



Universidade Federal
do Rio de Janeiro
Escola Politécnica

ANÁLISE DAS CORRELAÇÕES EXISTENTES ENTRE PRECIPITAÇÃO E VAZÃO EM USINAS HIDRELÉTRICAS BRASILEIRAS

Felipe Treistman

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Prof. Heloisa Teixeira Firmo
Co-orientador: Maria Elvira Piñeiro Maceira

Rio de Janeiro
Agosto de 2015

ANÁLISE DAS CORRELAÇÕES EXISTENTES ENTRE
PRECIPITAÇÃO E VAZÃO EM USINAS HIDRELÉTRICAS
BRASILEIRAS

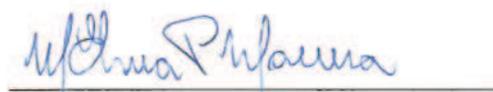
Felipe Treistman

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO
DE ENGENHARIA AMBIENTAL DA ESCOLA POLITÉCNICA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
ENGENHEIRO AMBIENTAL.

Examinada por:



Prof. Heloisa Teixeira Firmo, D.Sc.



Maria Elvira Piñeiro Maceira, D.Sc.



Prof. Otto Corrêa Rotunno Filho, Ph.D

Rio de Janeiro
Agosto de 2015

Treistman, Felipe

Análise das Correlações Existentes entre Precipitação e Vazão em Usinas Hidrelétricas Brasileiras / Felipe Treistman. – Rio de Janeiro: UFRJ / Escola Politécnica, 2015.

XI, 74 p.; 29,7 cm

Orientador: Heloisa Teixeira Firmo

Co-orientador: Maria Elvira Piñeiro Maceira

Projeto de Graduação – UFRJ / POLI / Curso de Engenharia Ambiental, 2015.

Referências Bibliográficas: p. 71 – 74

1. Modelos Hidrológicos; 2. Correlação; 3. Precipitação; 4. Planejamento da Operação do SIN; 5. Previsão de Vazões; I. Teixeira, Heloisa Firmo, *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro. III. Análise das Correlações Existentes entre Precipitação e Vazão em Usinas Hidrelétricas Brasileiras.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço aos meus pais, Ronaldo e Laís, pela dedicação e carinho dados ao longo de toda minha vida. Sem a educação de vocês, não seria o que sou hoje.

A toda minha família pelo apoio constante, em especial meus irmãos Daniel e Gustavo, minha tia Leila e meu avô Sampaio, por sempre estarem presentes nos momentos importantes de minha vida.

À Universidade Federal do Rio de Janeiro e a todos os professores que tive ao longo do curso de Engenharia Ambiental por todo, o conhecimento que adquiri durante cinco anos e meio e pelos desafios propostos, fazendo com que eu me superasse cada vez mais.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), por ter me concedido bolsa de intercâmbio, experiência inesquecível.

A minha orientadora, professora Heloisa, pelos ensinamentos passados a mim ao longo da graduação, por ter estado sempre disponível a auxiliar e por me acompanhar nesta última etapa da graduação.

A minha co-orientadora, pesquisadora Maria Elvira, por acreditar na importância de minha pesquisa e me ajudar com seus conselhos para que eu conseguisse desenvolvê-la da melhor forma possível.

Ao Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), por ter me dado a oportunidade de estagiar e crescer profissionalmente. Agradeço, especialmente, aos pesquisadores Débora e André, por terem aberto as portas do CEPEL a mim, e aos pesquisadores Juan, Pamella e Wanderson, pelo auxílio prestado no desenvolvimento deste trabalho.

Muito obrigado aos amigos que fiz durante o curso de Engenharia Ambiental, Pedro Mutti, Duda, Joãozinho, Nathalia, Laura, Luíza, Karys, Luís Otavio, Luís Gabriel, Noah, Bael e Gabriel que tornaram o caminho percorrido ao longo da faculdade muito mais fácil com suas companhias. Por tudo que compartilhamos, desde as longas horas de estudo, passando pelo intercâmbio, as mesas de truco no BD e até os dias intermináveis com 10 horas de aula seguidas.

A meus amigos de longa data, Marcel e Pedro, que tem acompanhado o meu desenvolvimento há muitos anos, sendo parte ativa desse processo.

Ao meu amor, Marcela, que está ao meu lado há muitos anos, e, mesmo com o oceano nos separando sempre esteve presente. Sou extremamente grato de tê-la em minha vida. Seu amor, companheirismo e amizade ajudam-me a ser melhor cada dia.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica / UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Ambiental.

Análise das Correlações Existentes entre Precipitação e Vazão em Usinas Hidrelétricas Brasileiras

Felipe Treistman

Agosto de 2015

Orientador: Heloisa Teixeira Firmo

Co-orientador: Maria Elvira Piñeiro Maceira

Curso: Engenharia Ambiental

A previsão e a geração de cenários de vazões afluentes ao Sistema Interligado Nacional (SIN) são utilizadas por diversos agentes do setor elétrico no planejamento da operação e expansão do sistema hidrotérmico brasileiro. Esse problema tem uma forte dependência espacial e temporal, ou seja, uma decisão tomada no presente terá influência direta na capacidade de geração futura, alterando os níveis dos reservatórios. Para resolvê-lo, é utilizada uma cadeia de modelos de otimização desenvolvida pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL). Visando aprimorar a metodologia atualmente utilizada, este trabalho tem como objetivo investigar a correlação existente entre a precipitação na área de drenagem e a vazão em cinco importantes usinas hidrelétricas no Brasil: Três Marias, Sobradinho, Itá, Furnas e Tucuruí. Os resultados mostram que as precipitações acumuladas em dois, três ou quatro meses sem atraso em relação à vazão, ou com atraso de até dois meses, são altamente correlacionadas com as afluições naturais, variando em função do regime climático predominante na região em que se localiza a área de drenagem. A correlação anual no caso da UHE Furnas chegou a 0,80, enquanto que, para a UHE Itá, alcançou o altíssimo resultado de 0,97, ratificando, mais uma vez, a forte relação entre as variáveis. Sendo assim, espera-se que

os modelos de previsão e geração de cenários de vazões sejam aprimorados ao se introduzirem essas variáveis.

Palavras-chave: Modelos Hidrológicos, Correlação, Precipitação, Usinas Hidrelétricas, Previsão de Vazões.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI / UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

Correlation Analysis between Precipitation and Streamflow on Brazilian Hydroelectric Plants

Advisor: Heloisa Teixeira Firmo

Co-Advisor: Maria Elvira Piñeiro Maceira

Course: Environmental Engineering

The streamflows forecast and scenarios generation to the Brazilian National Interconnected System (SIN) are used by the electrical sector agents in the operation and expansion planning. This problem has a strong spatial and temporal dependence, thereby, a decision made in the present has directly influence over the future generation capacity of the system, changing the reservoirs' level. To solve it, a chain of optimization models developed by the Electrical Energy Research Center (CEPEL) is used. Looking for the improvement of the methodology presently used, this paper has the objective to investigate the existing relation between the precipitation in the drainage area and the natural streamflow in five important Brazilians hydroelectric plants: Três Marias, Sobradinho, Itá, Furnas and Tucuruí. The results show the accumulated precipitation in two, three or four months not delayed in relation of the streamflow, or delayed up to two months, is highly correlated with the natural streamflows, varying with the predominating climatic region in the drainage area. The annual correlation in Furnas hydro plant reached 0,80, meanwhile the Ita hydro plant achieved the result of 0,97, ratifying the strong relation between these variables. Therefore, it's expected the forecast and scenarios generation models to be improved with the introduction of these variables.

Keywords: Hydrological Models, Correlation, Precipitation, Hydropower Plants, Streamflow Forecast

SUMÁRIO

1. Introdução.....	1
1.1. Apresentação do Tema.....	1
1.2. Objetivos	1
1.3. Metodologia	2
1.4. Estrutura do Trabalho	2
2. Revisão Bibliográfica	3
2.1. Sistema Interligado Nacional.....	3
2.2. Cadeia de Modelos de Otimização	6
2.3. Modelos Hidrológicos com Inclusão de Variáveis Climáticas.....	8
2.4. Métodos de Interpolação para a Distribuição da Precipitação.....	10
3. Materiais e Métodos	12
3.1. Área de Estudo.....	13
3.1.1. UHE Três Marias	14
3.1.2. UHE Sobradinho	15
3.1.3. UHE Itá	16
3.1.4. UHE Furnas.....	16
3.1.5. UHE Tucuruí.....	17
3.2 Dados	17
3.2.1 Dados de Precipitação	17
3.2.2 Dados de Vazão.....	19
3.3. Interpolação da Precipitação nas Áreas de Drenagem – Método do Inverso do Quadrado da Distância (IQD)	20
3.4. Correlação entre Precipitação e Vazão Natural Afluyente	22
4. Análise de Resultados.....	23
4.1. UHE Três Marias	23
4.2. UHE Sobradinho.....	32
4.3. UHE Itá	41
4.4. UHE Furnas	48
4.5. UHE Tucuruí.....	56
4.6. Análises finais.....	66
5. Conclusões e Recomendações Finais	68
Referências Bibliográficas.....	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema Interligado Nacional (SIN).

Figura 2 - Evolução da potência instalada

Figura 3 - Acréscimo de energia armazenável

Figura 4 – Processo de tomada de decisão no sistema hidrotérmico

Figura 5 – Interação entre os modelos hidrológicos e a cadeia de planejamento da operação do SIN

Figura 8 – Precipitação média mensal (a) e vazão natural média mensal (b) na UHE Três Marias para o período de 1943 a 2005

Figura 9 – Campo de precipitação anual na área de drenagem da UHE Três Marias

Figura 10 – Correlograma com as correlações cruzadas mensais entre as vazões naturais e as precipitações médias sem atraso (próprio mês) e com atraso de até seis meses na UHE Três Marias.

Figura 11 – Correlograma com as correlações cruzadas mensais entre as vazões naturais e as precipitações médias acumuladas em dois meses sem atraso (próprio mês) e com atraso de até dois meses na UHE Três Marias.

Figura 12 – Correlograma com as correlações cruzadas mensais entre as vazões naturais e as precipitações médias acumuladas em três meses sem atraso (próprio mês) e com atraso de até dois meses na UHE Três Marias.

Figura 13 – Correlograma com as correlações cruzadas mensais entre as vazões naturais e as precipitações médias acumuladas em quatro meses sem atraso (próprio mês) e com atraso de até dois meses na UHE Três Marias.

Figura 14 – Variação da precipitação anual normalizada e da vazão anual na UHE Três Marias entre 1943 e 2005.

Figura 15 – Precipitação média mensal (a) e vazões naturais média mensal (b) na UHE Sobradinho para o período de 1943 a 2005.

Figura 16 – Campo de precipitação anual na área de drenagem da UHE Sobradinho

Figura 17 – Correlograma com as correlações cruzadas mensais entre as vazões naturais e as precipitações médias sem atraso (próprio mês) e com atraso de até seis meses na UHE Sobradinho.

Figura 18– Correlograma com as correlações cruzadas mensais entre as vazões naturais e as precipitações médias acumuladas em dois meses sem atraso (próprio mês) e com atraso de até dois meses na UHE Sobradinho.

Figura 19 – Correlograma com as correlações cruzadas mensais entre as vazões naturais e as precipitações médias acumuladas em três meses sem atraso (próprio mês) e com atraso de até dois meses na UHE Sobradinho.

Figura 20 – Correlograma com as correlações cruzadas mensais entre as vazões naturais e as precipitações médias acumuladas em quatro meses sem atraso (próprio mês) e com atraso de até dois meses na UHE Sobradinho.

Figura 21 – Variação da precipitação anual normalizada e da vazão anual na UHE Sobradinho entre 1943 e 2005.

Figura 22 – Precipitação média mensal (a) e vazão natural média mensal (b) na UHE Itá para o período de 1961 a 2004.

Figura 23 – Campo de precipitação anual na área de drenagem da UHE Itá

Figura 24 – Correlograma com as correlações cruzadas mensais entre as vazões naturais e as precipitações médias sem atraso (próprio mês) e com atraso de até seis meses na UHE Itá.

Figura 25 – Correlograma com as correlações cruzadas mensais entre as vazões naturais e as precipitações médias acumuladas em dois meses sem atraso (próprio mês) e com atraso de até dois meses na UHE Itá.

Figura 26 – Correlograma com as correlações cruzadas mensais entre as vazões naturais e as precipitações médias acumuladas em três meses sem atraso (próprio mês) e com atraso de até dois meses na UHE Itá.

Figura 27 – Correlograma com as correlações cruzadas mensais entre as vazões naturais e as precipitações médias acumuladas em quatro meses sem atraso (próprio mês) e com atraso de até dois meses na UHE Itá.

Figura 28 – Variação da precipitação anual normalizada e da vazão anual normalizada na UHE Itá entre 1961 e 2004.

Figura 29 – Precipitação média mensal (a) e vazão natural média mensal (b) na UHE Furnas para o período de 1942 a 2006.

Figura 30 – Campo de precipitação anual na área de drenagem da UHE Furnas

Figura 31 – Correlograma com as correlações cruzadas mensais entre as vazões naturais e as precipitações médias sem atraso (próprio mês) e com atraso de até seis meses na UHE Furnas.

Figura 32 – Correlograma com as correlações cruzadas mensais entre as vazões naturais e as precipitações médias acumuladas em dois meses sem atraso (próprio mês) e com atraso de até dois meses na UHE Furnas.

Figura 33 – Correlograma com as correlações cruzadas mensais entre as vazões naturais e as precipitações médias acumuladas em três meses sem atraso (próprio mês) e com atraso de até dois meses na UHE Furnas.

Figura 34 – Correlograma com as correlações cruzadas mensais entre as vazões naturais e as precipitações médias acumuladas em quatro meses sem atraso (próprio mês) e com atraso de até dois meses na UHE Furnas.

Figura 35 – Variação da precipitação anual normalizada e da vazão anual normalizada na UHE Furnas entre 1942 e 2006.

Figura 36 – Precipitação média mensal (a) e vazão natural média mensal (b) na UHE Tucuruí para o período de 1975 a 2006.

Figura 37 – Campo de precipitação anual na área de drenagem da UHE Tucuruí

Figura 38 – Correlograma com as correlações cruzadas mensais entre as vazões naturais e as precipitações médias sem atraso (próprio mês) e com atraso de até seis meses na UHE Furnas.

Figura 39 – Correlograma com as correlações cruzadas mensais entre as vazões naturais e as precipitações médias acumuladas em dois meses sem atraso (próprio mês) e com atraso de até dois meses na UHE Tucuruí.

Figura 40 – Correlograma com as correlações cruzadas mensais entre as vazões naturais e as precipitações médias acumuladas em três meses sem atraso (próprio mês) e com atraso de até dois meses na UHE Tucuruí.

Figura 41 – Correlograma com as correlações cruzadas mensais entre as vazões naturais e as precipitações médias acumuladas em quatro meses sem atraso (próprio mês) e com atraso de até dois meses na UHE Tucuruí.

Figura 42 – Variação da precipitação anual normalizada e da vazão anual normalizada na UHE Furnas entre 1975 e 2006.

Figura 43 – Coeficiente de variação da precipitação mensal média nas UHEs estudadas.

Figura 44 – Coeficiente de variação da vazão mensal média nas UHEs selecionadas.

1. Introdução

1.1. Apresentação do Tema

A geração de energia elétrica no Brasil procede majoritariamente das vazões fluviais naturais que afluem aos aproveitamentos hidrelétricos distribuídos por doze bacias hidrográficas no país. A aleatoriedade é uma das principais características das vazões naturais. A previsão e a geração de cenários de vazões afluentes ao sistema hidroelétrico são utilizadas pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e pelo Ministério de Minas e Energia/Empresa de Pesquisa Energética (EPE) no planejamento da operação e expansão do sistema hidrotérmico brasileiro (COSTA *et al.*, 2007; TUCCI *et al.*, 2003; PENNA, 2009; MACEIRA *et al.*, 2002).

Para a previsão de vazões podem ser utilizados modelos determinísticos ou modelos estocásticos. Já para a geração de cenários de vazões, em geral, são utilizados modelos estocásticos. Para ambas, sempre há a possibilidade de integrar, a esses modelos, um modelo de previsão quantitativa de precipitação. Neste contexto, o objetivo desta pesquisa é a execução de uma análise da relação existente entre precipitações e vazões afluentes a cinco usinas hidrelétricas (UHEs) representativas das quatro regiões em que o Sistema Interligado Nacional (SIN) divide o programa de planejamento da operação energética no Brasil: Três Marias, Sobradinho, Itá, Furnas e Tucuruí. Dessa maneira, é importante investigar a relevância da inserção de informações de chuva em modelos de previsão e de geração de cenários de vazões.

1.2. Objetivos

O presente trabalho tem como objeto produzir longas séries de precipitação média para as áreas de drenagem em diferentes regiões do Brasil, a fim de mensurar as diversas correlações existentes entre a precipitação e a vazão natural afluente, identificando aquelas variáveis que podem contribuir para uma melhor previsão/geração de cenários de afluência e interpretando os resultados obtidos. A principal contribuição deste trabalho é identificar as variáveis que agregam mais informação ao processo de geração e previsão de vazão afluente às usinas do SIN, de forma a possivelmente aprimorar os modelos oficiais atualmente utilizados pelo setor elétrico no planejamento da operação do sistema elétrico brasileiro.

1.3. Metodologia

A metodologia utilizada seguirá a seguinte ordem:

- revisão bibliográfica;
- aquisição de dados de precipitação e vazão natural afluyente para as usinas escolhidas na base de dados da Agência Nacional de Águas (ANA) e Operador Nacional do Sistema Elétrico, respectivamente;
- modelagem dos dados através da linguagem de programação Matlab;
- produção de mapas de campo de precipitação com ArcGIS;
- cálculo do coeficiente de correlação de Pearson entre as variáveis de vazão natural afluyente e precipitação;
- comparação e análise dos resultados obtidos.

1.4. Estrutura do Trabalho

Este trabalho é dividido em cinco capítulos, apresentando as seguintes abordagens: no capítulo 1, o tema a ser desenvolvido é apresentado, assim como o seu objetivo e metodologia empregada; o capítulo 2 consiste de uma breve apresentação do Sistema Interligado Nacional (SIN) e sua problemática no contexto da gestão dos recursos hídricos, passando depois pela cadeia de modelos de otimização utilizada atualmente no setor elétrico brasileiro. Em seguida, são revisados modelos hidrológicos que já fazem o uso de informações climáticas. Por último, são apresentados trabalhos sobre diversos métodos de interpolação de dados de chuva; no capítulo 3, são introduzidas as áreas de estudo, as bases de dados utilizadas neste trabalho, o método empregado para calcular a precipitação média nas áreas de drenagem e o coeficiente de correlação de Pearson; no capítulo 4 são apresentados todos os resultados obtidos e as análises deles provenientes; o capítulo 5 consiste da conclusão do trabalho e recomendações para trabalhos futuros.

2. Revisão Bibliográfica

O capítulo está organizado da seguinte forma: primeiramente, é feita uma breve explanação sobre o Sistema Interligado Nacional e a cadeia de modelos de otimização energética utilizada no setor elétrico brasileiro; em seguida, elabora-se uma síntese de trabalhos que utilizam informações de precipitação como insumo aos modelos hidrológicos; por último, são revisados trabalhos sobre métodos de interpolação para o cálculo de precipitação em áreas de drenagem.

2.1. Sistema Interligado Nacional

O Sistema Interligado Nacional é o sistema brasileiro de produção e transmissão de energia elétrica, caracterizado por ser um sistema hidrotérmico de grande porte, com forte predominância hidroelétrica e com múltiplos proprietários. Devido às suas características e suas dimensões continentais, pode ser considerado único em todo o mundo. O SIN é formado pelas empresas das regiões sul, sudeste, centro-oeste, nordeste e parte da região norte, totalizando 98,3% da energia requerida pelo país (Figura 1). Os outros 1,7% encontram-se em pequenos sistemas isolados, localizados principalmente na região amazônica (ONS, 2015). Para o seu planejamento e operação, é dividido em quatro reservatórios equivalentes de energia: sul, sudeste/centro-oeste, nordeste e norte, sendo o segundo onde está a maior demanda de energia e também a maior capacidade instalada.

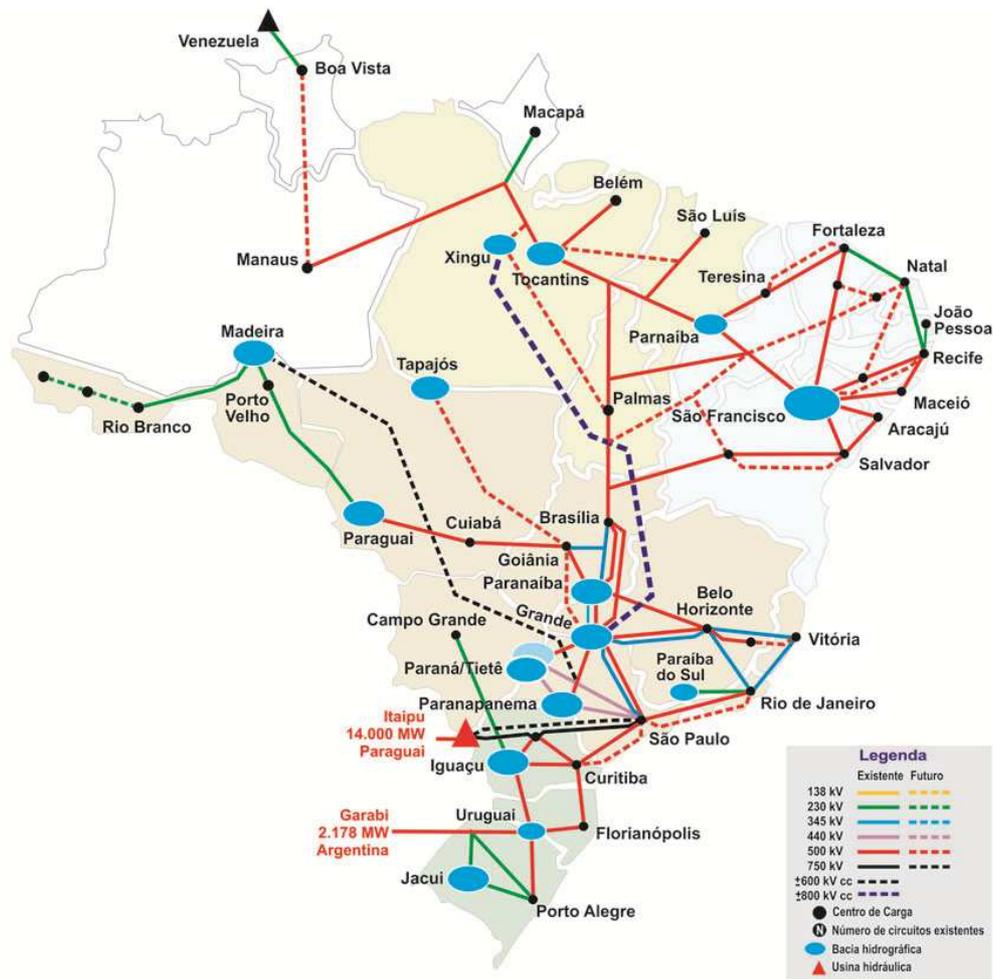


Figura 1 - Sistema Interligado Nacional (SIN). Fonte: ONS (2015a)

O Operador Nacional do Sistema é a empresa que centraliza as tomadas de decisão da operação do SIN, sendo responsável pelo seu planejamento e controle. Sendo assim, cabe ao ONS definir quais usinas hidroelétricas devem operar e quais devem ficar de reserva, mantendo sempre o volume de produção igual ao consumo. Por ser quase que completamente interligado, o SIN tem a grande vantagem de permitir o intercâmbio de energia entre as diferentes regiões brasileiras (FORTUNATO *et al.*, 1990). Devido às dimensões continentais do SIN, quando uma região encontra-se no período seco, gerando menos energia hidroelétrica e com reservatórios mais vazios, outra região pode estar no período úmido e com os reservatórios mais cheios, podendo assim gerar mais energia elétrica e enviar à primeira. A esse fenômeno descrito dá-se o nome de complementaridade hídrica. Esse procedimento faz com que a gestão dos reservatórios funcione de maneira aprimorada, além de inibir o uso de centrais térmicas, que encarecem o custo final da produção.

O Brasil, hoje, possui 3.837 empreendimentos em operação, totalizando 135.678.500 kW de potência instalada, sendo 65,9% desse valor proveniente de usinas hidroelétricas ou pequenas centrais hidroelétricas (ANEEL, 2015). Para os próximos anos, é esperada uma adição de 37.271.564 kW provenientes de 190 empreendimentos em construção e outros 633 com construção ainda não iniciada. Em anos hidrológicos favoráveis, mais de 90% da energia consumida no país é gerada em centrais hidroelétricas (ONS, 2005).

Porém, nos últimos anos, a energia proveniente de hidroelétricas vem diminuindo sua participação no total de energia consumida no Brasil, assim como a sua capacidade de armazenamento, tornando, assim, o SIN mais vulnerável, reduzindo a chamada regularização plurianual. Segundo o Plano Decenal de Expansão de 2023 da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2014), a capacidade instalada das usinas hidroelétricas crescerá 36% (Figura 2), enquanto que o acréscimo de energia armazenável será de apenas 2% (Figura 3).

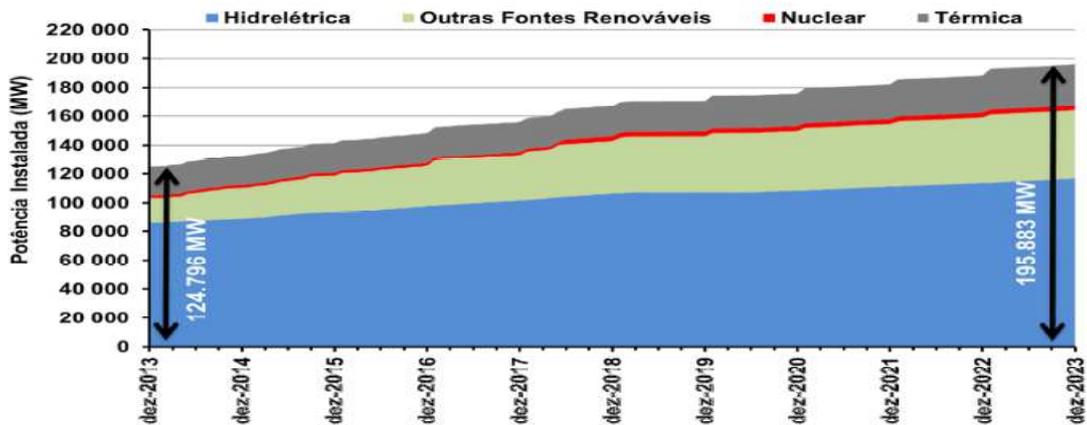


Figura 2 - Evolução da potência instalada. Fonte: EPE (2014)

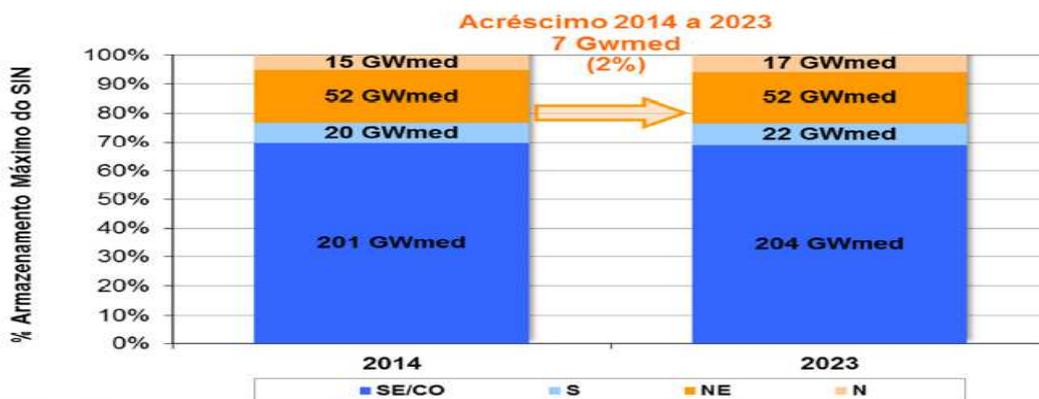


Figura 3 - Acréscimo de energia armazenável. Fonte: EPE (2014)

Considerando-se a grande participação da hidroeletricidade na matriz energética brasileira bem como o aumento de sua capacidade instalada e a redução da energia armazenável percentual, mostra-se ser necessário aprimorar cada vez mais o gerenciamento dos recursos hídricos.

2.2. Cadeia de Modelos de Otimização

Devido às suas dimensões continentais e conseqüentemente à sua complexidade, a operação do SIN é um problema não separável no tempo, dado que a decisão de deplecionamento de um reservatório terá influência na sua capacidade futura, assim como nos reservatórios das usinas hidrelétricas à jusante (PENNA, 2009). Por exemplo, caso a decisão seja gerar energia elétrica utilizando a água armazenada nos reservatórios e, no futuro, as afluições forem baixas, essa operação pode ocasionar utilização de mais termoeletricas, encarecendo o custo da operação, podendo levar, até mesmo, a um déficit de energia (Figura 4). Por outro lado, se, no momento, atual é tomada a decisão de não deplecionar os reservatórios e, então, acionar as térmicas, e as afluições futuras forem altas, tem-se novamente uma má política de operação, pois poderá ocorrer vertimento, representando, assim, um desperdício de energia e elevação no custo de produção.

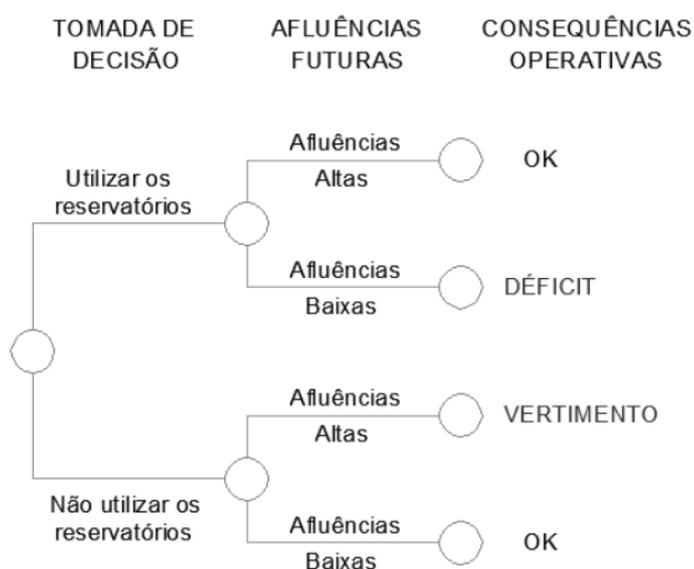


Figura 4 – Processo de tomada de decisão no sistema hidrotérmico

Sendo assim, a qualidade das previsões hidrológicas afeta diretamente o desempenho da operação do SIN, dado que uma previsão equivocada pode gerar conseqüências negativas futuras a todo o sistema, como o déficit ou o desperdício de energia, além de aumentar o custo de produção de energia elétrica devido a

acionamentos desnecessários de usinas termoeletricas. A coordenação da operação do sistema de reservatórios do setor elétrico, juntamente com o sistema de usinas térmicas, faz com que haja um maior aproveitamento dos recursos. Atualmente, o planejamento da operação do sistema hidrotérmico brasileiro é realizado em várias etapas com diferentes horizontes de estudo e níveis de detalhamento do sistema, com o auxílio da cadeia de modelos desenvolvidos no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL (MACEIRA *et al.*, 2002). Quanto mais próximo da operação, menor é a incerteza hidrológica adotada.

