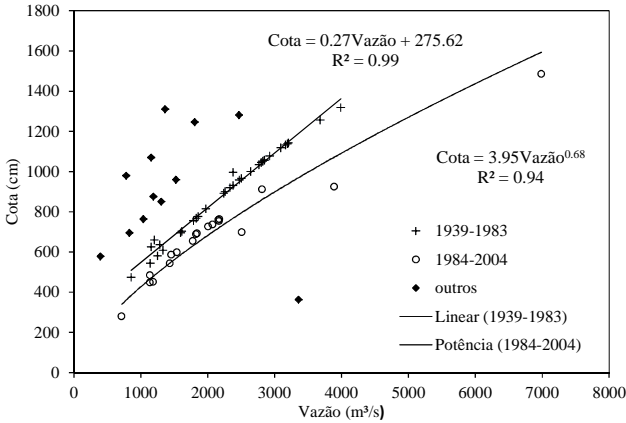


Figura 10- Cota x Vazão município de Blumenau.

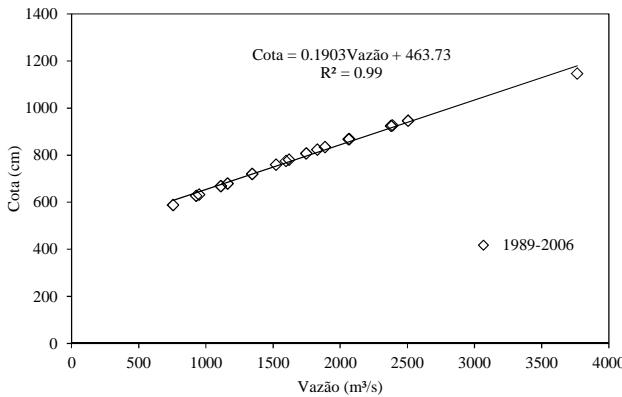


Figura 11 – Cota x Vazão município de Ilhota.

3.3. CÁLCULO DAS DISTRIBUIÇÕES DE EXTREMOS

As análises estatísticas foram realizadas utilizando os dados de máximas anuais de cada estação, sendo que no presente trabalho foram aplicadas 4 distribuições de probabilidades diferentes: Normal, Log-Normal, Gumbel e Log-Pearson 3.

A função densidade de probabilidade Normal é definida por:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right] \quad (1)$$

onde x é normalmente distribuída com média (μ) e variância (σ^2).

A função densidade de probabilidade Log-Normal é expressa por: (2)

$$f(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(x)-\mu}{\sigma}\right)^2\right] \text{ para } x > 0 \quad (2)$$

A distribuição de Gumbel é representada por:

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \exp\left[-\frac{x-\beta}{\alpha} - \exp\left(-\frac{x-\beta}{\alpha}\right)^2\right] \quad (3)$$

Com parâmetros média e desvio padrão- já apresentados em distribuições anteriores, e com parâmetros α e β , definido abaixo:

$$\sigma^2 = \frac{\pi^2\alpha^2}{6} \quad (4)$$

$$\mu = \beta + 0.5772\alpha \quad (5)$$

A função densidade de probabilidade de Log Pearson tipo 3 (LP3) é expressa por:

$$f(x) = |\beta| \{\beta[\ln(x) - \varepsilon]\}^{\alpha-1} \frac{\exp\{-\beta[\ln(x) - \varepsilon]\}}{\Gamma(\alpha)} \quad (6)$$

onde α é o parâmetro de forma, β parâmetro de escala, ε parâmetro de posição e $\Gamma(\alpha)$ é a função Gamma .

As análises preliminares dos dados, o cálculo das distribuições de extremo e o cálculo do *Bias* e Erro Padrão utilizando *Jackknife*, foram calculadas utilizando a ferramenta computacional MATLAB®. Os resultados das distribuições de extremo, foram comparados com os resultados obtidos utilizando o software HEC-SSP - U.S. Army Corps of Engineers Statistical Software Package.

3.3.1. ESCOLHA DA DISTRIBUIÇÃO E ANÁLISE

Após ter estimado os parâmetros para as 4 distribuições em análise, procedeu-se a escolha da distribuição de extremo de melhor aderência com os dados observados.

Quanto maior a série histórica dos dados observados, melhor será a capacidade da distribuição descrever de um modo mais adequado a realidade. No entanto, neste trabalho, a verificação do desempenho das distribuições empregadas foi feita por meio do cálculo de *Bias* e Erro Padrão, utilizando o processo de validação cruzada chamado *Jackknife*.

Neste estudo, o tratamento estatístico escolhido para avaliar o ajuste das distribuições aos dados observados foi o coeficiente de correlação entre os pontos observados (X) e os pontos calculados com as distribuições (Y). Sendo o coeficiente de correlação descrito na equação 7

$$\rho_{X,Y} = \frac{Cov(X,Y)}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{\sigma_{X,Y}}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (7)$$

onde X e Y são variáveis, σ é o desvio padrão, e o coeficiente de correção, $\rho_{X,Y}$, varia de -1 a 1.

Assumindo uma amostra composta por n observações, e que a estatística de interesse que se deseja calcular seja T, o primeiro passo do *Jackknife*, consiste em retirar uma observação da amostra. Posteriormente, calculou-se o valor do coeficiente de correlação utilizando os pontos remanescentes da amostra, resultando em $T^{(i)}$. Repetiu-se o procedimento, deixando de fora uma observação de cada vez, até que todos os n elementos da amostra fossem retirados e calculados os respectivos $T^{(i)}$. As equações 9 e 8 representam respectivamente, *Bias* e Erro Padrão (Martinez & Martinez, 2002).

$$\text{Erro Padrão} = \widehat{SEjack}(T) = \left[\frac{n-1}{n} \sum_{i=1}^n (T^{(i)} - \overline{T^{(j)}})^2 \right]^{1/2} \quad (8)$$

$$\text{Bias} = \widehat{Biasjack}(T) = (n-1)(\overline{T^{(j)}} - T) \quad (9)$$

onde $\widehat{Biasjack}(T)$ é a estimativa de Bias utilizando *Jackknife*, n é o número de elementos da amostra, $\overline{T^{(j)}}$ é a média das repetições de T e $\widehat{SEjack}(T)$ é a estimativa do erro padrão utilizando *Jackknife*.

3.4. ELABORAÇÃO DOS MAPAS DE SUSCEPTIBILIDADE A INUNDAÇÃO

Os mapas de susceptibilidade a inundação foram gerados a partir dos resultados obtidos com as distribuições de extremo escolhida em conjunto com o modelo HAND e comparados com os pontos medidos em campo. Como abordado anteriormente, neste trabalho a elaboração dos mapas de susceptibilidade a inundação foi realizada por meio do emprego de 2 métodos – aplicação de distribuição de extremo e espacialização dos resultados obtidos por meio da diferenças altimétricas obtidas com o auxílio do HAND (Figura 1).

