

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

**ANÁLISE COMPARATIVA DE INCERTEZAS EM
MÉTODOS PARA ESTIMAÇÃO DE FREQUÊNCIAS DE
VAZÕES MÁXIMAS DIÁRIAS COM INCORPORAÇÃO
DE VARIAÇÃO CLIMÁTICA EM BACIAS DO MEDIO
RIO URUGUAI**

Nicolás Failache Gallo

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Orientador: Adolfo O. N. Villanueva

Co-orientador: Robin T. Clarke

Banca Examinadora

Prof. Dr. Cíntia Bertacchi Uvo - Lund University, LU, Suécia

Prof. Dr. Joel Avruch Goldenfum - IPH/UFRGS

Prof. Dr. André Silveira - IPH/UFRGS

Porto Alegre, 5 de outubro de 2007

*“Do rio que tudo arrasta se diz que é violento. Mas ninguém diz:
violentas as margens que o comprimem...”*

Bertolt Brecht

Apresentação

Este trabalho foi desenvolvido no Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob a orientação dos Professores Adolfo O. N. Villanueva e Robin T. Clarke.

Desejo agradecer a todos aqueles que contribuíram para a realização deste trabalho;

Ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul pela possibilidade de realizar o mestrado.

Ao projeto de Gestão Integrada de Enchentes na bacia do rio Quaraí pela bolsa de trabalho. Ao Professor Adolfo e o pessoal da DNH Uruguai e IPH Brasil.

Aos meus orientadores pela dedicação, paciência, observações e apoio dedicados.

Aos colegas e amigos que fiz no IPH e na sala de hidrologia, Daniel, Ruti, Adolfo, Márcio, Marllus, Ivanilto, Martin, Benedito, Walter, Beatriz, Bruno, Ruberto, Christofer, Diogo, Mônica.

A todos os professores do programa de pós-graduação, às bibliotecárias, ao pessoal da secretaria do curso de pós-graduação. Aos amigos Álvaro Diaz e Gabriel Cazes pelas ajudas.

À Daniel e Ruti pelo apoio e amizade.

À minha família.

À Nati pela vida juntos.

Resumo

O presente trabalho apresenta metodologias para aprimorar a estimativa de frequências de vazões diárias máximas extremas na bacia de rio Quaraí e de 13 bacias do médio rio Uruguai, no Brasil e Uruguai. Inicialmente foram ajustados, para os dados de cada bacia, e utilizando máxima verossimilhança, os parâmetros da distribuição GEV e seu caso particular Gumbel. Utilizando a função de Deviança foi testada em cada caso, com um nível de significância de 95%, a conveniência de utilizar o modelo GEV (3 parâmetros) em lugar do modelo Gumbel (2 parâmetros). Também foram analisados os valores e as incertezas de vazões de 25, 50 e 100 anos de período de retorno calculados com as duas distribuições. O resultado obtido foi que é satisfatório utilizar o modelo de Gumbel. Posteriormente, foi proposto um novo modelo a partir da distribuição de Gumbel. Este modelo supõe uma dependência linear do parâmetro de posição μ com as temperaturas de superfície do oceano SST ($\mu(t)=a+b.SST(t)$). Novamente os parâmetros a , b e σ foram estimados mediante máxima verossimilhança. Foram utilizados os dados de reconstrução das SST dos oceanos disponíveis desde o ano 1854 para todo o planeta em células de 2 graus. Para cada célula de temperaturas de superfície do oceano Pacífico foi testada, para cada bacia, utilizando a função de Deviança, a significância de supor $b \neq 0$. A região compreendida entre os 14°N, 12°S, 79°O e 149°O, é a que apresenta maior significância de que o modelo proposto (supondo $b \neq 0$) consiga um melhor ajuste dos dados. O seja a probabilidade calculada de ocorrer as vazões observadas é maior se são consideradas as SST, além disso, pode se dizer que o teste efetuado indica que é maior o ganho de incorporar as SST do que agregar um novo parâmetro ao modelo. Em 12 bacias o modelo ajustado prevê que com o aumento da SST os períodos de retorno de vazões extremas diminuem, resultado coerente com o obtido por diversos autores para as precipitações e vazões médias e extremas em escala de tempo mensal ou anual. No trabalho foram analisadas três técnicas para determinar os intervalos de confiança dos parâmetros e as vazões ajustadas: a técnica que utiliza a curvatura do logaritmo da função de máxima verossimilhança e duas técnicas de bootstrap. As técnicas de bootstrap foram implementadas para determinar intervalos de confiança nos parâmetros ou diretamente nas vazões. As duas técnicas resultaram similares, mas no modelo proposto com as SST os intervalos de confiança somente puderam ser obtidos a partir da técnica de bootstrap diretamente nas vazões.

Abstract

This work presents methods for improving estimates of the frequency of occurrence of extreme values of annual daily flows in the basin of the R. Quaraí and 13 other basins in the middle of the R. Uruguai catchment. For each basin, the three parameters of the Generalized Extreme Value (GEV) distribution were estimated by maximum likelihood, together with the two parameters of the Gumbel distribution, a special case of the GEV distribution. Using the Deviança function, the hypothesis that the Gumbel distribution (2 parameters) gave an adequate fit to the distribution was tested against the alternative GEV (3 parameters), using a 5% significance level. Values of annual maxima with return periods 25, 50 and 100 years, and their errors, were then analyzed for the two distributions. Results showed that the Gumbel distribution fitted adequately. A new model was then tested using the Gumbel distribution, in which the position parameter was a linear function of sea surface temperature SST ($\mu(t)=a+b.SST(t)$). The parameters a , b and the dispersion parameter σ were again estimated by maximum likelihood. The reconstructed series of global SST extending back to 1854 was used with a grid size of 2 degrees. For each cell in the Atlantic Ocean, a Deviança function was calculated and the hypothesis $b=0$ was tested for each basin. The ocean region showing strongest evidence against the hypothesis $b=0$ lay between 14°N, 12°S, 79°W and 149°W, showing that the fit of the Gumbel distribution to the observed annual maxima is better when they are related to SST, so that is then preferable to use the Gumbel with SSTs than to use the extra parameter of the GEV distribution. In 12 basins the fitted model showed that as SST increases, the return period of extreme flows decreases. This agrees with results obtained by other authors for rainfall and mean and extreme flows at the monthly and annual time scales. Three methods were compared for evaluating confidence intervals for model parameters and fitted flows: these were a method using curvature of the log-likelihood function, and two bootstrap methods. The bootstrap methods were used to determine the confidence intervals of parameters or of flows directly. The two methods gave similar results, but in the model which includes SST, confidence intervals could only be calculated by the bootstrap method directly for flows.

Sumario

1	INTRODUÇÃO.....	- 1 -
1.1	JUSTIFICATIVA.....	- 1 -
1.2	DESCRIÇÃO GERAL DO TRABALHO.....	- 3 -
2	OBJETIVOS.....	- 5 -
2.1	OBJETIVO GERAL.....	- 5 -
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	- 5 -
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	- 6 -
3.1	DISTRIBUIÇÕES DE FREQUÊNCIAS E PERÍODOS DE RETORNO.....	- 6 -
3.1.1	<i>Distribuição de frequências</i>	- 6 -
3.1.2	<i>Período de retorno</i>	- 6 -
3.2	DISTRIBUIÇÕES DE VALORES EXTREMOS E METODOLOGIAS PARA ESTIMAÇÃO DOS PARÂMETROS.....	- 7 -
3.2.1	<i>Distribuição de valores extremos</i>	- 7 -
3.2.2	<i>Estimação dos parâmetros por meio do método dos momentos</i>	- 8 -
3.2.3	<i>Estimação dos parâmetros por meio de máxima verossimilhança</i>	- 11 -
3.3	INTERVALOS DE CONFIANÇA.....	- 12 -
3.3.1	<i>Intervalo de confiança utilizando a curvatura da superfície do logaritmo da função de máxima verossimilhança</i>	- 13 -
3.3.2	<i>Intervalos de confiança utilizando técnicas de bootstrap</i>	- 14 -
3.4	TESTE DE HIPÓTESES PARA ESCOLHER A DISTRIBUIÇÃO.....	- 15 -
3.5	RELAÇÕES ENTRE CHUVAS E VAZÕES DA REGIÃO COM AS SST.....	- 15 -
3.6	RECONSTRUÇÃO DOS DADOS HISTÓRICOS DAS TEMPERATURAS DE SUPERFÍCIE DO OCEANO.....	- 19 -
4	METODOLOGIA E DADOS DISPONÍVEIS.....	- 21 -
4.1	CONSISTÊNCIA DOS DADOS.....	- 21 -
4.2	AJUSTE DAS DISTRIBUIÇÕES GEV E GUMBEL AOS DADOS DE VAZÃO MÁXIMA ANUAL DAS BACIAS E TEST DE HIPÓTESES PARA ESCOLHA DA DISTRIBUIÇÃO.....	- 26 -
4.3	INTERVALOS DE CONFIANÇA.....	- 27 -
4.4	APRIMORAMENTO DO AJUSTE DA DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIAS UTILIZANDO INFORMAÇÃO CLIMÁTICA.....	- 27 -
4.5	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA SÉRIE AUXILIAR ESCOLHIDA.....	- 29 -
5	RESULTADOS.....	- 30 -
5.1	NÚMERO DE GERAÇÕES DE BOOTSTRAP.....	- 30 -

5.2	ESTAÇÃO 84, BACIA DO QUARAI.....	- 31 -
5.2.1	<i>Ajuste da distribuição de frequências e intervalos de confiança dos parâmetros e das vazões.....</i>	<i>- 31 -</i>
5.2.2	<i>Ajuste da distribuição de frequências e intervalos de confiança dos parâmetros e das vazões na estação 84, bacia do Quarai, utilizando séries auxiliares de temperatura de superfície do oceano.</i>	<i>- 34 -</i>
5.3	RESULTADOS NAS RESTANTES BACIAS DA REGIÃO	- 41 -
5.3.1	<i>Ajuste da distribuição de frequências e intervalos de confiança dos parâmetros e das vazões.....</i>	<i>- 41 -</i>
5.3.2	<i>Ajuste da distribuição de frequências e intervalos de confiança dos parâmetros e das vazões, utilizando séries auxiliares de temperatura de superfície do oceano....</i>	<i>- 47 -</i>
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	- 51 -
6.1	CONCLUSÕES.....	- 51 -
6.2	RECOMENDAÇÕES	- 53 -
7	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	- 54 -

ANEXO 1, AJUSTES DAS DISTRIBUIÇÕES GUMBEL E GEV, COM INTERVALOS DE CONFIANÇA DE 95% AOS DADOS DE VAZÃO MÁXIMA ANUAL DAS BACIAS ESTUDADAS.

ANEXO 2, VALORES DA FUNÇÃO DE DEVIANÇA DAS CÉLULAS DE SST PARA CADA BACIA.

ANEXO 3, ANÁLISE DA SENSIBILIDADE NA ESCOLHA DA CÉLULA ÓTIMA.

Lista de tabelas

TABELA 4.1.1. DADOS UTILIZADOS NO ESTUDO.	- 22 -
TABELA 4.1.2. CRITÉRIOS DE ATRIBUIÇÃO DE QUALIDADE AOS POSTOS QUANTO À VAZÃO MÁXIMA, TUCCI (1993).....	- 23 -
TABELA 4.1.3. NOTA DE CADA POSTO.	- 23 -
TABELA 4.1.4. CARACTERÍSTICAS DAS SÉRIES DE VAZÕES MÁXIMAS ANUAIS	- 24 -
TABELA 5.2.1. PARÂMETROS ESTIMADOS, INTERVALOS DE CONFIANÇA DE 95% E FUNÇÃO DE MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA, PARA AS DISTRIBUIÇÕES DE GUMBEL E GEV NA BACIA DO QUARAÍ.....	- 32 -
TABELA 5.2.2. VAZÕES PARA 2, 25, 50, 75 E 100 ANOS DE PERÍODO DE RETORNO E INTERVALOS DE CONFIANÇA DE 95% ESTIMADOS COM AS DISTRIBUIÇÕES DE GUMBEL E GEV NA BACIA DO QUARAÍ....	- 32 -
TABELA 5.2.3. PARÂMETROS ESTIMADOS E INTERVALOS DE CONFIANÇA DE 95% PARA O MODELO PROPOSTO.	- 37 -
TABELA 5.2.4. VAZÕES PARA 2, 25, 50, 75 E 100 ANOS DE PERÍODO DE RETORNO E INTERVALOS DE CONFIANÇA DE 95% (OBTIDOS DIRETAMENTE) NA BACIA DO QUARAÍ ESTIMADOS COM A DISTRIBUIÇÃO DE GUMBEL PROPOSTA PARA 26, 28 E 30 GRAUS DE TEMPERATURA MÉDIA DE SUPERFÍCIE DO OCEANO NA CÉLULA ESCOLHIDA.....	- 38 -
TABELA 5.2.5. PERÍODOS DE RETORNO INTERVALOS DE CONFIANÇA DE 95% (OBTIDOS DIRETAMENTE) PARA AS VAZÕES DE 2, 25, 50, 75 E 100 ANOS DE PERÍODO DE RETORNO OBTIDAS COM A DISTRIBUIÇÃO DE GUMBEL NA BACIA DO QUARAÍ PARA 26, 28 E 30 GRAUS DE TEMPERATURA MÉDIA DA SUPERFÍCIE DO OCEANO NA CÉLULA ESCOLHIDA.....	- 39 -
TABELA 5.3.1. PARÂMETROS ESTIMADOS, E INTERVALOS DE CONFIANÇA DE 95% DA DISTRIBUIÇÃO DE GUMBEL PARA AS BACIAS ESTUDADAS.	- 41 -
TABELA 5.3.2. PARÂMETROS ESTIMADOS, E INTERVALOS DE CONFIANÇA DE 95% DA DISTRIBUIÇÃO GEV PARA AS BACIAS ESTUDADAS.	- 42 -
TABELA 5.3.3. VALORES DE LOGARITMO DA FUNÇÃO DE MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA DOS AJUSTES COM AS DISTRIBUIÇÕES GUMBEL E GEV E FUNÇÕES DE DEVIANÇA CALCULADOS A PARTIR DE ELES.	- 42 -
TABELA 5.3.4. VAZÕES DE 25 ANOS DE PERÍODO DE RETORNO E INTERVALOS DE CONFIANÇA DE 95 % ESTIMADOS PELAS DISTRIBUIÇÕES GUMBEL E GEV PARA AS BACIAS ESTUDADAS.	- 44 -
TABELA 5.3.5. VAZÕES DE 50 ANOS DE PERÍODO DE RETORNO E INTERVALOS DE CONFIANÇA DE 95 % ESTIMADOS PELAS DISTRIBUIÇÕES GUMBEL E GEV PARA AS BACIAS ESTUDADAS.	- 45 -
TABELA 5.3.6. VAZÕES DE 100 ANOS DE PERÍODO DE RETORNO E INTERVALOS DE CONFIANÇA DE 95 % ESTIMADOS PELAS DISTRIBUIÇÕES GUMBEL E GEV PARA AS BACIAS ESTUDADAS.	- 46 -
TABELA 5.3.7. PARÂMETROS ESTIMADOS PARA O MODELO PROPOSTO A PARTIR DA DISTRIBUIÇÃO DE GUMBEL E INTERVALOS DE CONFIANÇA DE 95% NA CÉLULA ÓTIMA.	- 48 -
TABELA 5.3.8. VALORES DAS FUNÇÕES DE MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA PARA AS DISTRIBUIÇÕES GUMBEL COM E SEM SÉRIE AUXILIAR, FUNÇÃO DE DEVIANÇA E LOCALIZAÇÃO DA CÉLULA ÓTIMA.	- 49 -

TABELA 5.3.9. PERÍODOS DE RETORNO DE VAZÕES DE 100 ANOS SEGUNDO A DISTRIBUIÇÃO DE GUMBEL
CALCULADOS MEDIANTE A NOVA DISTRIBUIÇÃO PARA DIFERENTES TEMPERATURAS DO OCEANO DA
CÉLULA ESCOLHIDA. - 50 -

Lista de figuras

FIGURA 1.1.1. VAZÕES MÁXIMAS ANUAIS E MARCAS HISTÓRICAS NA BACIA DO RIO IGUAÇU NA CIDADE DE UNIÃO DA VITÓRIA. (EXTRAÍDO DE TUCCI & VILLANUEVA, 2001).	- 2 -
FIGURA 1.1.2. VAZÕES MÁXIMAS DIÁRIAS NA BACIA DO QUARAÍ	- 3 -
FIGURA 4.1.1. LOCALIZAÇÃO DAS BACIAS UTILIZADAS NO ESTUDO.	- 22 -
FIGURA 4.1.2. HISTOGRAMAS DOS MESES DE OCORRÊNCIA DA VAZÃO MÁXIMA ANUAL.	- 25 -
FIGURA 4.1.3. VALORES MÉDIOS E DESVIO PADRÃO DAS PRECIPITAÇÕES MENSIS NO PLUVIÔMETRO DE ARTIGAS, PERÍODO 1950-2002.	- 26 -
FIGURA 5.1.1. INTERVALOS DE CONFIANÇA DE PARÂMETRO AO AUMENTAR O NÚMERO DE GERAÇÕES DE BOOTSTRAP.	- 30 -
FIGURA 5.1.2. INTERVALOS DE CONFIANÇA DAS VAZÕES AO AUMENTAR O NÚMERO DE GERAÇÕES DE BOOTSTRAP.	- 31 -
FIGURA 5.2.1. AJUSTE DA DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIAS GEV E INTERVALOS DE CONFIANÇA DE 95%.....	- 33 -
FIGURA 5.2.2. VALORES DA FUNÇÃO DE DEVIANÇA DO MODELO ALTERNATIVO DA DISTRIBUIÇÃO DE GUMBEL EM RELAÇÃO AO MODELO ORIGINAL, PARA CADA CÉLULA DE TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE DO OCEANO, DA BACIA DO QUARAÍ.	- 35 -
FIGURA 5.2.3. VAZÕES MÁXIMAS ANUAIS NA BACIA DO QUARAÍ E SÉRIE DE TEMPERATURAS DE SUPERFÍCIE DO OCEANO ESCOLHIDA COM O MODELO DA GUMBEL PROPOSTO.	- 36 -
FIGURA 5.2.4. VALORES DA FUNÇÃO DE DEVIANÇA DO MODELO ALTERNATIVO DA DISTRIBUIÇÃO GEV EM RELAÇÃO AO MODELO ORIGINAL, PARA CADA CÉLULA DE TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE DO OCEANO, DA BACIA DO QUARAÍ.	- 37 -
FIGURA 5.2.5. AJUSTE DA DISTRIBUIÇÃO PROPOSTA, AVALIADA PARA 28°C, UTILIZANDO A SÉRIES AUXILIARES DA CÉLULA ESCOLHIDA E A SÉRIE AUXILIAR FEITA DA MÉDIA DAS 24 CÉLULAS MAIS PRÓXIMAS.	- 40 -
FIGURA 5.2.6. DISTRIBUIÇÃO AJUSTADA E INTERVALOS DE CONFIANÇA PARA 28°C NA CÉLULA ESCOLHIDA, E DISTRIBUIÇÕES AJUSTADAS INDIVIDUALMENTE NAS 24 CÉLULAS MAIS PRÓXIMA (SEM INCLUIR OS INTERVALOS DE CONFIANÇA).....	- 40 -
FIGURA 5.3.1. VAZÃO DE 100 E 50 ANOS DE PERÍODO DE RETORNO ESPECIFICA PELA ÁREA DA BACIA APARA AS BACIAS ESTUDADAS.	- 43 -
FIGURA 5.3.2. VAZÃO DE 100 ANOS DE PERÍODO DE RETORNO ESPECIFICA PELA ÁREA DA BACIA E INTERVALO DE CONFIANÇA ESTIMADO PELO MÉTODO CURVATURA DA SUPERFÍCIE DO LOGARITMO DA FUNÇÃO DE MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA PARA AS DISTRIBUIÇÕES GUMBEL E GEV NAS BACIAS ESTUDADAS.	- 43 -

Lista de símbolos

Z, z	variável aleatória
Ω	espaço amostral
$g(z)$	função de densidade de probabilidade
\Pr	probabilidade
Tr	período de retorno
$G(z)$	função de distribuição de probabilidades
z^- e z^+	limites inferiores e superiores de Ω .
μ	parâmetro de locação da distribuição generalizada de valores extremos
σ	parâmetro de escala da distribuição generalizada de valores extremos
ξ	parâmetro de forma da distribuição generalizada de valores extremos
$E(Z)$	valor esperado de uma variável aleatória Z
μ_1	momento de primeiro ordem
μ_r	momento de ordem r
$VAR(Z)$	variância de uma variável aleatória Z
\bar{z}	momento da amostra de primeiro ordem
m_r	momento da amostra da ordem r
s	estimador do desvio padrão
$\hat{\sigma}$	estimativa do parâmetro σ
$\hat{\mu}$	estimativa do parâmetro μ
$\hat{\xi}$	estimativa do parâmetro ξ
θ	parâmetros da distribuição
$\hat{\theta}$	estimativa dos parâmetros da distribuição
$M_{p,r,s}$	momentos ponderados pela probabilidade
$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ e λ_4	momentos L
$L(\theta)$	função de máxima verossimilhança
$\ell(\theta)$	logaritmo da função de máxima verossimilhança
n	numero de dados da amostra

$V(t)$	série temporal auxiliar
t	tempo
I_E	matriz de informação
d	numero de parâmetros da distribuição
MVN	distribuição normal multivariada
N	distribuição normal
α	nível de significância
$\delta_{\alpha/2}$	quantil $(1-\alpha/2)$ da distribuição normal padrão
I_O	matriz de informação observada
q_{\max}	série de vazões máximas
q_{\max}^*	série gerada de vazões máximas
B	numero de gerações de bootstrap
D	função de Deviança
χ^2_k	função chi quadrado com k graus de liberdade
M_1, M_0	modelos estatísticos
c_α	$(1-\alpha)$ quantil da distribuição
$^\circ S, ^\circ O$	graus latitude leste e oeste

Lista de Siglas

GEV	Distribuição de Extremos Generalizada
SST	temperatura de superfície do oceano
SOI	Índice da Oscilação Sul
ENSO	El Niño Southern Oscillation
COADS	Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set
ANA	Agência Nacional de Águas
DNH	Dirección Nacional de Hidrografía

1 Introdução

1.1 Justificativa

Para o projeto de obras civis, proteção de populações contra enchentes e planejamento urbano, é necessário conhecer o período de retorno das vazões extremas máximas. Particularmente para a planificação urbana, os períodos de retorno de vazões extremas e suas áreas atingidas devem ser levados em conta para evitar grandes prejuízos sociais e econômicos. Por exemplo, no caso da cidade de Artigas que possui uns 44600 habitantes, segundo dados do Sistema Nacional de Emergências do Uruguai, as enchentes do rio Quaraí têm provocado que quase 13000 pessoas tiveram que ser evacuadas entre os anos 1997 e 2005. Somente na enchente do junho de 2001 (Figura 1.1.1) 5000 pessoas resultaram prejudicadas (11% da população).

Quando no local existe uma série de vazões registradas, o procedimento clássico para estimar estes períodos de retorno consiste em:

- Construir a série de vazões extremas anuais (máximos ou mínimos).
- Ajustar uma distribuição de frequências teórica a esta série.
- A partir da distribuição ajustada, estimar os períodos de retorno de vazões extremas, ou estimar as vazões com determinado período de retorno.

Se o local não tem uma série registrada, geralmente são utilizados estudos regionais de vazão ou modelos de transformação precipitação-vazão (curvas IDF).

Geralmente as distribuições de frequências são feitas com 30 a 60 anos de dados e até menos, e extrapoladas a períodos de retorno de 100 anos ou mais. Estes períodos de dados nem sempre garantem a representatividade da série, já que não necessariamente toda a variabilidade das vazões da bacia ocorre nestes anos.

Um exemplo que ilustra esse fato são as vazões ocorridas no Rio Iguaçu que afetaram as cidades de União da Vitória e Porto União nos anos 1983 e 1992. Como pode-se observar na Figura 1.1.1, no período 1930-1983 as vazões máximas ocorridas não são representativas da variabilidade das vazões ocorridas na bacia no período 1890-2000. Assim, o período de retorno da enchente de 1983 estimado a partir dos dados contínuos no período 1930-1983 é de aproximadamente 1000 anos, mas incorporando marcas históricas de enchentes de anos anteriores (1891, 1905 e 1911), este período de retorno cai a 170 anos (Tucci & Villanueva, 2001). No entanto, na maioria dos estudos não se dispõe de marcas históricas e no caso de dispor destas, muitas vezes a sua qualidade é duvidosa. Neste sentido a presente dissertação visa melhorar estimações mediante o uso de outro tipo de informações.

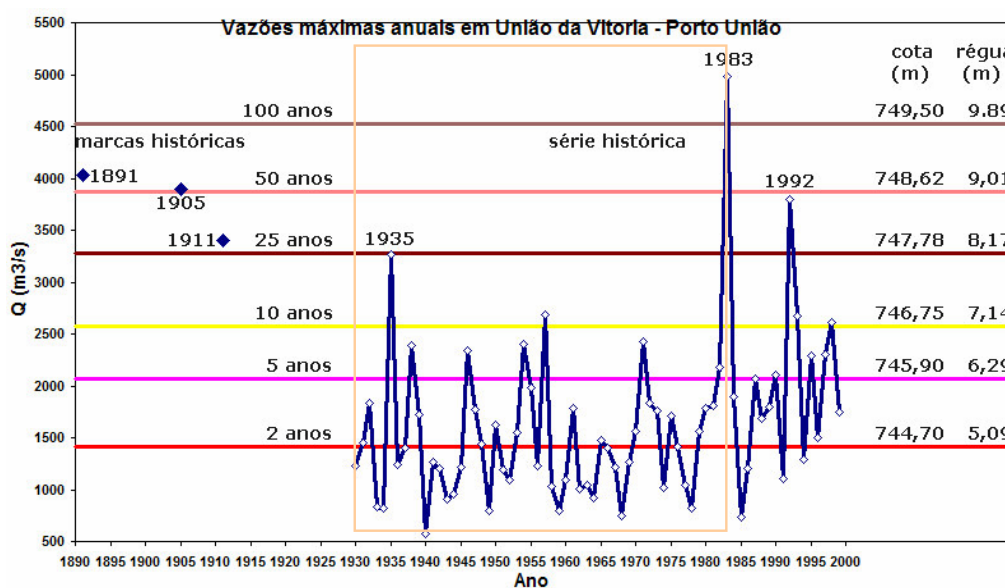


Figura 1.1.1. Vazões máximas anuais e marcas históricas na bacia do Rio Iguaçu na cidade de União da Vitória. (Extraído de Tucci & Villanueva, 2001).

O exemplo que motiva a presente dissertação é ilustrado na Figura 1.1.2, onde são apresentadas as vazões máximas diárias na bacia do Rio Quaraí. Nesta série é possível observar que se a distribuição de frequências fosse ajustada no período 1967 / 1990 as vazões ocorridas nos anos 1991 e 2001 teriam um período de retorno muito maior ao que teriam se fosse ajustada a distribuição com a série total.

