

PREVISÃO DE VAZÕES DIÁRIAS NA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO PARA O PERÍODO ÚMIDO 2011/2012: AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DOS MODELOS NEURO3M E NEUROSF

Luana Gomes¹; Alessandra Barros¹; Guilherme Ferreira¹ & Luiz Guilhon¹

RESUMO - A previsão de vazões representa um dos principais insumos da gestão dos recursos hídricos, planejamento e programação da geração das usinas hidrelétricas. Na elaboração destas, diversos modelos podem ser utilizados, a exemplo dos modelos físicos, estatísticos e de redes neurais. O uso da técnica de redes neurais tem se intensificado cada vez mais, pois os modelos baseados nessa técnica são de fácil aplicação e têm proporcionado resultados satisfatórios. Este trabalho apresenta os resultados obtidos com a utilização de modelos baseados na técnica de redes neurais para a previsão de vazão semanal do período úmido 2011-2012 a montante do reservatório de Três Marias, através de um modelo denominado Neuro3M, e para os trechos incrementais entre os reservatórios de Três Marias/Queimado e o posto hidrométrico de São Romão e entre os postos hidrométricos de São Romão e São Francisco, através de um modelo denominado NeuroSF. Apresenta-se também uma comparação dos resultados obtidos com uso dos modelos Neuro3M e NeuroSF com os resultados do modelo estatístico Previvaz, bem como os resultados do pré-processamento dos dados e da análise de consistência das vazões incrementais, e a correção da chuva média prevista. Os modelos Neuro3M e NeuroSF apresentaram um desempenho superior ao modelo estocástico Previvaz.

Palavras-chaves: redes neurais, previsão de vazões, bacia do rio São Francisco.

ABSTRACT - The streamflow forecasting is one of the main inputs of water resource management, planning and scheduling of the hydroelectric power generation. In preparing these streamflow forecasting, several models can be used, like the physical, statistical and neural networks models. The neural network use has been increasingly, because the models based on this technique are easy to apply and have provided satisfactory results. This paper presents, to wet period 2011-2012, the results obtained with the models based on neural network to predict the natural weekly inflow to Três Marias reservoir (model Neuro3M), and the incremental flow between Três Marias/Queimado and the São Romão hydrometric station and between the hydrometric stations São Romão and São Francisco (model NeuroSF). Is also presented a comparison of the results obtained using the models Neuro3M and NeuroSF with the results of the statistical model Previvaz and the results of the pre-processing datas and the consistency analysis of the incremental streamflow, and the correct at the average rain expected. The models Neuro3M and NeuroSF presented a better perform when compared with the stochastic model Previvaz.

Keywords: neural networks, streamflow forecasting, São Francisco river basin.

¹ Engenheiros do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Rua Quinze de Março, nº 50 – Anexo 2 – Sala A -205 – Torrões. CEP: 50.761-070 – Recife-PE – Tel. (81) 3227-8901 / (21) 2203-9883/ Fax: (81) 3227-8909. E-mail: luanag@ons.org.br; alessandram@ons.org.br; guilhermef@ons.org.br; guilhon@ons.org.br

INTRODUÇÃO

As previsões de vazões naturais subsidiam a tomada de decisão no Setor Elétrico, pois permitem a avaliação das condições operacionais das usinas hidrelétricas, através da utilização dos modelos de otimização e simulação energética, decidindo o despacho de todas as usinas e proporcionando ganhos sinérgicos na operação do Sistema Interligado Nacional – SIN. Estas previsões, quando realizadas com relativa precisão e antecedência, podem permitir a gestão dos recursos hídricos para uma tomada de decisão no sentido de minimizar os efeitos de uma cheia excepcional ou de uma situação de escassez de recursos hídricos, atenuando seus efeitos sobre os diferentes usos da água.

No setor elétrico, a previsão para o primeiro mês é discretizada semanalmente, sendo obtida, em grande parte, pelo sistema estocástico univariado PREVIVAZ (CEPEL, 2004), a partir de um histórico de vazões naturais médias semanais. Estas previsões têm por objetivo subsidiar o Programa Mensal de Operação - PMO e suas revisões semanais, realizado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS. Além das modelagens estocásticas univariadas e multivariadas para a primeira semana operativa à frente, também são utilizados no ONS modelos físicos e modelos baseados na técnica de redes neurais, que utilizam além do histórico de vazões passadas, informações de postos fluviométricos e precipitação observada e prevista.

A previsão de vazões afluentes aos reservatórios de Três Marias e Sobradinho são de extrema relevância no processo de operação dos demais reservatórios da bacia, localizados a jusante deste, além de interferirem nas definições estratégicas do despacho energético do Subsistema Nordeste. Neste trabalho são apresentados os resultados obtidos para o período úmido 2011/2012, utilizando os modelos Neuro3M e NeuroSF, onde o primeiro faz a previsão de vazões ao reservatório de Três Marias e o segundo faz a previsão de vazões de trechos incrementais ao aproveitamento de Sobradinho, localizado no rio São Francisco, ambos usando a técnica de redes neurais.

ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo (Figura 01) está localizada no Alto e Médio São Francisco, que compreende o reservatório de Três Marias, com uma área de drenagem de 50.732 Km², e os trechos incrementais entre os reservatórios de Três Marias/Queimado e o posto hidrométrico de São Romão (Inc 1), com uma área de drenagem de 99.029 Km², e entre os postos hidrométricos de São Romão e São Francisco (Inc 2), com uma área de drenagem de 30.057 Km².

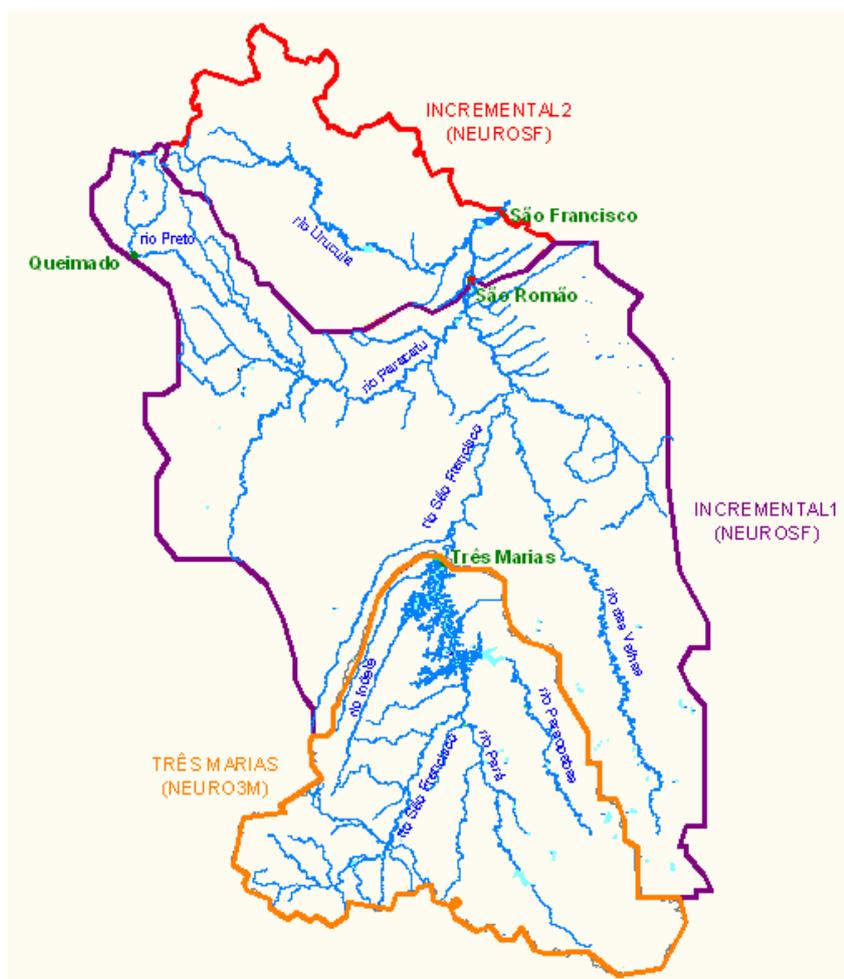


Figura 01 – Localização das áreas de drenagem estudadas

PROCESSO ATUAL DE PREVISÃO DE VAZÕES

No setor elétrico são utilizadas as vazões naturais afluentes aos reservatórios, que correspondem àquelas que ocorreriam em uma seção do rio, caso não houvesse a operação de reservatórios a montante, nem a vazão evaporada pelos lagos artificiais, nem mesmo retiradas de água para abastecimento e irrigação a montante. Em síntese, a vazão provida pela própria natureza.