Portanto, a partir da escolha da distribuição de melhor ajuste, procedeu-se a busca das vazões ou cotas para cada município de acordo com o tempo de retorno calculado por meio das distribuições de probabilidade.


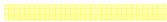

No presente trabalho os municípios foram classificados como alta susceptibilidade à inundação - áreas com tempo de retorno de até 5 anos. De 5 a 25 anos, a susceptibilidade foi considerada como média, e acima de 25 anos a susceptibilidade foi considerada baixa. A Tabela 3 apresenta a classificação da susceptibilidade a inundação.

Neste trabalho, foi utilizado o modelo digital de terreno obtido da base de dados da EPAGRI, STRM – NASA, o qual apresenta acurácia horizontal de 20 metros e vertical 16 metros.

Outra técnica utilizada para aumentar a precisão dos mapas obtidos, foi através de viagens à campo, de modo a coletar pontos nos municípios (marcados com GPS) que informem a altura da lâmina d'água em eventos extremos e nos eventos de menor magnitude. Essas informações foram obtidas com os responsáveis da Defesa Civil e com moradores antigos dos municípios de Ilhota e Gaspar.

Nestas idas a campo, os principais objetivos foram: identificar o RN das régua de nível dos municípios; marcar os pontos das inundações mais severas (no vale do Itajaí ocorreram eventos extremos em 1983,1984, 1992, 2008, 2011) e marcar os pontos de fácil alagamento na cidade.

Tabela 3- Classificação da susceptibilidade a inundação

Susceptibilidade à inundação	Tempo de retorno (anos)	Cor representativa
Alto	< 5	
Médio	$5 > x < 25$	
Baixo	> 25	

4. RESULTADOS

A estimativa/determinação das distribuições de extremo que descrevem os dados fluviométricos dos municípios, pode ser observada na Figura 12.

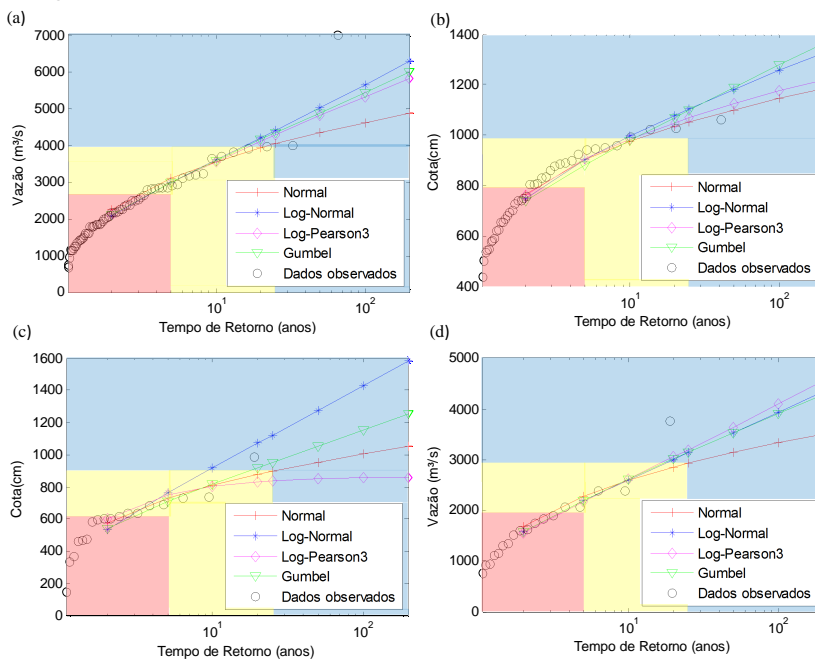


Figura 12 - Distribuições de Extremo aplicadas para os municípios de Blumenau (a), Gaspar 1(b), Gaspar 2 (c) e Ilhota (d)

Ao verificar a correlação dos dados medidos com os resultados das distribuições, pode-se observar por meio da Tabela 4 que os valores encontrados apontam para uma correlação forte, pois os valores são bem próximos a 1.

Ao realizar a segunda etapa do *Jackknife* onde todos os $T(i)$ são calculados, obtém-se um novo valor de correlação para cada amostra retirada – originalmente esses valores são utilizados no procedimento do *Jackknife* para obter a média das correlações e posteriormente calcular o Erro Padrão e *Bias*.

A Figura 13, apresenta o conjunto desses valores $T(i)$ de correlação, (diagramas de caixa) e os valores de correlação obtidos sem

a retirada de nenhum elemento da amostra (representados por x). No diagrama de caixa, a caixa central é delimitada pelo primeiro quartil (Q_1) e o terceiro quartil (Q_3). A linha vermelha no interior da caixa representa a mediana, a haste superior se estende até $Q_3 + 1,5IQR$ e a haste inferior até $Q_1 - 1,5IQR$. Os valores não compreendidos nos limites estabelecidos são considerados outliers (representados por +).

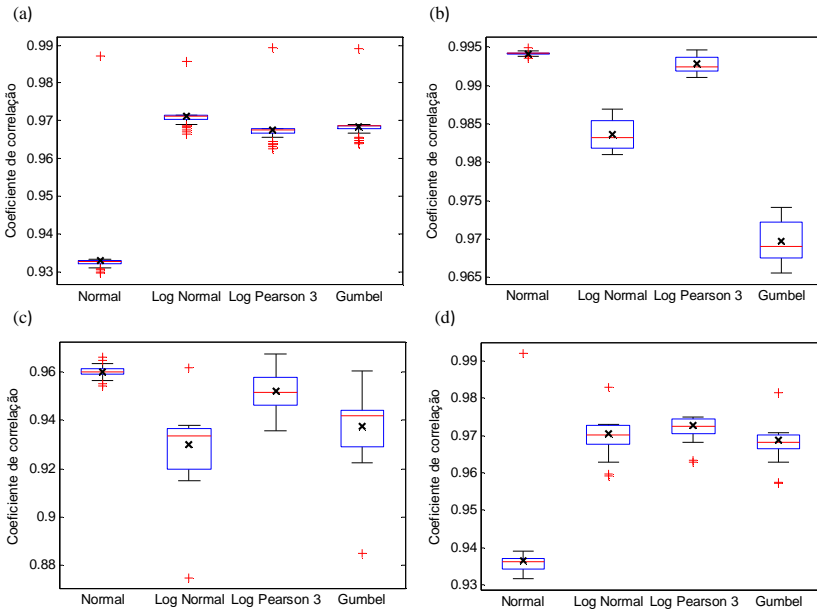


Figura 13 - Conjunto de valores obtidos com *Jackknife*, (diagramas de caixa) e os valores de correlação obtidos sem *Jackknife* (representados por x) aplicadas para os municípios de Blumenau (a), Gaspar 1(b), Gaspar 2 (c) e Ilhota (d). No diagrama de caixa, a caixa central é delimitada pelo primeiro quartil (Q_1) e o terceiro quartil (Q_3), onde $IQR = Q_3 - Q_1$. A linha vermelha no interior da caixa representa a mediana, a haste superior se estende até $Q_3 + 1,5IQR$ e a haste inferior até $Q_1 - 1,5IQR$. Os valores não compreendidos nos limites estabelecidos são considerados *outliers* (representados por +).

