

GERAÇÃO DE SÉRIE DE VAZÃO MÉDIA MENSAL PARA A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO JARI (PARÁ-AMAPÁ)

Marcos Airton de Sousa Freitas¹ & Cláudio Bielenki Junior²

RESUMO --- Trata o presente artigo da determinação de série de vazão média mensal, parte integrante dos estudos de disponibilidade hídrica afluyente ao AHE (Aproveitamento Hidrelétrico) Santo Antônio do Jari, no rio Jari, a fim de subsidiar deliberação sobre a DRDH – Declaração de Reserva de Disponibilidade Hídrica. Na determinação da pluviometria média da bacia foram empregados, tanto dados do território brasileiro, quanto dados básicos de pluviometria oriundos de países limítrofes ao Brasil (Guiana Francesa, Guiana e Suriname). Vale ainda ressaltar, que foi aplicada a metodologia de Thiessen variável para a determinação da precipitação média na bacia. Para a calibração, validação e geração da série de vazão média mensal foi utilizado o modelo chuva-vazão CN-3S, largamente testado e empregado em inúmeras bacias hidrográficas brasileiras. Com isso, foi possível obter, para o período 1931 a 2008, uma série de vazão média mensal, subsídio básico para a emissão da DRDH para o citado AHE.

ABSTRACT --- This article deals with the determination of average monthly flow series, an integral part of studies of water availability to the affluent AHE (Hydroelectric) Santo Antonio do Jari, Jari River in order to support resolution on the DRDH - Statement of Availability Reservation Water. For determining the average rainfall in the basin were employed, both data of the Brazilian territory, the basic data of rainfall from countries bordering Brazil (French Guiana, Guyana and Suriname). Is also worth mentioning, which was applied a methodology for determining the average rainfall in the basin, called the method of Thiessen variable. For calibration, validation and generation of the series of monthly average flow model was used rainfall-runoff CN-3S, widely tested and used in numerous Brazilian river basins. Thus, it was possible to obtain, for the period 1931 to 2008, a series of mean monthly flows, basic allowance for issuing DRDH for the cited AHE.

Palavras-chave: modelo chuva-vazão CN-3S, método de Thiessen variável, DRDH.

1) Especialista em Recursos Hídricos da Agência Nacional de Águas, SPO Área 5 Quadra 3 Bloco L, Brasília, DF, 70610-200. e-mail: masfreitas@ana.gov.br.

2) Especialista em Geoprocessamento da Superintendência de Planejamento da Agência Nacional de Águas, SPO Área 5 Quadra 3 Bloco L, Brasília, DF, 70610-200. e-mail: claudio@ana.gov.br.

1 - INTRODUÇÃO

O presente artigo trata da apresentação dos Estudos Hidrológicos para a definição da série de vazões médias mensais do Posto São Francisco, no rio Jari, no local da UHE Santo Antonio do Jari, formados das seguintes etapas (ANA, 2010):

a) Análise de disponibilidade e verificação de dados pluviométricos e fluviométricos: foram verificados no banco de dados a disponibilidade de dados referentes à pluviometria dos postos pluviométricos na área da bacia e próximos a ela, além da disponibilidade de dados fluviométricos (curvas-chave, medições de vazões, registros de cotas e de vazões);

b) Determinação da precipitação média mensal na bacia do posto São Francisco (UHE Santo Antonio do Jari), para o período de 1971 a 2007: foram utilizadas combinações de 24 postos pluviométricos, localizados no território brasileiro, mais 15 postos pluviométricos localizados na Guiana Inglesa, Suriname e Guiana Francesa, numa malha de Thiessen variável;

c) Determinação da precipitação média mensal na bacia do posto São Francisco (UHE Santo Antonio do Jari), para o período de 1931 a 1970: foram empregadas combinações de 20 postos pluviométricos numa malha de Thiessen variável;

d) Modelagem chuva-vazão - modelo CN3S: a extensão de dados fluviométricos observados na bacia que podem compor a série do posto fluviométrico São Francisco restringe-se ao período de 1973 em diante. Assim, utilizou-se o modelo chuva-vazão CN3S para a extensão da série de fluviometria de 1931 (ano inicial de referência para o SIN) até 1972, a partir da pluviometria média na bacia hidrográfica. O modelo foi calibrado no período 1972 a 1993 e validado no período de 1994 a 2008, com excelente resultado;

e) Geração da série final de vazão média mensal em São Francisco (UHE Santo Antonio do Jari): o período com dados gerados pelo modelo chuva-vazão CN3S (1931 a 1972) foi incorporado ao período com dados observados no posto São Francisco para constituir a série final naquele posto fluviométrico.

A série de vazão determinada nestes Estudos Hidrológicos não se constitui de vazões naturais, por não tratar às alterações devido aos usos consuntivos na bacia. Para a determinação da série de vazão natural final, deve-se, portanto, acrescentar os usos consuntivos mensais estimados para a bacia.

2 – DISPONIBILIDADE DE DADOS FLUVIOMÉTRICOS E PLUVIOMÉTRICOS

Com relação à análise e ao preenchimento de lacunas nos dados fluviométricos privilegiou-se o estudo do regime fluvial no posto fluviométrico São Francisco (Código 19150000), posto sua localização próxima ao local do aproveitamento UHE Santo Antonio do Jari (Figura 1), e em virtude de sua disponibilidade de dados observados.

A Tabela 1 apresenta a série de vazões médias mensais no posto São Francisco.

Tabela 1 - Série de vazões médias mensais no posto São Francisco.

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1972							1077	673	437	215	199	159
1973	354	563	1032	843	2056	2241	1148	747	587	384	311	601
1974	977	2010	2328	2258	1590	2494	2406	1649	939	673	443	467
1975	610	1065	1197	2227	1896	2404	1518	1288	978	521	319	317
1976	561	1443	2400	3121	2913	2333	1880	1053	647	351	206	209
1977	382	687	1292	1594	3147	2064	1362	965	572	402	199	330
1978	653	617	795	1805	1885	1400	1090	981	718	471	284	365
1979	387	993	2110	2156	2061	2212	1485	1164	734	492	333	352
1980	644	594	1149	2075	1554	1465	1080	783	472	251	209	158
1981	312	664	311	511	1383	1002	1012	692	482	249	121	122
1982	555	1221	1498	2437	2587	1888	1073	786	462	224	137	96,6
1983	206	259	387	957	710	465	362	393	218	97,8	42,2	34,1
1984	152	430	993	1091	2521	1665	1126	682	489	277	235	176
1985	395	558	1158	827	2171	2361	1382	1064	642	319	296	618
1986	814	883	991	1288	1288	1930	1404	744	438	225	189	193
1987	542	583	654	924	1642	997	787	446	249	131	58	32,7
1988	282	716	666	906	2568	2120	1809	938	682	408	208	457
1989	905	1177	2074	2519	3268	3085	2239	1241	735	610	584	491
1990	711	1037	1533	2328	2044	1729	1112	817	531	270	185	182
1991	548	1322	1269	1278	2123	3019	1740	1310	769	427	263	162
1992	223	525	1251	1956	1063	758	586	516	257	122	104	150
1993	402	596	1035	1926	1963	1191	903	615	360	250	328	360
1994	714	1264	1720	2012	2893	2180	1370	984	568	508	306	341
1995	836	602	1419	1478	2270	2991	1820	919	590	313	268	296
1996	934	1216	2080	2771	2827	3098	2751	1735	978	611	421	387
1997	713	1041	1421	1347	1864	1208	926	818	386	164	113	128
1998	270	359	697	1010	1203	1064	906	526	282	170	134	145
1999	523	902	981	1858	1897	2363	1385	1073	648	444	217	147
2000	899	1452	2290	3843	4741	2886	2196	1460	851	655	417	353
2001	907	1541	1473	2603	2346	1998	1743	1110	761	432	305	189
2002	405	880	1690	2229	2303	1800	1096	756	387	202	145	211
2003	347	871	1315	1832	2619	2314	1590	1129	621	407	299	224
2004	276	433	1419	1976	2762	1635	1227	1024	523	291	167	104
2005	139	500	1323	2029	2829	1842	1387	879	448	296	200	206
2006	464	1010	1009	1676	2821	2601	1802	1137	649	400	377	320
	estimada			preenchida								

O registro pluviométrico é fundamental para a caracterização do regime hidrológico de uma bacia hidrográfica, porém na Amazônia é muito comum que as séries sejam restritas a períodos mais recentes, ainda assim com importante percentual de falhas. Lamentável é o fato de existir apenas um posto pluviométrico com razoável quantidade de dados no interior da bacia hidrográfica, com área de mais 50 mil quilômetros quadrados.

