

ÍNDICES CLIMÁTICOS E A VARIABILIDADE DAS VAZÕES AOS RESERVATÓRIOS TRÊS MARIAS E SOBRADINHO

Carlos Henrique Ribeiro Lima¹ & Maria Vitória Nava Silva do Carmo²

RESUMO – Modelos estatísticos que incluem informação climática tem exercido papel fundamental na previsão de vazões e no planejamento da operação do sistema hidroelétrico nacional. Nesse sentido, busca-se aqui contribuir para o aperfeiçoamento desses modelos a partir da análise da influência de alguns índices climáticos representantes dos padrões de circulação atmosférica sobre o Brasil na variabilidade anual, mensal e diária das afluições aos reservatórios Três Marias e Sobradinho, considerados locais de difícil previsibilidade de vazões de médio e longo prazo. Na escala anual os resultados obtidos mostraram que o índice representativo do ramo ascendente da célula de Hadley influencia as vazões de ambos os reservatórios, enquanto na escala mensal diversos índices apresentam alguma influência, sendo que a combinação dos mesmos leva a potenciais ganhos nos modelos de previsões mensais de afluições, particularmente no período chuvoso e com antecedências de até quatro meses. A análise de extremos de vazão durante o período chuvoso mostrou que a evolução e magnitude de alguns índices climáticos nos quatro meses que antecedem o pico de vazão influenciam na magnitude desse evento, indicando a possibilidade de desenvolvimento de modelos que possam condicionar a distribuição de probabilidades de máximos sazonais de vazão ao estado climático do período analisado.

ABSTRACT – Climate informed statistical models have played a big role on streamflow forecasts and in the operation planning of the national hydropower system. In this way, we seek here to improve such models by analyzing the influence of some climate indexes representatives of the atmospheric circulation patterns across Brazil on the annual, monthly and daily inflow variability of the Três Marias and Sobradinho reservoir gauges, which are considered of low predictability in the medium and long term run. On the annual scale, the results show that the index representative of the Hadley cell ascending branch has an influence on the flow of both reservoir, while on the monthly scale several indexes have some influence, and the combination of them lead to potential gains in monthly streamflow forecast models, particularly during the rainy season and up to four months lead times. The analysis of extreme flows for the rainy season show that the evolution and magnitude of such climate indexes in the four months before the peak flow date are linked with magnitude of the flood event, showing the possibility to develop probability distribution models for the seasonal peak flow conditioned on the actual climate state.

Palavras-chave: índices climáticos, previsão de vazões, eventos extremos.

1) Prof. Adjunto. Depto. de Eng. Civil e Ambiental. Universidade de Brasília. Tel.: (61) 3107-0934. E-mail: chrlima@unb.br.

2) Estudante de Graduação. Engenharia Ambiental. Universidade de Brasília. Tel.: (61) 3107-0934. E-mail: vitorianava@gmail.com.

1 - INTRODUÇÃO

Com um grande parque de usinas hidroelétricas, o Brasil possui uma capacidade instalada de produção de energia elétrica predominantemente de fontes renováveis e com baixa emissão de gases poluentes da atmosfera, porém tal característica da matriz energética brasileira traz consigo a sensibilidade da produção energética à variabilidade climática, pois a energia produzida em cada uma das usinas depende diretamente do volume dos reservatórios de acumulação e conseqüentemente do histórico de aflúncias a esses reservatórios, que apresentam diversas componentes de variabilidade espaço-temporal. Nesse sentido, o conhecimento futuro das aflúncias a cada um dos reservatórios do sistema hidroelétrico brasileiro em diversas escalas temporais torna-se uma ferramenta fundamental na gestão dos recursos hídricos e na operação ótima do sistema, pois tende a minimizar as perdas evaporativas e por vertimento e, aproveitando-se da integração do sistema hidroelétrico nacional através de linhas de transmissão, busca otimizar a produção e o intercâmbio de energia elétrica entre as regiões produtoras. Busca-se portanto neste trabalho, a partir da análise de diversos índices climáticos representativos do clima no país, contribuir para o desenvolvimento e aperfeiçoamento de modelos estatísticos de previsão de vazões para a Bacia do Rio São Francisco, particularmente aos reservatórios hidroelétricos Três Marias e Sobradinho, que são considerados locais de difícil previsibilidade de vazões de curto, médio e longo prazo.

No intuito de antecipar os valores (ou a distribuição de probabilidades) futuros de aflúncias, é comum a utilização de modelos dinâmicos ou estatísticos de previsão de vazões. No primeiro tipo são em geral utilizados Modelos de Circulação Global (GCM's) do oceano e da atmosfera associados com modelos climáticos regionais para determinar os valores de precipitação futura em um certo local, e a partir do uso de modelos hidrológicos determinar as aflúncias futuras. Exemplos de aplicação desses modelos aparecem em diversos estudos (veja por exemplo Silva *et al.*, 2007). Dada a limitação em prever valores de precipitação para horizontes maiores do que duas semanas e as complexidades envolvidas na modelagem do processo chuva-vazão, modelos dinâmicos tendem a apresentar um baixo desempenho para previsões de médio e longo prazo (semanas a meses). Assim, uma alternativa bastante utilizada na literatura tem sido os modelos estatísticos de previsão de aflúncias (por exemplo, Costa *et al.*, 2003; Maceira *et al.*, 2005), que são desenvolvidos tradicionalmente a partir de uma regressão linear entre a variável resposta e variáveis independentes ou preditores. No caso de previsões de médio e longo prazo, os preditores tendem a representar uma variável ou índice climático de larga escala associados com o processo de chuva sobre a bacia hidrográfica onde são desejadas as previsões de vazão. Exemplos de modelos estatísticos com a utilização de preditores (informação) climática aparecem em vários estudos

(Lima *et al.*, 2007; Grantz *et al.*, 2005), incluindo modelagem das vazões na Bacia do Rio São Francisco (Lima e Lall, 2007).

Nesse sentido, o entendimento dos processos climáticos associados com a chuva na bacia e a consequente identificação de preditores climáticos para as vazões passa a ser o primeiro passo no desenvolvimento e aplicação de modelos estatísticos para previsão de afluências. Nos reservatórios ao longo do Brasil, por exemplo, essa tarefa pode ser complexa dada a extensão territorial do país e as diversas forçantes climáticas que atuam para determinar o tempo e chuva de uma dada região. Por exemplo, sabe-se que a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) associada com anomalias na temperatura do Oceano Pacífico (eventos El Niño e La Niña) afetam diretamente a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) em diversas escalas temporais produzindo diferentes padrões de precipitação ao longo do país, ainda pouco entendidos na literatura (Reboita *et al.*, 2010). Com objetivo de melhor representar essas forçantes climáticas de larga escala e facilitar o entendimentos dos processos regulados pelas mesmas, é comum a utilização de índices para representar por inteiro um sistema climático de grande dimensão ou uma característica específica desse sistema. Por exemplo, eventos de El Niño associados com uma elevação da temperatura da superfície do mar (TSM) na região do Pacífico Tropical são comumente representados pelo índice NINO3, que consiste na temperatura média da superfície do mar na região delimitada pelas coordenadas 5N-5S e 150W-90W. Da mesma forma, índices climáticos para caracterizar e ampliar o entendimento de sistemas de monção e precipitação sobre uma dada região podem ser observados na literatura (veja por exemplo Gan *et. al.*, 2006 e referências citadas).

Nesse trabalho é realizado um estudo da influência de indicadores climáticos recentemente desenvolvidos para o sistema de monção que afeta o Brasil (Gan *et. al.*, 2006) sobre as afluências aos reservatórios Três Marias e Sobradinho em diversas escalas temporais. Adicionalmente, obteve-se um outro índice representativo do sistema de monção a partir do contraste entre a temperatura na superfície do continente e a TSM do Oceano Atlântico Sul. Na escala mensal, avaliou-se o potencial ganho da utilização desses índices climáticos sobre um modelo de previsão de vazões baseado somente na persistência (ou modelo periódico auto-regressivo, veja por exemplo Yevjevich, 1997). Buscou-se da mesma forma avaliar a influência desses índices climáticos sobre os máximos sazonais de vazão.

2 - DADOS HIDROCLIMÁTICOS E A BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO

Dados de afluência diária para os reservatórios Três Marias e Sobradinho são disponibilizados pelo operador nacional do sistema (ONS) e foram utilizados neste estudo. A localização dos postos na Bacia do Rio São Francisco é apresentada na Figura 1. Os dados disponíveis compreendem o período 1931-2009. As séries disponibilizadas pela ONS são *naturalizadas*, assim são removidos

quaisquer efeitos artificiais (evaporação e operação de reservatórios, usos da água, etc) na vazão do rio ocorridos à montante do posto em uso. Apesar de séries naturais de afluência diária serem passíveis de erros de medição e durante o processo de *naturalização*, acredita-se que a influência dos mesmos nos resultados obtidos neste trabalho não sejam significantes. Características adicionais da série de afluência ao reservatório Sobradinho podem ser vistas em Lima e Lall (2007).

