

**IV-198 - REGIONALIZAÇÃO DE CURVAS DE PERMANÊNCIA DE VAZÕES  
PARA A REGIÃO HIDROGRÁFICA DO XINGÚ NO ESTADO DO PARÁ****Andréia Silva Costa<sup>(1)</sup>**

Engenheira Sanitarista e Ambiental formada pela Faculdade de Engenharia Sanitária e Ambiental do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará (FAESA/ITEC/UFPA).

**Brunna Lucena Cariello**

Engenheira Sanitarista e Ambiental formada pela Faculdade de Engenharia Sanitária e Ambiental do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará (FAESA/ITEC/UFPA).

**Claudio Jose Cavalcante Blanco**

Engenheiro Mecânico formado pela Universidade Federal do Pará. Mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Santa Catarina. Ph.D. em Ciências da Água pela Universidade do Quebec-Canadá. Professor da Faculdade de Engenharia Sanitária e Ambiental e Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará (PPGEC/ITEC/UFPA).

**Francisco Carlos Lira Pessoa**

Engenheiro Sanitarista e Ambiental formado pela Faculdade de Engenharia Sanitária e Ambiental e Doutorando do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Recursos Naturais do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará (FAESA/PRODERNA/ITEC/UFPA).

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Trav. Barão do Triunfo, 3188 - Vila São Francisco, casa 04 - Marco - Belém - PA - CEP: 66093-050 - Brasil - Tel: (91) 3236-1319 - e-mail: [andreiasc@ufpa.br](mailto:andreiasc@ufpa.br)

**RESUMO**

Para que aconteça uma adequada gestão dos recursos hídricos é fundamental o conhecimento das disponibilidades hídricas do local de interesse, mas esse conhecimento fica restrito às áreas onde estão localizadas estações fluviométricas. Diante disso, a regionalização de vazões se mostra uma boa alternativa, visto que é um método utilizado para suprir a carência de dados fluviométricos através da estimativa de vazões em locais onde os dados inexistem ou são insuficientes. Para tanto, este trabalho estabeleceu um modelo de regionalização de curvas de permanência de vazões para os rios da Região Hidrográfica do Xingu, com a utilização de dados de 16 estações fluviométricas presentes na região. Com os dados dessas estações foram elaboradas curvas de permanências que foram calibradas em função de cinco modelos matemáticos de regressão, potencial, exponencial, logarítmico, quadrático e cúbico. Os modelos exponencial e cúbico foram os que mais se adequaram às curvas de permanência, apresentando coeficientes de determinação ajustado igual a 0,971 e 0,993 e erro quadrático relativo médio percentual igual a 2,194 e 1,915. Com a utilização da técnica de regressão múltipla, sendo a área de drenagem e dados de precipitação média as variáveis independentes utilizadas nesta regressão, o modelo de regionalização foi elaborado. A fim de verificar o modelo de regionalização proposto, foram utilizadas duas estações alvo, sendo obtidos resultados satisfatórios com bom ajuste das curvas, das vazões observadas e simuladas, baixo valor do erro relativo médio percentual e coeficiente de Nash-Sutcliffe próximo de 1.

**PALAVRAS-CHAVE:** Regionalização de vazão, Regressão múltipla, Curva de permanência.

**INTRODUÇÃO**

A Região Amazônica, segundo SECTAM (2005), detém 73% dos recursos hídricos nacionais, sendo que o Pará possui grande importância, visto que nele está localizada a foz do Rio Amazonas, e 1,67% do seu território é coberto de água. Por isso é essencial para o Pará possuir uma rede de monitoramento de suas Bacias Hidrográficas. No entanto, o Pará possui entraves que vem de encontro à implantação dessa rede, tais como 83% do seu território ser recoberto pela Floresta Amazônica, o que dificulta o acesso a alguns cursos d'água além de encarecer o processo de instalação de estações fluviométricas na região. Assim, no presente trabalho, um modelo de regionalização de Vazão foi aplicado à Região Hidrográfica do Xingu.

Segundo Tucci (2000), a regionalização de vazões é um método estatístico da Hidrologia que objetiva a estimativa do escoamento superficial médio de longo prazo na rede de drenagem de uma bacia hidrográfica, em locais com ausência ou insuficiência de dados. É obtida a partir da análise de frequência de séries históricas de vazão em postos fluviométricos de uma bacia e estabelece, a partir de uma função de regressão, a

relação entre a vazão e uma ou mais variáveis independentes, tais como a área de contribuição ou precipitação. A regionalização possui grande importância na previsão probabilística de riscos de enchentes e da disponibilidade hídrica de longo tempo, para usos como a geração hidráulica de energia ou irrigação.

Quanto à execução da regionalização de vazão, existem vários métodos e ferramentas matemáticas que a possibilitam, neste trabalho foi utilizada a curva de permanência de vazões, sendo escolhida devido à sua relevância na gestão dos recursos hídricos, uma vez que ela é primordial para identificar a disponibilidade de água para cada risco pré-fixado, ou seja, a vazão mínima que se pode retirar de um corpo d'água com certo nível de garantia (SILANS et al., 1998); sendo esse método uma ferramenta importante não somente para a determinação de vazão mínima, mas para determinar o grau de permanência ao longo do tempo de qualquer valor de vazão, o que possibilita a regionalização de vazão em áreas homogêneas, ou seja, que possuam características semelhantes.

