UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS

INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

PIB-E/0052/2008

INFLUÊNCIA DE FATORES CLIMÁTICOS NOS NÍVEIS DE ÁGUA DOS RIOS SOLIMÕES E NEGRO

BOLSISTA: CELSO RICARDO CALDEIRA REGO

ORIENTADORA: MARTA SILVA GUSMÃO

MANAUS-AMAZONAS

2009

PIB-E/0052/2008

INFLUÊNCIA DE FATORES CLIMÁTICOS NOS NÍVEIS DE ÁGUA DOS RIOS SOLIMÕES E NEGRO

Orientadora Marta Silva Gusmão

Bolsista Celso Ricardo Caldeira Rego

Manaus, 15 de Julho de 2008

Resumo

Apresentamos neste trabalho uma análise da dinâmica do Rio Negro na estação hidrométrica de Manaus, situada próxima à confluência dos Rios Negro e Solimões, com o objetivo de propor um modelo que leve em conta a interação atmosfera-oceano-rio, e seja capaz de prever os níveis de água do Rio Negro na referida estação. Como resultado, obtivemos três modelos que prevêem os níveis de água máximos e mínimos mensais com uma antecedência de 7, 11 e 23 meses. Os modelos, com antecedência de 7 e 11 meses, possuem variáveis explicativas relacionadas a influência atmosfera-oceano, especificamente ao fenômeno conhecido por El-Niño oscilação Sul (ENSO), que ocorre no Oceano Pacífico equatorial, e ao fenômeno análogo que ocorre no Oceano Atlântico equatorial. Nestes modelos, temos como variáveis independentes as anomalias da temperatura da superfície do mar na região conhecida como Niño 3.4, anomalias da temperatura da superfície do mar no Atlântico Norte (NATL) e o Índice de Oscilação Sul (SOI), que é definido como a pressão normalizada ao nível do mar entre as ilhas do Tahiti e Darwin/Austrália. Mostramos neste estudo, que os níveis de água mensais do Rio Negro são influenciados tanto pelo Oceano Pacífico, quanto pelo Atlântico. Também, neste estudo, obtivemos um modelo que tem antecedência de 23 meses, onde usamos as previsões geradas pelo modelo com antecedência de 11 meses e substituímos estas nas séries de dados originais. Essas séries modificadas foram empregadas nos modelos de Box e Jenkins de ordens $(1,1,1)\times(0,1,1)_{12}$ (Níveis Máximos) e $(0,1,1)\times(0,1,1)_{12}$ (Níveis Mínimos). Denominamos este modelo de SARIMA-ACOPLADO. Os resultados gerais mostram que os níveis máximos e mínimos anuais são previstos com erros inferiores a 30cm , resultado aceitável para uma região que tem uma variação anual de 10m. Com isto, esperamos que estes modelos possam servir de panorama para as autoridades das cidades situadas nas margens dos rios da Amazônia.

Sumário

Lista de Siglas **vi**

Objetivo **vii**

1 Introdução **1**

2 Revisão Bibliográfica **3**

3 Marerial e Métodos **6**

3.1 Suposição 13

4 Resultados **14**

5 Conclusão **33**

A Cronograma de Atividades **42**

Lista de Figuras

2.1 Mapa hidrológico do Estado do Amazonas indicando a localização da cidade de Manaus. 5

3.1 Níveis de água do Rio Negro em Manaus em metros (m): (a) Nível máximo mensal, (b) Nível mínimo mensal. 11

3.2 ENSO-índices e índice da anomalia da SST do NATL: (a) Índice SOI, (b) Anomalias da SST do Niño 3.4, (c) Anomalias da SST do NATL. 12

4.1 (a) ACF: Função de autocorrelação e (b) PACF: Função de autocorrelação parcial, para os níveis máximos mensais do Rio Negro em Manaus. 22

4.2 ACF e PACF (a) ACF: Função de autocorrelação e (b) PACF: Função de autocorrelação parcial para os níveis mínimos mensais do Rio Negro em Manaus. 23

4.3 Histograma dos resíduos dos Níveis máximos mensais do Rio Negro em Manaus, confirmando a suposição de normalidade dos erros do modelo SARIMA $(1,1,1) \times (0,1,1)_{12.}$ 24

4.4 Histograma dos resíduos dos Níveis mínimos mensais do Rio Negro em Manaus, confirmando a suposição de normalidade dos erros do modelo SARIMA $(0,1,1) \times (0,1,1)_{12}$. 25

4.5 Previsão dos níveis de água do Rio Negro dado em metros (m) no período de 2006-2009: (a) Níveis máximos previstos e observados usando o modelo SARIMA $(1,1,1) \times (0,1,1)_{12}$, (b) Níveis mínimos previstos e observados usando o modelo SARIMA $(0,1,1) \times (0,1,1)_{12}$. 26

4.6 Previsão dos níveis de água do Rio Negro dado em (m) no período de 2005 -2006, usando o modelo SARIMA-ACOPLADO com 23 meses de antecedência: (a) Níveis máximos previstos e observados (b) Níveis mínimos previstos e observados. 27

4.7 Previsão dos níveis de água do Rio Negro Manaus dado em (m) no período de 2005 -2006, usando o modelo SARIMA-ACOPLADO com 16 meses de antecedência: (a) Níveis máximos previstos e observados (b) Níveis mínimos previstos e observados. 28

4.8 Previsão dos níveis de água do Rio Negro dado em (m) no período de 2008 -2009, usando o modelo SARIMA-ACOPLADO com 23 meses de antecedência: (a) Níveis máximos previstos e observados (b) Níveis mínimos previstos e observados. 29

4.9 Previsão dos níveis de água do Rio Negro dado em (m) no período de 2008 -2009, usando o modelo SARIMA-ACOPLADO com 16 meses de antecedência: (a) Níveis máximos previstos e observados (b) Níveis mínimos previstos e observados. 30

Lista de Tabelas

II.1 Localização Geográfica das regiões de estudos do Niño no oceano Pacífico Tropical, Índice de Oscilação Sul (SOI) e anomalias da TSM no NATL. . 5

IV.1 Coeficientes de previsão Eqs (3.1) e (3.2), para o ano de 2005 dos níveis máximos e mínimos mensais, com 11 meses de antecedência 18

IV.2 Coeficientes de previsão Eqs (3.1) e (3.2), para o ano de 2008 dos níveis máximos e mínimos mensais, com 11 meses de antecedência 19

IV.3 Coeficientes de previsão Eqs (3.3) e (3.4), para o ano de 2005 dos níveis máximos e mínimos mensais, com 7 meses de antecedência 19

IV.4 Coeficientes de previsão Eqs (3.3) e (3.4), para o ano de 2008 dos níveis máximos e mínimos mensais, com 7 meses de antecedência 20

IV.5 Previsões para o nível de água em (metros) do Rio Negro no ano de 2005: máximos; primeira e terceira coluna com 11 e 7 meses de antecedência, respectivamente, mínimos; segunda e quarta coluna com 11 e 7 meses de antecedência, respectivamente. 20

IV.6 Previsões para o nível de água em (metros) do Rio Negro no ano de 2008. 21

IV.7 Estimação dos parâmetros dos modelos SARIMA (1,1,1)x(0,1,1)12 nível máximo e SARIMA (0,1,1)x(0,1,1)12 nível mínimo do Rio Negro em Manaus, para previsões nos anos de 2006, 2007,2008 e 2009. 21

IV.8 Níveis de água máximos e mínimos mensais do Rio Negro observados na estação hidrométrica de Manaus nos anos de 2005, 2006 e 2008. 22

IV.9 Erro percentual entre os níveis máximos e mínimos mensais previstos e observados no Porto de Manaus no período de 2005 até 2006, usando os modelos SARIMA-ACOPLADO e SARIMA. 31

IV.10 Erro percentual entre os níveis máximos e mínimos mensais previstos e observados no Porto de Manaus no ano de 2008, usando os modelos SARIMA-ACOPLADO e SARIMA. 32

IV.11 Previsões para níveis máximos e mínimos, ano de 2009: primeira e segunda coluna Eqs. (3.1) e (3.2), terceira e quarta coluna Eqs (3.5) e (3.6), respectivamente. 32

Lista de Siglas

ACF - Função de Autocorrelação

ARIMA - Auto-regressivo Integrado de Médias Móveis

AR - Auto-regressivo

ARMA - Modelos Auto-regressivos de Médias Móveis

CPC-Climate Prediction Center

FDP- Função Densidade de Probabilidade

MA - Modelos de Médias Móveis

PACF - Função de Autocorrelação Parcial

SARIMA - Sazonal Auto-regressivo Integrado de Médias Móveis

VA - Variáveis Aleatórias

TSM-Temperatura da Superfície do Mar

ENSO-El-Nino Oscilação Sul

ENSOS-Índices - Índeces de Oscilação Sul

Objetivo

Este trabalho tem como objetivo geral propor uma metodologia capas de aumentar o período de previsão para as séries hidrológicas de níveis de água observadas no porto de Manaus, levando em consideração a influência dos índices ENSO e as anomalias da SST do Oceano Atlântico. Atualmente temos uma previsão para o periodo de um ano, o qual foi objeto de estudo do autor no PIB-E/042/2007, sendo que para isto utilizou-se a metodologia de Box e Jenkins.

Capítulo 1

Introdução

À medida que se avança na escala do tempo, as preocupações com o meio ambiente adquirem suprema importância, pois se defrontam com uma série de eventos globais que estão danificando a biosfera e a vida humana de uma maneira alarmante, podendo torna-se irreversível [1]

Na bacia Amazônica, a forte amplitude de variação do nível de água ao curso hidrológico gera inundações regulares de vastas zonas, denominadas localmente de várzea. Essas zonas inundáveis estão localizadas, principalmente, nas margens dos grandes rios da bacia Amazônica [2]. As áreas inundáveis são importantes não apenas por sua alta biodiversidade [3], mas também pela elevada produtividade primária das florestas inundáveis [5] e das macrófitas aquáticas [4]. As médias anuais dos níveis de água dos rios da Amazônia central oscilam em torno de 10 m [6]. Parte disso é conseqüência da variação da precipitação intra-anual nas bacias dos Rios Negro e Solimões, o que corresponde aproximadamente a uma área de 3.106 km^2[7], [8].