Na região da bacia hidrográfica do rio Jari foram identificados, porém, 24 postos pluviométricos de interesse no território brasileiro, além de 15 postos pluviométricos localizados na Guiana Inglesa, Suriname e Guiana Francesa, recentemente incorporados à base de dados da Agência Nacional de Águas - ANA, mostrados na Figura 1, a seguir, usados para a determinação da precipitação média na bacia no período de 1971 a 2007.

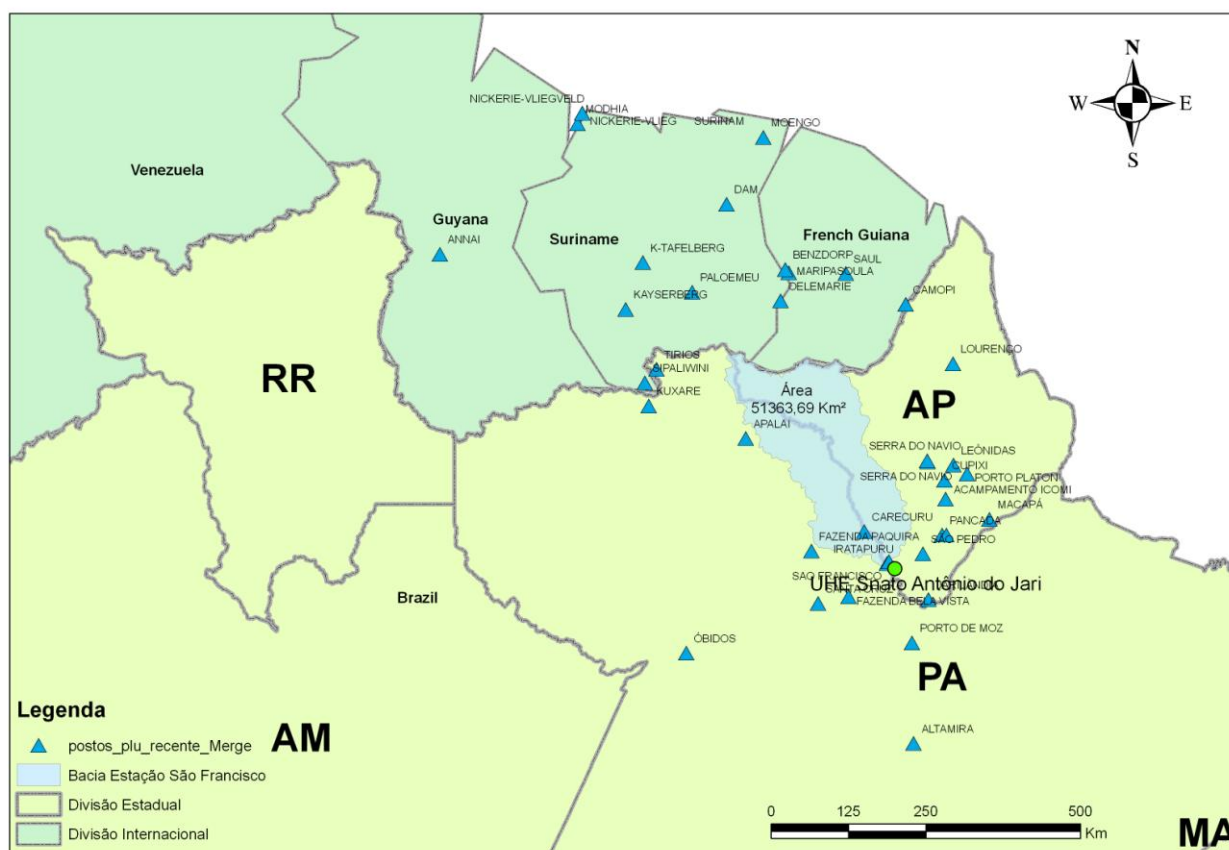


Figura 1 – Postos pluviométricos na região da UHE Santo Antonio do Jari (Período: 1971-2007)

Assim é que, para a caracterização do regime hidrológico da bacia hidrográfica no período de 1931 a 1970, foram identificados 20 postos pluviométricos, alguns deles, apresentando, entretanto, grande distância do UHE Santo Antonio do Jari, conforme localização mostrada na Figura 2.

Dentre os métodos para estimativa de precipitação média em bacias hidrográficas, três são os mais usuais: Método da Média Aritmética; o Método de Thiessen e o Método das Isoietas. Entretanto, desses o mais largamente empregado é o denominado Método de Thiessen (Linsley et

al., 1975). Esse método consiste em dar pesos aos totais precipitados em cada posto, proporcionais à área de influência de cada um, determinada a partir dos denominados polígonos de Thiessen (Souza Pinto et al., 1976).

Porto et al. (2002) empregando 74 postos pluviométricos distribuídos no Estado do Ceará, objetivando gerar mapas georeferenciados da distribuição espaço-temporal da precipitação no estado, estimou a precipitação média pelo Método de Thiessen, empregando-se o software Arcview 3.2. Pruski et al. (2004) utilizando-se de 178 estações pluviométricas determinaram a precipitação média, para cada área de drenagem, da bacia do rio São Francisco, pelo Método de Thiessen.

Gomig et al. (2007) determinam as áreas de influências das estações pluviométricas na bacia do rio do Peixe, em Santa Catarina, também pelo Método dos Polígonos de Thiessen. Freitas (2010) emprega o Método de Thiessen para inúmeras bacias de rios intermitentes do Nordeste do Brasil. Tibúrcio & Holanda de Castro (2007) com auxílio do Arcview, determinam a altura pluviométrica média para a bacia de Aracoiaba, no Estado do Ceará, empregando o Método de Thiessen e o Método das Isoietas. Todas essas aplicações, encontradas na literatura, usam, contudo, uma malha fixa de polígonos de Thiessen. A metodologia empregada neste artigo, porém, faz uso de uma malha variável, em função da disponibilidade de dados de cada estação pluviométrica.