Para a previsão de vazões incrementais e naturais para o trecho compreendido entre as UHE's Três Marias/Queimado e o reservatório de Sobradinho, o ONS utiliza atualmente o modelo CPINS - Cálculo e Previsão de Vazões Incrementais e Naturais a Sobradinho, para obter previsões de vazões diárias, que comparão a previsão de vazões média semanal para um horizonte de 2 semanas à frente, sendo as demais semanas complementadas pelos resultados do sistema PREVIVAZ, desenvolvido pelo CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica.

O PREVIVAZ constitui-se de um sistema de previsão de vazões em base semanal, para um horizonte de até 6 (seis) semanas à frente, formado por 94 (noventa e quatro) modelos que combinam a estrutura de correlação, os tipos de transformação e os métodos de estimação de parâmetros, utilizando informações de até 4 (quatro) semanas anteriores.

O modelo CPINS faz uso da rotina de propagação do modelo SSARR - *Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation*, que foi desenvolvido em 1956 pelo U.S. *Corps of Engineers, North Pacific Division*. A partir da informação verificada do aproveitamento ou posto fluviométrico a montante, esse modelo faz a propagação da vazão e determina a vazão incremental verificada no trecho através da diferença da vazão verificada no posto fluviométrico, permitindo que se faça a previsão de vazões incrementais, naturais e afluentes ao reservatório de Sobradinho para os demais dias.

O Modelo CPINS, utilizado no setor elétrico há mais de 30 anos, teve seu processo de validação concluído em 2006, através de uma força tarefa, tendo sua versão Windows sido homologada pela Aneel para utilização a partir de abril/2012, juntamente com o modelo NeuroSF. O modelo Neuro3M, de onde se obtém os resultados da previsão de vazões afluentes ao reservatório de Três Marias, está em operação desde maio/2010, conforme autorização da mesma Aneel.

METODOLOGIA

Em todos os processos de modelagem, a familiaridade e tratamento dos dados são de extrema importância e pode ter um efeito significativo no seu desempenho. Assim, a seguir, são mostrados os resultados do tratamento e análises dos dados, que servirão de entrada para as redes neurais estudadas, tanto do modelo Neuro3M quanto do modelo NeuroSF.

Nesta aplicação foram usadas informações de estações pluviométricas, fluviométricas e de vazão defluente dos reservatórios de Três Marias e Queimado. Todos os dados pluviométricos e fluviométricos utilizados foram obtidos junto à Companhia Hidrelétrica do São Francisco (CHESF), Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) e à Agência Nacional de Águas (ANA). A seguir são apresentados os postos utilizados, bem como o tratamento das informações utilizadas.

Informações pluviométricas

Na fase de definição dos postos, realizou-se uma análise das informações disponíveis, objetivando a seleção de postos confiáveis a fim de permitir a realização dos estudos e operacionalização do modelo. Nessa análise, foram selecionados os postos pluviométricos da CEMIG e CHESF que possuíam histórico sem muitas falhas e que estão atualmente em operação ou ainda de alguns postos de extrema importância, desativados no ano de 2009 (Ponte Nova do

Paraopeba, Caatinga, Santo Hipólito e Vila Uruçuia). Salienta-se que, posteriormente, o posto de Ponte Nova do Paraopeba foi substituído pelo posto de Igarapé.

Após a seleção dos postos, foi analisado o histórico disponível, utilizando informações da ANA para complementar as informações anteriores. A Tabela 01 mostra a relação dos postos selecionados e os utilizados na operacionalização do modelo, tendo em vista que alguns encontram-se desativados.

Tabela 01 – Postos pluviométricos selecionados

Sub-bacia	Cód Aneel	Latitude	Longitude	Posto Pluviométricos	Situação
Três Marias	1945042	19°29'	45°36'	Dores do Indaiá	Desativado
	2044063	20°38'	44°26'	Fazenda Campo Grande	Em Operação
	2045034	20°10'	45°43'	Iguatama	Em Operação
	2044056	20°24'	44°37'	Ponte dos Vilelas	Em Operação
	1944078	19°57'	44°18'	Ponte Nova do Paraopeba	Desativado
	1945045	19°16'	45°18'	Porto das Andorinhas	Em Operação
	1845022	18°41'	45°35'	Porto Indaiá	Em Operação
	1944060	19°10'	44°41'	Porto Mesquita	Em Operação
	1945017	19°17'	45°06'	Porto Pará	Em Operação
	1944032	19°41'	44°53'	SE Pitangui	Em Operação
	1845009	18°10'	45°18'	Três Marias	Em Operação
	2044059	20°14'	44°45'	UHE Cajuru	Em Operação
2046015	20°20'	46°22'	Vargem Bonita	Em Operação	
Incremental 1	1745019	17°08'	45°53'	Caatinga	Desativado
	1547045	15°57'	47°22'	Fazenda Canadá (Inc2)	Em Operação
	1845026	18°01'	45°06'	Fazenda das Pedras	Em Operação
	1846032	20°40'	43°49'	Major Porto	Em Operação
	1744046	17°22'	44°56'	Pirapora Ponte	Em Operação
	1845033	18°06'	45°27'	Ponte BR-040	Em Operação
	1844026	18°18'	44°13'	Santo Hipólito	Desativado
	2043064	18°42'	46°02'	SE Conselheiro Lafaiete	Em Operação
1744047	17°35'	44°42'	Várzea da Palma	Em Operação	
Incremental 2	1544012	15°56'	44°52'	São Francisco	Em Operação
	1645000	16°22'	45°04'	São Romão	Em Operação
	1645022	16°08'	45°44'	Vila Uruçuia	Desativado

A Figura 02 apresenta a distribuição dos postos selecionados na área de estudo.



Figura 02 – Distribuição dos postos pluviométricos na área de estudo

Análise da precipitação prevista

A precipitação prevista utilizada nesta aplicação foi obtida a partir da rodada do modelo numérico regional ETA (BLACK, 1994; CHOU et. all, 2000). Este modelo é executado operacionalmente no Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos - CPTEC, e possui resolução espacial de 40 km x 40 km. Para a obtenção da chuva média na bacia esses pontos de grade foram interpolados utilizando-se o método da média aritmética simples.

A chuva prevista utilizada foi sempre de 10 dias à frente, para todo o período estudado. Em estudo apresentado em ONS (2009 e 2010), verificou-se que a chuva prevista tendeu sempre a ficar superior a chuva verificada, conforme apresentado nas Figuras 03, 04 e 05.

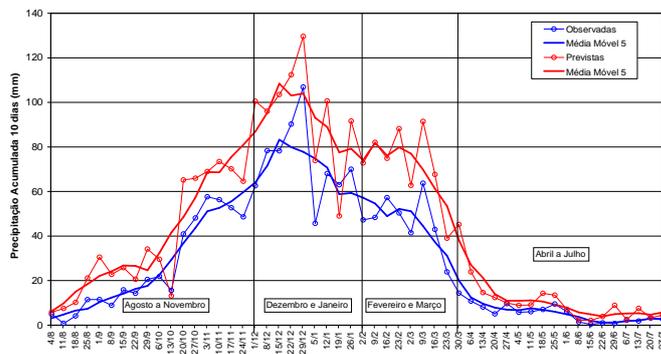


Figura 03 – média da chuva média prevista e observada a montante de Três Marias

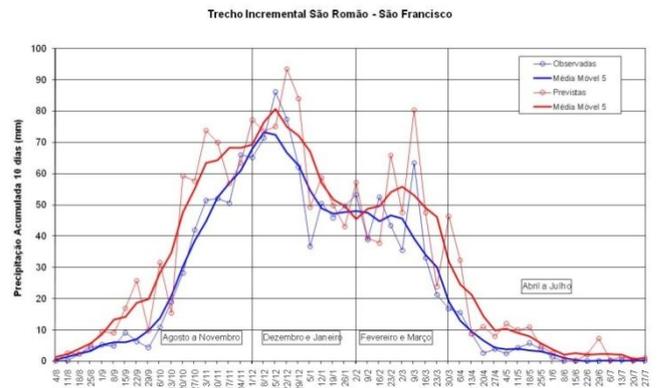
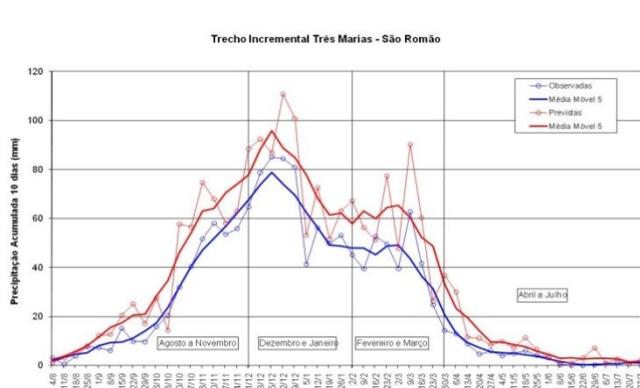