Este trabalho apresenta três propostas para prever a dinâmica dos níveis máximos e mínimos mensais do Rio Negro na cidade de Manaus localizada na Figura 2.1. Uma delas provém da metodologia de Box & Jenkins [41], desenvolvida na década de 70, sobretudo os modelos Seasonal Auto Regressive Integrated Moving Averages (SARIMA), o qual ainda não havia sido aplicado para os Rios da Amazônia, apresentado previsões

com antecedência de 12 meses e erros inferiores a 3% para os níveis máximos e mínimos anuais. A segunda proposta foi elaborada sob a hipótese de influência dos índices ENSO e das anomalias da SST no Oceano Atlântico Norte (NATL) na dinâmica do Rio Negro em Manaus, tendo retornado previsões com 11 e 7 meses de antecedência e erros inferiores a 2% no caso dos máximos e mínimos anuais. Por fim, acoplamos os modelos de Box e Jenkins com o modelo elaborado a partir dos índices do ENSO e anomalias da SST do NATL, modelo que denominamos de SARIMA-ACOPLADO, retornado resultados com antecedências de 19 e 23 meses e erros menores que 9% dos máximos e mínimos anuais. Esses modelos poderão servir de poderosas ferramentas para tomada de decisão ou planejamento pelo governo, quando da ocorrência de grandes cheias ou fortes secas como a ocorrida em 2005 na Amazônia.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

A partir de 1903 os níveis diários do Rio Negro começaram a ser registrados, pelas autoridades do porto de Manaus situado nas proximidades do encontro das águas dos Rios Solimões e Negro. Na maioria dos casos o nível máximo anual ocorre no mês de junho [6], sendo que desde o início dos registros o maior nível foi registrado em 1953 [9] e o menor em 1926 [8]. Evidentemente o ciclo hidrológico não influencia somente os níveis dos rios, mas toda a vida ao seu redor como: o crescimento de algas, peixes, árvores e outros tipos de organismos que dependem do ciclo das águas para a sua reprodução [2].

Na vazante dos rios, as terras das áreas de várzea se tornam férteis devidos os nutrientes que ficam acondicionados no solo, o que torna a terra propicia para as atividades agropecuárias, proporcionando o aumento da densidade populacional [3]. Desta forma, temos que as atividades econômicas tais como pesca, agropecuária, extração de madeira e o transporte fluvial são dependentes da dinâmica dos rios da Amazônia.

Para as populações que vivem às margens dos rios da Amazônia, é de importância crucial que se conheça o comportamento da dinâmica dos rios, como os níveis máximos e mínimos destes em um ciclo hidrológico. Este conhecimento não diz respeito somente às populações ribeirinhas, mas a todas as cidades que são afetadas pela dinâmica dos rios como: Manaus, Óbidos, Santarém, Belém e outras. Porém, a realidade mostra que todas às vezes que ocorre um fenômeno singular, como uma grande cheia ou uma forte

seca, os governos quase nunca estão preparados para socorrer os atingidos por eventos desta magnitude, talvez por descaso ou por falta de um modelo que possa prever tais fenômenos.

O fenômeno El-Nino Oscilação Sul (ENSO) é um acoplamento natural do sistema atmosfera-oceano, que ocorre na região do Oceano Pacífico Equatorial em um intervalo de tempo de 2 a 7 anos [10], [11]. Dois diferentes índices são usados para quantificar o ENSO: as anomalias da Temperatura da Superfície do Mar (SST) e o Índice de Oscilação Sul (SOI), que é definido como a diferença de pressão normalizada ao nível do mar entre o Tahiti e Darwin/Australia [10]. As anomalias da (SST) na região de ocorrência do ENSO são monitoradas dividindo a região afetada em sub-regiões onde, segundo o Climate Prediction Center (CPC), está de acordo com a Tabela II.1.

O El-Niño (fase quente) é conhecido pelo aumento da SST, enquanto que a La-Niña (fase fria) é caracterizada pela diminuição da SST [12], [10].

Muitos trabalhos têm mostrado que o ENSO tem influência nas variações de precipitações, níveis e vazões dos grandes rios tropicais, tais como: Nile, Congo, Orinoco, Paraná, Tocantins e os mais conhecidos tributários do Amazonas [7], [13], [14], [15], [10], [16],[17], [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30], [31].

Outro fenômeno análogo ao ENSO ocorre no Oceano Atlântico, possuindo como quantificador as anomalias da SST nas devidas sub-regiões mostradas na Tabela II.1 conforme o CPC. Vários estudos têm mostrado que as anomalias da SST do Atlântico influenciam a circulação atmosférica da América do sul, bem como as oscilações anuais de precipitação, níveis e vazão de água da bacia Amazônica [32], [33], [34], [27], [35], [36], [37], [38], [39], [40]. A revisão dos trabalhos acima citados, só reforça a importância e necessidade que é compreender a dinâmica dos rios da Amazônia. Em particular, no âmbito da previsão dos níveis de água desses rios.

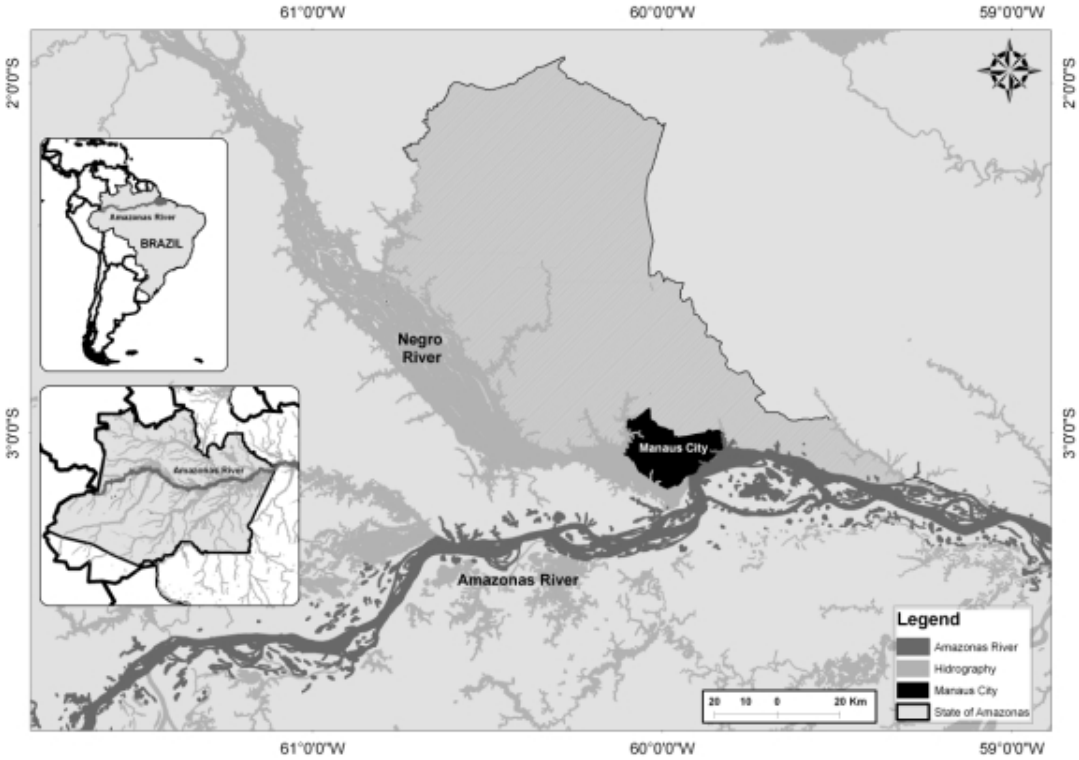

Figura 2.1: Mapa hidrológico do Estado do Amazonas indicando a localização da cidade de Manaus.

ENSO-index	Latitude	Longitude	Period
Niño 1+2	0-10°S	90-80°W	1950-2008
Niño 3	5°N-5°S	150-90°W	1950-2008
Niño 3.4	5°N-5°S	170-120°W	1950-2008
Niño 4	5°N-5°S	160°E-150°W	1950-2008
SOI (CPC)	Darwin (Australia) and Tahiti		1950-2008
North Atlantic	(5-20°)N-(60-30°)S		1950-2008

Tabela II.1: Localização Geográfica das regiões de estudos do Niño no oceano Pacífico Tropical, Índice de Oscilação Sul (SOI) e anomalias da TSM no NATL.

Capítulo 3

Marerial e Métodos

Desde 1903, as autoridades portuária de Manaus registram os dados diários do nível de água do Rio Negro, os quais podem ser encontrados no site http://www.snph.am.gov.br. Esses dados podem ser visualizados através da Figura 3.1. Para o desenvolvimento do estudo, os dados do nível do Rio Negro foram separados em níveis máximos e mínimos mensais, ou seja, dos registros diários dos níveis de água, obtivemos duas séries hidrológicas, uma correspondendo ao nível máximo e outra ao nível mínimo mensal, que serviram de dados de entrada no modelo SARIMA.

Conforme Brockwell and Davis, 2002; Bovas and Ledolter, 2005 uma série temporal (X_t) é qualquer conjunto de observações ordenadas no tempo. Séries temporais são compostas,basicamente, por três elementos: tendência (T_t) sazonalidade (S_t) e ruído branco ou erro aleatório (ε_t).

Um dos principais objetivos da análise de séries temporais é a realização de previsões. Supondo que uma série temporal, X_t tenha os dados coletados seqüencialmente ao longo do tempo, espera-se que ela apresente correlação seriada no tempo. Uma metodologia capaz de simular esse tipo de dinâmica é conhecida como modelos de Box & Jenkins [41]. Essa metodologia permite que valores futuros de uma série sejam previstos, tomando por base apenas seus valores presentes e passados através da correlação temporal existente entre os valores observados. Os modelos de Box & Jenkins, genericamente conhecidos por

SARIMA quando levam em conta a componente sazonal, são modelos matemáticos que visam captar o comportamento da correlação seriada ou autocorrelação entre os valores da série temporal e com base nesse comportamento, realizar previsões futuras.

Para a melhor compreensão dos modelos ARIMA e SARIMA de Box & Jenkins são necessárias algumas definições, como:

(1°) Série estacionária: é toda série que se desenvolve no tempo, aleatoriamente, ao redor de uma média e de uma variância constante.

(2°) Média ou valor esperado: $\mu(t) = E(X_t)$.

(3°) Variância: $Var(X_t) = E\left[(X_t - \mu(t))^2\right]$.