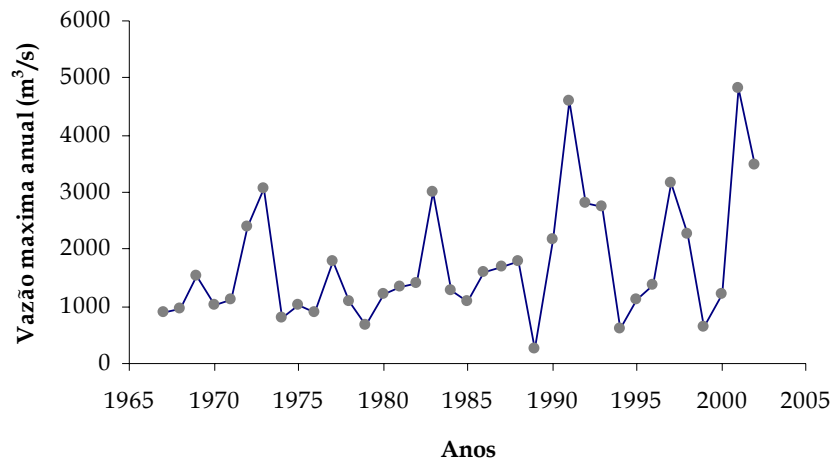


Figura 1.1.2. Vazões máximas diárias na bacia do Quaraí.

1.2 Descrição geral do trabalho

O trabalho consistiu em:

- Revisão bibliográfica sobre distribuições de valores extremos e metodologias para a estimação dos parâmetros e intervalos de confiança.
- Revisão bibliográfica sobre relações entre chuvas e vazões com índices climáticos e as temperaturas de superfície do oceano na região da Bacia do Prata.
- Coleta e consistência dos dados de vazão existentes nas bacias do médio rio Uruguai.
- Ajuste da Distribuição de Extremos Generalizada GEV e seu caso particular de Gumbel utilizando o método de máxima verossimilhança aos dados de vazões máximas anuais das bacias com dados consistidos. Eleição da distribuição utilizando um teste estatístico.
- Determinação dos intervalos de confiança dos parâmetros e das vazões extremas das séries ajustadas utilizando distintas técnicas.

- Proposta de um novo modelo de distribuição utilizando séries auxiliares de temperatura de superfície do oceano, ajuste mediante método de máxima verossimilhança e determinação de intervalos de confiança.

- Em todos os casos, avaliação dos resultados obtidos.

2 Objetivos

2.1 *Objetivo Geral*

Aprimorar a estimativa de frequências de vazões extremas em bacias do médio rio Uruguai.

2.2 *Objetivos Específicos*

Qual é a melhor distribuição de frequências para ajustar as vazões máximas diárias em bacias do médio rio Uruguai?

Quais são as metodologias que podem ser utilizadas para determinar os intervalos de confiança dos parâmetros da distribuição ajustada e das vazões extremas calculadas? Alguma é superior as outras?

Existem relações entre a variabilidade climática da atmosfera e o oceano Pacífico com a ocorrência de eventos extremos de vazão em bacias do médio rio Uruguai? É possível quantificá-la?

3 Revisão bibliográfica

3.1 *Distribuições de frequências e períodos de retorno.*

3.1.1 Distribuição de frequências

Dada uma variável aleatória Z , um modelo estatístico (distribuição de probabilidade) é construído para estimar as incertezas da ocorrência de valores de interesse z da variável. É determinada assim a probabilidade de ocorrência de que Z tome o valor z . O conjunto de todos os possíveis valores que pode tomar a variável aleatória Z é chamado Ω , espaço amostral. As variáveis aleatórias podem tomar valores discretos ou contínuos. No caso discreto a distribuição de probabilidade é determinada pela função de densidade de probabilidade: $g(z) = \Pr(Z = z)$ para cada valor de z em Ω , espaço amostral discreto. No caso contínuo não é possível identificar valores pontuais, portanto a distribuição de probabilidade é determinada pela função de distribuição de probabilidades: $G(z) = \Pr(Z \leq z)$ para cada z em Ω , espaço amostral contínuo. Este é o caso das vazões máximas. A função $G(z)$ satisfaz as propriedades de ser monótona crescente, e de tomar os valores $G(z^-)=0$ e $G(z^+)=1$, onde z^- e z^+ são os limites inferiores e superiores de Ω .

Se a função $G(z)$ e diferenciável, a função de densidade de probabilidade é

definida como: $g(z) = \frac{dG}{dz}$

portanto $G(z)$ fica: $G(z) = \Pr(Z \leq z) = \int_{-\infty}^z g(\mu) d\mu$

3.1.2 Período de retorno

Para fixar as idéias a variável aleatória Z considerada será a vazão máxima anual. Não existe uma definição universalmente aceita do período de retorno (Smith 2001); uma delas diz que a vazão de n anos de período de retorno é aquela que é

excedida em um ano qualquer com probabilidade $1/n$. Outra definição menos exata diz que é a vazão excedida em média uma vez cada n anos (esta definição tem problemas se existe alguma tendência nos dados) (Smith 2001). O período de retorno é calculado como:

$$Tr = \frac{1}{Pr(Z \geq z)} = \frac{1}{1 - Pr(Z \leq z)}$$

3.2 *Distribuições de valores extremos e metodologias para estimação dos parâmetros.*

3.2.1 Distribuição de valores extremos

A distribuição estatística de uma série valores máximos foi determinada por Fisher e Tippet (1928, apud Smith 2001), e demonstrada teoricamente por Gnedenko (1943, apud Smith 2001) no “teorema dos três tipos”. Neste teorema se estabelece que a distribuição de uma amostra aleatória de valores extremos somente pode, no limite, tender a três tipos de distribuições. Jenkinson (1955, apud Coles 2001) demonstrou que os três tipos de distribuições podem ser escritos numa equação só, que é chamada de Distribuição de Extremos Generalizada GEV distribuição Generalized Extreme Value (GEV).

A seguir é apresentado o Teorema dos três tipos e a distribuição GEV.

Sejam Z_1, \dots, Z_n uma seqüência de variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas. Define-se a variável M_n como $M_n = \max\{Z_1, \dots, Z_n\}$.

Se existem seqüências de constantes $\{a_n > 0\}$ e $\{b_n\}$ tais que:
 $Pr\{(M_n - b_n)/a_n \leq z\} \rightarrow G(z)$ se $n \rightarrow \infty$

onde $G(z)$ é uma função de distribuição não degenerativa, então $G(z)$ é um membro da família GEV:

$$\Pr(Z \leq z) = G(z) = \exp\left\{-\left[1 + \xi\left(\frac{z - \mu}{\sigma}\right)\right]^{-1/\xi}\right\} \quad \text{equação 3.1}$$

definida em $\{z : 1 + \xi(z - \mu)/\sigma > 0\}$, com $-\infty < \mu < \infty$, $\sigma > 0$ e $-\infty < \xi < \infty$.

O modelo tem três parâmetros, μ parâmetro de localização, σ parâmetro de escala e ξ parâmetro de forma. Se $\xi > 0$ a GEV é chamada de tipo II (Fréchet), se $\xi < 0$ tipo III (Weibull) e se $\xi = 0$ tipo I (Gumbel). Esta última é interpretada como a distribuição GEV quando $\xi \rightarrow 0$ e sua forma funcional fica:

$$\Pr(Z \leq z) = G(z) = \exp\left[-\exp\left\{-\left(\frac{z - \mu}{\sigma}\right)\right\}\right] \quad \text{equação 3.2}$$

definida em $-\infty < z < \infty$

3.2.2 Estimação dos parâmetros por meio do método dos momentos

O valor esperado de uma variável aleatória Z é definido como:

$$E(Z) = \int_{-\infty}^{+\infty} z \cdot dG(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} z \cdot g(z) dz$$

A forma das distribuições de probabilidade, tradicionalmente, tem sido descrita pelos momentos da distribuição. Os momentos são achados como:

$$\mu_1 = E(Z), \quad \text{e} \quad \mu_r = E(Z - \mu_1)^r, \quad \text{para } r=2,3,\dots$$

O momento de primeira ordem μ_1 é a média, a medida da posição do centro da distribuição. A dispersão da distribuição em relação ao centro é medida pela variância que é o momento de segundo ordem ($r=2$):

$$\text{VAR}(Z) = \mu_2 = E(Z - \mu_1)^2$$

A raiz quadrada da variância é o de desvio padrão, que mede a variabilidade nas mesmas unidades que Z.

Analogamente podem ser achados os momentos amostrais a partir dos dados observados da distribuição da seguinte forma:

$$\bar{z} = \frac{\sum_{i=1}^n z_i}{n} \quad \text{e} \quad m_r = \frac{\sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^r}{n-1}$$

O método dos momentos considera que estimativas razoáveis de uma distribuição de freqüências são aquelas para os quais os momentos da função de densidade de probabilidade na origem são iguais aos momentos das amostras. Não existem soluções analíticas deste método para os tipos II e III da distribuição GEV. No caso da distribuição GEV tipo I (Gumbel) os parâmetros obtidos pelo Método dos Momentos ficam (Smith, 2001):

$$\hat{\sigma} = \frac{\sqrt{6} \cdot s}{\pi} \quad \text{equação 3.3}$$

$$\hat{\mu} = \bar{z} - 0.5772 \cdot \hat{\sigma} = \bar{z} - 0.45 \cdot s \quad \text{equação 3.4}$$

onde $s = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2}{n-1} \right]^{1/2}$ é o estimador do desvio padrão.

Outra alternativa para a estimação dos parâmetros utilizando momentos são os “momentos ponderados pela probabilidade” ou momentos L, introduzidos por Hosking & Wallis (1997), são definidos a partir dos momentos ponderados pela probabilidade

definidos por Greenwood et al. (1979). Estes são calculados como o seguinte valor esperado:

$$M_{p,r,s} = E\left(Z^p (G(Z))^r (1-G(Z))^s\right)$$

Onde G é a distribuição de frequência acumulada, Z a variável aleatória.

Considerando os casos particulares $\alpha_r = M_{1,0,r}$ e $\beta_r = M_{1,r,0}$, estes podem ser escritos como:

$$\alpha_r = \int_{-\infty}^{+\infty} z(1-G(z))^r dG(z) = \int_0^1 z(u)(1-u)^r du$$

$$\beta_r = \int_{-\infty}^{+\infty} z(G(z))^r dG(z) = \int_0^1 z(u)u^r du$$

Estes momentos em comparação com os tradicionais não incluem potencias do quantil $z(u)$, o que simplifica seu calculo. Finalmente os momentos L são definidos a partir destes como:

$$\lambda_1 = \alpha_0 = \beta_0$$

$$\lambda_2 = \alpha_0 - 2\alpha_1 = 2\beta_1 - \beta_0$$

$$\lambda_3 = \alpha_0 - 6\alpha_1 + 6\alpha_2 = 6\beta_2 - 6\beta_1 + \beta_0$$

$$\lambda_4 = \alpha_0 - 12\alpha_1 + 30\alpha_2 - 20\alpha_3 = 20\beta_3 - 30\beta_2 + 12\beta_1 - \beta_0$$

O momento λ_1 pode ser assimilado como a média L , λ_2 como o desvio L , $\tau=\lambda_1/\lambda_2$ como o coeficiente de variação L , $\tau_3=\lambda_3/\lambda_2$ como a assimetria L e $\tau_4=\lambda_4/\lambda_2$ como a curtose L .

Os momentos L têm a vantagem sobre os convencionais de serem capazes de caracterizar uma faixa mais ampla de distribuições, e quando são estimados a partir de uma amostra, de serem mais robustos na presença de outliers. Ademais em comparação com os momentos convencionais, os momentos L são menos propensos a criar tendência na estimação.

Os momentos L tem sido utilizados com resultados satisfatórios para estimação dos parâmetros da GEV para séries de chuvas máximas em Pires (1994), Guimarães & Naghettini (1998) e Da Silva & Clarke (2004) e para vazões máximas em Fill (1994).

3.2.3 Estimação dos parâmetros por meio de máxima verossimilhança.

O método estima os parâmetros de forma a outorgar probabilidade máxima aos valores observados. Para isso, se z_1, z_2, \dots, z_n são valores observados distribuídos independentemente segundo a distribuição $G(z; \theta)$ (ou realizações independentes de uma variável aleatória distribuída segundo $G(z; \theta)$), onde θ são os parâmetros da distribuição, é definida a função de máxima verossimilhança $L(\theta)$ como:

$$L(\theta) = \prod_{i=1}^n g(z_i; \theta) \quad \text{equação 3.5}$$

onde $g(z; \theta)$ é a densidade da distribuição $G(z; \theta)$.

Assim, são estimados os parâmetros $\hat{\theta}$ como aqueles que maximizam a função de máxima verossimilhança $L(\theta)$ (parâmetros que outorgam probabilidade de ocorrência máxima aos valores observados). Como a função logaritmo é monótona crescente, o máximo da função $L(\theta)$ e da função $\ell(\theta) = \log(L(\theta))$ ocorrem na mesma posição, portanto geralmente são estimados os parâmetros $\hat{\theta}$ maximizando $\ell(\theta)$.

$$\ell(\theta) = \log L(\theta) = \sum_{i=1}^n \log g(z_i; \theta) \quad \text{equação 3.6}$$

No caso particular da distribuição GEV o logaritmo da função de verossimilhança fica:

$$\ell(\mu, \sigma, \xi) = -n \cdot \log(\sigma) - (1 + 1/\xi) \cdot \sum_{i=1}^n \log \left[1 + \xi \cdot \left(\frac{z_i - \mu}{\sigma} \right) \right] - \sum_{i=1}^n \left[1 + \xi \cdot \left(\frac{z_i - \mu}{\sigma} \right) \right]^{-1/\xi}$$

equação 3.7

No caso particular da distribuição Gumbel o logaritmo da função de verossimilhança fica:

$$\ell(\mu, \sigma) = -n \cdot \log(\sigma) - \sum_{i=1}^n \left(\frac{z_i - \mu}{\sigma} \right) - \sum_{i=1}^n \exp \left\{ - \left(\frac{z_i - \mu}{\sigma} \right) \right\}$$

equação 3.8

O método de máxima verossimilhança tem sido utilizados com resultados satisfatórios para estimação dos parâmetros da GEV para séries para ajuste de ventos máximos em Bautista et al. (2004), precipitações máximas em Beijo et al. (2005), e vazões em Rocha da Silva (2006).

3.3 Intervalos de confiança.

No modelo estatístico proposto existem diversas fontes de incertezas: as intrínsecas dos erros nos dados devidos à estimação das vazões a partir de curvas chave e ao passo de tempo das medidas que podem não conter a vazão máxima instantânea, as de forma, devidas ao próprio modelo, as de ajuste dos parâmetros e as da não representatividade de amostra. Na presente dissertação serão analisadas unicamente as duas últimas.

Em qualquer análise estatística as estimações feitas a partir da amostra disponível devem ser as melhores possíveis. Mas a partir de outras amostras representativas do fenômeno estudado (por exemplo, a ampliação da amostra no tempo) as estimações mudariam. Este fato faz que seja necessário complementar as estimações do modelo com uma avaliação das incertezas devidas à variabilidade da amostra. As duas formas para a avaliação das incertezas utilizadas na presente dissertação são apresentadas a seguir.

3.3.1 Intervalo de confiança utilizando a curvatura da superfície do logaritmo da função de máxima verossimilhança

Se z_1, z_2, \dots, z_n são n ocorrências independentes de uma distribuição com uma família paramétrica G , $\ell(\cdot)$ e $\hat{\theta}_0$ representam o logaritmo da função de máxima verossimilhança e a estimação por máxima verossimilhança de θ_0 . É razoável, para valores grandes de n , supor a normalidade do estimador de máxima verossimilhança (Coles, 2001).

$$\hat{\theta}_0 \approx \text{MVN}_d(\theta_0, I_E(\theta_0)^{-1}) \quad \text{equação 3.9}$$

$$\text{Onde } I_E(\theta) = \|\mathbf{e}_{i,j}(\theta)\|, \text{ matriz } d \times d \text{ com } \mathbf{e}_{i,j}(\theta) = E \left\{ -\frac{\partial^2}{\partial \theta_i \partial \theta_j} \ell(\theta) \right\}.$$

O vetor θ_0 é o vetor de médias e $I_E(\theta_0)$ a matriz de variância e covariância da distribuição normal multivariada. A matriz de informação $I_E(\theta)$ mede o valor esperado da curvatura da superfície do logaritmo da função de máxima verossimilhança. Este resultado pode ser utilizado para obter intervalos de confiança aproximados para cada componente de $\theta_0 = (\theta_1, \dots, \theta_d)$. Chamando de $\varphi_{i,j}$ o termo i,j do inverso de $I_E(\theta)$ segundo propriedades da distribuição normal multivariada para valores grandes de n , $\hat{\theta}_i \approx N(\theta_i, \varphi_{i,i})$. Então, se $\varphi_{i,i}$ é conhecido, um intervalo de confiança $(1-\alpha)$ aproximado para θ_i é:

$$\hat{\theta}_i \pm \delta_{\alpha/2} \sqrt{\varphi_{i,i}} \quad \text{equação 3.10}$$

Onde $\delta_{\alpha/2}$ é o quantil $(1-\alpha/2)$ da distribuição normal padrão. Como geralmente o valor de θ_0 não é conhecido aproxima-se a matriz de informação esperada I_E pela matriz

de informação observada I_O definida como $I_O(\theta) = \left\| -\frac{\partial^2}{\partial \theta_i \partial \theta_j} \ell(\theta) \right\|$ é avaliada em

$\theta = \hat{\theta}_0$, então a equação 3.10 transforma-se em:

$$\hat{\theta}_i \pm \delta_{\alpha/2} \sqrt{\bar{\varphi}_{i,i}} \quad \text{equação 3.11}$$

Onde $\bar{\varphi}_{i,i}$ é o termo i,i do inverso da matriz I_{θ} .

3.3.2 Intervalos de confiança utilizando técnicas de bootstrap

Outra forma de estimar intervalos de confiança tem sido desenvolvida a partir dos métodos de sorteio com reposição “bootstrap”, Efron & Tibshirani, (1998). Estes métodos já tem sido usados satisfatoriamente por diversos autores na estimação de incertezas em ajustes da distribuição GEV (Ramesh & Davison, (2002), Vargas (2005) e Rocha da Silva (2006)).

A idéia básica do bootstrap consiste em gerar novas amostras da população e estudar as incertezas das estimações a partir da variabilidade das estimações feitas a partir de cada geração de amostra.

As novas amostras são geradas a partir do sorteio com reposição na amostra disponível. Este fato resulta de particular importância no caso de estudo, já que as amostras são escassas. A metodologia utilizada é descrita a continuação

- 1.- a partir da série de vazões máximas q_{max} , são geradas séries q_{max}^* mediante sorteios com reposição na série q_{max}
- 2.- para cada série q_{max}^* gerada são estimados os parâmetros do modelo estatístico proposto em cada caso
- 3.- repetindo o procedimento B vezes são determinados B valores de cada parâmetro, a partir de estes B valores são determinados os intervalos de confiança com os percentis 5 e 95.

As técnicas de bootstrap podem ser utilizadas também para obter os intervalos de confiança diretamente nas vazões, conforme descrito a continuação.

1.- a partir da série de vazões máximas q_{max} , são geradas séries q_{max}^* mediante sorteios com reposição na série q_{max}

2.- para cada série q_{max}^* gerada são estimados, mediante um modelo estatístico, as vazões para os períodos de retorno de interesse q_2^* , q_5^* , q_{10}^* , q_{20}^* , q_{50}^* e q_{100}^*

3.- repetindo o procedimento B vezes, são determinados B valores de cada vazão, e a partir de estes B valores são determinados os intervalos de confiança de cada vazão com os percentis 5 e 95.

3.4 Teste de hipóteses para escolher a distribuição

Supondo o modelo M_1 , com um vetor de parâmetros θ , é definido o modelo M_0 como um submodelo de M_1 obtido condicionando k das componentes de θ a um valor fixo (por exemplo, 0). Assim, θ pode ser particionado como $\theta = (\theta^{(1)}, \theta^{(2)})$ onde a primeira componente de dimensão k são zeros no modelo M_0 . Se $\ell_1(M_1)$ e $\ell_0(M_0)$ são os logaritmos da função de máxima verossimilhança maximizados, é definida a função de Deviança (Coles, 2001) como:

$$D = 2 \cdot (\ell_1(M_1) - \ell_0(M_0)) \quad \text{equação 3.12}$$

Utilizando a função de Deviança é possível demonstrar (Coles, 2001) que um teste para validar o modelo M_0 em relação ao modelo M_1 com um nível de significância α é rechaçar o modelo M_0 ao favor do modelo M_1 se $D = 2 \{ \ell_1(M_1) - \ell_0(M_0) \} > c_\alpha$, onde c_α é o $(1-\alpha)$ quantil da distribuição χ^2_k . No caso de comparar os modelos GEV e Gumbel é fixado um valor só.

3.5 Relações entre chuvas e vazões da região com as SST.

Originalmente, o termo “El Niño” tem sido utilizado para se referir ao aquecimento periódico anômalo do oceano Pacífico que ocorre nas costas de Peru e Equador no mês de dezembro. O termo é utilizado na atualidade para se referir ao fenômeno de aquecimento periódico do oceano Pacífico ao longo do equador que tem conseqüências na variabilidade climática do planeta. A componente atmosférica

relacionada com “El Niño” é chamada de Oscilação Sul, portanto os científicos chamam ao fenômeno no que a atmosfera e o oceano colaboram juntos ENSO (“El Niño” Southern Oscillation). Assim “El Niño” corresponde a uma fase quente do ENSO e seu oposto “La Nina” a uma fase fria. Não existe uma definição universal para indicar a ocorrência de um evento “El Niño” ou “La Niña” Trenberth (1997) propõe que é uma ocorrência de “El Niño” (“La Niña”) se a média móvel de 5 meses das anomalias de temperatura de superfície do oceano na região Niño 3.4 (5°N-5°S, 120°-170°O) excede 0.4°C (-0.4°C) durante 6 ou mais meses. Com esta definição desde o ano 1950 até 1997 “El Niño” ocorreu um 31% do tempo e “La Niña” um 23%. O estado da Oscilação Sul é medido com índices (SOI), sendo o mais utilizado a diferença de pressões entre Darwin e Thaiti.

A seguir é apresentada uma descrição física do fenômeno de “El Niño”, extraída de Ahrens (2002). Periodicamente a configuração da pressão atmosférica da superfície tem variações, as pressões do ar aumentam sob a região do Pacífico oeste e diminuem sobre o Pacífico leste. Esta variabilidade nas pressões debilita o sentido leste dos ventos, e quando a anomalia é forte os ventos chegam a serem substituídos por ventos do oeste. Água de uma grande porção do Pacífico tropical é aquecida e se move surgindo nas costas de América de Sul. No final do período quente, o que pode durar entre um e dois anos, a pressão atmosférica sob o Pacífico leste muda a tendência e começa a subir, enquanto no Pacífico oeste desce, retornando à configuração inicial. Esta oscilação nas pressões de superfície do ar entre os extremos do oceano Pacífico é chamada de Oscilação Sul. Como as variações de pressões e o aquecimento do oceano são aproximadamente simultâneos o fenômeno tem sido chamado “El Niño - Southern Oscillation” ou ENSO. Apesar de a maioria dos ENSO seguirem a mesma evolução, cada um tem suas próprias características no que refere a sua magnitude e conseqüências.

Numa fase do ENSO, a grande área do oceano aquecida acima do normal pode ter efeitos na circulação geral da atmosfera. As águas tropicais aquecidas depositam calor e umidade adicional na atmosfera, tornando-se mais chuvosa. O calor adicional do oceano e a liberação de calor latente no ar durante a condensação tem influência nos ventos do oeste, provocando aumentos e diminuições de chuvas em diversas zonas do

planeta. Esta teleconexão tem sido estudada por diversos autores em termos estatísticos, e a partir deles, elaboradas hipóteses dos mecanismos físicos destas teleconexões.

Ropelewsky & Halpert (1987), utilizando séries de precipitação mensal e uma lista de 25 eventos “El Niño” desde 1877 até 1982 determinaram relações entre o ENSO e anomalias nas precipitações em 17 regiões do planeta. Para a região norte do Brasil, existe uma das relações mais consistentes entre ENSO e precipitações do planeta das determinadas no trabalho. Em episódios do ENSO, é clara a deficiência de precipitações nos meses de julho até março, com nenhuma anomalia positiva de precipitações ocorrendo. Esta teleconexão está associada a um incremento da subsidência sobre o norte de América do Sul com um deslocamento da circulação de Walker do Atlântico durante episódios do ENSO. Na região Sul, particularmente para Rio Grande do Sul e Uruguai acharam uma teleconexão forte nos meses de novembro até fevereiro seguinte ao evento com anomalias positivas nas precipitações. Esta teleconexão deve estar associada ao incremento dos ventos sub tropicais de 200mb do oeste que têm uma tendência de ocorrer durante os eventos do ENSO. O que também está relacionado com uma re-orientação da zona de convergência e suas precipitações associadas.

Pisciotano et al. (1994), utilizando precipitações mensais no Uruguai, eventos do ENSO e Índices de Oscilação Sul determinaram as seguintes relações para a região norte do Uruguai. Em anos com eventos ENSO existe uma tendência de ter anomalias positivas nas precipitações, especialmente nos meses novembro até janeiro. Em anos com valores altos do SOI existe uma tendência de ter anomalias negativas nas precipitações nos meses de outubro até dezembro. Encontraram também que existem anomalias positivas de precipitação nos meses de março até julho do ano anterior a um evento do ENSO e negativas antes de um SOI alto. Segundo Pisciotano et al. (1994) existem relações claras que provam a existência de teleconexões entre o oceano Pacífico e América do Sul, e os mecanismos físicos envolvidos. Mas pouco é conhecido sobre os mecanismos físicos que produzem as anomalias e o momento da sua ocorrência. Para entender estas relações devem ser consideradas as circulações atmosféricas anômalas associadas com cada fase da Oscilação Sul na escala global e regional; zonas de convergência e ventos de oeste (correntes Jet). Sugere que a variabilidade inter anual no Oceano Pacífico tropical contribui de forma importante na variabilidade das precipitações no Uruguai. Mas sugere também que para entender as anomalias de

precipitação na América do Sul deverão ser estudadas as relações entre a circulação global da atmosfera, as atividades de frentes e os fenômenos de convecção locais. Portanto deve ser considerada a variabilidade na atmosfera e a circulação no Atlântico Sul. O último porque a circulação anti ciclônica do Atlântico Sul é influenciada pelo vapor de água do Atlântico Sul e a umidade da porção tropical da América de Sul.