Para os modelos hidrológicos utilizados na cadeia supracitada, existem dois tipos distintos: os modelos estocásticos e os determinísticos, que se distinguem quanto à sua formulação. Modelos estocásticos levam em consideração a chance de ocorrência das variáveis do modelo e a teoria probabilística é introduzida na sua formulação matemática. Ao contrário dos modelos estocásticos, nos modelos determinísticos, não são consideradas as chances de ocorrência das variáveis, tendo a sua formulação baseada em alguma lei física ou empírica (YEVJEVICH, 1974). Atualmente a perspectiva da colocação de Yevjevich é contestada. De fato, há, hoje, uma crescente visão integrada entre modelagem determinística e estocástica, sem a separação ou a distinção então exposta.

Na etapa denominada por planejamento da operação de médio prazo, cujo horizonte é de até 10 anos, utiliza-se o modelo NEWAVE (MACEIRA *et al.*, 2008) que faz a coordenação hidrotérmica, no qual o problema matemático é resolvido utilizando programação linear estocástica multiestágio, com o objetivo de garantir o atendimento à demanda e minimizar os custos de operação de todo sistema. Para representar a incerteza hidrológica são gerados cenários de vazão ou energia natural afluente (ENA) pelo modelo hidrológico chamado GEVAZP (MACEIRA *et al.*, 2005). Esse modelo estocástico captura as características básicas da série histórica vazão ou ENA's e gera uma grande quantidade de cenários sintéticos para o horizonte de estudo. A partir dos cenários gerados pelo GEVAZP, o NEWAVE calcula a função de custo futuro, que será utilizada como dado de entrada para o modelo da etapa seguinte.

Para a etapa de curto prazo, a política de médio prazo é calculada para o primeiro mês, discretizado em semanas para cada usina do sistema pelo modelo DECOMP. Nessa etapa, a hidrologia considerada para o primeiro mês é parte definida por modelo determinístico e parte por modelo estocástico, utilizando-se das previsões

do modelo PREVIVAZ (COSTA *et al.*, 2007). Para os demais meses, são utilizados os cenários gerados pelo GEVAZP.

Na última etapa, a programação diária é realizada pelo modelo DESSEM, onde a hidrologia é considerada de forma predominantemente determinística, através do modelo PREVIVAZH (COSTA *et al.*, 2000), com um horizonte de sete até quatorze dias à frente. Esse modelo, de natureza estocástica, é baseado na desagregação em intervalos diários das previsões semanais de afluências gerados no PREVIVAZ. Além disso, ele utiliza séries sintéticas de vazões diárias, que são geradas pelo modelo DIANA (KELMAN *et al.*, 1983) condicionadas às últimas afluências diárias observadas e às informações quantitativas de precipitação média diária na bacia.

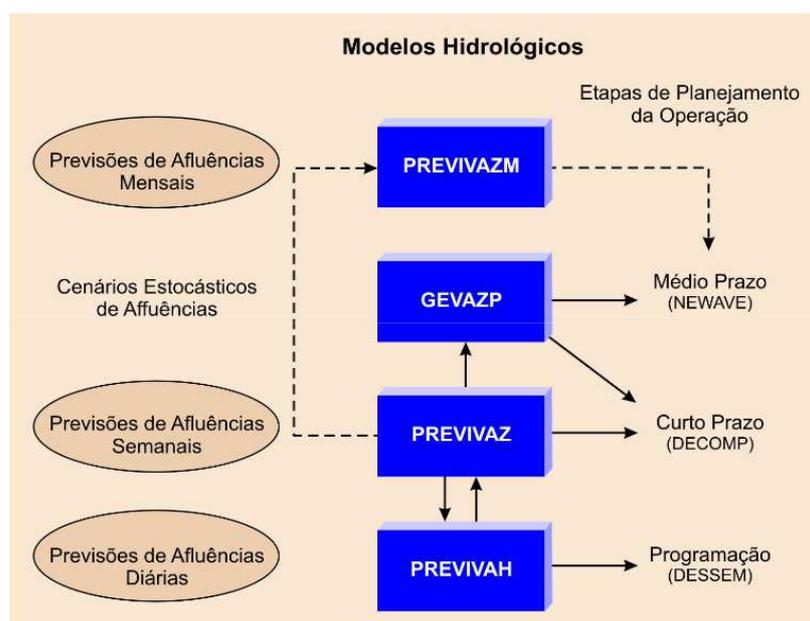


Figura 5 – Interação entre os modelos hidrológicos e a cadeia de planejamento da operação do SIN.
 Fonte: COSTA *et al.* (2007)

2.3. Modelos Hidrológicos com Inclusão de Variáveis Climáticas

Visando aprimorar os modelos hidrológicos já existentes, diversas pesquisas têm sido feitas para a incorporação de dados de previsão de precipitação nesses modelos. Esse tipo de estudo já vem sendo feito há muitos anos, porém, com o aumento da capacidade computacional e o maior entendimento das interações entre as diversas variáveis climáticas nos modelos de previsão e geração de vazões, tem sido feito um esforço maior recentemente nesse sentido com o objetivo de melhor gerenciar os recursos hídricos, que, no caso brasileiro, estão conectados com o planejamento e a operação do SIN.

BONNÉ (1971) buscou fazer uma simulação da série de vazão mensal em três áreas de drenagem com características climáticas e físicas diferentes na costa oeste dos Estados Unidos usando um modelo estocástico de regressão múltipla, incluindo a vazão do mês passado, a precipitação do mês atual, do mês anterior e a precipitação acumulada como variáveis independentes. Para cada mês, um tipo de distribuição de frequência era determinado por análise estatística sendo posteriormente imposto ao modelo a fim de reproduzir dados com os mesmos parâmetros estatísticos. Ao fim da simulação os resultados eram comparados com a série histórica em termos de parâmetros estatísticos e distribuição de frequência, e também comparados com os resultados gerados por um modelo de regressão simples, que só levava em conta dados de vazão passada. Concluiu-se que, na maioria dos casos, há um ganho na simulação pelo modelo de regressão múltipla em comparação com o modelo de regressão simples. Os dados gerados apresentaram valores semelhantes à média, desvio padrão e distribuição de frequência da série histórica.

Utilizando um modelo periódico autoregressivo exógeno (PARX) para fazer previsões de aflúências ao reservatório de Sobradinho, LIMA e LALL (2007) avaliaram a inclusão de informação climática através do uso da temperatura da superfície do mar (TSM) em regiões específicas dos oceanos Atlântico e Pacífico como variáveis aleatórias, além do campo de vento zonal em uma região específica do Oceano Atlântico. Para a comparação do desempenho do modelo sugerido, foram utilizados resultados obtidos de um modelo auto-regressivo (AR) e de um modelo periódico autoregressivo (PAR). Por fim, chegou-se à conclusão de que a inclusão de variáveis climáticas no modelo PARX ocasionou uma melhora significativa na previsão de aflúências com até quatro meses de antecedência quando comparado aos outros dois modelos, especialmente na estação chuvosa. Outros trabalhos dos autores nessa mesma linha de pesquisa podem ser encontrados na literatura (LIMA e LALL, 2008, 2010a, 2010b).

Em 2007, o ONS abriu concorrência entre diversas alternativas de modelos de previsão de vazões diárias, com horizonte de até 12 dias à frente, utilizando informações de precipitação, para serem incorporados na operação do SIN em aproveitamentos hidrelétricos localizados na bacia do rio Iguaçu, para as UHE Jordão, UHE Foz do Areia e o trecho incremental entre a UHE Foz do Areia a UHE Jordão e a UHE Salto Osório, na bacia do rio Paraná, para o trecho incremental entre as UHE Rosana, UHE

Porto Primavera e a UHE Itaipu, e na bacia do rio Paranaíba, trecho incremental entre a UHE Itumbiara e a UHE São Simão. Todos eles também foram comparados entre si na bacia selecionada e ao modelo que era utilizado para todo o SIN nesta época, o PREVIVAZ, a fim de determinar qual deles possuiria melhores resultados nas bacias selecionadas.

Em GUILHON *et al.* (2007), está descrito todo esse processo de concorrência e quais modelos foram escolhidos pelo ONS. Para efeito de comparação entre os modelos propostos foram utilizados os seguintes índices: desvio médio absoluto percentual (MAPE); média dos valores absolutos dos desvios (MAD); coeficiente de eficiência de Nash (NASH); coeficiente de eficiência de Nash aplicado aos logaritmos (NASH-LOG). Esses índices são calculados comparando-se os resultados de aflúências obtidas pelos modelos sugeridos e as aflúências observadas.

Para o trecho selecionado do rio Paranaíba o modelo que obteve os melhores resultados foi o MGB-IPH, Modelo Físico Distribuído complementado com Modelo estocástico de Correlação de Previsão, desenvolvido pela Rhama Consultoria Ambiental Ltda. Para o trecho selecionado na bacia do rio Paraná, novamente o modelo MGB-IPH foi considerado superior aos seus concorrentes, porém, pela necessidade de se conhecer e aplicar diferentes metodologias, foi adotado o modelo SMAP-MEL, modelo físico concentrado/estocástico, desenvolvido pela Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica da USP, já que este apresentou resultados bastante satisfatórios. Para o trecho selecionado na bacia do rio Iguaçu, foi selecionado o modelo fuzzy recorrente, desenvolvido pela UFF em conjunto com a UFRJ, por apresentar melhor resultados em quase todos os índices. Observa-se, no fim da análise feita nesse artigo, que os resultados obtidos nos modelos selecionados foram superiores nos índices avaliados ao PREVIVAZ, que não utiliza dados de precipitação, recomendando-se, também, investir em melhorar a qualidade da previsão de precipitação obtida com o modelo regional ETA. Para as bacias estudadas, passaram-se a ser utilizados as previsões dos modelos escolhidos nessa concorrência para a primeira semana do planejamento. Para as demais semanas do planejamento, as previsões para essas bacias são obtidas com o modelo PREVIVAZ. Para as demais UHEs do SIN, o modelo PREVIVAZ fornece as previsões para todas as semanas.

2.4. Métodos de Interpolação para a Distribuição da Precipitação

A precipitação é parte fundamental do ciclo hidrológico, responsável direta pela manutenção das aflúências nos rios, sendo uma parte proveniente do *runoff* da chuva sobre o terreno e outra pelo afloramento das águas subterrâneas (TUCCI, 1993). O estudo da distribuição espacial e quantitativa das chuvas é essencial para diversos campos de conhecimento, como agricultura, transporte e principalmente para a gestão de recursos hídricos, que, no Brasil, está intensamente ligada à política energética. Dessa maneira, é fundamental o conhecimento correto da distribuição pluviométrica em determinada área de drenagem a fim de se obter um melhor desempenho dos modelos de previsão de aflúências em usinas hidrelétricas.

Para a obtenção de dados de aflúência em rios, que ocorrem de forma contínua e variam lentamente ao longo do curso conforme a área drenada aumenta, existem alguns métodos simples de serem aplicados e já consolidados. Um dos mais utilizados consiste em fazer a medição da altura em que se encontra a lâmina de água e, assim, calcular a vazão de acordo com a respectiva curva-chave do rio, criando-se séries de vazão consistente e precisas. Já o fenômeno da precipitação é variável no tempo, podendo durar de alguns minutos a semanas seguidas, em relação a sua intensidade, desde chuvisco até temporais intensos, e também no espaço, ocorrendo de forma aleatória, criando campos de precipitação distintos ao longo da topografia. Segundo AMORIM (2005), a espacialização da precipitação pluvial anual e mensal é a entrada que possui o maior percentual de erro em modelos que simulam interações entre clima, terra e biosfera. Campos de precipitação podem ser obtidos de três formas: através de métodos de interpolação de dados provenientes de pluviômetros, por dados de radar meteorológico (FARIAS e FILHO, 2013), por dados de satélite (COLLISCHONN *et al.*, 2007) ou por métodos que façam a integração dos dois anteriores (LOU, 2004). Deve-se levar em conta que qualquer um dos meios descritos anteriormente são apenas representações da realidade, sendo extremamente difícil capturar de forma exata toda a variação espacial, temporal e de intensidade que ocorre durante um evento de precipitação.

Em KAISER e PORTO (2005), foi feito um estudo comparativo de métodos de geração de campos de precipitação descritos anteriormente, utilizando dados pluviométricos provenientes do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) e ANA e radar do Centro de Meteorologia de Bauru (IPMet), para o período de 1993 e

1998 em diversas sub-bacias. Verificou-se uma diferença quantitativa nas médias diárias entre dados de radar e métodos baseados em pluviômetros (Método de Costa e Inverso do Quadrado da Distância (IQD)) da ordem de -12%, e com valores entre -0,5% a +16% para os métodos compostos ali descritos, chegando-se à conclusão de que as técnicas mistas ainda não estão plenamente desenvolvidas para a sua utilização em períodos longos, sendo recomendado dar prosseguimento a esse ramo de pesquisas.

O estudo de VIOLA *et al.*(2010) objetivou avaliar o desempenho de quatro métodos de interpolação: Krigagem (KG), cokrigagem (CA), introduzindo a altitude como variável secundária, modelagem estatística (ME), na qual a precipitação média pode ser estimada a partir de coordenadas geográficas, e, por último, o método do inverso do quadrado da distância (IQD). A área de estudo considerada foi o estado de Minas Gerais, sendo utilizados dados de 232 postos pluviométricos para a modelagem e de 70 para validação com base no erro médio absoluto, obtidos a partir da base de dados do Sistema de Informações Hidrológicas (HidroWEB) da Agência Nacional de Águas. Foram interpolados dados de precipitação média anual, média mensal e média do período seco. Constatou-se, por fim, que todos os modelos têm um bom desempenho na espacialização da precipitação, com um erro absoluto médio na faixa de 12,84% a 19,96%, sendo destacado a cokrigagem, que, em 50% das situações analisadas obteve um erro menor em relação às outras metodologias.

Em AMORIM *et al.* (2008), foram coletados dados de precipitação média mensal de 50 estações climatológicas do Núcleo de Meteorologia e Recursos Hídricos do Estado de Alagoas para um período de 27 anos, com o intuito de se comparar dois métodos de interpolação: o inverso do quadrado da distância (IQD) e o spline. Foram verificadas a distribuição espacial dos dados interpolados e a acurácia dos métodos por meio de validação cruzada, concluindo-se que ambos são adequados à interpolação, sendo o método IQD ligeiramente superior em relação ao spline, com um erro na faixa de 2,2mm.

3. Materiais e Métodos

Neste capítulo primeiramente serão mostradas as áreas de estudo selecionadas fazendo-se uma breve explanação delas; em seguida, será comentada a aquisição de dados de vazão natural afluente e de precipitação nas UHEs selecionadas; em terceiro

lugar, é feita uma descrição do método IQD utilizado para produção das séries de precipitação; por último, é definido o coeficiente de correlação de Pearson, o qual servirá para calcular a relação existente entre as variáveis estudadas e assim analisá-las.

Toda a metodologia definida neste capítulo foi implementada em linguagem de programação Matlab, de forma a ser possível obter resultados para qualquer área de estudo, definidas corretamente as variáveis de entrada. Sendo assim, foi possível, com essa abordagem, a construção da série de precipitação média mensal e o cálculo da correlação entre as variáveis de precipitação e de vazão natural afluente para as UHEs selecionadas.

3.1. Área de Estudo

Para a realização das análises desta monografia, buscou-se selecionar usinas hidrelétricas com grande importância para o cenário nacional de energia elétrica, tanto pela sua potência instalada, quanto pela sua capacidade de armazenamento de seus reservatórios e assim proporcionando a regularização das vazões afluentes. Além disso, visou-se escolher regiões que possuam climatologias diferentes entre si, aumentando, assim, o alcance e a diversidade deste estudo. Desta maneira, cinco UHEs foram selecionadas: UHE Três Marias, UHE Sobradinho, UHE Itá, UHE Furnas, UHE Tucuruí (Figura 6).

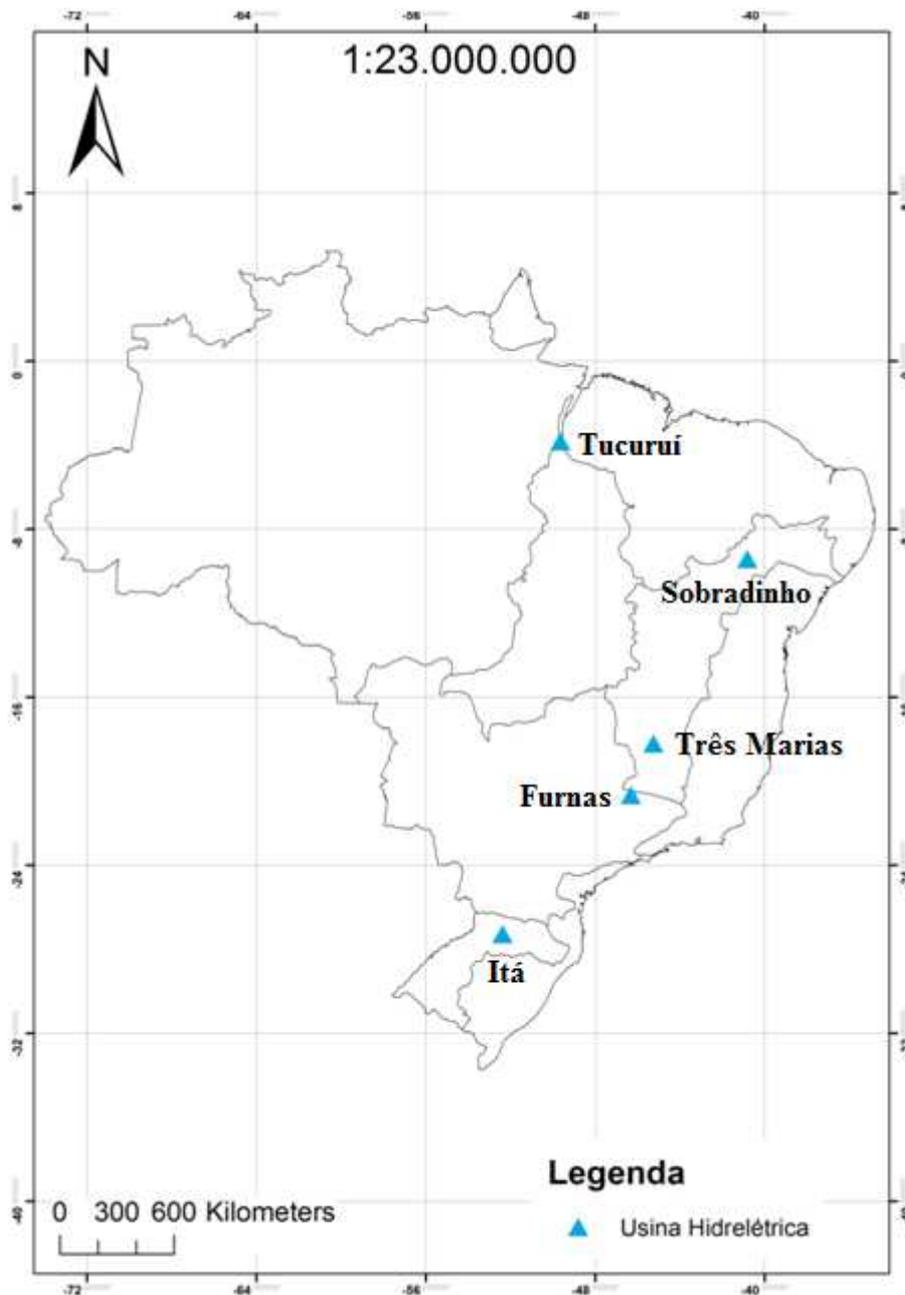


Figura 6 – Localização das usinas hidrelétricas selecionadas

3.1.1. UHE Três Marias

A UHE Três Marias localiza-se na bacia do rio São Francisco, estado de Minas Gerais. Sua operação começou no ano de 1962, após cinco anos de construção, tendo uma potência instalada de 396 MW e um reservatório de 19.528 hm³. Sua barragem é constituída por 2.700 m de comprimento e uma altura máxima de 75 m, sendo, para a época de sua construção, o maior reservatório existente em todo o Brasil e um dos maiores do mundo. Sua área de drenagem coincide com a sub-bacia 40 (pertencente a região denominada de Alto São Francisco), com 50.600 km², situando-se em uma região tropical.

Hoje em dia, sua potência instalada não é tão significativa para o Brasil, podendo abastecer cerca de 1,1 milhão de habitantes, porém a sua importância vai muito além da geração elétrica. Em 1950 o plano geral para o aproveitamento econômico do vale do São Francisco já apontava que a regularização do rio São Francisco era vital para o desenvolvimento regional. Sendo assim, recomendou-se a construção de uma série de barragens visando à melhoria da navegabilidade nas épocas de estiagem, o controle de cheias que atingiam as populações ribeirinhas, a produção hidrelétrica, a irrigação o aproveitamento agrícola das áreas vazantes e o saneamento urbano. Além de todos esses usos múltiplos, a UHE Três Marias é de importância vital no controle das vazões que chegam nas UHEs à jusante, como Sobradinho e o complexo de Paulo Afonso, que ficariam com aflúências muito pequenas na época de seca, não sendo aproveitado ao máximo o grande potencial dessas usinas hidroelétricas (CEMIG, 2015).

3.1.2. UHE Sobradinho

A usina hidrelétrica de Sobradinho também se localiza na bacia do rio São Francisco, no município homônimo, estado da Bahia, distando cerca de 40km à montante das cidade de Juazeiro/BA e Petrolina/PE. Sua construção iniciou-se no ano de 1973, sendo finalizada em 1979, constituindo, assim, o maior lago artificial de água doce do mundo. Com capacidade de armazenamento de 34,1 bilhões de metros cúbicos e estendendo-se por 320km ao longo da sua superfície de espelho de água de 4.214 km², o reservatório de Sobradinho pode inclusive ser visto do espaço. Sua área de drenagem compreende toda a bacia do rio São Francisco a montante da sub-bacia de número 47 (inclusive), com uma área de drenagem de 498.968 km² A maior parte dela fica em uma região de clima semi-árido, que tem como característica principal uma baixa pluviosidade.

O aproveitamento hidrelétrico de Sobradinho é um dos mais importantes no cenário nacional. Sua capacidade instalada é de um pouco mais de 1GW, porém sua importância vai muito além da geração de energia elétrica. Por ter o maior reservatório de todo sistema brasileiro, a UHE Sobradinho tem a função de regularização das vazões, mantendo, nos períodos de estiagem, uma aflúência de 2.060 m³/s permitindo a operação de todas as usinas à jusante da CHESF – Companhia Hidro Elétrica do São Francisco, além de garantir os outros usos múltiplos da água, como o abastecimento e agricultura irrigada. Faz parte de sua estrutura uma eclusa, cuja câmara tem 120m de comprimento e 17 de largura permitindo às embarcações vencer um desnível de 32,5m

criados pela barragem, garantindo, assim, a continuidade da navegação pelo rio São Francisco (CHESF, 2015).

3.1.3. UHE Itá

O aproveitamento hidrelétrico de Itá localiza-se na bacia do rio Uruguai, região sul do Brasil, no município homônimo. Sua construção passou efetivamente a ser realizada, depois de alguns atrasos devido a questões de financiamento e licitações, no ano de 1995, sendo finalizada em 2000. Tem uma área de drenagem total de 44.500km², inserida em região de clima subtropical.

A UHE Itá possui um pequeno reservatório de aproximadamente 140 km², represando no máximo 5.100 hm³, o qual não tem características de regularização das vazões ao longo de um ano hidrológico completo, apenas para questões de aflúências horárias, sendo, assim, caracterizada como uma usina a fio d'água. A regularização das suas vazões é feita a partir do reservatório da UHE Machadinho, que se localiza à montante de Itá. Sua potência instalada é de 1.450 MW, o que a configura como a maior usina hidrelétrica em operação nas bacias totalmente contidas na região Sul do Brasil (bacias 7 e 8) (CONSORCIO ITÁ, 2015).

3.1.4. UHE Furnas

A usina hidrelétrica de Furnas foi a primeira a ser construída pela companhia homônima, da qual herdou o nome. Ela se localiza no estado de Minas Gerais, entre os municípios de São José da Barra e São João Batista do Glória, no curso médio do rio Grande, que está inserido na bacia do rio Paraná, em um clima predominantemente tropical. Sua construção iniciou-se em meados de 1958, tendo a primeira unidade entrando em operação no ano de 1963, com sua sexta turbina ligada em 1965. Durante a década de 70, foi iniciada sua ampliação para a instalação de duas novas turbinas, configuração mantida até hoje.

O aproveitamento hidrelétrico de Furnas tem uma potência instalada de 1.216 MW, sendo considerada, para sua época de instalação, uma das maiores obras realizadas na América Latina. Seu reservatório possui um espelho de água de 1.440 km² de área, podendo reservar até 9.450.000 m³ de água. Sua localização é estratégica dado que ela está perto dos grandes centros consumidores de energia elétrica do Brasil (500km do Rio de Janeiro, 400km de São Paulo e 300km de Belo horizonte). Sua construção evitou que houvesse um grande colapso energético no Brasil em meados dos anos 60, havendo

acionamento e o corte de fornecimento de eletricidade para as indústrias. Para efeito de comparação, sua potência instalada representava cerca de 1/3 do potencial instalado em todo o país. Além da geração de energia elétrica, a UHE Furnas tem o papel de regularização das vazões do rio Grande, permitindo que fossem construídas mais oito usinas ao longo de seu curso, aproveitando integralmente, um potencial de mais de 6.000 MW instalados (FURNAS, 2015).

3.1.5. UHE Tucuruí

A usina hidrelétrica de Tucuruí localiza-se no município homônimo, ao norte do estado do Pará, no rio Tocantins, pertencendo assim à bacia do Tocantins-Araguaia. Ela é considerada a maior obra de engenharia já realizada na Amazônia devido à sua proporção e desafios construtivos. A primeira etapa de construção começou no ano de 1975 sendo finalizada somente em 1992, entregando uma potência instalada e 4.245 MW. Após 6 anos, iniciou-se a segunda etapa, colocando mais 11 unidades geradores, sendo a obra terminada em 2006, com uma potência instalada total de 8.370 MW, constituindo assim a maior usina hidrelétrica genuinamente brasileira (Itaipú tem 14 GW instalados, porém metade pertence ao Paraguai), e assim uma das maiores do mundo também.

Sua área de drenagem é de 758.000 km², sendo a maior parte localizada em uma região de clima tropical. Em seu reservatório podem ser acumulados cerca de 50.275 hm³ de água tendo uma área inundada de 3.007 km². Faz parte da estrutura da UHE Tucuruí uma eclusa, que permite o transporte marítimo de mercadorias para a foz do rio Tocantins, uma importante rota de importação e exportação de produtos.

3.2 Dados

3.2.1 Dados de Precipitação

Os dados pluviométricos mensais para o cálculo da precipitação média mensal ao longo da série histórica nas áreas de drenagem das UHEs selecionadas foram obtidos através do Sistema de Informações Hidrológicas (HidroWEB, 2015). É disponibilizado, nesse site, um programa computacional em que podem ser gerenciadas as bases de dados que são encontradas na página web, de forma simples e rápida.

Assim sendo, para cada área de drenagem, selecionou-se o máximo de estações pluviométricas que estivessem dentro das áreas de drenagem das UHEs e que tenham

dados classificados como consistidos. Essa escolha deve-se ao fato de que os dados brutos apresentam diversos tipos de erros inerentes ao próprio processo de coleta e armazenamento, como erros de leitura, de transcrição e digitação, problemas nos equipamentos de coleta e ausência de dados durante um período determinado. Para ser classificado como consistido, a ANA (2012) inicialmente recomenda a utilização do programa Hidro-Plu, produzido em parceria entre a Universidade Federal de Viçosa (UFV), ANA e Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) baseado na formulação matemática desenvolvida por HOLANDA e OLIVEIRA (1979), para fazer uma análise da consistência de dados pluviométricos mensais ou anuais da série de observações realizadas.

Após a seleção das estações de acordo com os critérios sugeridos, deve ser empregada alguma técnica de preenchimento de falhas, como o método da ponderação regional, método da regressão linear, método de redes neurais artificiais, método da dupla massa e método do vetor regional, conseguindo-se, assim, uma série de dados com minimização de erros e de longo período.

Sendo assim, foram selecionadas, para a área de drenagem de cada usina hidrelétrica a seguinte quantidade de estações pluviométricas (Figura 7): para UHE Três Marias, 85 pluviômetros com dados entre os anos de 1942 e 2005; para a UHE Sobradinho 334 pluviômetros com dados entre os anos de 1942 e 2005; para a UHE Itá 50 pluviômetros entre os anos de 1960 e 2004; para a UHE Furnas 142 pluviômetros com dados entre os anos de 1941 e 2006; para a UHE Tucuruí 205 pluviômetros com dados entre 1974 e 2006. Deve-se observar que a área de drenagem de Três Marias está contida dentro da área de drenagem de Sobradinho. Para a seleção dos períodos utilizados, visou-se obter uma longa série de dados, com uma quantidade suficiente de postos pluviométricos ativos durante todo o período, para que se possa utilizar o método de interpolação necessário para a produção da série de precipitação média nas áreas de drenagem.