(4°) Autocovariância: mede a dependência entre duas observações separadas por k intervalos (lag k) de tempo,

$$\gamma_k = Cov[X_t, X_{t+k}] = \frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N-k}(X_t - \mu(t))(X_{t+k} - \mu(t)). \tag{3.1}$$

(5°) Função de Autocorrelação (ACF) de lag k: tem a finalidade de medir a memória de um processo estocástico. Isto significa que a autocorrelação mede a intensidade com que um valor observado, X_t, é influenciado por outra observação no passado X_{t-k} dado pela equação abaixo:

$$\rho_k = \frac{\gamma_k}{\gamma_0}. \tag{3.2}$$

(6°) Função de Autocorrelação Parcial (PACF) de lag k: essa função tem a finalidade de medir a correlação entre as observações X_t e X_{t+k}, excluindo a dependência dos valores intermediários das observações $.X_{t+1}, X_{t+2}, ..., X_{t+k-1}$.

(7°) Operador translação para o passado (B): $B^m X_t = X_{t-m}$.

(8°) Operador diferença (Δ): $\Delta X_t = X_t - X_{t-1} = (1 - B)X_t$, logo $\Delta = (1 - B)$.

(9°) Processos estocásticos estacionários de segunda ordem: um processo em que, a qualquer instante de tempo t, as condições abaixo são satisfeitas:

(a) $E[X_t] = \mu$,

(b) $Var[X_t] = E[(X_t - \mu)^2] = \sigma^2$,

(c) $Cov[X_t, X_{t+k}] = E[(X_t - \mu)(X_{t+k} - \mu)]$.

(10°) Série ruído branco: é uma seqüência de variáveis aleatórias independente e identicamente distribuída com média zero e variância constante.

(11°) Correlação Linear: é um indicador da influência de linear de uma variável x em uma variável y , trata-se de uma medida de associação que independe das unidades de medidas das variáveis. Podendo variar entre 1 e -1, de modo que quanto mais próximo de 1 ou -1 maior é a influência de x em y, sendo o valor de associação dada pela seguinte equação.

$$\rho_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{\sqrt{\sigma_{yy}\sigma_{xx}}} \tag{3.3}$$

A metodologia de Box & Jenkins é aplicada a processos estocásticos que sejam estacionários de segunda ordem. Porém, se a série em estudo não for estacionária pode-se torná-la estacionária aplicando o operador diferença (ver, definição 8°) sucessivas vezes, até que a série satisfaça as condições de estacionariedade descrita na definição (9°).

Na prática, geralmente as séries encontradas apresentam tendência, e (ou) sazonalidade [42]. A tendência, T_t, é entendida como uma mudança sistemática e contínua em qualquer parâmetro de uma amostra, excluindo as mudanças periódicas, ou seja, verifica-se o sentido de deslocamento da série ao longo de vários anos. A sazonalidade,S_t, pode ser compreendida como as flutuações ocorridas em períodos mensais, trimestrais ou até diários (menores ou igual a um ano), geralmente observada em fenômenos climáticos. A influência da tendência sobre a componente sazonal é muito forte [45]. De maneira geral, uma série temporal pode ser representada pela seguinte equação:

$$X_t = T_t + S_t + \varepsilon_t, \tag{3.4}$$

onde ε_t é o erro aleatório, devendo se comportar como uma série ruído branco de acordo com a definição (10°).

Supondo que a série hidrológica da estação hidrométrica de Manaus (ver Figura 3.1), admita as componentes tendência e de sazonalidade, com período $s = 12$, utilizaremos o modelo proposto por Box and Jenkins, 1970, SARIMA de ordem $(p, d, q)\times(P, D, Q)_{12}$ para modelar os níveis de água do Rio Negro. A equação que descreve este modelo é:

$$\phi(B)\Phi(B^{12})(1 - B^{12})^D(1 - B)^d X_t = \theta(B)\Theta(B^{12})\varepsilon_t, \tag{3.5}$$

sendo

$$\phi(B) = 1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - ... - \phi_p B^p, \tag{3.6}$$

$$\theta(B) = 1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - ... - \theta_q B^q, \tag{3.7}$$

$$\Phi(B^{12}) = 1 - \Phi_1 B^{12} - ... - \Phi_P B^{12P}, \tag{3.8}$$

$$\Theta(B^{12}) = 1 - \Theta_1 B^{12} - ... - \Theta_Q B^{12Q}, \tag{3.9}$$

onde p e q representam os graus dos polinômios $\phi(B)$ e $\theta(B)$, respectivamente, d é o numero de vezes que se diferencia uma série para torná-la estacionária, denominado de ordem de integração, P e Q representam os graus dos polinômios sazonais $\Phi(B^{12})$ e $\Theta(B^{12})$, respectivamente e D o número de diferenças sazonais. Em geral, os valores de D e d são iguais a 1, e os valores de P e Q são menores que 2 (Brockwell and Davis, 2002; Bovas and Ledolter, 2005).

A estratégia de modelagem para o modelo SARIMA foi baseada em um ciclo de três

etapas iterativas: identificação do modelo; estimação e verificação da adequabilidade do modelo. A etapa de identificação consisti em selecionar valores para p, d e q e P, D e Q, através da análise da ACF e PACF. Essa etapa envolve subjetividade e julgamento pessoal. Na etapa de estimação, os coeficientes foram estimados usando técnicas estatísticas, na presente situação o metódo da máxima probabilidade [43], [44]. Na última etapa observou-se se o modelo identificado e estimado descrevia adequadamente o comportamento dos dados da série X_t. Quando não era adequado, o ciclo recomeçava [43], [44].

A verificação da adequabilidade do modelo SARIMA, com N observações, é efetuada analisando as autocorrelações amostrais dos erros, as quais devem seguir, assintoticamente, uma distribuição normal com média zero e variância $1/n$, gerando uma série ruído branco, onde $n = N - D - d$ indica o número de observações da série diferenciada. Como os erros verdadeiros não são conhecidos, a inferência baseia-se nos erros estimados, $\widehat{\varepsilon}_t$. Desta forma, se o modelo estiver corretamente especificado, os resíduos não devem apresentar correlação serial, pois toda a dinâmica dos dados já foi capturada pelo modelo proposto [43], [44].

De acordo com Schöngart et al., 2007; Amarasekera et al.,1997, os índices do ENSO influenciam os níveis de água do Rio Negro. Supomos, neste estudo, que as anomalias da SST do NATL, também, exercem influências nestes níveis. A partir da Eq. (3.3) mensuramos se estas suposições eram verídicas para os níveis de água do Rio Negro Manaus (ver Figura 2.1). A autocorrelação linear das séries da Figura 3.1, também, foi medida utilizando a Eq. (3.3). Nas duas situações descritas acima a probabilidade de insucesso do evento, significância, $p - value < 0.005$, foi mantida. Obtivemos um resultado positivo para as análises, o que nos levou a utilização dos modelos de regressão linear.

Uma vez observado que o modelo de Box & Jenkins descreve as séries hidrológicas em estudos (ver Figura 3.1) com boa precisão, e que os índices ENSO e a SST no NATL influênciam nos níveis de água do Rio Negro, utilizamos uma regressão linear para explicar

e prever os níveis máximos e mínimos mensais de água em Manaus. As equações de recorrência obtidas nesta regressão linear estão apresentadas na seção de resultados Eqs. (4.1), (4.2), (4.3) and (4.4). Estas equação geraram previsões com 7 e 11 meses de antecedência.

Com a pespectiva de aumentar o período de previsão de 1 para 2 anos, os resultados obtidos com as equações de regressão, descritas acima, foram acopladas as séries de dados X_t. Esta nova série foi substituida no modelo de Box & Jenkins. A este modelo denominamos de SARIMA-ACOPLADO.

Os dados mensais dos índices do ENSO as anomalias da SST do NATL foram obtidos do CPC, no site (www.cpc.noaa.gov/products), e estão mostrados na Figura 3.2.

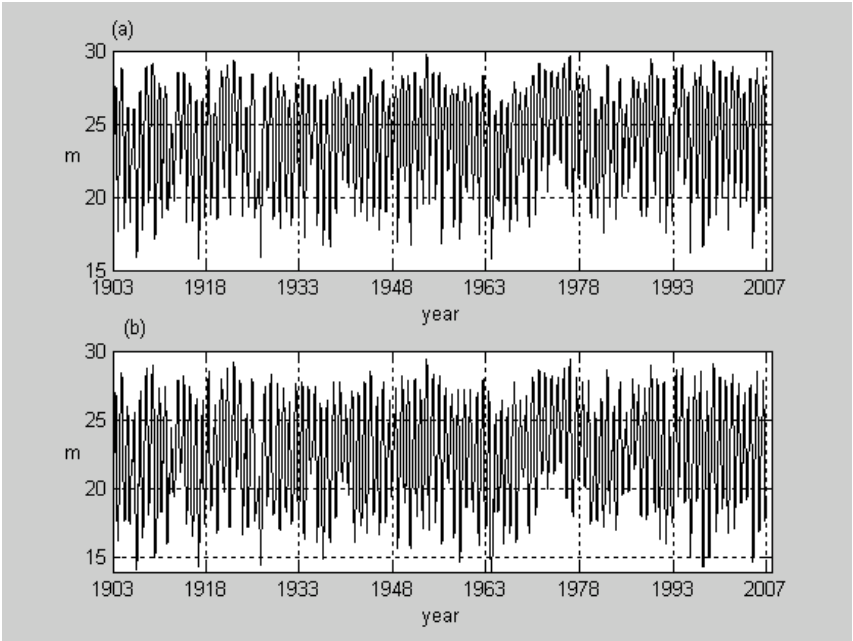

Figura 3.1: Níveis de água do Rio Negro em Manaus em metros (m): (a) Nível máximo mensal, (b) Nível mínimo mensal.

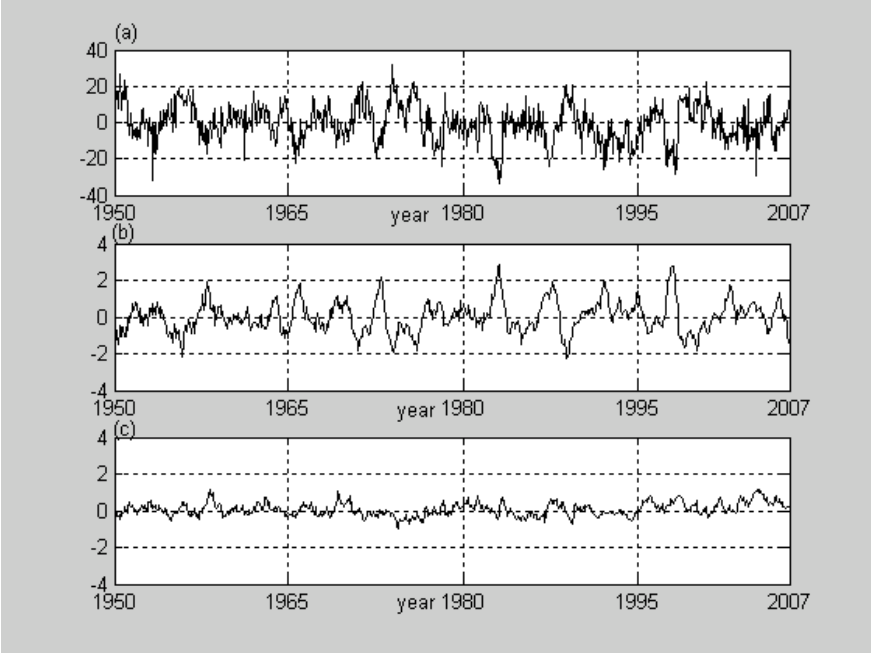

Figura 3.2: ENSO-índices e índice da anomalia da SST do NATL: (a) Índice SOI, (b) Anomalias da SST do Niño 3.4, (c) Anomalias da SST do NATL.