O posto do reservatório Três Marias está localizado no trecho do Rio São Francisco no Estado de Minas Gerais, possuindo uma área de drenagem de 49880 km². O posto Sobradinho localiza-se no trecho do Rio São Francisco dentro do Estado da Bahia, possuindo uma área de drenagem de 494700 km². A área incremental de drenagem entre Três Marias e Sobradinho é de aproximadamente 447865 km². O máximo volume de armazenamento do Sobradinho é de 28669 hm³, o que leva a uma capacidade máxima de geração elétrica de 1050 MW. A água liberada por Sobradinho é reaproveitada em mais sete usinas hidroelétricas (Itaparica, Paulo Afonso I, II, III e IV, Moxotó e Xingó.), que possuem baixas capacidades de armazenamento de água mas aumentam a máxima capacidade de geração de energia para cerca de 9800 MW. Vale ressaltar que o uso do reservatório Sobradinho também inclui controle de cheias, o que reforça a necessidade de previsões de afluências e uma ótima política operacional.

A Bacia do Rio São Francisco está localizada no Centro-Oeste, Sudeste e no Nordeste do Brasil. O Rio São Francisco nasce na Serra da Canastra, no Município de Roque de Minas, em Minas Gerais, e atravessa os estados da Bahia, de Pernambuco, de Alagoas e de Sergipe, até desaguar no mar, após percorrer cerca de 2700 km. É uma bacia de extrema importância, pois drena cerca de 8 % do território nacional, correspondendo a uma área de cerca de 640 mil km², sendo a terceira maior do País. A Figura 1 ilustra a localização dessa região.

Dada a sua grande extensão e posição em relação ao equador, a Bacia do Rio São Francisco é marcada pela atuação de diferentes sistemas climáticos que levam a diferentes padrões de precipitação ao longo da região, como pode ser observado na Figura 2. A região do alto São Francisco, representado por tons de azul na Figura 2, está localizada em uma porção dominada por clima úmido e com atuação de frentes frias e da ZCAS. Entretanto, cerca de 50% do território da bacia, representado pela cor laranja na Figura 2, está localizado em clima semi-árido, compreendendo uma fração do Polígono das Secas onde o sistema predominante de precipitação consiste da atuação da ZCIT e propagação de ondas do Atlântico Sul. Devido a essa transição, a região do São Francisco tem uma grande variabilidade climática, com temperatura média anual variando de 18 °C a 27 °C, baixo índice de nebulosidade e grande incidência de radiação solar.

Influências climáticas remotas sobre a precipitação na bacia do Rio São Francisco são também observadas (Lima e Martins, 2004; Lima e Lall, 2007). O estado da temperatura e campo de pressão no Pacífico tropical tem exercido uma influência particular nos padrões de precipitação ao longo do

São Francisco. Observa-se que em anos em que a TSM do Pacífico Tropical está acima do normal (estado El Niño), ocorre uma tendência de precipitação abaixo da média, particularmente no baixo São Francisco. Por outro lado, quando a TSM está abaixo do normal (fenômeno La Niña), observa-se uma tendência de aumento na precipitação. Essas tendências tendem a ser moduladas pelo gradiente de temperatura entre o Atlântico Norte e Sul Tropical, também conhecido como Dipolo do Atlântico, que exerce uma influência sobre a posição da ZCIT e conseqüentemente nos padrões de precipitação sobre o Nordeste.



Figura 1 – Localização da Bacia do Rio São Francisco, do Reservatório Sobradinho (triângulo) e dos Reservatórios à Jusante (círculos).

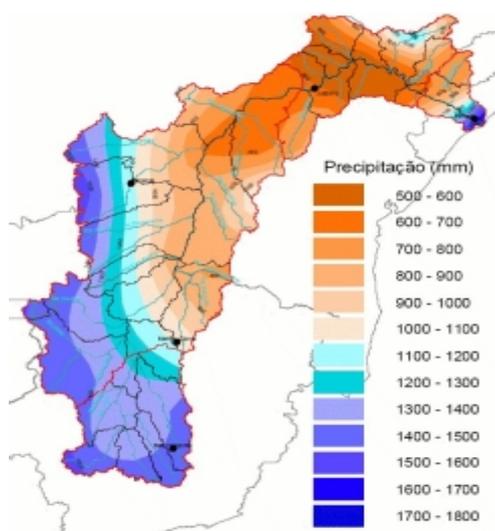


Figura 2 – Precipitação anual (mm) sobre a Bacia do Rio São Francisco.

Fonte: <http://siscom.ibama.gov.br/msfran/index.php?page=a-bacia-do-sao-francisco>

3 – ÍNDICES CLIMÁTICOS

Com objetivo de caracterizar os sistemas climáticos responsáveis pelos padrões de precipitação observados na Bacia do Rio São Francisco como descrito acima, foram obtidos índices climáticos a partir dos dados NCEP/NCAR de *reanalysis* (Kanay *et al.*, 1996) para o período 01/01/1949 a 31/12/2009. Os dados são disponibilizados *International Research Institute for Climate Prediction (IRI)* e podem ser obtidos em <http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA.NCEP-NCAR/.CDAS-1/.DAILY/>. Para os índices de monção, foram analisados os ventos zonal e meridional para diversos níveis de pressão entre 200hPa e 850 hPa. O índice de contraste de temperatura continente-oceano foi obtido pela diferença entre a temperatura média sobre a superfície do território brasileiro e a TSM média sobre a região do Atlântico Sul.

Os índices de monção foram determinados a partir das definições descritas em Gan *et al.* (2006), que argumentam que índices para caracterizar sistemas de monção são melhores representados quando indicam mudanças nos padrões de circulação do vento. O primeiro índice foi definido pela diferença entre o vento meridional nos níveis de 850 e 200 hPa, na área 10°S-5°S e 40°W-30°W (Nordeste do Brasil). Ele foi chamado de *Meridional Wind Shear Index* (MWSI) e representa a influência do ramo de ascensão da célula de Hadley nos padrões de precipitação, sendo que valores negativos desse índice estão associados com valores maiores (correlação negativa) de precipitação sobre o Nordeste e Amazônia (Gan *et al.*, 2006). Da mesma forma, o segundo índice denominado *Zonal Wind Shear Index* (ZWSI) foi definido como a diferença entre o vento zonal nos níveis de 850 e 200 hPa sobre a área 15°S-10°S e 60°W-50°W. Esse índice está associado com a circulação oeste-leste, sendo que o vento zonal em 850 hPa está positivamente correlacionado com a precipitação sobre o Nordeste enquanto o vento zonal em 200 hPa está negativamente correlacionado (Gan *et al.*, 2006), fazendo com que valores positivos do índice estejam associados com aumentos na precipitação sobre o Nordeste. O índice *850-hPa Zonal Wind Index* (850ZWI) foi definido pelo vento zonal no nível 850 hPa ao longo da longitude 60°W, delimitada pelas latitudes 10°S e 20°S. Durante a estação seca esse índice tende a ser negativo (ventos de leste) e reverte (ventos de oeste) seu valor durante o início do período de monção (Gan *et al.*, 2006). Esse índice é similar ao desenvolvido independentemente por Lima e Lall (2009) para previsão de vazões ao longo do país. Finalmente, definiu-se o índice *850-hPa Zonal and Meridional Index* (UVI) para avaliar a influência do transporte de umidade à leste dos Andes para o Nordeste pelos jatos de baixo nível. O índice é resultante da soma de duas componentes: a primeira foi formada pelo vento zonal médio em 60°W-50°W no nível 850 hPa e a segunda pelo vento meridional em 850 hPa delimitado na região 25°S-20°S e 65°W-60°W. Este índice tende a ser positivamente correlacionado com a

precipitação sobre o Nordeste (Gan *et al.*, 2006). Todos os índices de monção foram definidos na escala diária a partir da média móvel de cinco dias (*pentad*).

O índice de contraste de temperatura continente-oceano foi calculado pela diferença entre a temperatura diária média sobre o continente (área delimitada por 0-35°S e 70°W-40°W) e a temperatura diária média na superfície do mar do Atlântico Sul (área delimitada por 0-40°S e 40°W-10°E). Para minimizar o efeito de ruídos, o índice de contraste de temperatura (ICT) diário foi definido a partir do *pentad*, que representa a média móvel de cinco dias da diferença entre as médias espaciais diárias das temperaturas do continente e do oceano. A escala mensal e anual do índice foi definida a partir das médias diárias dos respectivos valores. Vale ressaltar que a temperatura média do continente foi determinada somente em função dos dados *reanalysis*, não tendo sido feita nenhuma comparação com dados observados.

Adicionalmente, foi considerado o índice NINO3 para avaliar a influência remota da TSM do Pacífico Tropical sobre as vazões ao longo da Bacia do Rio São Francisco nas escalas anual e mensal.

A Tabela 1 abaixo apresenta um resumo dos índices climáticos utilizados neste estudo.