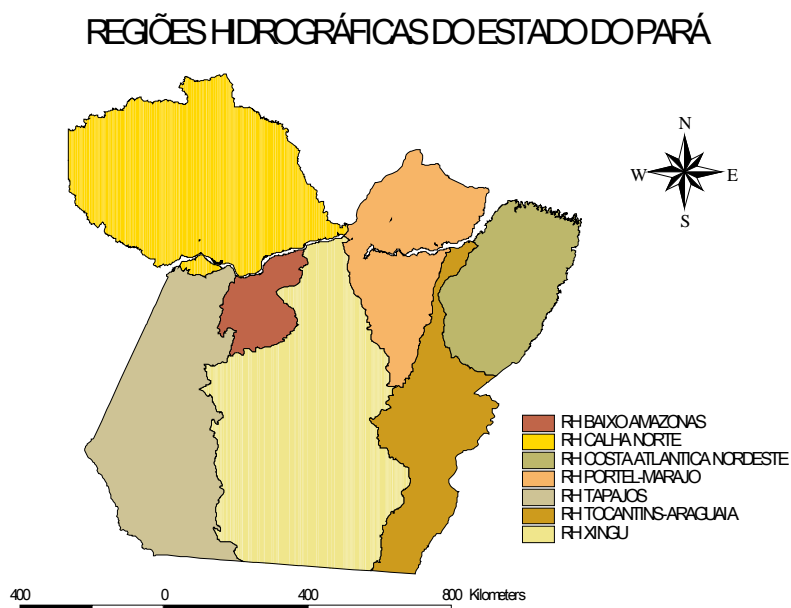
O desenvolvimento desse trabalho contou com o apoio da CAPES por meio de uma bolsa de mestrado destinada a **Francisco Carlos Lira Pessoa**.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### ÁREA DE ESTUDO

A Região Hidrográfica Amazônica é a mais extensa de todo o planeta, sua área total é de 6.925.674 km<sup>2</sup>, segundo a Agência Nacional de Águas (ANA), abrangendo os territórios do Brasil (63,88 %), Colômbia (16,14 %), Bolívia (15,61 %), Equador (2,31 %), Guiana (1,35 %), Peru (0,60 %) e Venezuela (0,11 %). No Brasil, ela inclui sete Estados, 100 % do Acre, Amazonas, Rondônia e Roraima, 76,2 % do Pará, 67,8 % do Mato Grosso e 31,3 % do Amapá, e com uma área da ordem de 3.899.419 km<sup>2</sup>. No domínio territorial do Estado do Pará, estão 7 Regiões Hidrográficas, sendo elas: Calha Norte, Tapajós, Xingu, Baixo Amazonas, Portel-Marajó, Tocantins-Araguaia e Costa Atlântico Nordeste (Figura 1), agrupadas de acordo com suas características geofisiográficas, como: geomorfologia, geologia, hidrografia, solos e fatores hidroclimáticos (SECTAM, 2005), sendo assim, consideradas regiões homogêneas.

Como área de estudo deste artigo foi utilizada a Região Hidrográfica do Xingu, a qual corresponde a uma área de 25,1% do Estado do Pará e apresenta valores de temperatura média entre 24 e 28 °C e umidade relativa do ar acima de 80% em quase todos os meses do ano, segundo o Instituto Nacional de Meteorologia, e possui uma precipitação que varia de 1500 a 2500 mm.ano-1.



**Figura 4 – Regiões Hidrográficas do Pará – Fonte: SECTAM (2005).**

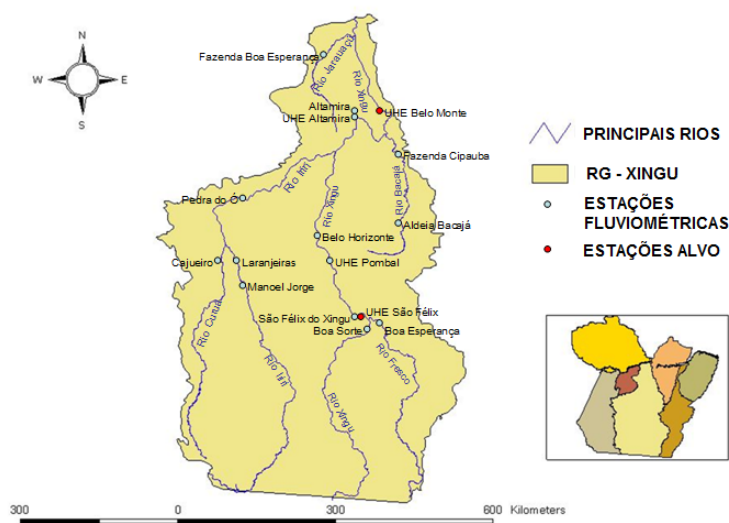
## DADOS

Para a elaboração deste trabalho, foram analisadas as séries históricas de 16 estações fluviométricas (Tabela 1 e Figura 2) e 11 estações pluviométricas (Tabela 2 e Figura 3), selecionadas com base no número de dados de vazões disponíveis e séries mais longas. Estas estações são pertencentes à rede hidrometeorológica do Sistema de Informações Hidrológicas (Hidroweb) da Agência Nacional de Águas (ANA).

**Tabela 1 - Estações Fluviométricas Utilizadas no Estudo.**

CÓDIGO	RIO	ESTAÇÃO	LATITUDE	LONGITUDE	PERÍODO
18870000	Rio Bacajá	Aldeia Bacajá	-4°54'58''	-51°25'42''	1976 - 1999
18640000	Rio Curuá	Aldeia Baú	-7°20'46''	-54°49'25''	1981 - 1994
18850000	Rio Xingú	Altamira	-3°12'53''	-52°12'44''	1971 - 2008
18520000	Rio Xingú	Belo Horizonte	-5°24'29''	-52°54'7''	1976 - 1998
18500000	Rio Fresco	Boa Esperança	-6°44'43''	-51°46'25''	1976 - 2007
18460000	Rio Xingú	Boa Sorte	-6°44'9''	-51°59'43''	1977 - 2008
18620000	Rio Curuá	Cachoeira Da Luz	-8°46'0''	-54°57'0''	1981 - 1986
18650000	Rio Curuá	Cajueiro	-5°39'0''	54°31'15''	1975 - 2006
18940000	Rio Jarauçu	Fazenda Boa Esperança	-2°12'40''	-52°48'0''	1981 - 1985
18880000	Rio Bacajá	Fazenda Cipaua	-3°43'53''	-51°34'3''	1977 - 2008
18480000	Rio Fresco	Fazenda Rio Dourado	-8°19'37''	-51°27'37''	2005 - 2008
18600000	Rio Iriri	Laranjeiras	-5°41'48''	-54°14'44''	1976 - 2007
18590000	Rio Iriri	Manoel Jorge (Terra Preta)	-6°12'9''	-54°4'27''	1999 - 2007
18700000	Rio Iriri	Pedra Do Ó	-4°32'30''	-54°0'3''	1976 - 2009
18960000	Rio Matari	Porto Do França	-1°47'0''	-52°5'0''	1979 - 1987
18510000	Rio Xingú	São Felix Do Xingu	-6°36'0''	-52°3'0''	1976 - 2005
18849100	Rio Xingú	UHE Altamira	-3°17'55''	-52°12'7''	1976 - 2005
18901080	Rio Xingú	UHE Belo Monte	-3°7'35''	51°46'30''	1976 - 2005
18514000	Rio Xingú	UHE Pombal	-5°55'4''	-52°35'27''	1976 - 2005
18470000	Rio Xingú	UHE São Félix	-6°47'52''	-52°0'2''	1976 - 2005