3.1 Suposição

O presente trabalho parte da seguinte suposição: sendo a Amazônia uma região que tem muita influência no clima da Terra, então é razoável pensar que a componente hidrológica desta, tenha alguma relação com as componentes climáticas globais, tal como: temperatura da superfície do mar. Partindo disto, tentaremos correlacionar as coeficiêntes dos modelos calibrados pelo autor no PIB-E/042/2007 com os ENSOS-índices e a partir disto tentar aumentar o tempo de previsão do nível do Rio Negro na cidade de Manaus, que atualmente é de um ano.

Capítulo 4

Resultados

As equações de recorrência para as previsões com uma antecedência de 11 meses para os níveis de máximo e mínimo de água do Rio Negro, descritas na seção anterior, estão mostradas abaixo:

Previsão de máximo:

$$
\begin{aligned}
(Fev_\max)_t &= a_1 + b_1(Dez_Nino_3.4)_{t-1} \\
(Mar_\max)_t &= a_2 + b_2(Fev_\max)_t \\
(Abr_\max)_t &= a_3 + b_3(Dez_Nino_3.4)_{t-1} \\
(Mai_\max)_t &= a_4 + b_4(Abr_\max)_t \\
(Jun_\max)_t &= a_5 + b_5(Jan_SOI)_t \\
(Jul_\max)_t &= a_6 + b_6(Jan_SOI)_t \\
(Ago_\max)_t &= a_7 + b_7(Jan_SOI)_t \\
(Set_\max)_t &= a_8 + b_8(Nov_SOI)_{t-1} \\
(Out_\max)_t &= a_9 + b_9(Set_\max)_t \\
(Nov_\max)_t &= a_{10} + b_{10}(Out_\max)_t \\
(Dez_\max)_t &= a_{11} + b_{11}(Nov_\max)_t
\end{aligned}
\tag{4.1}
$$

Previsão de mínimo:

$$
\begin{aligned}
(Fev_\min)_t &= c_1 + d_1(Jan_\max)_t \\
(Mar_\min)_t &= c_2 + d_2(Fev_\max)_t \\
(Abr_\min)_t &= c_3 + d_3(Dez_Nino_3.4)_{t-1} \\
(Mai_\min)_t &= c_4 + d_4(Dez_Nino_3.4)_{t-1} \\
(Jun_\min)_t &= c_5 + d_5(Jan_SOI)_t \\
(Jul_\min)_t &= c_6 + d_6(Jan_SOI)_t \\
(Ago_\min)_t &= c_7 + d_7(Jan_SOI)_t \\
(Set_\min)_t &= c_8 + d_8(Nov_SOI)_{t-1} \\
(Out_\min)_t &= c_9 + d_9(Out_\max)_t \\
(Nov_\min)_t &= c_{10} + d_{10}(Out_\min)_t \\
(Dez_\min)_t &= c_{11} + d_{11}(Nov_\max)_t
\end{aligned} \tag{4.2}
$$

onde $Dez_Nino_3.4$, Jan_SOI e Nov_SOI são os índices do ENSO e SOI dos meses correspondentes, que foram obtidos no site do CPC.

As equações de recorrência para as previsões com uma antecedência de 7 meses para os níveis de máximo e mínimo de água do Rio Negro, estão mostradas a seguir:

Previsão de máximo

$$
\begin{aligned}
(Fev_\max)_t &= e_1 + f_1(Dez_Nino_3.4)_{t-1} \\
(Mar_\max)_t &= e_2 + f_2(Dez_Nino_3.4)_{t-1} \\
(Abr_\max)_t &= e_3 + f_3(Dez_Nino_3.4)_{t-1} \\
(Mai_\max)_t &= e_4 + f_4(Jan_SOI)_t \\
(Jun_\max)_t &= e_5 + f_5(Dez_Nino_3.4)_{t-1} \\
(Jul_\max)_t &= e_6 + f_6(Dez_Nino_3.4)_{t-1} \\
(Ago_\max)_t &= e_7 + f_7(Nov_SOI)_{t-1} \\
(Set_\max)_t &= e_8 + f_8(Mai_NATL)_t \\
(Out_\max)_t &= e_9 + f_9(Mai_NATL)_t \\
(Nov_\max)_t &= e_{10} + f_{10}(Mai_NATL)_t \\
(Dez_\max)_t &= e_{11} + f_{11}(Nov_\max)_t
\end{aligned} \tag{4.3}
$$

Previsão de mínimo

$$
\begin{aligned}
(Fev_\min)_t &= g_1 + h_1(Jan_\max)_t \\
(Mar_\min)_t &= g_2 + h_2(Jan_SOI)_t \\
(Abr_\min)_t &= g_3 + h_3(Dez_Nino_3.4)_{t-1} \\
(Mai_\min)_t &= g_4 + h_4(Dez_Nino_3.4)_{t-1} \\
(Jun_\min)_t &= g_5 + h_5(Jan_SOI)_t \\
(Jul_\min)_t &= g_6 + h_6(Jan_SOI)_t \\
(Ago_\min)_t &= g_7 + h_7(Mai_NATL)_t \\
(Set_\min)_t &= g_8 + h_8(Mai_NATL)_t \\
(Out_\min)_t &= g_9 + h_9(Mai_NATL)_t \\
(Nov_\min)_t &= g_{10} + h_{10}(Mai_NATL)_t \\
(Dez_\min)_t &= g_{11} + h_{11}(Nov_\max)_t
\end{aligned}
\tag{4.4}
$$

onde Mai_NATL é o índice da anomalia da SST do NATL no mês de maio, também encontrado no site do CPC. Note que as equações de recorrência não prevêem o mês de janeiro, pois os dados de entrada destas são: os índices do ENSO de dezembro na região do Niño 3.4, SOI de novembro, do ano anterior, e o SOI de janeiro do ano corrente.

Os coeficientes das equações de recorrência (a_j, b_j, c_j, d_j, e_j, f_j, g_j e h_j para $j =$ 1,..,11), com a finalidade de prever os anos de 2005 e 2008 estão mostrados nas Tabelas II.1, IV.1, IV.2, IV.3, IV.4. As previsões com antecedência de 11 e 7 meses para os anos de 2005 e 2008 estão colocadas nas Tabelas IV.5 e IV.6, nesta ordem.

Para a escolha adequada da ordem do SARIMA, assumui-se sazonalidade de $s =$ 12 , devido ao ciclo hidrológico. Comprovamos, também, a existência da componente tendência pelo teste de Cox-Stuart, de acordo com os resultados obtidos por Brillinger, em 1989 e em 1994.

Para tornar a série estacionária, de acordo com a definição (9°), fez-se a primeira diferença ($d = 1$) nas mesmas. Considerando o ciclo hidrológico, realizamos também a primeira diferença sazonal ($D = 1$) para os níveis máximos e mínimos, respectivamente.

Como resultado da diferenciação sazonal, obteve-se as ACF e PACF dos máximos e mínimos mensais, representadas nas Figuras 4.1.e 4.2, respectivamente. A partir da análise destas figuras obtivemos as ordens para o modelo SARIMA, que apresentavam menor erro quadrático médio, como sendo $(1,1,1) \times (0,1,1)_{12}$ para os níveis máximos mensais e $(0,1,1) \times (0,1,1)_{12}$ para os níveis mínimos mensais.

Realizando as devidas substituições das ordens nos modelos SARIMA na Eq. (3.5), para o tempo $t+h$, temos como resultado as seguintes equações para o nível máximo:

$$\begin{aligned} X_{t+h} &= X_{t+h-1} + X_{t+h-12} - X_{t+h+13} + \phi_{\max} X_{t+h-1} - \phi_{\max} X_{t+h-13} \\ &\quad -\phi_{\max} X_{t+h-2} + \phi_{\max} X_{t+h-14} + \varepsilon_{t+h} - \theta_{\max} \varepsilon_{t+h-1} - \Theta_{\max} \varepsilon_{t+h-12} \\ &\quad +\theta_{\max} \Theta_{\max} \varepsilon_{t+h-13} \end{aligned} \tag{4.5}$$

e para o nível de mínimo

$$\begin{aligned} X_{t+h} &= X_{t+h-1} + X_{t+h-12} - X_{t+h-13} + \varepsilon_{t+h} - \theta_{\min} \varepsilon_{t+h} - \Theta_{\min} \varepsilon_{t+h-12} \\ &\quad +\theta_{\min} \Theta_{\min} \varepsilon_{t+h-13} \end{aligned} \tag{4.6}$$

Os parâmetros estimados $\phi_{\max}$, $\theta_{\max}$, $\Theta_{\max}$, $\theta_{\min}$ e $\Theta_{\min}$ para prever os anos de 2006, 2007, 2008 e 2009 estão mostrados na Tabela IV.7, juntamente com os seus desvios-padrão. Observou-se que ε_t é uma série de ruído branco, independente e identicamente distribuído, conforme mostrado nas Figuras 4.3.e 4.4 para os níveis máximos e mínimos, respectivamente.As previsões e os dados observados nos anos de 2006 a 2009 estão apresentadas na Figura 4.5. Toda esta análise comprova que os modelos SARIMA $(1,1,1) \times (0,1,1)_{12}$ (níveis máximos) e o SARIMA $(0,1,1) \times (0,1,1)_{12}$ (níveis mínimos) são adequados para descrever as séries hidrológicas do Rio Negro em Manaus.