Tabela 1 – Índices climáticos utilizados

Índice	Nome	Abreviação	Definição
1	<i>Meridional Wind Shear Index</i> (MWSI)	I1	Diferença entre o vento meridional nos níveis de 850 hPa e 200 hPa, na área 10 °S-5 °S e 40 °W-30 °W
2	<i>Zonal Wind Shear Index</i> (ZWSI)	I2	Diferença entre o vento zonal nos níveis de 850 e 200 hPa, na área 15 °S-10 °S e 60 °W-50 °W
3	<i>850-hPa Zonal Wind Index</i> (850ZWI)	I3	Vento zonal no nível 850 hPa ao longo da longitude 60 °W, delimitada pelas latitudes 10 °S e 20 °S
4	<i>850-hPa Zonal and Meridional Index</i> (UVI)	I4	Soma do vento zonal médio no nível 850 hPa na área 15 °S-10 °S e 60 °W-50 °W no nível 850 hPa e a do vento meridional em 850 hPa na área 25 °S-20 °S e 65 °W-60 °W
5	Índice de Contraste de Temperatura (ICT)	I5	Diferença entre a temperatura diária média sobre o continente (área 0-35 °S e 70 °W-40 °W) e a temperatura diária média na superfície do mar do Atlântico Sul (área 0-40 °S e 40 °W-10 °E).
6	NINO3	I6	Anomalia de temperatura na área 5 °N-5 °S e 150 °W-90 °W

A evolução temporal dos valores médios anuais dos índices 1-5 é mostrada na Figura 3. Note que nenhuma tendência temporal monotônica ou cíclica é observada nas séries temporais. A média mensal de cada um dos índices é mostrada na Figura 4, onde evidencia-se o ciclo sazonal de cada índice. O índice I1, por exemplo, apresenta um pico em agosto e o menor valor em dezembro, indicando o início do período chuvoso na região. Já o índice I5 (contraste de temperatura), apresenta seu maior valor em outubro, quando o continente passa a estar mais aquecido do que o oceano, e o menor valor em maio, quando essa situação se inverte.

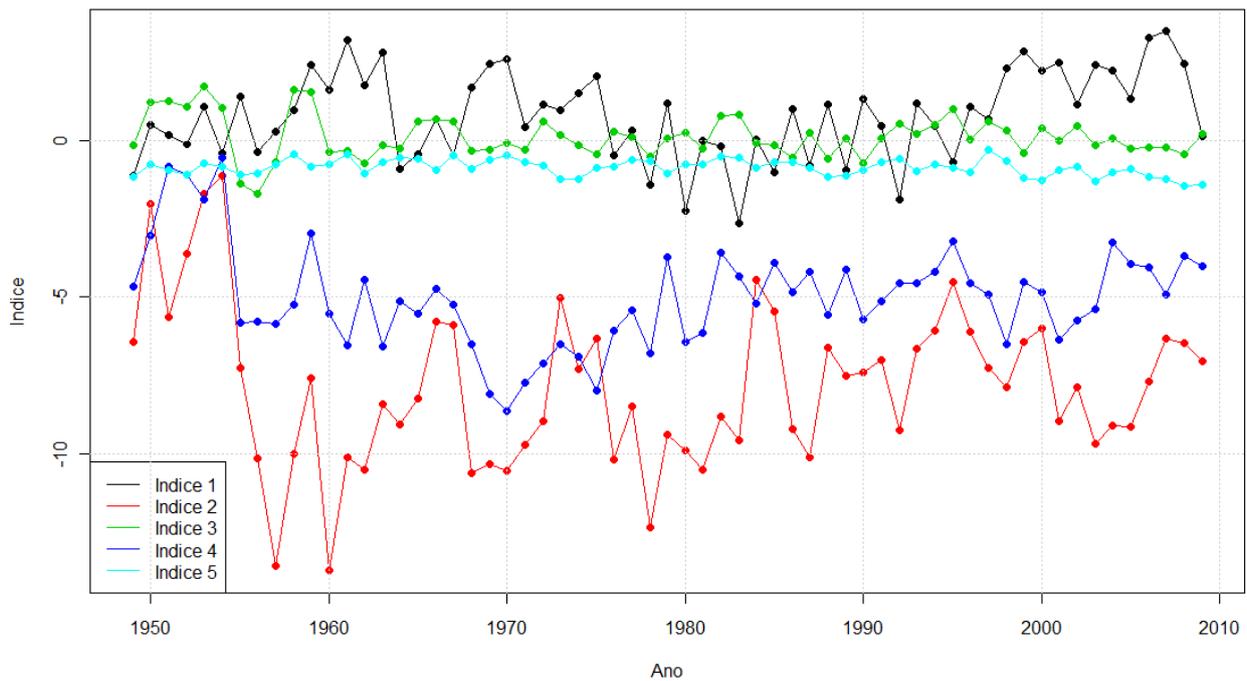


Figura 3 - Média anual dos índices como definido na Tabela 1

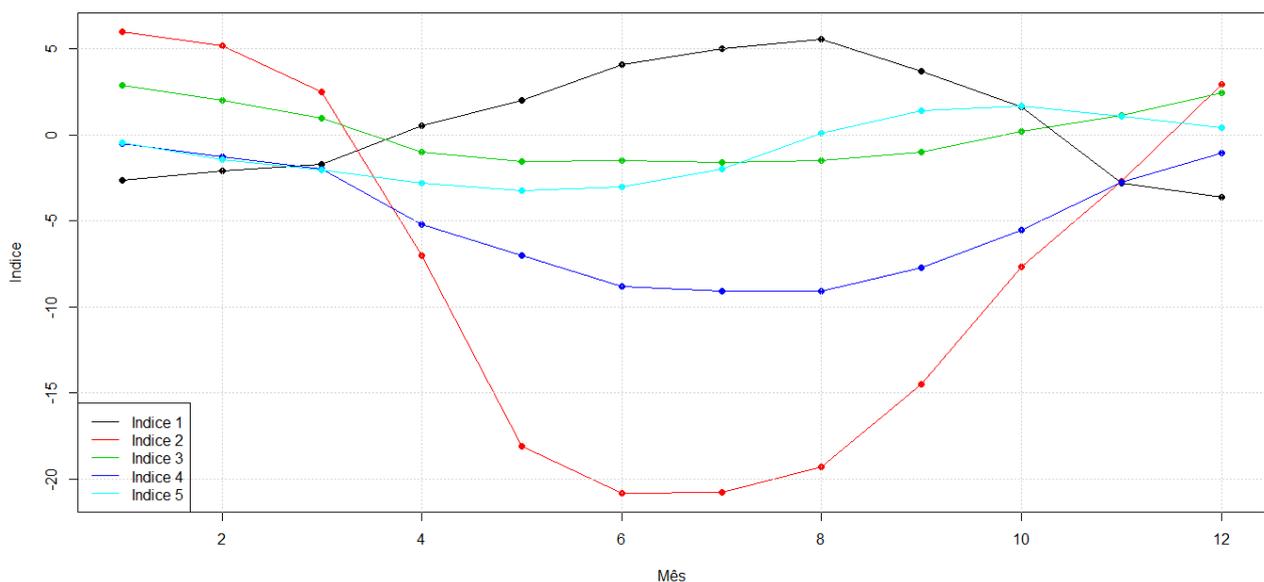


Figura 4- Média mensal dos índices climáticos utilizados.

As correlações entre os diversos índices na escala mensal são mostradas na Tabela 2. Observa-se correlações significativas (acima de 0,07 em valor absoluto são estatisticamente significantes ao nível de 5%) para a maior parte dos índices. Entretanto, vale ressaltar que a sazonalidade dos índices não foi removida, o que tende a levar a maiores valores de correlação.

Devido a inércia do sistema climático, espera-se que o I5 esteja bastante correlacionado com os demais índices, mas com uma certa antecedência. Assim, é apresentado na Figura 5 a função de correlação cruzada para os índices I1 e I5. Os valores observados sugerem que a maior correlação entre os dois índices ocorre quando o I5 está defasado de 2 a 3 meses do índice I1, sugerindo que esse seja o intervalo de tempo para que a circulação atmosférica caracterizada por I1 responda as mudanças no contraste de temperatura continente-oceano. Valores similares (apenas invertendo o sinal) foram encontrados para a correlação cruzada entre I5 e os índices I2, I3 e I4, levando a conclusões similares quanto a resposta da circulação atmosférica de larga escala sobre o Brasil a mudanças no contraste de temperatura continente-oceano. Não foram observadas correlações cruzadas estatisticamente significantes entre I6 e os demais índices até a antecedência de 6 meses.