## REGIÃO HIDROGRÁFICA DO XINGU

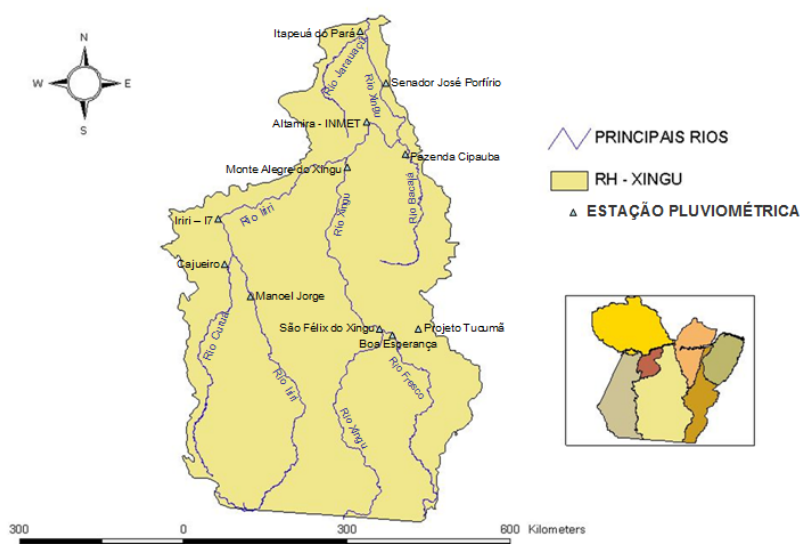


**Figura 2 – Estações Fluviométricas**

**Tabela 2 - Estações Pluviométricas Utilizadas no Estudo.**

CÓDIGO	MUNICÍPIO	ESTAÇÃO	LATITUDE	LONGITUDE	PERÍODO
352000	Altamira	Altamira – ANA	-3°12'30''	-52°12'27''	1968 - 1989
352001	Altamira	Altamira – INMET	-3°12'51''	-52°12'47''	1927 – 2009
351003	Altamira	Altamira Km-35	-3°12'0''	-51°51'0''	1987 – 1989
651001	São Félix Do Xingú	Boa Esperança	-6°42'9''	-51°47'55''	1976 – 2007
352005	Altamira	Brasil Novo	-3°37'0''	-52°32'28''	1982 – 2007
954000	Altamira	Cachimbo (Serra)	-9°20'0''	-54°57'0''	1980 – 2002
554000	Altamira	Cajueiro	-5°39'1''	-54°31'16''	1975 – 2008
351002	Senador José Porfírio	Fazenda Cipauba	-3°43'23''	-51°34'5''	1981 – 2001
351002	Senador José Porfírio	Fazenda Rio Dourado	-3°43'23''	-51°34'5''	1999 – 2007
454002	Altamira	Irirí I-7	-4°45'29''	-54°38'21''	1988 – 2008
252001	Porto De Moz	Itapéua Do Pará	-2°20'11''	-52°55'7''	1986 – 2006
352006	Altamira	Km 23 Transamazônica	-3°12'0''	-52°13'0''	1975 – 1987
353001	Altamira	Km-101 Transamazônica	-3°12'0''	-53°1'0''	1981 – 1987
452001	Altamira	Koatynema	-4°14'0''	-52°12'0''	1977 – 1978
654000	Altamira	Manoel Jorge (Terra Preta)	-6°12'8''	-54°4'22''	1999 – 2008
452000	Altamira	Monte Alegre Do Xingu	-4°39'56''	-52°43'13''	1976 – 2008
152003	Porto De Moz	Porto De Moz – DPEV	-1°45'0''	-52°14'0''	1975 – 1998
152001	Porto De Moz	Porto De Moz – INMET	-1°45'5''	-52°14'11''	1963 – 2007
651002	São Félix Do Xingú	Projeto Tucumã	-6°49'1''	-50°32'16''	1984 – 2001
651003	São Felix Do Xingú	São Felix Do Xingú	-6°38'0''	-51°58'0''	1972 – 2007
251001	Senador José Porfírio	Senador José Porfírio	-2°35'12''	-51°56'53''	1999 - 2001

## REGIÃO HIDROGRÁFICA DO XINGU



### Figura 3 – Estações Pluviométricas

Para cada estação fluviométrica foi atribuído um valor de precipitação média anual, correspondente a uma estação pluviométrica, levando-se em consideração a posição geográfica (latitude e longitude) das estações, em alguns casos adotou-se os dados de precipitação da estação pluviométrica mais próxima. Em seguida, as estações UHE São Félix (cód. 18470000) e UHE Belo Monte (cód. 18901080) foram escolhidas como

estações-alvo (A1 e A2) a serem utilizadas para verificar a eficiência dos modelos de regionalização. Para a efetivação da regionalização de vazão foram consideradas as seguintes variáveis: precipitação anual média (P) e área de drenagem (A) (Tabela 3). As áreas de drenagem foram obtidas no Sistema de Informações Hidrológicas (Hidroweb) da Agência Nacional de Águas (ANA).