As previsões geradas pelas equações de recorrência, para os anos de 2005 e 2008,

$a_1 = 2337$	$b_1 = 49.5$	$c_1 = -46.6$	$d_1 = 1.02$
$a_2 = 435$	$b_2 = 0.869$	$c_2 = -251$	$d_2 = 1.1$
$a_3 = 2624$	$b_3 = -41.7$	$c_3 = 2485$	$d_3 = -53.7$
$a_4 = 487$	$b_4 = 0.862$	$c_4 = 2638$	$d_4 = -40.6$
$a_5 = 2794$	$b_5 = 4.46$	$c_5 = 2752$	$d_5 = 4.57$
$a_6 = 2784$	$b_6 = 5.39$	$c_6 = 2716$	$d_6 = 6.76$
$a_7 = 2697$	$b_7 = 7.13$	$c_7 = 2498$	$d_7 = 9.3$
$a_8 = 2447$	$b_8 = 9.35$	$c_8 = 2100$	$d_8 = 8.81$
$a_9 = -364$	$b_9 = 0.99$	$c_9 = 40$	$d_9 = 0.872$
$a_{10} = 843$	$b_{10} = 0.535$	$c_{10} = 278$	$d_{10} = 0.833$
$a_{11} = 780$	$b_{11} = 0.66$	$c_{11} = 302$	$d_{11} = 0.832$

Tabela IV.1: Coeficientes de previsão Eqs (3.1) e (3.2), para o ano de 2005 dos níveis máximos e mínimos mensais, com 11 meses de antecedência .

foram substituindas nas séries hidrológica (ver Figuras 3.1) e esta nova série foi utilizada como entrada no modelo SARIMA para níveis máximos e mínimos. A este modelo denominamos de SARIMA-ACOPLADO, sendo ele capaz de gerar previsões com uma antecedência de 23 e 19 meses. Com o modelo SARIMA-ACOPLADO geramos previsões para os anos de 2005 até 2006, apresentadas nas Figuras 4.6.e 4.7 e as previsões 2008 até 2009, estão mostradas nas Figuras 4.8.e 4.9. A Tabela IV.8 mostra os níveis máximos e mínimos observados nos anos 2005 a 2008 na estação hidrométrica de Manaus.

Mostramos na Tabela IV.11 as previsões para os níveis de água de 2009, usando o SARIMA$(1,1,1) \times (0,1,1)_{12}$ (níveis máximos), SARIMA $(0,1,1) \times (0,1,1)_{12}$ (níveis mínimos) e os modelos gerados com os índices do ENSO, em particular as Eqs. (4.1), (4.2), destas previsões observamos que o nível máximo previsto pelo SARIMA$(1,1,1) \times (0,1,1)_{12}$ está registrando o terceiro maior nível de todas as observarções já realizada.

As eficiências dos modelos SARIMA e SARIMA-ACOPLADO foram medida calculando-se o erro percentual entre os níveis previsto pelos modelos e os observados no porto de Manaus. Estes erros podem ser vistos na Tabela IV.9 para o período 2005 a 2006 e na Tabela IV.10 para o ano de 2008.

$a_1 = 2343$	$b_1 = -50.5$	$c_1 = -52.7$	$d_1 = 1.02$
$a_2 = 460$	$b_2 = 0.858$	$c_2 = -244$	$d_2 = 1.10$
$a_3 = 2628$	$b_3 = -49.9$	$c_3 = 2489$	$d_3 = -53.3$
$a_4 = 482$	$b_4 = 0.864$	$c_4 = 2641$	$d_4 = -39.6$
$a_5 = 2796$	$b_5 = 4.46$	$c_5 = 2754$	$d_5 = 4.60$
$a_6 = 2784$	$b_6 = 5.29$	$c_6 = 2713$	$d_6 = 6.44$
$a_7 = 2694$	$b_7 = 6.78$	$c_7 = 2489$	$d_7 = 8.70$
$a_8 = 2447$	$b_8 = 9.35$	$c_8 = 2090$	$d_8 = 9.43$
$a_9 = -400$	$b_9 = 1.00$	$c_9 = 41$	$d_9 = 0.872$
$a_{10} = 891$	$b_{10} = 0.513$	$c_{10} = 284$	$d_{10} = 0.830$
$a_{11} = 799$	$b_{11} = 0.652$	$c_{11} = 314$	$d_{11} = 0.827$

Tabela IV.2: Coeficientes de previsão Eqs (3.1) e (3.2), para o ano de 2008 dos níveis máximos e mínimos mensais, com 11 meses de antecedência .

$e_1 = 2337$	$f_1 = -49.5$	$g_1 = -46.6$	$h_1 = 1.02$
$e_2 = 2464$	$f_2 = -54.1$	$g_2 = 2328$	$h_2 = 5.99$
$e_3 = 2624$	$f_3 = -41.7$	$g_3 = 2624$	$h_3 = -41.7$
$e_4 = 2748$	$f_4 = 3.69$	$g_4 = 2638$	$h_4 = -40.6$
$e_5 = 2795$	$f_5 = -38.2$	$g_5 = 2752$	$h_5 = 4.57$
$e_6 = 2784$	$f_6 = -43$	$g_6 = 2716$	$h_6 = 6.76$
$e_7 = 2691$	$f_7 = 6.62$	$g_7 = 2502$	$h_7 = -234$
$e_8 = 2462$	$f_8 = 248$	$g_8 = 2115$	$h_8 = -335$
$e_9 = 2076$	$f_9 = -332$	$g_9 = 1850$	$h_9 = -293$
$e_{10} = 1952$	$f_{10} = -170$	$g_{10} = 1819$	$h_{10} = -231$
$e_{11} = 780$	$f_{11} = 0.66$	$g_{11} = 302$	$h_{11} = 0.832$

Tabela IV.3: Coeficientes de previsão Eqs (3.3) e (3.4), para o ano de 2005 dos níveis máximos e mínimos mensais, com 7 meses de antecedência .

$e_1 = 2343$	$f_1 = -50.1$	$g_1 = -52.7$	$h_1 = 1.02$
$e_2 = 2469$	$f_2 = -53.8$	$g_2 = 2333$	$h_2 = 6.3$
$e_3 = 2628$	$f_3 = -40.9$	$g_3 = 2489$	$h_3 = -53.3$
$e_4 = 2750$	$f_4 = 3.79$	$g_4 = 2641$	$h_4 = -39.6$
$e_5 = 2798$	$f_5 = -37.6$	$g_5 = 2754$	$h_5 = 4.6$
$e_6 = 2786$	$f_6 = -42.7$	$g_6 = 2713$	$h_6 = 6.44$
$e_7 = 2690$	$f_7 = 6.72$	$g_7 = 2502$	$h_7 = -242$
$e_8 = 2461$	$f_8 = -257$	$g_8 = 2113$	$h_8 = -340$
$e_9 = 2074$	$f_9 = -337$	$g_9 = 1849$	$h_9 = -297$
$e_{10} = 1954$	$f_{10} = -158$	$g_{10} = 1818$	$h_{10} = -235$
$e_{11} = 799$	$f_{11} = 0.652$	$g_{11} = 314$	$h_{11} = 0.827$

Tabela IV.4: Coeficientes de previsão Eqs (3.3) e (3.4), para o ano de 2008 dos níveis máximos e mínimos mensais, com 7 meses de antecedência .

Mês	Nível Máximo (11)	Nível Mínimo (11)	Nível Máximo (7)	Nível Mínimo (7)
Jan	21.87	21.08	21.87	21.08
Fev	22.95	21.84	22.95	21.84
Mar	24.18	22.73	24.18	23.38
Abr	25.88	24.39	25.88	25.88
Mai	27.54	26.03	27.54	26.04
Jun	27.62	26.98	27.62	27.60
Jul	27.47	26.37	27.47	27.28
Ago	26.29	23.90	26.29	22.25
Set	21.69	20.18	21.69	17.19
Out	16.84	17.59	16.84	15.04
Nov	17.51	17.44	17.51	15.46
Dez	19.35	18.81	19.35	17.59

Tabela IV.5: Previsões para o nível de água em (metros) do Rio Negro no ano de 2005: máximos; primeira e terceira coluna com 11 e 7 meses de antecedência, respectivamente, mínimos; segunda e quarta coluna com 11 e 7 meses de antecedência, respectivamente.

Mês	Nível Máximo (11)	Nível Mínimo (11)	Nível Máximo (7)	Nível Mínimo (7)
Jan	23.81	21.49	23.81	21.49
Fev	24.15	23.76	24.15	23.76
Mar	25.32	24.22	25.47	24.22
Abr	26.87	25.66	26.87	25.66
Mai	28.04	26.98	28.03	26.98
Jun	28.59	28.18	28.52	28.19
Jul	28.58	28.04	28.48	28.09
Ago	27.89	24.87	27.56	24.87
Set	25.36	20.92	24.45	20.92
Out	21.36	18.31	20.53	18.31
Nov	19.86	18.04	19.44	18.04
Dez	22.33	19.22	20.66	19.22

Tabela IV.6: Previsões para o nível de água em (metros) do Rio Negro no ano de 2008.

Ano	$\phi_{\max}$	$\theta_{\max}$	$\Theta_{\max}$	$\theta_{\min}$	$\Theta_{\min}$
2006	-0.5045	-0.6433	0.9776	-0.2781	0.9727
Desvio Padrão	0.1184	0.1048	0.0044	0.0276	0.0074
2007	-0.5034	-0.6436	0.9742	-0.2821	0.9736
Desvio Padrão	0.1169	0.1034	0.0052	0.0273	0.0072
2008	-0.5036	-0.6425	0.9774	-0.2831	0.9734
Desvio Padrão	0.1175	0.1042	0.0046	0.0272	0.0065
2009	-0.4998	-0.6413	0.9781	-0.2822	0.9772
Desvio Padrão	0.1156	0.1023	0.0054	0.0271	0.0056

Tabela IV.7: Estimação dos parâmetros dos modelos SARIMA (1,1,1)x(0,1,1)12 nível máximo e SARIMA (0,1,1)x(0,1,1)12 nível mínimo do Rio Negro em Manaus, para previsões nos anos de 2006, 2007,2008 e 2009.