Na Figura 13, os municípios Blumenau (a) e Ilhota (d) apresentaram resultados muito semelhantes nas distribuições Log Normal, Log Pearson 3 e Gumbel, assim como a dispersão observada nos dados também foi pequena (inferior a 2%). Nota-se também que a distribuição Normal apresentou o menor coeficiente de correlação em

ambas as cidades. Contudo, em uma análise mais detalhada, é possível perceber que quando removido o ponto mais extremo da série, tanto para Blumenau quanto para Ilhota, o coeficiente de correlação apresentou valores muito próximos de 1, fato esse que também foi verificado para as outras distribuições aplicadas a Blumenau.

Ao realizar a segunda etapa do procedimento do *Jackknife*, obtém-se a Figura 14, a qual representa o novo cálculo do coeficiente de correlação após a retirada de 1 elemento do conjunto analisado. Percebe-se que em alguns casos (Blumenau e Ilhota), tem-se falsos positivos quando removido o evento mais extremo.

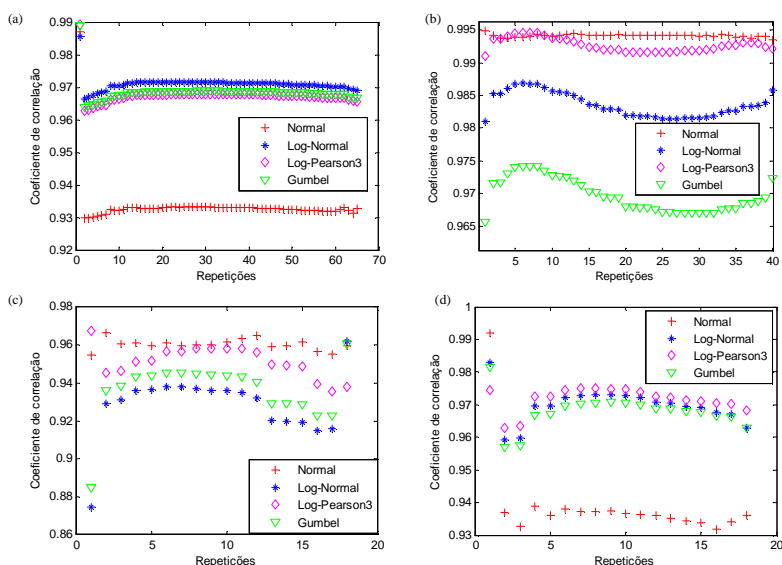


Figura 14 - Cálculo do coeficiente de correlação aplicadas para os municípios de Blumenau(a), Gaspar 1(b), Gaspar 2 (c) e Ilhota (d).

Tabela 4 - Valores do coeficiente de correlação entre os dados observados em relação aos dados calculados com as distribuições

Distribuição	Cidade			
	Blumenau	Ilhota	Gaspar 1	Gaspar 2
Gumbel	0.97	0.97	0.97	0.94
Log-Normal	0.97	0.97	0.98	0.93
Normal	0.93	0.94	0.99	0.96
Log-Pearson 3	0.97	0.97	0.99	0.95

Outro aspecto interessante a ser observado é que quando removido o evento mais extremo da série de máximas anuais, a distribuição que no geral apresentava menor correlação, passou a assumir o maior valor de correlação encontrado. Esse fenômeno pode ser observado no município de Blumenau, onde a distribuição Normal manteve-se entre 0.93 a 0.94, exceto quando removido o valor mais extremo da série, obtendo-se 0.99 de correlação. O mesmo aconteceu para o município de Ilhota.

No caso do município de Gaspar, representado por Gaspar 1 (1927-1966) e Gaspar 2 (1985-2006), os coeficientes de correlação encontrados foram distintos, o que aponta para a diferença significativa nos dados, motivo pelo qual a série foi desmembrada mesmo os dados sendo oriundos da mesma estação. Outro fator que corrobora para o fato de Gaspar 2 não apresentar valores próximos aos obtidos em Gaspar 1, é a diferença no tamanho da série de dados, em Gaspar 1 tem-se aproximadamente 21 anos de registro de dados de cota e em Gaspar 2 tem-se 39 anos de registros. Aliado a esses fatores, também tem o fato de que o período de sem registro dos dados coincide com a construção de 2 das 3 barragens na bacia, sendo que a terceira barragem foi concluída poucos anos após a retomada das medições de cota.

Para avaliar a qualidade do ajuste das distribuições de extremo empregadas aos dados observados, procedeu-se o cálculo do Erro Padrão e de *Bias* através do método *Jackknife* como explicado anteriormente.

A Tabela 6 demonstra que o Erro Padrão calculado com *Jackknife* apresentou valores pequenos, onde a maior parte dos valores calculados foi inferior a 3 % e o maior erro encontrado foi de 7% para distribuição Log Normal na série de dados Gaspar 2. Os valores referentes ao cálculo de *Bias* (Tabela 5) também foram baixos, demonstrando assim que os coeficientes de correlação entre os dados históricos e os resultados das distribuições apresentaram boa precisão.

Tabela 5- Valores de *Bias* para cada uma das distribuições aplicadas para cada uma das cidades

Distribuição	Bias			
	Blumenau	Ilhota	Gaspar 1	Gaspar 2
Gumbel	-0.01	-0.01	0.00	-0.03
Log-Normal	-0.01	-0.01	0.00	-0.03
Normal	-0.02	0.04	0.00	0.00
Log-Pearson	-0.01	-0.02	-0.01	-0.01

Tabela 6 - Valores de Erro Padrão para cada uma das distribuições aplicadas para cada uma das cidades

Distribuição	Erro Padrão			
	Blumenau	Ilhota	Gaspar 1	Gaspar 2
Gumbel	0.02	0.02	0.02	0.06
Log-Normal	0.02	0.02	0.01	0.07
Normal	0.05	0.05	0.00	0.01
Log-Pearson	0.02	0.01	0.01	0.03

Para determinar em quais cotas foram delimitados os cortes das diferentes classes de susceptibilidade – Alta (inferior a 5 anos de tempo de retorno), Média (5 a 25 anos de tempo de retorno) e Baixa (superior a 25 anos de tempo de retorno), foram utilizados os resultados encontrados nas distribuições de probabilidade. Como em muitos casos, o coeficiente de correlação foi superior a 0,90 – pode-se observar nos valores de *Bias* e de Erro Padrão, que as distribuições em geral, apresentaram resultados muito semelhantes. No entanto, como os tempos de retorno escolhidos para o fatiamento do HAND nas diferentes classes de susceptibilidade (Alta, Média e Baixa) utilizam valores de tempo de retorno de 5 e 25 anos, procedeu-se a escolha da distribuição que obteve melhor resultado ao eliminar os pontos mais extremos – uma vez que para tempos de retorno de até 25, muitas das distribuições escolhidas já apresentam boa aderência aos pontos observados.