**Tabela 3 – Características Físico-Climáticas**

CÓDIGO	RIO	ESTAÇÃO	PRECIPITAÇÃO MÉDIA ANUAL "P" (MM)	ÁREA DE DRENAGEM (KM²)
18460000	Rio Xingu	Boa Sorte	1698,44	206863
18470000	Rio Xingu	UHE São Félix	1681,41	208719
18500000	Rio Fresco	Boa Esperança	1657,37	43030
18510000	Rio Xingu	São Félix do Xingu	1698,44	250626
18514000	Rio Xingu	UHE Pombal	1698,44	262681
18520000	Rio Xingu	Belo Horizonte	1315,72	277265
18590000	Rio Iriri	Manoel Jorge	1514,93	56641,44
18600000	Rio Iriri	Laranjeiras	1481,05	60058
18650000	Rio Curuá	Cajueiro	1481,05	35213
18700000	Rio Iriri	Pedra do Ó	1260,65	123827
18849100	Rio Xingu	UHE Altamira	1607,19	447916
18850000	Rio Xingu	Altamira	1607,19	446203
18870000	Rio Bacajá	Aldeia Bacajá	1735,37	12839
18880000	Rio Bacajá	Fazenda Cipaubá	1683,39	24575
18901080	Rio Xingu	UHE Belo Monte	1683,39	446573
18940000	Rio Jarauaçu	Fazenda Boa Esperança	1661,68	12858,59

## REGIONALIZAÇÃO DE CURVAS DE PERMANÊNCIA DE VAZÃO

O modelo utilizado neste artigo baseou-se no trabalho realizado por Mimikou e Kaemaki (1985), que desenvolveram um estudo de regionalização nas regiões oeste e noroeste da Grécia. Pessoa et al. (2011) também aplicaram este modelo à região hidrográfica da Calha Norte no Estado do Pará. Os dois estudos mencionados utilizaram os modelos dados pelas seguintes equações:

$$Q = a \exp.(-b.D)$$

equação (1)

$$Q = a.D^{-b}$$

equação (2)

$$Q = a - b.D + c.D^2$$

equação (3)

$$Q = a - b.\ln.D$$

equação (4)

$$Q = a - b.D + c.D^2 - d.D^3$$

equação (5)

onde  $Q$  é a vazão (por unidade de área da bacia),  $D$  é o percentual de tempo igualado ou excedido e  $a$  e  $b$  são constantes positivas dos modelos, as quais foram determinadas pelo método dos mínimos quadrados.

Para obtenção do modelo apropriado a realidade da Região Hidrográfica do Xingu, seguiu-se o seguinte roteiro:

- Calibração das curvas de permanência de vazões por meio dos seguintes modelos matemáticos: potencial, exponencial, logarítmico, quadrático e cúbico;
- Definição do modelo regional através de testes de equações de regressão, utilizando o método dos mínimos quadrados;
- Cálculo dos coeficientes de determinação  $R^2$ ;
- Cálculo do NASH para avaliação do nível de confiança das equações de regressão;
- Aplicação e verificação do modelo regional para a construção das curvas de permanência de vazões das bacias alvos com o melhor dos 5 modelos analisados;
- Estimativa do erro relativo (%) para as estações alvos.

## CRITÉRIOS DE DESEMPENHO

Visando analisar o desempenho dos modelos, tanto na calibração, quanto na verificação, foram considerados o erro quadrático relativo médio percentual,  $\epsilon\%$  (Eq. 6), o coeficiente de determinação ajustado,  $R^2_{ajustado}$  (Eq. 7) e o coeficiente de Nash-Sutcliffe (Eq. 8).

$$\epsilon = N^{-1} \left[ \sum_{i=1}^N \left( \frac{Q_i - \hat{Q}_i}{Q_i} \right)^2 \right]^{1/2} \cdot 100 \quad \text{equação (6)}$$

onde  $Q_i$  é a vazão observada,  $\hat{Q}_i$  é a vazão estimada pelo modelo de regionalização, e  $N$  corresponde ao número total de vazões observadas.

$$R^2_{ajustado} = 1 - \frac{n-1}{n-p-1} \cdot (1 - R^2) \quad \text{equação (7)}$$

onde  $n$  é o número de valores observados,  $p$  é o número de variáveis independentes e  $R^2$  é o coeficiente de determinação.

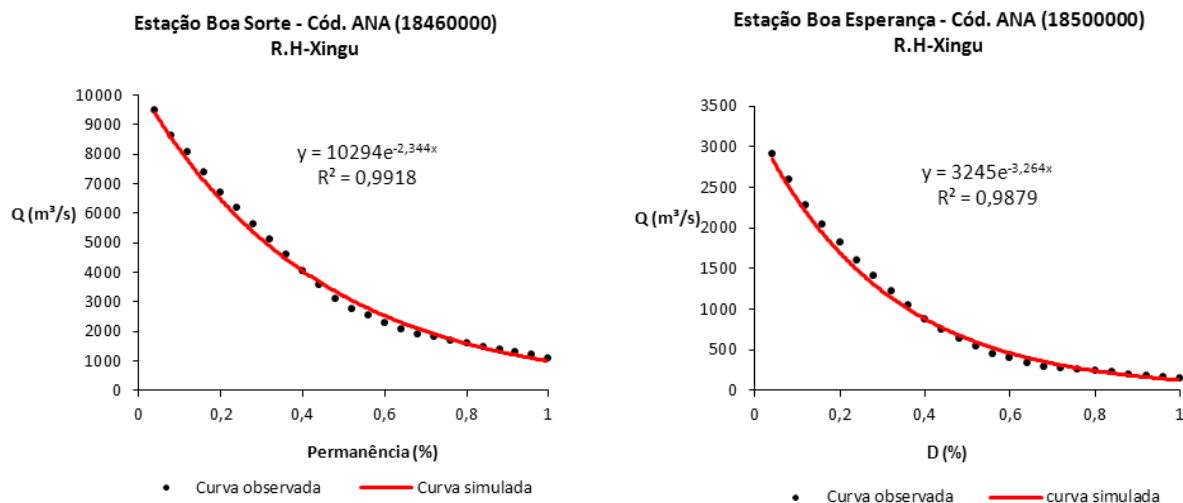
$$Nash = 1 - \frac{\sum (Y_{obs}(t) - Y_{cal}(t))^2}{\sum (Y_{obs}(t) - \bar{Y}_{obs})^2} \quad \text{equação (8)}$$

onde  $Y_{obs}$  é a vazão observada,  $Y_{cal}$  é a vazão simulada, pelo modelo e  $\bar{Y}_{obs}$  é a média das vazões observadas.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