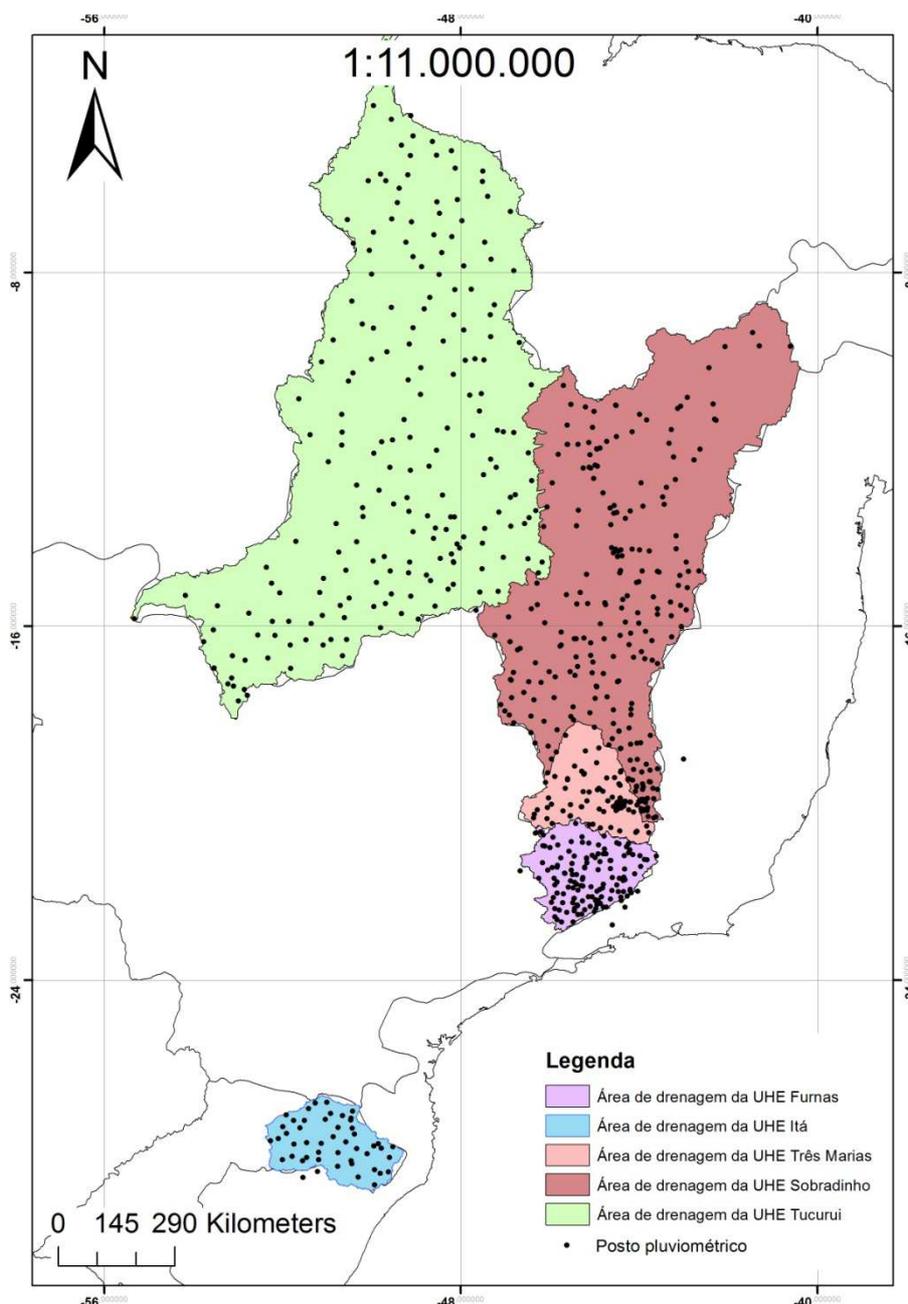


Figura 7 – Áreas de drenagem das 5 UHEs selecionadas e seus respectivos postos pluviométricos.

3.2.2 Dados de Vazão

Para as séries históricas de vazão natural das UHEs selecionadas, utilizaram-se os dados dos postos fluviométricos das próprias usinas (ONS, 2015c). Vazões naturais são aquelas que ocorreriam em uma seção do rio caso não houvesse ações antrópicas na sua bacia contribuinte – tais como regularizações de vazões realizadas por reservatórios, desvios de água, evaporações em reservatórios e usos consuntivos (irrigação, criação de animal e abastecimento urbano, rural e industrial). Elas são obtidas por meio de um processo de reconstituição, e sua atualização ocorre conforme uma nova metodologia é

desenvolvida. Esse processo considera a vazão observada em um posto pluviométrico e as informações referentes às ações antrópicas na bacia. As séries de vazões mensais naturais consolidadas estão disponíveis para o horizonte de 1931 a 2013, sendo selecionados, para o estudo, os períodos idênticos aos disponíveis para os dados de precipitação.

3.3. Interpolação da Precipitação nas Áreas de Drenagem – Método do Inverso do Quadrado da Distância (IQD)

A partir dos dados das diversas estações pluviométricas selecionadas, é necessária a utilização de algum método de interpolação para a criação dos campos de precipitação e a produção da série histórica de precipitação mensal nas áreas de drenagem. Dentre os vários métodos existentes, escolheu-se o método do inverso do quadrado da distância (VIOLA *et.al.*, 2010), pois, conforme descrito anteriormente, apresenta uma solução de compromisso entre a precisão obtida em seus resultados e o esforço computacional necessário para utilizá-lo, além de ter uma modelagem simples de ser realizada.

O método IQD consiste em criar uma malha de pontos contidos na área de drenagem estabelecida e assim calcular a precipitação estimada para cada ponto através da média ponderada pelo inverso do quadrado da distância a partir da chuva observada em cada posto pluviométrico. Primeiramente, deve-se calcular a distância entre cada ponto da malha e cada posto pluviométrico, podendo aplicar a lei esférica dos cossenos a partir das coordenadas dos pontos das malhas e dos postos.

$$\cos(S) = \text{sen}(lat1) * \text{sen}(lat2) + \cos(lat1) * \cos(lat2) * \cos(|lon1 - lon2|) \quad (1)$$

$$d_i = R * \arccos(S) \quad (2)$$

onde:

R - raio médio da Terra (6.371 km);

d_i - distância;

$lat1, lon1$ - coordenadas geodésicas dos pontos da malha;

$lat2, lon2$ - coordenadas geodésicas dos postos;

Após calcular a distância entre todos os postos e pontos, faz-se o cálculo da precipitação estimada em um ponto P_{est} com o método IQD, que pondera a precipitação observada no pluviômetro i , P_{obs_i} , conforme a equação 3:

$$P_{est} = \frac{\sum_{i=1}^{np} P_{obs_i} \cdot \frac{1}{d_i^2}}{\sum_{i=1}^{np} \frac{1}{d_i^2}} \quad (3)$$

onde d_i é a distância calculada no item anterior; np é o número de postos pluviométricos utilizados para a bacia em estudo.

Por último, para o cálculo da precipitação mensal média somente é necessário fazer uma média aritmética entre a precipitação estimada para todos os pontos da área de drenagem.

3.4. Correlação entre Precipitação e Vazão Natural Afluente

Visando identificar uma relação entre as séries de precipitações e de vazões naturais afluentes, esta pesquisa utiliza o coeficiente de correlação de Pearson (FIGUEIREDO E SILVA JUNIOR, 2009), discretizado mensalmente, com a precipitação sem atraso em relação à vazão e com atraso de até seis meses e com a precipitação acumulada para 2, 3 e 4 meses anteriores à vazão sem atraso e com atraso de até dois meses em relação à vazão além de calcular a correlação anual, conforme a Tabela 1 demonstra.

Tabela 1 – Discretização das correlações calculadas

Tipo de Correlação	Variável 1	Variável 2
Correlação mensal	Precipitação mensal sem atraso	Vazão mensal
	Precipitação mensal com atraso de 1 mês	
	Precipitação mensal com atraso de 2 meses	
	Precipitação mensal com atraso de 3 meses	
	Precipitação mensal com atraso de 4 meses	
	Precipitação mensal com atraso de 5 meses	
	Precipitação mensal com atraso de 6 meses	
	Precipitação mensal acumulada em 2 meses sem atraso	
	Precipitação mensal acumulada em 2 meses com atraso de 1 mês	
	Precipitação mensal acumulada em 2 meses com atraso de 2 meses	
	Precipitação mensal acumulada em 3 meses sem atraso	
	Precipitação mensal acumulada em 3 meses com atraso de 1 mês	
	Precipitação mensal acumulada em 3 meses com atraso de 2 meses	
	Precipitação mensal acumulada em 4 meses sem atraso	
Precipitação mensal acumulada em 4 meses com atraso de 1 mês		
Precipitação mensal acumulada em 4 meses com atraso de 2 meses		
Correlação anual	Precipitação anual	Vazão anual

Deve-se primeiramente observar que altos valores do coeficiente de correlação de Pearson nem sempre indicam uma relação direta entre duas variáveis distintas. Porém,

tratando-se de chuva e vazão, é sabido que as duas estão conectadas entre si pelo ciclo hidrológico, por isso o interesse em mensurar aqui a correlação entre elas.

Para uma determinada bacia, consideram-se as séries temporais de vazões naturais $[v_1^1, v_2^1, v_3^1, \dots, v_{12}^n]$ e de precipitações $[p_1^1, p_2^1, p_3^1, \dots, p_{12}^n]$ com discretização mensal e n anos. A Equação 4 apresenta o estimador da correlação cruzada mensal ρ_k^m entre a vazão do mês m e a precipitação do mês atrasado de k meses:

$$\rho_k^m = \frac{\sum_{i=1}^n (v_m^i - \bar{v}_m)(p_{m-k}^i - \bar{p}_{m-k})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (v_m^i - \bar{v}_m)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (p_{m-k}^i - \bar{p}_{m-k})^2}} \quad (4)$$

Para estimar a correlação anual, calcula-se a média anual para a vazão e para a precipitação com os dados mensais de cada ano i , respectivamente V_i e P_i . A partir da série de médias anuais é calculada a correlação anual, segundo a Equação 5:

$$\rho_{anual} = \frac{\sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \quad (5)$$

4. Análise de Resultados

Neste capítulo, serão descritos e analisados todos os resultados obtidos para as UHEs selecionadas, na mesma ordem do capítulo 3.1. Aqui, frisa-se que, para conseguir produzir as séries de precipitação com atraso de 1 até 6 meses, decidiu-se retirar o primeiro ano de cada série para esse fim, evitando, assim, séries incompletas o que poderia levar a resultados errôneos.

Para a construção dos mapas de campo de precipitação nas áreas de drenagem das UHEs selecionadas, utilizou-se o programa ArcGIS.

4.1. UHE Três Marias

A Figura 8 apresenta as médias e desvios padrões mensais da precipitação e das aflúncias naturais mensais da UHE Três Marias para o período entre 1943 e 2005. Nota-se que os maiores acumulados pluviométricos mensais, bem como as maiores vazões, ocorrem entre outubro e março (primavera e verão), caracterizando, assim, o chamado período úmido. Os menores valores de ambos os parâmetros são observados

entre abril e setembro (outono e inverno), no chamado período seco, característica padrão de uma área tropical.

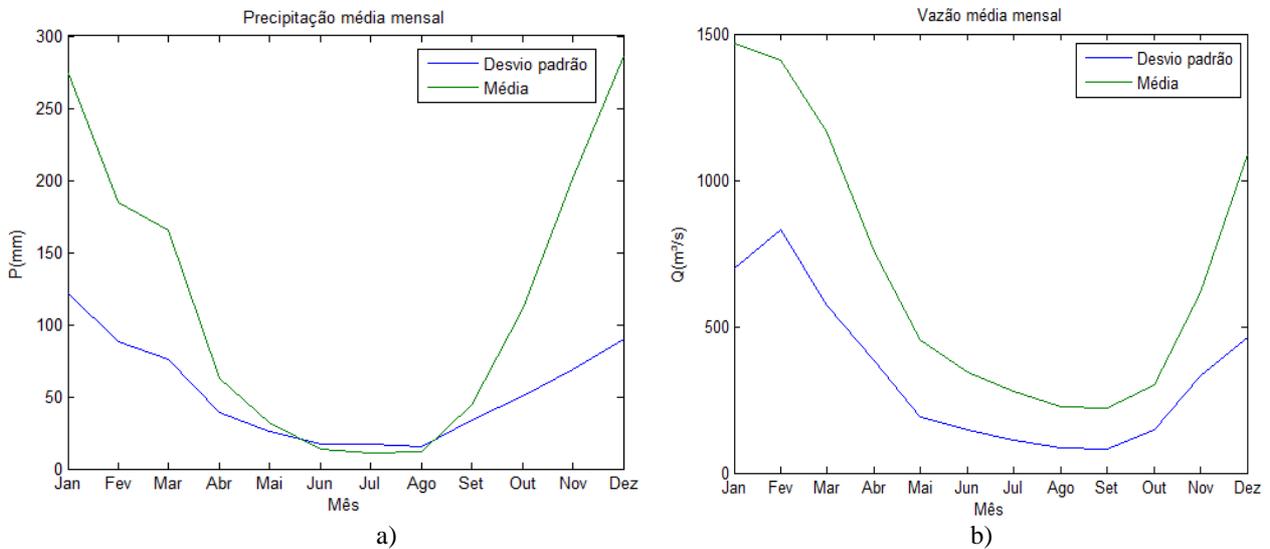


Figura 8 – Precipitação média mensal (a) e vazão natural média mensal (b) na UHE Três Marias para o período de 1943 a 2005.

A Figura 9 traz o mapa com os campos de precipitação na área de drenagem da UHE Três Marias, cuja precipitação anual média é de 1.400 mm.

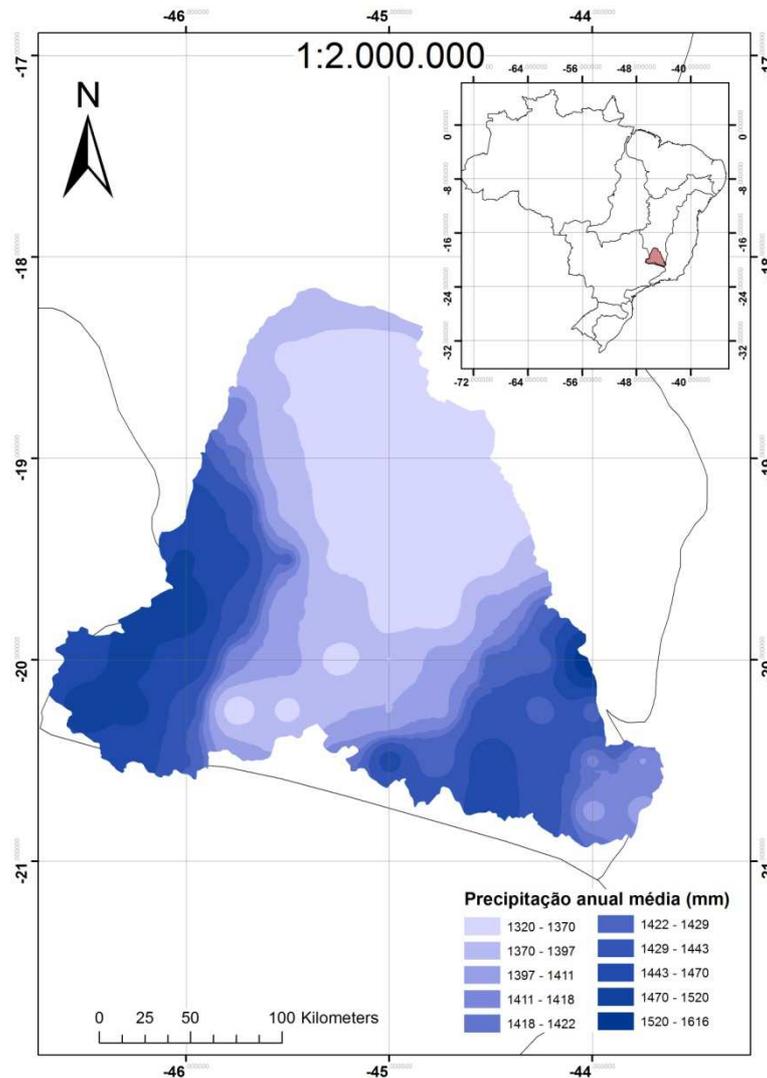


Figura 9 – Campo de precipitação anual na área de drenagem da UHE Três Marias

A Figura 10 apresenta as correlações cruzadas mensais entre as afluências naturais e as precipitações médias sem atraso (próprio mês) e com atraso de até seis meses da área de drenagem da UHE Três Marias. Verifica-se uma alta correlação entre as precipitações médias sem atraso e as vazões naturais para os seis meses com maiores acumulados pluviométricos, chamado de período úmido, com valores oscilando entre 0,60 e 0,75. Para o período seco onde a precipitação é extremamente baixa, conforme verificado na Figura 8, as afluências possuem uma correlação maior com a precipitação dos meses anteriores (janeiro a abril), fato este completamente compreensível. Para esses meses, a escassa chuva que ocorre no mês atual tem baixa relação com a vazão no rio, sendo este recarregado principalmente pelas águas subterrâneas que são provenientes da infiltração no solo da precipitação nos meses do período úmido.

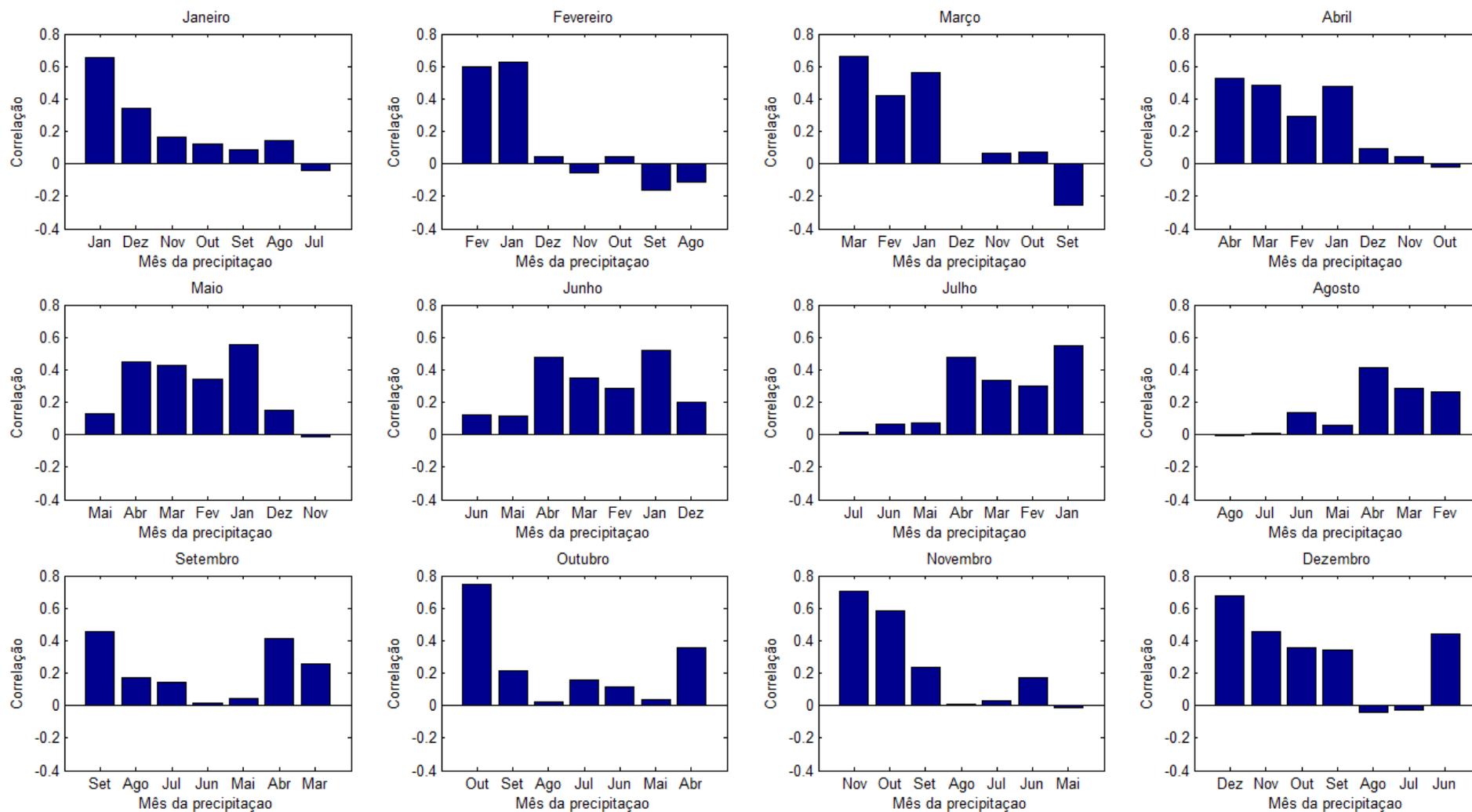


Figura 10 – Correlograma com as correlações cruzadas mensais entre as vazões naturais e as precipitações médias sem atraso (próprio mês) e com atraso de até seis meses na UHE Três Marias.

Foram também calculadas a correlação entre a vazão natural e a precipitação acumulada por dois meses consecutivos, que são apresentadas pela Figura 11. Para a melhor compreensão das análises, adota-se aqui a seguinte nomenclatura: “P(t)” denominará a precipitação do mês atual em relação à vazão, “P(t-1)” a precipitação do mês anterior e assim sucessivamente. Sendo assim, a coluna 1 é a correlação entre a vazão natural e a precipitação acumulada $P(t)+P(t-1)$, a coluna 2 é a correlação entre a vazão natural e a precipitação acumulada $P(t-1)+P(t-2)$ e a coluna 3 é a correlação entre a vazão natural e a precipitação acumulada $P(t-2)+P(t-3)$. Os resultados demonstram que a coluna 1 tem uma maior correlação quando comparada à correlação da análise anterior, com resultados variando entre 0,72 a 0,82 para os meses do período úmido. Para os meses do período seco, verificam-se baixas correlações assim como na Figura 10 excetuando-se o mês de abril, onde a correlação da precipitação acumulada alcançou 0,7.

O mesmo procedimento é apresentado na Figura 12, porém a precipitação é acumulada durante três meses seguidos. Sendo assim, a coluna 4 mostra a correlação entre a vazão natural e $P(t)+P(t-1)+P(t-2)$, a coluna 5 é a correlação entre a vazão natural e $P(t-1)+P(t-2)+P(t-3)$, e a coluna 6 é a correlação entre a vazão natural e $P(t-2)+P(t-3)+P(t-4)$. Observa-se que, para o período úmido, houve pouca variação, tendo apenas um pequeno decréscimo na correlação agora entre 0,71 e 0,81, demonstrando assim que a precipitação com dois meses de atraso pouco influência na vazão. Porém, para o mês de maio, houve um ganho significativo na correlação, tendo a coluna 6 o valor de 0,7.

Como última correlação mensal a ser analisada, agora a precipitação é acumulada durante quatro meses. Assim, a coluna 7, na Figura 13, representa a correlação entre a vazão natural e $P(t)+P(t-1)+P(t-2)+P(t-3)$, a coluna 8 é a correlação entre a vazão natural e $P(t-1)+P(t-2)+P(t-3)+P(t-4)$, e a coluna 9, a correlação entre a vazão natural e $P(t-2)+P(t-3)+P(t-4)+P(t-5)$. Analisando-se o correlograma a seguir, percebe-se que, para o período úmido, houve pouca variação na correlação. Porém, para os meses de período seco, houve um grande incremento nos valores, principalmente para o mês de maio nas colunas 8 e 9, que chegam a valores próximos de 0,8 e para o mês de junho coluna 9, com 0,75 de correlação.

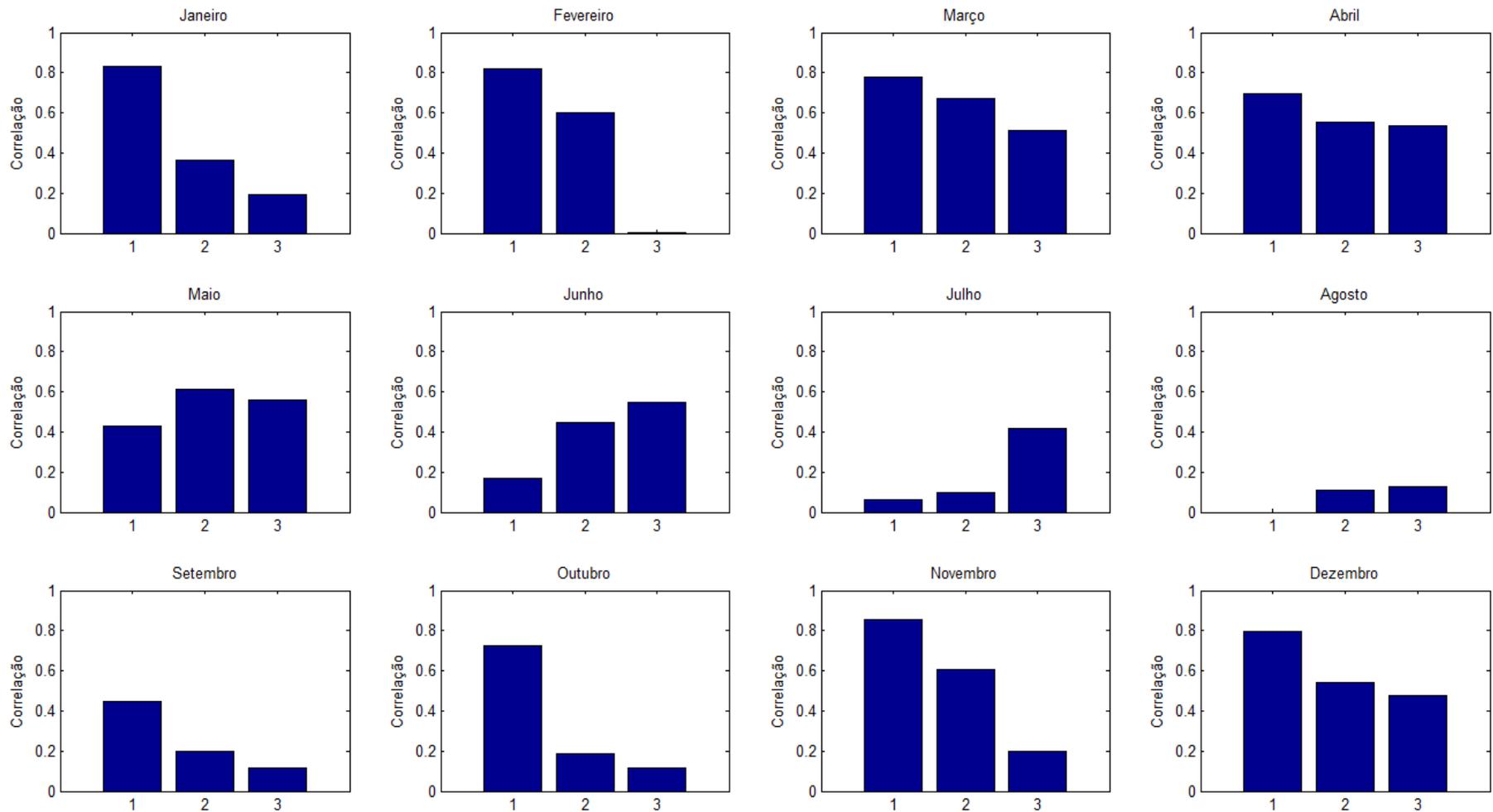


Figura 11 – Correlograma com as correlações cruzadas mensais entre as vazões naturais e as precipitações médias acumuladas em dois meses sem atraso (próprio mês) e com atraso de até dois meses na UHE Três Marias.

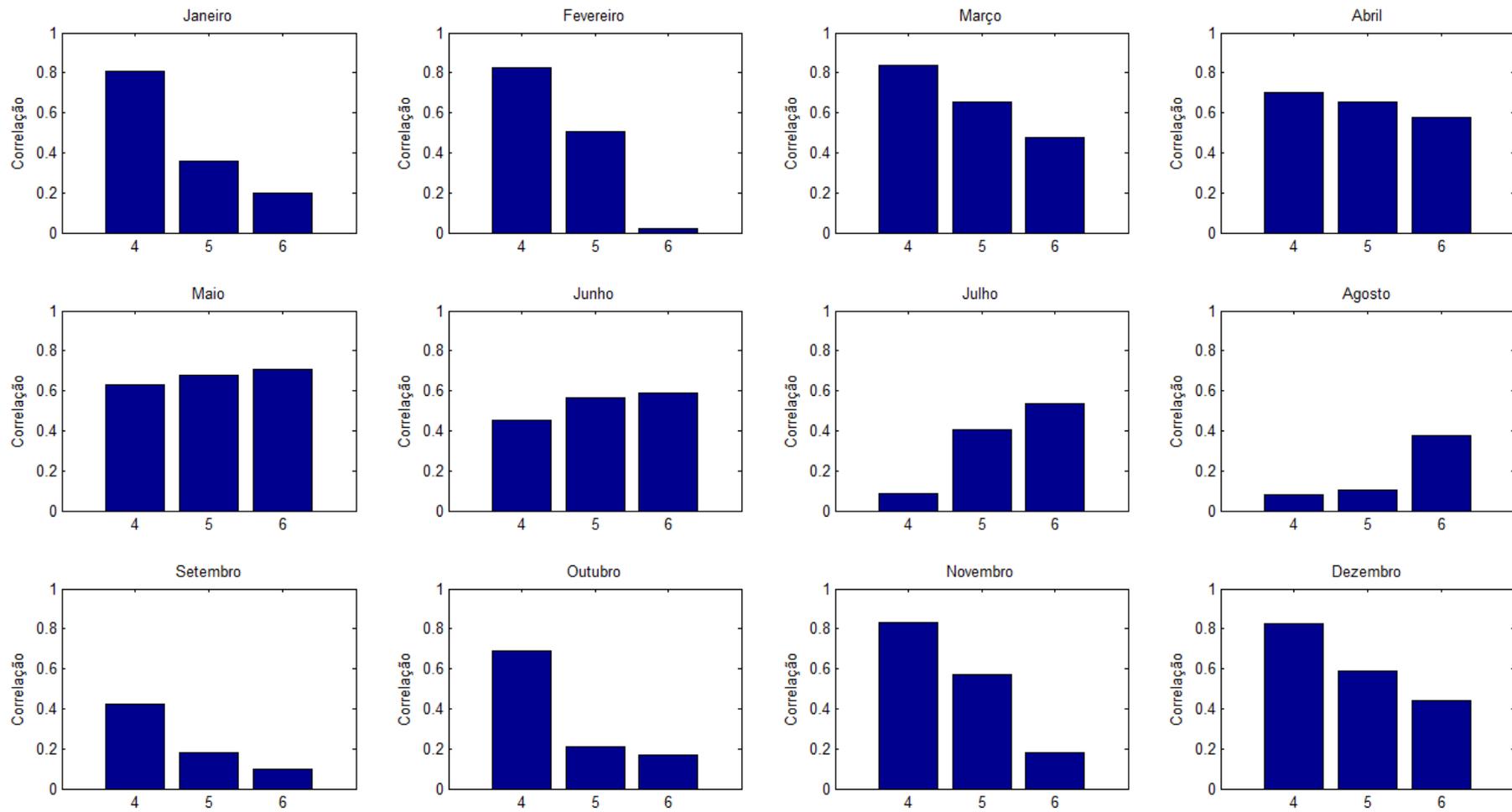


Figura 12 – Correlograma com as correlações cruzadas mensais entre as vazões naturais e as precipitações médias acumuladas em três meses sem atraso (próprio mês) e com atraso de até dois meses na UHE Três Marias.