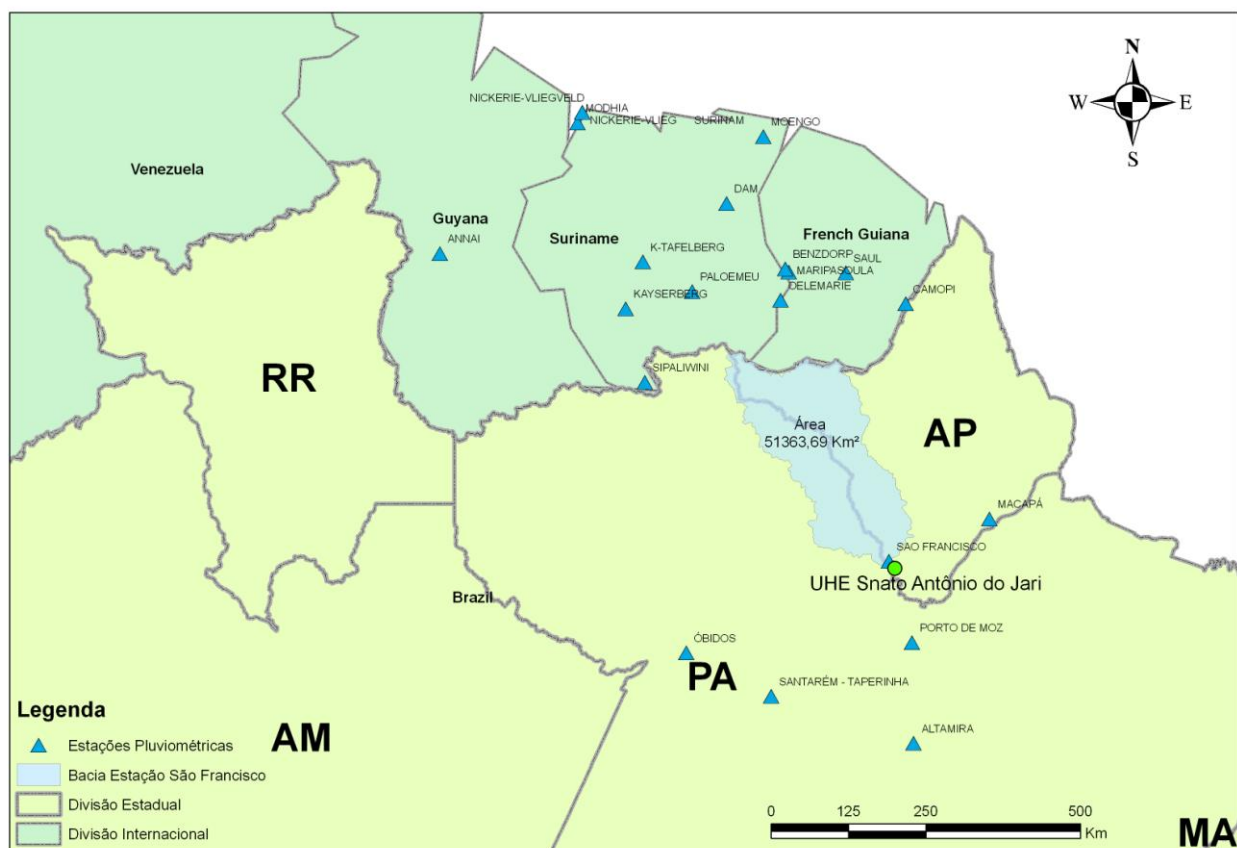


Figura 2 – Postos pluviométricos na região da UHE Santo Antonio do Jari (Período: 1931-1970)

Para a determinação da precipitação média mensal na bacia do posto São Francisco (UHE Santo Antonio do Jari), para o período de 1971 a 2007, foram utilizadas combinações de 39 postos pluviométricos numa malha de Thiessen variável, de acordo com a disponibilidade de dados nos postos, resultando em 174 combinações de postos. Os coeficientes de cada combinação foram obtidos pela utilização do programa ArcGis® ;

Para a determinação da precipitação média mensal na bacia do posto São Francisco (UHE Santo Antonio do Jari), para o período de 1931 a 1970, foram empregadas combinações de 20 postos pluviométricos numa malha de Thiessen, variando conforme a disponibilidade de dados nos postos, resultando em 55 combinações de postos. Os coeficientes de cada combinação foram obtidos pela utilização do programa ArcGis®;

3 – PLUVIOMETRIA MÉDIA

Para o cálculo da precipitação média na bacia do posto pluviométrico São Francisco, para o período de 1971 a 2007, foram considerados os dados de altura pluviométrica de 24 postos localizados na região de estudo (dentro e no entorno da bacia hidrográfica), no território brasileiro, e listados na Tabela 2, além de 15 postos pluviométricos localizados na Guiana Inglesa, Suriname e Guiana Francesa, recentemente incorporados à base de dados da ANA (códigos 8352001, 8354001, 8354004, 8354000, 8256000, 8356001, 8355000, 8353003, 8356000, 8454011, 8359003, 8658008, 8557013, 8557000, 8554013) . Estes dados foram obtidos da base de dados da ANA (HIDRO), tendo sido utilizados em sua maioria os dados, que passaram por um processo de consistência, utilizando-se de dados brutos apenas na falta dos primeiros.

Para efeito de cálculo da precipitação média optou-se pela utilização de Polígonos de Thiessen, variando em conformidade com a disponibilidade de dados nos postos pluviométricos para cada mês da série no período de janeiro de 1971 a dezembro de 2007. Este procedimento resultou em 174 combinações distintas de Polígonos de Thiessen para o cálculo dos ponderadores, que representam a influência de cada posto em cada mês da série para a composição da chuva média. Os Polígonos de Thiessen foram gerados por meio de otimização de ferramentas de geoprocessamento disponibilizadas no software ArcGis® em função da localização geográfica de cada posto e posteriormente recortados pela área da bacia de contribuição considerada. Os ponderadores calculados foram multiplicados pelas alturas pluviométricas de cada posto e o seu resultado acumulado gerando assim a série de precipitação média mensal na bacia.

Tabela 2 - Postos pluviométricos do território brasileiro para composição da precipitação média (período: 1971 a 2007)

Nome	Código
JARILÂNDIA	151000
PORTO DE MOZ	152001
FAZENDA BELA VISTA	152006
ÓBIDOS	155001
SANTA CRUZ	253000
ALTAMIRA	352001
ACAMPAMENTO ICOMI	8051011
SERRA DO NAVIO	8052000
APALAI	8154000
CUPIXI	8051012
SERRA DO NAVIO	8052001
KUXARE	8156001
PORTO PLATON	8051000
LEÔNIDAS	8051005
MACAPÁ	8051002
LOURENÇO	8251003
TIRIOS	8255000
CARECURU	52001
PANCADA	51003
IRATAPURU	52002
VILA DO MARACÁ	51004
SÃO PEDRO	52003
FAZENDA PAQUIRA	53000
SÃO FRANCISCO	52000

Para o cálculo da precipitação média na bacia do posto fluviométrico São Francisco, para o período de 1931 a 1970, foram considerados os dados de altura pluviométrica de 6 postos localizados na região de estudo (dentro e no entorno da bacia hidrográfica) e listados na Tabela 3, além de 15 postos pluviométricos localizados na Guiana Inglesa, Suriname e Guiana Francesa, recentemente incorporados à base de dados da ANA (códigos 8352001, 8354001, 8354004, 8354000, 8256000, 8356001, 8355000, 8353003, 8356000, 8454011, 8359003, 8658008, 8557013, 8557000, 8554013). Estes dados foram obtidos da base de dados da ANA (HIDRO), tendo sido utilizados em sua maioria os dados, que passaram por um processo de consistência, utilizando-se de dados brutos apenas na falta dos primeiros.

Tabela 3 - Postos pluviométricos do território brasileiro para composição da precipitação média (período: 1931 a 1970)

Nome	Código
ALTAMIRA	352001
ÓBIDOS	155001
SANTARÉM - TAPERINHA	254001
MACAPÁ	8051002
PORTO MOZ	152001
SÃO FRANCISCO	52000

Neste caso, também optou-se pela utilização de Polígonos de Thiessen, variando em conformidade com a disponibilidade de dados nos postos pluviométricos para cada mês da série no período de janeiro de 1931 a dezembro de 1970. Este procedimento resultou em 55 combinações distintas de Polígonos de Thiessen para o cálculo dos ponderadores, que representam a influência de cada posto em cada mês da série para a composição da chuva média. Os Polígonos de Thiessen foram gerados da mesma forma anterior e posteriormente recortados pela área da bacia de contribuição considerada. Os ponderadores calculados foram multiplicados pelas alturas pluviométricas de cada posto e o seu resultado acumulado gerando assim a série de precipitação média mensal na bacia para o período considerado.

A Tabela 4 apresenta as estatísticas da série de precipitação média espacial na bacia. A precipitação média anual de 2219 mm (período de 1931 a 2008) pode ser considerada esperada para aquela região.

Tabela 4 – Estatísticas da pluviometria média mensal na bacia

Período: 1931-1970													
Mínima	80	103	148	144	184	137	79	54	6	11	23	27	1659
Média Ger	215	233	284	306	328	239	165	104	52	44	84	164	2219
DesvioP	75	72	80	68	83	70	49	35	26	27	39	59	337
Máxima	402	413	451	416	585	482	276	229	142	119	175	293	2902

Período: 1971-2008													
Mínima	70	104	132	155	140	113	64	35	13	6	2	20	1434
Média Obs	234	237	288	319	331	221	181	112	61	54	57	124	2219
DesvioP	86	71	68	82	96	68	52	40	34	30	37	59	373
Máxima	464	455	407	575	587	419	281	221	188	139	155	240	3032

Período: 1931-2008													
Mínima	70	103	132	144	140	113	64	35	6	6	2	20	1434
Média	225	235	286	312	330	231	173	108	56	49	71	144	2219
DesvioP	81	71	74	75	89	69	51	38	30	29	40	62	352
Máxima	464	455	451	575	587	482	281	229	188	139	175	293	3032
MediaPC	184	184	184	184	184	184	184	184	184	184	184	184	184

Série de pluviometria média mensal

A série de pluviometria média mensal, em milímetros, para o período de 1931 a 2008 é mostrada na Tabela 5.