Tabela 2 - Matriz de correlação entre os índices climáticos na escala mensal

	I1	I2	I3	I4	I5	I6
I1	--	-0,61	-0,61	-0,71	-0,11	-0,06
I2	--	--	0,79	0,77	0,21	-0,07
I3	--	--	--	0,78	0,29	0,10
I4	--	--	--	--	0,10	-0,03
I5	--	--	--	--	--	0,04

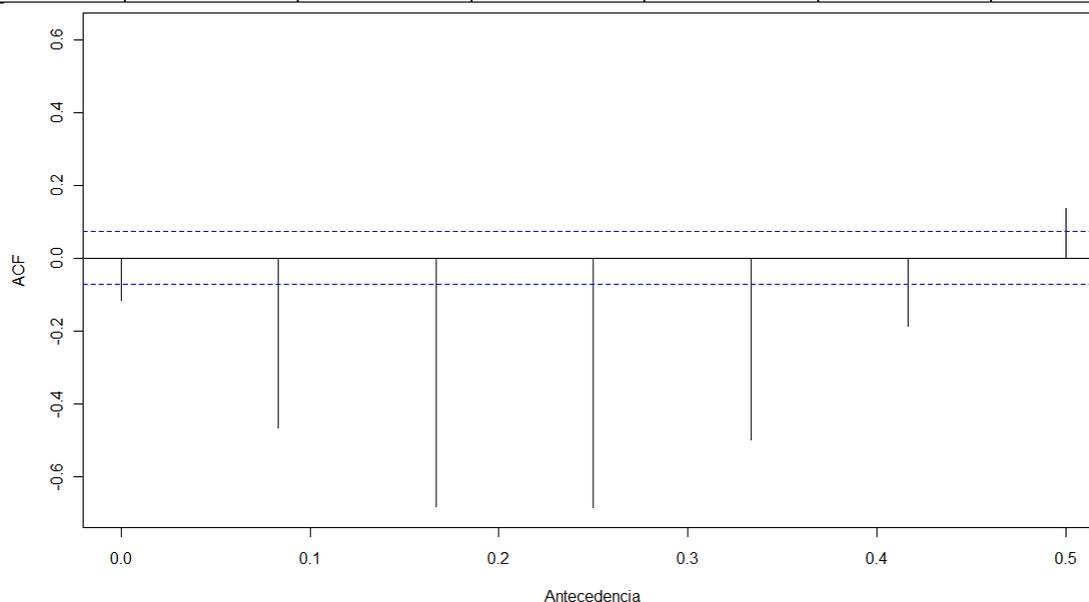


Figura 5 - Função de correlação cruzada entre I1 e I5. A antecedência se refere ao período de atraso do índice I5 com relação ao I1 em fração de ano. Valores acima ou abaixo da região definida pelas linhas tracejadas azuis são estatisticamente significantes ao nível de significância de 5%.

4 – ÍNDICES CLIMÁTICOS E VARIABILIDADE DAS VAZÕES

A correlação anual entre as vazões médias anuais em Três Marias e Sobradinho e cada um dos índices climáticos é mostrada na Figura 6. Em ambos os reservatórios o índice 1 representante da influência do ramo ascendente da célula de Hadley nos padrões de precipitação do Nordeste é o único, com exceção do I6 para o posto Três Marias, a apresentar uma correlação estatisticamente significativa nessa escala temporal.

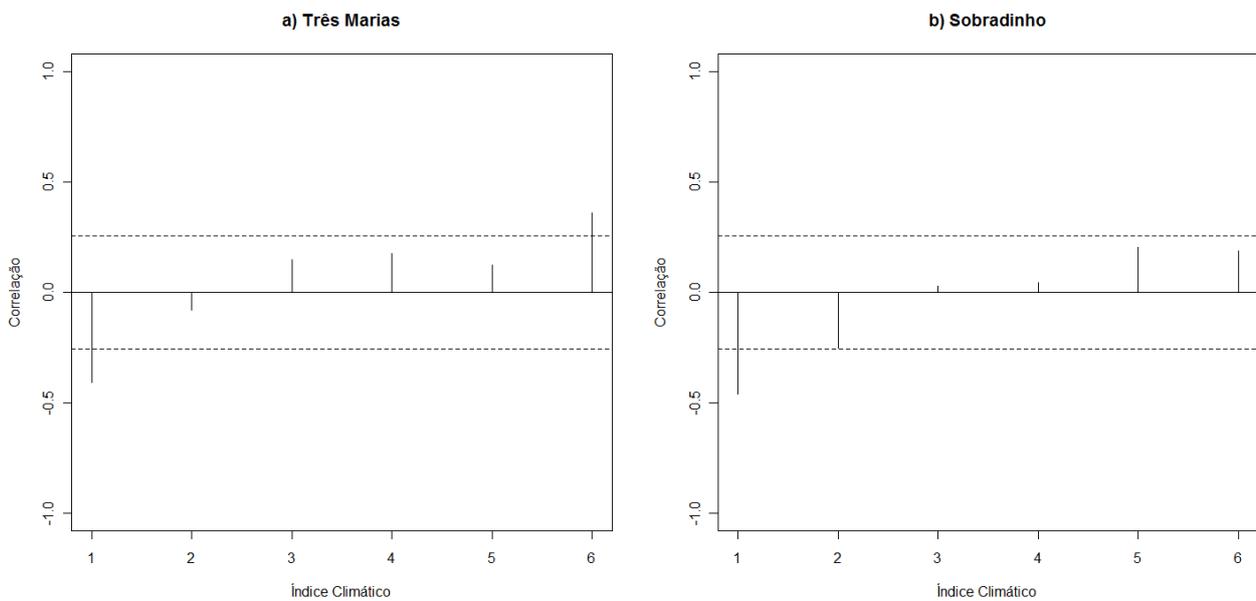


Figura 6 - Correlação entre as vazões médias anuais em Três Marias (a) e Sobradinho (b) e os seis índices climáticos como definidos na Tabela 1. Valores acima ou abaixo da região delimitada pelas linhas pontilhadas são estatisticamente significantes ao nível de confiança de 5%.

Na escala mensal uma série de correlações estatisticamente significantes foi obtida para diversos índices em diferentes escalas temporais. Por exemplo, a Figura 7 apresenta a correlação entre o I4 e I6 e as afluições de Três Marias em função do mês e da antecedência. Observa-se uma maior influência do I4 nos meses de maior vazão (Fevereiro-Maio), enquanto o I6 tende a influenciar mais as vazões do período seco com antecedências de até 6 meses. Já para as vazões mensais afluentes ao reservatório Sobradinho, o I1 apresenta uma grande influência nos meses de alta vazão (Figura 8), enquanto o índice I5 tende a afetar as vazões no período seco.

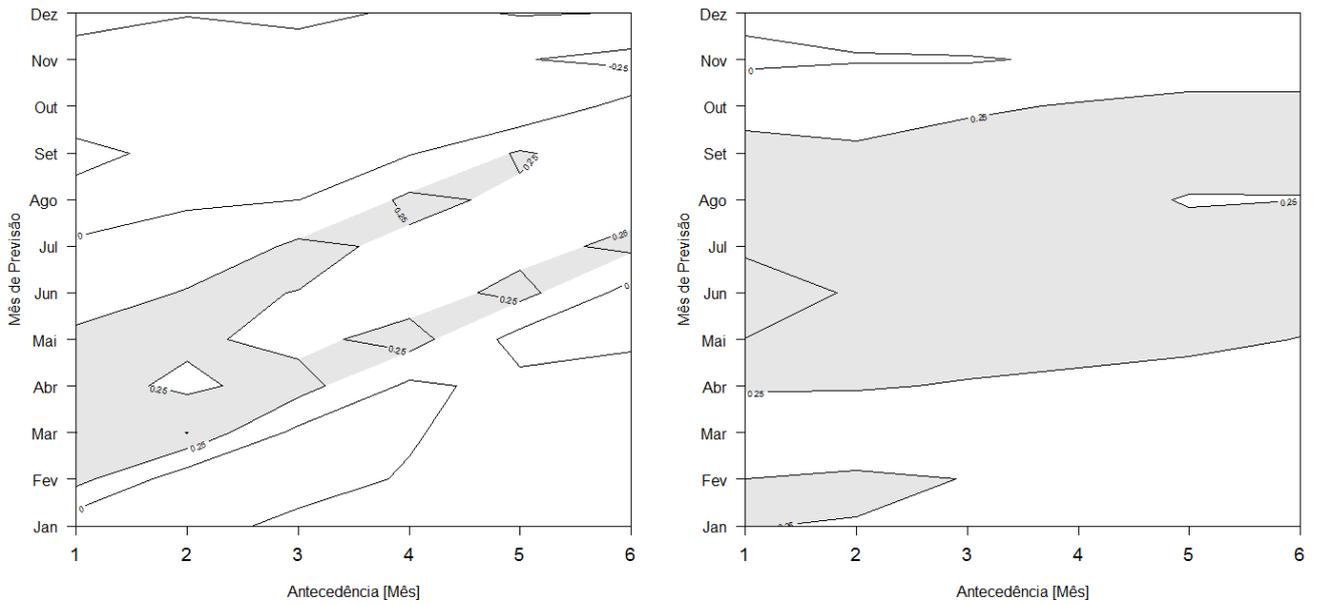


Figura 7 - Correlação entre os índices I4 (esquerda) e I6 (direita) e as vazões em Três Marias em função da antecedência e mês de previsão. A região em cinza indica correlações estatisticamente significantes (acima de 0,25 em valor absoluto) ao nível de significância de 5%.