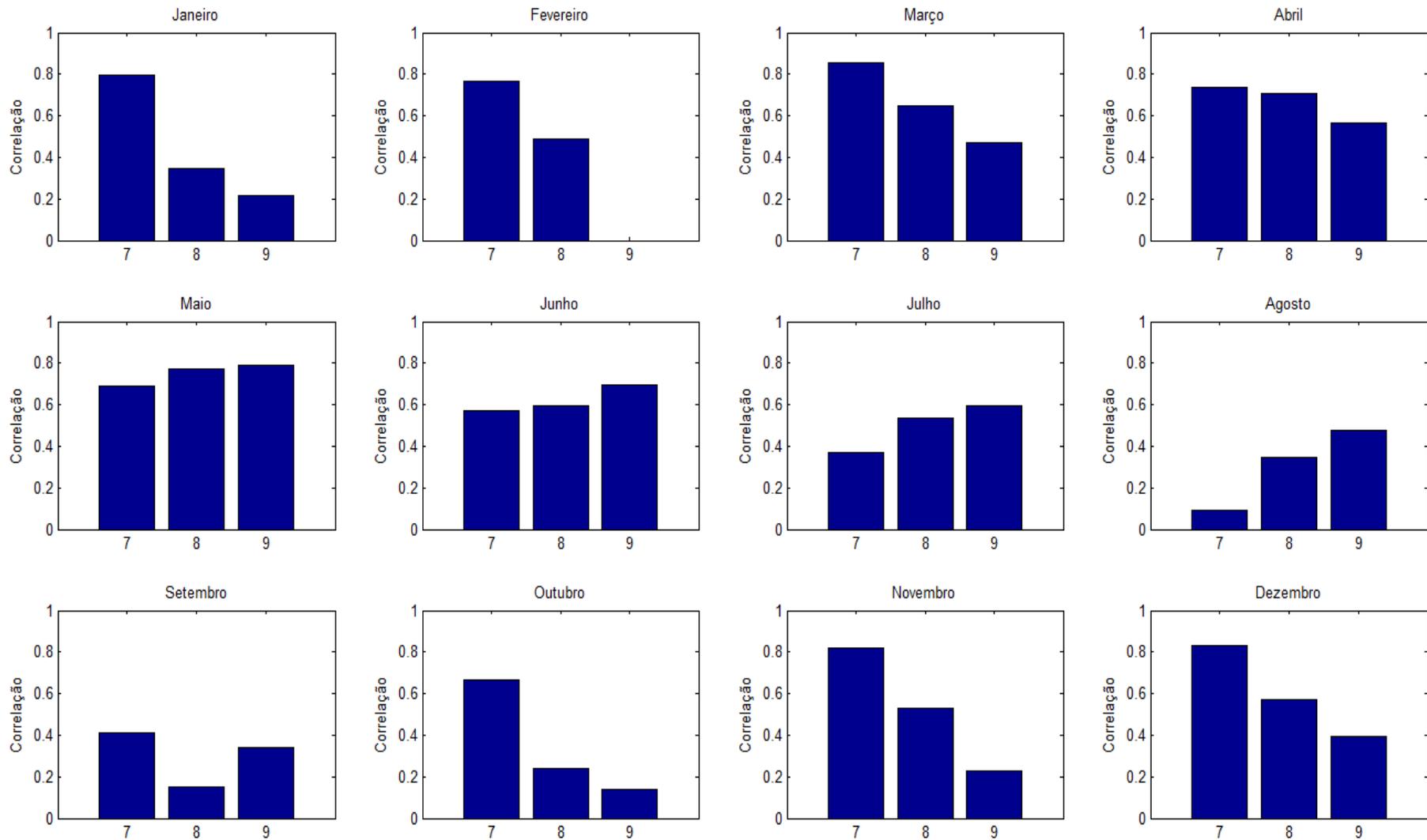


Figura 13 – Correlograma com as correlações cruzadas mensais entre as vazões naturais e as precipitações médias acumuladas em quatro meses sem atraso (próprio mês) e com atraso de até dois meses na UHE Três Marias.

Dessa maneira, pode-se chegar à conclusão que, para os meses de período seco, a vazão que flui na UHE Três Marias está relacionada principalmente com a precipitação acumulada dos quatro meses anteriores com atraso de dois meses, ou seja, o período úmido possui significativo efeito sobre as afluições no período seco. Para o período úmido, a variável que apresentou maior correlação com a vazão foi a precipitação acumulada em dois meses.

A seguir, apresenta-se uma análise dos valores anuais de vazão e de precipitação ao longo da série histórica disponível (1943 a 2005). Para a apresentação dos resultados, tanto a precipitação anual na área de drenagem da UHE Três Marias quanto sua vazão natural anual foram normalizadas em relação às suas respectivas médias, facilitando assim a comparação entre as duas (Figura 14). Nota-se que os picos superiores e inferiores de precipitação de praticamente toda a série histórica coincidem com as vazões superiores e inferiores, inclusive no elevado valor de 1983, ano em que houve um intenso evento de El Niño (RASMUSSEON E WALLACE, 1983). A correlação anual entre a vazão natural na UHE Três Marias e a precipitação anual na sua área de drenagem é 0,75.

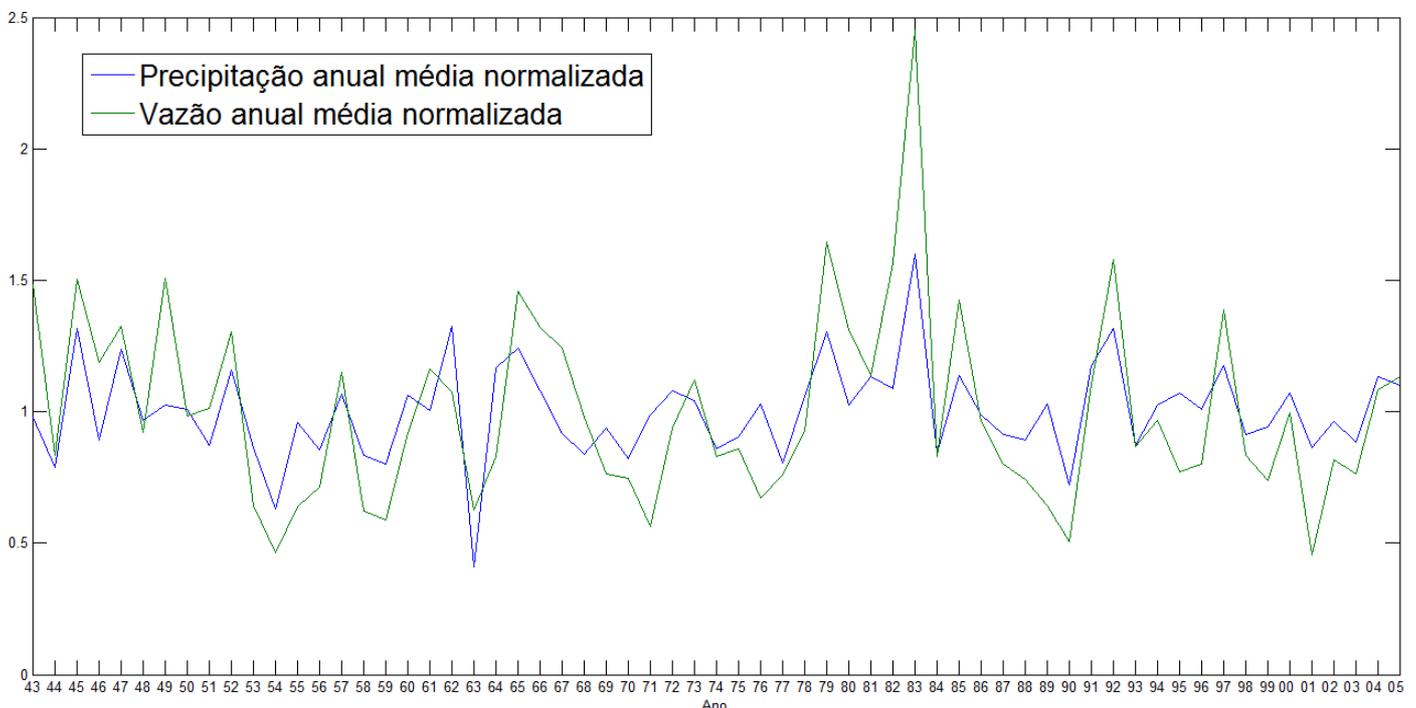


Figura 14 – Variação da precipitação anual normalizada e da vazão anual na UHE Três Marias entre 1943 e 2005.

4.2. UHE Sobradinho

A Figura 15 apresenta as médias e desvios padrões mensais da precipitação e das afluências naturais mensais da UHE Sobradinho para o período entre 1943 e 2005. Nota-se que os maiores acumulados pluviométricos mensais, bem como as maiores vazões, ocorrem entre outubro e março (primavera e verão), caracterizando assim o chamado período úmido. Os menores valores de ambos os parâmetros são observados entre abril e setembro (outono e inverno), no chamado período seco. Enfatiza-se aqui que a área de drenagem da UHE Sobradinho compreende regiões climáticas diferentes. Parte dela está inserida em uma área de clima tropical, no chamado alto São Francisco e outra parte localiza-se numa região de semi-árido, médio e baixo São Francisco, com uma característica de baixa pluviosidade. O mês com maior vazão natural afluyente é fevereiro, enquanto que para a UHE Três Marias (que também se localiza no rio São Francisco, porém, mais à montante) é o mês de janeiro. Fazendo uma comparação com a área de estudo citada anteriormente, observa-se que os valores de vazão média são muito superiores na UHE Sobradinho, chegando a 5.000 m³/s, enquanto que na UHE Três Marias o máximo é cerca de 1.500 m³/s. Essa diferença ocorre por conta da maior área de drenagem da primeira. Porém para a precipitação mensal média, os valores na UHE Sobradinho são inferiores, em decorrência da predominância de um clima semiárido.

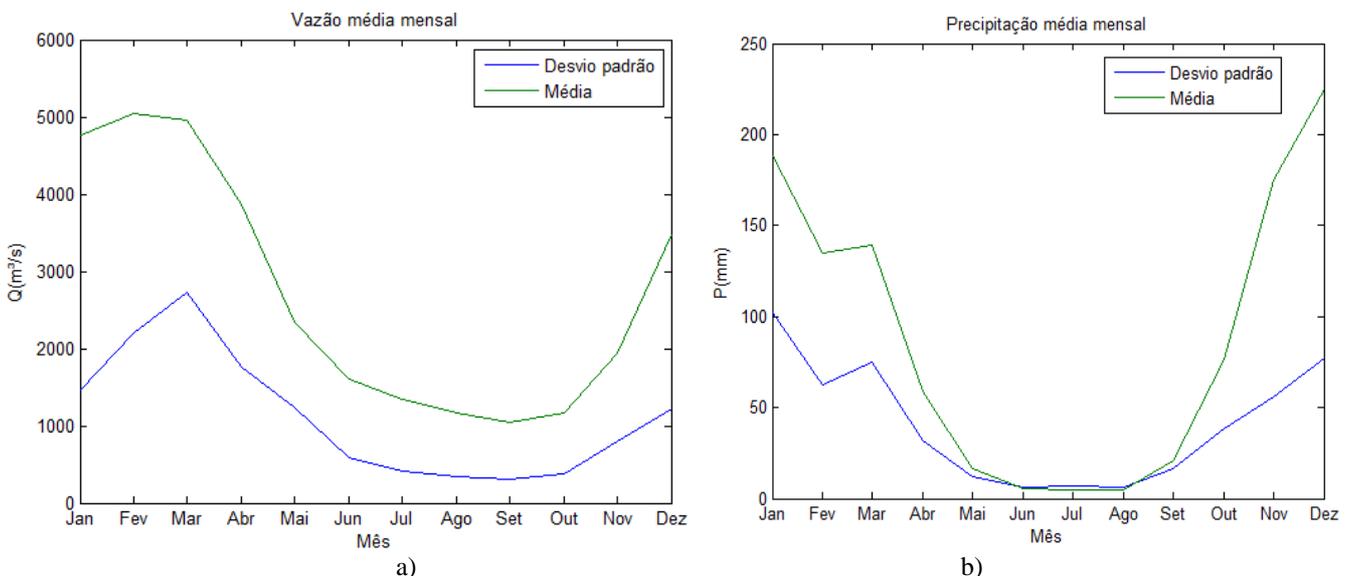


Figura 15 – Precipitação média mensal (a) e vazão natural média mensal (b) na UHE Sobradinho para o período de 1943 a 2005.

A Figura 16 apresenta os campos de precipitação anual média na área de drenagem da UHE Sobradinho, após a modelagem dos dados. É possível observar

claramente que a precipitação anual média vai diminuindo conforme se avança na região de clima semi-árido chegando-se a um valor de 487mm ao ano, enquanto que na região tropical o máximo é de 1.567mm. A precipitação anual média ao longo de toda a área de drenagem é de 1.050 mm.

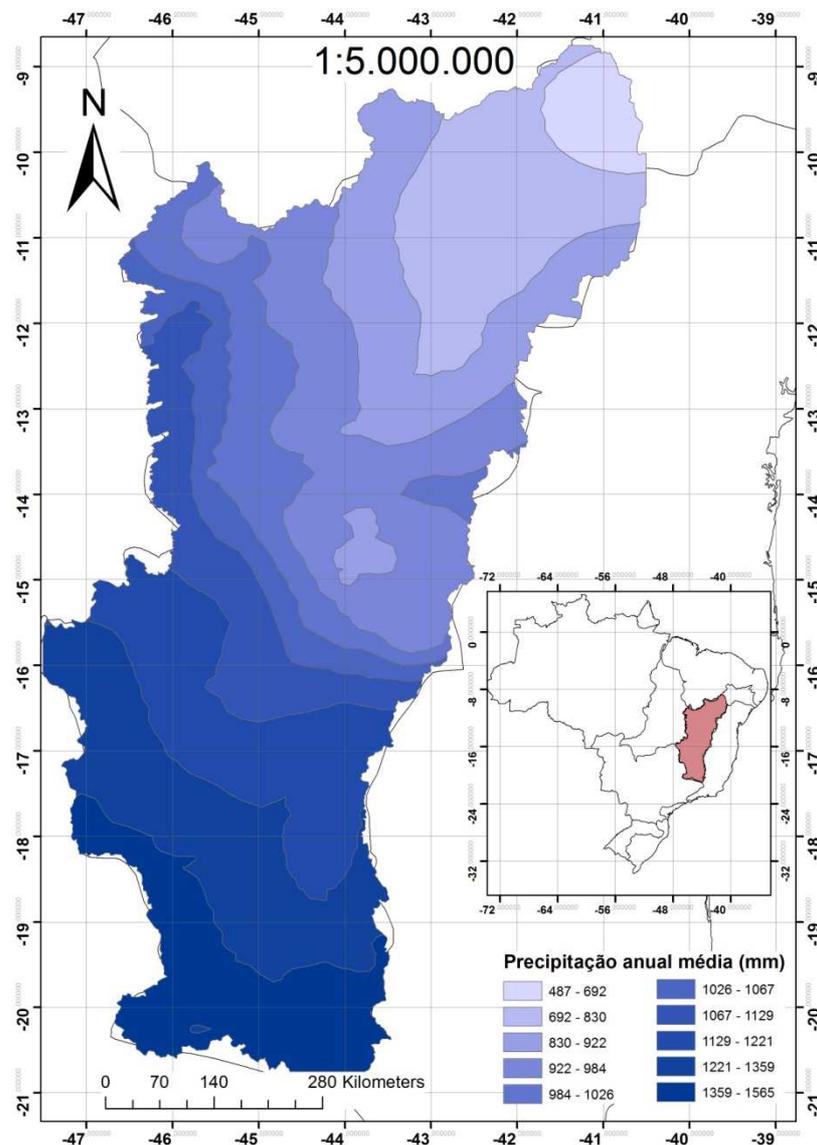


Figura 16 – Campo de precipitação anual na área de drenagem da UHE Sobradinho

A Figura 17 apresenta as correlações cruzadas mensais entre as afluições naturais e as precipitações médias da área de drenagem da UHE Sobradinho sem atraso e com atraso de até seis meses. Verifica-se uma alta correlação entre as precipitações médias com atraso de um mês e as vazões naturais para a maioria dos meses com maiores acumulados pluviométricos, chamado de período úmido, com valores oscilando entre 0,63 e 0,70. A única exceção é o mês de outubro que apresenta a correlação mais alta

para a precipitação sem atraso, no valor de 0,44. Esses resultados são consistentes com o que foi observado anteriormente na Figura 15. A maior parte da precipitação na área de drenagem da UHE Sobradinho ocorre na região do alto São Francisco, levando certo período de tempo para percorrer todo o trajeto até chegar à hidroelétrica, seja pelo próprio escoamento da água pelo rio, ou pelo tempo para que a água infiltrada no solo aflore novamente. Para o período seco onde a precipitação acumulada mensal é extremamente baixa, as afluências possuem uma correlação maior com a precipitação dos meses anteriores (janeiro a abril). Observa-se que os resultados encontrados para o período seco já haviam sido descritos para a UHE Três Marias.

Novamente foram calculadas as correlações entre vazão natural afluente e precipitação acumulada em dois meses. A Figura 18 apresenta os resultados encontrados. Observa-se que os maiores valores de correlação mensal nos meses do período úmido ocorrem na coluna 2 (precipitação acumulada em 2 meses com atraso de 1 mês), com exceção de outubro e novembro. Para os meses de fevereiro e março houve um ganho considerável na correlação que antes era de 0,70 e 0,63 passando a 0,8 e 0,76 respectivamente. Os outros meses do período úmido mantiveram-se praticamente estáveis. Para o período seco o mês de abril obteve um aumento na correlação, passando de 0,53 a 0,66 na coluna 2. Os meses de maio e junho obtiveram valores semelhantes de correlação quando comparados com os resultados da Figura 17, enquanto que para julho, agosto e setembro a correlação esteve bem abaixo.

A Figura 19 apresenta os resultados encontrados para a correlação entre a vazão natural mensal e a precipitação média mensal acumulada em três meses. Para os meses do período úmido a coluna 5 (precipitação acumulada em 3 meses com atraso de 1 mês em relação a vazão), pouco variou em relação ao resultado encontrado na coluna 2. Para o período seco, a coluna 4 apresentou melhor resultado para o mês de abril, 0,66, a coluna 5 para o mês de maio, 0,59 e o mês de junho apresentou como melhor resultado a coluna 6 com 0,58. Observa-se que para os três meses citados do período seco os maiores resultados ocorreram quando estavam sendo correlacionadas as suas vazões com a precipitação acumulada dos meses de abril, março e fevereiro.

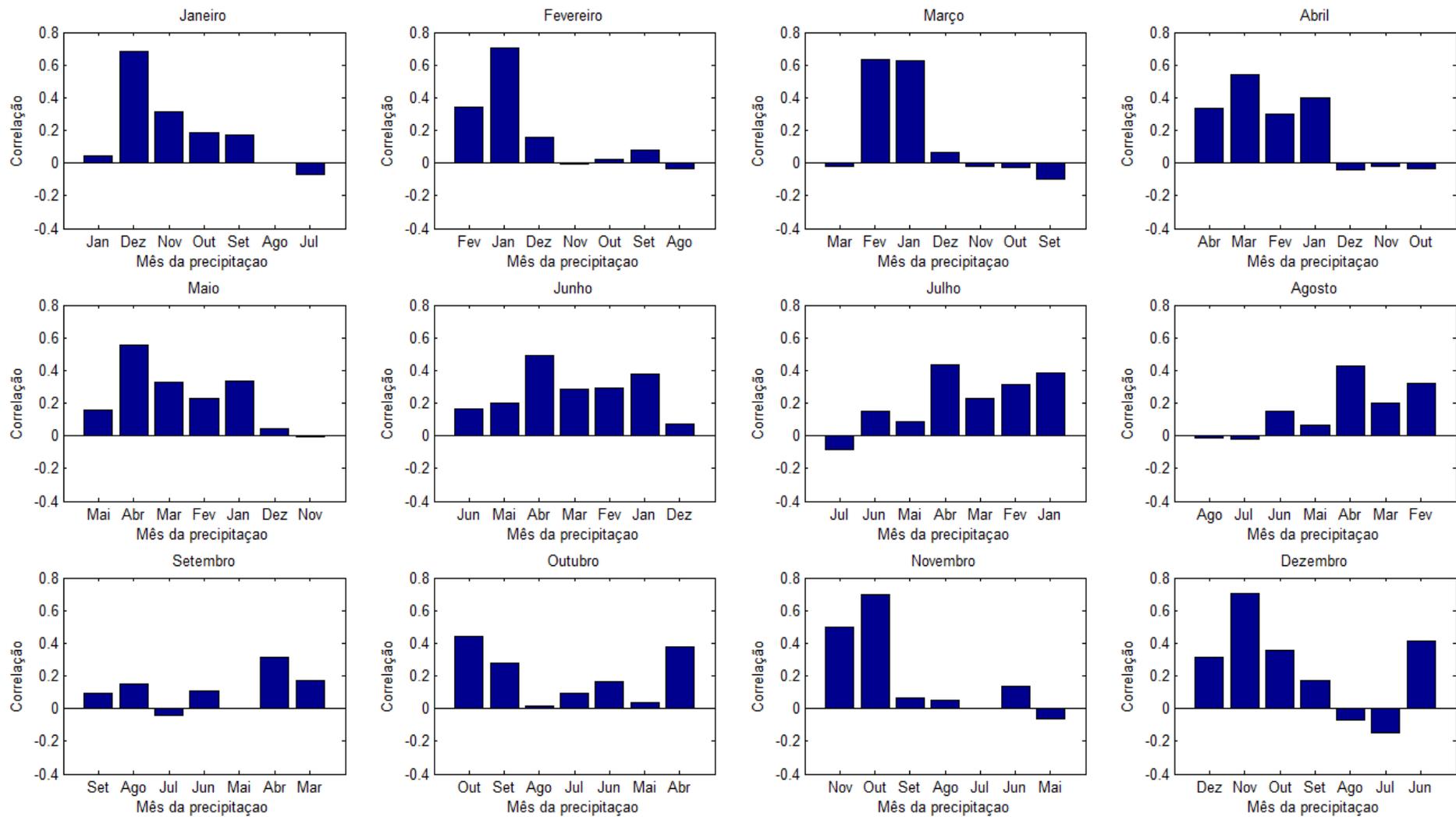


Figura 17 – Correlograma com as correlações cruzadas mensais entre as vazões naturais e as precipitações médias sem atraso (próprio mês) e com atraso de até seis meses na UHE Sobradinho.

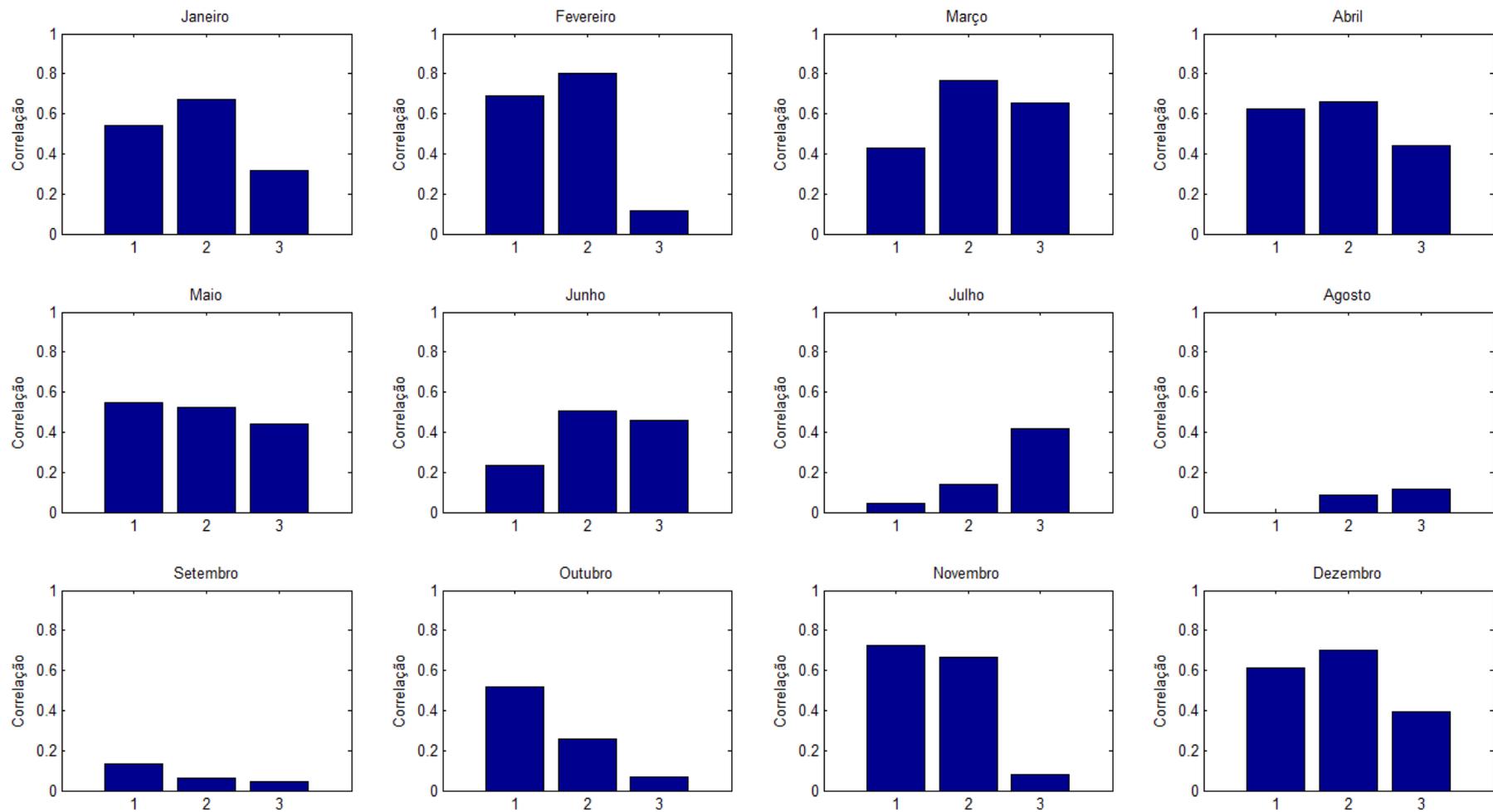


Figura 18– Correlograma com as correlações cruzadas mensais entre as vazões naturais e as precipitações médias acumuladas em dois meses sem atraso (próprio mês) e com atraso de até dois meses na UHE Sobradinho.

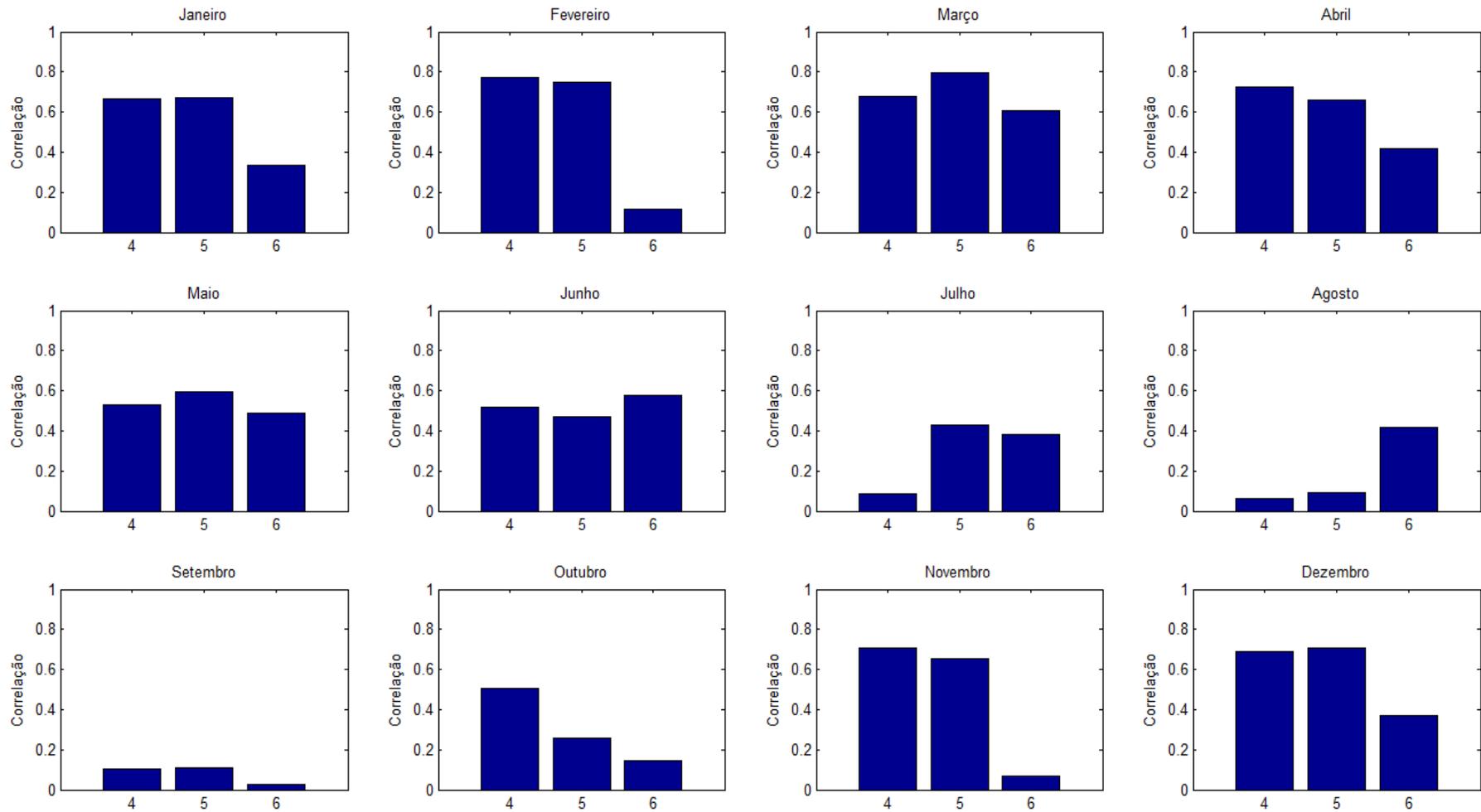


Figura 19 – Correlograma com as correlações cruzadas mensais entre as vazões naturais e as precipitações médias acumuladas em três meses sem atraso (próprio mês) e com atraso de até dois meses na UHE Sobradinho.