Diaz et al. (1997) utilizando precipitações mensais e células de SST médias mensais dos oceanos Atlântico e Pacífico de 7.5° de longitude e 4.5° de latitude determinaram relações que agregam aos trabalhos anteriores a influência do oceano Atlântico na variabilidade das precipitações em Rio Grande do Sul e Uruguai. Além disso foram caracterizadas as precipitações da região como “distribuídas equitativamente no ano” e com importante variabilidade espacial e temporal. A maior variabilidade aparece como um dipolo oeste - este. Os resultados confirmam que as anomalias nas precipitações estão relacionadas com ENSO durante os meses novembro até fevereiro com uma extensão mais débil outubro – dezembro. Nestes períodos as anomalias poderiam estar relacionadas com anomalias nas SST das zonas de convergência dos oceanos Pacífico e Atlântico. Em todos os períodos estudados a variabilidade das precipitações no Rio Grande do Sul e Uruguai estão associadas com anomalias das SST nos oceanos Atlântico e Pacífico. Isto sugere três possíveis cenários: 1) As anomalias nas precipitações e no oceano Atlântico sub tropical do sudeste são manifestações de perturbações complexas da circulação geral da atmosfera e os oceanos associadas a ENSO, possivelmente independentes entre si. 2) Os eventos do Pacífico podem produzir uma resposta tardia no Atlântico e este produz as anomalias nas precipitações. 3) Podem existir anomalias no Atlântico independentes do ENSO que podem contribuir às anomalias de precipitação. Ao menos um dos dois últimos cenários é aplicável nos meses de abril até julho onde a sinal do Atlântico é mais forte.

Grimm et al.(2000) analisando precipitações mensais de Argentina, Brasil, Chile, Uruguai e Paraguai conclui que toda esta região possui anomalias associadas aos fenômenos de “El Niño” e “La Niña”, mas o sul do Brasil é a região que apresenta um sinal mais claro das anomalias com eventos do ENSO, em concordância com as determinadas por Pisciotano et al. (1994) e Diaz et al. (1997). O incremento (diminuição) e realocação das correntes Jet durante fases de “El Niño” (“La Niña”) e suas incidências na zona de convergência mediante condições mais (menos) favoráveis

para a propagação de ondas de Rossby são as formas físicas de teleconexão relatadas por Grimm et al.(2000) e Grimm & Natori (2006).

Finalmente no que se refere as vazões, Mechoso & Iribarren (1992) analisaram as relações entre as vazões médias mensais dos rios Uruguai e Negro (Uruguai) nos períodos junho – dezembro e o SOI achando que para valores altos de índice as vazões são menores que a média. Além disso, no período de novembro - fevereiro em anos El Niño, a tendência das vazões são de ser acima da média. Os autores concluem também que estes índices não são os únicos preditores da ocorrência de vazões acima da média. Camilloni & Barros (2003), analisaram as relações entre as vazões médias mensais dos rios Paraná, Iguazu e Paraguai, precipitações da região e temperaturas de superfície do oceano. Existe uma relação clara entre as fases do ENSO e as maiores anomalias positivas do rio alto Paraná e Paraná em Corrientes (inclui o Paraguai e Iguazu), duas terças partes de elas ocorreram durante ano Niño e nenhuma anomalia positiva ocorreu durante um ano Niña. Isto contrasta com que a correlação entre os valores estacionais do SOI e as vazões é débil, indicando que as maiores anomalias positivas estão mais relacionadas ao Niño do que o resto das anomalias. Por outro lado as maiores anomalias relacionadas com o Niño ocorreram na primavera e outono posterior ao ano, acompanhando a variação estacional do sinal da precipitação do Niño da região subtropical leste de América do Sul. Durante o século XX, as maiores vazões do Paraná em Corrientes ocorreram em outono. Em todos esses eventos as anomalias de SST na região Niño 3 persistiram até maio, e se a anomalia continuou persistiram as anomalias positivas. A restante terceira parte das maiores anomalias positivas do alto Paraná foram em outono o verão de anos neutros (sem El Niño ou La Niña) mas com uma anomalia importante de temperaturas de superfície de oceano nas proximidades da costa de América do Sul.

3.6 Reconstrução dos dados históricos das temperaturas de superfície do oceano.

Smith & Reynolds (2003) fizeram a reconstrução das temperaturas médias mensais da superfície do oceano em células de 2 graus no período 1854-1997 a partir do COADS (Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set). Um controle de qualidade dos

dados foi desenvolvido por Smith & Reynolds utilizando o período de base 1961-1991 para construir as séries desde o ano 1854. As incertezas nos dados reconstruídos diminuíram ao longo da maioria do período, sendo as menores a partir do ano 1950 até o presente (devido à existência de maior número de dados). Os dados estão disponíveis em formato Matlab no endereço: <http://www.cdc.noaa.gov/cdc/data.noaa.ersst.html>.

4 Metodologia e dados disponíveis.

No presente capítulo são apresentados os dados das vazões máximas anuais utilizadas, e suas principais características. Estes dados foram consistidos utilizando somente aqueles com dados de todo o ano completo e analisando cada hidrograma para conhecer se o valor máximo é coerente. Em seguida, a partir dos dados consistidos, é descrita a metodologia utilizada. Resumidamente consistiu em:

- Ajustar, para as séries de vazão média diária máxima anual de cada uma das bacias utilizadas, os parâmetros da distribuição de frequências GEV e o caso particular Gumbel mediante o método de máxima verossimilhança. Aplicar um teste estatístico para escolher a distribuição adequada.
- Obter os intervalos de confiança dos parâmetros da distribuição ajustada e das vazões com os métodos: “curvatura da superfície do logaritmo da função de máxima verossimilhança” e “bootstrap”, comparando-os e analisando as incertezas de cada uma das distribuições.
- Pesquisa de relações entre temperaturas de superfície de mar e vazões máximas anuais que permitam um melhor ajuste das distribuições de frequências. Análise das relações entre períodos de retorno de vazões e temperaturas de superfície do oceano. Análise da sensibilidade da escolha das séries de temperaturas do oceano utilizado as células mais próximas. Em todos os casos determinação dos intervalos de confiança mediante as metodologias propostas.

4.1 Consistência dos dados

Foram utilizados os dados da vazão diária dos postos da bacia média do rio Uruguai, sendo que os dados brasileiros pertencem à ANA, e os dados uruguaios à

DNH. Dos dados disponíveis na região foram escolhidos somente aqueles com anos completos. Para os anos completos foram extraídos os valores de vazão máxima anual, observando os hidrogramas para garantir que não sejam outliers. Na Tabela 4.1.1 são apresentados os dados utilizados e suas principais características. Na Figura 4.1.1 é apresentada a localização das bacias utilizadas.

Tabela 4.1.1. Dados utilizados no estudo.

Nome	Rio	Código da bacia	Fonte dos dados	Área (km ²)	inicio	fim	Anos com dados completos
Ernesto Alves	Jaquarizinho	76460000	ANA	933	1959	2002	39
Jaguari	Jaguari	76440000	ANA	2296	1942	2001	52
Rosário do Sul	Santa Maria	76310000	ANA	12077	1968	2002	33
Passo das Turmas	Icamaqua	75600000	ANA	388	1976	2002	24
P. nova do Potiribu	Potiribu	75185000	ANA	629	1964	1995	29
Passo faxinal	Ijuí	75155000	ANA	2003	1942	2002	56
Linha união	Comandai	74900000	ANA	1248	1970	2002	31
Linha cascata	Santo Crisanto	74750000	ANA	337	1964	2001	34
Tucunduva	Santa Rosa	74700000	ANA	1139	1942	2002	58
Cascata Burica	Burica	74600000	ANA	2265	1942	1996	55
Três passos	Turvo	74470000	ANA	1538	1965	2002	37
Ponte do rio turvo	Turvo	74460000	ANA	505	1977	2002	26
Usina de bombeo	Cuareim (Quaraí)	84	DNH	4640	1967	2002	36
Paso Manuel Díaz	Tacuarembó	51.1	DNH	2310	1972	2003	29

(DNH, Uruguai), (ANA, Brasil)

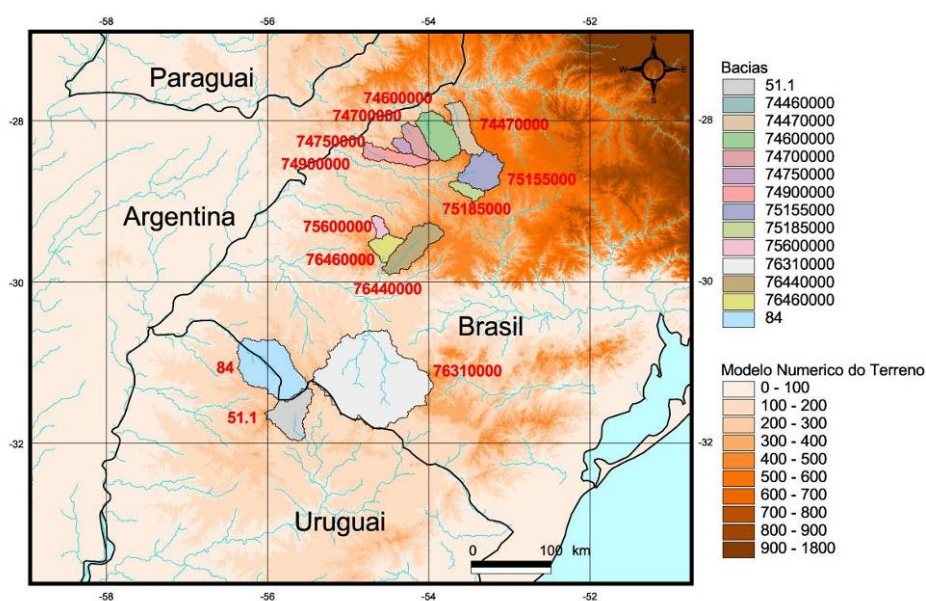


Figura 4.1.1. Localização das bacias utilizadas no estudo.

Nos postos de medição de vazão não é comum contar com curvas chave que atinjam aos valores extremos, porém geralmente os dados de vazão máxima diária são estimados a partir de extrapolações. Para estudos de regionalização de vazões máximas, Tucci (1993) tem desenvolvido critérios para atribuição de qualidade aos postos. Na Tabela 4.1.2 são descritos os critérios, e na Tabela 4.1.3 é apresentada a qualidade dos dados de vazão máxima de cada posto segundo o critério.

Tabela 4.1.2. Critérios de atribuição de qualidade aos postos quanto à vazão máxima, Tucci (1993)

Nota	Características	H	Q
A	Postos fluviométricos de características excelentes cujas descargas máximas medidas estão dentro de 10 a 15% do valor máximo de cheia observada, com uma boa seção transversal para extrapolação, sem transbordamento estável.	≤1.15	≤1.15
B	Postos bons com extrapolação da curva de descarga menor que 50% do valor máximo medido de vazão. Seções transversais boas, sem extravasamento e estável.	≤1.25	≤1.50
C	Postos aceitáveis com extrapolação adequada da curva de descarga e com eventuais transbordamentos.	≤1.75	≤2.50
D	Postos geralmente inaceitáveis pela grande extrapolação da curva de descarga e transbordamento excessivo na seção.	≤2.00	≤3.00
E	Postos com extrapolação inadequada da curva de descarga. Não são no estudo.		

H = relação entre a maior cota observada e a maior cota com vazão medida
 Q = o mesmo do anterior para vazões

Tabela 4.1.3. Nota de cada posto.

Nome	Rio	Código da bacia	Fonte dos dados	Área (km ²)	H	Q	Nota
Ernesto Alves	Jaquarizinho	76460000	ANA	933	2.78	4.65	E
Jaguari	Jaguari	76440000	ANA	2296	1.26	2.20	C
Rosário do Sul	Santa Maria	76310000	ANA	12077	1.39	3.16	E
Passo das Turmas	Icamaqua	75600000	ANA	388	1.48	5.35	E
P. nova do Potiribu	Potiribu	75185000	ANA	629	1.25	1.51	B
Passo faxinal	Ijuí	75155000	ANA	2003	3.83	7.40	E
Linha união	Comandai	74900000	ANA	1248	1.40	1.61	C
Linha cascata	Santo Crisanto	74750000	ANA	337	1.42	2.91	D
Tucunduva	Santa Rosa	74700000	ANA	1139	1.31	2.06	C
Cascata Burica	Burica	74600000	ANA	2265	1.89	3.25	E
Três passos	Turvo	74470000	ANA	1538	1.98	2.40	D
Ponte do rio turvo	Turvo	74460000	ANA	505	1.55	1.98	C
Usina de bombeo	Cuareim (Quaraí)	84	DNH	4640	1.00	1.00	A
Paso Manuel Díaz	Tacuarembó	51.1	DNH	2310	*	*	*

Pode-se observar na Tabela 4.1.3 que se tem 5 postos com nota E e 2 postos como nota D. Estes postos geram duvidas enquanto à qualidade do dado de vazão máxima diária, mais devido à escassez de postos com dados completos serão igualmente utilizados no estudo.

A partir das séries históricas de vazão diária foram construídas, para cada bacia, as séries de vazões máximas anuais. As principais características destas séries históricas são apresentadas na Tabela 4.1.4.

Tabela 4.1.4. Características das séries de vazões máximas anuais

Codigo da bacia	Máximo		Mínimo		Média		Desvio padrão		Coef. de variação
	(m ³ /s)	(m ³ /s/km ²)	(m ³ /s)	(m ³ /s/km ²)	(m ³ /s)	(m ³ /s/km ²)	(m ³ /s)	(m ³ /s/km ²)	
76460000	1747	1.87	134	0.14	550	0.59	277	0.30	0.50
76440000	2879	1.25	325	0.14	943	0.41	431	0.19	0.46
76310000	6100	0.51	218	0.02	2055	0.17	1353	0.11	0.66
75600000	840	2.16	146	0.38	435	1.12	206	0.53	0.47
75185000	237	0.38	37	0.06	121	0.19	53	0.08	0.43
75155000	1577	0.79	130	0.06	414	0.21	233	0.12	0.56
74900000	629	0.50	200	0.16	395	0.32	93	0.07	0.24
74750000	300	0.89	46	0.14	135	0.40	56	0.17	0.42
74700000	585	0.51	55	0.05	273	0.24	129	0.11	0.47
74600000	1241	0.55	236	0.10	615	0.27	239	0.11	0.39
74470000	857	0.56	123	0.08	382	0.25	185	0.12	0.48
74460000	119	0.24	26	0.05	59	0.12	22	0.04	0.37
84	4813	1.04	270	0.06	1744	0.38	1092	0.24	0.63
51.1	1412	0.61	55	0.02	558	0.24	328	0.14	0.59

Observando os valores por unidade de área, as bacias com características diferentes das restantes são Ernesto Alves (código 76460000) e Passo das Turmas (código 75600000). No primeiro caso somente o valor da vazão máxima é diferente do resto, no segundo caso todos os valores resultam diferentes. Além disso, segundo os critérios de qualidade de Tucci (1993) na Tabela 4.1.3 os postos tem nota E. Devido à escassez de dados, estes postos serão considerados no estudo.

Analisando a data de ocorrência dos valores máximos anuais em cada uma das bacias e possível concluir que não existe um padrão definido de ocorrência dos eventos máximos anuais. O histograma do mês de ocorrência do Máximo anual para cada estação é apresentado na Figura 4.1.2. Nesta figura somente pode-se observar uma leve tendência dos máximos anuais ocorrer nos meses de inverno, e que nenhum dos meses do ano possui mais do que 30% dos valores máximos anuais. Os resultados anteriores permitem considerar para as restantes análises o ano hidrológico coincidente com o ano Gregoriano, centralizando o período de vazões máximas.

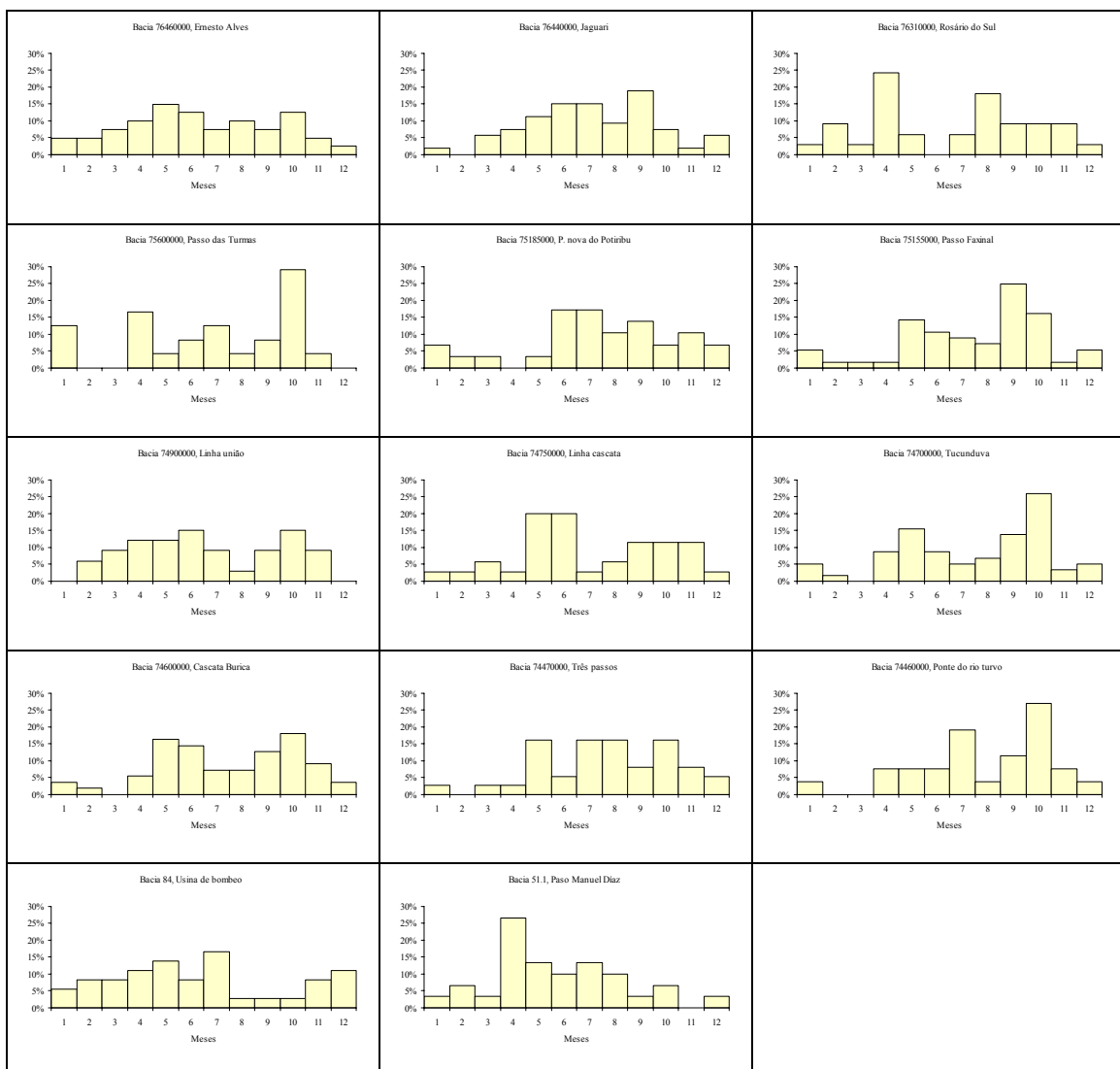


Figura 4.1.2. Histogramas dos meses de ocorrência da vazão máxima anual.

O fato de não ter uma temporada fixa de enchentes tem relação com as características do clima da região. Como exemplo disto, na Figura 4.1.3 pode-se

observar o regime de chuvas do pluviômetro Artigas no período 1950-2002, da bacia do Quaraí, onde desvio padrão da precipitação mensal é de uma ordem similar à média.

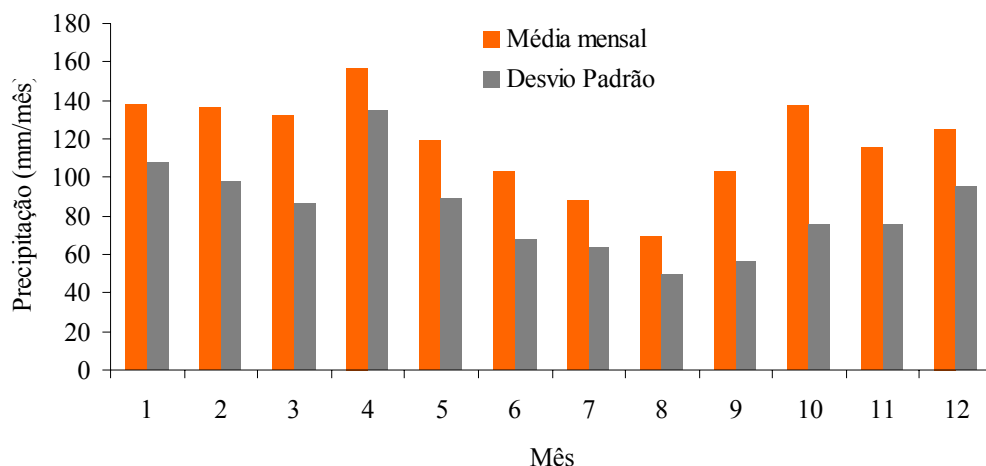


Figura 4.1.3. Valores médios e desvio padrão das precipitações mensais no pluviômetro de Artigas, período 1950-2002.

4.2 Ajuste das distribuições GEV e Gumbel aos dados de vazão máxima anual das bacias e test de hipóteses para escolha da distribuição

Para as séries de vazões máximas anuais de cada bacia foram estimados, maximizando as funções de máxima verossimilhança, os parâmetros das distribuições GEV e Gumbel (Equações 3.7 e 3.8). A maximização da função de máxima verossimilhança somente pode ser feita de forma numérica, para isso foram escritas rotinas específicas em Matlab. Estas rotinas utilizam, para maximizar, algoritmos de procura direta. Estes mostraram serem adequados, já que a função de máxima verossimilhança não apresenta máximos locais. O valor inicial para a procura foram os valores de μ e σ obtidos pelo método dos momentos para a distribuição de Gumbel, e no caso da distribuição GEV o valor inicial para ξ foi 0.1.

A partir dos valores dos logaritmos das funções de máxima verossimilhança de cada ajuste, foram calculados os valores da função de Deviança (equação 3.12) e feito um teste estatístico para escolher a distribuição apropriada aos dados.

O teste, utilizando a função de Deviança, analisa a significância de $\xi \neq 0$ (isto é, foi testada a hipótese $\xi = 0$). Na escolha deve se considerar que utilizar uma distribuição de três parâmetros em lugar de dois, diminui a robustez do modelo e aumenta as incertezas nas extrapolações, já que agrega graus de liberdade. Isto é muito importante já que geralmente as distribuições de frequências são utilizadas para estimar vazões de altos períodos de retorno, que resultam de uma extrapolação.

As incertezas nas extrapolações geradas por cada modelo podem ser avaliadas observando as duas distribuições ajustadas no que refere à largura dos intervalos de confiança, especialmente nas extrapolações (por exemplo para 100 anos).

4.3 Intervalos de confiança

Os intervalos de confiança de 95% de cada ajuste de distribuição de frequências foram determinados utilizando a curvatura da superfície do logaritmo da função de máxima verossimilhança (equação 3.11) e utilizando as técnicas de bootstrap (equação 3.13). Para ambos os métodos foram implementados rotinas em Matlab.

No caso das técnicas de bootstrap os intervalos de confiança das vazões foram determinados a partir dos intervalos de confiança dos parâmetros e diretamente nas vazões. Também, foi analisado qual é o número de gerações bootstrap necessárias para que o intervalo de confiança seja constante (seja independente do número de gerações bootstrap).

Os intervalos de confiança obtidos com os dois métodos propostos foram comparados, e analisada a conveniência de qual método utilizar.

4.4 Aprimoramento do ajuste da distribuição de frequências utilizando informação climática

A partir da distribuição GEV podem ser formulados outros modelos que utilizam informações complementares na estimativa de frequências. Supondo a série temporal

$V(t)$, em igual período que a série de interesse, um modelo proposto pode-se supor $\mu(t)=a+b \cdot V(t)$ na distribuição GEV. Assim o modelo, para cada t , pode ser formulado para o caso da distribuição GEV como:

$$\Pr(Z \leq z / V) = G(z / V) = \exp \left\{ - \left[1 + \xi \left(\frac{z - (a + b \cdot V)}{\sigma} \right) \right]^{-1/\xi} \right\}$$

E para o caso da distribuição de Gumbel:

$$\Pr(Z \leq z / V) = G(z / V) = \exp \left[- \exp \left\{ - \left(\frac{z - (a + b \cdot V)}{\sigma} \right) \right\} \right]$$

Utilizando as séries mensais de temperatura de superfície do oceano em células de 2 graus reconstruídas por Smith & Reynolds (apresentadas na revisão bibliográfica) foram feitas séries de temperatura média e máxima anual. Utilizando estas séries auxiliares, e o modelo apresentado, foram maximizados os logaritmos das funções de máxima verossimilhança para cada uma das células. Isto supõe considerar uma relação entre o parâmetro de locação e as séries auxiliares da seguinte forma: $\mu_i = a + b \cdot sst_i$, onde μ_i é o valor do parâmetro de locação para cada valor da temperatura de superfície do oceano sst_i correspondente ao ano i .

Para cada célula foi determinado o valor da função de Deviança em relação ao valor do logaritmo da função de máxima verossimilhança das distribuições GEV e Gumbel antes ajustadas:

$$D = 2 \cdot (\ell_{SST_GEV} - \ell_{GEV}) \approx \chi_1^2 \quad \text{e} \quad D = 2 \cdot (\ell_{SST_Gumbel} - \ell_{Gumbel}) \approx \chi_1^2$$

onde:

ℓ_{SST_GEV} é o logaritmo da função de máxima verossimilhança do modelo proposto para a distribuição GEV, utilizando a série auxiliar das SST escolhidas.

ℓ_{SST_Gumbel} é o logaritmo da função de máxima verossimilhança do modelo proposto para a distribuição de Gumbel, utilizando a série auxiliar das SST escolhidas.

O valor da função de Deviança para cada célula é uma medida da significância de supor $b \neq 0$ (isto é, foi testada a hipótese $b=0$), sendo que valores maiores que 3.86 apresentam significância inferior a 5%. Os resultados dos valores da função de Deviança, para cada célula apresentam-se em figuras.

A partir dos valores da função de Deviança obtidos, foi escolhido o maior valor dentro da região compreendida entre 160°L, 80°O, 10°N e 10°S. Esta região inclui as identificadas pelos diversos autores citados no Capítulo 3.5 como aquela que tem influencia sobre as precipitações e vazões na bacia média de rio Uruguai.

Para cada bacia foi analisada a distribuição ajustada e os intervalos de confiança do modelo. Especificamente foi analisada a relação entre um aumento das temperaturas e os períodos de retorno. Para determinar os intervalos de confiança foram utilizados os mesmos métodos que no modelo anterior.