Figura 04 – média da chuva média prevista e observada (inc1)

Figura 05 – média da chuva média observada (inc2)

Assim, foi efetuado um estudo, visando analisar a existência da tendência de superestimar a chuva prevista. Tal estudo foi chamado de “remoção do viés” e os meses com características hidrometeorológicas semelhantes foram agrupados os períodos, a saber: agosto a novembro, dezembro e janeiro, fevereiro e março, abril a julho. A metodologia utilizada para a identificação e remoção do viés das previsões de precipitação, para cada um dos quatro períodos, foi a seguinte:

- Obtenção dos totais de precipitação observada e prevista nos primeiros dez dias de cada previsão, realizada no período 1998/2008;
- Elaboração de curvas de permanência de precipitação observada e prevista;
- Elaboração de gráficos de precipitação prevista versus observada;
- Ajuste de uma equação do segundo grau aos pontos do gráfico “precipitação prevista versus precipitação observada”, passando pela origem e limitado aos valores de precipitação prevista maiores do que a precipitação observada. Nestes estudos, optou-se pelo não cruzamento da reta de 45°, ou seja, evita-se que o valor considerado como previsto seja maior do que o valor previsto fornecido diretamente pelo modelo;
- Cálculo da precipitação diária prevista com remoção de viés para os dez dias de

previsão, por meio da seguinte expressão:

$$P_{pre(t)} = P_{ETA(t)} \times \frac{P_{totpre_{10dias}}}{P_{tot_{ETA_{10dias}}}} \quad (1)$$

onde:

$$P_{totpre_{10dias}} = a \times \left(P_{tot_{ETA_{10dias}}} \right)^2 + b \times \left(P_{tot_{ETA_{10dias}}} \right) \quad (2)$$

$P_{pre(t)}$: precipitação diária prevista com remoção de viés, para cada um dos dez dias de previsão (mm).

$P_{ETA(t)}$: precipitação diária prevista pelo modelo ETA, para cada um dos dez dias de previsão (mm).

$P_{totpre_{10dias}}$: precipitação total prevista com remoção de viés, acumulada para os dez primeiros dias de previsão (mm).

$P_{tot_{ETA_{10dias}}}$: precipitação total prevista pelo modelo ETA, acumulada para os dez primeiros dias de previsão (mm).

a e b: constantes da equação do segundo grau obtida para remoção de viés, em cada sub-bacia e em cada período considerado.

Após definidas as equações de remoção do viés, foi efetuada a correção da precipitação total prevista dos 10 dias, distribuindo-a proporcionalmente para a precipitação diária. As Figuras 06 a 08 mostram o comportamento da chuva verificada e prevista, após a remoção do viés, para o período de 1998 a 2008, dos trechos incrementais 1 e 2.

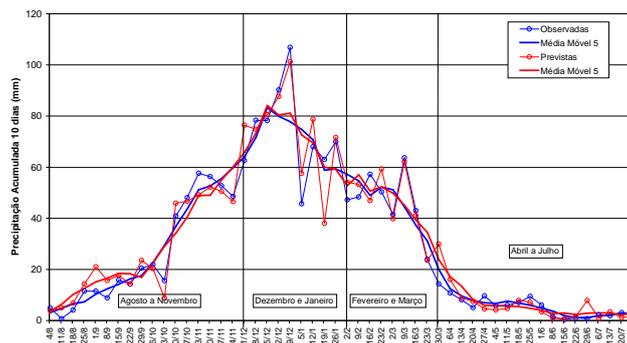


Figura 06 – média da chuva média prevista e verificada a montante de Três Marias - após correção do viés

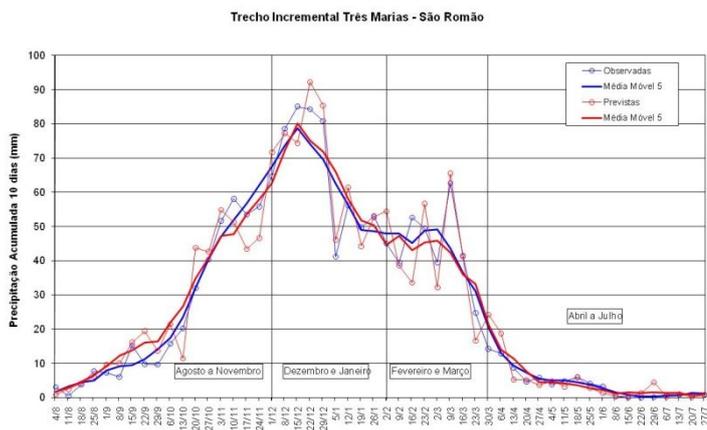


Figura 07 – média da chuva média prevista e observada (inc1) – após correção do viés



Figura 08 – média da chuva média observada (inc2) – após correção do viés

Para o período úmido 2011/2012, as figuras 09 e 10 mostram, para a incremental 1, os resultados da chuva prevista antes e depois da correção do viés, comparadas a chuva verificada.

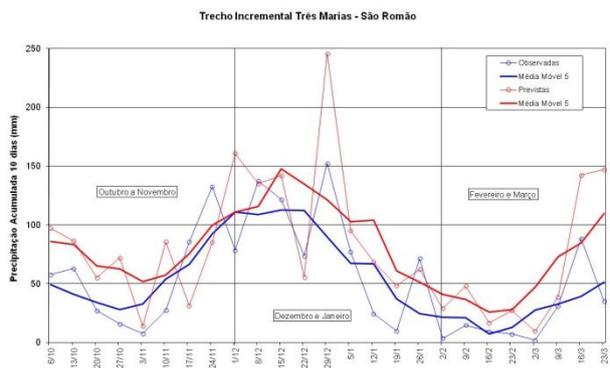


Figura 09 – média da chuva média prevista e observada (inc1) – antes correção do viés

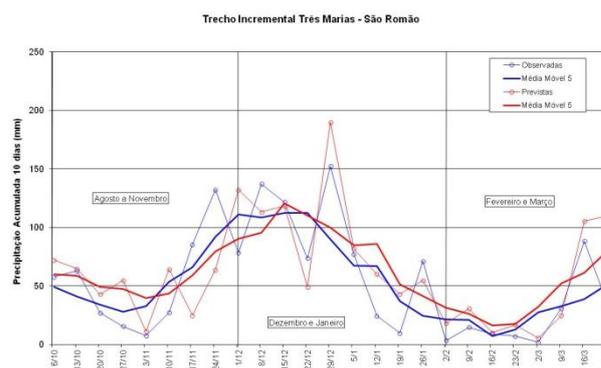


Figura 10 – média da chuva média observada (inc2) – após correção do viés

Para o período úmido 2011/2012, as figuras 11 e 12 mostram, para a incremental 2, os resultados da chuva prevista antes e depois da correção do viés, comparadas a chuva verificada.