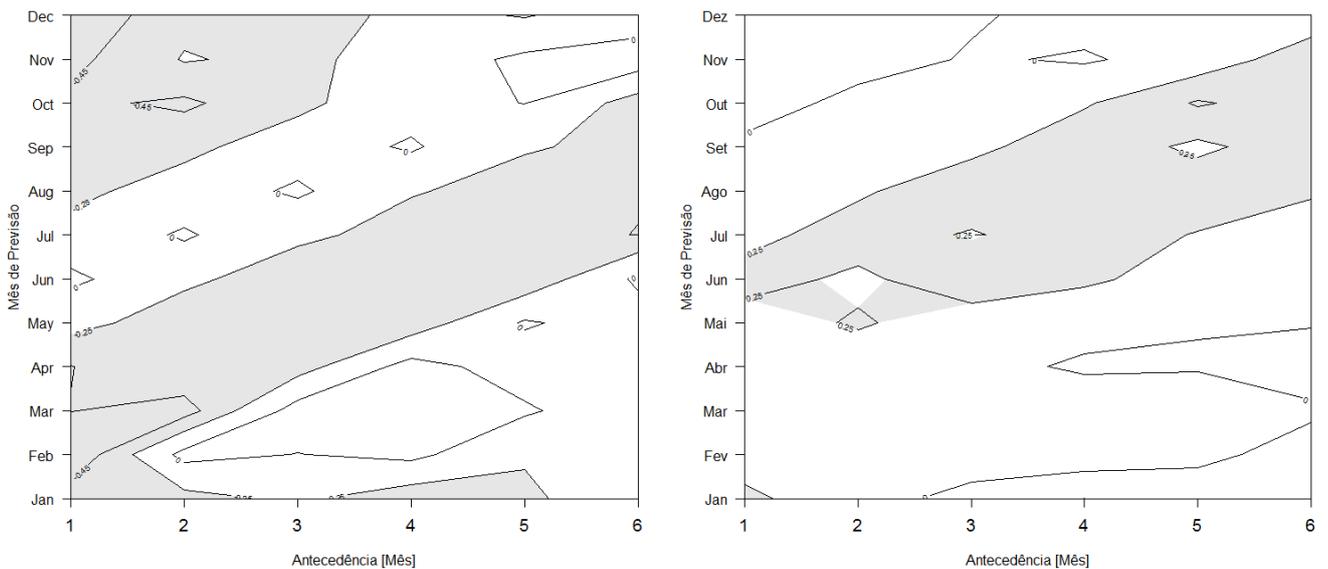


Figura 8 - Correlação entre os índices I1 (esquerda) e I5 (direita) e as vazões em Sobradinho em função da antecedência e mês de previsão. A região em cinza indica correlações estatisticamente significantes (acima de 0,25 em valor absoluto) ao nível de significância de 5%.

Para melhor avaliar a parte da variabilidade explicada pelos índices climáticos e o potencial ganho na previsão das vazões mensais afluentes aos reservatórios Três Marias e Sobradinho a partir do uso de informação climática fornecida pelos índices definidos acima, comparou-se o ajuste de

um modelo linear de regressão considerando apenas a persistência das vazões, ou seja, um modelo periódico auto-regressivo (Lima e Lall, 2007):

$$q(t) = a_{t,0} + a_{t,1}q(t-\tau) + a_{t,2}q(t-\tau-1) + \dots + a_{t,n}q(t-6) \quad (1)$$

com um modelo periódico auto-regressivo exógeno, que incluisse os índices climáticos:

$$q(t) = \sum_{i=\tau}^6 a_{t,i-\tau}q(t-i) + b_{t,i-\tau}I1(t-i) + c_{t,i-\tau}I2(t-i) + \dots + g_{t,i-\tau}I6(t-i) \quad (2)$$

onde q representa a vazão, t o mês de previsão, τ a antecedência das previsões, a , b , ..., g os parâmetros do modelo e I1-I6 os índices climáticos. Note que para cada mês de previsão e antecedência, é necessário estimar um conjunto de parâmetros para cada modelo.

Ademais, com intuito de evitar modelos com um grande número de preditores e parâmetros que estejam correlacionados entre si e poderiam levar a um modelo de previsão com *overfitting* e resultados insatisfatórios, utilizou-se a regressão LASSO (Hastie *et al.*, 2001) para estimar os parâmetros do modelo. Nesse caso, o processo de estimação consiste numa otimização que vise diminuir o erro quadrático médio ao mesmo tempo que reduz a soma do valor absoluto dos parâmetros (*shrinkage*), atuando da mesma forma que uma seleção de modelos via algum critério como AIC ou BIC. Maiores detalhes podem ser vistos em Hastie *et al.* (2001). Assim, um grande número de parâmetros em (1) e (2) podem possivelmente apresentar valores próximos ou iguais a zero.

O grau de ajuste do modelo foi determinado pelo coeficiente R^2 , conforme apresentado na Figura 9 para os modelos (1) e (2) e dados de vazão de Três Marias. Como esperado, os maiores valores são obtidos para os meses de previsão do período seco, que possuem uma maior persistência (Lima e Lall, 2007) e portanto são mais adequados ao modelo (1). Por outro lado, valores de R^2 para o modelo (2), que utiliza informação climática, mostram um ganho de previsão (ou uma maior variabilidade explicada) em todos os meses, particularmente no período chuvoso. A diferença entre os valores de R^2 para os modelos (2) e (1) reforça o ganho com uso de informação climática para antecedências de até 4 meses durante o período chuvoso (Figura 10), enquanto o período seco é marcado por baixo ganho na qualidade das previsões. Aumentos superiores a 50% de variabilidade explicada podem ser observados.

Da mesma forma, ganhos potenciais na previsão das vazões mensais ao reservatório Sobradinho (Figura 11) podem ser observados pela diferença entre os valores de R^2 para os modelos (2) e (1). Novamente o maior ganho é observado para os meses do período chuvoso (Janeiro-Abril) para antecedências de até quatro meses.

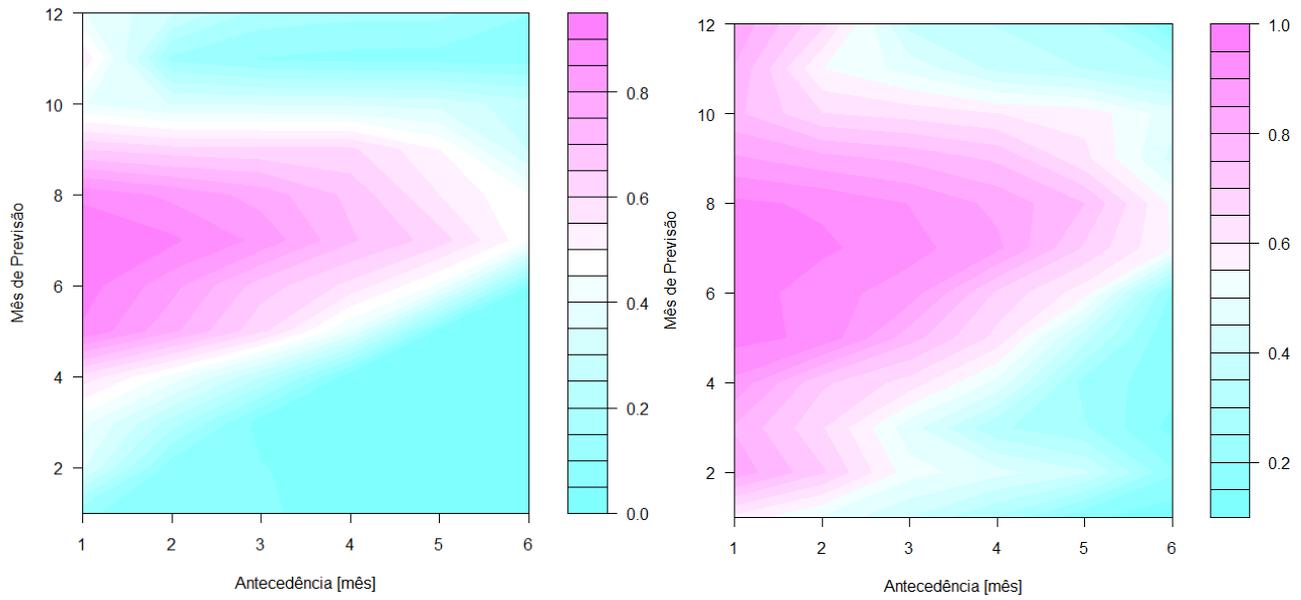


Figura 9 - Coeficiente R^2 para a regressão Lasso em (1) (esquerda) e (2) (direita) em função da antecedência e mês de previsão com dados do reservatório Três Marias.