4 – MODELO CHUVA-VAZÃO NO POSTO SÃO FRANCISCO

Objetivando estender a série de vazões médias mensais do posto São Francisco (com área de drenagem de 51.364 km²) foi utilizado o modelo chuva-vazão CN3S. Esse modelo foi calibrado, no período de 1972 a 1993, validado nos períodos de 1994 a 2008, e em seguida empregado para a extensão da respectiva série de vazões, no período de 1931 a 1972.

O modelo CN-3S (Curve Number 3 Step), com vasta experiência de aplicação na região semi-árida nordestina, assim como no bioma cerrado brasileiro, baseia-se nas relações desenvolvidas pelo U. S. Conservation Service das curvas CN (Curve Number) e é composto de seis parâmetros de calibragem. Trata-se de um modelo conceitual para a geração de deflúvios que foi desenvolvido por Taborga & Freitas (1987).

O modelo determinístico chuva-vazão CN-3S (Curve Number with Three Step Antecedent Precipitation) foi desenvolvido com o objetivo de gerar vazões sintéticas para a simulação de operações de reservatórios. O CN-3S utiliza como dados de entrada, necessário ao cálculo da lâmina de escoamento superficial de um determinado intervalo de tempo, a precipitação pluviométrica do próprio período e as precipitações dos três períodos antecedentes.

Tabela 5 – Série de pluviometria média usada na bacia do posto São Francisco

Série de Precipitação Mensal Média, em mm - Bacia do Posto São Francisco													
Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Ano
1931	157	132	293	295	293	162	110	56	63	16	90	27	1695
1932	136	172	302	144	260	149	183	54	25	40	40	156	1659
1933	187	196	300	378	209	239	183	125	24	61	97	66	2065
1934	247	275	335	334	486	362	249	118	59	88	113	237	2902
1935	159	267	283	243	267	294	180	70	44	42	58	187	2093
1936	157	212	198	163	260	231	144	124	23	60	31	75	1677
1937	183	103	322	354	326	200	79	95	13	30	87	174	1965
1938	208	216	348	363	310	241	214	66	57	28	69	194	2312
1939	380	336	339	409	255	252	220	88	71	40	26	183	2600
1940	198	140	273	387	316	271	146	56	6	18	27	65	1902
1941	98	223	204	256	393	254	97	102	48	26	85	199	1985
1942	274	173	154	262	317	292	103	89	41	112	49	203	2068
1943	148	191	355	367	411	275	179	107	50	20	23	269	2393
1944	312	413	386	365	269	189	138	229	84	33	74	237	2729
1945	178	347	197	364	297	187	137	122	75	11	61	105	2082
1946	280	254	270	273	497	203	251	63	34	39	127	223	2515
1947	367	298	245	360	338	175	172	105	69	81	137	156	2504
1948	205	148	148	259	279	250	129	97	72	68	175	188	2017
1949	402	212	261	384	309	202	123	65	78	54	138	219	2447
1950	324	283	330	399	289	482	166	129	69	46	101	186	2803
1951	202	130	183	247	347	154	182	120	41	31	67	77	1780
1952	201	231	261	290	293	154	90	103	83	20	33	111	1871
1953	172	205	262	256	184	185	256	153	50	37	80	293	2134
1954	174	313	398	301	282	222	141	113	54	35	125	104	2262
1955	150	320	430	268	375	137	163	120	68	119	123	146	2418
1956	164	306	451	306	394	246	234	83	51	104	76	184	2598
1957	160	178	262	248	302	171	152	142	142	28	52	214	2051
1958	222	164	177	265	357	314	144	79	21	31	45	183	2001
1959	80	162	352	416	270	187	85	105	21	69	52	91	1890
1960	220	208	166	281	188	196	174	147	93	42	105	193	2012
1961	213	328	154	345	356	214	186	147	60	32	100	179	2313
1962	191	189	208	195	406	224	144	103	27	60	105	161	2012
1963	194	249	284	243	274	169	146	89	29	25	71	235	2007
1964	329	359	333	376	585	321	207	77	25	14	66	164	2856
1965	110	150	230	228	339	305	121	132	48	21	58	140	1882
1966	266	251	295	302	349	363	216	65	38	11	60	110	2327
1967	272	256	378	243	288	302	171	161	80	16	121	179	2467
1968	271	254	417	328	332	283	187	83	32	38	129	172	2526
1969	221	235	298	387	496	287	276	66	46	51	158	152	2674
1970	196	251	269	342	337	229	134	117	65	73	139	109	2261
1971	255	356	407	386	399	292	217	150	73	47	18	20	2620
1972	144	160	152	155	166	167	212	73	87	84	52	216	1667
1973	224	280	336	358	439	280	281	159	188	132	103	209	2987
1974	347	307	257	165	268	274	245	139	91	79	64	155	2391
1975	183	234	265	382	367	249	199	169	132	68	51	207	2506
1976	333	286	396	367	285	238	172	82	13	6	50	131	2358
1977	197	256	321	383	405	198	171	136	90	67	23	192	2439
1978	281	215	240	286	283	206	167	221	75	68	71	181	2294
1979	116	302	373	256	301	207	150	126	90	63	74	174	2233
1980	256	104	284	325	270	257	179	80	42	33	44	43	1917
1981	216	201	132	306	287	128	234	117	60	24	22	139	1867
1982	224	297	335	430	353	211	179	84	40	22	21	75	2270
1983	85	120	238	278	169	135	111	144	34	10	7	102	1434
1984	238	271	289	375	454	192	203	173	95	88	80	114	2572
1985	238	317	254	278	495	328	259	163	35	28	148	240	2782
1986	282	212	277	298	291	344	152	97	66	64	97	161	2340
1987	398	160	175	304	271	188	215	59	68	23	20	96	1978
1988	345	455	186	326	587	419	201	94	80	53	67	219	3032
1989	234	206	338	218	401	231	264	89	44	75	114	163	2378
1990	252	215	313	237	281	155	117	105	54	39	47	74	1890
1991	289	197	181	221	247	229	218	148	55	52	2	40	1880
1992	86	224	343	284	140	143	93	97	17	20	31	57	1536
1993	156	165	297	339	237	159	121	82	37	72	155	149	1968
1994	299	256	323	375	470	207	167	143	22	81	81	144	2568
1995	235	132	323	272	454	335	155	35	40	29	100	96	2206
1996	464	262	400	249	426	293	265	120	48	44	70	75	2717
1997	270	207	327	227	323	113	116	141	58	28	37	96	1941
1998	194	160	252	262	246	191	166	54	29	29	72	141	1797
1999	240	210	276	309	358	153	161	124	57	68	31	76	2063
2000	327	244	361	575	413	199	242	73	56	46	43	92	2669
2001	324	285	229	368	290	293	103	72	77	63	34	28	2166
2002	223	244	245	338	305	192	64	67	13	22	35	137	1885
2003	144	310	256	379	355	253	199	112	73	42	44	47	2214
2004	70	311	331	433	292	157	190	82	53	55	6	68	2049
2005	169	206	321	256	233	200	128	135	14	66	36	142	1908
2006	165	286	258	363	387	229	179	85	72	19	99	85	2228
2007	153	146	366	338	305	149	152	144	55	139	94	171	2212
2008	248	219	273	439	316	222	220	83	77	89	27	156	2369
Mínima	70	103	132	144	140	113	64	35	6	6	2	20	1434
Média	225	235	286	312	330	231	173	108	56	49	71	144	2219
DesvioP	81	71	74	75	89	69	51	38	30	29	40	62	352
Máxima	464	455	451	575	587	482	281	229	188	139	175	293	3032
MediaPC	184	184	184	184	184	184	184	184	184	184	184	184	184

Para a avaliação do valor dessa lâmina, empregou-se as equações de escoamento real com o escoamento potencial, conforme as equações do U. S. Conservation Service:

$$\frac{(P - I_m) - Q}{S} = \frac{Q}{(P - I_m)} \quad (01)$$

onde:

P – altura de chuva (mm);

Q – lâmina de escoamento direto (mm);

S – diferença máxima de potencial entre P e Q;

Im – intercepção, infiltração e armazenamento superficial.