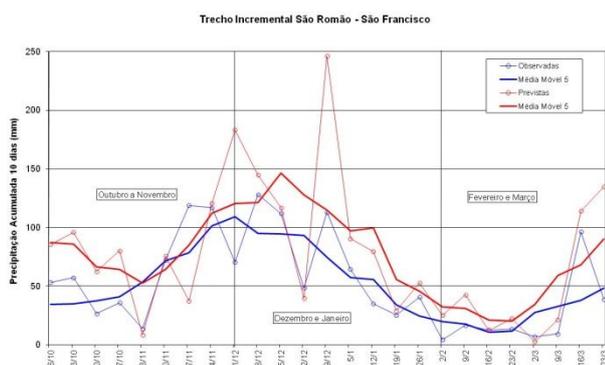


Figura 11 – média da chuva média prevista e observada (inc1), antes da remoção do viés

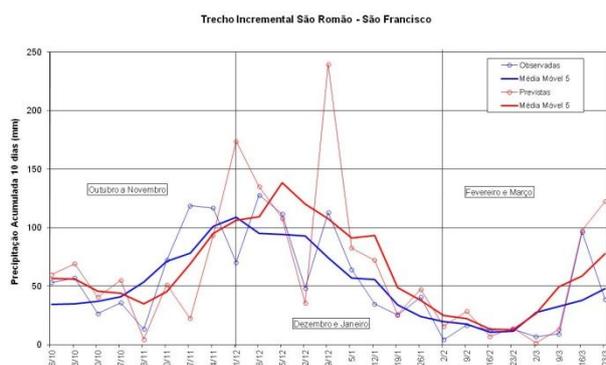


Figura 12 - média da chuva média observada (inc2), após remoção do viés

Observa-se que a correção do viés para a incremental 1 foi bem melhor que para a incremental 2. Salienta-se a pouca disponibilidade de dados na contabilização da chuva média verificada na área da incremental 2. A chuva média prevista em 27/dez/2011 para Inc2 apresentou um desvio muito alto, elevando a curva de chuva prevista, considerando a utilização de média móvel de 7 dias.

Informações fluviométricas

No momento da calibração do modelo, foram avaliados os postos fluviométricos da CEMIG e da CHESF que possuíam histórico sem muitas falhas, e que estavam em operação, ou que são importantes e foram desativados no ano de 2009 (caso dos postos Ponte Nova do Paraopeba, Caatinga, Santo Hipólito e Vila Urucua). A Figura 13 ilustra a distribuição espacial desses postos e a Tabela 02 a listagem dos mesmos, destacando os que estão atualmente em operação e os que estão desativados.

Tabela 02 - Postos Fluviométricos na área incremental entre o reservatório de Três Marias e o posto fluviométrico de São Francisco

Sub-bacia	Cód Aneel	Latitude	Longitude	Posto Fluviométricos	Situação
Três Marias	40050003	20°10'	45°43'	Iguatama	Em Operação
	40800001	19°57'	44°18'	Ponte Nova do Paraopeba	Desativado
	40130002	20°24'	44°37'	Ponte dos Vilelas	Em Operação
	40100001	19°16'	45°18'	Porto das Andorinhas	Em Operação
	40963000	18°41'	45°35'	Porto Indaiá	Em Operação
	40865001	19°10'	44°41'	Porto Mesquita	Em Operação
	40450001	19°17'	45°06'	Porto Pará	Em Operação
Incremental 1	42750000	17°08'	45°53'	Caatinga	Desativado
	41135006	17°22'	44°56'	Pirapora Ponte	Em Operação
	41090002	18°06'	45°27'	Ponte BR-040	Em Operação
	41818000	18°18'	44°13'	Santo Hipólito	Desativado
	41990000	17°35'	44°42'	Várzea da Palma	Em Operação
Incremental 2	44200000	15°56'	44°52'	São Francisco	Em Operação
	43200000	16°22'	45°04'	São Romão	Em Operação
	43670000	16°08'	45°44'	Vila Urucua	Desativado



Figura 13 - Localização dos postos fluviométricos selecionados

Tratamento das vazões incrementais

Conforme citado em ONS (2010), foram comparadas as vazões incrementais históricas com as vazões dos postos fluviométricos dos principais afluentes do rio São Francisco que contribuíam para as mesmas, ou seja, rios Abaeté, das Velhas e Paracatu para a Inc1; e rio Urucua para a Inc2, com uma defasagem temporal de 1 dia. Através desta comparação, observou-se a necessidade da aplicação de uma média móvel nessas vazões incrementais, para suavizar a alta variabilidade das mesmas. Vale salientar que esse comportamento não é observado nas vazões medidas nos postos fluviométricos. Desse modo, aplicou-se uma média móvel de 7 dias com limite de até $700 \text{ m}^3/\text{s}$ para a incremental 1 e de até $500 \text{ m}^3/\text{s}$ para a incremental 2.

Após a aplicação da média móvel nas vazões incrementais 1 e 2 observou-se a persistência de inconsistências entre as vazões incrementais e as vazões dos postos fluviométricos (tais problemas podem ser causados por diversos motivos, a exemplo de imprecisão na curvas-chave dos postos de São Romão e São Francisco), o que levou à necessidade de consistir as vazões verificadas

através de outra metodologia. Esse tratamento foi feito através de uma redistribuição das vazões incrementais 1 e 2, a partir de condições pré-determinadas: i) se a vazão incremental 2 for superior a 330 m³/s mantêm-se as vazões iniciais; ii) se a vazão incremental 2 for inferior a 330 m³/s soma-se a vazão incremental 1 e 2; iii) redistribui-se as mesmas proporcionalmente às áreas de drenagem (coeficiente igual a 0,767 para a Inc1 e 0,233 para a Inc2). Salienta-se que nessa redistribuição há um deslocamento do volume, não sendo alterado o volume total de água do sistema.

As Figuras 14 e 15 mostram exemplos do resultado da aplicação dessa redistribuição de vazões incrementais para o período úmido 2011/2012.