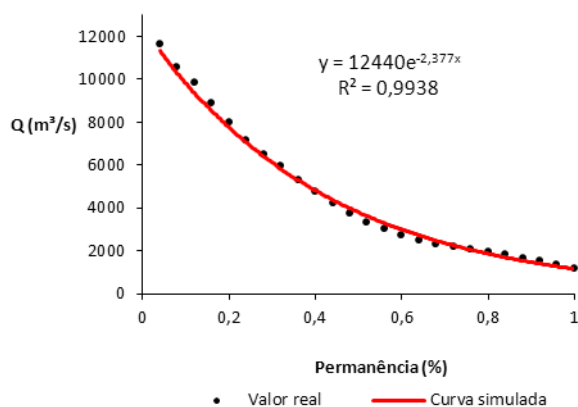
### CALIBRAÇÃO DAS CURVAS DE PERMANÊNCIA

Primeiramente, as curvas de permanência de vazões observadas de cada posto fluviométrico foram traçadas. Em seguida, foram testados 5 modelos matemáticos, exponencial, potencial, logarítmico, quadrático e cúbico (Eqs. 1-5) para calibração das curvas de permanência de vazões das estações fluviométricas. No processo de calibração, foi usada uma planilha eletrônica capaz de ajustar aos dados observados às funções correspondentes aos cinco modelos supracitados. Os parâmetros  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$  foram calculados por intermédio do método dos mínimos quadrados, mas determinados automaticamente também por planilha eletrônica. Nesse caso, as vazões observadas  $Q$  são as variáveis dependentes e as permanências  $D$  são as variáveis independentes. Para uma melhor visualização gráfica do ajuste dos modelos, foram selecionados pares –  $Q$  ( $m^3.s^{-1}$ ) x Permanência  $D$  (% tempo) – para cada uma das estações. Esses 25 pares foram divididos em intervalos de 4% até alcançar os 100%. Os resultados obtidos a partir da calibração das curvas de permanência de vazões aos modelos matemáticos estão descritos na figura 4 e na tabela 4.

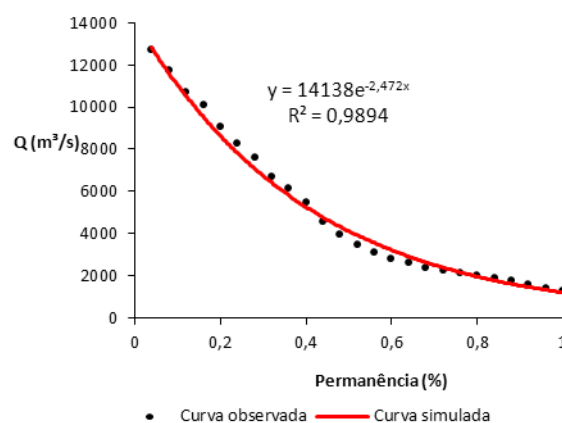




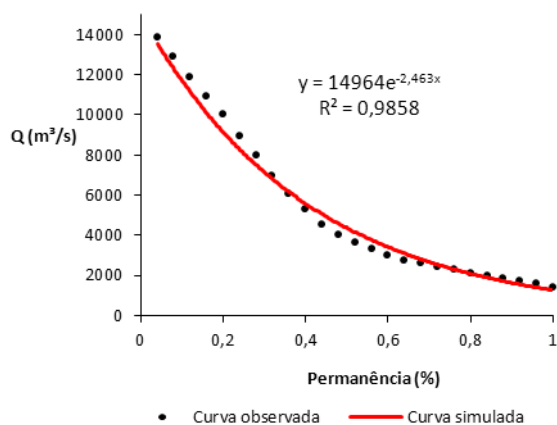
Estação São Félix do Xingú - Cód. ANA (18510000)  
R.H-Xingú



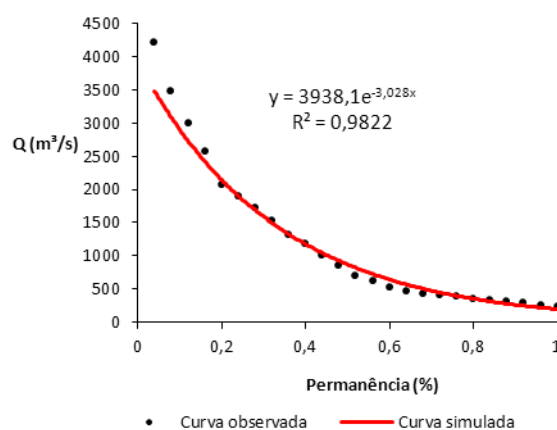
Estação UHE Pombal - Cód. ANA (18514000)  
R.H-Xingú



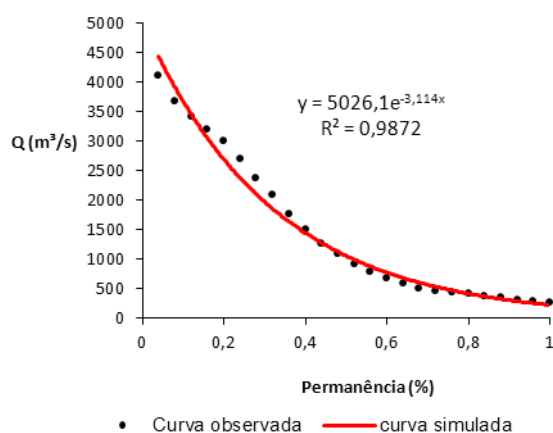
Estação Belo Horizonte - Cód. ANA (18520000)  
R.H-Xingú