Escolhidas as distribuições que apresentaram melhor aderência aos dados de tempo de retorno de até 25 anos, obteve-se os valores da Tabela 7.

Para o fatiamento do HAND foi preciso que os dados de vazão fossem convertidos em cota. Como para as estações Ilhota e Blumenau as distribuições foram calculadas utilizando dados de vazão, procedeu-se a conversão das vazões em cota por meio de curvas cota x vazão baseadas nos registros de cada estação.

Como a estação Gaspar não apresentou valores de vazão disponíveis, as cotas utilizadas no fatiamento do HAND foram obtidas diretamente do resultado das distribuições para os tempos de retorno preestabelecidos.

Tabela 7- Valores do fatiamento da cota para cada município

Cidade	Cota (cm)	
	Tempo de retorno 5 anos	Tempo de retorno 25 anos
Blumenau	921	1097
Ilhota	899	1022
Gaspar	904	1068

O fatiamento gerado pelo HAND é o ponto chave da união dos modelos e da metodologia que se desejava testar. De um lado tem-se o MDT hidrologicamente adequado e por outro, os valores de cota baseados nos registros históricos das estações. Sendo assim, a última etapa consistiu na utilização dos resultados obtidos da aplicação das distribuições de extremo, em conjunto com o modelo HAND e validação dos resultados por meio dos dados coletados em campo.

Os mapas de susceptibilidade à inundação, foram classificadas em alta, média e baixa susceptibilidade a inundação (Figura 15, Figura 16 e Figura 17).

Outro aspecto importante, é que mesmo o cálculo do modelo HAND tendo sido feito de modo individual para cada município, ao colocar o resultado dos municípios lado a lado (Figura 18) foi possível perceber uma continuidade e conexão.

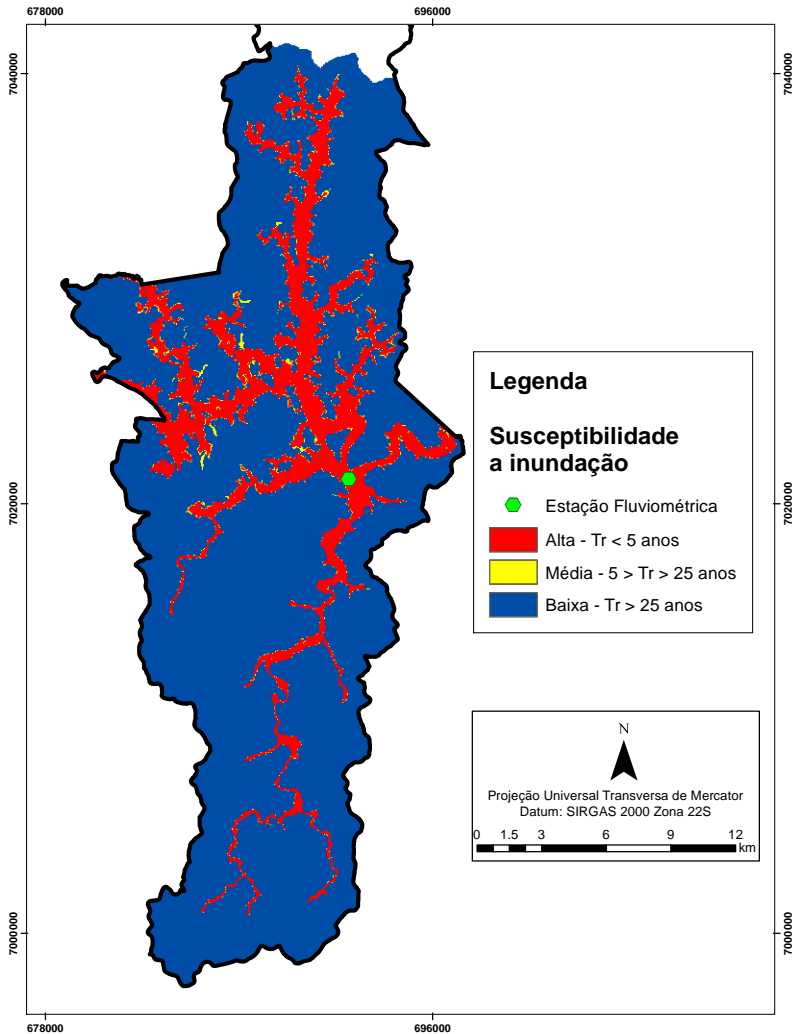


Figura 15 –Mapa de susceptibilidade a inundação Blumenau.

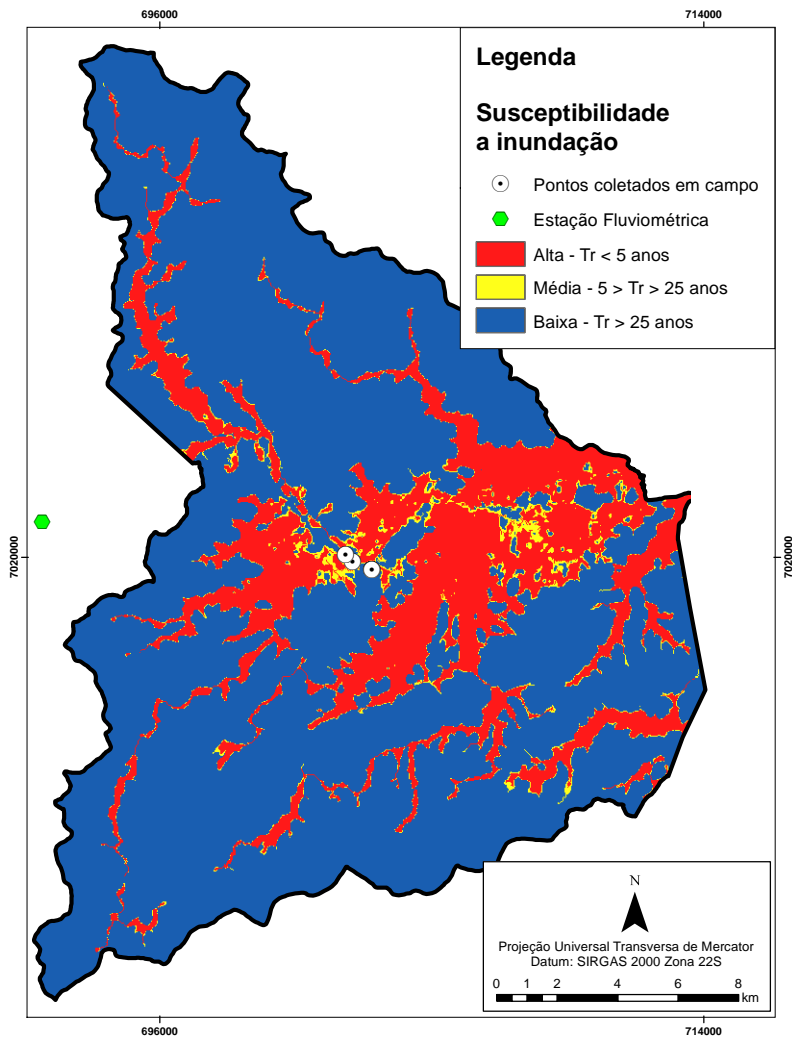


Figura 16 – Mapa de susceptibilidade a inundação Gaspar.