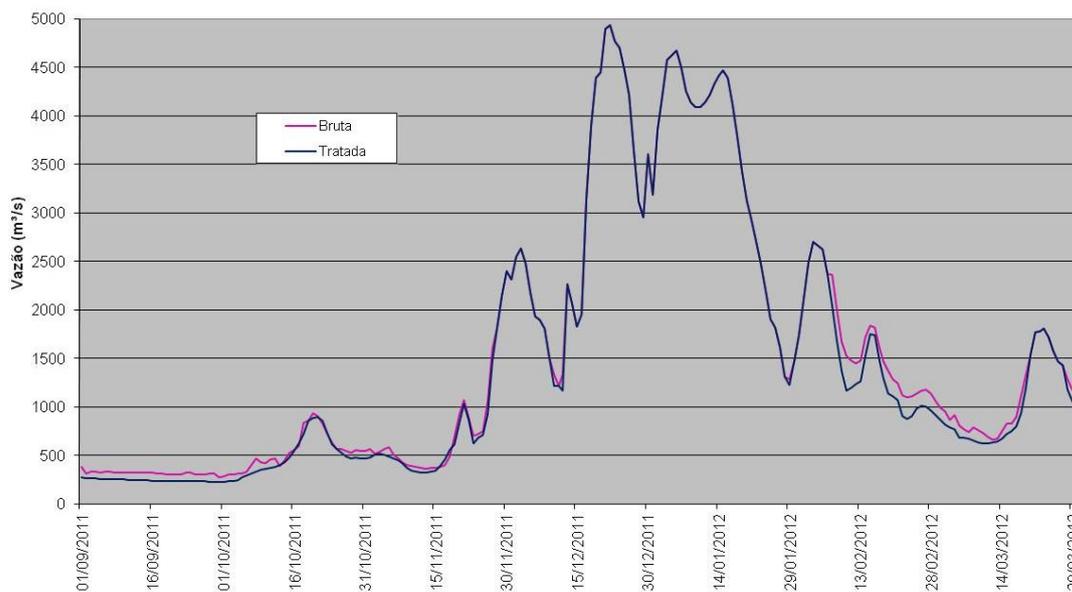


Figura 14 – Tratamento das vazões incrementais 1

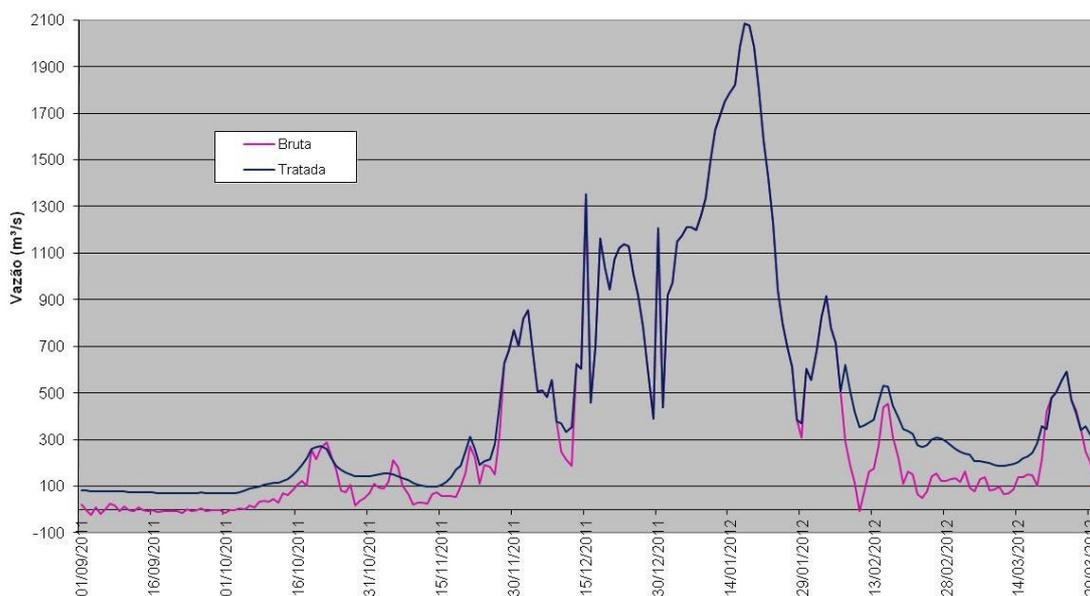


Figura 15 – Tratamento das vazões incrementais 2

Treinamento da rede neural

A previsão de vazões incrementais médias diárias 12 dias à frente, utilizando uma rede NSRBN, foi feita em uma versão modificada do software NeuroHidro, disponível em Valença (2005). Como dados de entrada para as redes neurais, foram consideradas as informações dos postos pluviométricos, fluviométricos e a vazão natural a Três Marias e as vazões incrementais 1 e 2 ocorridas, todos com diversas defasagens.

Em todo o processo da validação cruzada (treinamento, validação e teste) foram usados os dados de chuva verificada, considerando que não foi identificado um erro sistemático na chuva prevista.

Para o aproveitamento de Três Marias, dentre todos os testes efetuados com as diversas configurações de redes neurais, a que proporcionou melhores resultados foi a calibração de três redes neurais: uma para o período de dezembro a abril, uma para o período de maio a setembro e uma para o mês de outubro.

Já para as incrementais a Sobradinho, as redes neurais foram calibradas em função dos resultados da consistência das vazões: calibraram-se duas redes para a incremental 1 e duas para a incremental 2. Cada rede neural de cada incremental foi separada em função da vazão ser superior (denominado “cheio”) ou inferior (denominado “seco”) à vazão incremental do trecho São Romão e São Francisco, não importando em que época do ano essas vazões se encontravam.

RESULTADOS

Com os pesos/parâmetros definidos nos momentos das calibrações das redes neurais, partiu-se para avaliar os resultados do período úmido 2011/2012, tomando como referência o processo do PMO e suas revisões. Para Três Marias foram avaliadas as vazões da próxima semana operativa (de sábado a sexta) e para as incrementais 1 e 2 foram avaliadas a média dos primeiros 7 dias de previsão. As Figuras 16, 17 e 18 e tabelas 03, 04 e 05 mostram esses resultados.

A Tabela 03 mostra os desvios de previsão, em termos de MAD (m^3/s) e MAPE (%), para o período úmido 2011/2012. Na Figura 16 observam-se as vazões e chuvas previstas e verificadas, onde se observa que as vazões previstas estão bem aderentes às verificadas, não sendo notado defasagem temporal nas mesmas. Observa-se que para as três semanas entre 17/03/2012 e 06/04/2012 os desvios elevados na previsão de precipitação acabaram provocando desvios elevados também nas previsões de vazões. Para outros períodos os desvios foram compensados pelo processo de correção de viés.

Tabela 03 – Resultados do Neuro3M para o período úmido 2011/2012

Período			Neuro3M	Verificado	Diferença Neuro3M	Diferenças (m3/s) Neuro3M
08/10/11	a	14/10/11	153	180	-15%	-27
15/10/11	a	21/10/11	483	369	31%	114
22/10/11	a	28/10/11	213	281	-24%	-68
29/10/11	a	04/11/11	196	233	-16%	-37
05/11/11	a	11/11/11	254	156	63%	98
12/11/11	a	18/11/11	246	236	4%	10
19/11/11	a	25/11/11	507	438	16%	69
26/11/11	a	02/12/11	618	902	-31%	-284
03/12/11	a	09/12/11	963	820	17%	143
10/12/11	a	16/12/11	1556	1190	31%	366
17/12/11	a	23/12/11	3022	3325	-9%	-303
24/12/11	a	30/12/11	2055	1787	15%	268
31/12/11	a	06/01/12	3441	3268	5%	173
07/01/12	a	13/01/12	3812	3692	3%	120
14/01/12	a	20/01/12	2814	2553	10%	261
21/01/12	a	27/01/12	2390	2053	16%	337
28/01/12	a	03/02/12	2145	2040	5%	105
04/02/12	a	10/02/12	1713	1087	58%	626
11/02/12	a	17/02/12	1346	1182	14%	164
18/02/12	a	24/02/12	784	769	2%	15
25/02/12	a	02/03/12	786	608	29%	178
03/03/12	a	09/03/12	576	462	25%	114
10/03/12	a	16/03/12	695	584	19%	111
17/03/12	a	23/03/12	1349	945	43%	404
24/03/12	a	30/03/12	1455	727	100%	728
31/03/12	a	06/04/12	1083	742	46%	341
07/04/12	a	13/04/12	725	610	19%	115
14/04/12	a	20/04/12	582	461	26%	121
21/04/12	a	27/04/12	537	452	19%	85
28/04/12	a	04/05/12	693	441	57%	252

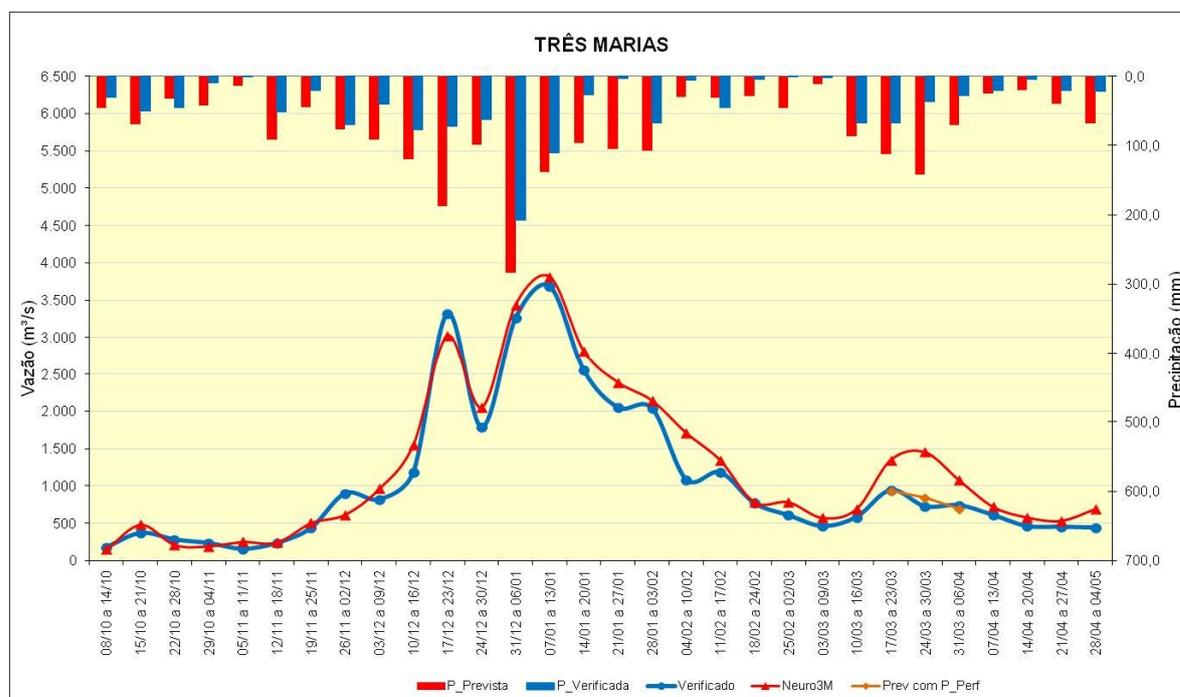


Figura 16 – Resultados da previsão de vazões do Neuro3M, período de 08/10/2011 a 04/05/2012

As Tabelas 04 e 05 mostram os desvios de previsão de vazões, em termos de MAD (m^3/s) e MAPE (%), para o período úmido 2011/2012 e para, respectivamente, as incrementais 1 e 2. Da mesma forma, as Figuras 17 e 18 mostram as vazões e chuvas previstas e verificadas. Nestas tabelas e figuras também são mostrados os resultados de uma previsão caso fosse desconsiderado o erro da previsão de chuva, ou seja, as previsões foram efetuadas com as chuvas verificadas. Essa avaliação visa avaliar unicamente o modelo de redes neurais, desconsiderando o erro na previsão de chuva.