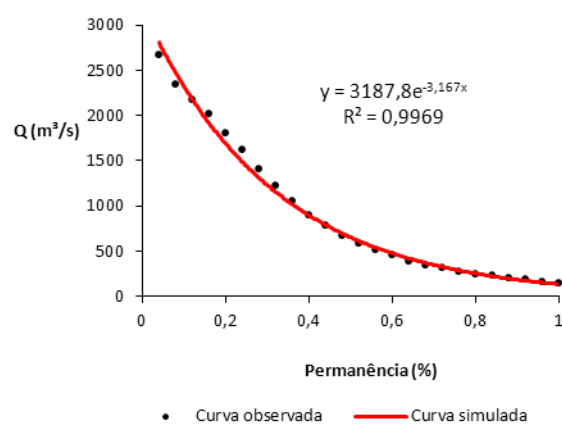
Estação Manoel Jorge - Cód. ANA (18590000)  
R.H-Xingú



Estação Laranjeiras - Cód. ANA (18600000)  
R.H-Xingú



Estação Cajueiro - Cód. ANA (18650000)  
R.H-Xingú



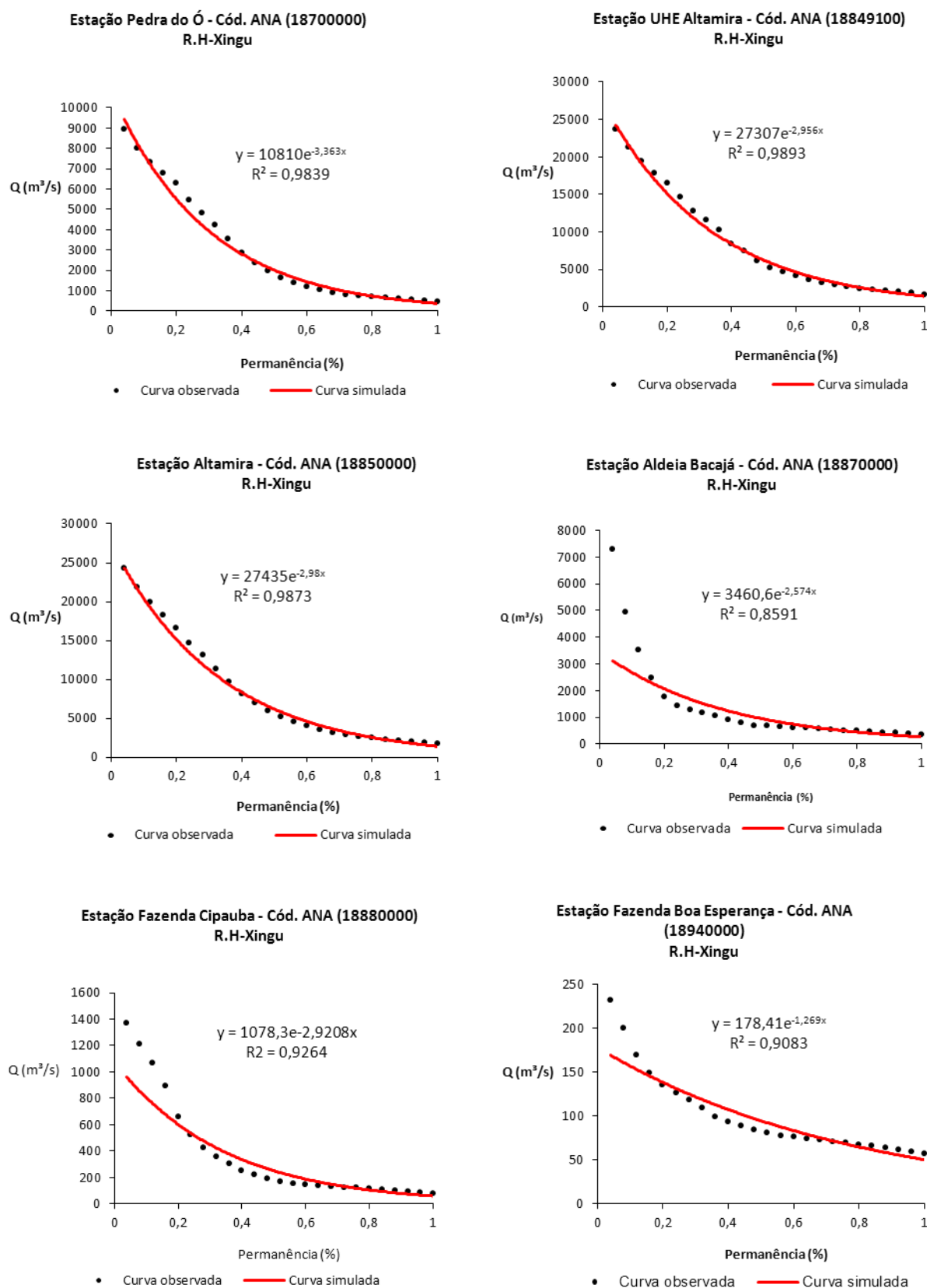


Figura 4. Curvas de permanência observadas e simuladas na calibração



**Tabela 4 – Coeficiente de Determinação Ajustado ( $R^2_a$ ) e Erros Quadráticos Médios Percentuais ( $\epsilon\%$ ) de cada Modelo na Calibração.**