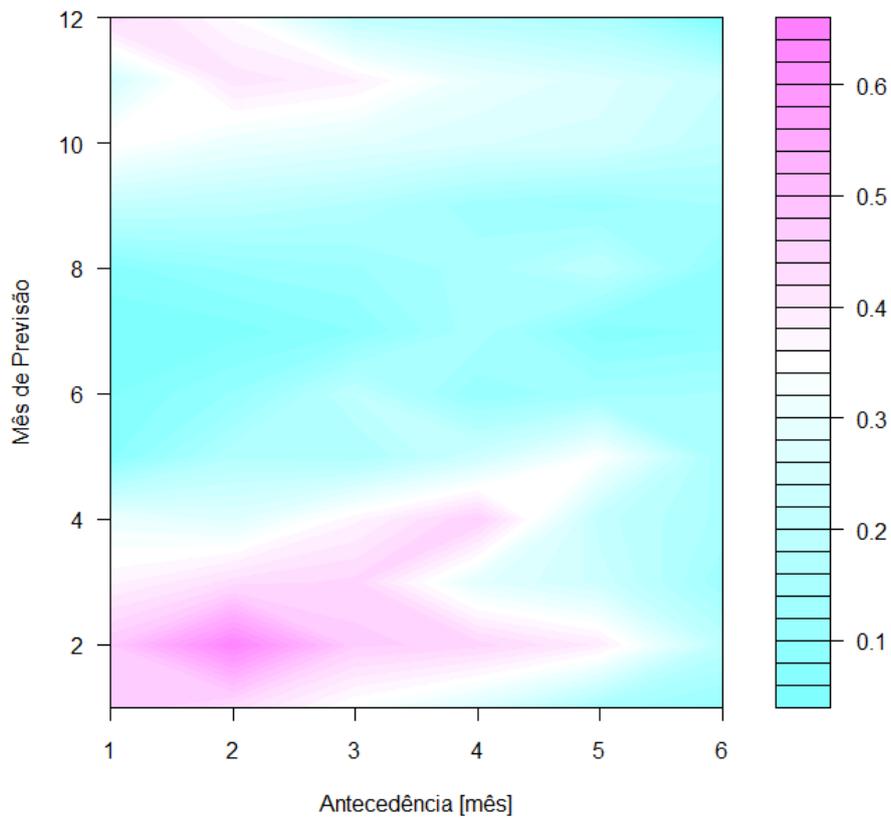


Figura 10 - Diferença entre os coeficiente R^2 da Figura 9.

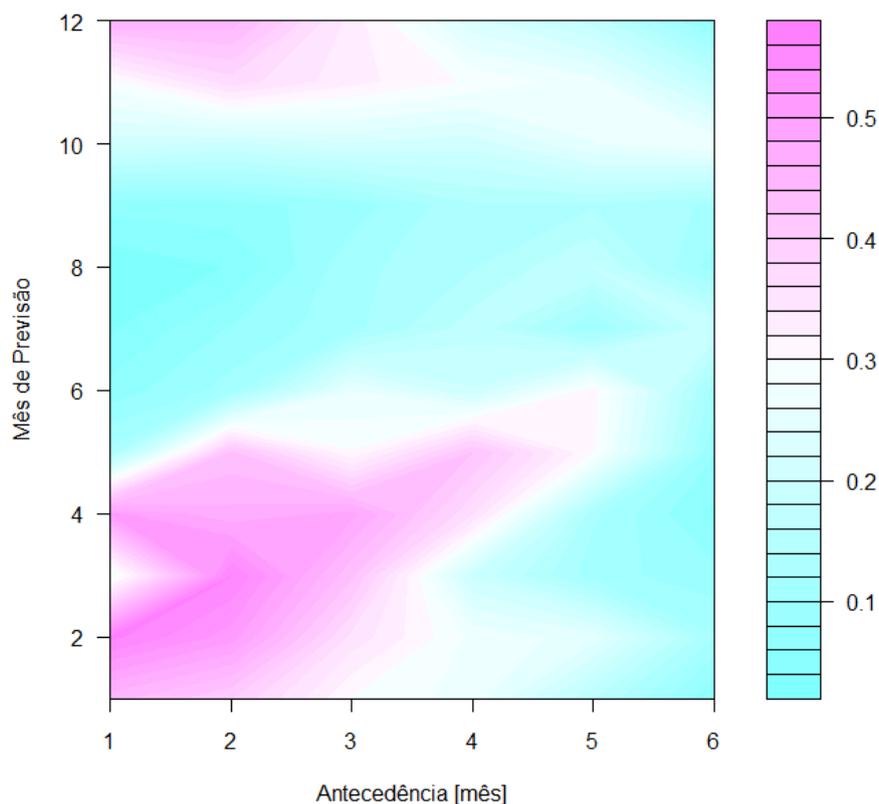


Figura 11 - Diferença entre os coeficientes R^2 obtidos via regressão Lasso para o modelo (2) e para o modelo (1) para os dados de vazão mensal do reservatório Sobradinho.

5.1- Eventos extremos

Uma análise da influência dos indicadores climáticos I1-I5 em eventos extremos de vazão aos reservatórios Três Marias e Sobradinho foi realizada a partir da determinação da correlação entre a vazão máxima diária ocorrida entre janeiro e abril de cada ano do período 1950-2009 e o valor médio dos índices climáticos no período dos 120 dias anteriores a data de ocorrência da vazão máxima. Os resultados obtidos mostraram correlações estatisticamente significantes ao nível de 5% entre a vazão máxima de Três Marias e os indicadores I1 (correlação = -0,29) e I5 (correlação = 0,32) e entre a vazão máxima de Sobradinho e o indicador I1 (correlação = -0,55). A Figura 12 apresenta o diagrama de dispersão para os valores de vazão máxima de Três Marias e os respectivos valores médios dos índices I1 e I5, enquanto a Figura 13 apresenta os dados para Sobradinho e o indicador I1.

De fato, a correlação entre as vazões de pico e o valor dos indicadores em cada um dos 120 dias que antecederam o eventos (Figura 14) sugere que, para Três Marias, o indicador 1 atua com uma antecedência superior a 60 dias, enquanto para Sobradinho essa antecedência tende a ser menor do que 20 dias e aparecer novamente após 60 dias, nesse caso possivelmente devido a influência das vazões de Três Marias. O indicador 5 (contraste de temperatura) tende a influenciar apenas os picos de Três Marias em diversas antecedências.

Uma análise de agrupamentos *K*-médias (Hastie *et al.*, 2001) das trajetórias desses índices nos 120 dias anteriores ao evento (Figura 15) mostra que os *clusters* (escolha foi para $K = 3$ *clusters*) obtidos, nesse caso sem nenhuma informação dos dados de vazão, possuem trajetórias médias distintas (para os respectivos dias de antecedência, representa a média do valor do índice ao longo dos anos referentes ao *cluster* selecionado) e que estão relacionadas com os valores de pico de vazão. Por exemplo, a trajetória média do índice I1 no *cluster* 3 (linha verde na Figura 15 esquerda) possui valores bastante inferiores aos *clusters* 1 e 2 nos 60 dias que antecedem a vazão de pico, que para os anos relacionados a esse *cluster* é de 3927,6 m³/s. Da mesma forma, a trajetória do índice I5 do *cluster* 3 (linha verde na Figura 15 direita) é também bastante diferenciada das demais e leva aos maiores valores de vazão de pico. É importante notar que os *clusters* obtidos para os índices I1 e I5 não necessariamente representam os mesmos anos do histórico de observações. Observou-se também que a variância diária do *cluster* 3 do índice I1 é bastante superior à variância dos demais. Da mesma forma, os *clusters* obtidos para os índices I1 e I4 nos 120 dias que antecederam as vazões de pico em Sobradinho (Figura 16) apresentam trajetórias médias distintas que levam a valores de vazões de pico diferentes, particularmente o *cluster* 1 do índice I1.