Tabela 04 – Resultados do NeuroSF, incremental 1, para o período úmido 2011/2012

Período			NeuroSF - Inc1	com P_Perf	Verificado	Diferença (%) NeuroSF-inc1	Diferenças (m3/s) NeuroSF-inc1	Diferença (%) com P_Perf	Diferenças (m3/s) com P_Perf
07/10/11	a	13/10/11	341	307	358	-5%	-17	-14%	-51
14/10/11	a	20/10/11	838	619	642	31%	196	-4%	-23
21/10/11	a	27/10/11	658	929	668	-1%	-10	39%	261
27/10/11	a	02/11/11	564	529	479	18%	85	10%	50
04/11/11	a	10/11/11	439	442	437	0%	2	1%	5
11/11/11	a	17/11/11	407	324	350	16%	57	-8%	-26
18/11/11	a	24/11/11	422	398	728	-42%	-306	-45%	-330
24/11/11	a	30/11/11	796	1820	1451	-45%	-655	25%	369
02/12/11	a	08/12/11	3591	2494	2211	62%	1380	13%	283
09/12/11	a	15/12/11	1833	1745	1590	15%	243	10%	155
16/12/11	a	22/12/11	3413	3396	3951	-14%	-538	-14%	-555
22/12/11	a	28/12/11	4203	4211	4266	-1%	-63	-1%	-55
28/12/11	a	03/01/12	3891	3574	3642	7%	249	-2%	-68
06/01/12	a	12/01/12	4937	4755	4203	17%	734	13%	552
13/01/12	a	19/01/12	3534	3385	4137	-15%	-603	-18%	-752
19/01/12	a	25/01/12	3028	2672	2681	13%	347	0%	-9
26/01/12	a	01/02/12	1573	1711	1611	-2%	-38	6%	100
03/02/12	a	09/02/12	1829	1772	2207	-17%	-378	-20%	-435
10/02/12	a	16/02/12	1430	-	1412	1%	18	-	-
17/02/12	a	23/02/12	1125	-	1125	0%	0	-	-
24/02/12	a	01/03/12	908	-	950	-4%	-42	-	-
01/03/12	a	07/03/12	756	-	755	0%	1	-	-
09/03/12	a	15/03/12	651	-	650	0%	1	-	-
16/03/12	a	22/03/12	1611	1398	1249	29%	362	12%	149
23/03/12	a	29/03/12	1964	1381	1462	34%	502	-6%	-81

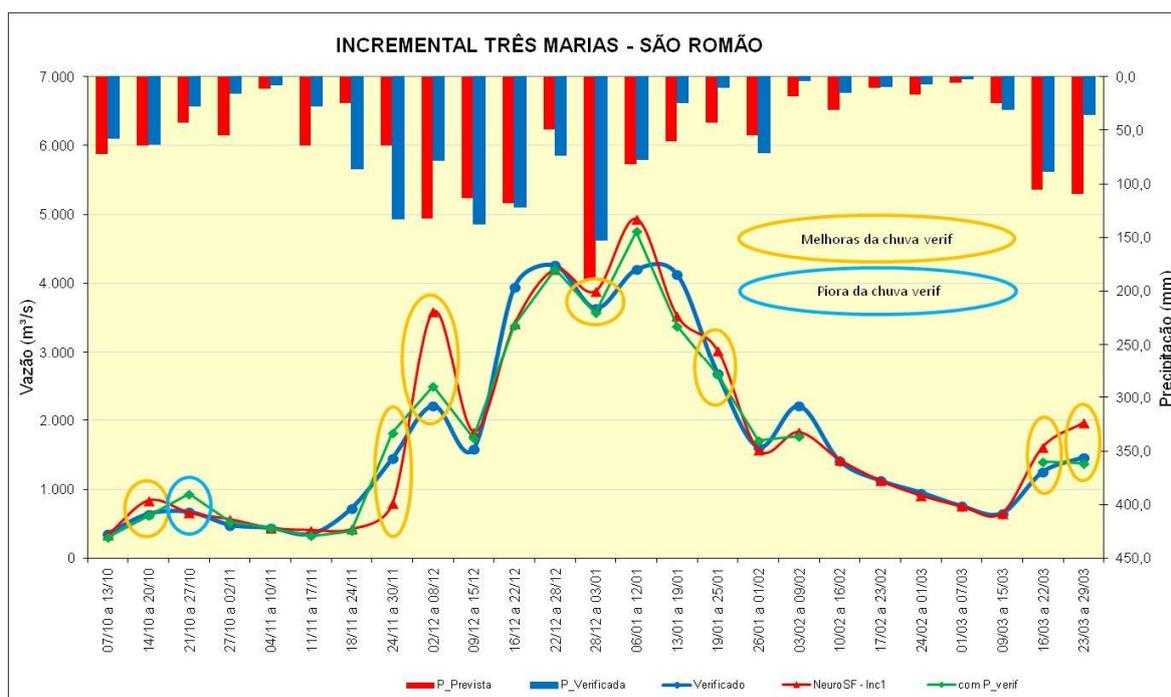


Figura 17 – Comparação dos Resultados da Previsão de Vazões – Incremental 1

Tabela 05 – resultados do NeuroSF, incremental 2, para o período úmido 2011/2012

Período	NeuroSF - Inc2	com P_Perf	Verificado	Diferença	Diferenças (m3/s)	Diferença (%)	Diferenças (m3/s)		
				NeuroSF-inc2	NeuroSF-inc2	com P_Perf	com P_Perf		
07/10/11	a	13/10/11	126	112	109	16%	17	3%	3
14/10/11	a	20/10/11	277	223	195	42%	82	14%	28
21/10/11	a	27/10/11	326	245	203	61%	123	20%	42
27/10/11	a	02/11/11	226	206	145	56%	81	42%	61
04/11/11	a	10/11/11	142	149	133	7%	9	12%	16
11/11/11	a	17/11/11	140	141	106	32%	34	33%	35
18/11/11	a	24/11/11	168	274	221	-24%	-53	24%	53
24/11/11	a	30/11/11	382	380	463	-17%	-81	-18%	-83
02/12/11	a	08/12/11	1067	743	630	69%	437	18%	113
09/12/11	a	15/12/11	586	561	574	2%	12	-2%	-13
16/12/11	a	22/12/11	1405	1424	929	51%	476	53%	495
22/12/11	a	28/12/11	942	975	958	-2%	-16	2%	17
28/12/11	a	03/01/12	1484	755	812	83%	672	-7%	-57
06/01/12	a	12/01/12	1352	1208	1403	-4%	-51	-14%	-195
13/01/12	a	19/01/12	1539	1505	1926	-20%	-387	-22%	-421
19/01/12	a	25/01/12	1806	1820	1393	30%	413	31%	427
26/01/12	a	01/02/12	643	634	558	15%	85	14%	76
03/02/12	a	09/02/12	637	624	638	0%	-1	-2%	-14
10/02/12	a	16/02/12	476	403	428	11%	48	-6%	-25
17/02/12	a	23/02/12	378	376	341	11%	37	10%	35
24/02/12	a	01/03/12	299	296	288	4%	11	3%	8
01/03/12	a	07/03/12	243	270	239	2%	4	13%	31
09/03/12	a	15/03/12	217	198	194	12%	23	2%	4
16/03/12	a	22/03/12	390	359	312	25%	78	15%	47
23/03/12	a	29/03/12	704	540	462	52%	242	17%	78