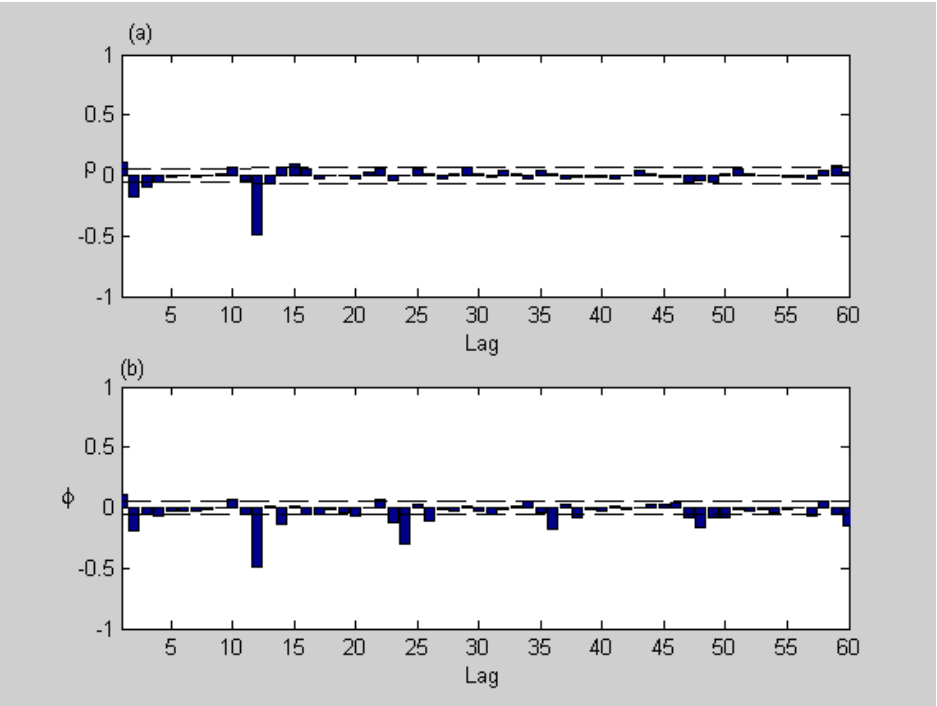

Figura 4.1: (a) ACF: Função de autocorrelação e (b) PACF: Função de autocorrelação parcial, para os níveis máximos mensais do Rio Negro em Manaus.

Mês	2005_{max}	2005_{min}	2006_{max}	2006_{min}	2008_{max}	2008_{min}
Jan	21.87	21.08	23.49	20.70	23.81	21.49
Fev	23.47	21.89	25.83	23.55	24.92	23.86
Mar	26.01	23.56	26.38	25.88	26.38	25.05
Abr	27.17	26.04	27.25	26.39	27.00	26.41
Mai	28.09	27.22	28.71	27.27	28.16	27.03
Jun	28.10	27.52	28.84	28.53	28.62	28.20
Jul	27.48	25.61	28.50	26.95	28.53	27.28
Ago	25.52	20.94	26.88	23.60	27.21	24.52
Set	20.77	16.63	23.45	19.07	24.38	19.86
Out	16.53	14.75	18.94	16.89	19.78	18.43
Nov	18.74	15.13	19.12	17.01	19.83	18.50
Dez	20.61	18.81	21.40	19.24	22.33	19.89

Tabela IV.8: Níveis de água máximos e mínimos mensais do Rio Negro observados na estação hidrométrica de Manaus nos anos de 2005, 2006 e 2008.

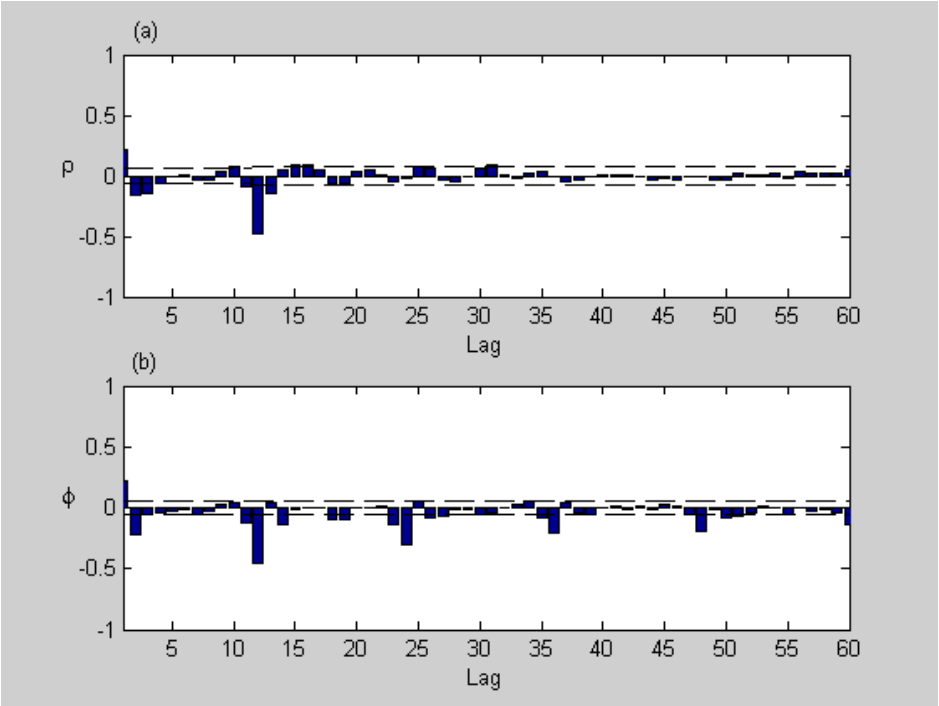

Figura 4.2: ACF e PACF (a) ACF: Função de autocorrelação e (b) PACF: Função de autocorrelação parcial para os níveis mínimos mensais do Rio Negro em Manaus.

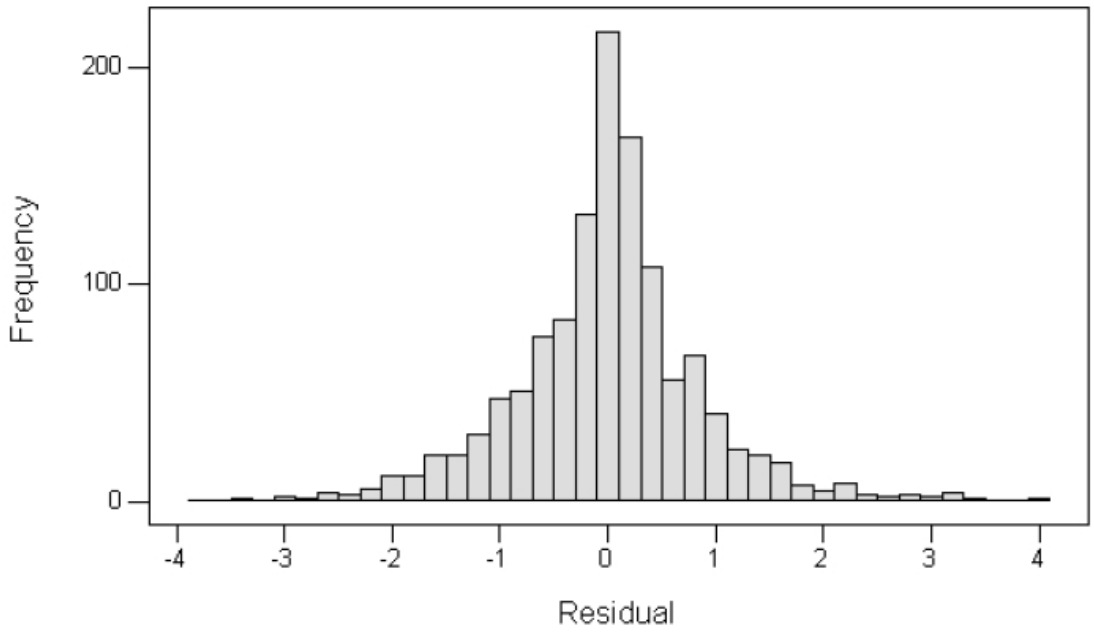

Figura 4.3: Histograma dos resíduos dos Níveis máximos mensais do Rio Negro em Manaus, confirmando a suposição de normalidade dos erros do modelo SARIMA $(1,1,1)\times(0,1,1)_{12}$.

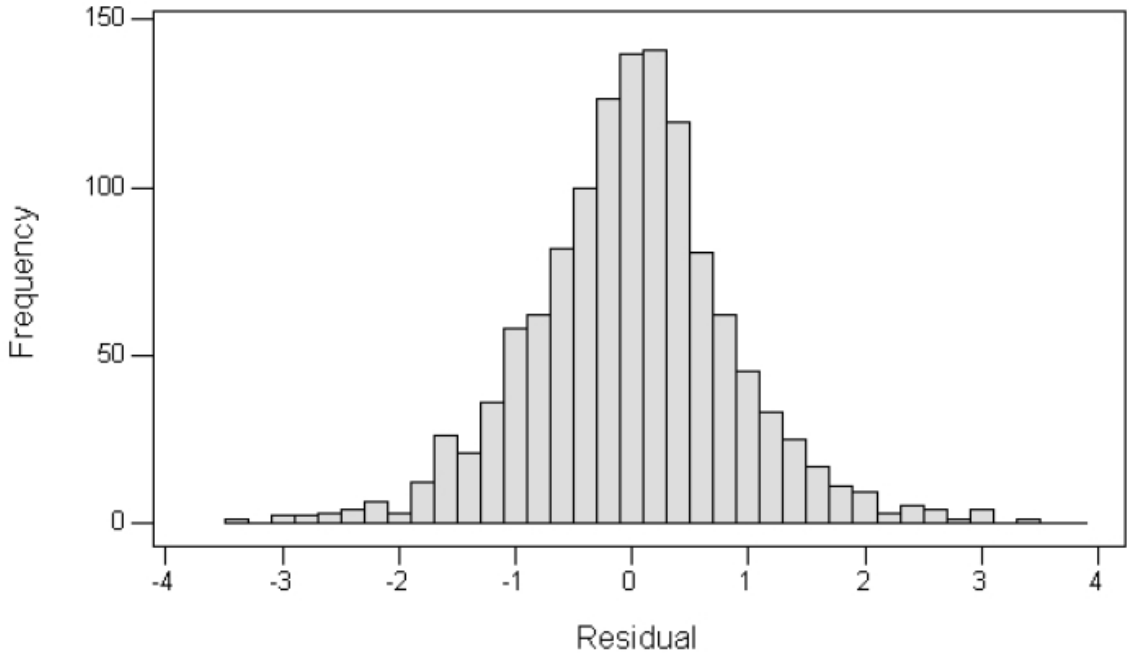

Figura 4.4: Histograma dos resíduos dos Níveis mínimos mensais do Rio Negro em Manaus, confirmando a suposição de normalidade dos erros do modelo SARIMA $(0,1,1) \times (0,1,1)_{12}$.