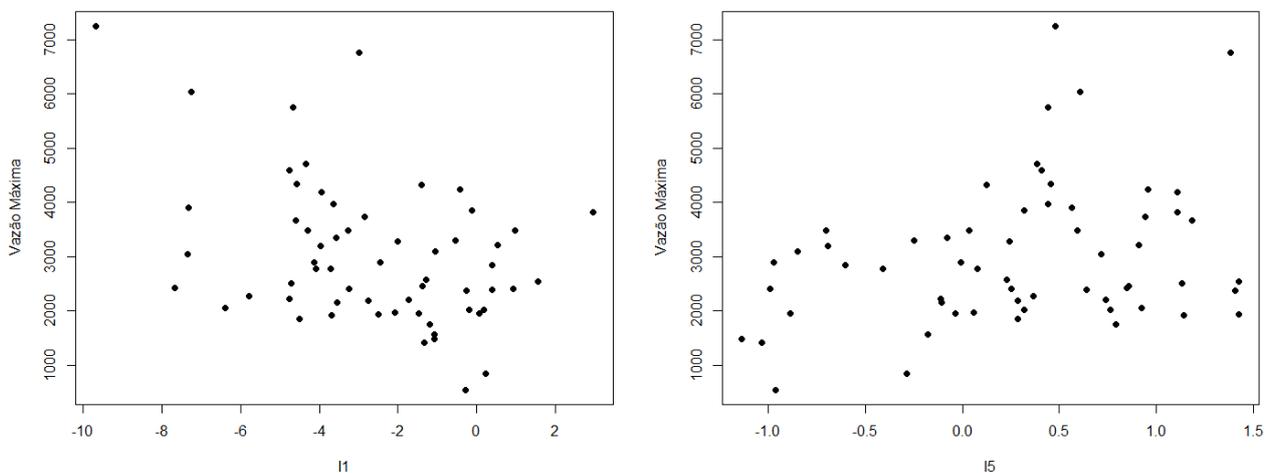


Figura 12 – Vazão diária máxima em Três Marias entre janeiro e abril (período 1950-2009) e valor médio do indicador I1 (esquerda) e I5 (direita) para os 90 dias que antecederam o evento de máximo.

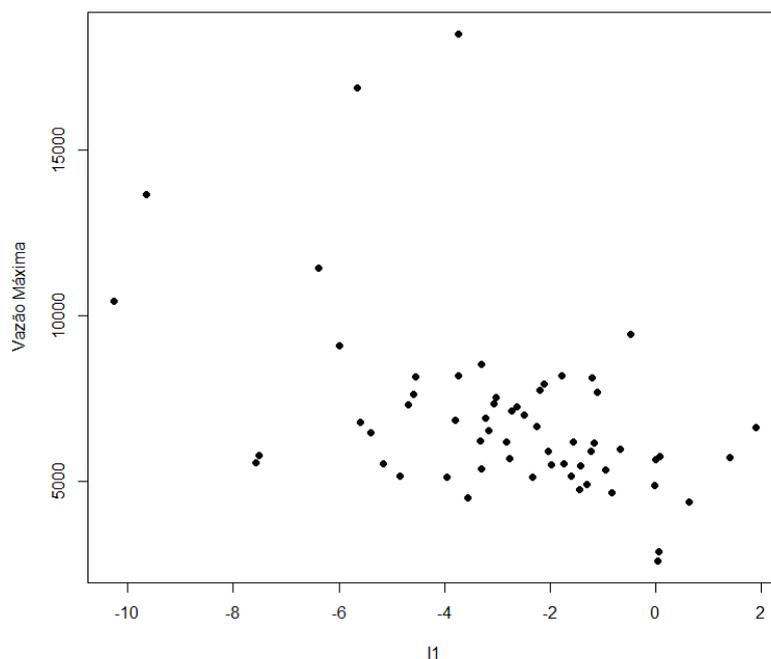


Figura 13 – Vazão diária máxima em Sobradinho entre janeiro e abril (período 1950-2009) e valor médio do indicador I1 para os 90 dias que antecederam o evento de máximo.

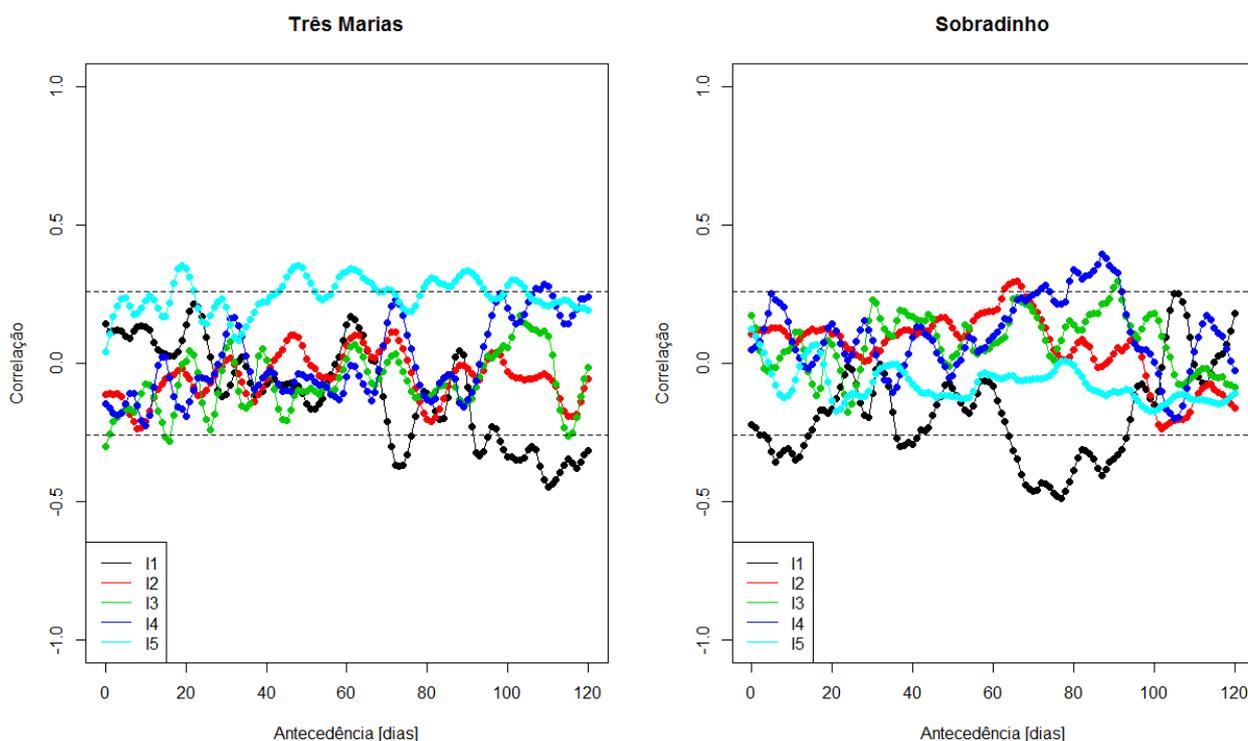


Figura 14 – Correlação entre as vazões máximas sazonais e o valor dos índices climáticos nos 120 dias anteriores ao evento de máximo.

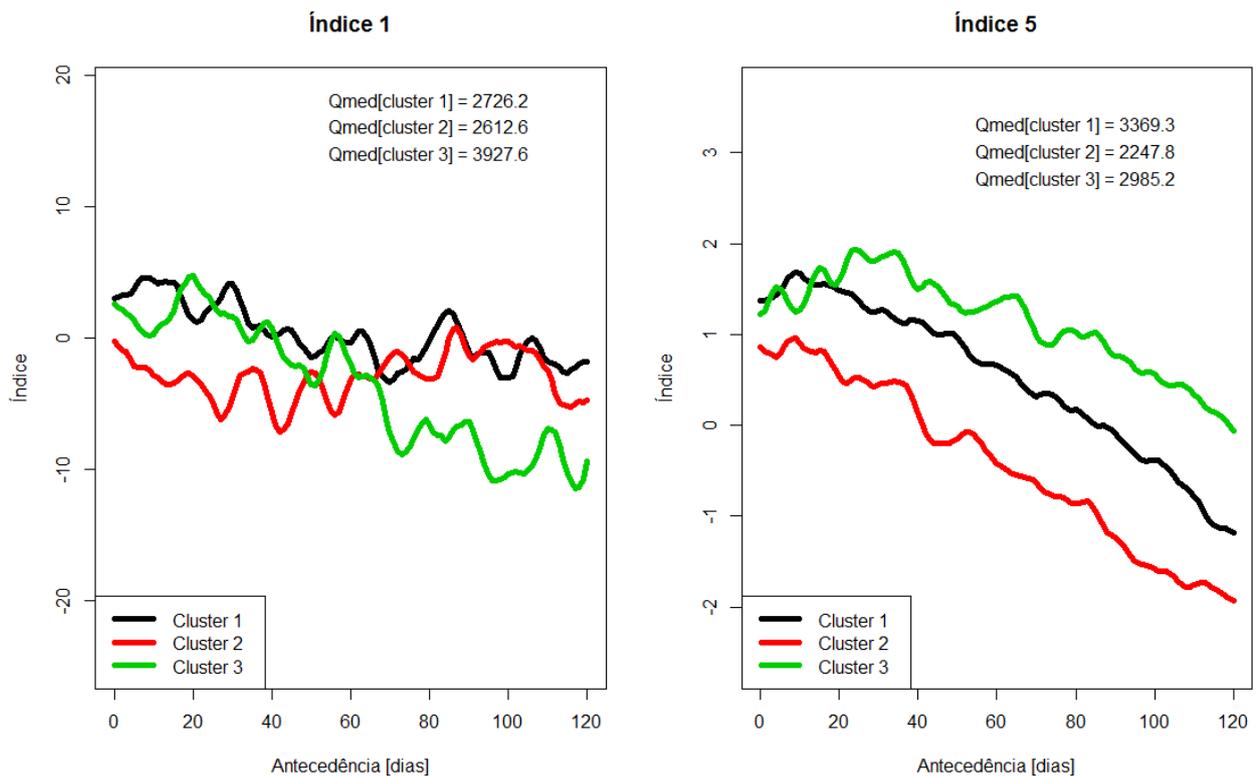


Figura 15 – Centro (valor médio do índice climático) dos *clusters* obtidos para os índices I1 e I5 nos 120 dias que antecederam as vazões de pico em Três Marias.