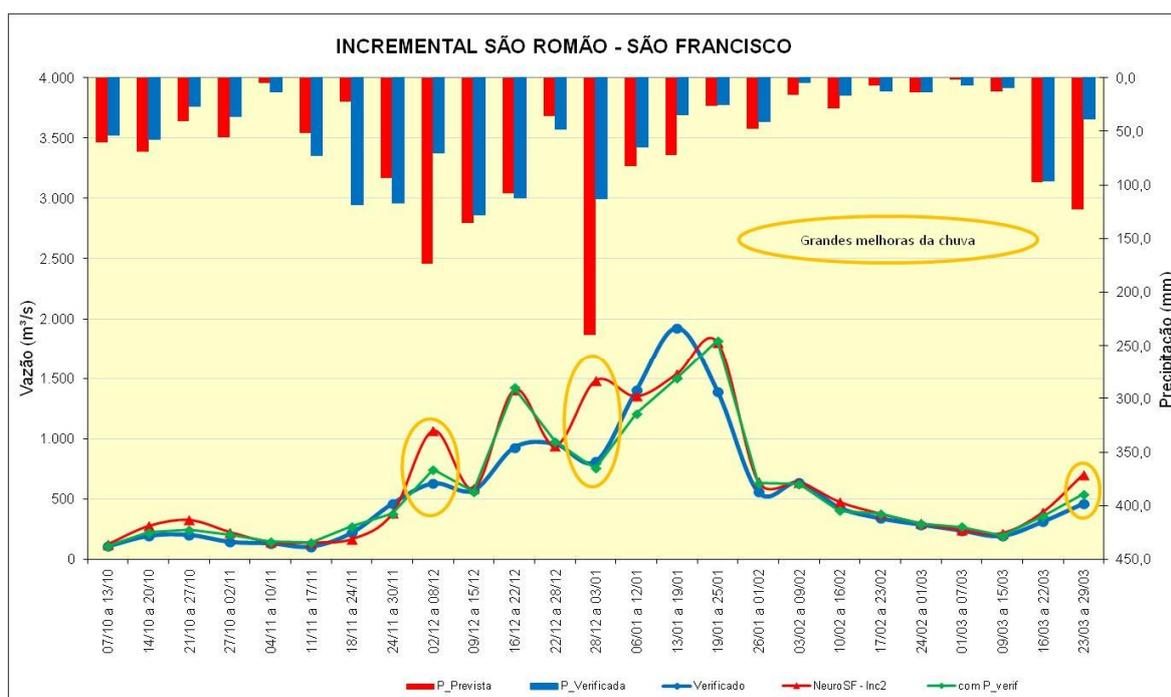


Figura 18 – Comparação dos Resultados da Previsão de Vazões – Incremental 2

Avaliando as Figuras 17 e 18 observa-se a importância da previsão de chuva nas previsões de vazões e que a utilização da chuva verificada no modelo NeuroSF reduziu bastante os grandes desvios de previsão de vazões, observados quando ocorreu grandes desvios na previsão de chuva.

As Tabelas 06 a 08 mostram comparação dos resultados dos modelos aqui analisados em comparação com o modelo Previvaz, onde observa-se que o desempenho dos modelos Neuro3M e

NeuroSF, mesmo considerando os erros devido ao desvio na previsão de chuva, é superior aos do modelo Previzaz. As Figuras 19 a 21 mostram essas previsões de vazões, onde se destaca a clara defasagem temporal do modelo estocástico.

Em relação ao Neuro3M, desconsiderando os resultados das semanas de 24 a 30 (de 17/mar a 04/mai), onde o desvio da previsão de chuva foi grande, teríamos um desvio médio de 20% para o Neuro3M e de 35% para o Previzaz.

Tabela 06 - Comparação entre os resultados do Neuro3M com o Previzaz

Semana	Desvios Absoluto	
	Neuro3M	Previzaz
semana1	15%	31%
semana2	31%	50%
semana3	24%	10%
semana4	16%	24%
semana5	63%	127%
semana6	4%	9%
semana7	16%	9%
semana8	31%	40%
semana9	17%	12%
semana10	31%	12%
semana11	9%	58%
semana12	15%	57%
semana13	5%	40%
semana14	3%	27%
semana15	10%	50%

Semana	Desvios Absoluto	
	Neuro3M	Previzaz
semana16	16%	9%
semana17	5%	1%
semana18	58%	71%
semana19	14%	15%
semana20	2%	56%
semana21	29%	40%
semana22	25%	66%
semana23	19%	2%
semana24	43%	27%
semana25	100%	23%
semana26	46%	3%
semana27	19%	9%
semana28	26%	10%
semana29	19%	2%
semana30	57%	5%

Média 26% 30%

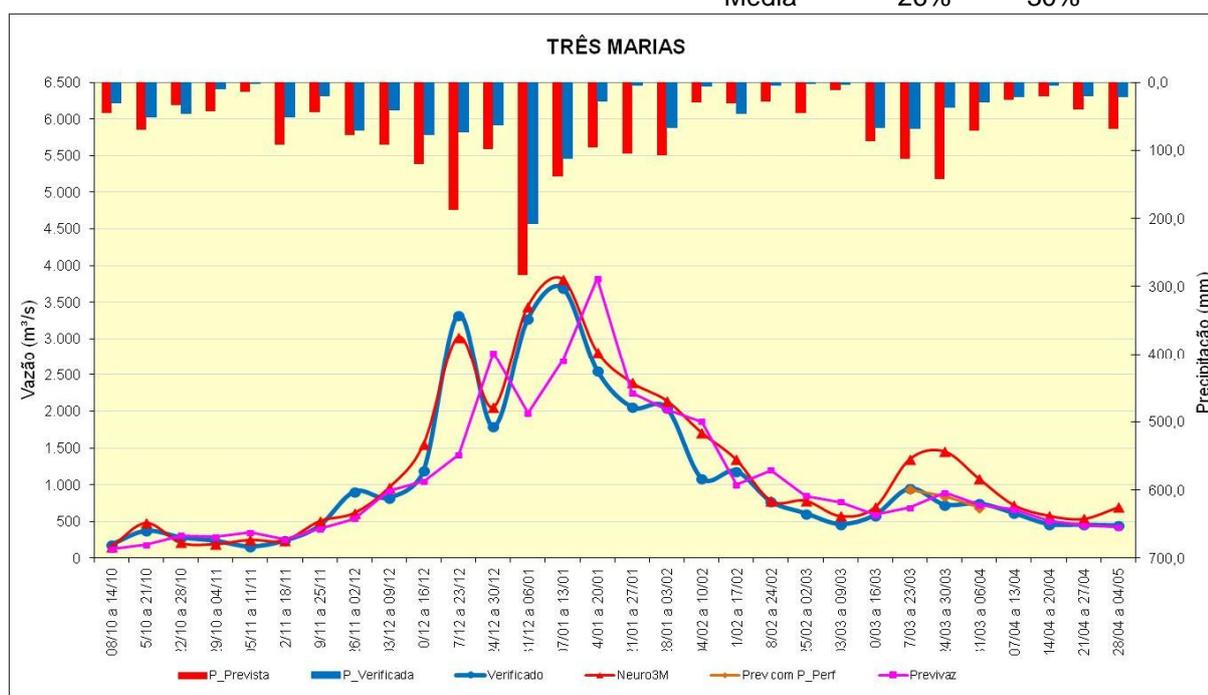


Figura 19 – Comparação dos Resultados do Neuro3M e Previzaz

Tabela 07 - Comparação entre os resultados do NeuroSF com o Previvaz – Incremental 1

Semana	Desvios Absoluto	
	NeuroSF	Previvaz
semana1	5%	26%
semana2	31%	36%
semana3	1%	20%
semana4	18%	34%
semana5	0%	88%
semana6	16%	50%
semana7	42%	24%
semana8	45%	20%
semana9	62%	10%
semana10	15%	33%
semana11	14%	54%
semana12	1%	16%
semana13	7%	15%

Semana	Desvios Absoluto	
	NeuroSF	Previvaz
semana14	17%	23%
semana15	15%	12%
semana16	13%	51%
semana17	2%	51%
semana18	17%	25%
semana19	1%	57%
semana20	0%	28%
semana21	4%	19%
semana22	0%	70%
semana23	0%	66%
semana24	29%	40%
semana25	34%	9%