Tirando o valor de Q na expressão anterior, com $I_m = ALFA * S$, resulta em:

$$Q = \frac{(P - ALFA * S)^2}{P + (1 - ALFA) * S} \quad (02)$$

Os técnicos do U. S. Conservation Service adotam ALFA igual 0.2, ou seja, 20% da capacidade de armazenamento do solo. Para o modelo CN-3S, entretanto, ALFA é um parâmetro de calibragem. Nos diversos casos analisados (Freitas & Porto, 1990), a calibração, adotando-se o valor de ALFA igual a 0.2, mostrou-se satisfatória, o que reduz para cinco o número de parâmetros a serem ajustados. A versão aqui empregada usa cinco parâmetros.

Conforme detalhes encontrados em Taborga & Freitas (1987), a partir dos valores numéricos dos CNs tabelados pelo SCS, em função das características da chuva antecedente e dos complexos solo-vegetação, calculando-se as curvas de regressão potencial, chega-se a seguinte regressão múltipla:

$$CNV_j = 0.925 * CNI^{1.019} * V_j^{8.256 - 0.479 * \ln(CNI)} \quad (03)$$

onde CNI é um parâmetro de ajuste do modelo.

O valor de V_j na equação acima exprime o coeficiente de chuva antecedente, empregando como insumo a chuva dos três intervalos de tempo antecedentes ao intervalo em questão. Os valores de V_j ($1 \leq V_j \leq 3$), são computados pela expressão a seguir:

$$V_j = 1 + BETA * (P_{j-1} + K0 * P_{j-2} + K0^2 * P_{j-3}) \quad (04)$$

onde:

BETA e K0 – parâmetros de ajuste da chuva antecedente,

Com o valor de CNV_j obtido, calcula-se, então o valor de S_j pela equação seguinte:

$$CN = \frac{1000}{(S / 25.4) + 10} \quad (05)$$

A equação anterior representa as relações das curvas CN (Curve Number), em função da variável S, ou seja, da diferença máxima de potencial. A lâmina referente ao escoamento direto Qup é obtida pela Equação 01, com os valores de precipitação P e do parâmetro ALFA.

Os valores de CN, em função da lâmina de precipitação antecedente e do uso e classe do solo, estão dispostos na Tabela 6. Para se encontrar a relação entre os dados (V=1, V=2 e V=3) pode ser empregada uma regressão cruzada. Para cada coluna da Tabela 6 foi ajustada uma equação de regressão. As colunas dos valores de x e y contêm os coeficientes e os expoentes entre V=1, V=2 e V=3, para cada valor de CN, conforme a equação descrita a seguir:

$$CNV = x.V^y \quad (06)$$

Após, é realizada uma regressão entre a coluna pivô (CN-I) com os coeficientes apresentados na coluna x.

$$x = 0.925(CN1)^{1.019} \quad (07)$$

Entre a coluna pivô (CN-I) e a coluna y é ajustada uma regressão logarítmica dada por:

$$y = 2.356 - 0.478.\ln(CN1) \quad (08)$$

Tabela 6 - Valores de CN e os coeficientes de regressão

V=1 CN-I	V=2 CN-II	V=3 CN-III	x	y
4	10	26	3.75	1.663
7	15	33	6.65	1.378
9	20	39	8.73	1.315
12	25	45	11.72	1.188
15	30	50	14.76	1.086
19	35	55	18.73	0.958
23	40	60	22.72	0.865
27	45	65	26.72	0.793
31	50	70	30.73	0.736
35	55	75	34.76	0.689
40	60	79	39.77	0.616
45	65	83	44.80	0.554
51	70	87	50.75	0.483
57	75	91	56.72	0.423
63	80	94	62.80	0.362
70	85	97	69.80	0.295
78	90	98	77.99	0.208

Substituindo-se ambas as equações acima na Equação 06, resulta-se em:

$$CNV_j = 0.925(CN1)^{1.019} .V_j^{2.356-0.478.\ln(CN1)} \quad (09)$$

O coeficiente de regressão dessa equação é 0,997. Os valores de V_j na equação correspondem ao coeficiente das lâminas mensais de precipitação antecedente:

$$V_j = 1 + BETA.(N_{j-1} + K0.N_{j-2} + K0^2.N_{j-3}) \quad (10)$$

$$V_j = \text{Coeficiente de lâmina de precipitação antecedente } (1 \leq V_j \leq 3),$$

BETA= Parâmetro de precipitação antecedente;

K0 = Parâmetro de precipitação antecedente.

O escoamento básico ou de base é calculado sob a hipótese de que uma parcela da diferença entre a precipitação e a lâmina de escoamento direto, a uma taxa K1, alimenta o lençol freático, e este sofre, por sua vez, uma depleção a uma taxa K2, correspondente ao escoamento básico Q_{low} (mm), consoante sequência adiante:

$$R_j = R_{j-1} + K1*(P_j - Q_{up}), K1 < 1 \quad (11)$$

$$Q_{low} = K2*R_j \quad (12)$$

O lençol freático após a depleção Q_{low} , no fim do período j, resulta:

$$R_j = R_{j-1} + K1*(P_j - Q_{up}) - Q_{low}, \quad (13)$$

Então, teremos o escoamento total dado por:

$$Q_{total} = Q_{up} + Q_{low} \quad (14)$$

Como condição inicial de R_0 , pode-se adotar, para rios não perenes o valor de zero e para rios perenes, calcula-se por iteração, até atingir a quantia do primeiro valor de vazão observado. Posto a grande dimensão da bacia hidrográfica foi empregada uma defasagem temporal de um mês na resposta da vazão.

Calibração e validação

A Tabela 7 mostra os parâmetros otimizados do modelo CN3S para a bacia de drenagem do Posto São Francisco, calibrados no período de 1972 a 1993.

Tabela 7 - Parâmetros otimizados do modelo CN3S para a bacia de drenagem do Posto São Francisco, calibrado no período de 1972 a 1993).

Modelo CN-3S	
CN1	20,00
ALFA	0,20
BETA	0,00032
K0	0,60
K1	0,270
K2	0,900

A Figura 3 apresenta as vazões calculadas e observadas para o período de calibração (1972 a 1993) e a Figura 4 mostra as curvas de permanência das vazões médias mensais calculadas e observadas no posto São Francisco, para o período de calibração. A Tabela 8 mostra os parâmetros estatísticos (média, desvio padrão) das séries de vazões médias mensais calculadas e observadas no posto São Francisco, no período de calibração, bem como o coeficiente de escoamento (c.e.), em l/s.km², para esse mesmo período.

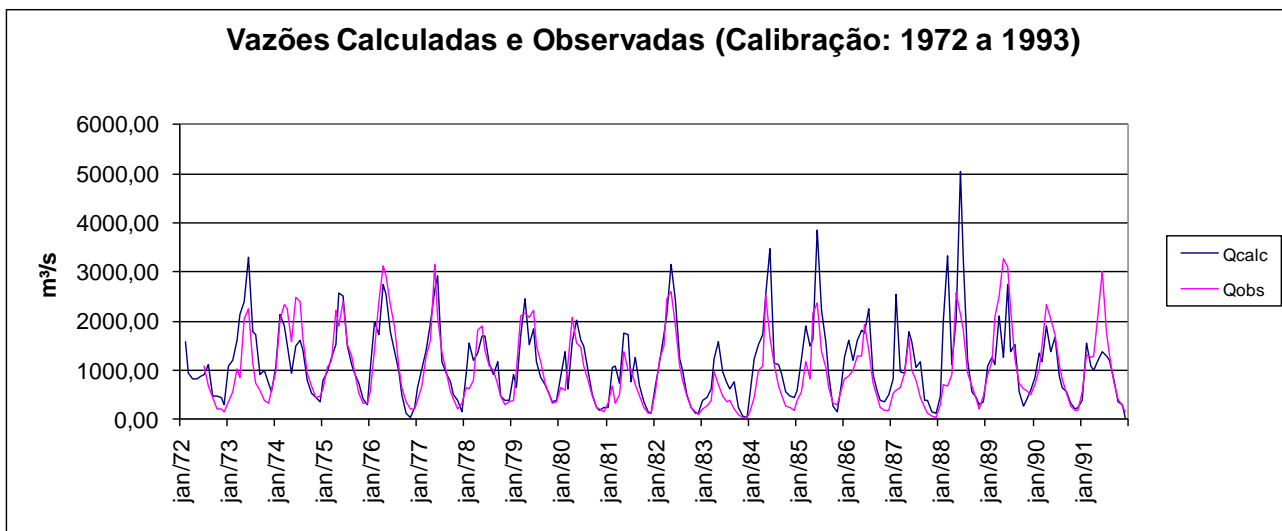


Figura 3 - Vazões Calculadas e Observadas (Período de Calibração: 1972 a 1993).