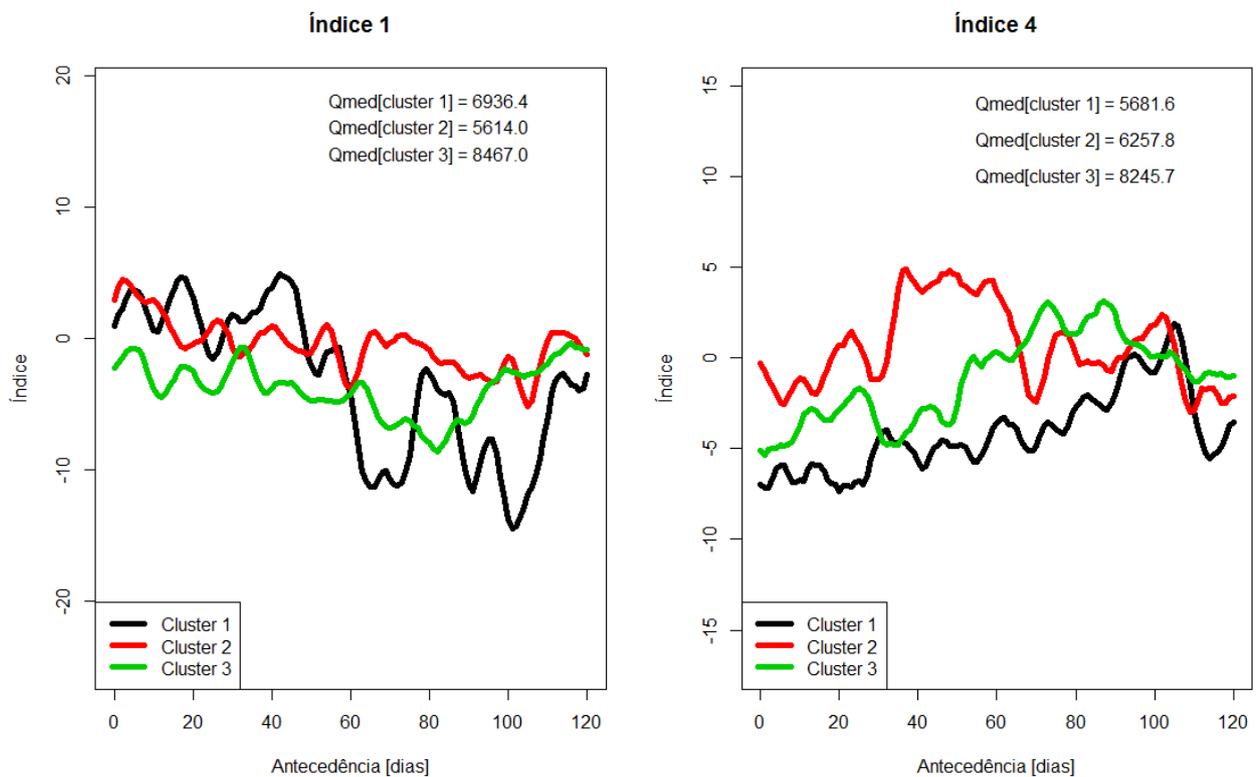


Figura 16 - Centro (valor médio do índice climático) dos *clusters* obtidos para os índices I1 e I4 nos 120 dias que antecederam as vazões de pico em Sobradinho.

6 – CONCLUSÕES

Buscou-se neste trabalho analisar a influência de índices climáticos representativos dos padrões de circulação atmosférica sobre o Brasil e as vazões afluentes aos reservatórios Três Marias e Sobradinho localizados na Bacia do Rio São Francisco. Na escala anual, observou-se que a circulação de larga escala determinada pelo ramo ascendente da célula de Hadley e representada pelo índice I1 possui a maior influência na variabilidade interanual das vazões médias anuais a esses reservatórios, sendo que um maior fluxo meridional nos baixos níveis do equador para os pólos e um menor fluxo em altos níveis no sentido do equador tendem a levar a maiores valores de vazão. Na escala mensal todos os índices apresentaram uma certa influência, mas difícil de serem contabilizadas individualmente quando se leva em conta o mês e a antecedência das previsões. Nesse caso, a inclusão de todos os índices como preditores climáticos a partir da regressão LASSO levou a um ganho substancial na qualidade do ajuste do modelo de regressão (ou uma maior variabilidade explicada) quando comparado com um modelo periódico auto-regressivo que considera apenas a persistência das vazões como covariável. O maior ganho obtido foi para o meses chuvosos e para antecedência de até quatro meses.

Finalmente, uma análise da variabilidade diária das vazões buscando identificar fatores percusores de eventos extremos mostrou que valores negativos do índice I1, ou seja, um maior fluxo de vento meridional nos baixos níveis no sentido dos pólos, nos 60-120 dias que antecedem o evento de cheia tendem a levar a magnitudes maiores do evento em ambos os reservatórios. Valores maiores do índice I5 (ou seja, um continente mais aquecido) também levaram a maiores valores de pico de vazão, particularmente no reservatório Três Marias. Esses resultados apontam para a possibilidade de construção de modelos probabilísticos não-estacionários para os picos sazonais de vazão considerando o estado climático atual dado pelo valor observado ou previsto do índice climático em questão.

Dessa forma, espera-se que esse estudo forneça informações empíricas e teóricas para o desenvolvimento e aperfeiçoamento de modelos estatísticos que possam antecipar e simular valores de afluências para os reservatórios Três Marias e Sobradinho e que possam ser úteis não somente na operação hidroelétrica desses reservatórios, mas também na geração de cenários futuros de afluências e antecipação de eventos de cheias considerando a variabilidade climática.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a ONS e o IRI pela disponibilização dos dados hidroclimáticos. Esse trabalho foi parcialmente financiado pelo CNPq através do projeto Universal 480448/2011-6.

BIBLIOGRAFIA

- COSTA, F. S.; DAMÁZIO, J. M.; MACEIRA, M. E. P.; DENÍCIO, M.; GUILHON, L. G.; SILVA, S. B. (2003). “*Modelo Estocástico de Previsão de Vazões Mensais – PREVIVAZM*” in Anais do XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Curitiba, 2003.
- GAN, M. A.; RAO, V. B.; MOSCATI, M. C. L. (2006). “*South American monsoon indices*”, Atmospheric Science Letters, v. 6, pp. 219-223.
- GRANTZ, K.; RAJAGOPALAN, B.; CLARK, M.; ZAGONA, E. (2005). “*A technique for incorporating large scale climate information in basin-scale ensemble streamflow forecasts*”, Water Resources Research, v. 41, W10410.
- HASTIE, T.; TIBSHIRANI, R.; FRIEDMAN, J. (2001). *The elements of statistical learning*. Springer.
- KALNAY, E., ET AL., (1996). *The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project*. Bulletin of the American Meteorological Society, March, 1996.
- LIMA, C. H. R.; LALL, U. (2007). “*Análise e Previsões de Afluências ao Reservatório Sobradinho Utilizando um Modelo Periódico Autoregressivo Exógeno (PARX)*” in Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, São Paulo, 2007.
- LIMA, C. H. R.; LALL, U.; SOUZA FILHO, F. A. (2007). “*Variabilidade e Teleconexões Climáticas associadas às Afluências Naturais ao Sistema Hidroelétrico Brasileiro*” in Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, São Paulo, 2007.
- LIMA, C.H.R.; MARTINS, E.S.P.R. “*Determinação dos padrões de variabilidade interanual de vazões do semi-árido brasileiro com uso da transformada wavelet*”. VII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, São Luís, 2004.
- MACEIRA, M. E. P.; PENNA, D. D. J.; DAMÁZIO, J. M. (2005). “*Geração de Cenários Sintéticos de Energia e Vazão para o Planejamento da Operação Energética*” in Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, João Pessoa, 2005.
- REBOITA, M.S.; GAN, M. A.; ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, E. T. (2010). “*Regimes de precipitação na América do Sul: Uma Revisão Bibliográfica*”. Revista Brasileira de Meteorologia, v.25, n.2, pp. 185-204.
- SILVA, B. C.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E.; CLARKE, R. T.; CORBO, M. D. (2007). “*Previsão hidroclimática de vazão de curto prazo na bacia do rio São Francisco*” in Anais do I Workshop – Previsão de Vazões. ONS. Rio de Janeiro, 2007.
- YEVJEVICH, V.; LANE, W. L. (1997). *Applied Modeling of Hydrologic Time Series*. Water Resources Pubns, 484p.