Média 16% 35%

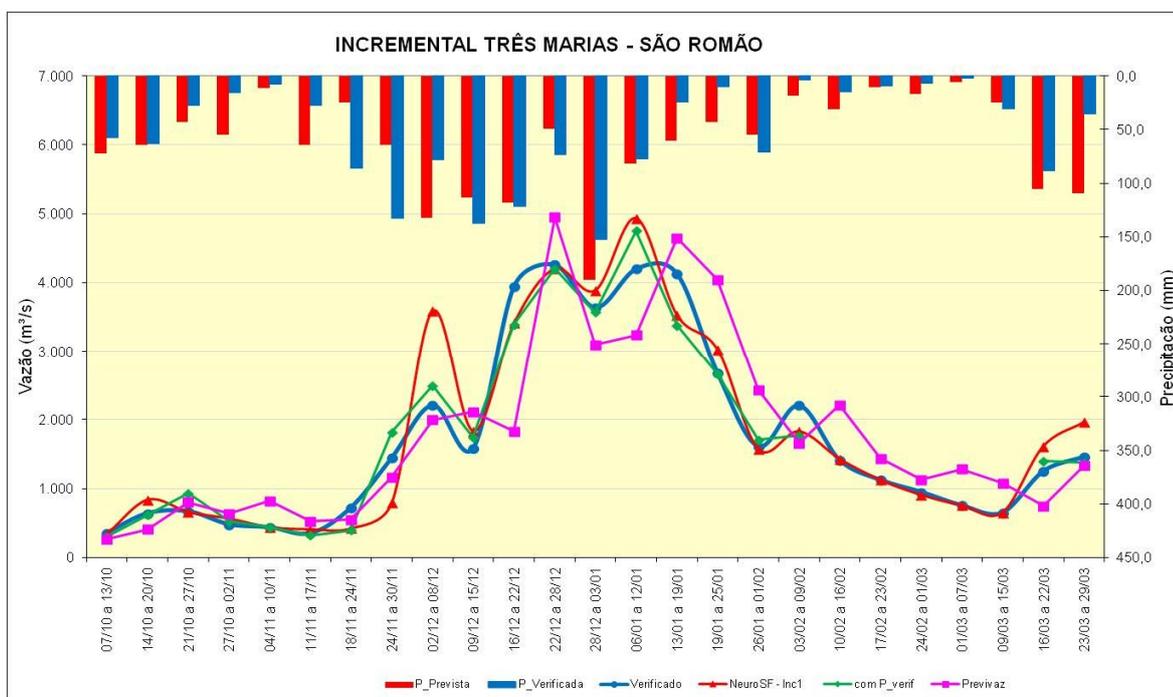


Figura 20 – Comparação dos Resultados do NeuroSF e Previvaz – Incremental 1

Tabela 08 - Comparação entre os resultados do NeuroSF com o Previvaz – Incremental 2

Semana	Desvios Absoluto	
	NeuroSF	Previvaz
semana1	16%	23%
semana2	42%	43%
semana3	61%	15%
semana4	56%	34%
semana5	7%	95%
semana6	32%	89%
semana7	24%	28%
semana8	17%	35%
semana9	69%	34%
semana10	2%	6%
semana11	51%	23%
semana12	2%	2%
semana13	83%	7%

Semana	Desvios Absoluto	
	NeuroSF	Previvaz
semana14	4%	37%
semana15	20%	34%
semana16	30%	0%
semana17	15%	166%
semana18	0%	20%
semana19	11%	46%
semana20	11%	34%
semana21	4%	25%
semana22	2%	65%
semana23	12%	53%
semana24	25%	21%
semana25	52%	17%

Média 26% 38%

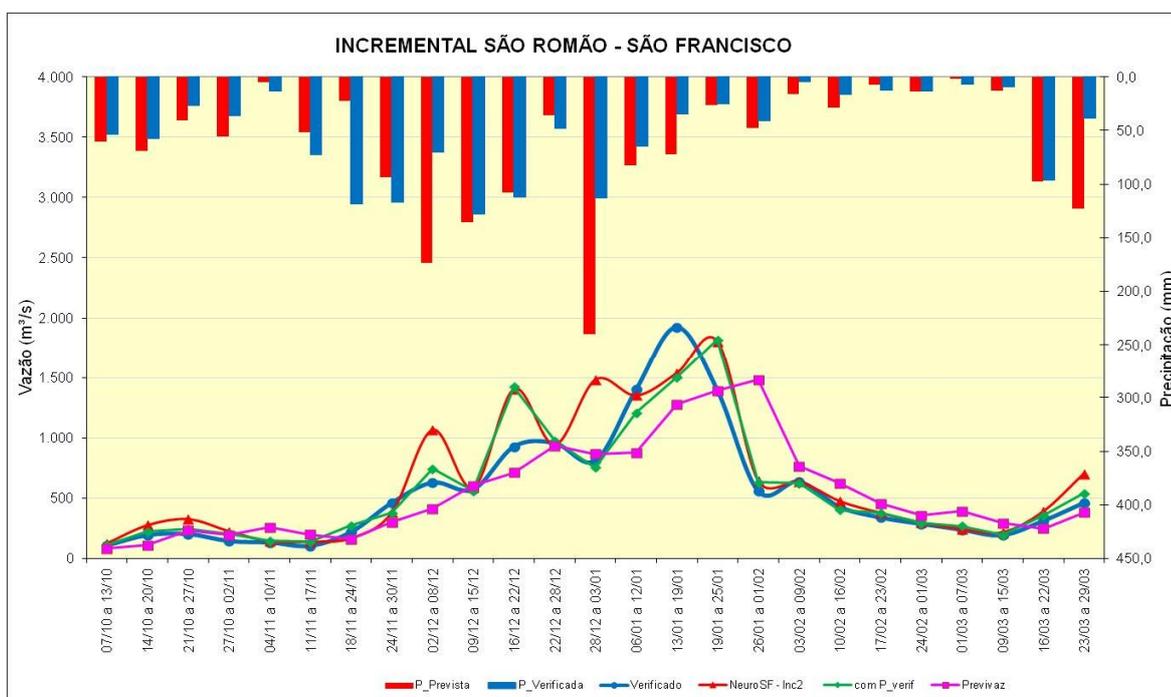


Figura 21 – Comparação dos Resultados do NeuroSF e Previvaz – Incremental 2

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados obtidos com a utilização dos modelos Neuro3M e NeuroSF, baseados na técnica de redes neurais, mostram uma melhoria na qualidade das previsões de vazões diárias na bacia do rio São Francisco para o período úmido 2011/2012.

Para calibração dos modelos foram utilizadas informações das estações fluviométricas e pluviométricas da bacia, previsão de precipitação para um horizonte de 10 dias oriundas do modelo

numérico de precipitação ETA e a utilização de séries de vazões naturais a Três Marias e incrementais de dois trechos afluentes ao aproveitamento de Sobradinho.

Verificou-se que mesmo com desvios elevados na previsão de precipitação em algumas semanas, obtém-se um ganho significativo na qualidade das previsões de vazões com a utilização da previsão de precipitação. Contudo, foi observado um viés positivo nas previsões fornecidas pelo modelo ETA (tendência de superestimar os valores da precipitação prevista), sendo utilizada, nestes estudos, uma metodologia para identificação e remoção deste viés, obtendo-se melhores resultados na previsão de vazões.

A comparação entre os desempenhos dos modelos desenvolvidos foi realizada com base em comparações semanais. A partir destas comparações, conclui-se que a aplicação da técnica de redes neurais para a previsão de vazões naturais a Três Marias e incrementais ao reservatório de Sobradinho proporcionou um bom desempenho para a previsão de vazão natural, sendo superior ao desempenho do modelo estocástico Previvaz, que apresenta uma defasagem temporal na previsão de vazões por não utilizar a previsão de precipitação.

Tendo em vista os resultados obtidos, recomenda-se a realização de estudos para outros aproveitamentos, utilizando a metodologia baseada na técnica de redes neurais.

BIBLIOGRAFIA

BLACK T.L. (1994). “*NMC Notes: The New NMC mesoscale Eta model: Description and forecast examples. Weather and Forecasting*”. pp. 256-278.

CEPEL. (2004). “*Modelo de Previsão de Vazões Semanais Aplicado ao Sistema Hidroelétrico Brasileiro – Modelo Previvaz*”, Manual de Referência.

CHOU, S. C.; NUNES, A. M. B.; CAVALCANTI, I, F. A. (2000). *Extended range forecasts over South America using the regional ETA model*. Journal of Geophysical Research, Volume 105, Issue D8, p. 10147-10160.

ONS (2009). *Previsão de vazões diárias ao reservatório de Três Marias usando a técnica de redes neurais*.

ONS (2010). *Previsão de vazões incrementais diárias na Bacia do Rio São Francisco usando a técnica de redes neurais*.

VALENÇA, M. J. S. (2005). *Aplicando redes neurais: um guia completo*. Editora Livro rápido. Olinda, PE: Ed. do Autor, 284p.