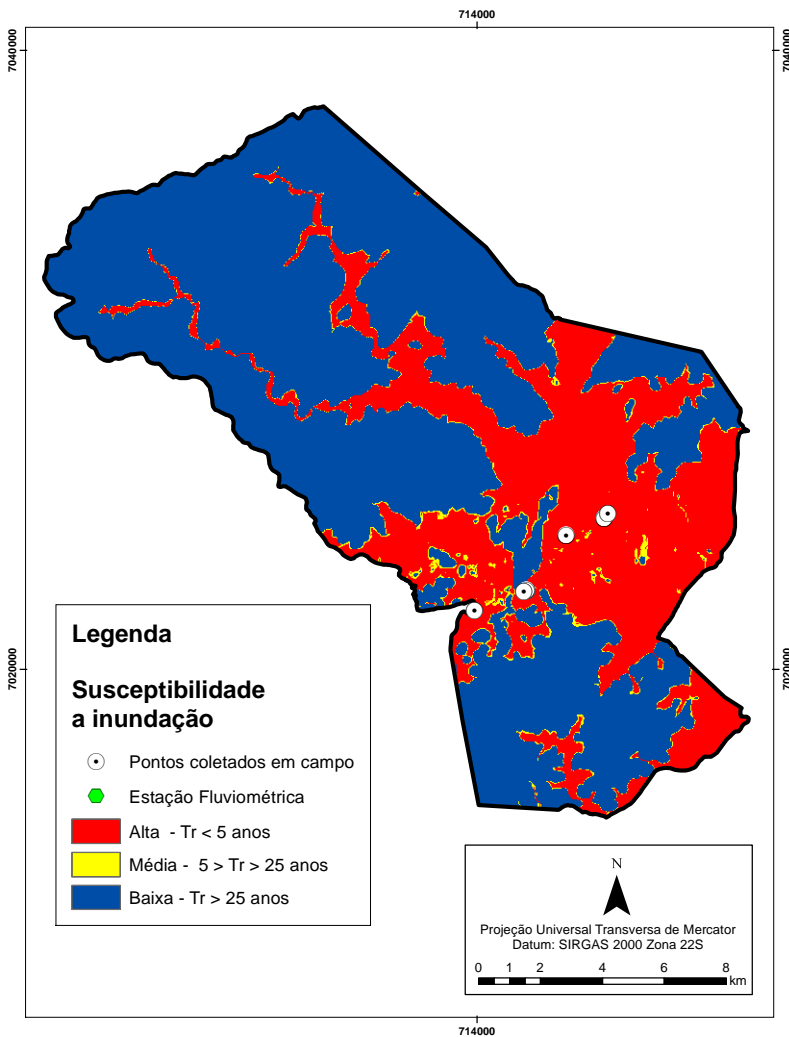


Figura 17 – Mapa de susceptibilidade a inundação Ilhota.

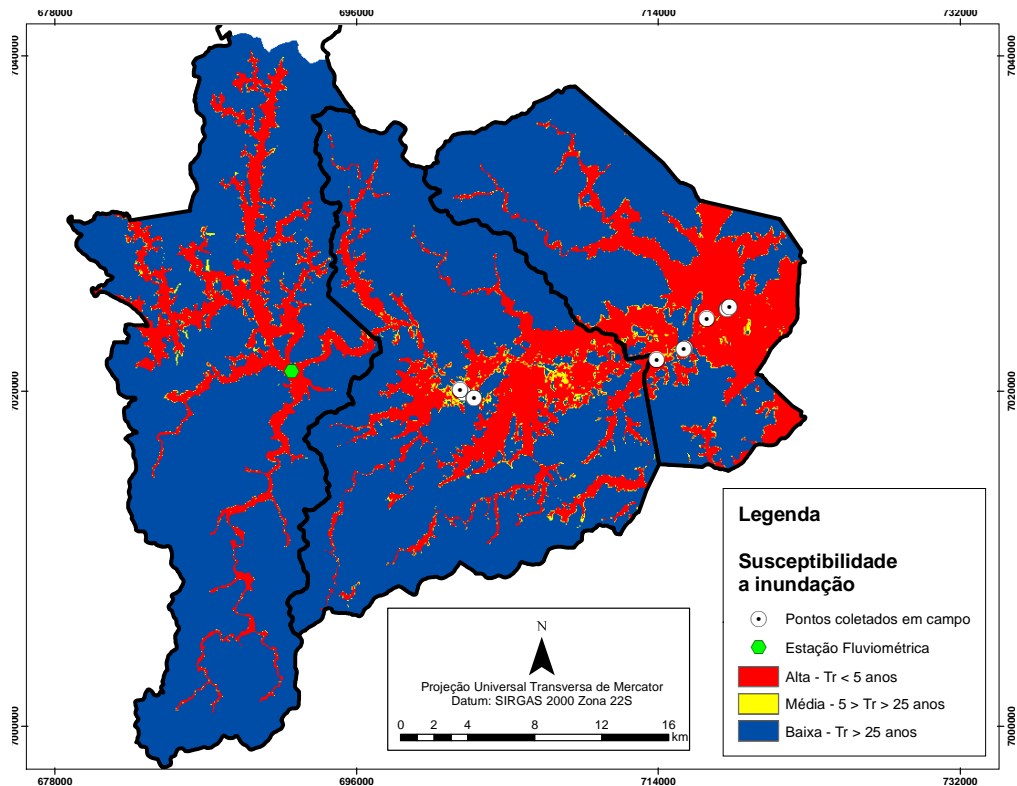


Figura 18- Mapa de susceptibilidade a inundações para Blumenau , Gaspar e Ilhota

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Pode-se observar que as distribuições de extremo para os municípios de Blumenau, Gaspar e Ilhota, apresentaram valores de correlação muito próximos uns dos outros e próximos de 1, o que indica a qualidade das distribuições ao descrever os fenômenos de vazões e cotas máximas.