Por último, a Figura 20 apresenta as correlações entre a vazão e a precipitação acumulada durante quatro meses com atraso de até dois meses. Houve pouca variação nos resultados tanto para o período úmido quanto para o período seco, levando-se a conclusão que a precipitação de quatro meses atrás não exerce uma influência tão significativa na vazão. As únicas exceções de aumento na correlação foram para o mês de maio que apresentou na coluna 7 o melhor resultado (0,59) e junho, onde a coluna 9 apresentou o valor de 0,6.

Após as análises discretizadas mensalmente, chega-se à conclusão de que para o período úmido, as variáveis que têm maior influência na vazão natural da UHE Sobradinho são: a precipitação com atraso de um mês e a precipitação acumulada em dois meses com atraso de um mês, enquanto que para os meses de período seco a variável que obteve o melhor desempenho foi a precipitação acumulada em quatro meses sem atraso para abril e maio e com atraso de dois meses para junho e julho.

A Figura 21 apresenta a precipitação anual normalizada e a vazão anual normalizada ao longo da série histórica disponível (1943 a 2005). Assim como os resultados encontrados para a UHE Três Marias, porém em menor proporção, muitos picos de vazão ocorrem junto com os picos de precipitação. Apesar de o fenômeno do El Niño estar relacionada a precipitações abaixo da média para a região nordeste do Brasil (KAYANO E ANDREOLI, 2006), o ano de 1983 apresenta o maior valor de vazão e um dos maiores de precipitação de toda a série histórica. Isso ocorre porque, como demonstrado em todas as análises anteriores, a maior parte da precipitação na área de drenagem da UHE Sobradinho ocorre na região do alto São Francisco, onde incidem os maiores acumulados pluviométricos. A correlação anual entre a vazão natural na UHE Sobradinho e a precipitação na sua área de drenagem é 0,56.

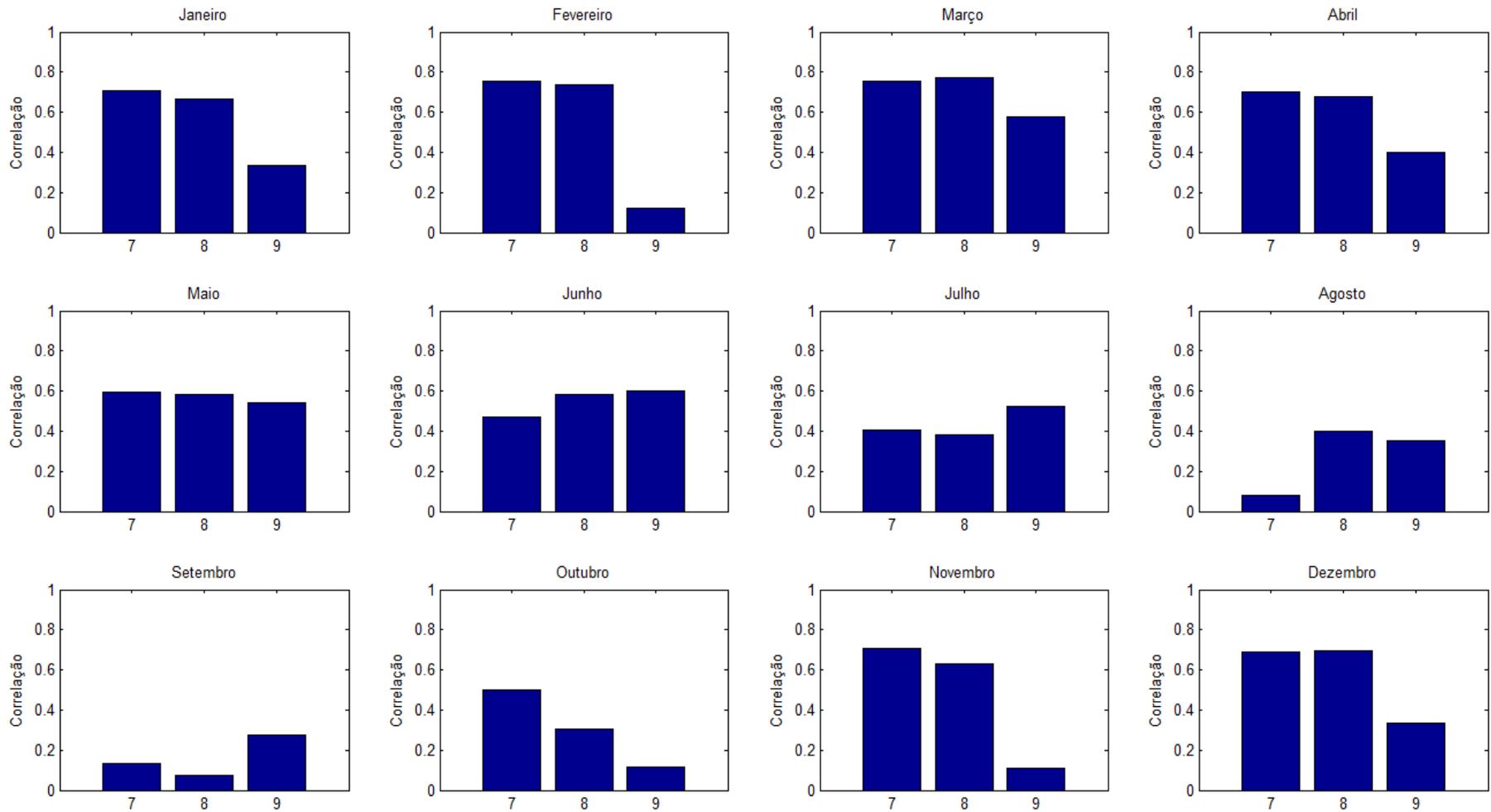


Figura 20 – Correlograma com as correlações cruzadas mensais entre as vazões naturais e as precipitações médias acumuladas em quatro meses sem atraso (próprio mês) e com atraso de até dois meses na UHE Sobradinho.

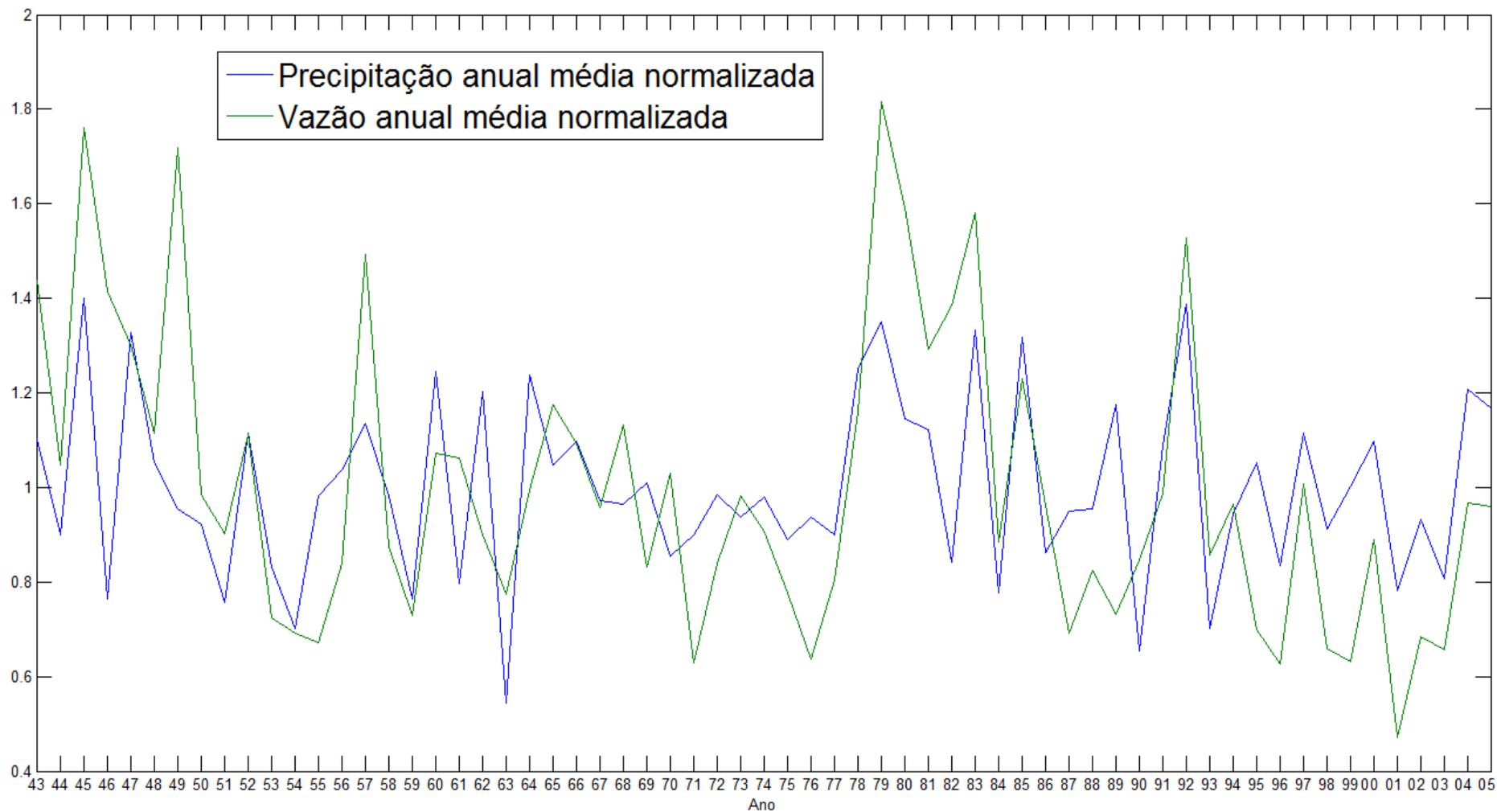


Figura 21 – Variação da precipitação anual normalizada e da vazão anual na UHE Sobradinho entre 1943 e 2005.

4.3. UHE Itá

A Figura 22 mostra as médias e desvios padrões mensais da precipitação e das afluências naturais da UHE Itá para o período de 1961 a 2004. Observa-se que, ao contrário dos resultados encontrados para as UHEs anteriores, a precipitação na área de drenagem de Itá não apresenta uma sazonalidade marcante, ou seja, não há períodos secos ou úmidos de maneira destacada, característica típica de uma região subtropical. As chuvas acontecem frequentemente e com intensidades variadas ao longo de todo o ano, sendo levemente menores entre abril e agosto. Como pode ser observado, as médias mensais apresentam grandes valores, o que denota uma região com alto índice de pluviosidade. As vazões indicam uma pequena sazonalidade, porém o período de maiores afluências naturais ocorre entre junho e novembro. Esta é uma característica comum nas UHEs da região Sul do Brasil, onde as maiores vazões ocorrem na época em que as demais regiões do país encontram-se no período seco.

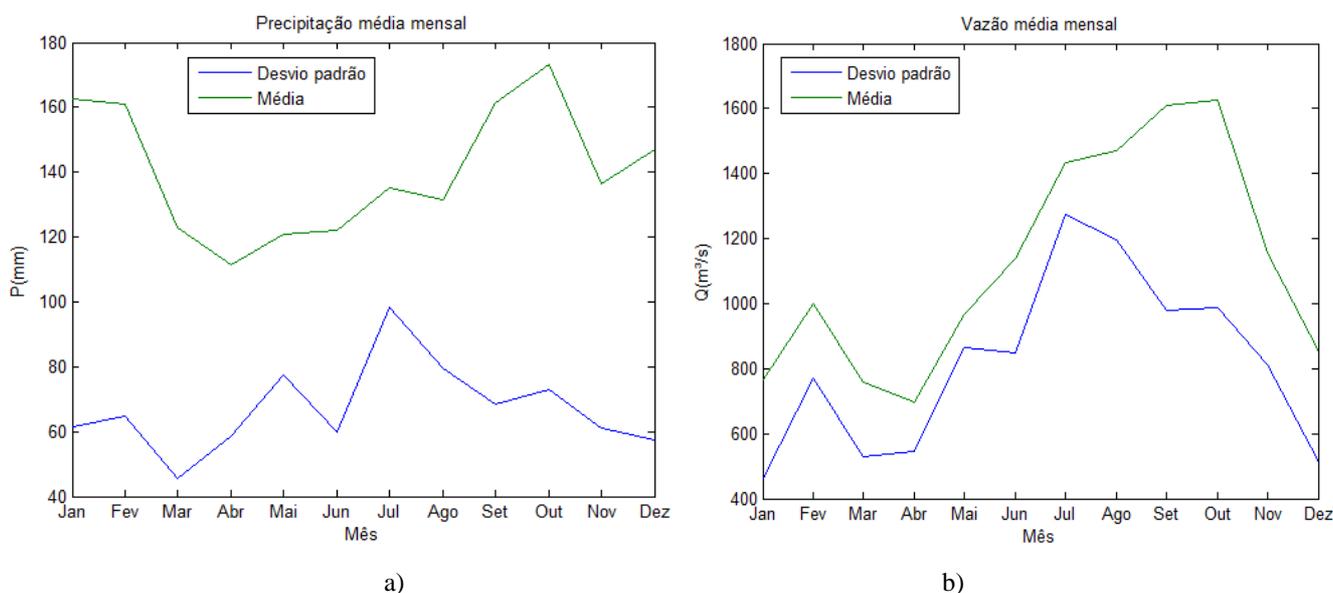


Figura 22 – Precipitação média mensal (a) e vazão natural média mensal (b) na UHE Itá para o período de 1961 a 2004.

Após a modelagem dos dados, o mapa com os campos de precipitação anual na área de drenagem da UHE Itá é apresentado na Figura 23. Observa-se que a região mais ao leste apresenta os menores totais pluviométricos, havendo um aumento gradativo ao oeste, chegando-se ao máximo de 1.858 mm. A precipitação média anual mais baixa é de 1.528 mm, um valor extremamente alto, visto que na área de drenagem da UHE Três Marias a máxima era um pouco maior que essa. Com isso, a precipitação anual média na área de drenagem é de 1.686 mm.

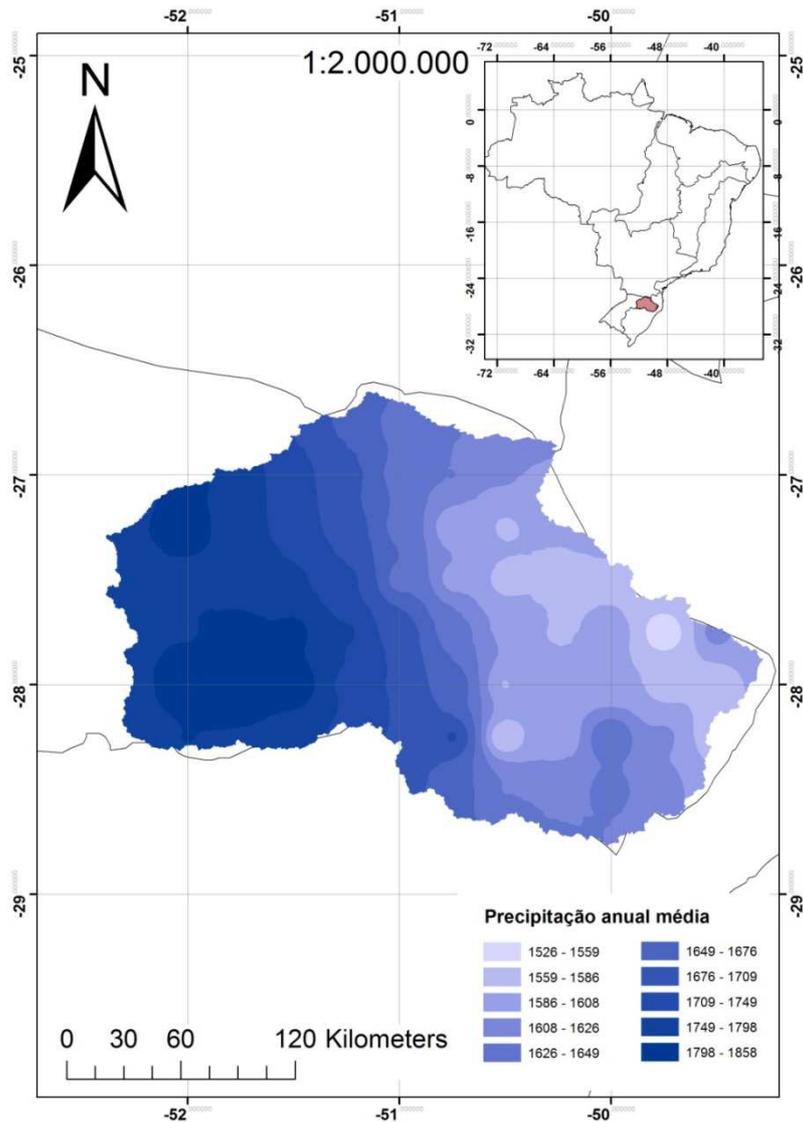


Figura 23 – Campo de precipitação anual na área de drenagem da UHE Itá

A Figura 24 apresenta as correlações cruzadas mensais entre as afluições naturais e as precipitações médias sem atraso (próprio mês) e com atraso de até seis meses da bacia de Itá. Verifica-se uma alta correlação entre as precipitações médias sem atraso e as afluições naturais para todos os meses do ano, com valores variando entre 0,60 (janeiro) e 0,94 (julho). Esses resultados evidenciam o clima subtropical da área em que se situa a área de drenagem de Itá, ou seja, precipitações regulares que ocorrem no decorrer de todo o ano, influenciando constantemente as vazões naturais. Uma outra explicação para essa alta correlação encontrada pode estar ligada à saturação de água no solo dessa região. Pelo fato de haver chuva de forma regular durante o ano todo, o solo ali encontrado satura-se de uma forma mais rápida o que contribui para o escoamento da água aos rios da área de drenagem da UHE Itá.

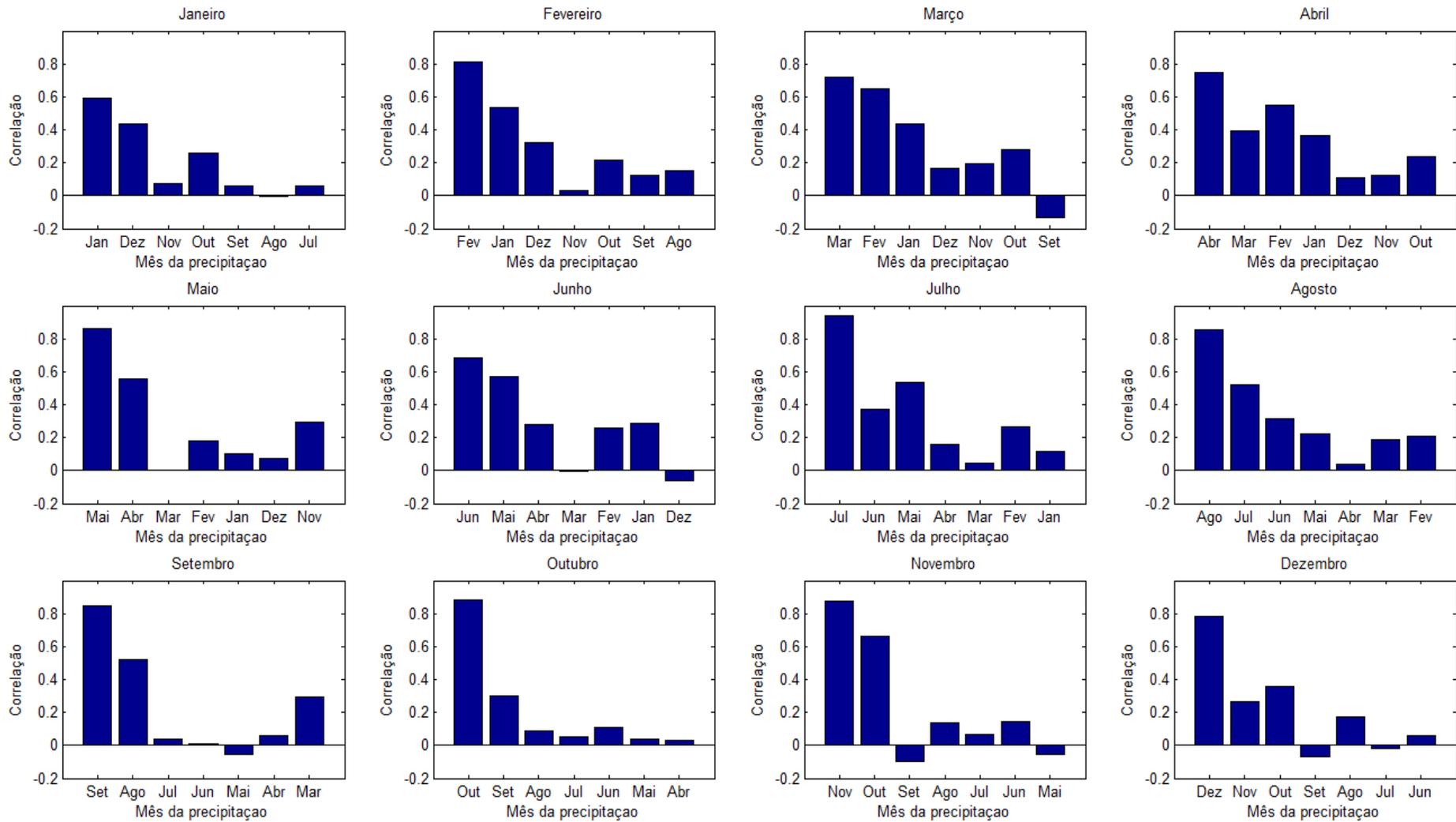


Figura 24 – Correlograma com as correlações cruzadas mensais entre as vazões naturais e as precipitações médias sem atraso (próprio mês) e com atraso de até seis meses na UHE Itá.

A seguir, a Figura 25 mostra o resultado da correlação entre vazão natural mensal e a precipitação mensal acumulada em dois meses sem atraso e com atraso de até dois meses. Como pode ser observado, ao se acumular a chuva em 2 meses, a correlação encontrada foi incrementada na maioria dos meses, tendo os maiores valores sempre a coluna 1, ou seja, sem atraso. Apenas outubro apresentou uma pequena queda, porém mantendo uma alta correlação (0,85). Para os meses de janeiro, março, abril e junho o aumento foi significativo. Isso evidencia que a precipitação do mês anterior ainda tem uma expressiva ligação com a vazão natural.

A Figura 26 apresenta o resultado da correlação mensal entre a vazão natural e a precipitação agora acumulada em três meses. É possível observar que, em todos os meses, a correlação sofreu uma queda ou manteve-se estável para a coluna 4, sem atraso. Com isso, verifica-se que a chuva com atraso de dois meses na área de drenagem da UHE Itá não exerce uma influência na sua vazão natural. Provavelmente, grande parte dela já escoou para fora da área de drenagem de Itá, devido aos fatos apresentados anteriormente.

Por último, a Figura 27 traz a análise da correlação da vazão natural com a precipitação acumulada em quatro meses. Como esperado, dado que foi demonstrado que a chuva com atraso de dois meses não tinha influência na vazão, a correlação aqui proposta apresentou-se pior para todos os meses. Todos os resultados apresentaram uma queda considerável em relação à precipitação acumulada em dois meses, demonstrando, assim, que a precipitação com atraso de três meses não tem influência direta na vazão natural. Desse modo, conclui-se que a variável de precipitação acumulada em dois meses sem atraso possui uma maior influência na vazão natural da UHE Itá.

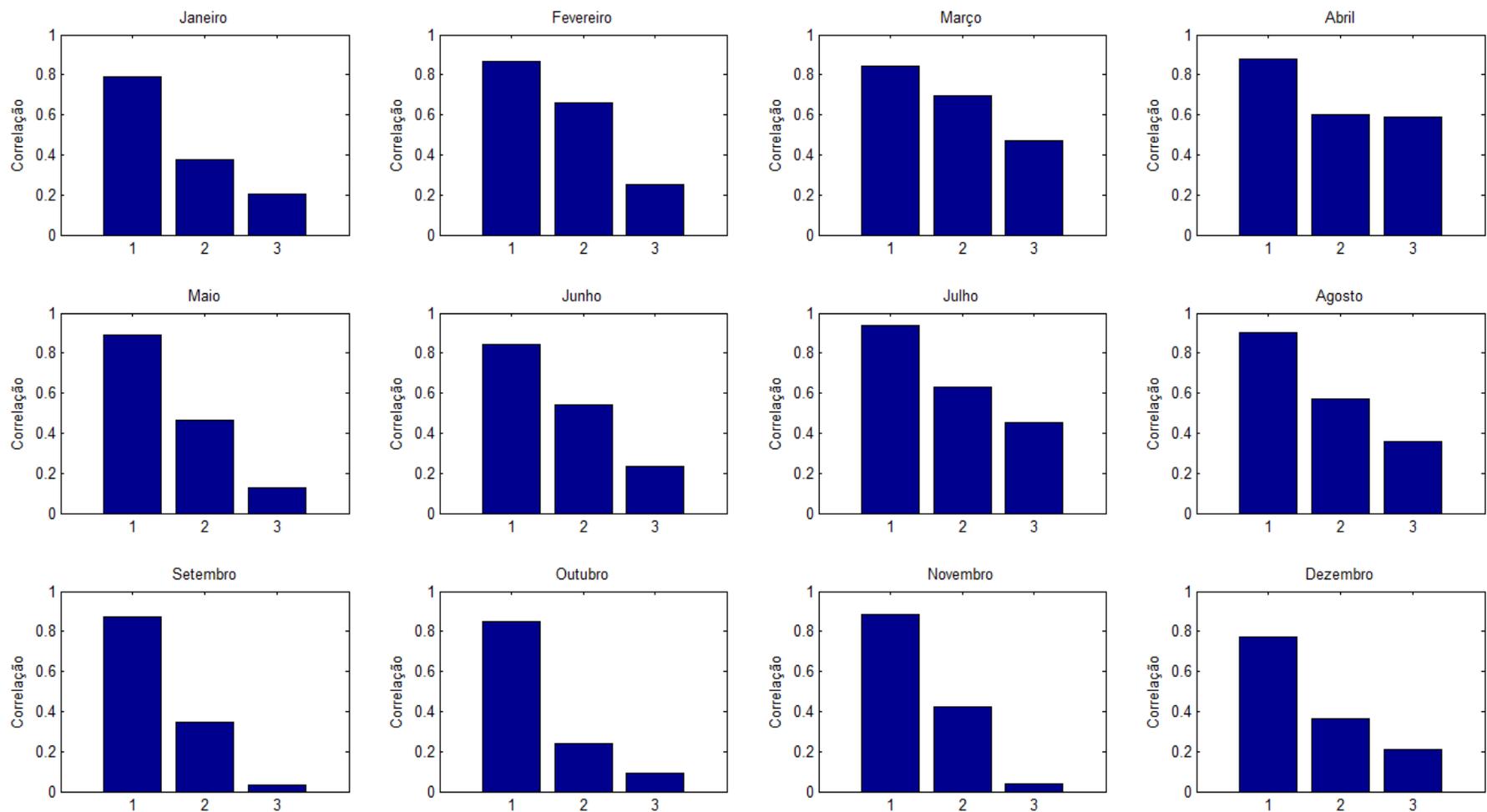


Figura 25 – Correlograma com as correlações cruzadas mensais entre as vazões naturais e as precipitações médias acumuladas em dois meses sem atraso (próprio mês) e com atraso de até dois meses na UHE Itá.

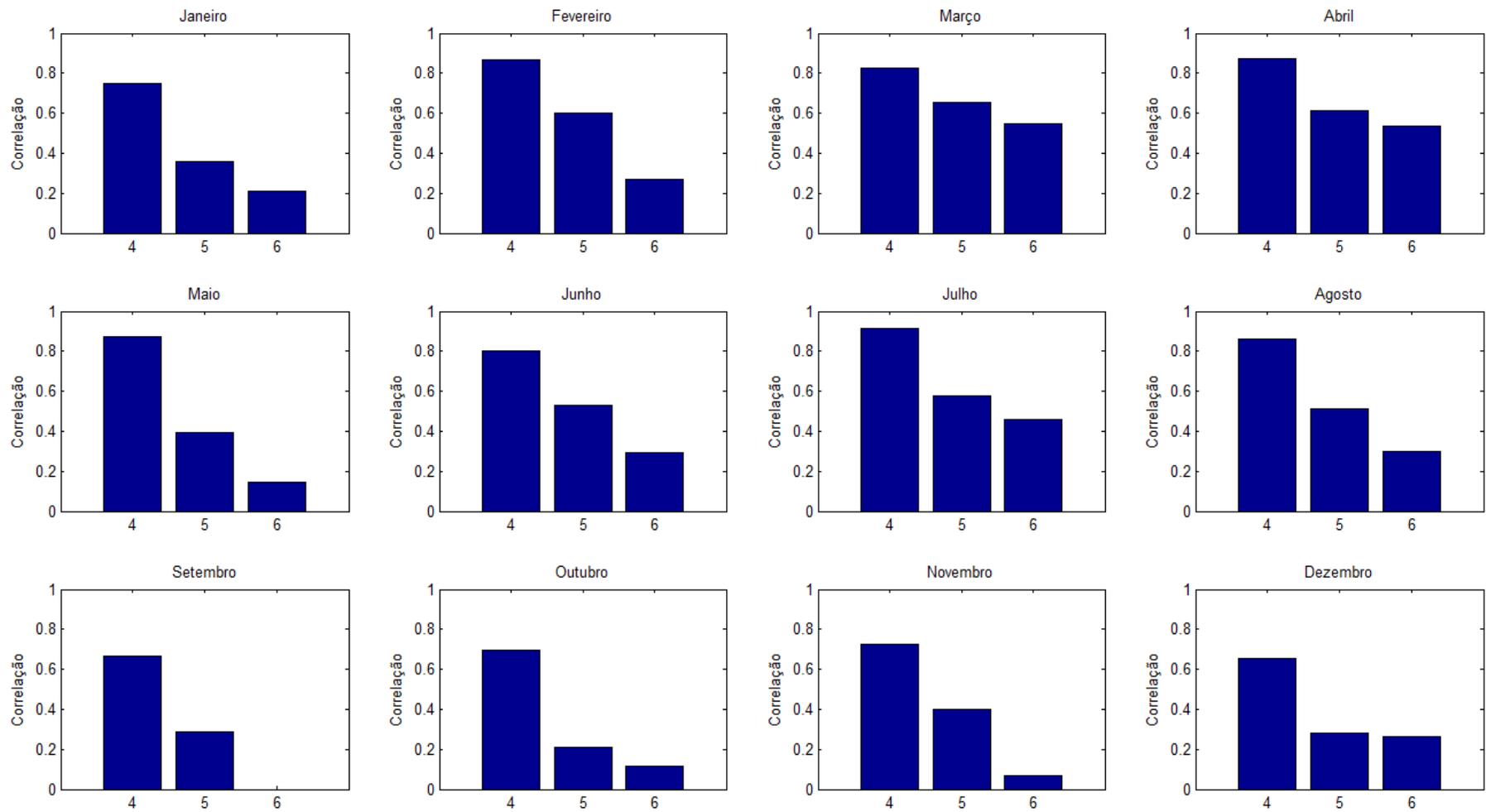


Figura 26 – Correlograma com as correlações cruzadas mensais entre as vazões naturais e as precipitações médias acumuladas em três meses sem atraso (próprio mês) e com atraso de até dois meses na UHE Itá.