4.5 Análise de sensibilidade da série auxiliar escolhida

A escolha da célula com maior valor de função de Deviança tem graus de incerteza já que células próximas têm alta correlação e uma extensão da série no tempo poderia fazer que seja outra a célula escolhida, ou com os dados utilizados no presente trabalho seja melhor a função de Deviança de alguma combinação linear de células próximas. Portanto, para fazer uma análise da sensibilidade de célula escolhida (enquanto à determinação dos períodos de retorno), utilizadas as 24 células próximas foram utilizados dois procedimentos; otimizar o modelo para cada uma de elas e otimizar o modelo para a média delas. A partir de cada modelo otimizado foram determinados e graficados os períodos de retorno.

5 Resultados

Inicialmente, no item 5.1, será apresentada uma análise do número de gerações de bootstrap necessário para determinar os intervalos de confiança de parâmetros e vazões. No item 5.2 serão apresentados e exemplificados de forma detalhada os resultados obtidos a partir da metodologia proposta na bacia do Quaraí, código 84 da DNH, única bacia com Nota A nos critérios de qualidade adotados. Mais adiante no item 5.3 são apresentados de forma resumida os resultados da metodologia nas outras bacias de região.

5.1 Número de gerações de bootstrap.

Para a escolha do número de gerações de bootstrap necessárias para determinar intervalos de confiança em parâmetros e vazões são analisadas as variações de eles ao aumentar as gerações. Na Figura 5.1.1 e Figura 5.1.2 e são apresentados os gráficos que justificam a escolha do número de gerações necessárias para uma correta estimação. Pode-se observar que nas 2000 gerações os valores dos intervalos de confiança dos parâmetros e as vazões permanecem constantes. Em todas as bacias foram observados estes resultados, mas não serão apresentados os gráficos.

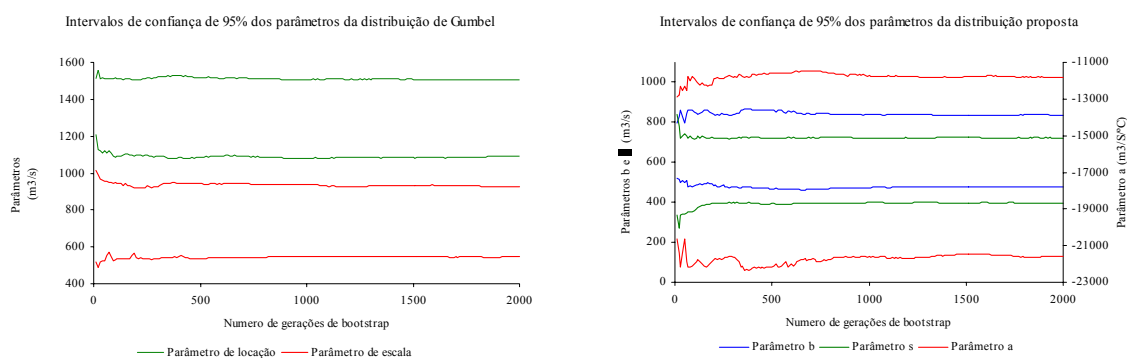


Figura 5.1.1. Intervalos de confiança de parâmetro ao aumentar o número de gerações de bootstrap.

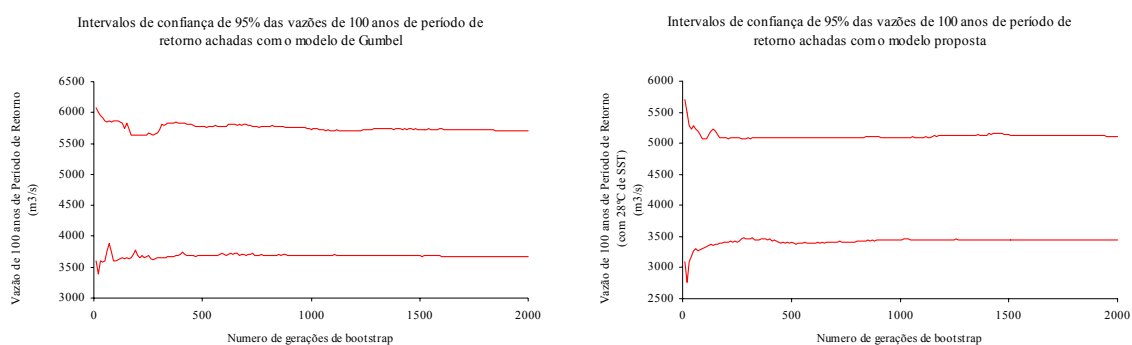


Figura 5.1.2. Intervalos de confiança das vazões ao aumentar o número de gerações de bootstrap.

5.2 Estação 84, bacia do Quaraí

5.2.1 Ajuste da distribuição de frequências e intervalos de confiança dos parâmetros e das vazões.

Foram ajustadas, aos dados de vazão máxima anual da bacia do Quaraí, as distribuições GEV e Gumbel mediante a metodologia de máxima verossimilhança. Os valores dos parâmetros, os intervalos de confiança de 95% obtidos com as duas metodologias propostas e as funções de máxima verossimilhança são apresentados na Tabela 5.2.1.

Para comparar o ajuste dos dados obtido com os modelos é utilizada a função de Deviança, $D = 2 \cdot (l_{\text{GEV}} - l_{\text{Gumbel}}) = 2 \cdot (-295.41 - (-296.55)) = 2.28$. Lembrando que para 3.84 a distribuição χ^2_1 toma o valor de 0.05 (5% de significância), o valor de 2.28 sugere que a distribuição Gumbel é a adequada aos dados. A comparação visual das distribuições é apresentada na Figura 5.2.1.

Na Tabela 5.2.2, e Figura 5.2.1 pode se observar que os intervalos de confiança dos parâmetros e as vazões obtidas utilizando as duas metodologias propostas são da mesma ordem. Para os intervalos de confiança gerados pela técnica de bootstrap o número de gerações de vazões qmax* utilizado foi de 2000 já que provas realizadas mostraram que para esse número o intervalo de confiança gerado permanece constante. Na Figura 5.1.1 e Figura 5.1.2 pode ser observado este resultado.

Tabela 5.2.1. Parâmetros estimados, intervalos de confiança de 95% e função de máxima verossimilhança, para as distribuições de Gumbel e GEV na bacia do Quaraí.

Distribuição	Parâmetros estimados e intervalos de confiança				Logaritmo da função de máxima verossimilhança
		$\hat{\mu}$ (m ³ /s)	$\hat{\sigma}$ (m ³ /s)	$\hat{\xi}$	ℓ
Gumbel	parâmetros	1278	740	*	-296.55
	(1)	[1065,1490]	[572,909]	*	
	(2)	[1113,1452]	[577,882]	*	
GEV	parâmetros	1203	671	0.201	-295.41
	(1)	[994,1411]	[504,838]	[-0.03,0.432]	
	(2)	[1051,1368]	[478,795]	[0.053,0.459]	

(1) Intervalos de confiança de 95% obtidos com a curvatura da superfície do logaritmo da função de máxima verossimilhança. (2) Intervalos de confiança de 95% obtidos com as técnicas de “bootstrap”.

Tabela 5.2.2. Vazões para 2, 25, 50, 75 e 100 anos de período de retorno e intervalos de confiança de 95% estimados com as distribuições de Gumbel e GEV na bacia do Quaraí.

Distribuição Gumbel							
Período de retorno	Vazão	(1)		(2)		(3)	
		Intervalos de confiança	Largura	Intervalos de confiança	Largura	Intervalos de confiança	Largura
(anos)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)
2	1549	[1275,1823]	548	[1324,1775]	451	[1353,1757]	404
25	3645	[2895,4397]	1502	[2959,4273]	1314	[3012,4218]	1206
50	4165	[3297,5037]	1740	[3364,4894]	1530	[3413,4826]	1413
75	4468	[3531,5409]	1878	[3600,5254]	1654	[3645,5186]	1541
100	4682	[3696,5672]	1976	[3767,5509]	1742	[3811,5440]	1629

Distribuição GEV							
Período de retorno	Vazão	(1)		(2)		(3)	
		Intervalos de confiança	Largura	Intervalos de confiança	Largura	Intervalos de confiança	Largura
(anos)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)
2	1458	[1178,1744]	566	[1228,1685]	457	[1254,1662]	408
25	4214	[2531,7195]	4664	[2717,7155]	4438	[3435,5462]	2027
50	5178	[2850,9938]	7088	[3123,10020]	6897	[4048,7486]	3438
75	5805	[3032,11960]	8928	[3366,12164]	8798	[4448,9034]	4586
100	6280	[3160,13623]	10463	[3541,13943]	10402	[4704,10219]	5515

(1) Intervalos de confiança de 95% obtidos com a curvatura da superfície do logaritmo da função de máxima verossimilhança. (2) Intervalos de confiança de 95% obtidos com as técnicas de “bootstrap” nos parâmetros. (3) Intervalos de confiança de 95% obtidos com as técnicas de “bootstrap” nas vazões.

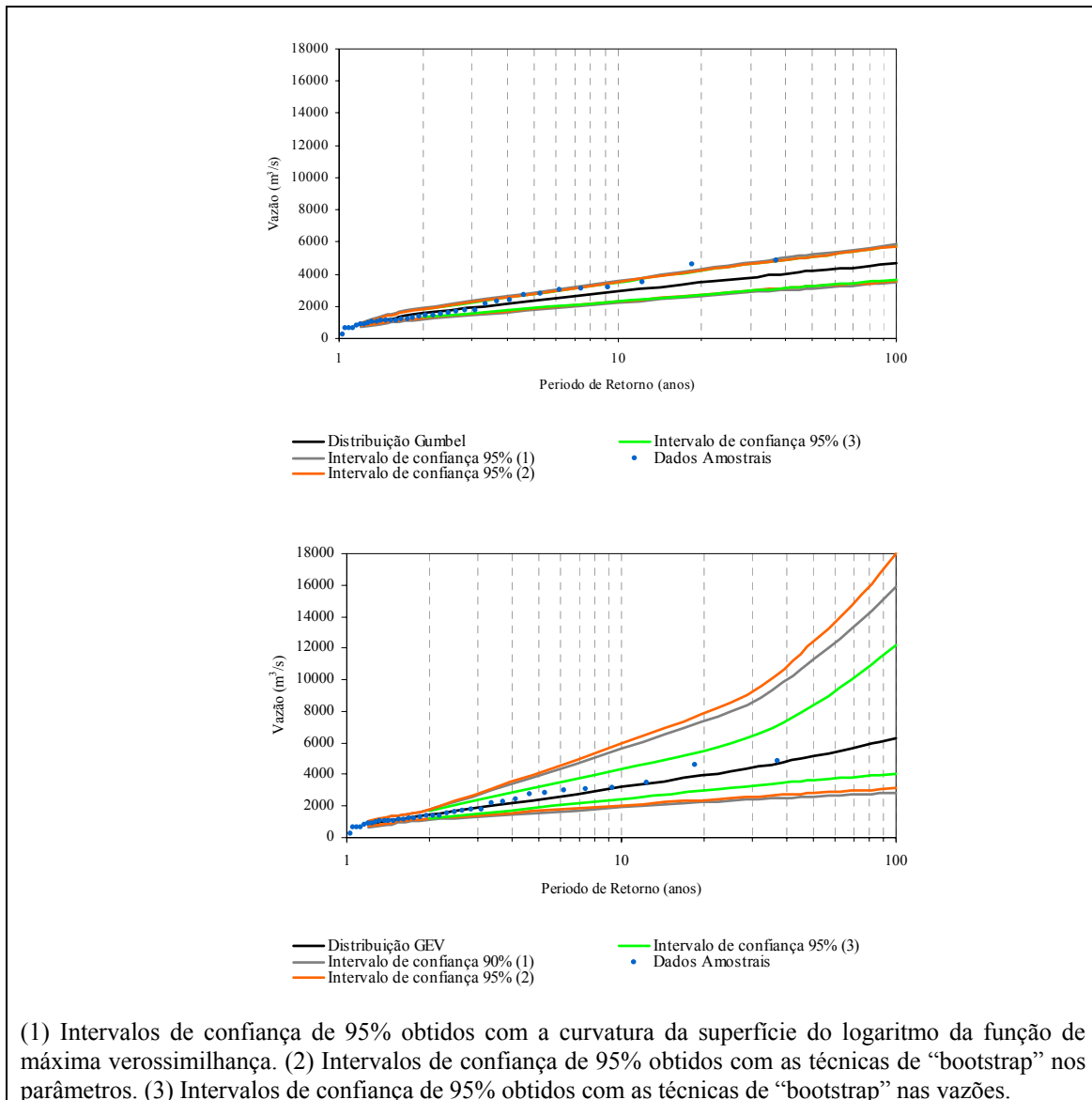


Figura 5.2.1. Ajuste da distribuição de frequências GEV e intervalos de confiança de 95%

A escolha da distribuição de Gumbel ou GEV para o ajuste dos dados utilizando o teste estatístico da função de Deviança é uma medida da significância de agregar um parâmetro ao modelo. Além disso, como pode ser observado na Tabela 5.2.2, o fato de agregar um parâmetro ao modelo implica maiores incertezas na extrapolação (no valor central e os intervalos de confiança). As anteriores considerações levam a adotar o modelo de Gumbel, já que a pesar de visualmente o ajuste da GEV ser melhor, o teste sugere que para significância de 5% a incorporação de outro parâmetro não é significativa, e as incertezas para altos períodos de retorno são muito maiores. Um outro fator que afeta a qualidade visual do ajuste é a ocorrência de dois valores extremos muito similares no final da série.

Outra forma de obter os intervalos de confiança das vazões com a metodologia de bootstrap pode ser de forma direta. Uma comparação dos valores obtidos a partir dos parâmetros e da forma direta é apresentada na Tabela 5.2.2 e Figura 5.2.1. No caso da distribuição de Gumbel, embora o modelo não seja linear, os valores obtidos são muito similares. No caso da distribuição GEV o intervalo de confiança obtido de forma direta é mais estreito, que pode se dever às maiores incertezas geradas pelo terceiro parâmetro e à não linearidade.

5.2.2 Ajuste da distribuição de frequências e intervalos de confiança dos parâmetros e das vazões na estação 84, bacia do Quaraí, utilizando séries auxiliares de temperatura de superfície do oceano.

Utilizando as séries formadas pela média anual dos valores mensais da temperatura da superfície dos oceanos Atlântico e Pacífico em células de 2 graus (Smith & Reynolds, 2002), foi ajustado para cada uma das células o modelo proposto em 4.4. Os parâmetros do modelo são obtidos da maximização do logaritmo da função de máxima verossimilhança. No caso do modelo proposto a partir de Gumbel fica:

$$\ell(\mu, \sigma) = -m \cdot \log(\sigma) - \sum_{i=1}^n \left(\frac{z_i - \mu_i}{\sigma} \right) - \sum_{i=1}^n \exp \left\{ - \left(\frac{z_i - \mu_i}{\sigma} \right) \right\}$$

com $\mu_i = a + b \cdot sst_i$

No caso do modelo proposto a partir da GEV fica:

$$\ell(\mu, \sigma) = -m \cdot \log(\sigma) - (1 + 1/\xi) \cdot \sum_{i=1}^n \log \left\{ 1 + \xi \left(\frac{z_i - \mu_i}{\sigma} \right) \right\} - \sum_{i=1}^n \left\{ 1 + \xi \left(\frac{z_i - \mu_i}{\sigma} \right) \right\}^{-1/\xi}$$

com $\mu_i = a + b \cdot sst_i$, onde sst_i é a média anual no ano i

O resultado da maximização do logaritmo da função de verossimilhança para cada célula, no caso do modelo proposto a partir de Gumbel proposto é apresentado na Figura 5.2.2.

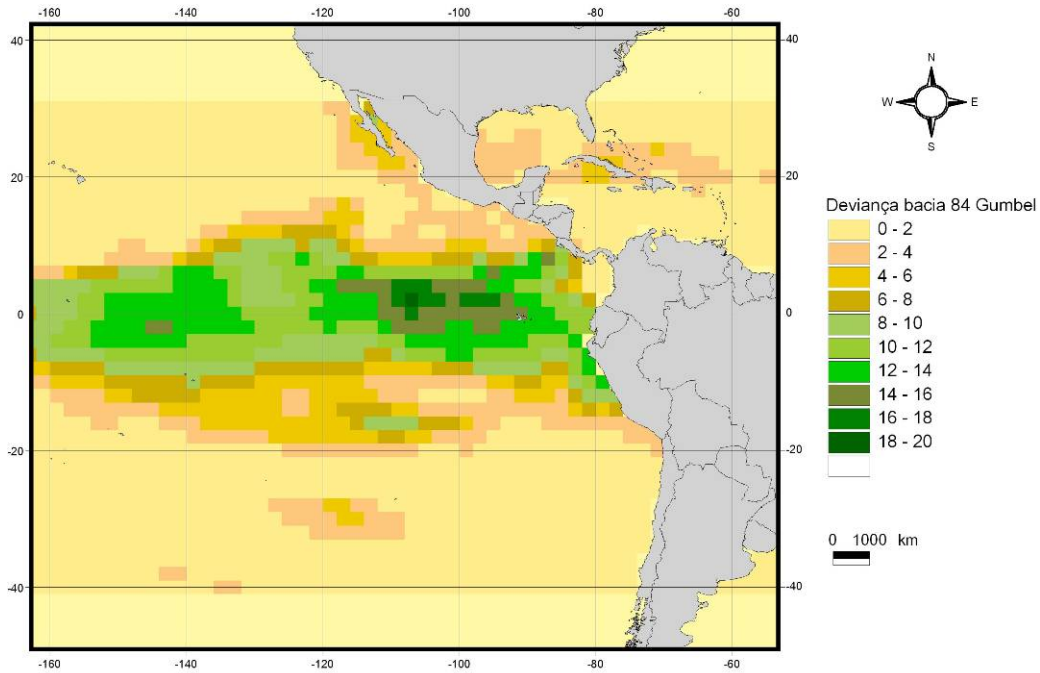


Figura 5.2.2. Valores da função de Deviança do modelo alternativo da distribuição de Gumbel em relação ao modelo original, para cada célula de temperatura de superfície do oceano, da bacia do Quaraí.

A série auxiliar escolhida são as temperaturas da superfície do oceano da célula com maior valor do logaritmo da função de máxima verossimilhança. Esta célula é a correspondente aos 2° N e 107°O e tem um valor de $\ell = -287.25$. Na Figura 5.2.3 são apresentadas as duas séries.

Para testar a significância do modelo proposto em relação à Gumbel, ou seja, a significância de $\text{supor } b \neq 0$ é utilizada a função de Deviança:

$$D = 2 \cdot (\ell_{\text{SST_Gumbel}} - \ell_{\text{Gumbel}}) = 2 \cdot (-287.25 - (-296.55)) = 18.60.$$

Este é um valor significativo comparado com χ_1^2 , o que sugere que o modelo proposto consegue um melhor ajuste dos dados.

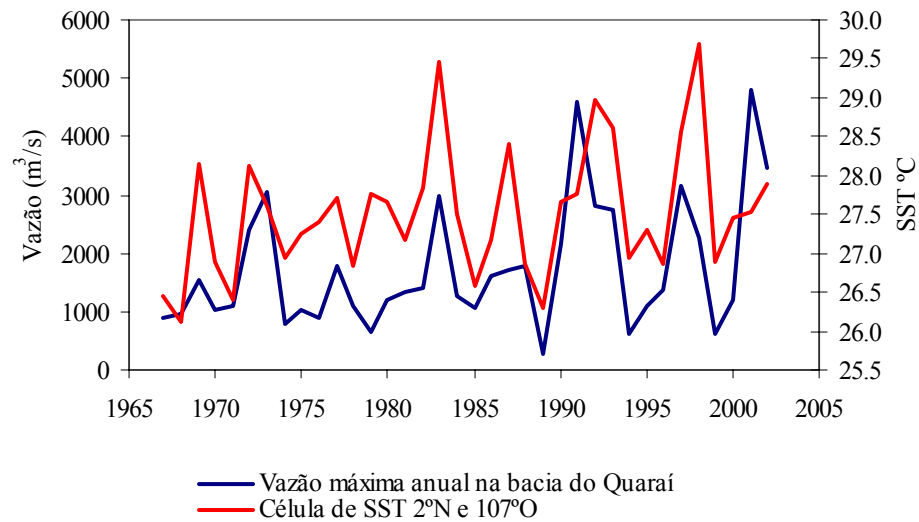


Figura 5.2.3. Vazões máximas anuais na bacia do Quaraí e série de temperaturas de superfície do oceano escolhida com o modelo da Gumbel proposto.

Similar ao caso anterior na Figura 5.2.4 é apresentada maximização do logaritmo da função de verossimilhança para cada célula, no caso do modelo do modelo proposto a partir da GEV.

Novamente, é escolhida a série auxiliar com maior valor do logaritmo da função de máxima verossimilhança. Esta célula é a correspondente aos 2° N e 107° W e tem um valor de $\ell = -285.89$. É importante observar que a região com significância é similar ao caso de Gumbel. Na Figura 5.2.3 já foram apresentadas as duas séries.

Para testar a significância do modelo proposto em relação à GEV, ou seja, a significância de $\text{supor } b \neq 0$ é utilizada a função de Deviança:

$$D = 2 \cdot (\ell_{\text{SST_GEV}} - \ell_{\text{GEV}}) = 2 \cdot (-285.89 - (-295.41)) = 9.52.$$

Este é um valor significativo comparado com χ_1^2 , o que novamente sugere que o modelo proposto consegue um melhor ajuste dos dados.

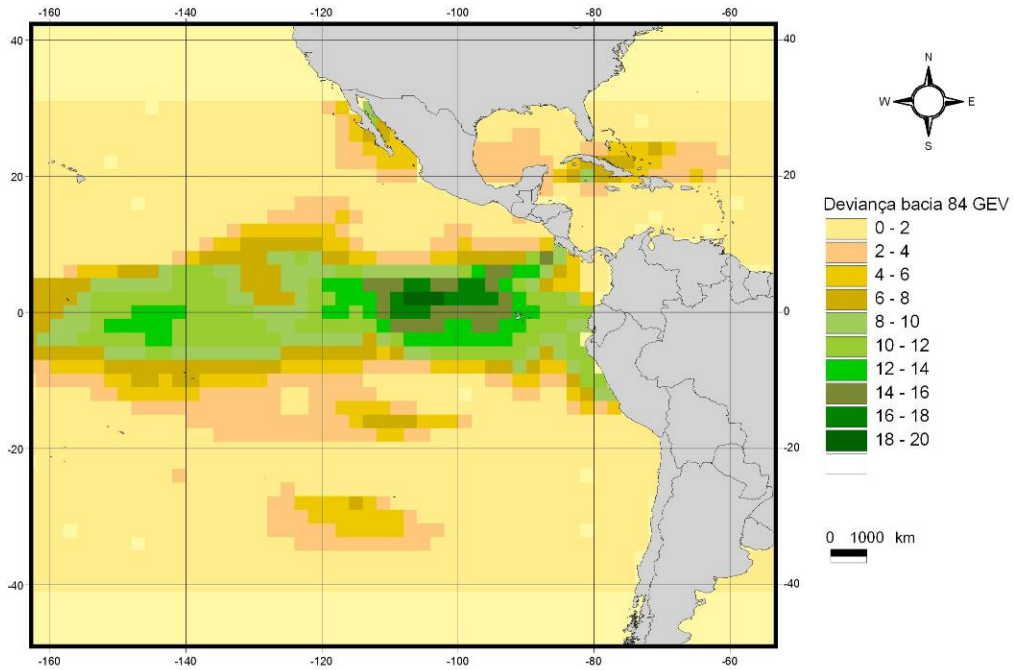


Figura 5.2.4. Valores da função de Deviança do modelo alternativo da distribuição GEV em relação ao modelo original, para cada célula de temperatura de superfície do oceano, da bacia do Quaraí.

O ganho com o modelo GEV é menor do que o ganho com o modelo Gumbel. Este resultado é razoável já que os testes estão medindo o ganho de agregar um parâmetro ao modelo, e o ganho de agregar parâmetros é sempre marginal. Levando em conta os valores dos logaritmos das funções de máxima verossimilhança obtidos, e considerando que o aumento do número de parâmetros provoca maiores incertezas na extrapolação é adotado para o análise o modelo de Gumbel. Na Tabela 5.2.3 são apresentados os parâmetros estimados e os intervalos de confiança de 95%.

Tabela 5.2.3. Parâmetros estimados e intervalos de confiança de 95% para o modelo proposto.

Parâmetro	Valor ajustado	Intervalos de confiança	
		(1)	(2)
a (m3/s)	-15515	[-21615,-9415]	[-20418,-12574]
b (m3/s/°C)	614	[392,836]	[507,795]
σ (m3/s)	568	[416,720]	[423,678]

(1) Intervalos de confiança de 95% obtidos com a curvatura da superfície do logaritmo da função de máxima verossimilhança. (2) Intervalos de confiança de 95% obtidos com as técnicas de “bootstrap”.

O método de bootstrap produz um intervalo de confiança mais estreito. Com os dois intervalos de confiança, aplicando o modelo nesses parâmetros, não se produzem

resultados razoáveis, portanto neste caso somente foi possível determinar intervalos de confiança das vazões utilizando as técnicas de bootstrap diretamente. Os intervalos de confiança supondo os valores de SST de 26°, 28° e 30° são apresentados na Tabela 5.2.4. Estes intervalos de confiança foram feitos com 2000 gerações de séries q_{max}^* de caudal máximo anual. Neste caso para cada série q_{max}^* gerada foi gerada uma série sst^* com as temperaturas correspondentes originalmente a cada valor de vazão.

Tabela 5.2.4. Vazões para 2, 25, 50, 75 e 100 anos de período de retorno e intervalos de confiança de 95% (obtidos diretamente) na bacia do Quaraí estimados com a distribuição de Gumbel proposta para 26, 28 e 30 graus de temperatura média de superfície do oceano na célula escolhida.

Período de retorno (anos)	Temperatura média de superfície do oceano de 26°		Temperatura média de superfície do oceano de 28°		Temperatura média de superfície do oceano de 30°	
	vazão (m ³ /s)	intervalo de confiança de 95% (m ³ /s)	vazão (m ³ /s)	intervalo de confiança de 95% (m ³ /s)	vazão (m ³ /s)	intervalo de confiança de 95% (m ³ /s)
2	657	[410,838]	1885	[1705,2087]	3113	[2764,3610]
25	2266	[1702,2668]	3494	[2957,3978]	4722	[4076,5376]
50	2665	[2008,3132]	3893	[3262,4452]	5121	[4396,5818]
75	2898	[2188,3408]	4126	[3434,4723]	5354	[4579,6095]
100	3062	[2310,3607]	4290	[3559,4923]	5518	[4704,6291]

Na Tabela 5.2.4 pode-se observar que fixando um valor de período de retorno a vazão aumenta com o aumento da SST. Este resultado é coerente com as relações entre as SST da região em que esta compreendida a série escolhida, e as chuvas e vazões medias determinadas pelos autores citados na revisão bibliográfica. Uma outra forma interessante de observar o resultado anterior é determinar os períodos de retorno com a distribuição de Gumbel proposta se acontecerem valores de SST de 26°, 28° e 30° de algumas vazões significativas. Foram escolhidas as vazões de 2, 25, 50, 75 e 100 anos de período de retorno determinadas com a distribuição de Gumbel original. Na Tabela 5.2.5 são apresentados os resultados.