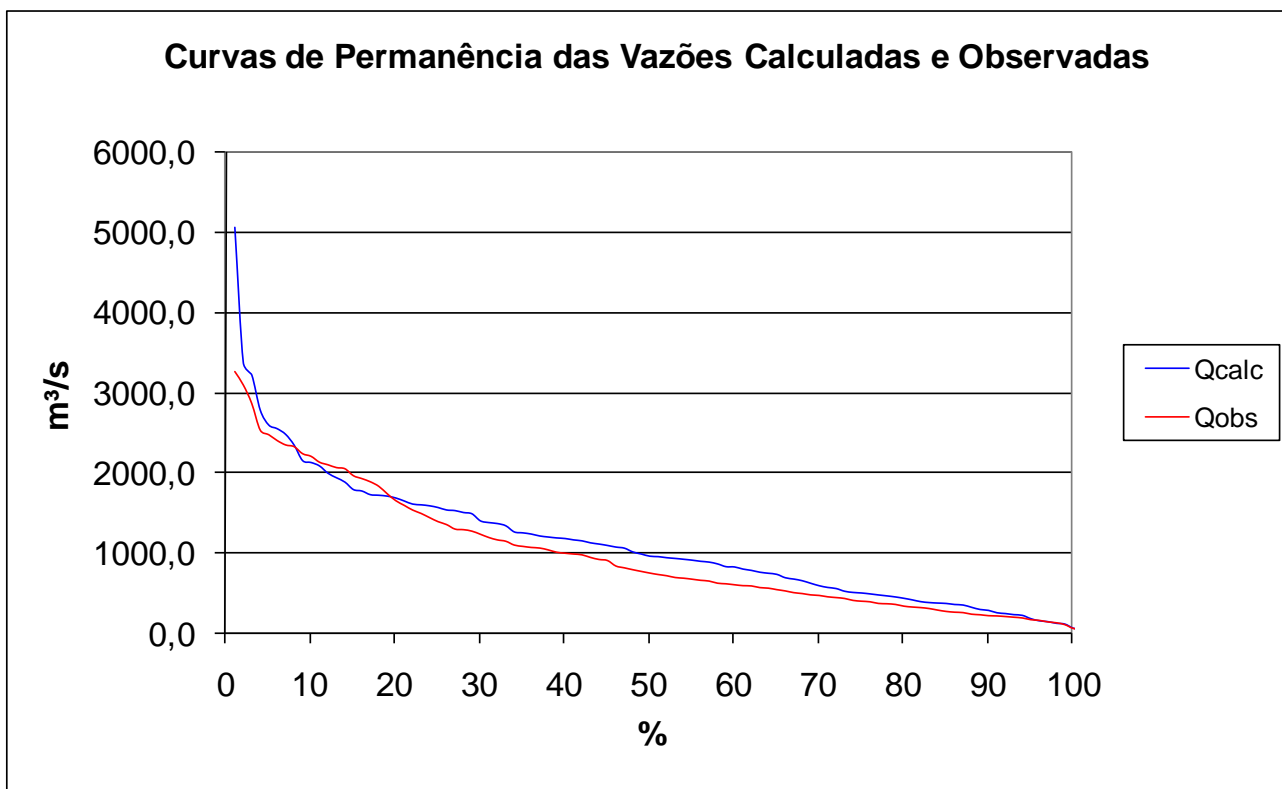


Figura 4 - Curvas de Permanência das Vazões Calculadas e Observadas (Período de Calibração: 1972 a 1993).

Tabela 8 - Parâmetros estatísticos das séries de vazões médias mensais calculadas e observadas no posto São Francisco, no período de calibração (1972 a 1993).

	Qcal (m³/s)	Qobs(m³/s)
média	1096,58	969,56
desv pad	772,36	745,83
c.e. (l/s.km²)	21,35	18,88

A Figura 5 apresenta as vazões calculadas e observadas para o período de validação (1994 a 2008) e a Figura 6 mostra as curvas de permanência das vazões médias mensais calculadas e observadas no posto São Francisco, para o período de validação. A Tabela 9 mostra os parâmetros estatísticos (média, desvio padrão) das séries de vazões médias mensais calculadas e observadas no posto São Francisco, no período de validação, bem como o coeficiente de escoamento (c.e.), em l/s.km², para esse mesmo período.

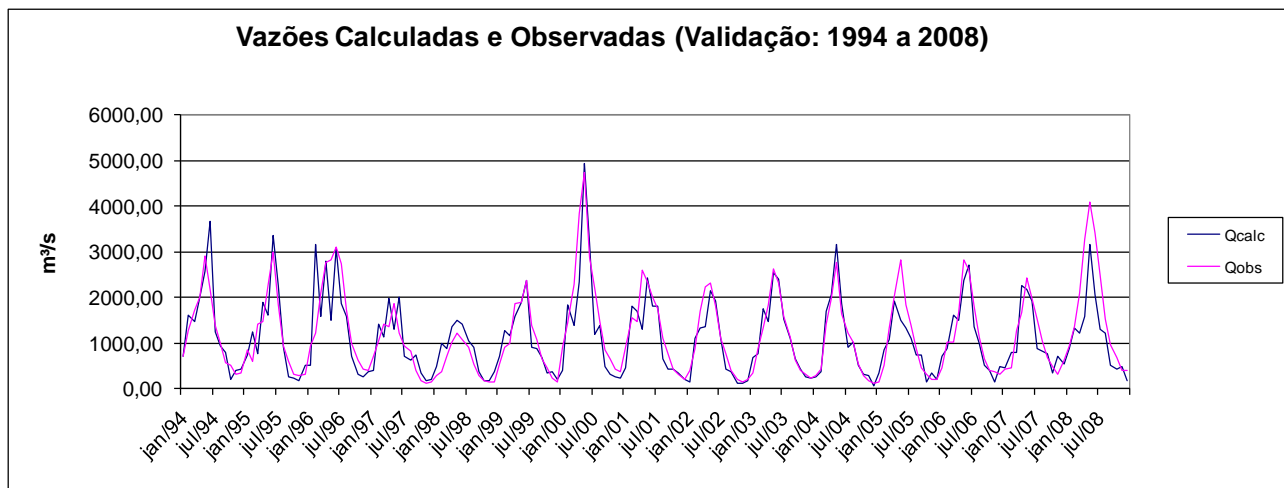


Figura 5 - Vazões Calculadas e Observadas (Período de Validação: 1994 a 2008).