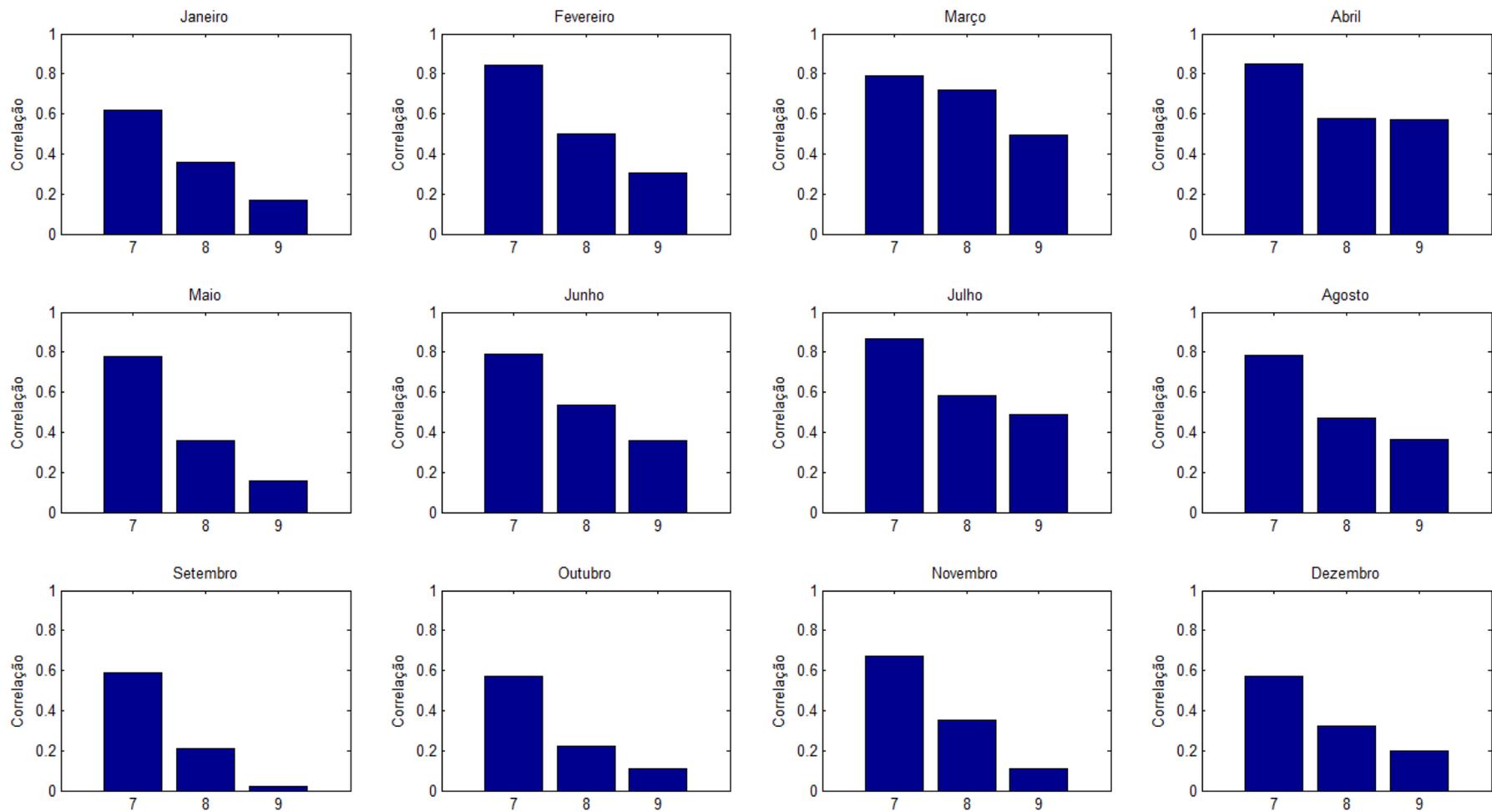


Figura 27 – Correlograma com as correlações cruzadas mensais entre as vazões naturais e as precipitações médias acumuladas em quatro meses sem atraso (próprio mês) e com atraso de até dois meses na UHE Itá.

A variabilidade da precipitação anual normalizada na área de drenagem da UHE Itá e sua vazão anual normalizada entre 1961 e 2004 é mostrada na Figura 28. Nota-se que as precipitações máximas e mínimas de toda a série histórica coincidem significativamente com as vazões máximas e mínimas, acompanhando todos os ciclos interanuais destas variáveis. Mais uma vez é ratificada a grande influência da precipitação na vazão natural afluente da UHE Itá. Observa-se também a influência direta do fenômeno El Niño nos extremos de precipitação e de vazão nos anos de 1983 e de 1998. A correlação anual entre a vazão natural na UHE Itá e a precipitação anual na sua área de drenagem é 0,97, isto é, bastante expressiva.

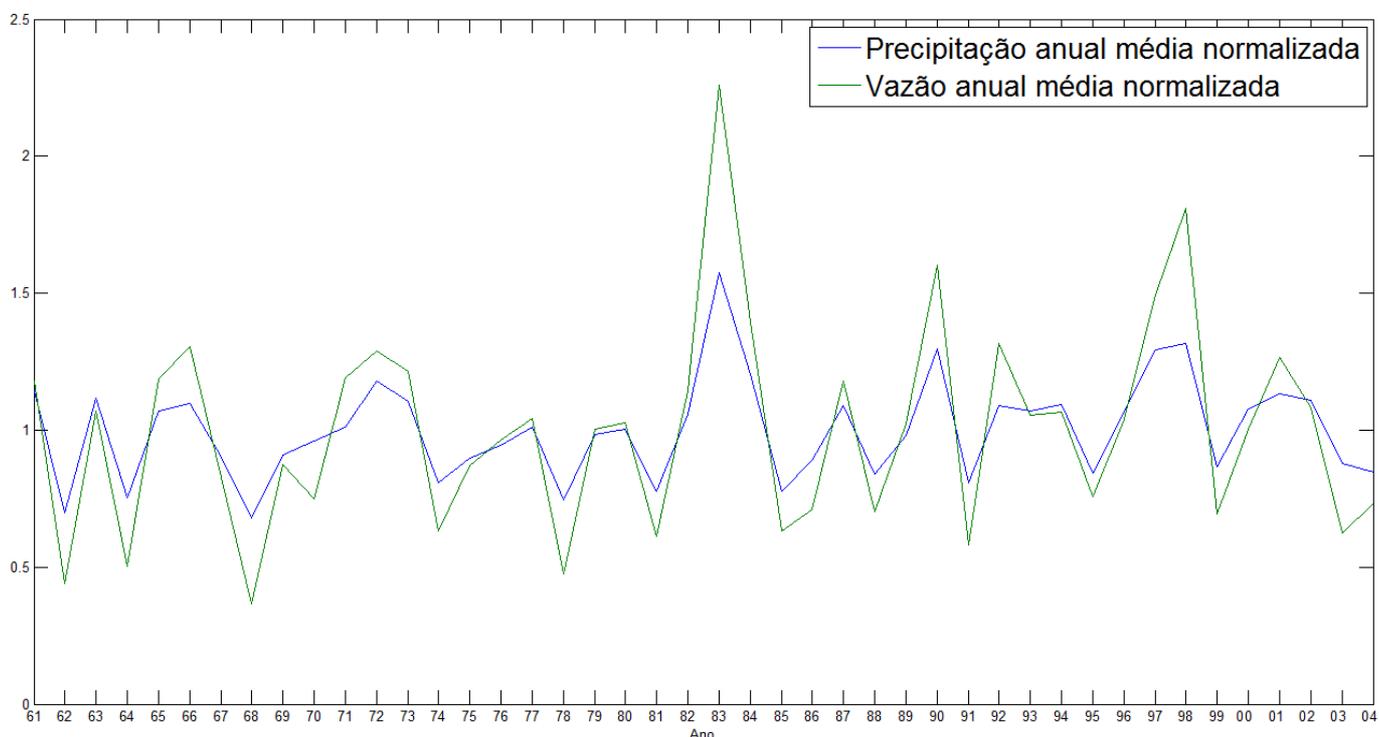


Figura 28 – Variação da precipitação anual normalizada e da vazão anual normalizada na UHE Itá entre 1961 e 2004.

4.4. UHE Furnas

Dando prosseguimento à ordem de análises proposta anteriormente, a Figura 29 apresenta as médias e os desvios padrões mensais da precipitação mensal na área de drenagem da UHE Furnas e sua vazão natural afluente mensal para o período entre 1942 e 2006. Percebe-se claramente uma alta sazonalidade em ambos os gráficos, tendo um período úmido composto pelos meses de outubro a março e um período seco de abril a setembro, característica do clima tropical.

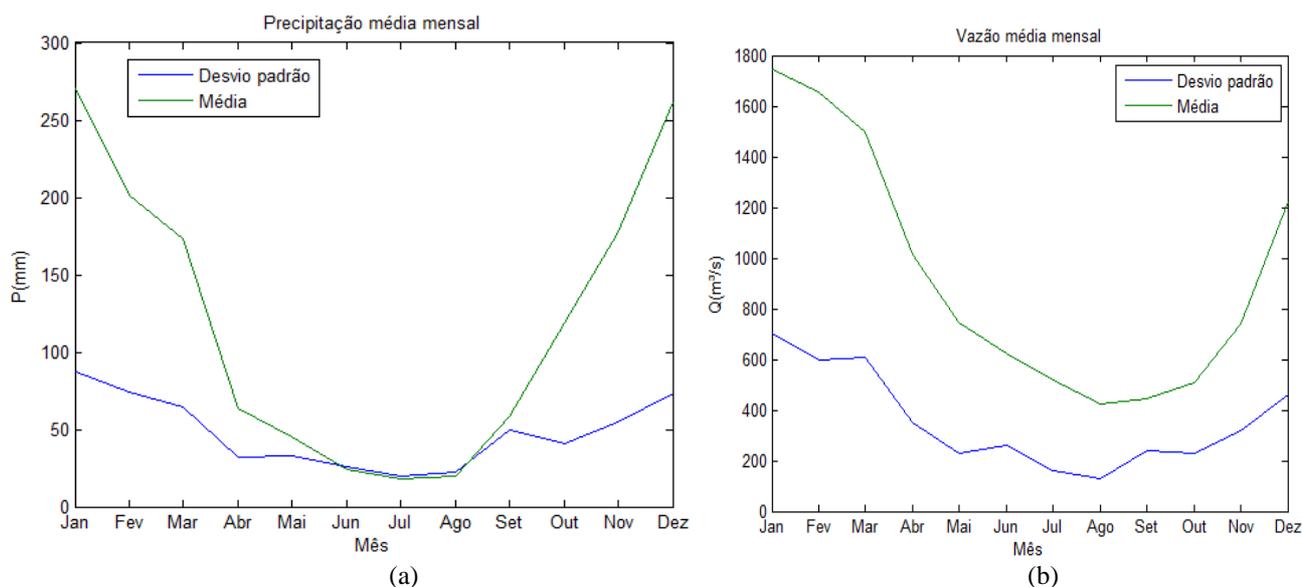


Figura 29 – Precipitação média mensal (a) e vazão natural média mensal (b) na UHE Furnas para o período de 1942 a 2006.

O campo de precipitação anual na área de drenagem da UHE Furnas é apresentado na Figura 30. Observa-se que não há grandes discrepâncias na precipitação ao longo da região, sendo o máximo de 1.553 mm na área mais ao Sul. A precipitação anual média na bacia é de 1.433mm.

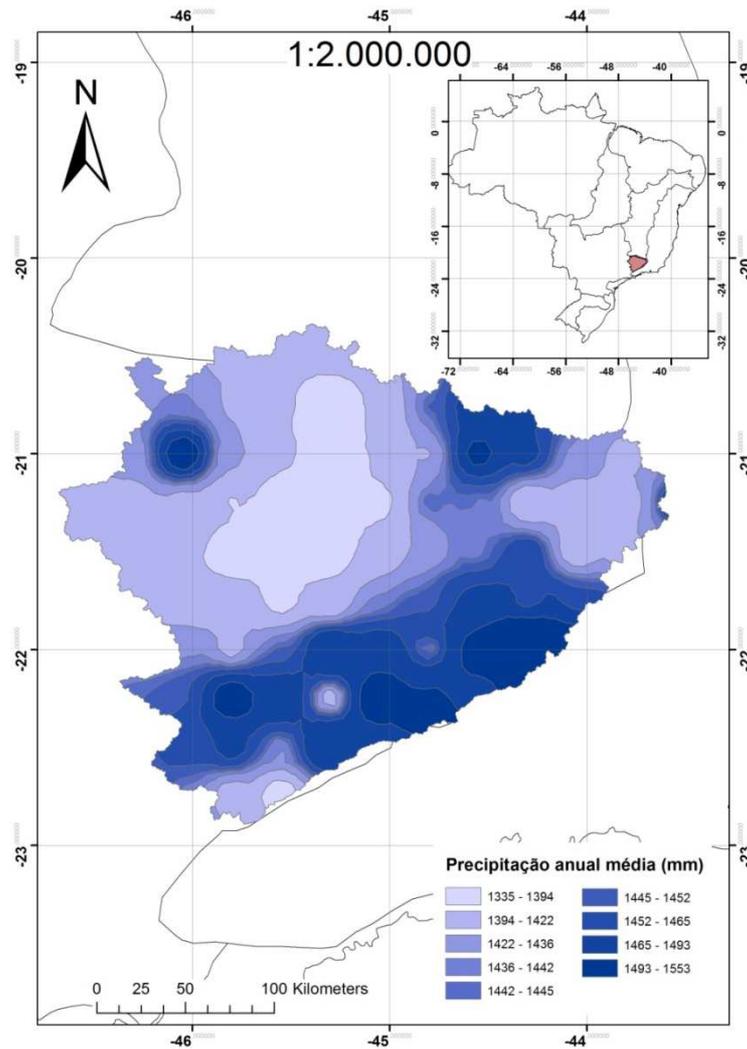


Figura 30 – Campo de precipitação anual na área de drenagem da UHE Furnas

Com os dados de vazão natural afluente e precipitação, é calculada a correlação mensal entre as duas variáveis sem atraso e com atraso de até seis meses, demonstrado na Figura 31. Observa-se que no período úmido, os meses de janeiro, março, novembro e dezembro apresentam uma maior correlação (0,7, 0,72, 0,61 e 0,67, respectivamente) com a precipitação sem atraso, enquanto que fevereiro e outubro possuem uma influência ligeiramente superior da precipitação com atraso de um mês (0,56 e 0,62, respectivamente). Para o período seco pode-se afirmar que as vazões estão correlacionadas de uma forma pequena e com valores semelhantes entre a precipitação do próprio mês e dos meses anteriores até março. Apesar de indicar um valor maior em alguns meses, não é coerente concluir que a chuva de janeiro, por exemplo, está relacionada com a vazão de maio, sendo que a correlação para fevereiro, que ocorreu mais recentemente, tem um valor baixo (0,20). A única exceção é o mês de setembro que apresentou uma alta correlação com a precipitação sem atraso (0,85).

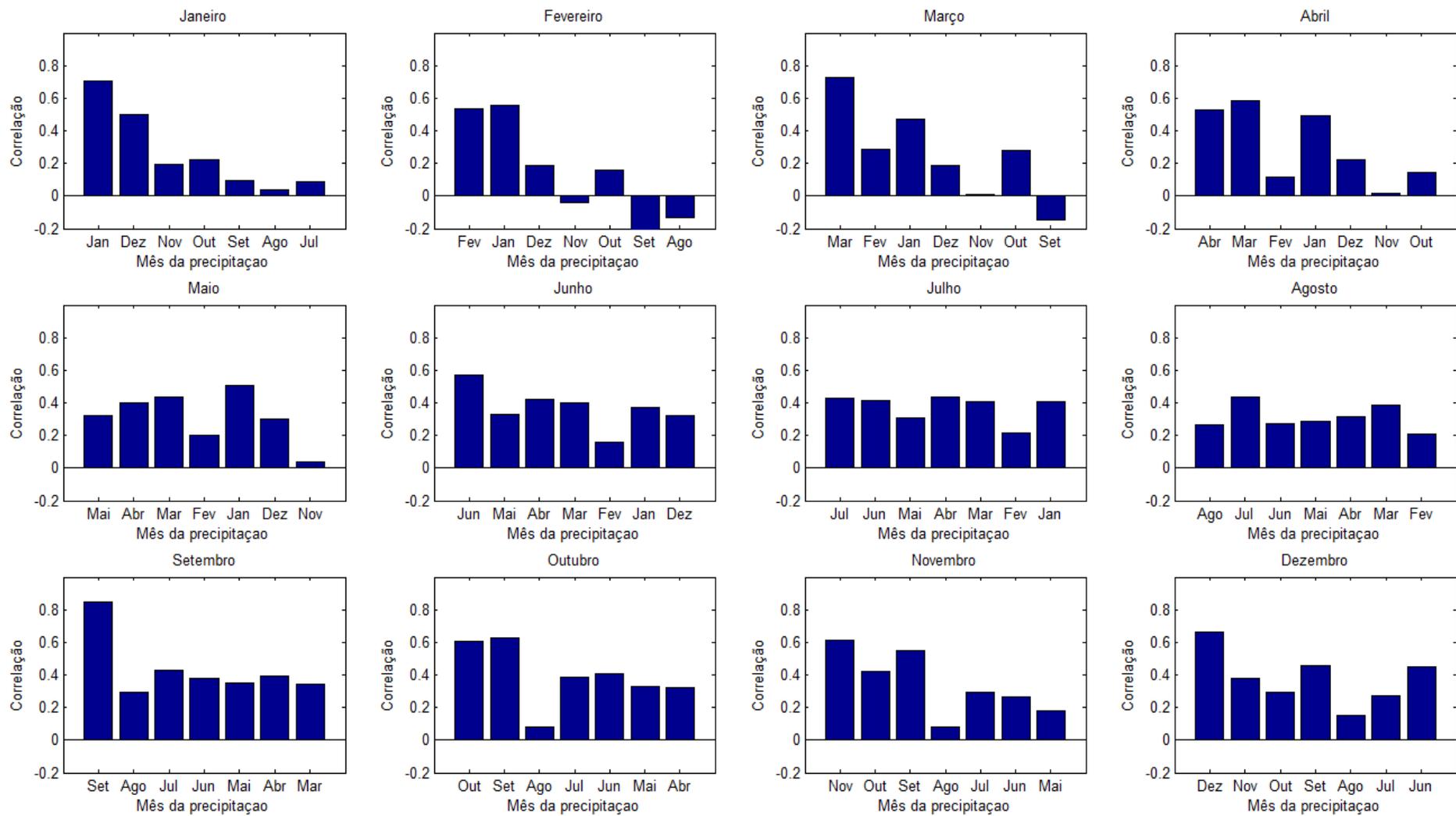


Figura 31 – Correlograma com as correlações cruzadas mensais entre as vazões naturais e as precipitações médias sem atraso (próprio mês) e com atraso de até seis meses na UHE Furnas.

A seguir, a Figura 32 mostra a correlação entre a vazão natural afluyente e a precipitação acumulada em dois meses sem atraso e com atraso de até dois meses. Para todos os meses do período úmido, a coluna 1 obteve os melhores resultados, com valores de correlação variando entre 0,71 e 0,86. Para o período seco, os meses de abril, junho, julho e setembro também apresentaram os melhores resultados na coluna 1 com 0,78, 0,58, 0,58 e 0,82 respectivamente. Para maio a coluna 2 apresentou a maior correlação (0,59). Agosto foi o único mês a não apresentar uma melhora significativa, enquanto todos os outros meses obtiveram melhores resultados ao acumular a chuva em dois meses.

Na próxima análise a ser realizada, a Figura 33 mostra a correlação entre a vazão natural afluyente e precipitação acumulada em três meses sem atraso e com atraso de até dois meses. Para o período úmido, todos os meses, com exceção de outubro, apresentaram um resultado superior na coluna 4 em relação à análise anterior, com resultados variando entre 0,79 e 0,88. No período seco, abril apresentou uma significativa queda na correlação e setembro um resultado ligeiramente inferior, enquanto que maio, junho e julho obtiveram resultados superiores nas colunas 4, 5 e 6 respectivamente. Agosto indicou uma melhora, porém não apresentou uma correlação alta.

Por último, a Figura 34 apresenta a correlação entre a vazão natural afluyente e a precipitação acumulada em quatro meses sem atraso e com atraso de até dois meses. Para o período úmido, os resultados variaram pouco, em alguns meses se apresentando ligeiramente melhor e outros ligeiramente pior. Somente o mês de dezembro apresentou uma melhora significativa, passando a 0,85 na coluna 7. Para o período seco, maio e agosto apresentaram maior correlação na coluna 9 (0,72 e 0,59 respectivamente), junho e setembro obtiveram melhor resultado na coluna 7 (0,74 e 0,83 respectivamente) e julho na coluna 8, com 0,69.

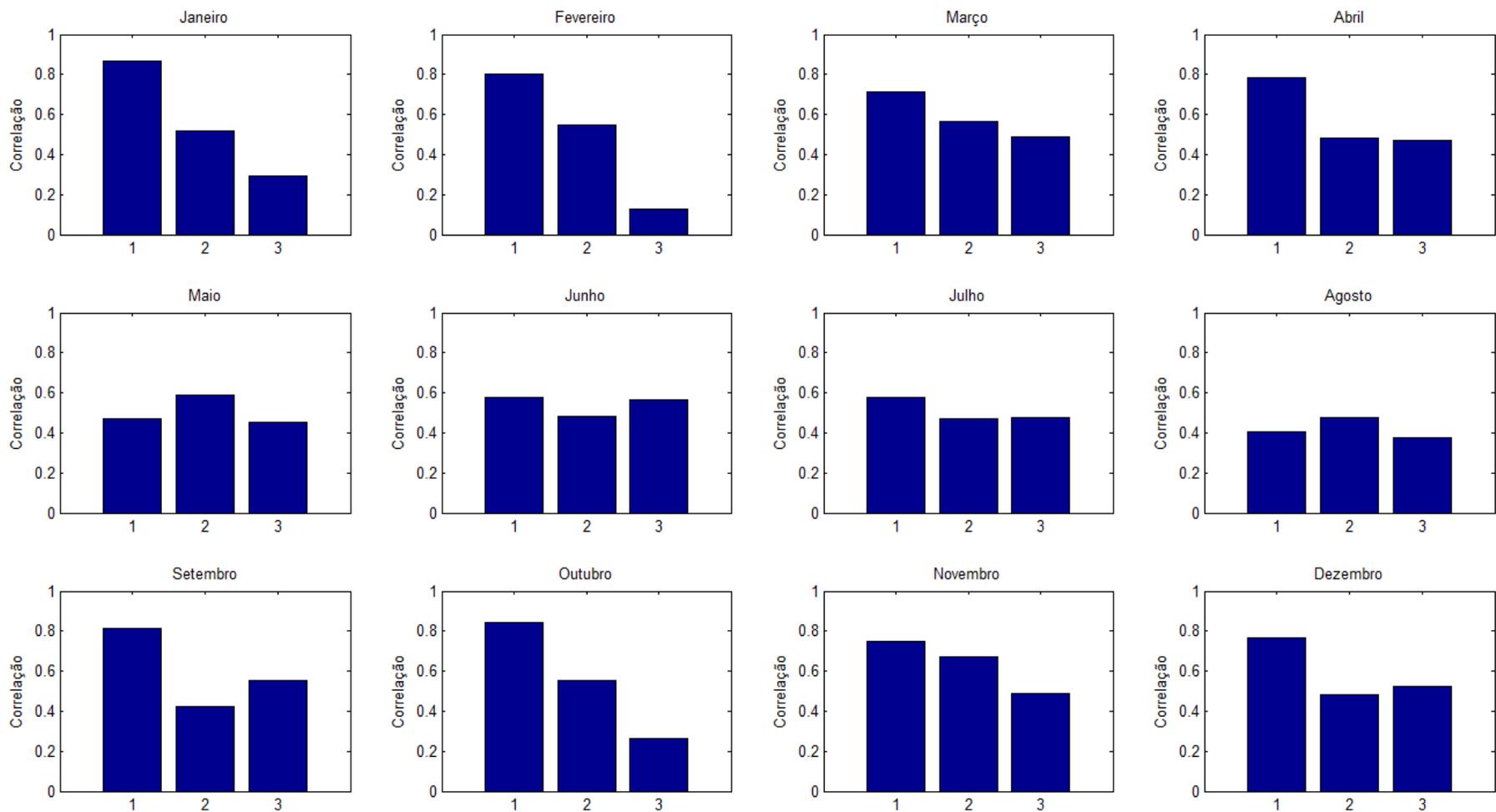


Figura 32 – Correlograma com as correlações cruzadas mensais entre as vazões naturais e as precipitações médias acumuladas em dois meses sem atraso (próprio mês) e com atraso de até dois meses na UHE Furnas.

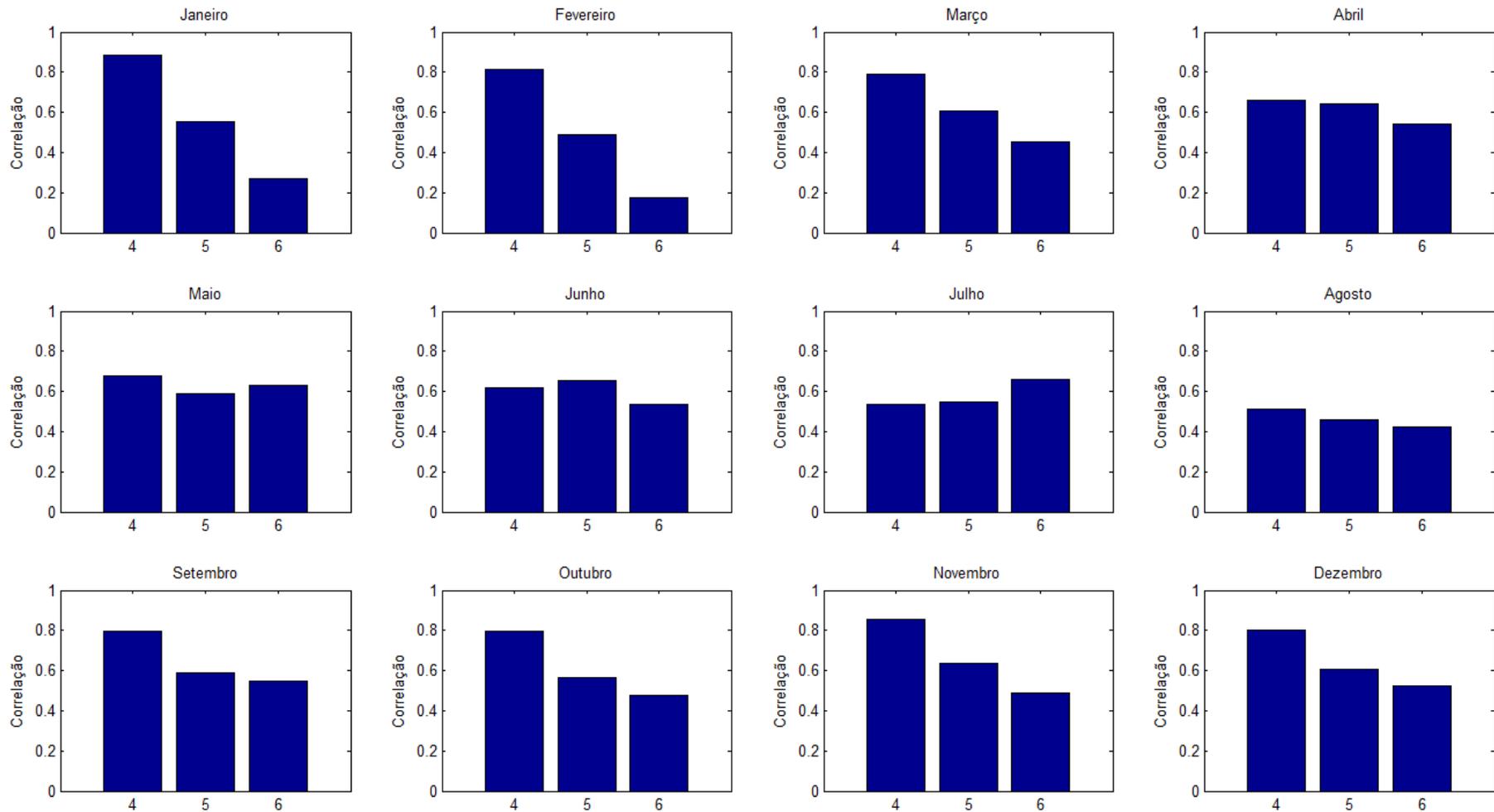


Figura 33 – Correlograma com as correlações cruzadas mensais entre as vazões naturais e as precipitações médias acumuladas em três meses sem atraso (próprio mês) e com atraso de até dois meses na UHE Furnas.