A vazão de 4682 m³/s, correspondente a 100 anos de período de retorno segundo a distribuição de Gumbel, sobe para 1719 anos se a SST fosse 26° e cai para 23 anos se a SST fosse 30°. Por último é interessante observar que o intervalo de confiança se reduz em termos relativos: para o caso de 26° o intervalo de confiança [293,56091] representa 17 e 3263% de 1719 anos, e para o caso de 30° [7,135] representa 30 e 587% de 23 anos. Embora sejam grandes as incertezas, nas variações dos períodos de retorno com as SST são menores para vazões grandes.

Tabela 5.2.5. Períodos de retorno intervalos de confiança de 95% (obtidos diretamente) para as vazões de 2, 25, 50, 75 e 100 anos de período de retorno obtidas com a distribuição de Gumbel na bacia do Quaraí para 26, 28 e 30 graus de temperatura média da superfície do oceano na célula escolhida.

Vazão	Períodos de retorno com um intervalo de confiança de 95%							
	Gumbel		Distribuição de Gumbel proposta com SST=26°		Distribuição de Gumbel proposta com SST=28°		Distribuição de Gumbel proposta com SST=30°	
(m ³ /s)	(anos)	(anos)	(anos)	(anos)	(anos)	(anos)	(anos)	(anos)
1549	2	[2,3]	7	[4,22]	1	[1,2]	1	[1,1]
3645	25	[10,129]	278	[69,4200]	32	[12,173]	4	[2,13]
4165	50	[17,337]	692	[145,15138]	80	[24,638]	10	[3,41]
4468	75	[23,591]	1180	[219,32452]	136	[36,1351]	16	[5,81]
4682	100	[29,879]	1719	[293,56091]	198	[48,2304]	23	[7,135]

O método anterior não leva em conta a correlação existente entre células próximas. Portanto a seguir serão feitas algumas análises no que refere à sensibilidade na escolha da célula da série auxiliar. Uma forma pode ser tomando uma nova série auxiliar composta pela média das séries das 24 células mais próximas da célula escolhida. O valor médio das temperaturas da série escolhida é de 27.54 °C, portanto a sensibilidade foi testada comparando as duas distribuições (ajustadas com a série escolhida e a média das 24 células mais próximas) avaliadas para 28°C. O resultado é apresentado na Figura 5.2.5. Pode-se observar que, neste caso, tanto as distribuições como seus intervalos de confiança resultam ser similares. Outra forma de analisar a sensibilidade é como o ajuste individual de cada uma das 24 células mais próximas. Na Figura 5.2.6 pode-se observar a distribuição ajustada na célula escolhida e seus intervalos de confiança, e as distribuições ajustadas individualmente com cada uma das 24 células mais próximas, sempre avaliadas para 28°C. Neste caso as células mais afastadas em latitude se afastam da distribuição com a célula escolhida. As células apartadas em longitude ficam dentro do intervalo de confiança. Pode-se concluir que um análise utilizando médias de células é mais robusto do que análises com células isoladas.

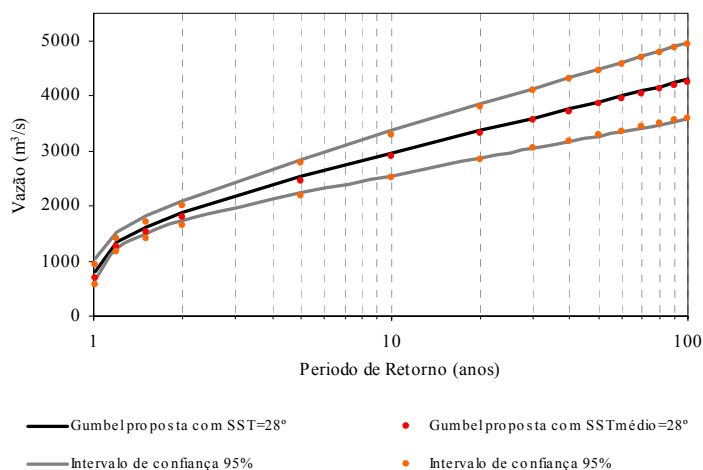


Figura 5.2.5. Ajuste da distribuição proposta, avaliada para 28°C, utilizando a séries auxiliares da célula escolhida e a série auxiliar feita da média das 24 células mais próximas.

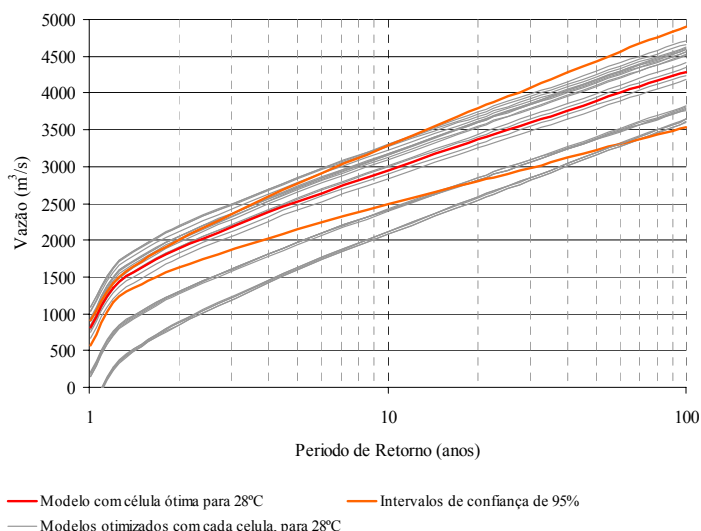


Figura 5.2.6. Distribuição ajustada e intervalos de confiança para 28°C na célula escolhida, e distribuições ajustadas individualmente nas 24 células mais próxima (sem incluir os intervalos de confiança).

Concluindo o capítulo, foi analisada a conveniência de utilizar a distribuição de Gumbel em lugar da GEV na bacia do Quaraí, utilizando um teste estatístico e critérios de incertezas na extrapolação da distribuição para determinar vazões extremas. Foi escolhida a distribuição de Gumbel. Além foi analisada a relação das vazões extremas com SST do oceano Pacífico, achando se que existem células de temperaturas medias mensais que no modelo de Gumbel proposto conseguem um melhor ajuste do modelo com uma confiança superior ao 95%. A distribuição de frequências com a série auxiliar

de SST, fixando uma vazão extrema, prognostica uma diminuição do período de retorno com um aumento da SST. Foi analisada a robustez de utilizar uma célula isolada em relação à média de células próximas, achando se resultados similares.

5.3 Resultados nas restantes bacias da região

5.3.1 Ajuste da distribuição de freqüências e intervalos de confiança dos parâmetros e das vazões.

Na Tabela 5.3.1 e Tabela 5.3.2 são apresentados os parâmetros das distribuições Gumbel e GEV, estimados mediante máxima verossimilhança, para as séries de vazões máximas anuais nas bacias estudadas. Também são apresentados os intervalos de confiança dos parâmetros determinados pelos dois métodos propostos.

Tabela 5.3.1. Parâmetros estimados, e intervalos de confiança de 95% da distribuição de Gumbel para as bacias estudadas.

Código da Bacia	$\hat{\mu}$	Intervalo de confiança		$\hat{\sigma}$	Intervalo de confiança	
	(m ³ /s)	(m ³ /s)		(m ³ /s)	(m ³ /s)	
		(1)	(2)		(1)	(2)
Quaraí	1278	[1065,1490]	[1113,1452]	740	[572,909]	[577,882]
76460000	438	[375,500]	[389,498]	189	[143,235]	[144,239]
76440000	760	[670,850]	[688,835]	316	[249,382]	[262,374]
76310000	1487	[1159,1815]	[1237,1804]	918	[664,1172]	[679,1161]
75600000	340	[273,407]	[290,401]	159	[107,211]	[118,192]
75185000	96	[80,113]	[83,112]	44	[31,56]	[35,51]
75155000	324	[285,363]	[293,357]	144	[113,174]	[113,177]
74900000	348	[314,382]	[322,381]	91	[68,114]	[74,104]
74750000	109	[93,125]	[95,124]	46	[34,58]	[37,54]
74700000	211	[180,242]	[186,238]	113	[91,136]	[99,127]
74600000	505	[451,558]	[463,552]	191	[151,231]	[160,220]
74470000	301	[255,347]	[265,342]	137	[102,172]	[106,165]
74460000	49	[42,56]	[44,56]	17	[12,22]	[13,21]
51.1	403	[308,499]	[330,495]	245	[171,319]	[175,305]

(1) Intervalos de confiança de 95% obtidos com a curvatura da superfície do logaritmo da função de máxima verossimilhança. (2) Intervalos de confiança de 95% obtidos com as técnicas de “bootstrap”.

Para escolher qual é a distribuição adequada para cada bacia é utilizada a função de Deviança e algumas observações práticas sobre os ajustes, as vazões extremas calculadas e incertezas relacionadas. A partir do valor do logaritmo da função de máxima verossimilhança foram calculadas as funções de Deviança apresentadas na Tabela 5.3.3.

Tabela 5.3.2. Parâmetros estimados, e intervalos de confiança de 95% da distribuição GEV para as bacias estudadas.

Código da Bacia	$\hat{\mu}$	Intervalo de confiança		$\hat{\sigma}$	Intervalo de confiança		$\hat{\xi}$	Intervalo de confiança	
	(m ³ /s)	(m ³ /s)		(m ³ /s)	(m ³ /s)		(m ³ /s)	(m ³ /s)	
		(1)	(2)		(1)	(2)		(1)	(2)
Quarai	1203	[994,1411]	[1051,1368]	671	[504,838]	[478,795]	0.201	[-0.03,0.432]	[0.053,0.459]
76460000	431	[367,494]	[385,491]	185	[138,231]	[135,224]	0.067	[-0.12,0.254]	[-0.317,0.305]
76440000	755	[661,848]	[684,848]	312	[244,381]	[263,365]	0.031	[-0.122,0.184]	[-0.294,0.169]
76310000	1418	[1085,1751]	[1158,1718]	862	[605,1118]	[634,1049]	0.144	[-0.128,0.416]	[-0.105,0.41]
75600000	333	[257,410]	[258,462]	153	[92,215]	[81,235]	0.083	[-0.421,0.587]	[-0.571,0.988]
75185000	100	[80,119]	[81,121]	46	[31,61]	[32,57]	-0.131	[-0.492,0.23]	[-0.443,0.227]
75155000	312	[273,352]	[284,348]	134	[104,164]	[110,158]	0.148	[-0.037,0.333]	[-0.065,0.294]
74900000	361	[326,397]	[335,394]	93	[68,117]	[72,108]	-0.259	[-0.435,-0.084]	[-0.652,-0.133]
74750000	111	[93,129]	[96,130]	47	[34,60]	[37,56]	-0.072	[-0.325,0.181]	[-0.485,0.127]
74700000	223	[188,257]	[193,256]	119	[94,144]	[102,135]	-0.189	[-0.386,0.009]	[-0.343,-0.068]
74600000	508	[450,565]	[457,563]	193	[151,235]	[158,225]	-0.029	[-0.234,0.175]	[-0.19,0.122]
74470000	297	[248,346]	[260,341]	134	[97,170]	[104,163]	0.058	[-0.195,0.311]	[-0.103,0.232]
74460000	50	[42,57]	[43,56]	17	[12,23]	[13,21]	-0.023	[-0.234,0.189]	[-0.322,0.252]
51.1	390	[290,490]	[311,510]	235	[158,311]	[129,320]	0.104	[-0.229,0.437]	[-0.224,0.74]

(1) Intervalos de confiança de 95% obtidos com a curvatura da superfície do logaritmo da função de máxima verossimilhança. (2) Intervalos de confiança de 95% obtidos com as técnicas de “bootstrap”.

Tabela 5.3.3. Valores de logaritmo da função de máxima verossimilhança dos ajustes com as distribuições Gumbel e GEV e funções de Deviança calculados a partir de eles.

Código da Bacia	ℓ		D
	Logaritmo da função de máxima verossimilhança		Função de Deviança
	Gumbel	GEV	
Quaraí	-296.55	-295.41	2.28
76460000	-266.63	-266.35	0.56
76440000	-381.42	-381.35	0.14
76310000	-278.52	-277.88	1.28
75600000	-160.00	-159.95	0.10
75185000	-155.08	-154.86	0.44
75155000	-369.20	-367.43	3.54
74900000	-186.64	-184.28	4.72
74750000	-183.48	-183.34	0.28
74700000	-364.08	-362.70	2.76
74600000	-375.60	-375.57	0.06
74470000	-240.97	-240.87	0.20
74460000	-114.86	-114.85	0.02
51.1	-199.01	-198.82	0.38

Pode se observar que somente na bacia 74900000 o valor da função de Deviança é maior a 3.84. O que indicaria que, com um nível de confiança superior ao 95%, a distribuição mais adequada aos dados é a distribuição GEV. Na Tabela 5.3.4, Tabela 5.3.5 e Tabela 5.3.6 são apresentadas as vazões e os intervalos de confiança calculados com todos os métodos propostos para 25, 50 e 100 anos de período de retorno. Nelas

pode-se observar que as vazões calculadas pelas duas distribuições têm pequenas diferenças, e que os intervalos de confiança da GEV são mais amplos.

No resto dos casos a amplitude do intervalo de confiança da distribuição GEV é sempre maior. Na Figura 5.3.1 pode se observar graficamente uma comparação das vazões, por unidade de área de bacia, para 50 e 100 anos de período de retorno geradas por ambas distribuições. O aumento das incertezas, também por unidade de área de bacia, geradas para 100 anos de período de retorno é apresentado na Figura 5.3.2, onde pode-se observar o aumento das incertezas do modelo de três parâmetros.

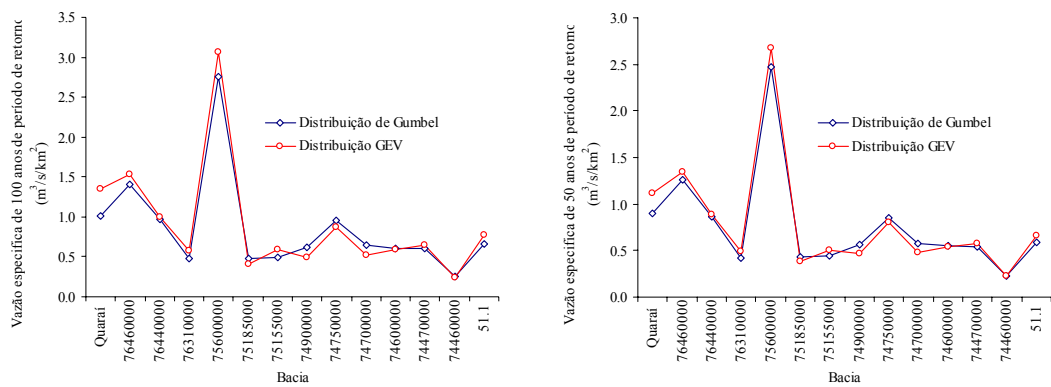


Figura 5.3.1. Vazão de 100 e 50 anos de período de retorno específica pela área da bacia para as bacias estudadas.

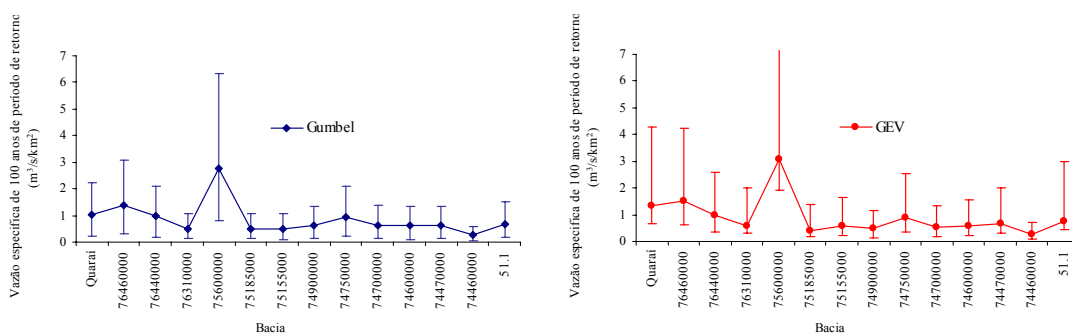


Figura 5.3.2. Vazão de 100 anos de período de retorno específica pela área da bacia e intervalo de confiança estimado pelo método curvatura da superfície do logaritmo da função de máxima verossimilhança para as distribuições Gumbel e GEV nas bacias estudadas.

Tabela 5.3.4. Vazões de 25 anos de período de retorno e intervalos de confiança de 95 % estimados pelas distribuições Gumbel e GEV para as bacias estudadas.

Distribuição Gumbel, Período de retorno de 25 anos.							
Código da Bacia	Valor central (m ³ /s)	Intervalos de confiança (1)	Largura (m ³ /s)	Intervalos de confiança (2)	Largura (m ³ /s)	Intervalos de confiança (3)	Largura (m ³ /s)
		(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)
Quaraí	3645	[2895,4397]	1502	[2959,4273]	1314	[3012,4218]	1206
76460000	1043	[832,1252]	420	[850,1262]	412	[883,1229]	346
76440000	1771	[1466,2072]	606	[1526,2031]	505	[1563,1990]	427
76310000	4423	[3283,5564]	2281	[3409,5517]	2108	[3488,5421]	1933
75600000	849	[615,1082]	467	[667,1015]	348	[681,1000]	319
75185000	237	[179,292]	113	[195,275]	80	[201,270]	69
75155000	785	[646,920]	274	[654,923]	269	[664,903]	239
74900000	639	[532,747]	215	[559,714]	155	[586,687]	101
74750000	256	[202,311]	109	[213,297]	84	[221,289]	68
74700000	572	[471,677]	206	[503,644]	141	[515,628]	113
74600000	1116	[934,1297]	363	[975,1256]	281	[998,1240]	242
74470000	739	[581,897]	316	[604,870]	266	[618,862]	244
74460000	103	[80,126]	46	[86,123]	37	[88,118]	30
51.1	1187	[855,1519]	664	[890,1471]	581	[919,1435]	516
Distribuição GEV, Período de retorno de 25 anos.							
Código da Bacia	Valor central (m ³ /s)	Intervalos de confiança (1)	Largura (m ³ /s)	Intervalos de confiança (2)	Largura (m ³ /s)	Intervalos de confiança (3)	Largura (m ³ /s)
		(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)
Quaraí	4214	[2531,7195]	4664	[2717,7155]	4438	[3435,5462]	2027
76460000	1091	[734,1634]	900	[656,1705]	1049	[825,1387]	562
76440000	1804	[1307,2507]	1200	[1229,2396]	1167	[1434,2142]	708
76310000	4920	[2673,9231]	6558	[2880,8655]	5775	[3498,6804]	3306
75600000	893	[419,2438]	2019	[377,5831]	5454	[733,2041]	1308
75185000	220	[130,407]	277	[136,389]	253	[187,261]	74
75155000	860	[587,1288]	701	[602,1187]	585	[670,1073]	403
74900000	563	[443,725]	282	[432,675]	243	[489,604]	115
74750000	245	[161,389]	228	[156,351]	195	[195,287]	92
74700000	509	[361,724]	363	[391,644]	253	[451,546]	95
74600000	1098	[790,1572]	782	[836,1443]	607	[973,1221]	248
74470000	768	[479,1277]	798	[543,1114]	571	[622,926]	304
74460000	102	[69,158]	89	[69,159]	90	[81,125]	44
51.1	1282	[648,2658]	2010	[687,3510]	2823	[1048,1863]	815

(1) Intervalos de confiança de 95% obtidos com a curvatura da superfície do logaritmo da função de máxima verossimilhança. (2) Intervalos de confiança de 95% obtidos com as técnicas de “bootstrap” nos parâmetros. (3) Intervalos de confiança de 95% obtidos com as técnicas de “bootstrap” nas vazões.

Tabela 5.3.5. Vazões de 50 anos de período de retorno e intervalos de confiança de 95 % estimados pelas distribuições Gumbel e GEV para as bacias estudadas.

Distribuição Gumbel, Período de retorno de 50 anos.							
Código da Bacia	Valor central (m ³ /s)	Intervalos de confiança	Largura	Intervalos de confiança	Largura	Intervalos de confiança	Largura
		(1)	(1)	(2)	(2)	(3)	(3)
		(m3/s)	(m3/s)	(m3/s)	(m3/s)	(m3/s)	(m3/s)
Quaraí	4165	[3297,5037]	1740	[3364,4894]	1530	[3413,4826]	1413
76460000	1175	[933,1417]	484	[951,1431]	480	[986,1397]	411
76440000	1993	[1642,2341]	699	[1710,2294]	584	[1755,2247]	492
76310000	5069	[3750,6388]	2638	[3886,6334]	2448	[3983,6235]	2252
75600000	960	[691,1230]	539	[750,1150]	400	[766,1129]	363
75185000	268	[201,332]	131	[220,311]	91	[227,306]	79
75155000	886	[726,1042]	316	[734,1048]	314	[743,1026]	283
74900000	703	[579,827]	248	[611,787]	176	[640,759]	119
74750000	288	[226,351]	125	[239,335]	96	[246,327]	81
74700000	652	[535,773]	238	[572,734]	162	[586,716]	130
74600000	1250	[1040,1459]	419	[1087,1410]	323	[1111,1392]	281
74470000	836	[653,1018]	365	[679,986]	307	[694,978]	284
74460000	115	[89,142]	53	[95,138]	43	[98,132]	34
51.1	1359	[975,1744]	769	[1013,1685]	672	[1044,1643]	599
Distribuição GEV, Período de retorno de 50 anos.							
Código da Bacia	Valor central (m ³ /s)	Intervalos de confiança	Largura	Intervalos de confiança	Largura	Intervalos de confiança	Largura
		(1)	(1)	(2)	(2)	(3)	(3)
		(m3/s)	(m3/s)	(m3/s)	(m3/s)	(m3/s)	(m3/s)
Quaraí	5178	[2850,9938]	7088	[3123,10020]	6897	[4048,7486]	3438
76460000	1256	[797,2035]	1238	[687,2171]	1484	[885,1709]	824
76440000	2049	[1419,3023]	1604	[1295,2865]	1570	[1524,2550]	1026
76310000	5931	[2943,12687]	9744	[3188,11829]	8641	[3948,9171]	5223
75600000	1038	[433,3662]	3229	[385,11459]	11074	[784,3944]	3160
75185000	241	[134,504]	370	[140,479]	339	[197,314]	117
75155000	1020	[651,1665]	1014	[663,1503]	840	[743,1358]	615
74900000	589	[454,786]	332	[437,723]	286	[499,636]	137
74750000	271	[168,469]	301	[161,413]	252	[202,331]	129
74700000	551	[378,829]	451	[412,719]	307	[479,601]	122
74600000	1220	[836,1880]	1044	[892,1687]	795	[1058,1401]	343
74470000	884	[513,1639]	1126	[594,1376]	782	[695,1120]	425
74460000	113	[73,190]	117	[72,195]	123	[84,150]	66
51.1	1521	[698,3694]	2996	[747,5425]	4678	[1165,2808]	1643

(1) Intervalos de confiança de 95% obtidos com a curvatura da superfície do logaritmo da função de máxima verossimilhança. (2) Intervalos de confiança de 95% obtidos com as técnicas de “bootstrap” nos parâmetros. (3) Intervalos de confiança de 95% obtidos com as técnicas de “bootstrap” nas vazões.

Tabela 5.3.6. Vazões de 100 anos de período de retorno e intervalos de confiança de 95 % estimados pelas distribuições Gumbel e GEV para as bacias estudadas.

Distribuição Gumbel, Período de retorno de 100 anos.							
Código da Bacia	Valor central (m ³ /s)	Intervalos de confiança	Largura	Intervalos de confiança	Largura	Intervalos de confiança	Largura
		(1)		(2)		(3)	
		(m3/s)	(m3/s)	(m3/s)	(m3/s)	(m3/s)	(m3/s)
Quaraí	4682	[3696,5672]	1976	[3767,5509]	1742	[3811,5440]	1629
76460000	1307	[1033,1581]	548	[1051,1597]	546	[1085,1563]	478
76440000	2214	[1815,2607]	792	[1893,2555]	662	[1940,2506]	566
76310000	5710	[4213,7206]	2993	[4361,7145]	2784	[4460,7049]	2589
75600000	1071	[765,1378]	613	[833,1284]	451	[849,1262]	413
75185000	298	[223,371]	148	[244,347]	103	[252,341]	89
75155000	986	[805,1163]	358	[813,1171]	358	[824,1148]	324
74900000	767	[627,906]	279	[662,859]	197	[693,832]	139
74750000	321	[249,392]	143	[265,372]	107	[272,364]	92
74700000	731	[599,868]	269	[641,822]	181	[654,805]	151
74600000	1384	[1146,1621]	475	[1199,1564]	365	[1222,1543]	321
74470000	931	[724,1138]	414	[753,1101]	348	[770,1093]	323
74460000	127	[97,157]	60	[104,153]	49	[107,147]	40
51.1	1530	[1095,1966]	871	[1135,1898]	763	[1167,1854]	687
Distribuição GEV, Período de retorno de 100 anos.							
Código da Bacia	Valor central (m ³ /s)	Intervalos de confiança	Largura	Intervalos de confiança	Largura	Intervalos de confiança	Largura
		(1)		(2)		(3)	
		(m3/s)	(m3/s)	(m3/s)	(m3/s)	(m3/s)	(m3/s)
Quaraí	[3160,13623]	10463	[3541,13943]	10402	[4704,10219]	5515	[3160,13623]
76460000	[855,2510]	1655	[712,2744]	2032	[929,2095]	1166	[855,2510]
76440000	[1520,3605]	2085	[1347,3388]	2041	[1601,2996]	1395	[1520,3605]
76310000	[3188,17279]	14091	[3471,16029]	12558	[4309,12139]	7830	[3188,17279]
75600000	[444,5495]	5051	[390,22619]	22229	[820,7436]	6616	[444,5495]
75185000	[136,618]	482	[144,583]	439	[205,382]	177	[136,618]
75155000	[713,2138]	1425	[721,1889]	1168	[813,1698]	885	[713,2138]
74900000	[461,843]	382	[440,766]	326	[506,669]	163	[461,843]
74750000	[174,560]	386	[164,480]	316	[206,380]	174	[174,560]
74700000	[390,933]	543	[429,789]	360	[503,657]	154	[390,933]
74600000	[875,2226]	1351	[942,1951]	1009	[1135,1608]	473	[875,2226]
74470000	[543,2085]	1542	[641,1681]	1040	[758,1349]	591	[543,2085]
74460000	[76,226]	150	[74,238]	164	[88,179]	91	[76,226]
51.1	[739,5091]	4352	[802,8358]	7556	[1298,4228]	2930	[739,5091]

(1) Intervalos de confiança de 95% obtidos com a curvatura da superfície do logaritmo da função de máxima verossimilhança. (2) Intervalos de confiança de 95% obtidos com as técnicas de “bootstrap” nos parâmetros. (3) Intervalos de confiança de 95% obtidos com as técnicas de “bootstrap” nas vazões.