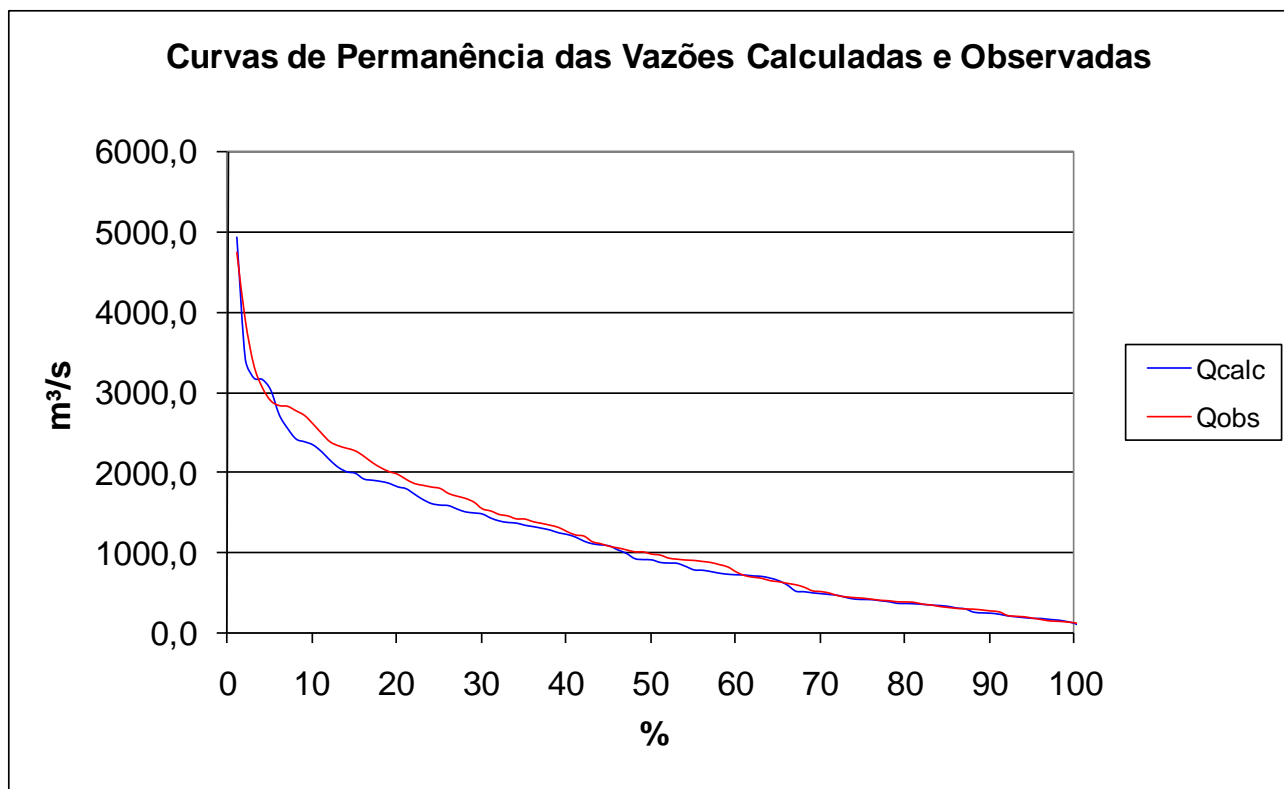


Figura 6 - Curvas de Permanência das Vazões Calculadas e Observadas (Período de Validação: 1994 a 2008).

Tabela 9 - Parâmetros estatísticos das séries de vazões médias mensais calculadas e observadas no posto São Francisco, no período de validação (1994 a 2008).

	Qcal (m³/s)	Qobs(m³/s)
média	1104,02	1186,62
desv pad	848,02	910,63
c.e. (l/s.km²)	21,49	23,10

Série de vazão média mensal

A Figura 7 apresenta as permanências de vazões médias no posto São Francisco e, pela premissa de proximidade adotada, no aproveitamento Santo Antonio do Jari. A série de vazão média mensal no local do referido aproveitamento é apresentada na Tabela 10. Vale ressaltar, que os meses de maio e junho de 2005 foram determinados a partir de interpolação das cotas e posterior aplicação da curva-chave. Os meses de fevereiro e dezembro de 2007 foram preenchidos a partir das cotas diárias aplicadas à curva-chave, conforme estudos do Consórcio Amapá Energia.

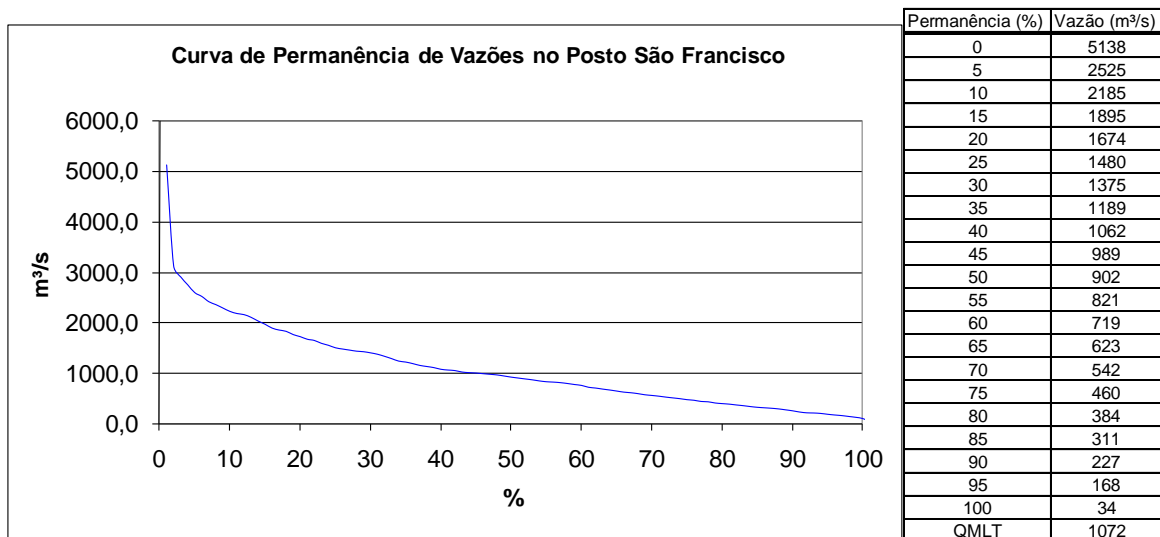


Figura 7 - Curvas de Permanência das Vazões (1931 a 2008).

5 – CONCLUSÕES

Estes Estudos Hidrológicos determinaram a série de vazões afluentes na seção do posto fluviométrico São Francisco (e, por proximidade, na UHE Santo Antonio do Jari), localizado no Jari, para o período 1931 a 2008, com o objetivo de instrumentalizar a ANA para se pronunciar sobre solicitação de DRDH para a citada UHE.

A prática de uso de polígonos de Thiessen variáveis possibilitou agregar uma grande quantidade de postos pluviométricos sem a geração de dados sintéticos oriundos de preenchimentos privilegiando os dados observados para a geração da precipitação média na bacia.

O modelo CN3S mostrou-se eficiente para a geração de dados de vazão simulados a partir da precipitação média da bacia para os períodos sem observações, estendendo a série até o período requerido para as simulações do setor elétrico.

BIBLIOGRAFIA

ANA – Agência Nacional de Águas – Nota Técnica Conjunta nº 005/2010/ SGH-NHI. Revisão dos Estudos de Viabilidade do AHE Santo Antônio do Jari – Estudos de Disponibilidade Hídrica, Brasília – DF.

Freitas, M. A. S. Que Venha a Seca: modelos para gestão de recursos hídricos em regiões semiáridas, Ed. CBJE, Rio de Janeiro, 1ª ed., 2010, 413p.

Freitas, M. A. S. & Porto, A. S. Considerações Sobre um Modelo Determinístico Chuva-Vazão Aplicado às Bacias do Semi-Árido Nordeste. Revista Tecnologia (UNIFOR), Fortaleza, v. 1, n. 11, p. 45-49, 1990.

Gomig, K., Lindner, E. A. & Kobiyana, M. Áreas de influência das estações pluviométricas na bacia rio do Peixe/SC pelo método de polígonos de Thiessen utilizando imagem de satélite e SIG. In: Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE, p. 3373-3380.

Linsley, R. K., Kohler, M.A., and Paulhus, J.L.H. Hydrology for Engineers. Second Edition. McGraw-Hill, New York, 1975, 482p.

Porto, M. M., Andrade, E. M. & Teixeira, A. S. Emprego do Arcview na Determinação das regiões de Precipitações Homogêneas para o Estado do Ceará. In: Anais do II Simpósio de Recursos Hídricos do Centro Oeste, Campo Grande, 2002.

Pruski, F. F., Pereira, S. B., Novaes, L. F., Silva, D. D. & Ramos, M. M. Precipitação média anual e vazão específica média de longa duração, na Bacia do São Francisco. In: Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.8, n.2/3, p.247-253, 2004.