O Erro Padrão e o *Bias*, calculados por meio do *Jackknife* apontam que todas as distribuições estudadas apresentaram valores virtualmente iguais e bons - onde os erros calculados foram inferiores a 3 % e o maior valor observado foi de 7%.

Os mapas de susceptibilidade a inundação, apresentaram resultados satisfatórios, principalmente quando utilizados em grandes áreas (municípios). Em razão da metodologia proposta no trabalho ter sido aplicada individualmente para cada município, pode-se perceber uma continuidade dos resultados ao unir os mapas dos municípios – fato que aponta para a robustez dos resultados e da metodologia utilizada.

Seria relevante aumentar a quantidade de pontos coletados em campo para auxiliar na melhor validação dos mapas. Em campo, deve-se buscar as informações que auxiliem a mapear tanto os eventos que mais comumente ocorrem, quanto os eventos de maior magnitude já registrados.

Ao aplicar a metodologia deste trabalho em áreas menores, recomenda-se que se utilize um modelo digital do terreno de maior precisão, de modo que seja compatível com a escala da área que se deseja trabalhar. Os resultados obtidos no mapeamento sejam comparados com modelos hidráulicos-hidrológicos, de modo a verificar a qualidade dos resultados obtidos e a identificar possíveis ajustes que podem ser feitos nos mapas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

COSTA, V. A.; FERNANDES, W.; NAGHETTINI, M.; Modelos Regionais para Curvas de Permanência de Vazões de Rios Perenes, Intermitentes e Efêmeros, com Emprego da Distribuição Burr XII Estendida. Porto Alegre, RS. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos** v. 17, n 2. , p.171-180, Abr/Jun 2012.

CUARTAS L.A.; TOMASELLA J.; NOBRE A. D.; NOBRE C. A.; HODNETT M. G.; WATERLOO M. J.; OLIVEIRA, S. M.; von RANDOW R. C.; TRANCOSO R.; FERREIRA M.; Distributed hydrological modeling of a micro-scale rainforest watershed in Amazonia: Model evaluation and advances in calibration using the new HAND terrain model. **Journal of Hydrology** 462-463. p 15-27. 2012.

FAN, F. M.; COLLISCHONN. Integração do Modelo MGB-IPH com Sistemas de Informação Geográfica. Porto Alegre, RS. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos** v. 19, n 1. , p.243-254, Jan/Mar 2014.

FERNANDES, W.; NAGHETTINI, M.; LOSCHI, R.; Método para a Estimção de Quantis de Enchentes Extremas com o Emprego Conjunto de Análise Bayesiana de Informações não Sistemáticas e de Distribuições Limitadas Superiormente – Parte 1: Desenvolvimento Teórico. Porto Alegre, RS. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos** v. 18, n 2. , p.115-125, Abr/Jun 2013.

FRANK, B.; PINHEIRO, A. **Enchentes na Bacia do Rio Itajaí: 20 anos de experiências**. Org. por Frank, B. e Pinheiro, FURB. Blumenau – SC pp. 237. 2003.

GHARARI, S.; HRACHOWITZ, M.; FENICIA, F.; SEVENIJE, H. H. G.; Hydrological lanscape classification: investigating the performance of HAND based landscape classifications in a central European meso-scale catchmanet. **Hydrology and Earth System Sciences**, 15, p. 3291-3291, 2011.

HERRMANN, Maria L. de P. **Atlas de Desastres Naturais do Estado de Santa Catarina**: Período de 1980-2010. 2.ed. Florianópolis: Editora UFSC, 2014. 214 p.

HIRSCH, R. M; HELSEL, D.R.; COHN, T.A.; GILROY, E.J.. Statistical analysis of hydrologic data: Hydrology and Chance. In: MAIDMENT,

David R. (Org.). **Handbook of hydrology**. 20. ed. United States Of America: R. R. Donnelley & Sons Company, 1992. Cap. 17.1, p. 17.1.

JENSON S. K.; DOMINGUE, J. O.; Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. **Photogrammetric Engineering Remote Sensing** 54 (11), p. 1593-1600. 1988.

KOBIYAMA M., MENDONÇA, M.; MORENO, D. A.; MARCELINO, I. P. V. O.; MARCELINO E. V.; GONÇALVES, E.F. BRAZETTI, L. L. P.; GOERL, R.F.; MOLLERI, G. S. F.; RUDORFF, F. M. In: Prevenção de Desastres Naturais. **Desastres Naturais e medidas preventivas** – Curitiba, 2006. p. 45- 88.

MARCELINO, E. V., GOERL, R. F.; PARIZOTO, D. G. V.; OLIVEIRA, C. A. F.; MURARA, P. G. (2014). Inundação Brusca. In: HERRMANN, M. L. de P.; **Atlas de desastres naturais do estado de Santa Catarina: Período de 1980 a 2010**. 2. ed. Florianópolis: Editora UFSC, 2014. Cap. 6. p. 123-127.

MARTINEZ. W.L., MARTINEZ. A.R.; Data Partitioning. **Computational Statiscs Handbook with MATLAB**®, Org. por Martinez e Martinez. Ed. Chapman & Hall/CRC, Washington, D.C., pp 243- 269. 2002.

MCCUEN. R. H. **Modeling hydrologic change: statistical methods**. Department of Civil and Environmental Engineering University of Maryland, College Park – MD, 450p. 1941.

MERWADE, V.; OLIVEIRA, F.; ARABI, M.; EDLEMAN, S. Uncertainty in Flood Inundation Mapping: Current Issues and Future Directions. *Journal of Hydrologic Engineering* 13.608-620, 2008.

MONTGOMERY, D. R; DIETRICH, W. E.; Where do channels begin? **Nature**, Vol 336, p. 232-234. 1988.

NAGHETTINI, M.; PINTO, É. J. de A.. **Hidrologia** In: Serviço Geológico do Brasil. Variáveis aleatórias contínuas: Distribuições e aplicações: Distribuição Normal. Belo Horizonte: CPRM, 2007. Cap. 5, p. 127.

NOBRE, A. D. et al. Height Above Nearest Drainage - hydrologically relevant new terrain model. **Journal Of Hydrology**. p. 13-29. 12 abr. 2011.

NODOLF, J. M.; SMITH, J. B.; MOORE, D. L.; FULLERTON, W. T. (2008). Inundation Mapping of Dam Breach Conditions. In: **World Environmental & Water Resources Congress**, Honolulu, Mai. 2008.

O'CALLAGHAN , J. F.; MARK, D.M.; The extraction of Drainage networks from digital elevation data. **Computer vision, Graphics and Image Processing** 28, p. 323-344. 1984.

PINHEIRO, V. B.;NAGHETTINI, M.; Calibração de um Modelo Chuva-Vazão em Bacias sem Monitoramento Fluviométrico a partir de Curvas de Permanência Sintéticas. Porto Alegre, RS. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos** v. 15, n 2. , p.143-156, Abr/Jun 2010.