De forma geral pode-se dizer que para os ajustes com a distribuição de Gumbel, pode se observar que para 10 das 14 bacias os intervalos de confiança nas vazões, que produzem os intervalos de confiança nos parâmetros feitos pelos dois métodos, são muito similares, e, em geral todos são da mesma ordem. No caso da distribuição GEV são 10 as bacias em que os intervalos de confiança pelos dois métodos são da mesma ordem, mais casos como a bacia 75600000 em que os intervalos resultam muito distintos.

Os intervalos de confiança estimados pela metodologia de bootstrap diretamente nas vazões podem ser observados nas Tabela 5.3.4, Tabela 5.3.5 e Tabela 5.3.6. Pode-se observar que no caso da distribuição Gumbel os intervalos de confiança estimados pelos duas metodologias de bootstrap propostas são similares, mais no caso da distribuição GEV eles são sempre mais estreitos. Isto pode-se dever à não linearidade ou ao fato de ter um parâmetro a mais.

Finalmente, a comparação visual dos ajustes das duas distribuições, e os intervalos de confiança obtidos como as metodologias propostas podem-se observar no Anexo 1.

5.3.2 Ajuste da distribuição de frequências e intervalos de confiança dos parâmetros e das vazões, utilizando séries auxiliares de temperatura de superfície do oceano.

Na Tabela 5.3.7 são apresentados os parâmetros estimados, e seus intervalos de confiança de 95%, para o modelo proposto a partir da distribuição de Gumbel na célula da região de interesse que apresentou o maior valor de máxima verossimilhança. Na Tabela 5.3.8 são apresentados os valores das funções de máxima verossimilhança do modelo proposto e de Gumbel, da função de Deviança e a localização da célula ótima.

Tabela 5.3.7. Parâmetros estimados para o modelo proposto a partir da distribuição de Gumbel e intervalos de confiança de 95% na célula ótima.

Código da Bacia	\hat{a}	Intervalo de confiança		\hat{b}	Intervalo de confiança		$\hat{\sigma}$	Intervalo de confiança	
	(m ³ /s)	(m ³ /s)		(m ³ /s)	(m ³ /s)		(m ³ /s)	(m ³ /s)	
		(1)	(2)		(1)	(2)		(1)	(2)
Quaraí	-15515	[-21615,-9415]	[-20418,-12574]	614	[392,836]	[507,795]	568	[416,720]	[423,678]
76460000	-3405	[-4925,-1886]	[-4322,-2384]	140	[85,194]	[103,173]	151	[112,189]	[115,193]
76440000	-10407	[-15663,-5150]	[-13422,-6762]	417	[221,613]	[281,528]	264	[205,322]	[200,325]
76310000	-39080	[-56848,-21312]	[-53954,-26010]	1438	[810,2066]	[976,1969]	716	[516,915]	[517,895]
75600000	13994	[5925,22064]	[6819,21731]	-494	[-786,-202]	[-773,-236]	135	[95,176]	[92,151]
75185000	-1378	[-1936,-820]	[-1720,-980]	54	[34,75]	[40,67]	33	[24,43]	[26,38]
75155000	-1352	[-2337,-366]	[-2237,-612]	63	[26,99]	[35,95]	132	[104,160]	[100,163]
74900000	11062	[4886,17239]	[3630,16078]	-374	[-589,-158]	[-548,-114]	75	[54,96]	[58,85]
74750000	-721	[-1272,-171]	[-1440,-218]	30	[10,50]	[12,56]	42	[31,52]	[31,48]
74700000	-4891	[-7420,-2363]	[-6891,-2937]	201	[101,300]	[125,280]	102	[82,122]	[84,115]
74600000	-18868	[-28951,-8784]	[-27878,-9907]	676	[324,1028]	[363,991]	174	[139,209]	[145,196]
74470000	-4186	[-6278,-2094]	[-5761,-2088]	167	[89,245]	[89,226]	113	[85,142]	[84,134]
74460000	-422	[-714,-131]	[-678,-178]	17	[6,27]	[8,26]	14	[10,19]	[10,17]
51.1	-16321	[-21963,-10679]	[-23159,-11281]	574	[381,767]	[402,807]	181	[128,235]	[120,220]

(1) Intervalos de confiança de 95% obtidos com a curvatura da superfície do logaritmo da função de máxima verossimilhança. (2) Intervalos de confiança de 95% obtidos com as técnicas de “bootstrap”.

Da mesma forma que todos os casos anteriores o intervalo de confiança dos parâmetros, obtido mediante as técnicas de bootstrap é mais estreito que o obtido mediante a técnica da curvatura da superfície do logaritmo da função de máxima verossimilhança. Somente duas bacias apresentam um valor estimado do parâmetro b negativo, o que significa que nessas bacias o parâmetro de posição diminui com o aumento da temperatura de superfície do oceano, ou seja, que fixando um período de retorno, as vazões diminuem com o aumento da temperatura do oceano.

Segundo a função de Deviança, em todas as bacias é significante $\text{supor } b \neq 0$, ou seja, que o novo modelo é mais adequado aos dados. No Anexo 2 são apresentados, para cada bacia, figuras com os valores da função de Deviança em relação ao Gumbel de cada célula da região do oceano interesse (região que segundo os autores apresenta relações entre as precipitações e vazões). Nelas pode-se observar que apesar de todas as bacias apresentar significância de $\text{supor } b \neq 0$, nem sempre as regiões são similares. Para todas as bacias foi escolhida a mesma escala gráfica de cores para a função de Deviança.

Tabela 5.3.8. Valores das funções de máxima verossimilhança para as distribuições Gumbel com e sem série auxiliar, função de Deviança e localização da célula ótima.

Código da Bacia	ℓ	ℓ	Deviança	longitude	latitude
	Gumbel	Modelo proposto			
76460000	-266.63	-259.19	14.88	95°O	2°N
76440000	-381.42	-374.72	13.4	99°O	8°S
76310000	-278.52	-270.68	15.68	137°O	6°N
75600000	-160.00	-156.66	6.68	149°O	14°N
75185000	-155.08	-147.36	15.44	105°O	4°S
75155000	-369.20	-364.54	9.32	119°O	0°S
74900000	-186.64	-181.97	9.34	79°O	8°N
74750000	-183.48	-179.8	7.36	123°O	2°N
74700000	-364.08	-358.15	11.86	99°O	12°S
74600000	-375.60	-368.75	13.7	83°O	10°N
74470000	-240.97	-233.76	14.42	83°O	2°N
74460000	-114.86	-110.49	8.74	149°O	4°N
84	-296.55	-287.25	18.6	107°O	2°N
51.1	-199.01	-189.93	18.16	89°O	6°N

A relação entre as temperaturas de oceano da célula escolhida, e os períodos de retorno das vazões é explorada na Tabela 5.3.9. Nela apresentam-se as vazões para 100 anos de período de retorno calculadas segundo a distribuição de Gumbel antes ajustada, e com a distribuição proposta em distintas temperaturas de superfície do oceano da célula escolhida. Pode se observar que na maioria das bacias a vazão de 100 anos de período de retorno aumenta com o aumento da temperatura do oceano. Somente em aquelas dois que o valor de b resulta ser negativo a relação é a contrária.

Na Tabela 5.3.9 são apresentados também os intervalos de confiança das vazões calculadas com a metodologia de bootstrap diretamente nas vazões. Da mesma forma como ocorrido na bacia do Quaraí, não foi possível calcular o intervalo de confiança das vazões a partir do intervalo de confiança dos parâmetros já que o resultado é absurdo.

A sensibilidade na escolha da célula ótima para cada bacia pode ser observada no Anexo 3, onde são apresentadas para cada bacia as distribuições ajustadas com a célula ótima e a distribuição ajustada como uma série auxiliar composta pela média das 24 células mais próximas. Nela pode-se observar que para varias bacias o resultado é diferente. Isto é devido a que a metodologia proposta para isto não é o suficientemente robusta.

Tabela 5.3.9. Períodos de retorno de vazões de 100 anos segundo a distribuição de Gumbel calculados mediante a nova distribuição para diferentes temperaturas do oceano da célula escolhida.

Código da Bacia	Distribuição de Gumbel		Distribuição proposta com diferentes temperaturas médias de superfície do oceano					
			26°		28°		30°	
	Vazão (m ³ /s)	Intervalo de confiança de 95% (m ³ /s)	Vazão (m ³ /s)	Intervalo de confiança de 95% (m ³ /s)	Vazão (m ³ /s)	Intervalo de confiança de 95% (m ³ /s)	Vazão (m ³ /s)	Intervalo de confiança de 95% (m ³ /s)
Quaraí	4682	[3811,5440]	3062	[2310,3607]	4290	[3559,4923]	5518	[4704,6291]
76460000	1307	[1085,1563]	930	[719,1145]	1210	[1001,1425]	1490	[1267,1734]
76440000	2214	[1940,2506]	1649	[1286,2041]	2483	[2160,2783]	3317	[2844,3704]
76310000	5710	[4460,7049]	1602	[186,2882]	4478	[3467,5437]	7354	[5884,8910]
75600000	1071	[849,1262]	1771	[1264,2169]	783	[555,878]	*	*
75185000	298	[252,341]	178	[141,223]	286	[252,325]	394	[346,450]
75155000	986	[824,1148]	893	[726,1036]	1019	[839,1186]	1145	[933,1351]
74900000	767	[693,832]	1683	[1016,2142]	935	[767,1053]	187	[*,563]
74750000	321	[272,364]	252	[178,298]	312	[267,348]	372	[310,433]
74700000	731	[654,805]	804	[713,866]	1206	[1009,1394]	1608	[1258,1954]
74600000	1384	[1222,1543]	*	*	860	[603,1076]	2212	[1743,2660]
74470000	931	[770,1093]	676	[528,809]	1010	[841,1142]	1344	[1048,1553]
74460000	127	[107,147]	84	[44,102]	118	[88,127]	152	[118,167]
51.1	1530	[1167,1854]	*	*	584	[109,858]	1732	[1405,2010]

Concluindo o capítulo se pode dizer que foi aplicada a mesma metodologia que em 5.2 para as restantes bacias da região. Com os mesmos critérios para a eleição da distribuição, Gumbel foi achada satisfatória para 13 das 14 bacias estudadas. Os intervalos de confiança das vazões podem ser determinados com qualquer dos métodos pospostos. Para todas as bacias foi achada uma célula do oceano Pacífico onde o teste aplicado conclui que com uma significância superior ao 95% a distribuição proposta consegue um melhor ajuste dos dados. Em 12 das 14 bacias, a distribuição de frequências com a série auxiliar de SST, fixando uma vazão extrema, prognostica uma diminuição do período de retorno com um aumento da SST. Este resultado é coerente com as relações descritas na revisão bibliográfica onde um aumento das temperaturas do oceano Pacífico esta associada a aumentos das precipitações na região estudada. Em 4 bacias estudadas uma serie formada por a média das 25 células próximas à escolhida apresentam resultados distintos.

6 Conclusões e recomendações.

Na presente dissertação foram analisados os ajustes, por meio de máxima verossimilhança, de distribuições de frequências GEV e Gumbel em 14 bacias do médio rio Uruguai. Foram escolhidas as distribuições mais convenientes utilizando testes estatísticos e critérios de aumento de incertezas na extrapolação ao agregar graus de liberdade ao modelo. Diversas metodologias para estimar intervalos de confiança dos parâmetros e das vazões foram analisadas. Estes intervalos de confiança representam as incertezas do modelo e as estimações dos parâmetros enquanto a representatividade da série (amostra). Finalmente a partir de um modelo estatístico baseado na distribuição de Gumbel, com uma dependência linear do parâmetro de posição como séries auxiliares de temperatura média anual do oceano Pacífico, foram analisadas e quantificadas relações entre períodos de retorno de vazões extremas e variabilidade climática das temperaturas de superfície do oceano. Além disto, foram desenvolvidas metodologias para estimar intervalos de confiança do novo modelo proposto. Conclusões e recomendações para futuros trabalhos são apresentadas a seguir.

6.1 Conclusões

As séries de vazão máxima anual da maioria das bacias da região podem ser ajustadas utilizando a distribuição de Gumbel. Isso tem a vantagem de que o fato de ter um parâmetro a menos da GEV o que diminui as incertezas na extrapolação. A estimação de vazões de alto período de retorno e seus intervalos de confiança, utilizando a distribuição Gumbel, fica dentro do intervalo de confiança da mesma estimação utilizando a distribuição GEV.

Podem-se utilizar quaisquer dos métodos propostos para calcular o intervalo de confiança de vazões extremas utilizando a distribuição de Gumbel, já que resultados utilizando os três métodos propostos foram da mesma ordem. O método de bootstrap utilizado tem a vantagem de não supor distribuição das gerações enquanto que o método da curvatura da superfície do logaritmo da função de máxima verossimilhança supõe a

sua normalidade. Além disso o método de bootstrap aplicado diretamente nas vazões foi o único capaz de calcular os intervalos de confiança do modelo proposto com séries auxiliares de temperatura de oceano.

Existe uma região do oceano cujas séries de temperaturas de superfície conseguem valores com significância superior ao 95% de supor que o modelo proposto é um melhor ajuste aos dados de vazão máxima anual. Além disso, esta região apresenta resultados coerentes com outros autores (Ropelewsky & Halpert (1987), Pisciotano et al (1994), Mechoso & Iribarren (1992), Diaz et. al. (1998), Camilloni & Barros (2003), Grimm et al. (2000)) de que existe uma relação positiva entre o aumento das vazões e precipitações na região da Bacia do Prata com o aumento das temperaturas de superfície do oceano na região. A relação é quantificada quanto aos períodos de retorno, mas o método utilizado não tem a robustez necessária para assegurar a confiabilidade desse valor.

Levando em conta as seguintes questões:

1. A formação de uma enchente em bacias do tamanho das estudadas é um processo complexo que geralmente necessita de: 1) precipitações prolongadas e uniformemente distribuídas na área da bacia, e 2) condições antecedentes de umidade do solo favoráveis.
2. O ciclo anual de precipitações na região não apresenta épocas chuvosas, sendo para qualquer mês do ano o valor do desvio padrão próximo ao valor da média (Figura 4.1.3 e Diaz (1997)).
3. As condições de umidade do solo favoráveis à formação de enchentes são mais prováveis de ocorrer no inverno, já que o ciclo anual de evapotranspirações e estável e apresenta um mínimo nos meses de inverno.
4. Os meses onde é mais clara a teleconexão do ENSO (e as anomalias positivas de precipitação) com as precipitações na região são na primavera – verão (Ropelewsky & Halpert (1987), Pisciotano (1994), Diaz et al. (1997), Grimm et al.(2000) e Grimm & Natori (2006)), e segundo Pisciotano (1994) e Diaz et al. (1997)), mas podem existir outros mecanismos físicos de formação de precipitações que geram anomalias não diretamente relacionados ao ENSO.

Pode-se concluir que os resultados da presente dissertação são apenas uma quantificação (com baixo grau de precisão) do aumento da probabilidade de ocorrer enchentes quando um episódio do ENSO ocorrer.

O modelo proposto utilizando as séries auxiliares de temperatura de oceano agrega um parâmetro, mas o intervalo de confiança não aumenta nas proporções do que aumenta ao agregar um parâmetro para passar de Gumbel a GEV.

6.2 *Recomendações*

Seria necessário complementar o estudo de relações entre vazões extremas na Bacia do médio rio Uruguai e temperatura de superfície de oceano com uma análise mais robusta, por exemplo, utilizando Componentes Principais. A partir de uma análise mais robusta poderia ser mais confiável a quantificação da relação.

Levando em conta os resultados da influencia do oceano Atlântico com as anomalias de precipitações na região de estudo (Pisciotoano (1994), Diaz et al. (1997), Grimm et al.(2000) e Grimm & Natori (2006)) o estudo deveria ser estendido considerando as SST dois dos oceanos, juntas e por separado.

O estudo poderia ser ampliado considerando valores mensais ou considerando séries com mais de um valor anual de vazão máxima. Poderiam ser explorados distintos “lags” entre temperaturas de superfície de oceano e ocorrência das vazões extremas.

Um estudo similar aumentando a robustez do método poderia ser utilizado para análises de aumento de vazões extremas frente a mudanças climáticas, por exemplo, a partir de resultados de modelos em futuros cenários como os apresentados por Grimm & Natori (2006).

7 Referencias bibliográficas.

AHRENS DONALD (2002). *Meteorology Today*. Brooks/Cole Pub. Co. ISBN 0534397719.

BAUTISTA E. A., ZOCCHI S. S. & ANGELOCCI L.R. (2004). A distribuição generalizada de valores extremos aplicada ao ajuste dos dados de velocidade máxima do vento em Piracicaba, São Paulo, Brasil. *Rev. Mat. Estat., São Paulo*, v.22, n.1, p.95-111.

BEIJO L. A., MUNIZ J. A., NETO C. P. (2005). Tempo de retorno das precipitações máximas em Lavras (MG) pela distribuição de valores extremos do tipo I. *Ciênc. agrotec., Lavras*, v. 29, n. 3, p. 657-667.

CAMILLONI A. I., V. R. BARROS (2003) “Extreme discharge events in the Paraná River and their climate forcing”. *Journal of Hydrology* 278 94-106.

COLES, S. (2001). *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*. Editora Springer-Verlag, London. ISBN 1-85233-459-2

DA SILVA B. & CLARKE R. T., (2004) Análise estatística de chuvas intensas na bacia do rio São Francisco, *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.19, n.3, 265-272,

DIAZ A. F., C. D. STUDZINSKI, & C. R. MECHOSO (1998) Relationships between Precipitation Anomalies in Uruguay and Southern Brazil and Sea Surface Temperature in the Pacific and Atlantic Oceans. *Journal of Climate: Vol. 11, No. 2* pp. 251–271

EFRON, B., R. J. TIBSHIRANI (1998). *An Introduction to the Bootstrap*. Chapman & Hall / CRC. ISBN 0-412-04231-2

FILL H. D. (1994) Improving Flood Quantile estimates using regional information. Tese de Doutorado apresentada na Faculty of the Graduate School of Cornell University,

GREENWOOD, J. A., LANDWEHR, J. M., MATALAS, N. C., & WALLIS, J. R. (1979). Probability weighted moments: Definition and relation to parameters of several distributions expressible in inverse form. *Water Resources Research*, 15, 1049-54.

GRIMM A. M., BARROS V. R. & DOYLE M. E. (2000). Climate Variability in Southern South America Associated with El Niño and La Niña Events. *Journal of Climate*. Vol. 13, 35-58.

GRIMM A. M & NATORI A. A. (2006). Climate change and interannual variability of precipitation in South America. *Geophysical Research Letters*, Vol. 33, L19706, doi:10.1029/2006GL026821.

GUIMARÃES M. & NAGHETTINI M. (1998) Análise regional de frequência e distribuição temporal das tempestades na região metropolitana de Belo Horizonte - RMBH *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* Volume 3 - nº 4

HOSKING, J. R. M., & J. R. WALLIS (1997). *Regional Frequency Analysis, an approach based on l-moments*. Cambridge University Press, New York ISBN 0-521-43045-3

MECHOSO C. R., G. P. IRIBARREN (1992). Streamflow in Southeastern South America and the Southern Oscillation. *Journal of Climate*, Vol. 5 No. 12.

PIRES, C. L. F., 1994, Regionalização de Precipitações Máximas Diárias em uma Região no Vale do Paraíba do Sul Utilizando Momentos-L, Tese de Mestrado, Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.

PISCIOTTANO, G., A. DÍAZ, G. CAZESS, & C. R. MECHOSO. El Niño-Southern Oscillation Impact on Rainfall in Uruguay. *Journal of Climate*, Volume 7, Issue 8 (August 1994)

RAMESH N. I., A. C. DAVISON (2002). Local models for exploratory analysis of hydrological extremes. *Journal of Hydrology* 256 (2002) 106-119

ROCHA DA SILVA, V. (2006) Modelagem Condicional de Valores Extremos Multivariados, Uma Aplicação no Cálculo de Vazão de Rios em Porto Rico. Tese de Mestrado, apresentada ao Programa de Pós-graduação em Estatística do Instituto de Matemática da UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.

ROPELEWSKI C. F. & HALPERT M. S. (1987). Global and Regional Scale Precipitation Patterns Associated with the El Niño/Southern Oscillation. *Monthly Weather Review*. Vol. 115, 1606-1626.

SMITH, R. L. (2001). Environmental Statistics. Curso de estatística do Department of Statistics, University of North Carolina, disponível no endereço <http://www.stat.unc.edu/postscript/rs/envnotes.ps>

SMITH, T. M., R. W. REYNOLDS, (2002). Extended reconstruction of global seas surface temperatures based on COADS data 1854-1997. *Journal of Climate*, 16, 1495-1510.

TRENBERTH K. E. (1997). The Definition of El Niño. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 78, No. 12, 2771-2777.

TUCCI C. E. M. (1993). Hidrologia ciência e aplicação. EDUSP / Editora da Universidade. ABRH.

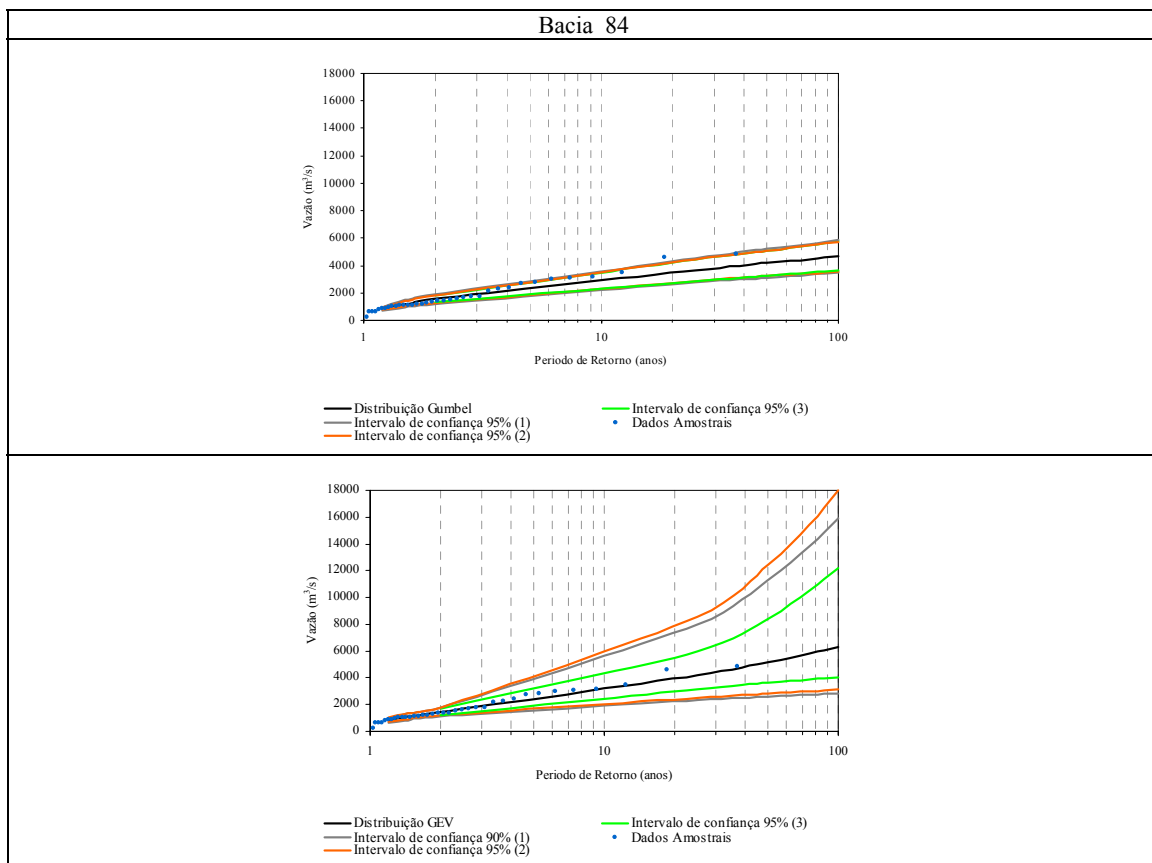
TUCCI C. E. M., A. O. N. VILLANUEVA, (2001). "Flood conflicts, and control measures in União da Vitoria and Porto União." Urban drainage in specific climates, Volume I. IHP-V Technical Documents in Hydrology, UNESCO, Paris, 2001. 200-204

VARGAS F. P. (2005). Técnica bootstrap aplicada à avaliação de incertezas estatísticas na análise de extremos. Tese de Mestrado, Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.

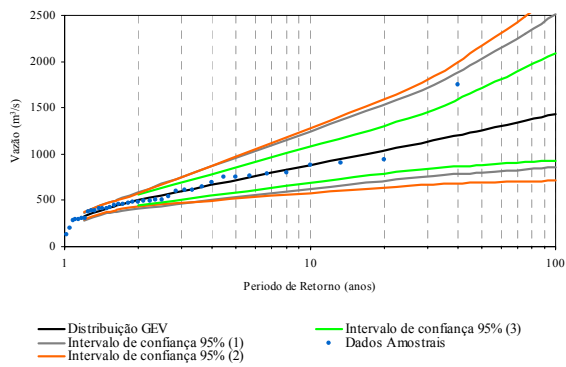
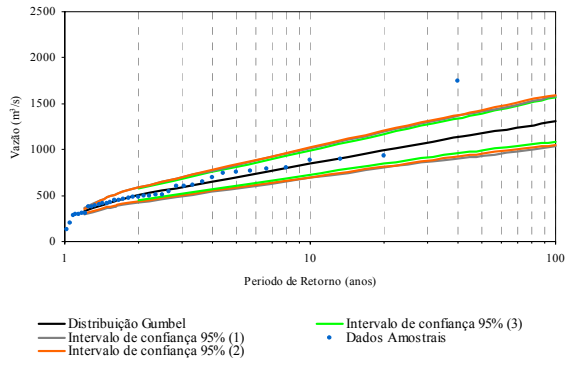
Anexo 1, Ajustes das distribuições Gumbel e GEV, com intervalos de confiança de 95% aos dados de vazão máxima anual das bacias estudadas.

Para todos os casos

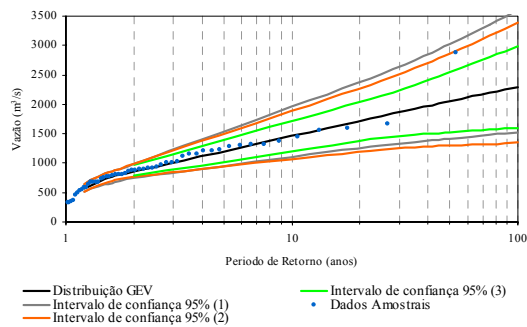
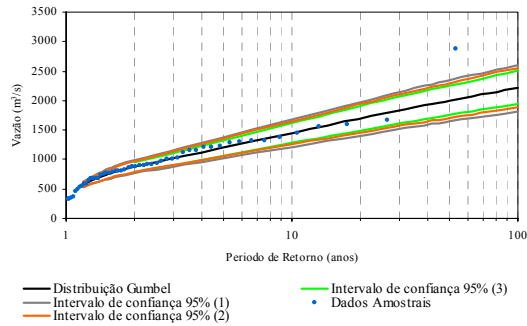
- (1) Intervalos de confiança de 95% obtidos com a curvatura da superfície do logaritmo da função de máxima verossimilhança.
- (2) Intervalos de confiança de 95% obtidos com as técnicas de “bootstrap” nos parâmetros.
- (3) Intervalos de confiança de 95% obtidos com as técnicas de “bootstrap” nas vazões.