Souza Pinto, N. L. et al. Hidrologia Básica. São Paulo, Edgard Blücher, 1976.

Taborga, J. & Freitas, M. A. S. Simulação da Lâmina de Escoamento Mensal. In: III Simpósio Luso-Brasileiro de Hidráulica e Recursos Hídricos, 1987, Salvador. Anais do III Simpósio Luso Brasileiro de Hidráulica e Recursos Hídricos, 1987. v. 2. p. 558-570.

Tibúrcio, E. C., Castro, M. A. H. Uma Aplicação de SIG para Determinação de Altura Pluviométrica Média em Bacias Hidrográficas. In: XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, São Paulo, 2007.

Tabela 10 - Vazões médias mensais na UHE Santo Antonio do Jari (1931 a 2008).

Série de Vazão Mensal Média, em m³/s - Posto São Francisco													
Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Ano
1931	576	1648	798	1650	1766	1775	930	623	332	337	113	446	916
1932	174	671	894	1718	841	1426	846	964	357	156	209	212	706
1933	773	977	1044	1746	2533	1214	1338	1006	702	186	313	500	1028
1934	368	1259	1561	2110	2172	3815	2569	1504	704	352	459	592	1455
1935	1225	886	1474	1664	1386	1546	1766	1017	437	253	228	303	1016
1936	930	850	1116	1066	889	1431	1286	817	678	178	305	179	810
1937	379	917	587	1844	2292	2104	1148	490	504	111	156	434	914
1938	882	1095	1162	2177	2431	1980	1405	1188	432	316	166	349	1132
1939	970	2399	2175	2238	2972	1556	1467	1230	541	397	231	150	1361
1940	894	1041	779	1504	2581	2023	1637	846	354	64	93	138	996
1941	328	503	1132	1098	1425	2660	1521	605	554	286	153	425	891
1942	1000	1525	972	836	1434	1929	1776	644	494	247	566	293	976
1943	1005	815	1003	2210	2464	2981	1725	1007	613	301	125	122	1198
1944	1364	1848	2895	2752	2551	1659	1057	769	1210	524	211	379	1435
1945	1202	977	2139	1121	2351	1855	1060	764	665	426	97	304	1080
1946	535	1496	1437	1567	1605	3857	1223	1433	435	209	208	634	1220
1947	1146	2322	1848	1429	2367	2222	1010	931	601	394	430	701	1283
1948	822	1074	821	795	1402	1616	1430	754	543	399	367	880	909
1949	991	2646	1232	1492	2599	1965	1151	706	386	414	300	695	1215
1950	1135	1944	1697	2100	2827	1821	3766	1004	719	406	264	512	1516
1951	947	1068	732	955	1342	2185	909	965	675	263	173	340	880
1952	406	1010	1240	1472	1724	1777	891	523	547	454	141	175	863
1953	553	883	1076	1461	1463	1022	995	1418	866	329	211	407	890
1954	1568	977	1854	2756	1916	1724	1260	800	622	321	201	624	1219
1955	562	778	1854	3055	1656	2568	835	868	663	394	611	654	1208
1956	766	865	1755	3283	1985	2808	1486	1329	523	299	531	418	1337
1957	927	862	944	1449	1404	1821	977	828	766	759	210	272	935
1958	1058	1188	905	942	1469	2296	1990	851	464	149	166	233	976
1959	905	476	828	2136	2938	1671	1051	512	557	159	346	285	989
1960	466	1116	1118	912	1584	1046	1050	944	800	528	253	530	862
1961	983	1132	1984	902	2137	2362	1235	1020	807	371	192	499	1135
1962	914	1011	1009	1111	1051	2724	1311	820	578	188	310	534	964
1963	829	1017	1359	1656	1386	1600	955	796	509	191	141	354	899
1964	1184	1975	2371	2184	2611	5138	2228	1205	488	168	84	325	1663
1965	824	614	783	1210	1248	2117	1901	736	711	302	129	291	906
1966	704	1426	1414	1758	1855	2294	2469	1260	434	226	76	298	1185
1967	559	1442	1444	2508	1439	1724	1862	975	874	474	126	596	1169
1968	922	1489	1448	2914	2164	2184	1747	1051	502	203	205	644	1289
1969	894	1171	1290	1764	2643	3964	1873	1684	457	267	273	789	1423
1970	813	1026	1378	1545	2185	2199	1333	768	639	379	389	710	1114
1971	597	1345	2254	2889	2762	2922	1870	1237	839	436	271	113	1461
1972	107	703	840	816	826	884	1077	673	437	215	199	159	578
1973	354	563	1032	843	2056	2241	1148	747	587	384	311	601	906
1974	977	2010	2328	2258	1590	2494	2406	1649	939	673	443	467	1520
1975	610	1065	1197	2227	1896	2404	1518	1288	978	521	319	317	1195
1976	561	1443	2400	3121	2913	2333	1880	1053	647	351	206	209	1426
1977	382	687	1292	1594	3147	2064	1362	965	572	402	199	330	1083
1978	653	617	795	1805	1885	1400	1090	981	718	471	284	365	922
1979	387	993	2110	2156	2061	2212	1485	1164	734	492	333	352	1207
1980	644	594	1149	2075	1554	1465	1080	783	472	251	209	158	870
1981	312	664	311	511	1383	1002	1012	692	482	249	121	122	572
1982	555	1221	1498	2437	2587	1888	1073	786	462	224	137	97	1080
1983	206	259	387	957	710	465	362	393	218	98	42	34	344
1984	152	430	993	1091	2521	1665	1126	682	489	277	235	176	820
1985	395	558	1158	827	2171	2361	1382	1064	642	319	296	618	983
1986	814	883	991	1288	1288	1930	1404	744	438	225	189	193	866
1987	542	583	654	924	1642	997	787	446	249	131	58	33	587
1988	282	716	666	906	2568	2120	1809	938	682	408	208	457	980
1989	905	1177	2074	2519	3268	3085	2239	1241	735	610	584	491	1577
1990	711	1037	1533	2328	2044	1729	1112	817	531	270	185	182	1040
1991	548	1322	1269	1278	2123	3019	1740	1310	769	427	263	162	1186
1992	223	525	1251	1956	1063	758	586	516	257	122	104	150	626
1993	402	596	1035	1926	1963	1191	903	615	360	250	328	360	827
1994	714	1264	1720	2012	2893	2180	1370	984	568	508	306	341	1238
1995	836	602	1419	1478	2270	2991	1820	919	590	313	268	296	1150
1996	934	1216	2080	2771	2827	3098	2751	1735	978	611	421	387	1651
1997	713	1041	1421	1347	1864	1208	926	818	386	164	113	128	844
1998	270	359	697	1010	1203	1064	906	526	282	170	134	145	564
1999	523	902	981	1858	1897	2363	1385	1073	648	444	217	147	1037
2000	899	1452	2290	3843	4741	2886	2196	1460	851	655	417	353	1837
2001	907	1541	1473	2603	2346	1998	1743	1110	761	432	305	189	1284
2002	405	880	1690	2229	2303	1800	1096	756	387	202	145	211	1009
2003	347	871	1315	1832	2619	2314	1590	1129	621	407	299	224	1131
2004	276	433	1419	1976	2762	1635	1227	1024	523	291	167	104	986
2005	139	500	1323	2029	2829	1842	1387	879	448	296	200	206	1007
2006	464	1010	1009	1676	2821	2601	1802	1137	649	400	377	320	1189
2007	437	456	1262	1675	2422	1973	1516	1056	684	486	321	631	1077
2008	917	1358	2089	3281	4088	3417	2475	1527	962	680	382	391	1797
Mínima	107	259	311	511	710	465	362	393	218	64	42	33	344
Média	687	1055	1346	1788	2090	2085	1450	956	594	337	248	352	1082
DesvioP	316	480	524	705	724	785	550	298	188	149	123	194	286
Máxima	1568	2646	2895	3843	4741	5138	3766	1735	1210	759	611	880	1837
MediaPC	1113	1113	1113	1113	1113	1113	1113	1113	1113	1113	1113	1113	1113