CÓDIGO	ESTAÇÃO	MODELO									
		Cúbico		Logarítmico		Potencial		Exponencial		Quadrático	
		$\epsilon$	$R^2_a$	$\epsilon$	$R^2_a$	$\epsilon$	$R^2_a$	$\epsilon$	$R^2_a$	$\epsilon$	$R^2_a$
18460000	Boa Sorte	0,87	0,999	2,060	0,964	5,402	0,867	1,247	0,991	1,318	0,998
18500000	Boa Esperança	1,21	0,999	6,003	0,975	8,095	0,868	2,133	0,987	4,695	0,996
18510000	São Félix do Xingu	0,74	0,999	1,706	0,973	5,428	0,873	1,096	0,994	2,076	0,996
18514000	UHE Pombal	1,53	0,997	2,378	0,960	5,941	0,860	1,512	0,989	1,931	0,997
18520000	Belo Horizonte	1,27	0,996	2,371	0,961	5,563	0,880	1,742	0,985	2,302	0,995
18590000	Manoel Jorge	1,34	0,995	6,271	0,987	6,024	0,903	2,395	0,981	5,903	0,977
18600000	Laranjeiras	2,67	0,995	4,429	0,951	8,353	0,839	2,084	0,987	2,414	0,995
18650000	Cajueiro	1,34	0,998	3,548	0,968	8,618	0,845	1,019	0,997	3,334	0,997
18700000	Pedra do Ó	3,11	0,996	6,250	0,955	8,994	0,849	2,524	0,983	3,866	0,995
18849100	UHE Altamira	1,57	0,998	3,701	0,964	7,499	0,855	1,779	0,989	2,325	0,997
18850000	Altamira	1,54	0,998	4,092	0,965	7,251	0,865	1,953	0,987	2,899	0,997
18870000	Aldeia Bacajá	7,92	0,942	11,770	0,858	1,356	0,992	5,553	0,853	14,457	0,806
18880000	Fazenda Cipaubá	2,23	0,995	9,716	0,942	4,487	0,949	4,827	0,923	10,331	0,951
18940000	Fazenda Boa Esperança	0,65	0,993	1,216	0,986	0,962	0,985	2,246	0,904	1,991	0,950
Média		1,999	0,993	4,679	0,958	5,998	0,888	2,293	0,968	4,274	0,975

Com base nos dados apresentados na Tabela 4, foi verificado que o modelo exponencial (Eq. 1), ajustou-se melhor às curvas de permanência de vazões observadas da Região Hidrográfica do Xingu, além de possuir um  $\epsilon\% < 10\%$  e coeficiente de determinação ajustado próximo de 1. No caso do  $R^2_a$ , apenas o resultado da Aldeia Bacajá não foi próximo de 1, confirmando o resultado de  $\epsilon\%$  mais alto em relação as bacias analisadas.

## MODELOS DE REGRESSÃO/REGIONALIZAÇÃO

Por meio da calibração dos modelos, foi determinado o melhor modelo para ser utilizado na regionalização das curvas de permanência de vazões da região hidrográfica do Xingu, i.e., o modelo exponencial. Assim, foram obtidos os valores dos parâmetros  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$  (Tabela 5). Nesse caso, já que, as permanências  $D$  são conhecidas, os parâmetros dos modelos representam as informações climáticas e fisiográficas das bacias analisadas, os quais serão transferidos às bacias sem dados de vazão. Para tanto, a regionalização é efetuada por meio da regressão de  $a$  e  $b$ ,  $c$  e  $d$  em relação às características morfoclimáticas das bacias utilizadas na calibração do modelo.

**Tabela 5 – Parâmetros e Coeficientes de Determinação Ajustados das Equações de Regressão (Modelo Exponencial)**

Código	Estações	Parâmetros e $R^2_{\text{quadrado}}$		
		$a$	$b$	$R^2_a$
18460000	Boa Sorte	10294	2,3442	0,991443
18500000	Boa Esperança	3245	3,2636	0,987374
18510000	São Felix do Xingu	9940,7	2,29	0,99353
18520000	Belo Horizonte	14964	2,4634	0,985183
18590000	Manoel Jorge	3938,1	3,0275	0,981426
18600000	Laranjeiras	5026,1	3,1136	0,986643
18650000	Cajueiro	3187,8	3,1668	0,996765
18700000	Pedra do Ó	10810	3,3633	0,9832
18849100	UHE Altamira	27307	2,9561	0,988835
18850000	Altamira	27435	2,98	0,986748
18870000	Aldeia Bacajá	3460,6	2,5741	0,852974
18880000	Fazenda Cipaubá	1078,3	2,9208	0,9232
18940000	Fazenda Boa Esperança	178,41	1,2688	0,904313

De posse dos valores dos parâmetros dos modelos e das características morfoclimáticas (Tabela 3) das bacias analisadas, foi aplicada a regressão múltipla, entre os parâmetros e as variáveis independentes, por meio das seguintes equações de regressão:

$$V = b_0 + b_1.P + b_2.A + b_3.L + b_4.H \quad \text{equação (8)}$$

$$V = b_0.P^{b_1}.A^{b_2}.L^{b_3}.H^{b_4} \quad \text{equação (9)}$$

$$V = b_0.P^{b_1}.(A/L)^{b_2}.H^{b_3} \quad \text{equação (10)}$$

$$V = b_0.P^{b_1}.A^{b_2}.(H/L)^{b_3} \quad \text{equação (11)}$$

onde  $V$  é a variável dependente que representa os parâmetros das curvas de permanência de vazão  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$  e  $b_0$ ;  $b_1$ ;  $b_2$ ;  $b_3$  e  $b_4$  são as constantes da regressão, sendo a análise de regressão múltipla executada de acordo com os textos estatísticos do Serviço Geológico do Brasil – CPRM (Naghettini e Pinto 2007). Os valores de  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$  e  $b_4$  foram determinados pelo método dos mínimos quadrados, por intermédio de planilha eletrônica.

Segundo Naghettini e Pinto (2007), para se evitar a multi-colinearidade, elimina-se uma entre cada conjunto de duas variáveis independentes que apresentarem coeficiente de correlação superior a 0,85. Na Região Hidrográfica do Xingu, as variáveis comprimento e desnível do rio foram retiradas das equações de regressão múltiplas, sem perdas significativas aos modelos, pois o modelo de regressão obteve resultado significativo utilizando-se a área de drenagem e a precipitação média anual como variáveis explicativas.