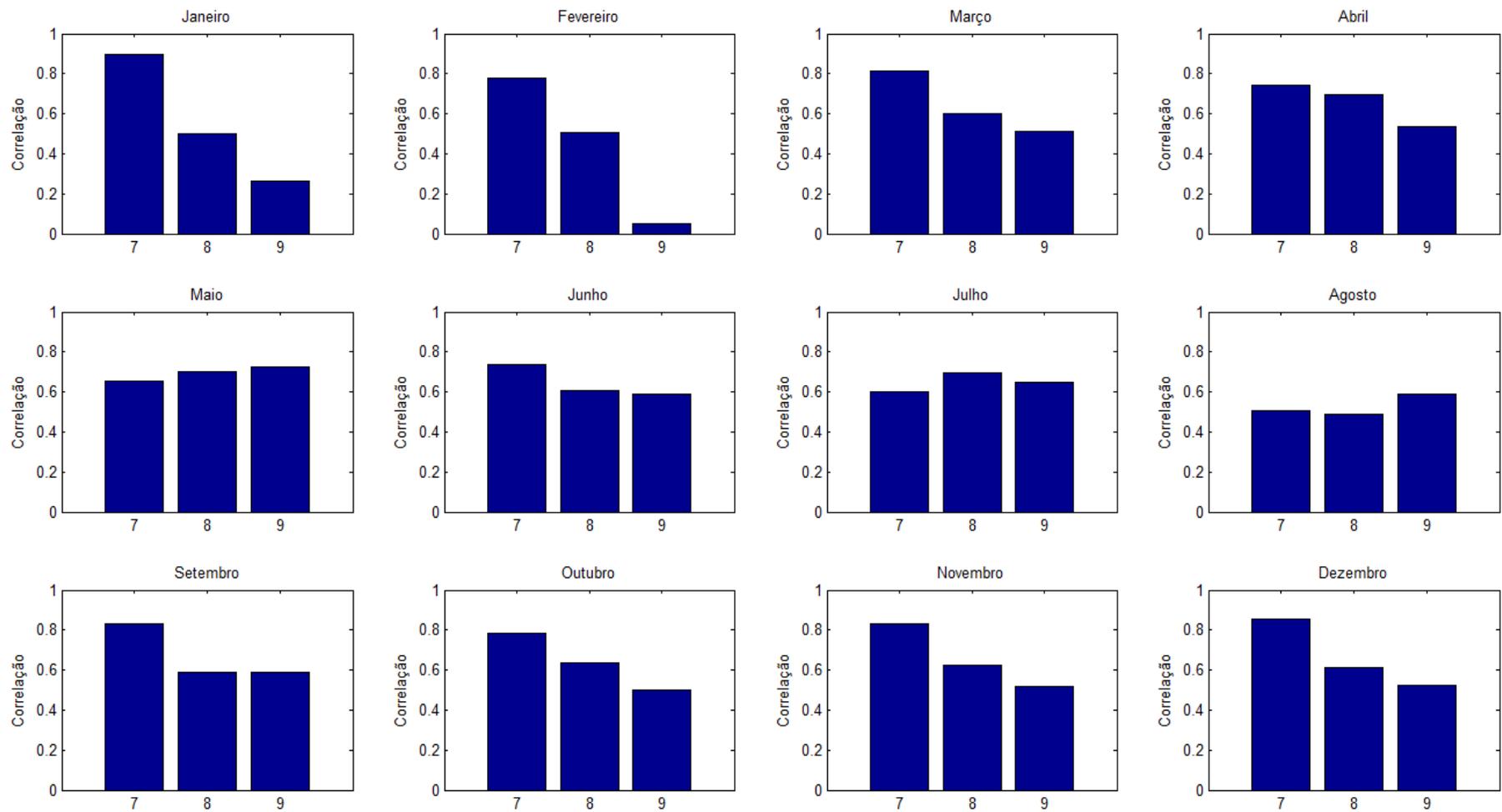


Figura 34 – Correlograma com as correlações cruzadas mensais entre as vazões naturais e as precipitações médias acumuladas em quatro meses sem atraso (próprio mês) e com atraso de até dois meses na UHE Furnas.

Segundo os resultados observados nas análises mensais, para o período úmido, a variável que apresentou a maior correlação com a vazão natural foi a precipitação acumulada em três meses sem atraso com exceção de outubro (melhor resultado precipitação acumulada em dois meses) e dezembro (precipitação acumulada em quatro meses). Para o período seco, abril obteve a melhor correlação com a precipitação acumulada em dois meses, enquanto todos os outros meses obtiveram para precipitação acumulada em quatro meses, sem atraso para junho e setembro, para julho com atraso de um mês e para maio e com atraso de dois meses para agosto.

Por fim, é calculada a correlação anual entre a vazão natural afluyente e a precipitação na UHE Furnas, chegando-se ao valor de 0,80, um valor bastante alto. A Figura 35 mostra o comportamento das duas variáveis ao longo de toda a série histórica. É possível observar que a variação de ambas ocorre de forma sincronizada, onde a maioria dos seus picos encontra-se juntos, o que mais uma vez comprova a relação entre as duas variáveis.

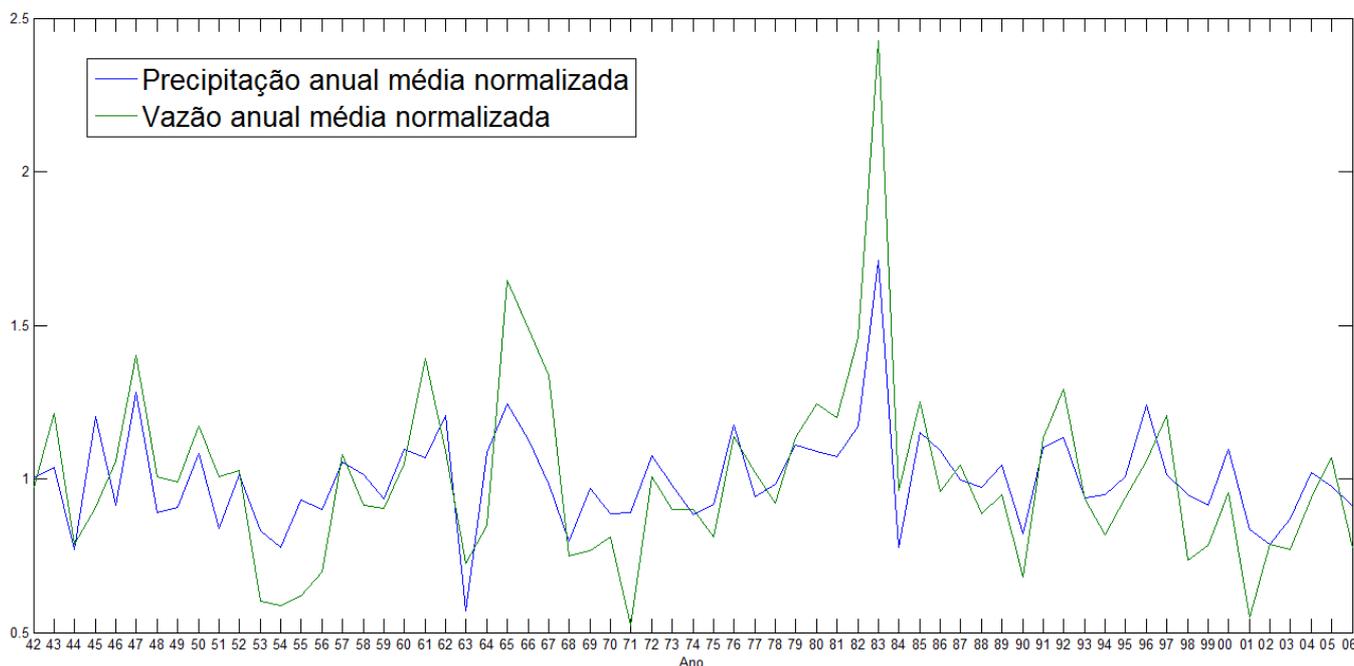


Figura 35 – Variação da precipitação anual normalizada e da vazão anual normalizada na UHE Furnas entre 1942 e 2006.

4.5. UHE Tucuruí

A UHE Tucuruí tem sua vazão natural média mensal e a precipitação média mensal na sua área de drenagem, para o período compreendido entre os anos de 1975 e 2006, apresentadas na Figura 36. Observa-se primeiramente na sua precipitação que os

meses com a menor pluviosidade, conhecido como período seco, ocorrem entre maio e setembro, sendo abril agora enquadrado dentro do período úmido que também contém os meses de outubro a março. Sua vazão natural, apesar de ter uma grande sazonalidade como as outras usinas hidrelétricas analisadas, apresenta outra configuração, sendo os seis meses de maior afluência entre dezembro e maio. Comparando-se os dois gráficos, pode-se afirmar que as vazões da UHE Tucuruí apresentam um tempo de resposta mais lento. Destacam-se também as altíssimas afluências que ocorrem no rio Tucuruí chegando a mais de 25.000 m³/s e não sendo menores que 2.000 m³/s, em média.

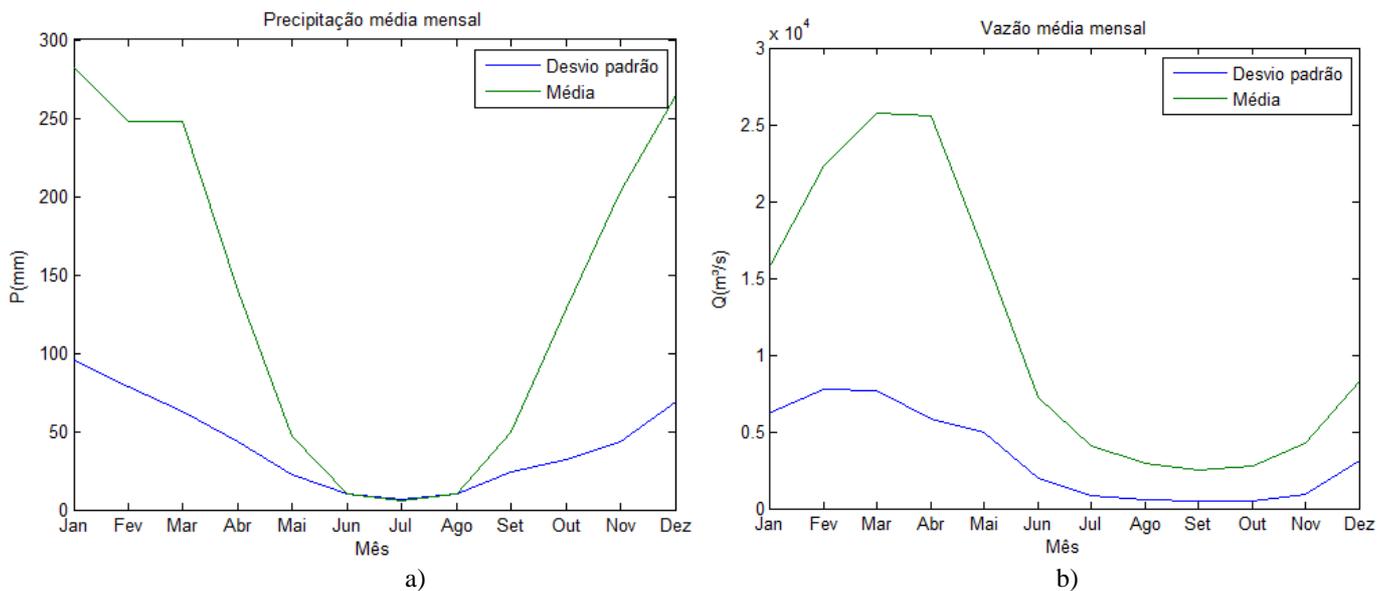


Figura 36 – Precipitação média mensal (a) e vazão natural média mensal (b) na UHE Tucuruí para o período de 1975 a 2006.

O campo de precipitação anual na área de drenagem da UHE Tucuruí é apresentado abaixo na Figura 37. Pode-se observar que, por ter uma grande extensão, em sua área de drenagem, existe uma variação muito significativa na precipitação anual. A parte mais ao norte, onde de fato se localiza a hidroelétrica, tem uma pluviosidade extremamente alta, chegando a 2.128 mm ao ano, característica típica e um clima equatorial. Ao sul, a precipitação chega a 1.231 mm, constituindo assim uma grande diferença entre os extremos. A precipitação média anual sobre toda a área de drenagem é de 1.641 mm.

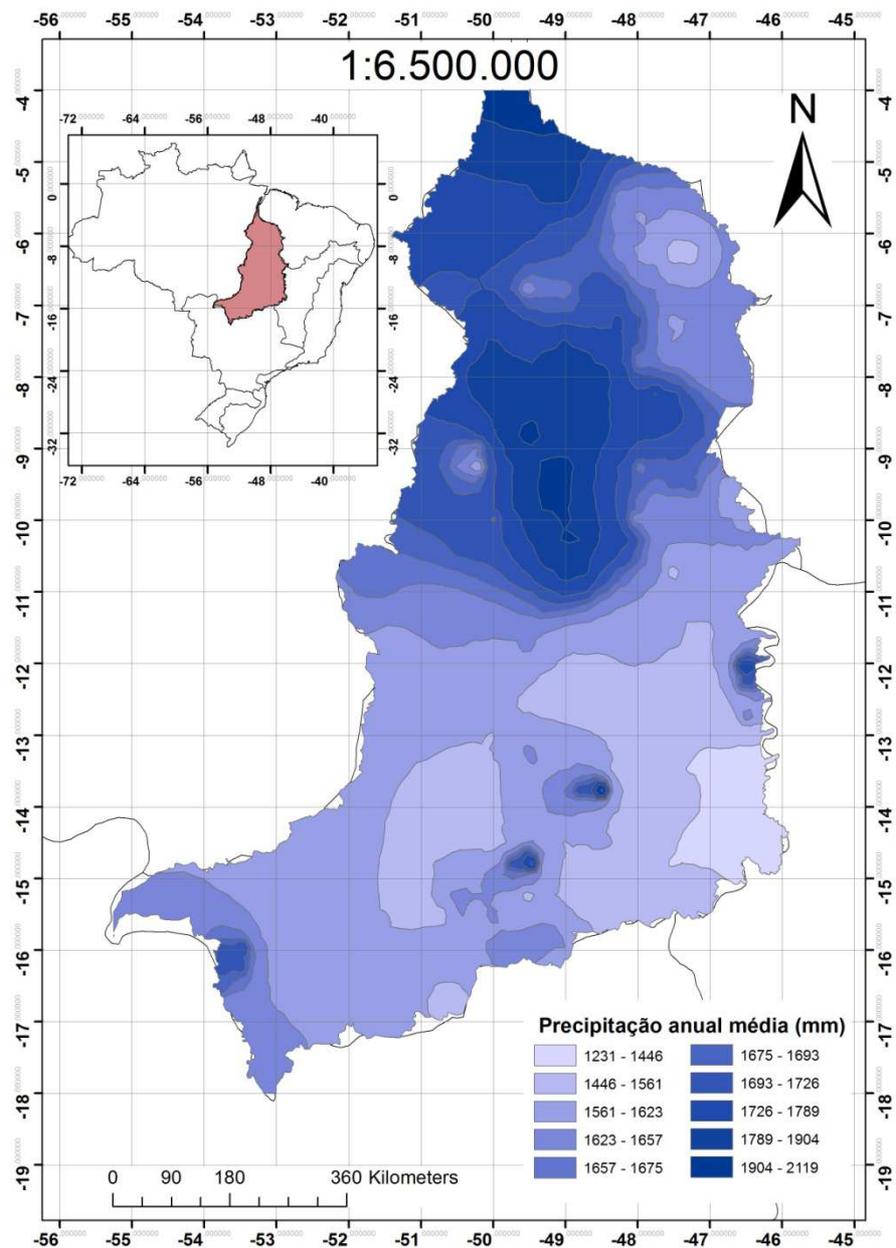


Figura 37 – Campo de precipitação anual na área de drenagem da UHE Tucuruí

A Figura 38 mostra a correlação mensal entre a vazão natural afluente na UHE Tucuruí e a precipitação na sua área de drenagem sem atraso e com atraso de até seis meses. Pode-se observar que dezembro é o único mês do período úmido com uma resposta rápida à chuva, tendo uma correlação entre a vazão e a precipitação sem atraso de 0,80. Para os meses de janeiro a março e novembro a precipitação com atraso de um mês obteve os melhores resultados variando de 0,58 a 0,77. O mês de outubro, apesar de apresentar uma alta variação da precipitação em relação ao mês anterior, isso não se reflete na sua afluência, explicando assim a baixa correlação apresentada entre a vazão e a precipitação sem atraso (0,35). O mês de abril, aqui compreendido dentro do período

úmido apresenta correlação mais alta para a precipitação com atraso de três meses (janeiro), no valor de 0,61. Para o período seco, maio ainda tem uma grande afluência que é altamente correlacionada (0,77) à precipitação com atraso de um mês. O mês de junho ainda sofre influência da precipitação de abril tendo uma correlação de 0,65. Os meses de julho e agosto apresentam maior correlação com a precipitação de junho com 0,47 e 0,42. O mês de setembro apresenta baixa correlação com a precipitação.

A Figura 39 apresenta os resultados da correlação entre a vazão e precipitação acumulada em dois meses sem atraso e com atraso de até dois meses. Observa-se que para os meses de fevereiro, outubro, novembro e dezembro a coluna 1 apresentou os melhores resultados, variando entre 0,50 e 0,84. Já para janeiro, março e abril houve um incremento da correlação para a coluna 2 variando, com valores de 0,76, 0,82 e 0,69. Para o período seco, o mês de maio teve um desempenho inferior ao acumular-se a precipitação em dois meses, enquanto junho manteve exatamente o mesmo resultado para a coluna 2. Já o mês de julho obteve um incremento na correlação para a coluna 1 (0,52) e agosto uma leve melhora para a coluna 2 (0,48). O mês de setembro obteve uma pequena melhora, porém, continuando a apresentar baixa correlação (0,40).

Em seguida, a Figura 40 apresenta a correlação mensal entre vazão e a precipitação acumulada em três meses sem atraso e com atraso de dois meses. Para fevereiro, outubro, novembro e dezembro as correlações mantiveram praticamente estáveis, com pequenas variações positivas ou negativas. Assim, pode-se afirmar que a precipitação de dois meses atrás não possui uma influência considerável para as vazões nesses meses. Já para os outros meses do período úmido, janeiro, março e abril, houve um aumento da correlação para a coluna 5 com 0,80, 0,88 e 0,78. No período seco o mês de maio apresentou uma melhora na correlação, porém ainda é menor do que a correlação entre a vazão e a precipitação do mês de abril. Já o mês de junho apresentou a melhor correlação para a coluna 4 com 0,69. Os meses de julho e agosto obtiveram piores resultados comparados aos anteriores. Por fim, setembro apresentou um ligeiro aumento na correlação para a coluna 5, com um valor de 0,51.

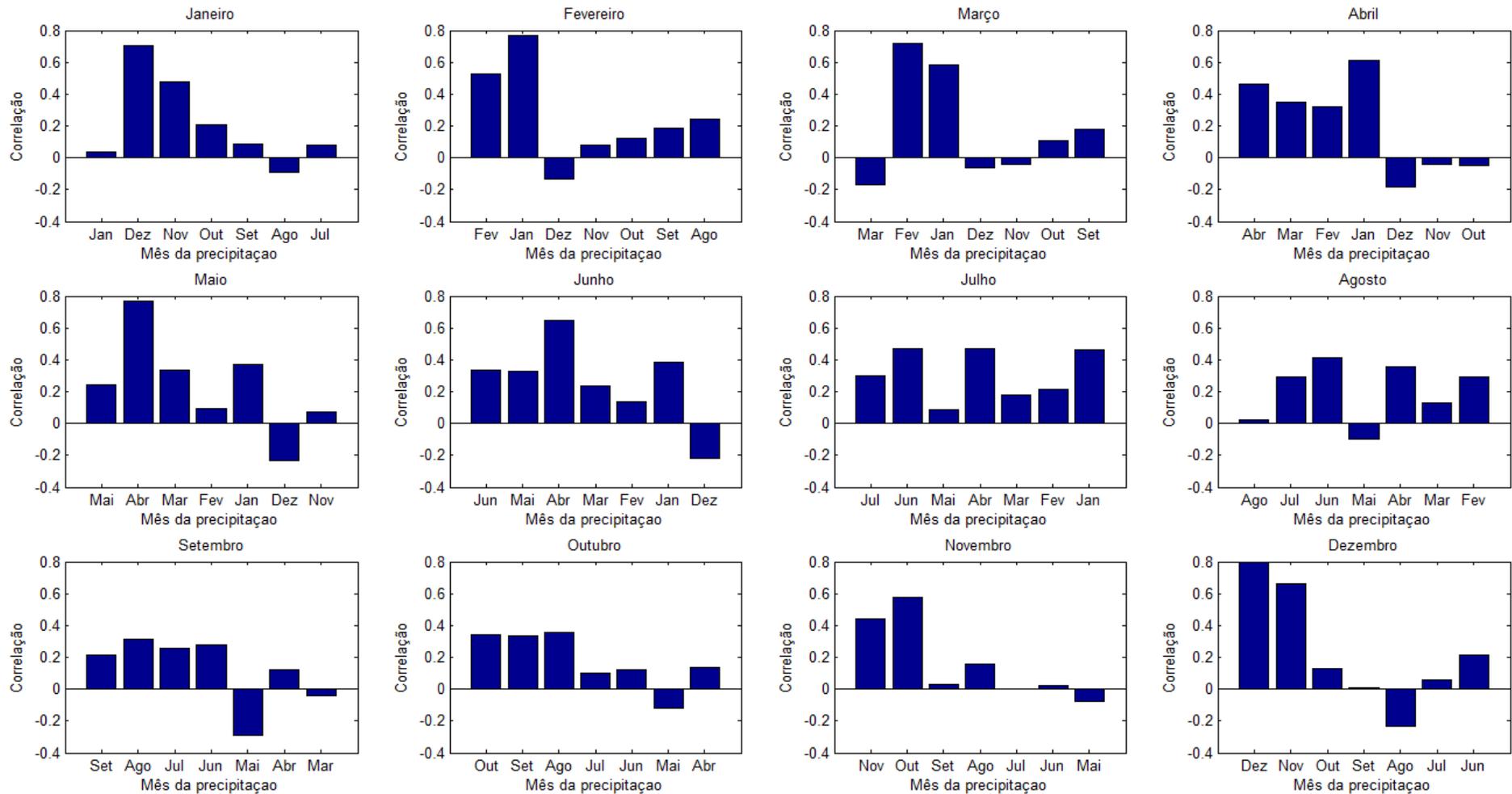


Figura 38 – Correlograma com as correlações cruzadas mensais entre as vazões naturais e as precipitações médias sem atraso (próprio mês) e com atraso de até seis meses na UHE Tucuruí.

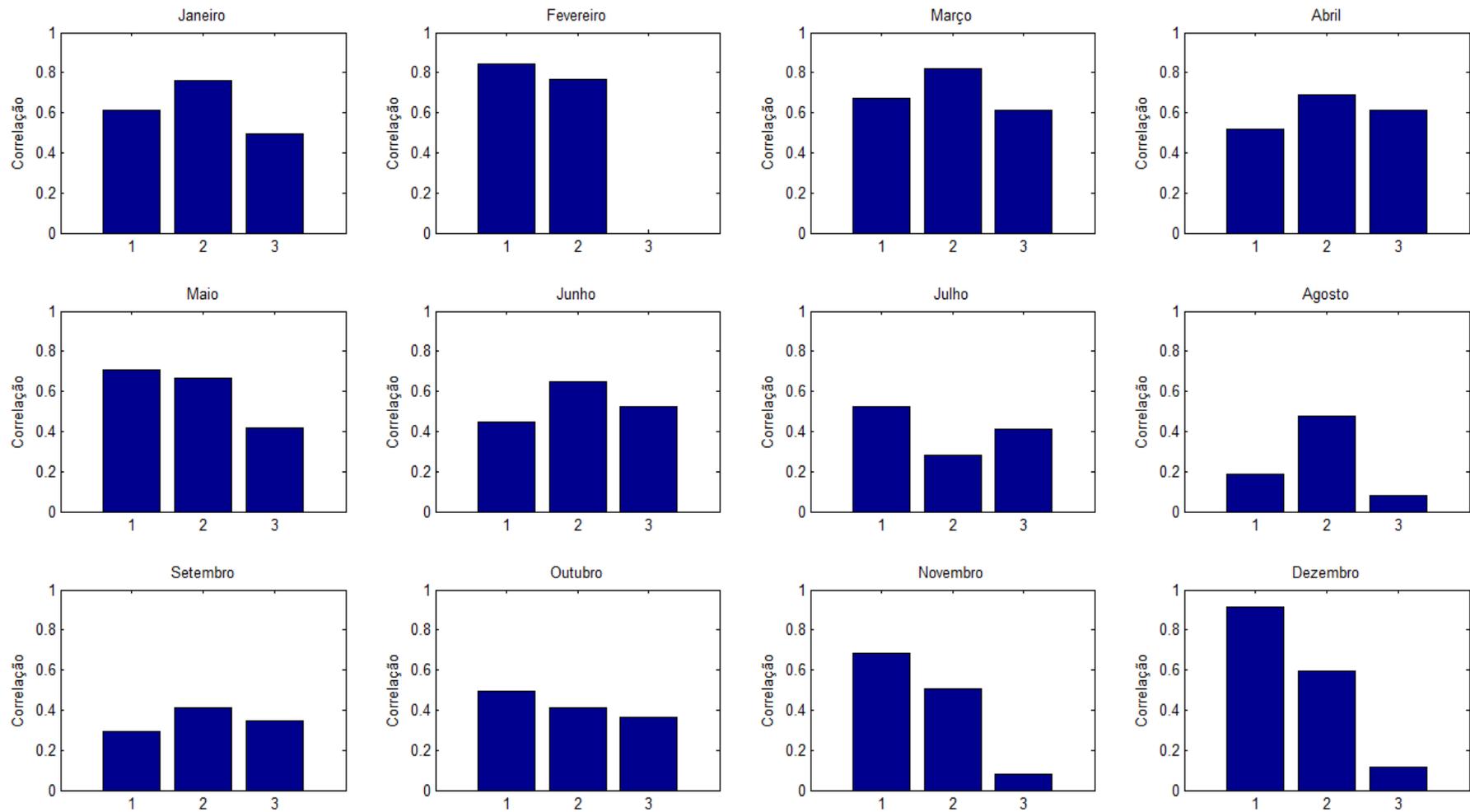


Figura 39 – Correlograma com as correlações cruzadas mensais entre as vazões naturais e as precipitações médias acumuladas em dois meses sem atraso (próprio mês) e com atraso de até dois meses na UHE Tucuruí.

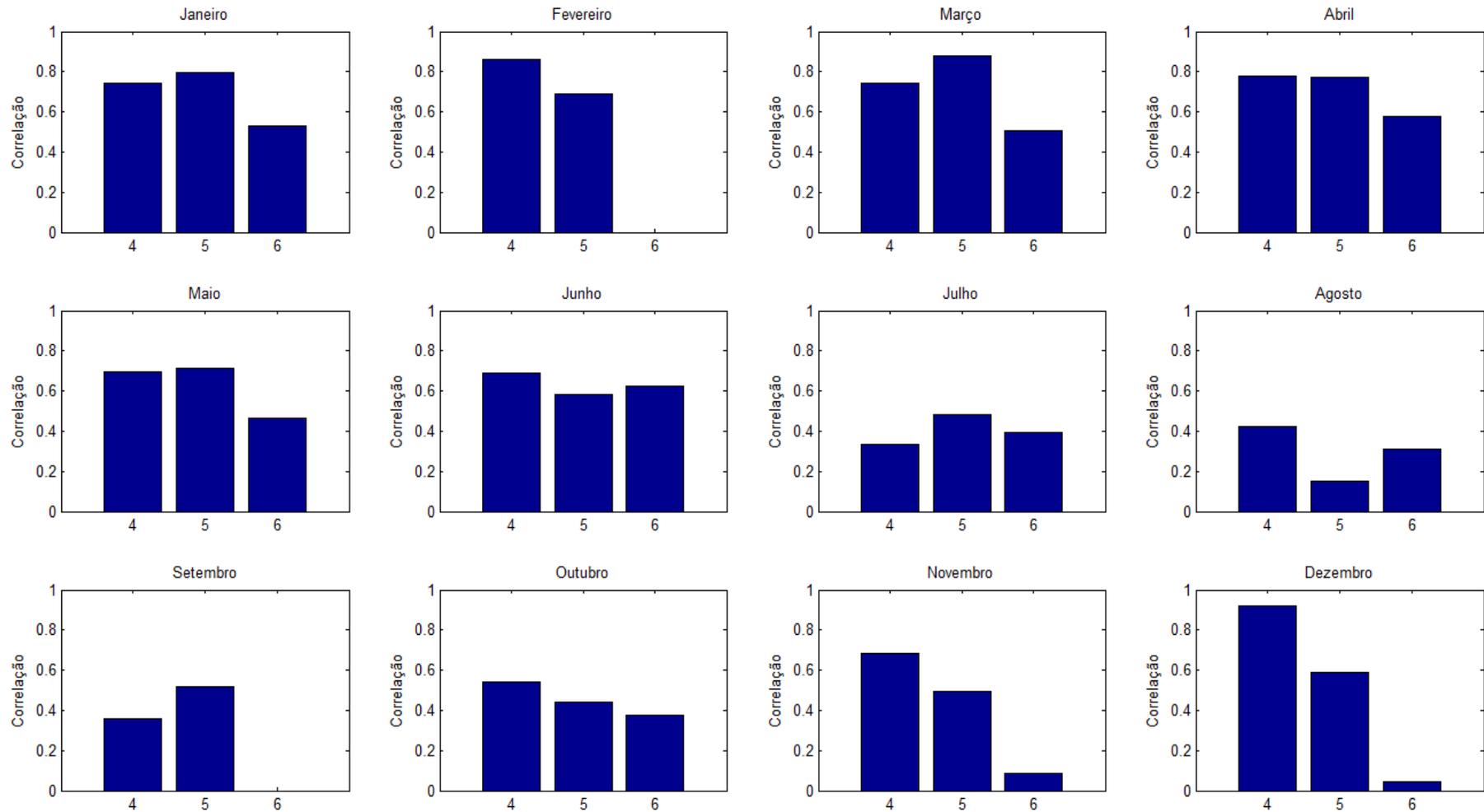


Figura 40 – Correlograma com as correlações cruzadas mensais entre as vazões naturais e as precipitações médias acumuladas em três meses sem atraso (próprio mês) e com atraso de até dois meses na UHE Tucuruí.