RENARD, B.; KOCHANEK, K.; LANG, M.; GARAVAGLIA, F.; PAQUET, E.; NEPEL, L.; NAJIB, K.; CARREAU, J.; AUBERT, Y.; BORCHI, F.; SOUBEYROUX, J.M.; JOURDAIN, S.; VEYSSEIRE, J.-M.; SAUQUET, S.; CIPRIANI, T.; AUFFRAY, A.; Data-based comparison of frequency analysis methods: A general framework. **Water Resources Research**, Vol. 49, p. 1-19, 2013.

RENNÓ, C. D.; NOBRE A. D.; CUARTAS, L. A.; SOARES, J. V.; HODNETT, M. G.; TOMASELLA, J.; WATERLOO, M. J.; HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. **Remote Sensing of Environment**. p. 3469-3481. 29 mar. 2008.

SARAIVA, I.; FERNANDES, W.; NAGHETTINI, M. Simulação Hidrológica Mensal em Bacias Hidrográficas sem Monitoramento Fluviométrico. Porto Alegre, RS. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos** v. 16, n 1, p.115-125, Jan/Mar 2011.

SAVAGE, J.; BATES, P.; FREER, J.; NEAL, J.; ARONICA, G. (2014). The impact of Scale on Probabilistic Flood Inundation Maps Using a 2D Hydraulic Model with Uncertain Boundary Conditions. In Proceedings of the **Second International Conference on Vulnerability, Uncertainty and Risk Analysis and Management (ICVRAM)**, Liverpool, Jul. 2014, pp. 279-289.

STEDINGER, J. R.; VOGEL, R. M.; FOUFOULA G., E.; Hidrologic Analysis and Interpretation. In: MAIDMENT, D. R. **Handbook of Hydrology**. Frequency analysis of extreme events. 20. ed. United States Of America: R. R. Donnelley & Sons Company, 1992. Cap. 18. p. 181-182.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia Ciência e Aplicação**. 1ª edição. São Paulo, SP. Edusp - Editora do Estado de São Paulo. 1993.

TUNG, Y. Keynote lecture: Risk-Based design of flood defense system. In **Proceedings of Second International Symposium of Flood Defense**, Beijing, 2002. Beijing:. p. 71-81.

WOLFF, W.; DUARTE, S. N.; MINGOTI, R.; Nova metodologia de regionalização de vazões para o Estado de São Paulo. Porto Alegre, RS. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos** v. 19, n 4. , p.171-180,Out/Dez 2014.

APÊNDICE A

Rotina utilizada na análise preliminar dos dados de cota e vazão.

```

filename=
[num,txt,raw] = xlsread(filename);

media_diaria = num(:,5);
select_lines = num(media_diaria==1,:);
registro_cota = select_lines(:,17:end);
consist_level = select_lines(:,2);
date_notselect = raw(18:end,3);
date_select = date_notselect(media_diaria==1,:);
qtd_data = length(consist_level);

for ii=1:length(date_select);
    date_to_mat(ii,1) =
datenum(date_select{ii,1}, 'dd/mm/yyyy');
end
date_vec = datevec(date_to_mat);
date_vec = [date_vec consist_level];
year = date_vec(1:end,1);
month = date_vec(1:end,2);
num_lastday_month = eomday(year,month);

ti=1;
num_month = length(num_lastday_month);
for kk = 1:num_month
    lastday = num_lastday_month(kk);
    tf = ti + lastday - 1;
    flow_day_month = registro_cota(kk,1:lastday)';
    correct_date = ones(num_lastday_month(kk),3);
    correct_date(:,1) =
correct_date(:,1).*date_vec(kk,1);
    correct_date(:,2) =
correct_date(:,2).*date_vec(kk,2);
    correct_date(:,3) = 1:num_lastday_month(kk);
    flow_daily(ti:tf,:) = [correct_date
flow_day_month];
    ti = ti + lastday;
end

ti=1;

```



```

num_month= length(num_lastday_month);
for bb=1: num_month
    lastday = num_lastday_month(bb);
    tf = ti + lastday -1;
    consistency_day_month =
select_lines(bb,1:lastday)';
    consist_date = ones(num_lastday_month(bb),1);
    consist_date =
consist_date(:,1).*consist_level(bb,1);
    qtd_daily_mean = select_lines(bb,1:lastday)';
    matrix_consistency(ti:tf,:) =[consist_date];
    ti = ti +lastday;
end
data = horzcat(flow_daily, matrix_consistency);
data_consist = data(matrix_consistency==2,:);

data_raw = data(matrix_consistency==1,:);
teste_dataraw=isempty(data_raw);
    if teste_dataraw==0 ;

date_vec_consist = date_vec(consist_level==2,:);
date_vec_bruto = date_vec(consist_level==1,:);
year_consist = date_vec_consist(1:end,1);
month_consist = date_vec_consist(1:end,2);
nro_de_dias_no_mes_consist =
eomday(year_consist,month_consist);
ano_primeiro = year_consist(1,1);
ano_ultimo = year_consist(end,1);

fi=1;
nro_meses_consist =
length(nro_de_dias_no_mes_consist);
for hh = 1:nro_meses_consist
    ultimodia = nro_de_dias_no_mes_consist(hh);
    ff = fi + ultimodia - 1;
    calculated_mean(hh,1)=
mean(data_consist(fi:ff,4));
    fi = fi + ultimodia;
end

fi=1;
nro_meses_consist =
length(nro_de_dias_no_mes_consist);
for gg = 1:nro_meses_consist

```

```

    ultimodia = nro_de_dias_no_mes_consist(gg);
    ff = fi + ultimodia - 1;
    teste_nan = data_consist(fi:ff,4);
    if any(isnan(teste_nan))
        calculated_min(gg,1)=NaN;
        fi = fi + ultimodia;
    else
        calculated_min(gg,1)=
min(data_consist(fi:ff,4));
        fi = fi + ultimodia;
    end
end

fi=1;
nro_meses_consist =
length(nro_de_dias_no_mes_consist);
for ll = 1:nro_meses_consist
    ultimodia = nro_de_dias_no_mes_consist(ll);
    ff = fi + ultimodia - 1;
        teste_nan = data_consist(fi:ff,4);
    if any(isnan(teste_nan))
        calculated_max(ll,1)=NaN;
        fi = fi + ultimodia;
    else
        calculated_max(ll,1)=
max(data_consist(fi:ff,4));
        fi = fi + ultimodia;
    end
end
date_vec_raw = date_vec(consist_level==1,:);

testempty = isempty(date_vec_raw);
if testempty==0;
year_raw = date_vec_raw(1:end,1);
month_raw = date_vec_raw(1:end,2);
nro_de_dias_no_mes_raw =
eomday(year_raw,month_raw);

fi=1;
nro_meses_raw = length(nro_de_dias_no_mes_raw);
for hh = 1:nro_meses_raw
    ultimodia = nro_de_dias_no_mes_raw(hh);
    ff = fi + ultimodia - 1;