Desta forma, os modelos de regressão, representados pelas Eqs. (8–11) foram testados para definir o melhor modelo de regionalização. Constando-se que o modelo de regressão representado pela Eq. 8, obteve um melhor desempenho na determinação dos parâmetros  $a$  e  $b$  do modelo exponencial (Eq. 1), pois o mesmo apresentou maiores valores de coeficiente de determinação ajustado (Eq. 7), e menores erros percentuais (Eq. 6). Sendo as equações de regressão recomendadas para estimar os coeficientes  $a$  e  $b$  do modelo exponencial as seguintes:

$$a = 9375,72 - 5,503.P + 0,055.A \quad \text{equação (12)}$$

$$R^2_{\text{ajustado}} = 0,95$$

$$b = 5,088 - 0,0015.P + 0,000000056.A \quad \text{equação (13)}$$

$$R^2_{\text{ajustado}} = 0,85$$

## VALIDAÇÃO

Nesta etapa, aplicaram-se os dados das bacias-alvo A1 e A2, ao modelo de regionalização exponencial (Eqs. 16-17) para cálculo dos parâmetros  $a$  e  $b$ . As características morfoclimáticas das bacias-alvo foram definidas na Tabela 1. De posse dos valores dos parâmetros  $a$  e  $b$  do modelo, foi possível simular as curvas de permanência de vazões como mostrado nas Figuras 4 e 5. As análises dessas, dos coeficientes de Nash–Sutcliffe e dos erros percentuais, revelaram que, o modelo de regionalização exponencial apresentou resultados satisfatórios com erros inferiores a 10%, coeficientes de Nash–Sutcliffe superiores a 0,85 e bons ajustes gráficos das curvas de permanência de vazões simuladas e observadas.

## CONCLUSÃO

Este trabalho estabeleceu uma metodologia de regionalização de curvas de permanência de vazões para a região hidrográfica do Xingu no Estado do Pará. A proposta de regionalização envolveu as características físico-climáticas de 16 estações fluviométricas instaladas e em funcionamento nas regiões. As curvas de permanência de vazões foram calibradas em função de 5 modelos matemáticos de regressão (exponencial, logarítmico, potência, quadrático e cúbico). O melhor resultado foi obtido pelo modelo exponencial, pois apresentou maior coeficiente de Nash–Sutcliffe, menores erros quadráticos relativos médios percentuais e melhores ajustes das curvas.

A regionalização foi efetuada por meio da técnica da regressão múltipla dos parâmetros  $a$  e  $b$  do modelo exponencial, em função das características morfoclimáticas da bacia analisada. Fisicamente, tais coeficientes explicam a variação espacial das vazões por meio das características morfoclimáticas, que são: área de drenagem e precipitação média anual. Por intermédio de uma análise de multi-colinearidade, as variáveis comprimento e desnível do rio na regionalização foram retiradas das equações de regressão múltiplas, sem perdas significativas aos modelos. Assim, as curvas de permanência das bacias-alvo (A1 e A2) foram

simuladas, mostrando um desempenho satisfatório do modelo de regionalização exponencial por meio do ajuste entre as vazões observadas e simuladas, coeficientes de Nash–Sutcliffe superiores a 0,85 e dos erros quadráticos relativos médios percentuais, os quais foram inferiores a 10%.

Nesse contexto, o modelo de regionalização aplicado, mostrou-se promissor para auxiliar na solução da escassez de dados de vazão na região amazônica, podendo dar suporte ao planejamento e à gestão dos recursos hídricos da região, bem como de outras regiões que sofram com a falta de monitoramento hidrológico.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. HIDROWEB Informações Hidrológicas – ANA (Agência Nacional de Águas). Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br>>. Acesso em 15 set. 2010.
2. INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Normais Climatológicas**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/html/clima/mapas/?mapa=tmax>>. Acesso em: 03 dez. 2010.
3. MIMIKOU, M. and KAEMAKI, S. Regionalization of flow duration characteristics. **Journal of Hydrology**, 1985.
4. NAGHETTINI, M e PINTO, E. J. A. **Hidrologia Estatística**. Belo Horizonte: Serviço Geológico do Brasil – CPRM, 2007. p. 362 e 404.
5. NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. **River flow forecasting though conceptual models part I – A discussion of principles**. Journal of Hydrology. Vol. 10, Issue 3, p. 282-290, 1970.
6. PESSOA, F. C. L; BLANCO, C. J. C.; MARTINS, J. R. (2011). **Regionalização de Curvas de Permanência de Vazões da Região da Calha Norte no Estado do Pará**, Revista Brasileira de Recursos Hídricos, artigo aceito para publicação.
7. SECRETARIA EXECUTIVA DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E MEIO AMBIENTE – SECTAM. **Política de Recursos Hídricos do Estado do Pará - Lei nº 6381 de 25 de julho de 2001 e Legislação Complementar**. Belém – PA – 2005.
8. SECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS – AGENCIA NACIONAL DE ÁGUAS –ANA. **Panorama dos Recursos Hídricos por Regiões Hidrográficas – Região Hidrográfica Amazônica**. Disponível em: <[www.ana.gov.br/mapainicial/doc\\_Mapas/AMAZONAS.doc](http://www.ana.gov.br/mapainicial/doc_Mapas/AMAZONAS.doc)>. Acesso em: 03 dez. 2010.
9. SILANS, A. M. B. P. de, et al. **Desenvolvimento de um modelo hidrológico distribuído para ser incorporado ao sistema de informações hidrológicas do Estado da Paraíba**. In: Simpósio Internacional sobre Gestão de Recursos Hídricos. Gramado, ABRH, 5 a 8, out., 1998.
10. TUCCI, C. E. M. (2000). Regionalização de Vazões. In: Tucci, C. E. M. (ed.), **Hidrologia: Ciência e Aplicação**, Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, ABRH, Edusp, Porto Alegre, RS. **apud** ZEILHOFE, P e LIMA, R. M. N. Régio: uma aplicação SIG para subsidiar a Regionalização de Vazões. **Caminhos de geografia**. MT, V. 6, n. 17, fev. 2006. Disponível em: <<http://www.ig.ufu.br/revista/caminhos.html>>. Acesso em: 07 de abr. 2010. p. 54.