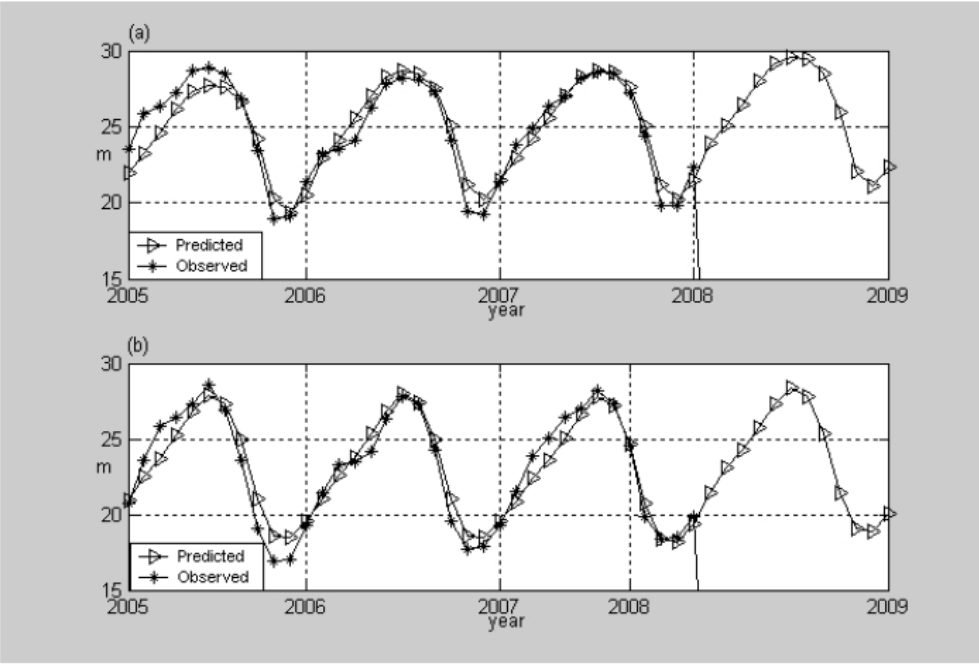

Figura 4.5: Previsão dos níveis de água do Rio Negro dado em metros (m) no período de 2006-2009: (a) Níveis máximos previstos e observados usando o modelo SARIMA $(1,1,1)\times(0,1,1)_{12}$, (b) Níveis mínimos previstos e observados usando o modelo SARIMA $(0,1,1)\times(0,1,1)_{12}$.

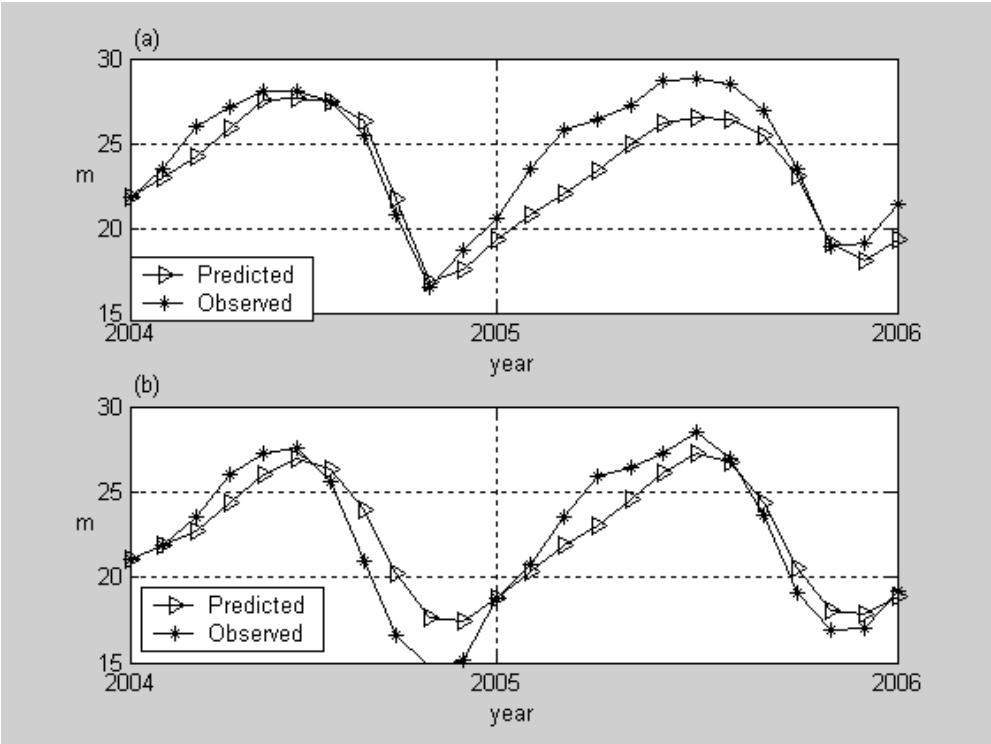

Figura 4.6: Previsão dos níveis de água do Rio Negro dado em (m) no período de 2005 -2006, usando o modelo SARIMA-ACOPLADO com 23 meses de antecedência: (a) Níveis máximos previstos e observados (b) Níveis mínimos previstos e observados.

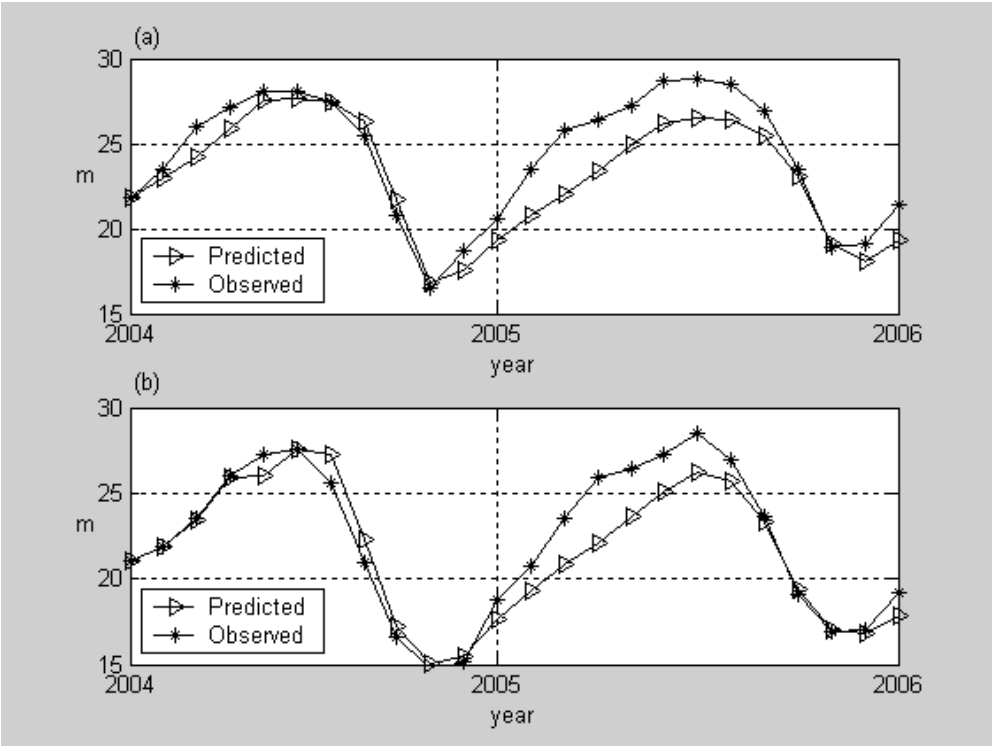

Figura 4.7: Previsão dos níveis de água do Rio Negro Manaus dado em (m) no período de 2005 -2006, usando o modelo SARIMA-ACOPLADO com 16 meses de antecedência: (a) Níveis máximos previstos e observados (b) Níveis mínimos previstos e observados.

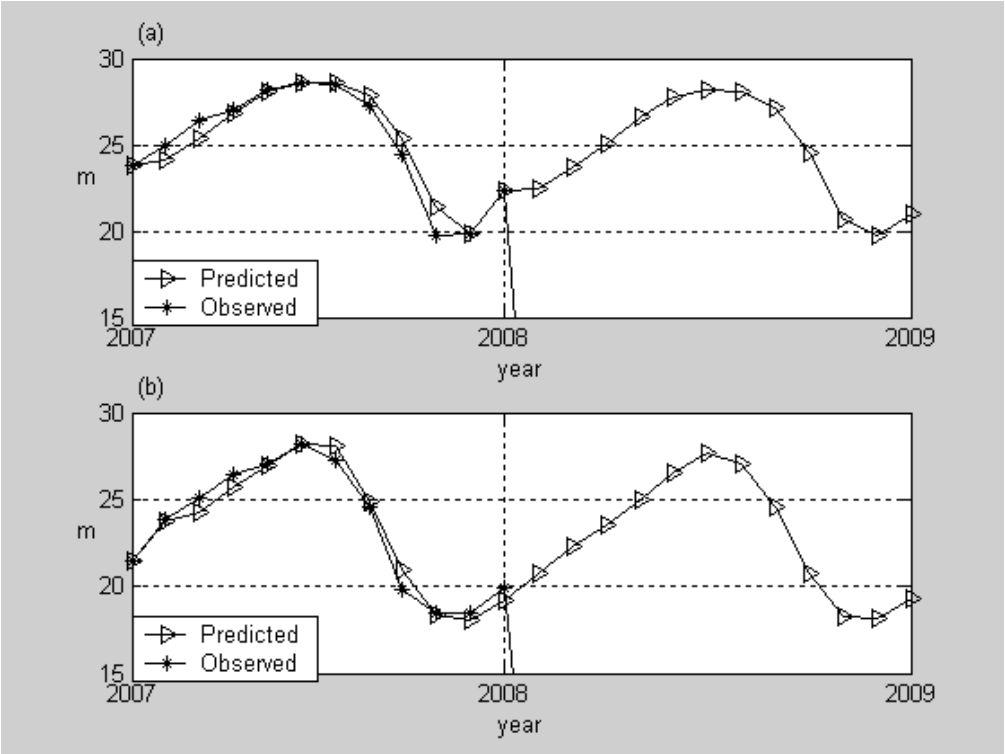

Figura 4.8: Previsão dos níveis de água do Rio Negro dado em (m) no período de 2008 -2009, usando o modelo SARIMA-ACOPLADO com 23 meses de antecedência: (a) Níveis máximos previstos e observados (b) Níveis mínimos previstos e observados.