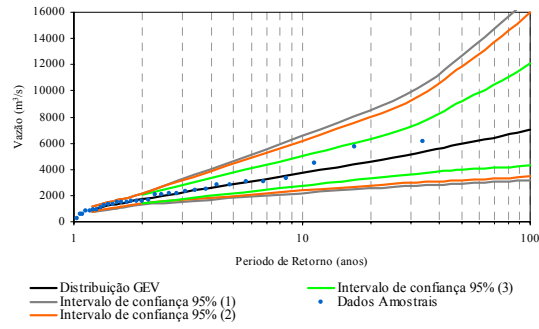
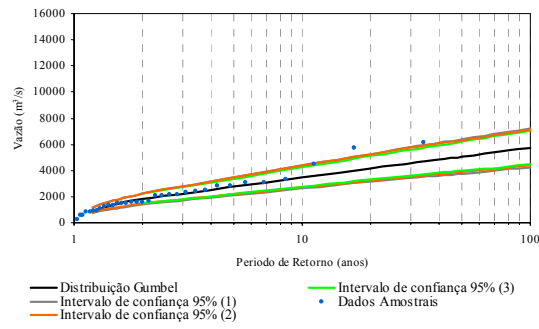
Bacia 76460000



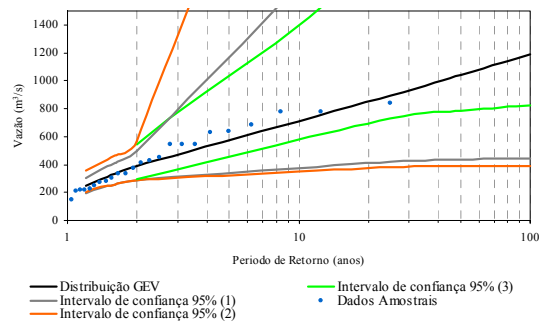
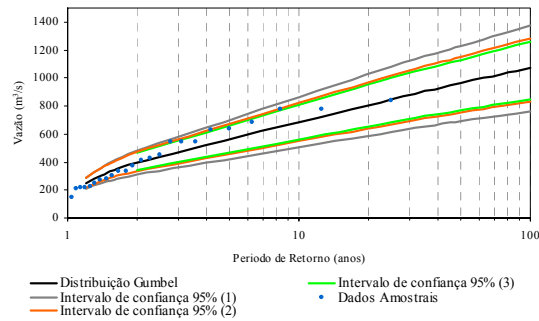
Bacia 76440000



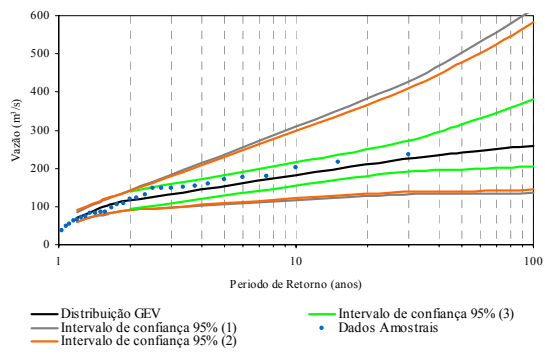
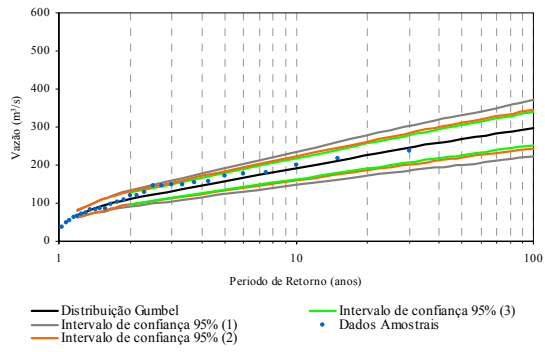
Bacia 76310000



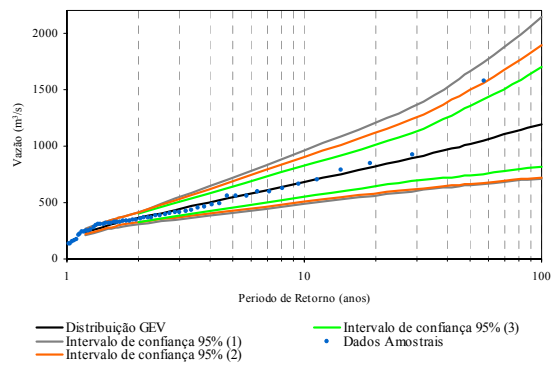
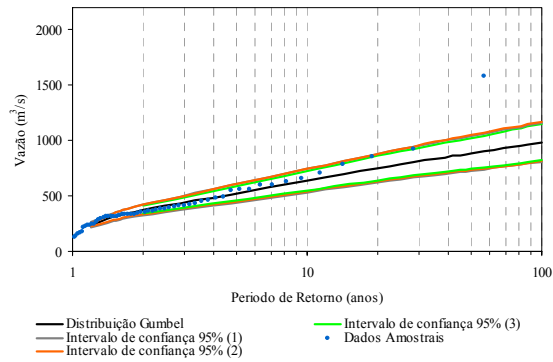
Bacia 75600000



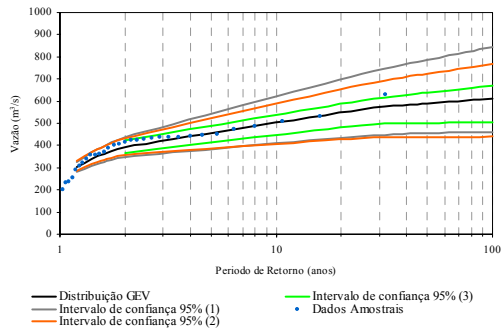
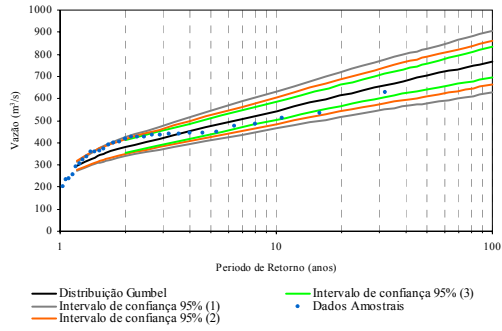
Bacia 75185000



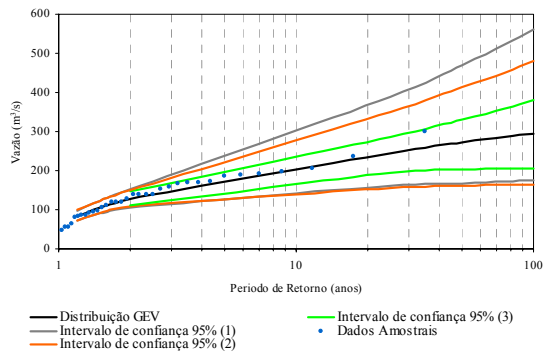
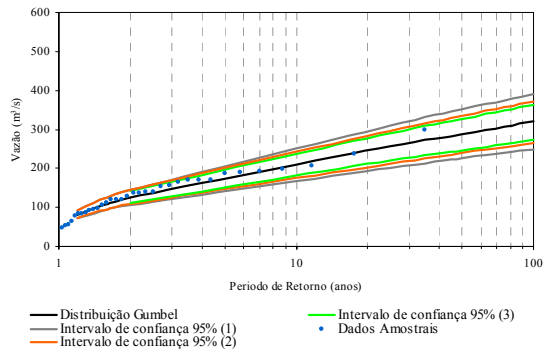
Bacia 75155000



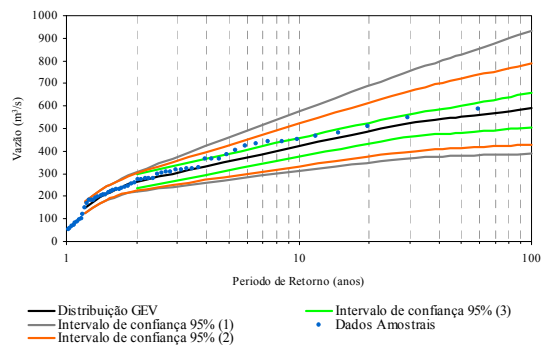
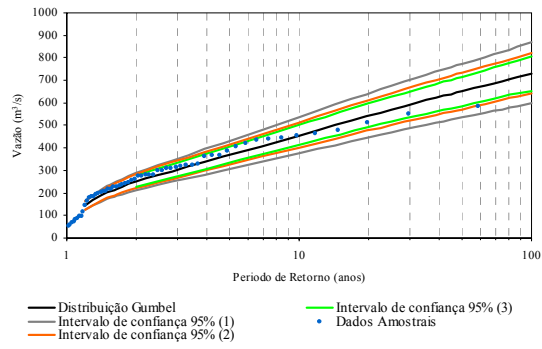
Bacia 74900000



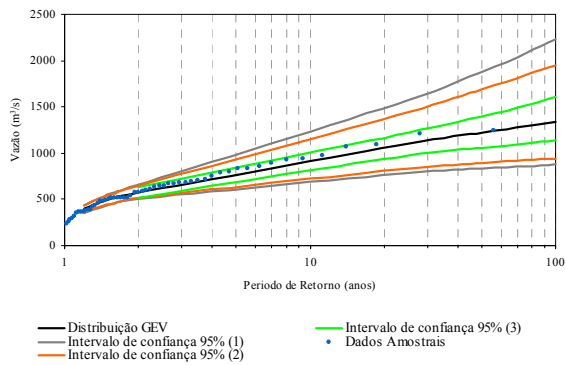
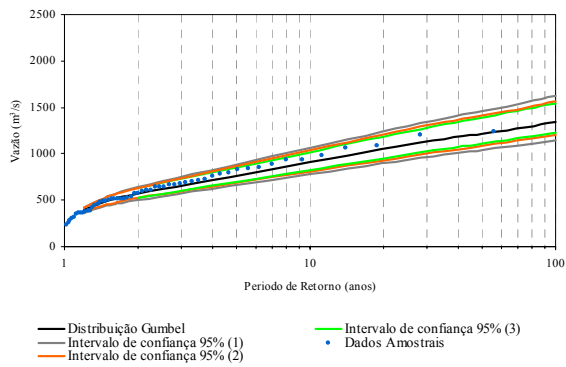
Bacia 74750000



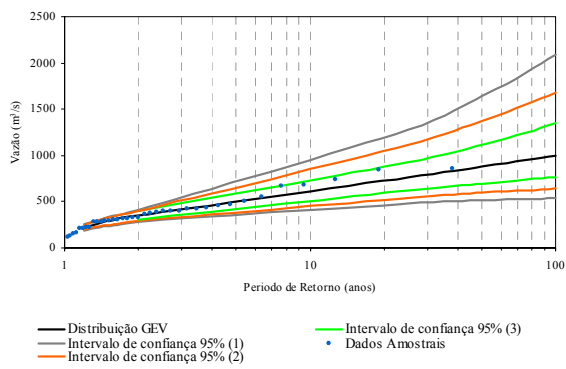
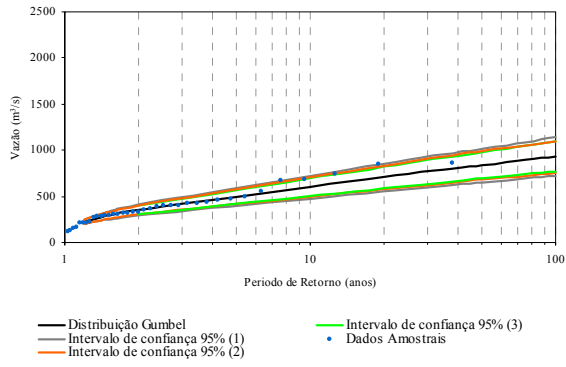
Bacia 74700000



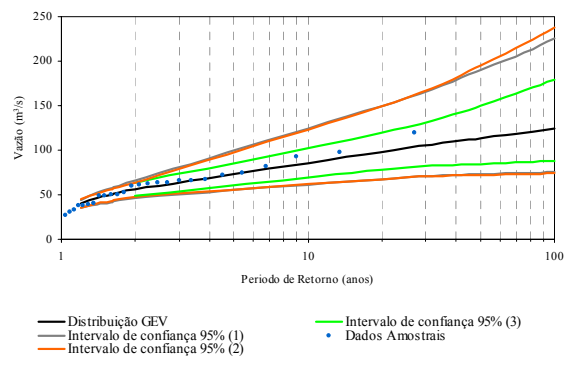
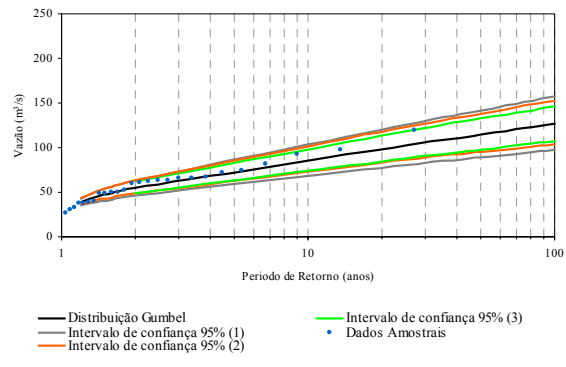
Bacia 74600000



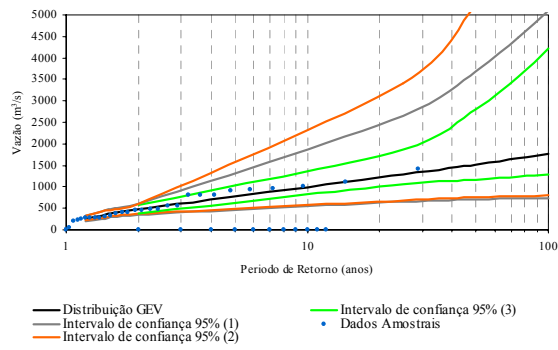
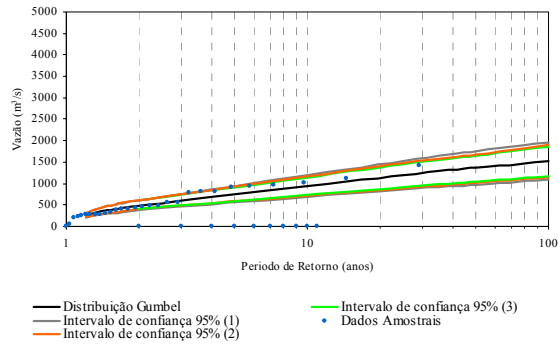
Bacia 74470000



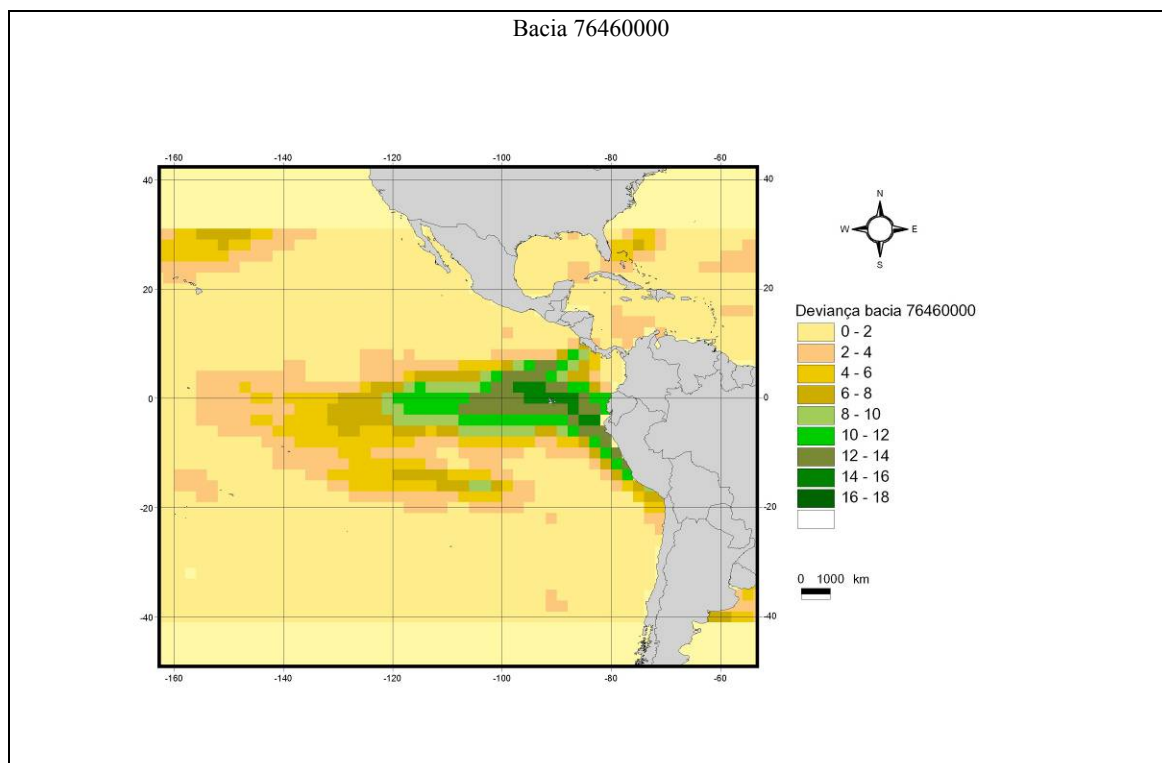
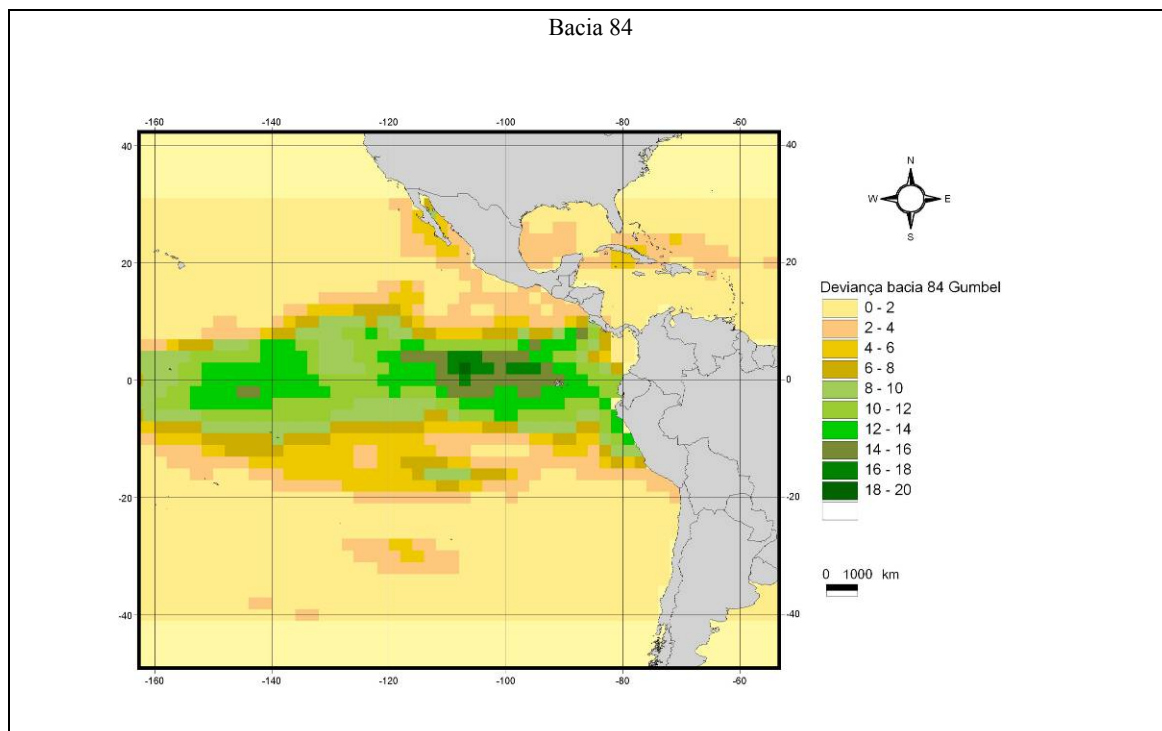
Bacia 74460000



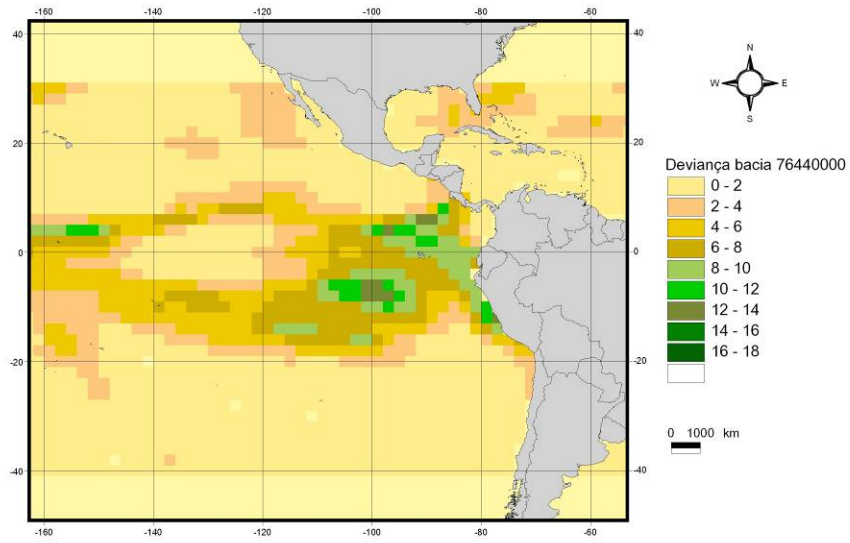
Bacia 51.1



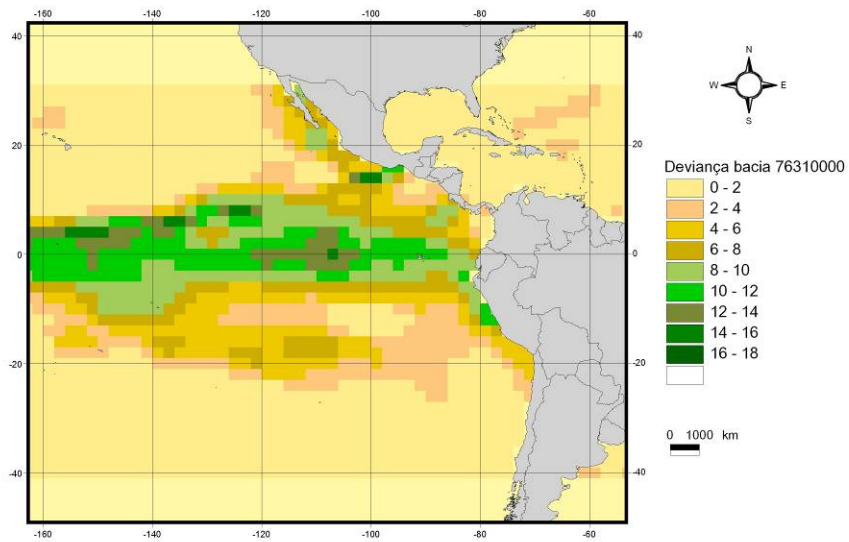
Anexo 2, Valores da função de Deviança das células de SST para cada bacia.