```

```

        calculated_mean_raw(hh,1)=
mean(data_raw(fi:ff,4));
        fi = fi + ultimodia;
end

fi=1;
nro_meses_raw = length(nro_de_dias_no_mes_raw);
for gg = 1:nro_meses_raw
    ultimodia = nro_de_dias_no_mes_raw(gg);
    ff = fi + ultimodia - 1;
    teste_nan = data_raw(fi:ff,4);
    if any(isnan(teste_nan))
        calculated_min_raw(gg,1)=NaN;
        fi = fi + ultimodia;
    else
        calculated_min_raw(gg,1)=
min(data_raw(fi:ff,4));
        fi = fi + ultimodia;
    end
end

fi=1;
nro_meses_raw = length(nro_de_dias_no_mes_raw);
for ll = 1:nro_meses_raw
    ultimodia = nro_de_dias_no_mes_raw(ll);
    ff = fi + ultimodia - 1;
    teste_nan = data_raw(fi:ff,4);
    if any(isnan(teste_nan))
        calculated_max_raw(ll,1)=NaN;
        fi = fi + ultimodia;
    else
        calculated_max_raw(ll,1)=
max(data_raw(fi:ff,4));
        fi = fi + ultimodia;
    end
end

figure()
hold on
plot(calculated_min, 'g', 'LineWidth', 2);
plot(calculated_mean, 'k', 'LineWidth', 2);
plot(calculated_max, 'b', 'LineWidth', 2);
legend('mínima', 'média', 'máxima');

```

```
xlabel('Tempo (meses)');
ylabel('Vazão(m³/s)');
hold off

if testempty==0

figure()
hold on
plot(calculated_min_raw,'g');
plot(calculated_mean_raw,'k');
plot(calculated_max_raw,'b');
legend('minima bruto', 'media bruto','máxima
bruto');
xlabel('Tempo (meses)');
ylabel('Vazão(m³/s)');
hold off
else
end
```

APÊNDICE B

Cálculo das distribuições de Extremo – Normal, Log Normal, Gumbel e Log Pearson tipo 3.

```

fi=1;
tamanho_serie = length(b);
repeticoes = a;
w = length(ano_vazao(:,2));

for gg = 1:tamanho_serie
    ultimodia = repeticoes(gg);
    ff = fi + ultimodia - 1;
    max_anual(gg,1)= max(ano_vazao(fi:ff,2));
    fi = fi + ultimodia;
end

media_vazoes = mean(max_anual(:,1));
desviopad_vazoes = std(max_anual(:,1));
assimetria_vazoes = skewness(max_anual(:,1));

rank_vazao = sort(max_anual(:,1), 'descend');
numdata = length(max_anual(:,1));
posicao = (1:numdata)';

log_vazoes = log10(rank_vazao);
media_logvazoes = mean(log_vazoes);
desviopad_logvazoes = std(log_vazoes);
assimetria_logvazoes = skewness(log_vazoes);

temp_retorno = (numdata + 1)./ (posicao);
freq_exced = 1./temp_retorno;

prob_acum = (1 - freq_exced);
z_normal = norminv(prob_acum);

q_normal = media_vazoes +
z_normal*desviopad_vazoes;
q_lognormal = 10.^((media_logvazoes +
z_normal.*desviopad_logvazoes));

y_gumbel = -log(-log(1-freq_exced));

```

```

yn = mean(y_gumbel);
sn = std(y_gumbel);
kt_gumbel = (y_gumbel-yn)./sn;
q_gumbelcorrigido = media_vazoes +
kt_gumbel.*desviopad_vazoes;
kt_naocorrigido = 0.7797.*y_gumbel-0.45;
q_gumbelnaocorrigido = media_vazoes +
kt_naocorrigido.*desviopad_vazoes;

kt_logpearson = z_normal+(z_normal.^2-
1).*(assimetria_logvazoes./6)+(1./3)...
.*(z_normal.^3-
6.*z_normal).*((assimetria_logvazoes./6).^2)-
(z_normal.^2 -1)...

.*((assimetria_logvazoes./6).^3)+z_normal.*((assime
tria_logvazoes./6).^4)...
+(1./3).*((assimetria_logvazoes./6).^5);

q_logpearson3 = 10.^(media_logvazoes +
kt_logpearson.*desviopad_logvazoes);

temp_retorno_calc = [2,5,10,20,25,50,100,200]';
freq_exced_calc = 1./temp_retorno_calc;
prob_acum_calc = (1 - freq_exced_calc);
z_normal_calc = norminv(prob_acum_calc);
q_normal_calc = media_vazoes +
z_normal_calc*desviopad_vazoes;

q_lognormal_calc = 10.^(media_logvazoes +
z_normal_calc.*desviopad_logvazoes));
y_gumbel_calc = -log(-log(1-freq_exced_calc));
kt_gumbel_calc = (y_gumbel_calc-yn)./sn;

q_gumbelcorrigido_calc = media_vazoes +
kt_gumbel_calc.*desviopad_vazoes;

kt_naocorrigido_calc = 0.7797.*y_gumbel_calc-0.45;

```

```
q_gumbelnaocorrigido_calc = media_vazoes +
kt_naocorrigido_calc.*desviopad_vazoes;
```

```
kt_logpearson_calc =
z_normal_calc+(z_normal_calc.^2-1)
.*(assimetria_logvazoes./6)+(1./3).*(z_normal_calc.
^3-6.*z_normal_calc)
.*(assimetria_logvazoes./6).^2)-(z_normal_calc.^2
-1)
.*(assimetria_logvazoes./6).^3)+z_normal_calc
.*(assimetria_logvazoes./6).^4)+
(1./3).*(assimetria_logvazoes./6).^5);
```

```
q_logpearson3_calc = 10.^(media_logvazoes +
kt_logpearson_calc.*desviopad_logvazoes);
```

ANEXO A

Calculo de Bias e Erro Padrão utilizando *Jackknife*

A rotina para cálculo do Bias e Erro Padrão, foi baseada no livro *Computational Statistics Handbook with Matlab – Martinez & Martinez*.

```
% Set up memory for jackknife replicates.
n = length(gpa);
reps = zeros(1,n);
for i = 1:n
% Store as temporary vector:
gpat = gpa;
lsatt = lsat;
% Leave i-th point out:
gpat(i) = [];
lsatt(i) = [];
% Get correlation coefficient:
% In this example, we want off-diagonal element.
tmp = corrcoef(gpat,lsatt);
reps(i) = tmp(1,2);
end
mureps = mean(reps);
sehat = sqrt((n-1)/n*sum((reps-mureps).^2));
% Get the estimate of the bias: biashat = (n-
1)*(mureps-T);
```