Finalizando as análises das correlações mensais de Tucuruí, a Figura 41 apresenta a correlação entre a vazão natural e a precipitação acumulada em quatro meses sem atraso e com atraso de até dois meses. No período úmido, para os meses de fevereiro, outubro novembro e dezembro continuou havendo pouca variação nos resultados da correlação. O mês de janeiro também obteve resultado semelhante aos anteriores na coluna 8. Para março os resultados foram inferiores às análises anteriores, enquanto que o mês de abril apresentou um ganho significativo na correlação para a coluna 7, chegando ao valor de 0,87, ratificando mais uma vez a grande influências das chuvas de janeiro nas afluições de abril. Para o período seco, o mês de maio apresentou o melhor resultado para a coluna 7 (0,76), enquanto que junho teve um leve incremento na correlação para a coluna 8 (0,69) e julho para a coluna 9 (0,57). Os meses de agosto e setembro apresentaram resultados inferiores.

Em suma, observa-se que, para o mês de janeiro e março, a maior correlação alcançada foi para a precipitação acumulada em três meses com atraso de um mês. Os meses de fevereiro, outubro, novembro, dezembro apresentaram maiores correlações para a precipitação acumulada em dois meses sem atraso. Já os meses de abril e maio têm uma relação maior com a precipitação acumulada durante quatro meses sem atraso, com atraso de um mês para o mês de junho e com atraso de dois meses para julho. Os meses de agosto e setembro não alcançaram em nenhuma análise uma correlação que possa ser dita alta, chegando ao seu valor máximo de correlação para a precipitação acumulada em dois meses com atraso de um mês. Esse comportamento pode ser explicado pela sua extensa área de drenagem, e as discrepâncias entre a precipitação ao longo dela. Ao contrário das outras três UHEs localizadas em regiões Nordeste e Sudeste, a incidência de chuvas na bacia do Tocantins aumenta de montante para jusante, tendo um comportamento diferente no tempo de viagem das águas no seu rio.

Por fim, a Figura 42 apresenta a variação da precipitação anual normalizada e a vazão anual normalizada ao longo da série histórica. Observa-se que em muitos anos as duas variáveis têm o mesmo comportamento. Isso também é refletido na correlação anual calculada, com o valor de 0,67. Nota-se aqui que o El Niño não tem qualquer influência nas vazões aqui apresentadas para a UHE Tucuruí.

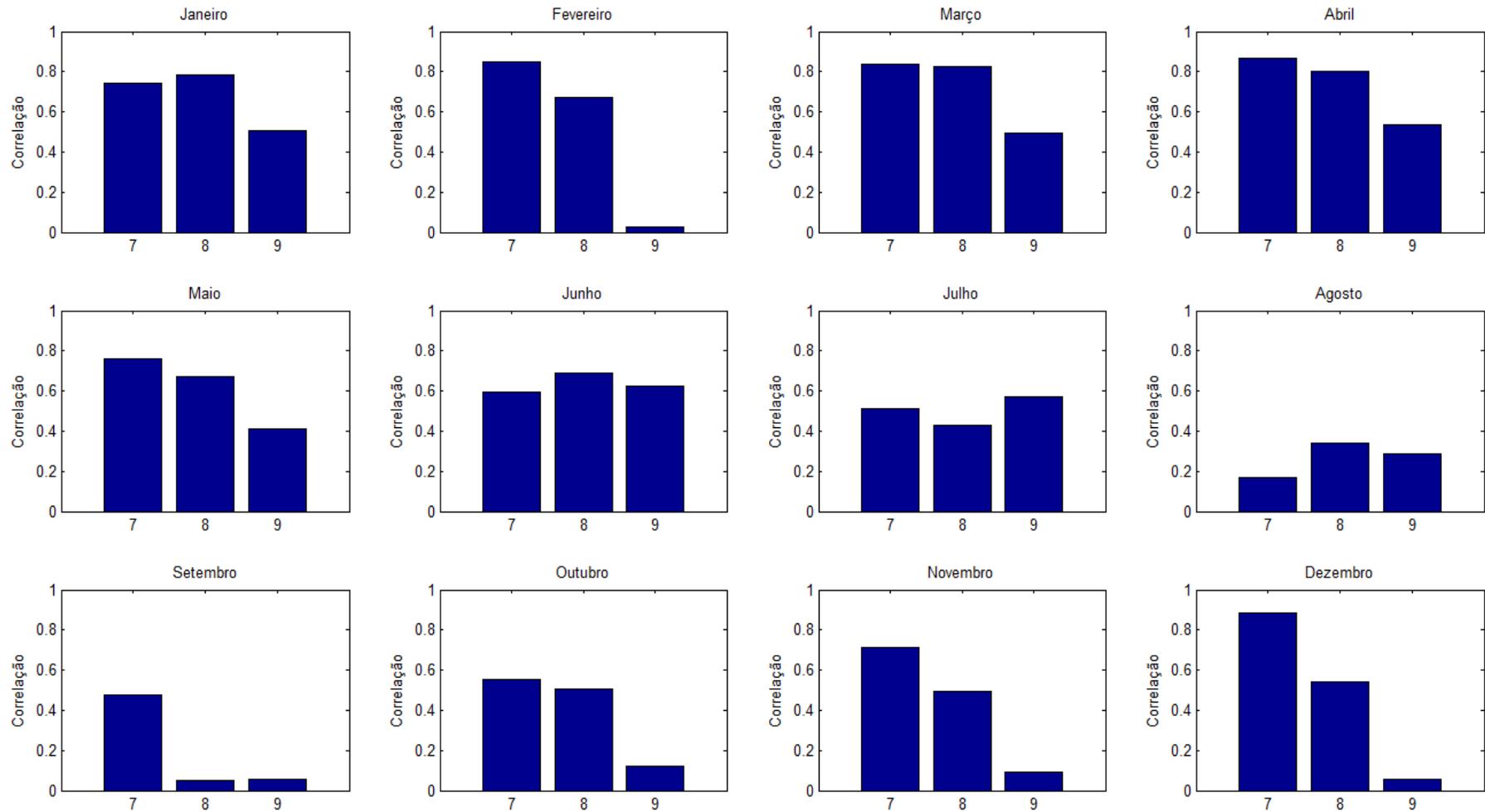


Figura 41 – Correlograma com as correlações cruzadas mensais entre as vazões naturais e as precipitações médias acumuladas em quatro meses sem atraso (próprio mês) e com atraso de até dois meses na UHE Tucuruí.

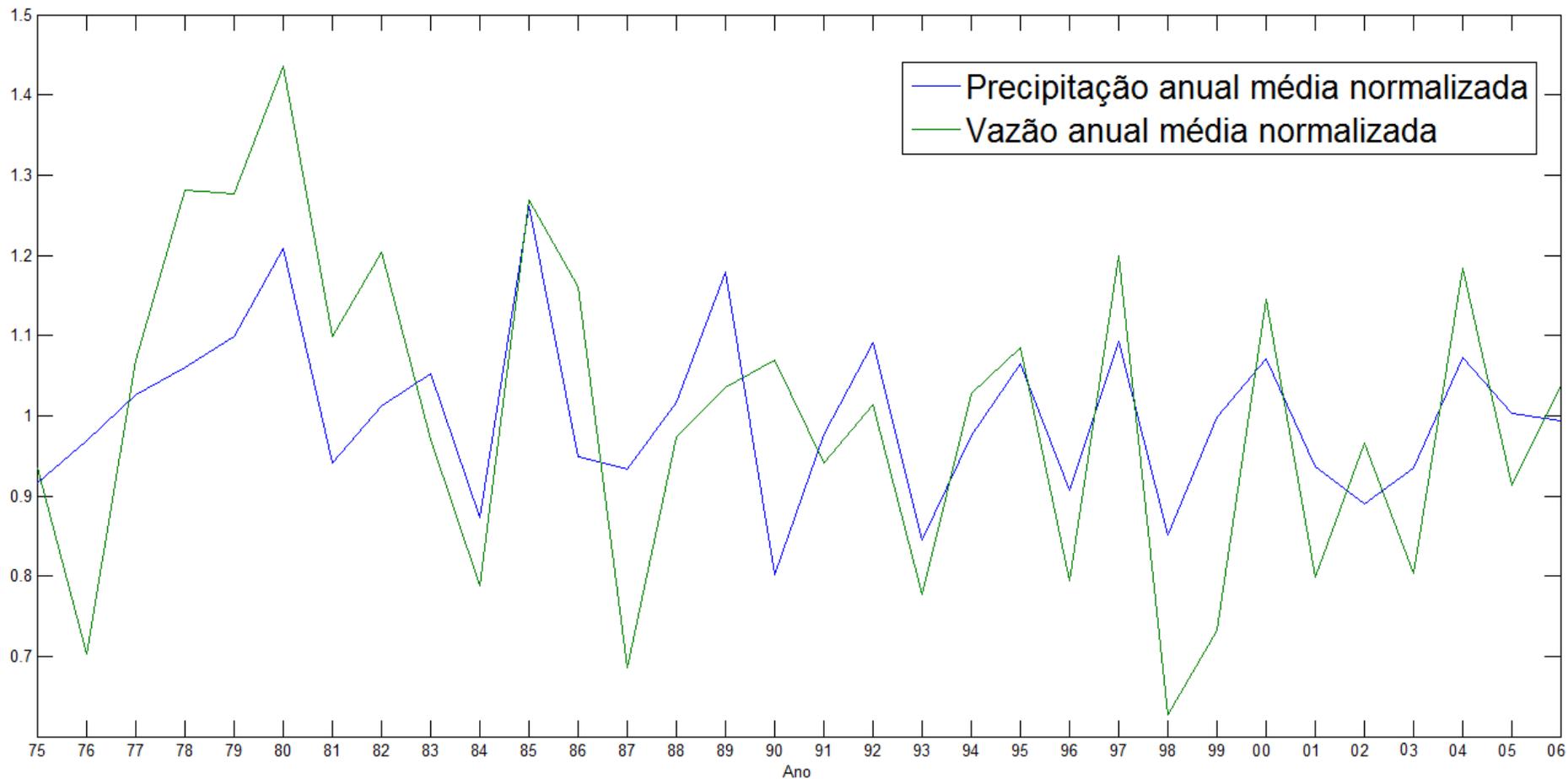


Figura 42 – Variação da precipitação anual normalizada e da vazão anual normalizada na UHE Tucuruí entre 1975 e 2006.

4.6. Análises finais

Após as análises das correlações das UHEs selecionadas, a Figura 43 apresenta o coeficiente de variação da precipitação, que é calculado dividindo-se o desvio padrão mensal pela precipitação média mensal. Este índice adimensional mostra a variabilidade percentual de uma determinada variável. Nota-se que no período seco ocorre a maior variação em todas as usinas hidrelétricas, exceto Itá, onde chove regularmente ao longo de todo o ano. Isto acontece porque nestes meses a precipitação média possui valores muito baixos, cerca de 10 mm ao mês, havendo eventuais meses com valores mais elevados, aumentando assim o desvio padrão. Ou seja, nestes meses podem ocorrer anos em que não haja chuva alguma no período seco, ou que a chuva seja bem superior à média. Já para o período úmido o coeficiente de variação se estabelece entre 25 e 55%.

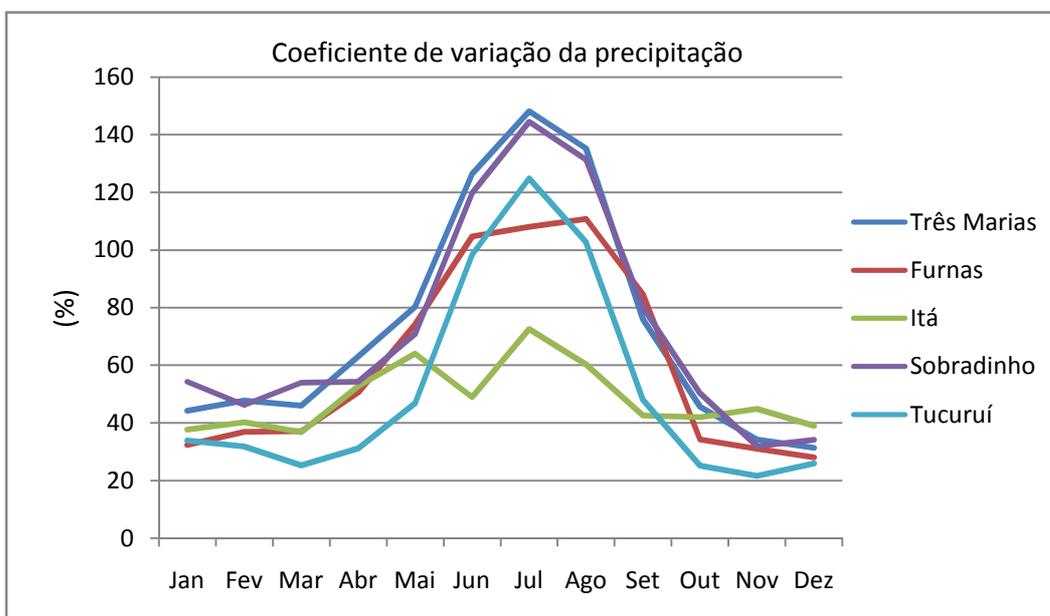


Figura 43 – Coeficiente de variação da precipitação mensal média nas UHEs estudadas.

Também foi calculado o coeficiente de variação das vazões naturais médias para as usinas hidrelétricas pesquisadas (Figura 44). Observa-se que Itá apresenta uma alta variação ao longo de todos os meses do ano, com valores entre 60 e 90%. Como verificado anteriormente, Itá possui uma resposta rápida aos eventos de chuva, o que explica esta grande variabilidade. Desta maneira, eventos transitórios de precipitação ou de seca logo afetam as aflúências, elevando ou reduzindo imediatamente as vazões. A usina hidrelétrica de Tucuruí se destaca por exibir uma variação pequena da vazão em todos os meses do ano, com valores entre 20 e 40%, provavelmente em virtude do regime pluviométrico equatorial mais constante interanualmente. As outras UHEs

apresentam valores similares do coeficiente de variação, que se encontram entre 30 e 60% no decorrer de todos os meses do ano.

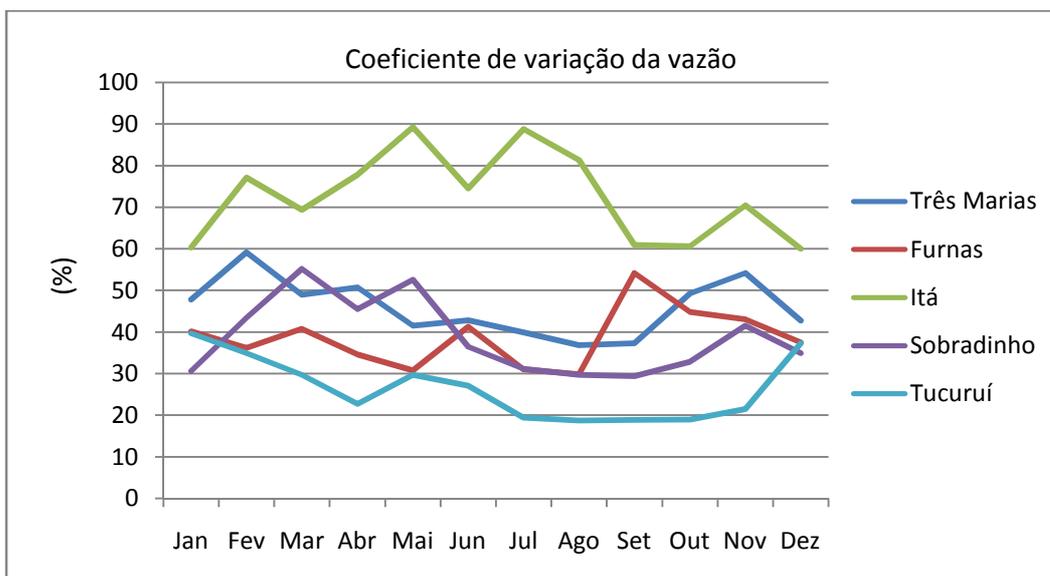


Figura 44 – Coeficiente de variação da vazão mensal média nas UHEs selecionadas.

Resumindo os resultados encontrados anteriormente, a Tabela 2 apresenta as variáveis que tiveram as maiores correlações com a vazão natural afluyente, divididas entre as UHEs e em período úmido e período seco.

Tabela 2 – Resumo das variáveis com melhores resultados

UHE	Período Úmido	Período Seco
Três Marias	$P(t) + P(t-1)$	$P(t-2) + P(t-3) + P(t-4) + P(t-5)$
Sobradinho	$P(t-1)$ $P(t) + P(t-1)$	$P(t) + P(t-1) + P(t-2) + P(t-3)$ $P(t-2) + P(t-3) + P(t-4) + P(t-5)$
Itá ¹	$P(t)$ $P(t) + P(t-1)$	$P(t)$ $P(t) + P(t-1)$
Furnas	$P(t) + P(t-1)$ $P(t) + P(t-1) + P(t-2)$	$P(t) + P(t-1) + P(t-2) + P(t-3)$ $P(t-1) + P(t-2) + P(t-3) + P(t-4)$ $P(t-2) + P(t-3) + P(t-4) + P(t-5)$
Tucuruí ²	$P(t) + P(t-1)$ $P(t-1) + P(t-2) + P(t-3)$	$P(t) + P(t-1) + P(t-2) + P(t-3)$ $P(t-1) + P(t-2) + P(t-3) + P(t-4)$ $P(t-2) + P(t-3) + P(t-4) + P(t-5)$

¹ - Para a UHE Itá não existe divisão entre período úmido e seco.

² - Para a UHE Tucuruí o mês de abril está compreendido no período úmido.

Pode-se observar que, para a maioria dos casos, a precipitação acumulada em dois meses, sem atraso em relação à vazão obteve os melhores resultados para o período úmido. Já para o período seco a precipitação acumulada em quatro meses tem uma

correlação com a vazão natural no geral com um atraso de dois meses. Isso ocorre, pois, nos meses do período seco, a precipitação na maior parte dessas regiões é extremamente baixa. Sendo assim, as vazões nos rios estão relacionadas com as águas provenientes do lençol freático, que foi recarregado com as chuvas dos meses passados.

5. Conclusões e Recomendações Finais

A gestão de recursos hídricos no Brasil está intrinsecamente relacionada à gestão de seus reservatórios e, assim, ao planejamento da operação energética. Cada vez mais, é necessário buscar novos métodos que aprimorem a gestão de tais recursos, evitando-se, assim, a escassez de água, acionamentos desnecessários de usinas termoelétricas, que aumentariam o custo da operação, podendo chegar até mesmo em um cenário de déficit de energia. Atualmente, no Brasil, o planejamento da operação do SIN é realizado pelo ONS com o auxílio da cadeia de modelos criada pelo CEPEL. Este trabalho teve como objetivo mensurar, de forma simples e objetiva, a relação que existe entre a vazão e a precipitação na área de drenagem de cinco usinas hidrelétricas de extrema importância para o país: UHE Três Marias, UHE Sobradinho, UHE Itá, UHE Furnas e UHE Tucuruí.

Para isso, construíram-se longas séries de precipitação utilizando dados da ANA através do método do inverso do quadrado da distância (IQD). Observa-se que, apesar de ter uma boa base de dados e de acesso universal, a quantidade de postos pluviométricos disponíveis por área de drenagem ainda está longe de ser o ideal recomendado pela Organização Mundial de Meteorologia (2006). No caso da UHE Tucuruí, por exemplo, somente existem dados consistidos em grande quantidade a partir do ano de 1975, impedindo de serem analisados anos anteriores. Recentemente, foi produzido pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM), o Atlas Pluviométrico do Brasil (2011). Os resultados aqui obtidos para todos os campos de precipitação são comparáveis aos do CPRM, demonstrando a eficácia da modelagem pelo método IQD.

Utilizou-se, então, o coeficiente de correlação de Pearson para se calcular a correlação mensal e anual entre as séries de precipitações construídas e a séries de vazões naturais disponibilizadas no endereço eletrônico do ONS. Na análise mensal, foram consideradas além das precipitações que ocorrem no mês da afluição, as que ocorrem até seis meses anteriores. Dado que nem toda bacia hidrográfica tem um tempo de resposta rápido, podendo a chuva ser infiltrada no solo e aflorar nos rios semanas ou

até meses à frente, buscou-se assim estimar as conexões possíveis nos ciclos hidrológicos analisados. Além disso, a correlação foi calculada para o caso de precipitação acumulada de dois, três e quatro meses seguidos sem atraso e com atraso de até dois meses em relação à afluência.

Pode-se chegar à conclusão de que, para todos os casos analisados, ao se acumularem as precipitações, há um ganho na correlação. Isso faz sentido, pois, ao se acumular a precipitação, é como se estivéssemos levando em conta a contribuição do lençol freático nas afluências, além dos diferentes tempos de viagem dos rios. Para a maioria dos casos, no período úmido, a chuva acumulada em dois meses sem atraso tem maior correlação com a vazão, com resultados que chegam a mais de 0,90. Algumas exceções foram encontradas como no caso de Furnas e Tucuruí. Já os períodos secos dependem das precipitações anteriores que se infiltraram e vão aflorando com o tempo já que há pouca chuva nessas épocas. Com isso, a precipitação acumulada em quatro meses com atraso de dois meses, apresentou-se com uma correlação maior na maioria dos casos. Apesar de não ter sido analisado aqui neste trabalho, caso houvesse uma variável de precipitação acumulada em quatro meses com atrasos maiores do que dois meses espera-se que a correlação para os meses de agosto e setembro poderiam ser maiores. A correlação anual também apresentou-se alta na maioria dos casos, chegando-se ao altíssimo resultado de 0,97 para a UHE Itá. Conforme esperado, observa-se também que as usinas hidrelétricas com grandes áreas de drenagem (e, por conseguinte, maiores tempos de concentração de suas bacias hidrográficas) têm um tempo de resposta maior entre os eventos de chuva-vazão, enquanto que, para as que têm uma área de drenagem pequena (menores tempos de concentração), os efeitos da precipitação são rapidamente refletidos nas afluências.

Espera-se o mesmo grau de correlação para qualquer outra usina hidrelétrica que apresente características semelhantes às aqui analisadas. Em UHEs localizadas na região sul, como Itá, os resultados devem ser diferentes das demais regiões do país já que não existe uma divisão muito clara entre período úmido ou seco. Os eventos de chuva são rapidamente refletidos na vazão dos rios, uma vez que o escoamento subterrâneo não chega a diminuir muito, apresentando altos valores de correlação para a precipitação acumulada em dois meses sem atraso.

Os resultados apresentados neste trabalho servem como suporte ao próximo passo a ser dado no aprimoramento de modelos hidrológicos brasileiros com discretização mensal, que seria a introdução de variáveis de precipitação. Recomenda-se

que sejam feitos testes nesses modelos com a introdução de variáveis de precipitação, simples ou acumulada, sem atraso e com atraso em relação à vazão. Dessa forma, espera-se que haja um ganho na previsão ou geração de cenários de vazões, havendo uma melhor gestão dos recursos hídricos e conseqüentemente uma maior segurança da política energética.

Referências Bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Diretrizes e Análises Recomendadas para a Consistência de Dados Pluviométricos**. Brasília – DF. 2012.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>. Acesso em Abril/2015.

AMORIM, R.C.F. **Espacialização de variáveis meteorológicas em áreas de relevo ondulado na bacia do Rio Doce**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola)– Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

AMORIM, R.C.F.; RIBEIRO, A.; LEITE, C.C.; LEAL, B.G.; SILVA, J.B.G. **Avaliação do desempenho de dois métodos de espacialização da precipitação pluvial para o Estado de Alagoas**. Acta Sci. Technol., Maringá, v.30,n. 1, p.87-91, 2008.

BONNÉ, J. **Stochastic Simulation of Monthly Streamflow by a Multiple Regression Model Utilizing Precipitation Data**. Journal of Hydrology n.12, p. 285-310 , 1971.

COLLISCHONN, B.; ALLASIA, D.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C.E.M.; **Desempenho do satélite TRMM na estimativa de precipitação sobre a bacia do Paraguai superior**. Revista Brasileira de Cartografia, v. 59, n. 1, 2007.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS – Disponível em http://www.cemig.com.br/pt-br/a_cemig/Nossa_Historia/Paginas/Usinas_Hidreletricas.aspx. Acesso em maio/2015.

CIDADE DE TUCURUÍ. Disponível em: http://cidadedetucurui.com/inicio/usina_hidreletrica_tucurui/USINA_HIDRELETRICA_TUCURUI.htm. Acesso em maio/2015

COMPANHIA HIDRO ELÉTRICA DO SÃO FRANCISCO. Disponível em: http://www.chesf.gov.br/portal/page/portal/chesf_portal/paginas/sistema_chesf/sistema_chesf_geracao/container_geracao?p_name=8A2EEABD3C01D002E0430A803301D00

CONSÓRCIO ITÁ. Disponível em: <http://www.consorcioita.com.br>. Acesso em: maio/2015

COSTA, F. S., DAMÁZIO J. M.; LIVINO DE CARVALHO, A. R.; DANTAS, H. M. **PREVIVAZH – Modelo Estocástico de Previsão de Vazões Diárias**, Seminário Internacional sobre Hidrologia Operativa , CIER, 2000.

COSTA, F. da S.; MACEIRA, M. E. P.; DAMÁZIO, J. M. **Modelos de previsão hidrológica aplicados ao planejamento da operação do sistema elétrico brasileiro**. 2007

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2023**. Brasília, 2014.

FARIAS, J. F. da S.; FILHO, A. J. P.. **Previsão de chuva a curtíssimo prazo na área de abrangência do radar meteorológico de São Paulo**. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 28, n. 2, p. 199-209, 2013.

FIGUEIREDO FILHO, D.B., SILVA JUNIOR, J. A. **Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson (r)**. Revista Política Hoje, v. 18, n. 1, p. 115-146, 2009.

FORTUNATO, L.A.M.; NETO, T.A.A.; ALBUQUERQUE, J.C.R.; PEREIRA, M.V.F. (1990). **Introdução ao planejamento da expansão e operação de sistemas de produção de energia elétrica**. EDUFF/UFF Niterói-RJ, 227 p.

FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS. Disponível em: http://www.furnas.com.br/hotsites/sistemafurnas/usina_hidr_furnas.asp. Acesso em maio/2015

GUILHON, L.G.F.; ROCHA, V.F.; MOREIRA, J.C; **Comparação de Métodos de Previsão de Vazões Naturais Afluentes a Aproveitamentos Hidroelétricos**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 12, n. 3, p. 13-20, 2007.

HIDROWEB – SISTEMA DE INFORMAÇÕES HIDROLÓGICAS. Disponível em: <http://hidroweb.ana.gov.br/>. Acesso em abril/2015

HOLANDA, C.V.M., OLIVEIRA, E. **Programa para Homogeneização de Dados – PROHD**. In: Simpósio de Hidrologia, 3, 1979, Brasília. Anais.Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, p. 810-845, 1979

KELMAN,J., DAMÁZIO, J.M., COSTA, J.P. **Geração de Séries Sintéticas de Vazões Diárias – Modelo Diana**. Revista Brasileira de Engenharia – Caderno Recursos Hídricos, vol.1, no 2, 1983, Brasil.

KAISER, I.M.; PORTO, R.M. **Campos de Precipitação Parte II: Estudo de Caso**. RBRH, v.10, n.4, p. 113-124, 2005.

KAYANO, MARY T.; ANDREOLI, RITA V. **Relationships between rainfall anomalies over northeastern Brazil and the El Niño–Southern Oscillation.** Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012), v. 111, n. D13, 2006.

LIMA, C.H.R.; LALL, U. **Análise e Previsões de Afluências ao Reservatório Sobradinho Utilizando um Modelo Periodico Autoregressivo Exógeno (Parx).** XVII Simpósio Brasileiro De Recursos Hídricos, 2007.

LIMA, C.H.R.; LALL, U. **Inclusão de Informação Climática e Variabilidade Espacial em Modelos estatísticos de Previsão de Afluências.** II Simpósio de Recursos Hídricos do Sul-Sudeste, 2008

LIMA, C.H.R.; LALL, U. **Climate informed monthly streamflow forecasts for the Brazilian hydropower network using a periodic ridge regression model.** Journal of hydrology, v. 380, n. 3, p. 438-449, 2010.

LIMA, C.H.R.; LALL, U. **Climate informed long term seasonal forecasts of hydroenergy inflow for the Brazilian hydropower system.** Journal of hydrology, v. 381, n. 1, p. 65-75, 2010.

LOU, A.P.F.. **Modelagem Geoestatística Aplicada à Integração entre Dados de Postos Pluviométricos e Radar Meteorológico.** 2004. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

MACEIRA, M.E.P., TERRY, L.A., COSTA, F.S., DAMÁZIO, J.M. e MELO, A.C.G. **Chain of Optimization Models for Setting the Energy Dispatch and Spot Price in the Brazilian System.** 2002

MACEIRA, M.E.P., PENNA, D.D.J., DAMÁZIO, J.M. **Geração de Cenários Sintéticos de Energia e Vazão para o Planejamento da Operação energética.** 2005

MACEIRA, M. E. P.; DUARTE, V. S.; PENNA, D. D. J.; MORAES, L. A. M.; MELO, A. C. G. **Ten Years of Application of Stochastic Dual Dynamic Programming in Official and Agent Studies in Brazil Description of the NEWAVE.** Anais da XVI Power Systems Computation Conference. Glasgow, Escócia, 2008.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA. Disponível em:
http://www.ons.org.br/conheca_sistema/o_que_e_sin.aspx. Acesso em abril/2015.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA. Disponível em:
http://www.ons.org.br/download/biblioteca_virtual/publicacoes/dados_relevantes_2005/index.html. Acesso em junho/2015.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA. Disponível em:
http://www.ons.org.br/operacao/vazoes_naturais.aspx. Acesso em junho/2015.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE METEOROLOGIA. Guide to Hydrological Practices, Data Acquisition and Processing, Analysis, forecasting and other Applications. 5ª edição, Nº 168, Geneva – Suíça, Cap. 20, 259 p., 2006.

PENNA, D. D. J. **Definição da Árvore de Cenários de Afluências para o Planejamento da Operação Energética de Médio Prazo**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2009.

RASMUSSEN, E.M.; WALLACE, J.M. **Meteorological Aspects of the El Niño/Southern Oscillation**. *Science*, v. 222, n. 4629, p. 1195-1202, 1983.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM. Disponível em:
<http://www.cprm.gov.br/publique/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?infoid=1351&sid=9>.
Acesso em junho/2015.

TUCCI, C.E.M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4 ed. Editora da Universidade / UFRGS. Porto Alegre, 1993.

VIOLA, M. R., MELLO, C. D., PINTO, D. B., MELLO, J. D. e ÁVILA, L. F. **Métodos de Interpolação Espacial para o Mapeamento da Precipitação Pluvial**. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 14, n. 9, p. 970-978, 2010.

YEVJEVICH, V. **Determinism and Stochasticity in Hydrology**. *Journal of Hydrology*, v. 22, p. 225-238, 1974.