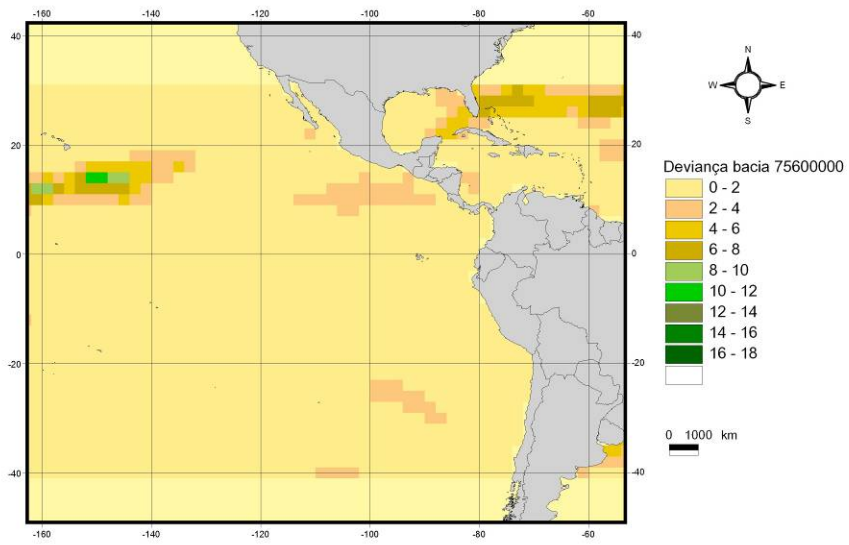
Bacia 76440000



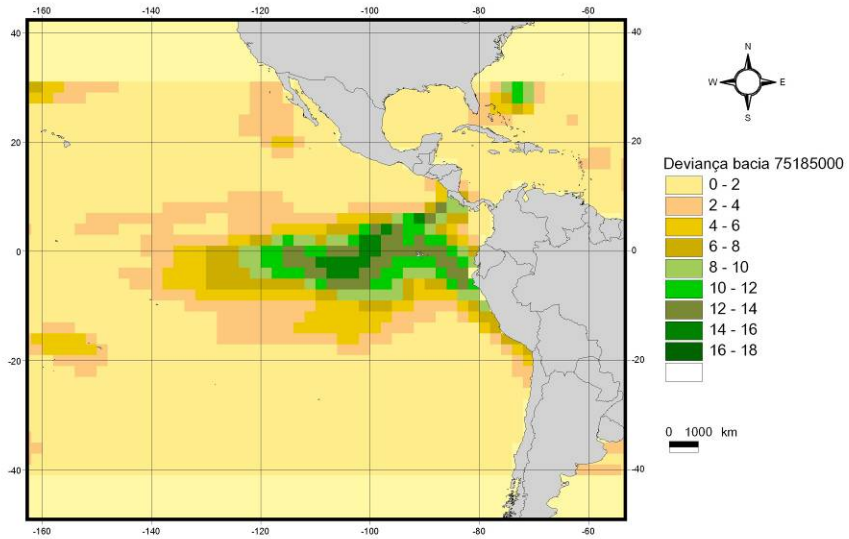
Bacia 76310000



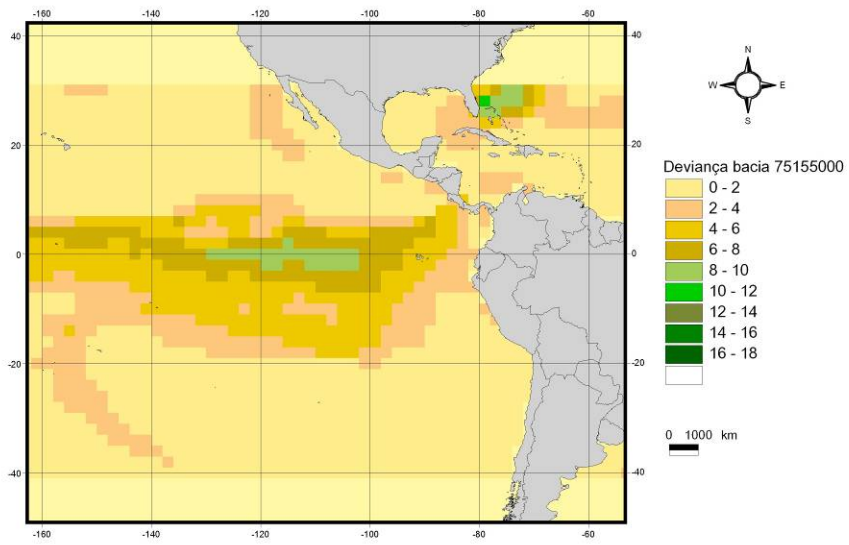
Bacia 75600000



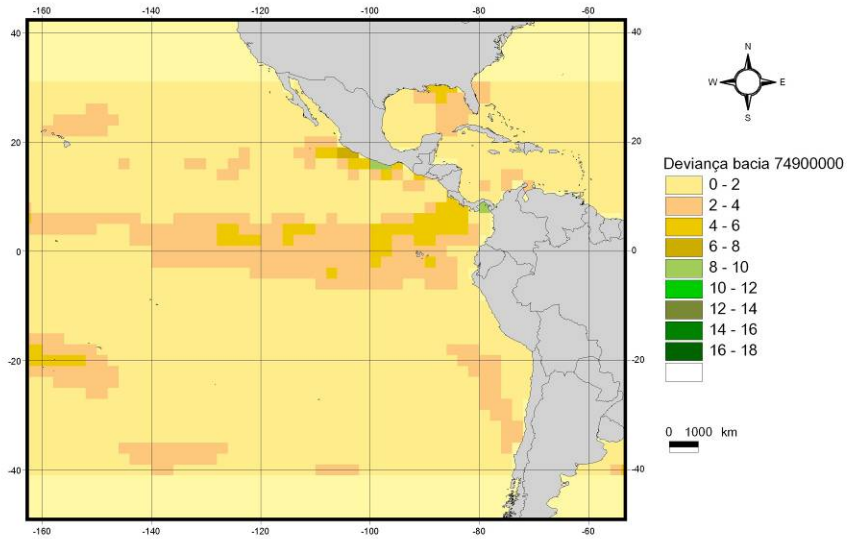
Bacia 75185000



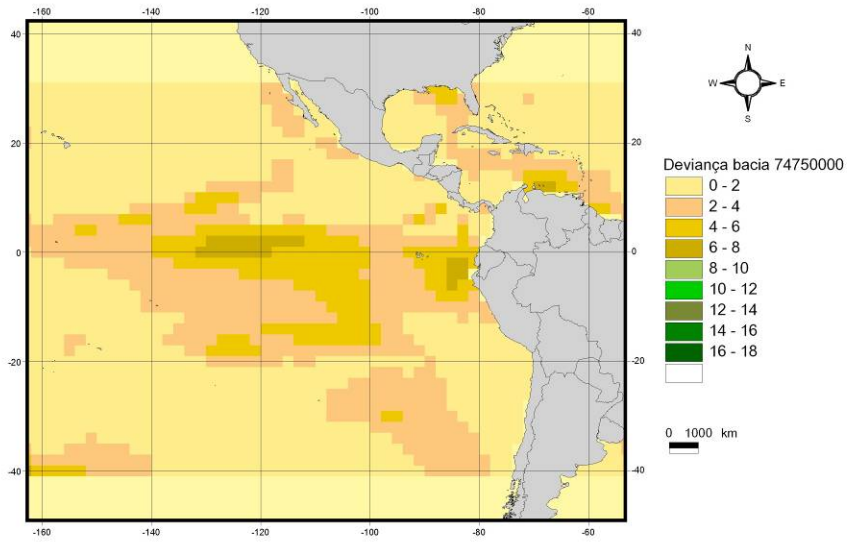
Bacia 75155000



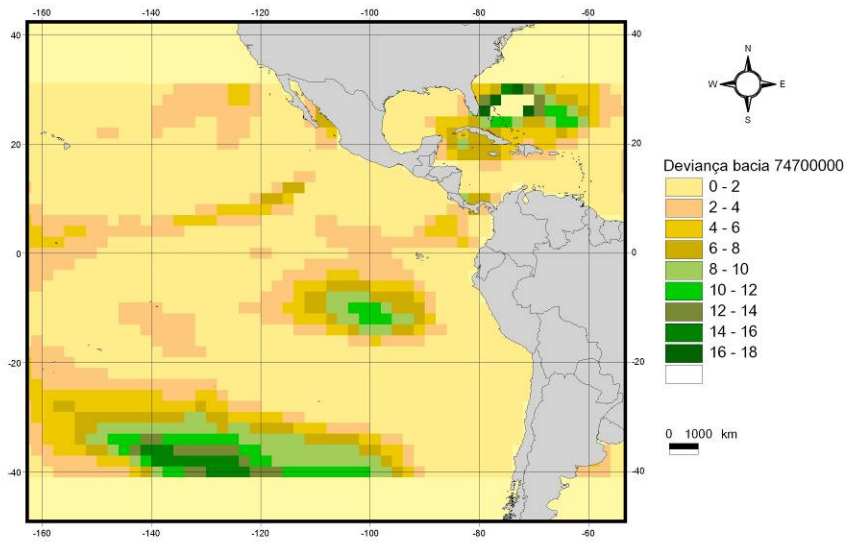
Bacia 74900000



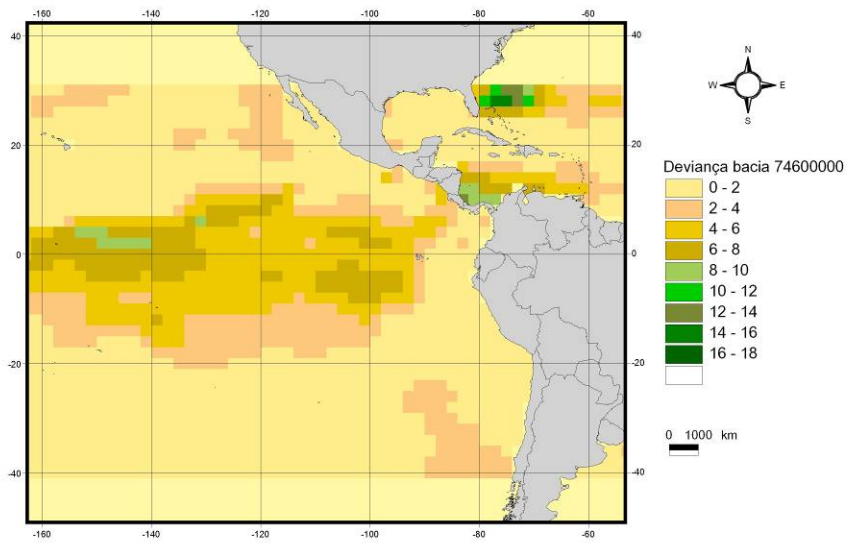
Bacia 74750000



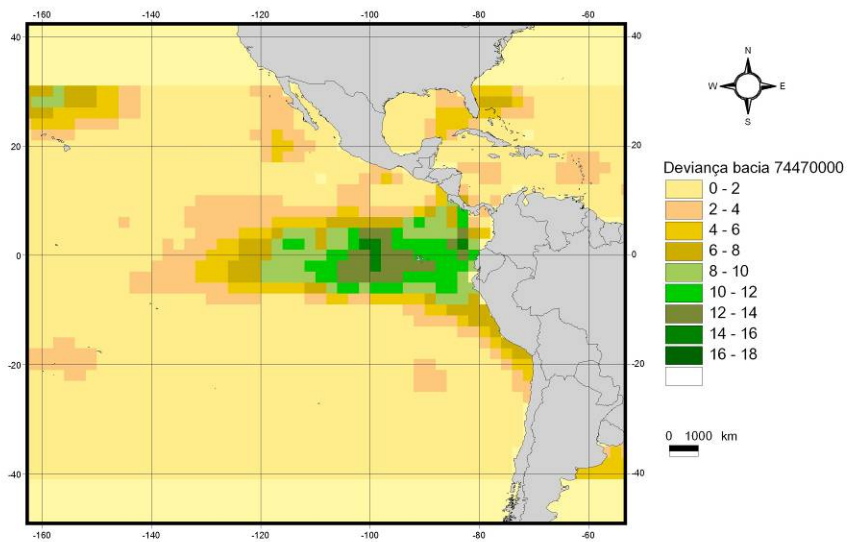
Bacia 74700000



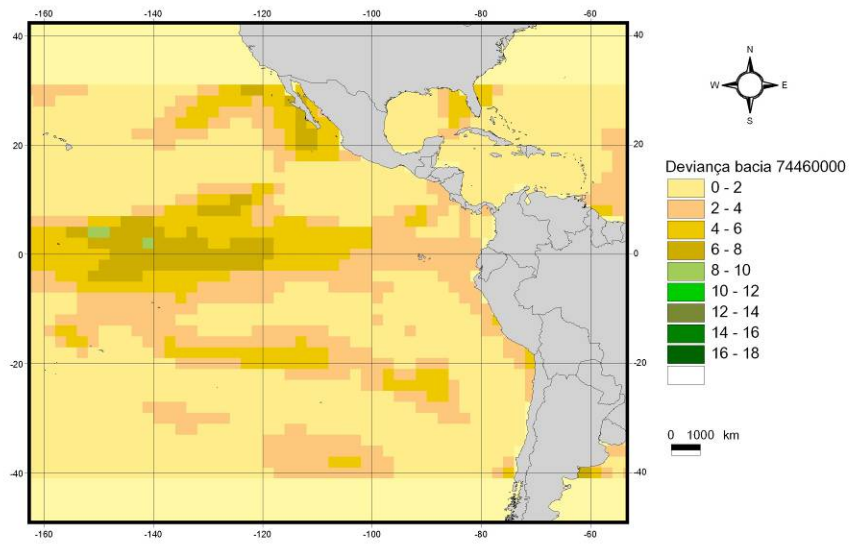
Bacia 7460000



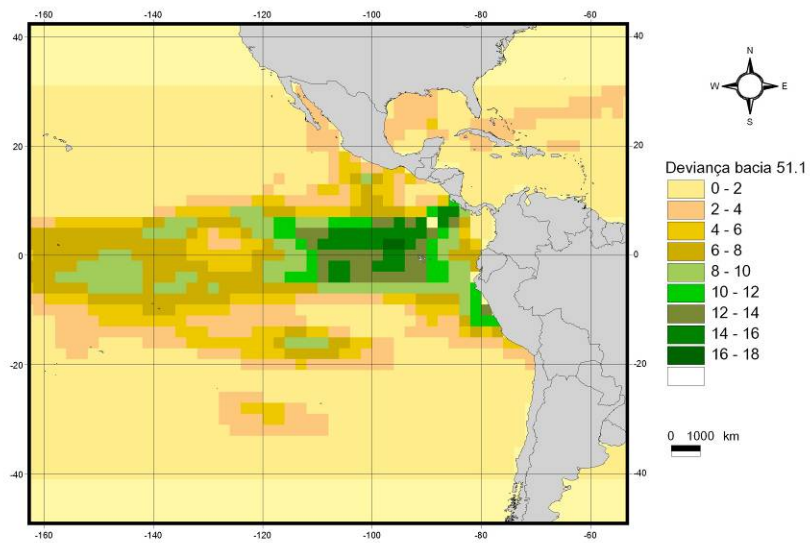
Bacia 74470000



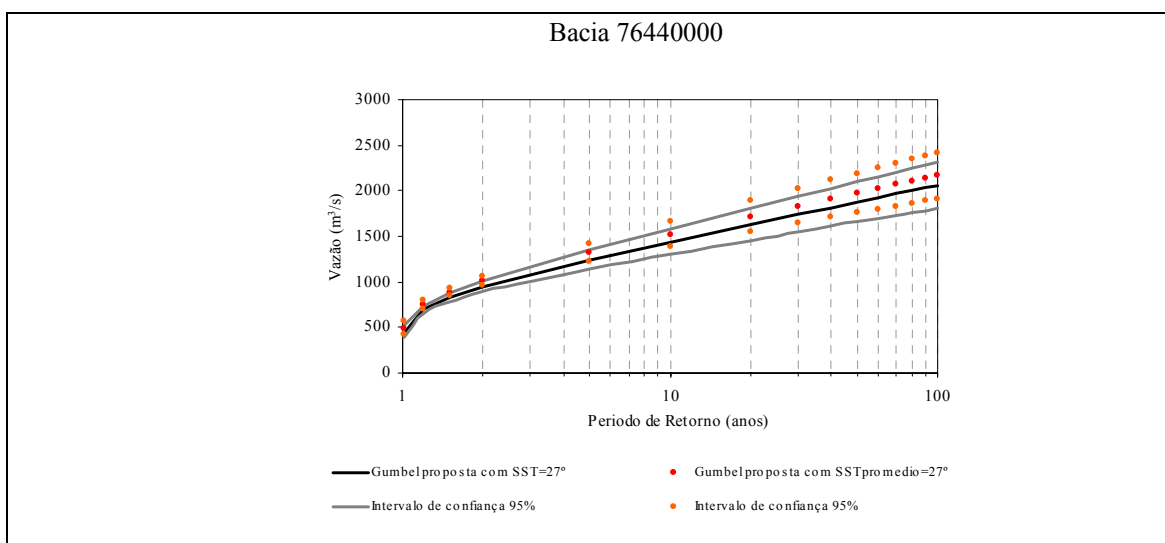
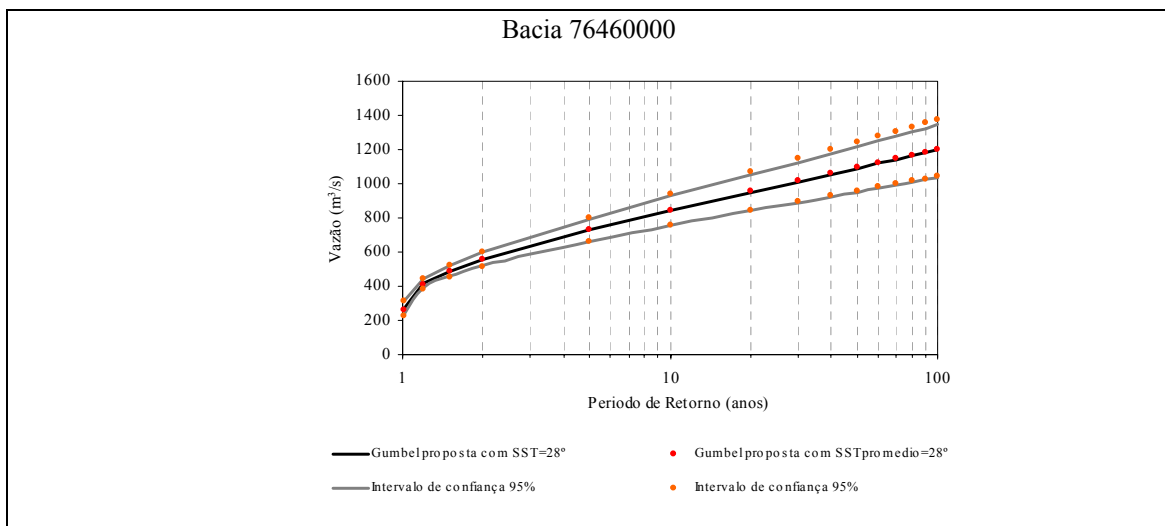
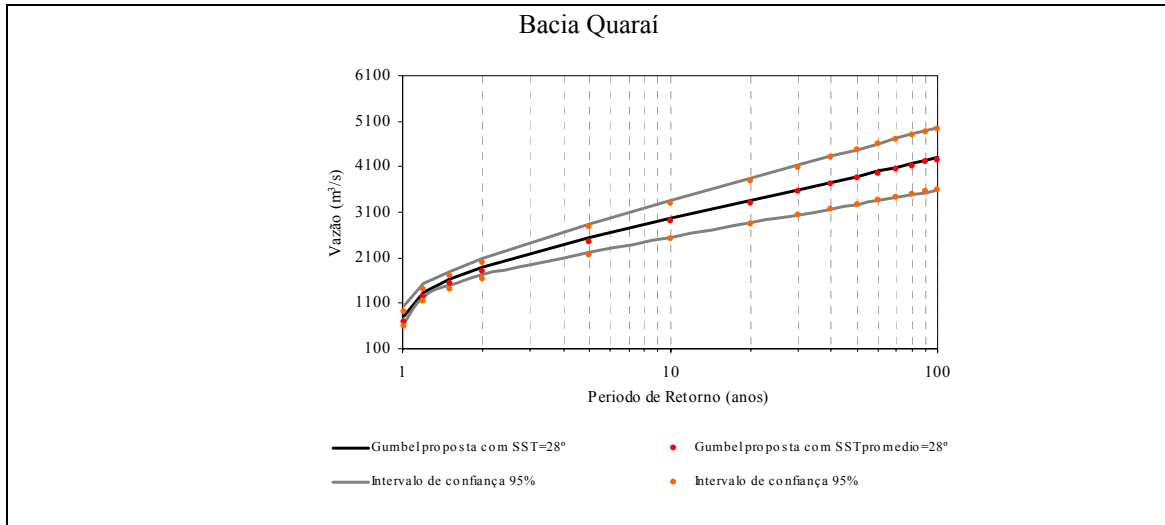
Bacia 74460000



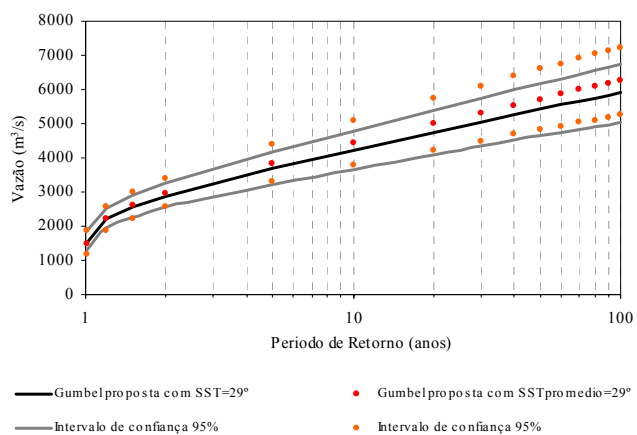
Bacia 51.1



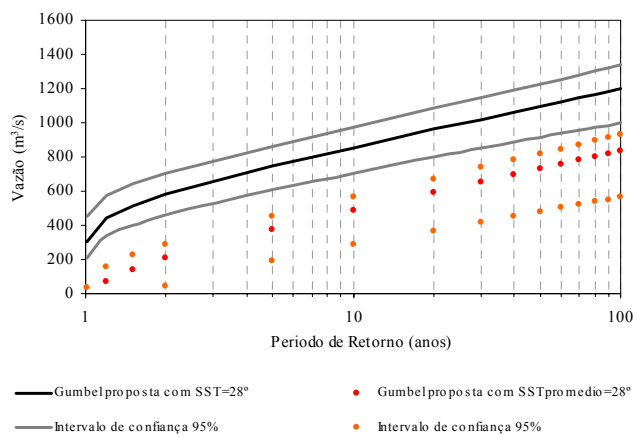
Anexo 3, Análise da sensibilidade na escolha da célula ótima.



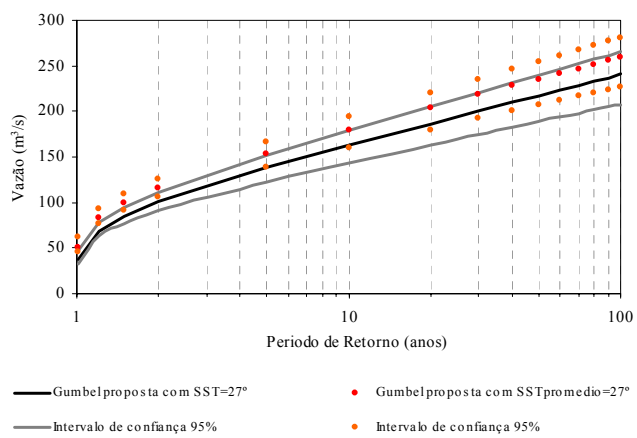
Bacia 76310000



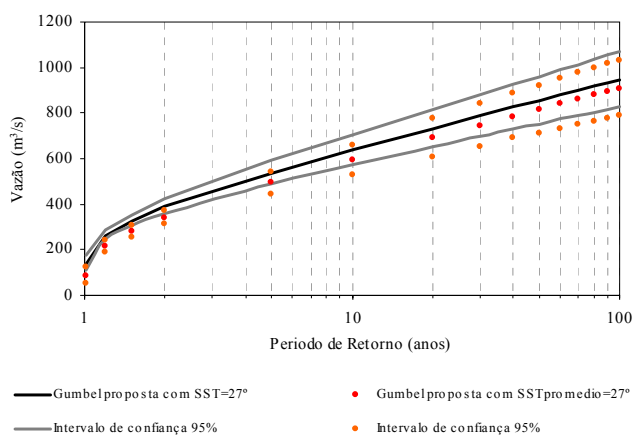
Bacia 75600000



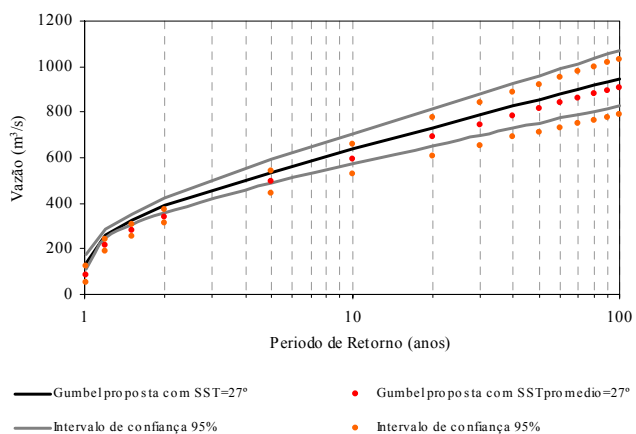
Bacia 75185000



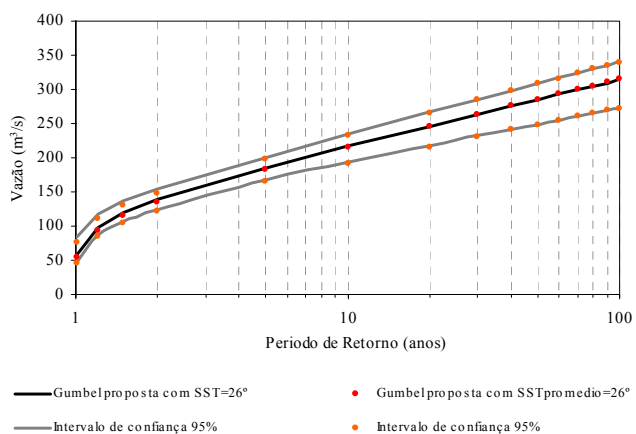
Bacia 75155000



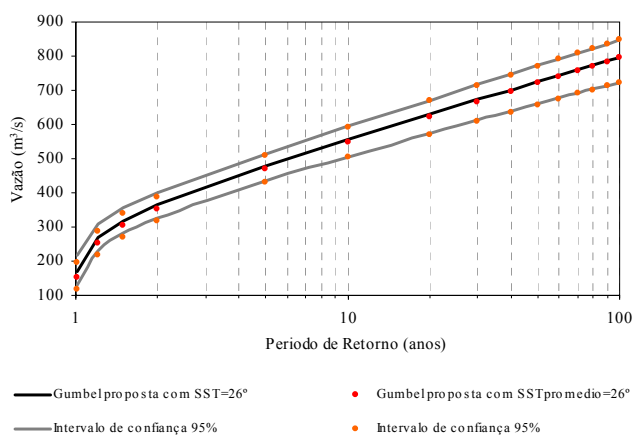
Bacia 74900000



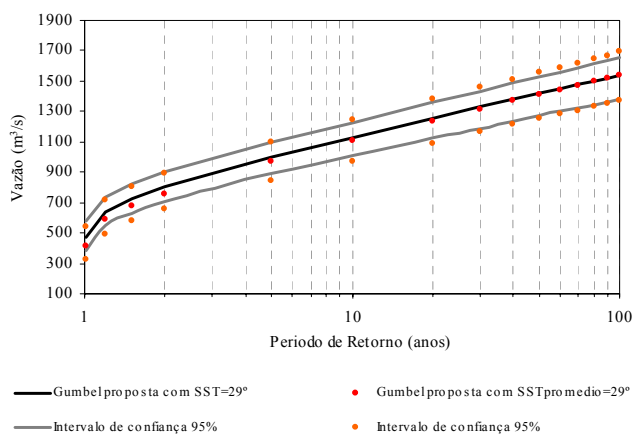
Bacia 74750000



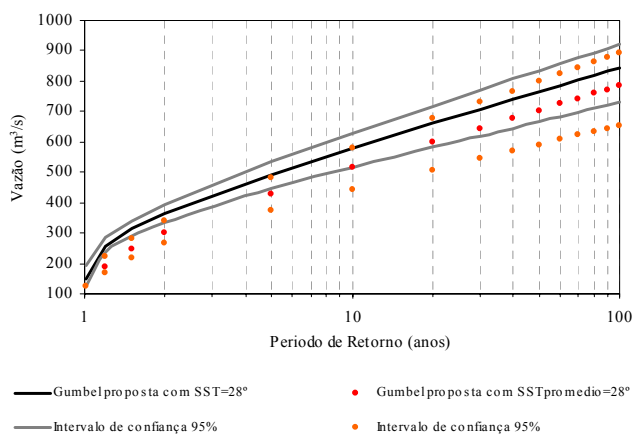
Bacia 74700000



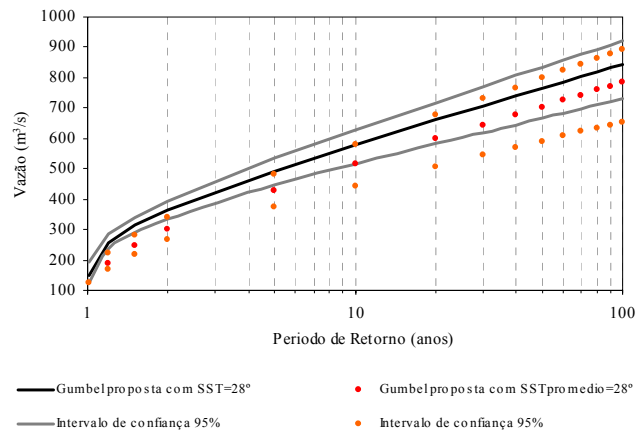
Bacia 74600000



Bacia 74470000



Bacia 74460000



Bacia 51.1