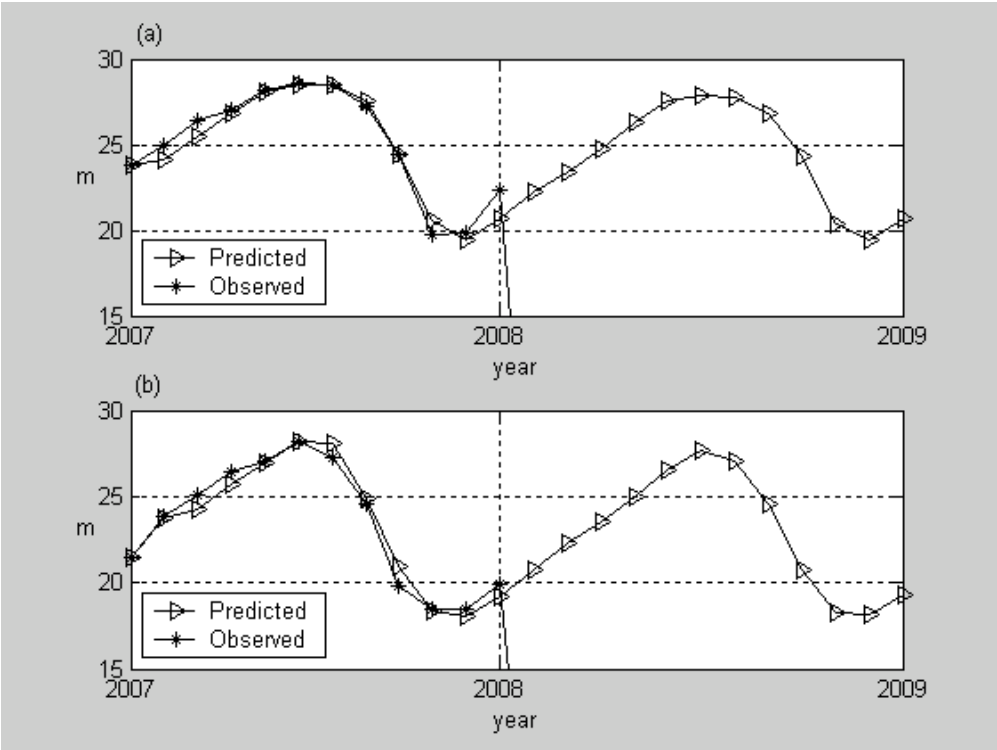

Figura 4.9: Previsão dos níveis de água do Rio Negro dado em (m) no período de 2008 -2009, usando o modelo SARIMA-ACOPLADO com 16 meses de antecedência: (a) Níveis máximos previstos e observados (b) Níveis mínimos previstos e observados.

$Erro_{2005-2006}$	Max_{23}	Max_{19}	Min_{23}	Min_{19}	$SARIMA_{max}$	$SARIMA_{min}$
Jan	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.032	0.017
Fev	0.021	0.021	0.002	0.002	-0.011	-0.016
Mar	0.065	0.070	0.034	0.007	0.033	0.003
Abr	0.047	0.047	0.063	0.005	0.018	0.040
Mai	0.032	0.019	0.043	0.04	0.006	0.025
Jun	0.002	0.016	0.019	-0.002	-0.007	-0.005
Jul	-0.016	0.000	-0.029	-0.061	-0.025	-0.059
Ago	-0.061	-0.030	-0.141	-0.059	-0.069	-0.182
Set	-0.136	-0.044	-0.213	-0.032	-0.196	-0.256
Out	-0.193	-0.018	-0.193	-0.019	-0.271	-0.253
Nov	-0.012	0.065	-0.152	-0.021	-0.060	-0.210
Dez	0.013	0.060	-0.000	0.069	-0.023	-0.027
Jan	0.071	0.115	0.017	0.072	0.066	-0.012
Fev	0.110	0.148	0.071	0.130	0.101	0.045
Mar	0.075	0.114	0.108	0.174	0.068	0.084
Abr	0.048	0.085	0.068	0.118	0.040	0.043
Mai	0.054	0.089	0.042	0.087	0.047	0.018
Jun	0.045	0.080	0.044	0.087	0.038	0.022
Jul	0.037	0.073	0.007	0.047	0.031	-0.014
Ago	0.013	0.051	-0.033	0.013	0.007	-0.055
Set	-0.026	0.018	-0.076	-0.016	-0.031	-0.103
Out	-0.067	-0.011	-0.071	-0.004	-0.073	-0.102
Nov	0.000	0.053	-0.051	0.013	-0.009	-0.084
Dez	0.050	0.097	-0.017	0.079	0.041	-0.014

Tabela IV.9: Erro percentual entre os níveis máximos e mínimos mensais previstos e observados no Porto de Manaus no período de 2005 até 2006, usando os modelos SARIMA-ACOPLADO e SARIMA.

$Erro_{2008}$	Max_{23}	Max_{19}	Min_{23}	Min_{19}	SARIMAmax	SARIMAmin
Jan	0	0	0	0	0.126	-0.068
Fev	0.030	0.030	0.004	0.004	0.102	-0.012
Mar	0.039	0.034	0.033	0.033	0.105	-0.019
Abr	0.004	0.004	0.028	0.028	0.070	-0.024
Mai	0.004	0.004	0.001	0.001	0.055	-0.047
Jun	0.001	0.003	0.000	0.000	0.030	-0.016
Jul	-0.001	0.001	-0.027	-0.027	0.047	-0.046
Ago	-0.025	-0.012	-0.014	-0.014	0.092	-0.125
Set	-0.040	-0.003	-0.053	-0.053	0.147	-0.261
Out	-0.080	-0.038	0.006	0.006	0.070	-0.148
Nov	-0.002	0.0194	0.024	0.024	0.081	-0.091
Dez	-0.000	0.0744	0.0330	0.033	0.133	-0.079

Tabela IV.10: Erro percentual entre os níveis máximos e mínimos mensais previstos e observados no Porto de Manaus no ano de 2008, usando os modelos SARIMA-ACOPLADO e SARIMA.

Mês	(ENSO)2009_{max}	(ENSO)2009_{min}	(SARIMA)2009_{max}	(SARIMA)2009_{min}
Jan	24.65	22.43	23.89	21.45
Fef	23.83	24.57	25.07	23.05
Mar	25.05	23.78	26.45	24.27
Abr	26.58	25.30	27.97	25.75
Mai	27.78	26.69	29.20	27.26
Jun	28.38	27.97	29.56	28.40
Jul	28.33	27.71	29.44	27.81
Ago	27.55	25.64	28.50	25.33
Set	26.04	22.43	25.96	21.40
Out	22.02	19.63	22.04	19.04
Nov	20.20	19.13	21.09	18.90
Dez	21.20	19.84	22.39	20.01

Tabela IV.11: Previsões para níveis máximos e mínimos, ano de 2009: primeira e segunda coluna Eqs. (3.1) e (3.2), terceira e quarta coluna Eqs (3.5) e (3.6), respectivamente.

Capítulo 5

Conclusão

Os resultados deste trabalho mostram que os níveis de água do Rio Negro, em Manaus (ver Figura 2.1), são influenciados pelo fenômeno ENSO e pelas anomalias da SST do Atlântico, o que está corroborando com os estudos de Amarasekera et al., 1997; Williams et al., 2005; Schongart et al., 2007; Nobre et al., 1996; Foley et al., 2002; Mechoso et al., 1988; Souza et al ., 2000 and Hastenrath et al ., 1977.

Este estudo mostra que o nível máximo anual do Rio Negro ocorre no mês de junho, como se pode ver nas figuras de 4.5 a 4.8 e nas Tabelas IV.5, IV.6, IV.9e IV.10. Irion et al., 1997. também, comprova esta observação. Nestas figuras e tabelas notamos ainda que o nível de água mínimo anual ocorre entre os meses de outubro e novembro.

Analisando as Tabelas IV.9 e IV.10, as quais exibem os erros percentuais entre o previsto e o observado, concluimos que os modelos SARIMA$(1,1,1) \times (0,1,1)_{12}$ para níveis máximos e SARIMA$(0,1,1) \times (0,1,1)_{12}$ para níveis mínimos são adequados para representar as séries hidrológicas do Rio Negro (ver Figura 3.1). Contudo, estes modelos têm boa eficiência apenas a curto prazo, como também mostra Granger and Newbold, 1977, isto é, só são capazes de retornar previsões confiáveis com antecedência de 12 meses, principalmente para os níveis máximos e mínimos anuais.

Os modelos elaborados a partir dos índices do ENSO e das anomalias da SST do NATL, descrevem de forma satisfatória os níveis máximos e mínimos mensais em Manaus,

como pode ser observado nas Tabelas IV.9 e IV.10, porém o prazo de previsão das Eqs. (4.1) and (4.2) é de 11 meses e as Eqs. (4.3) and (4.4) é de 7 meses. No entanto, estes modelos geram melhores previsões para os níveis mensais do que os modelos SARIMA.

No caso dos modelos SARIMA-ACOPLADO, observamos que eles prevêem com uma antecedência de 23 e 19 meses para os níveis máximos e mínimos, apesar de não retornar boas previsões para todos os meses. Porém, para os máximos e mínimos anuais, o modelo SARIMA-ACOPLADO retorna valores aceitáveis, como pode ser constado nas Tabelas IV.9 e IV.10 (tabelas de erros) e figuras de 4.6 a 4.9.

Contrariando o trabalho de Schongart et al., 2007 e analisando as Tabelas IV.1, IV.2, IV.3, IV.4 e IV.6 cocluimos que os coeficientes de todos os modelos propostos são dinâmicos, isto é, eles variam de um ciclo hidrológico para outro, pois a interação atmosfera-oceano-rio não é estática, caso fosse não teríamos variações na SST, pressão e níveis de água dos grandes rios do mundo, o que está de acordo com o estudo de Potter et al., 2004.

Analisando as Eqs. (4.1) and (4.2), notamos que a partir de fevereiro até agosto algumas variáveis pertencem ao Oceano Pacífico, no corrente ano da previsão, enquanto que a partir de setembro até dezembro temos as variáveis dependendo dos níveis dos meses anteriores. Na situação das Eqs (4.3) and (4.4), observamos que as variáveis de fevereiro até agosto pertencem ao Oceano Pacífico, enquanto que de setembro até novembro elas pertencer ao Oceano Atlântico. Esta depedência nos levar a propor que a maior parte do primeiro semestre do ciclo hidrológico na estação hidrométrica de Manaus é influenciada pelo Oceano Pacífico, enquanto que o segundo semestre é basicamente influenciado pelo oceano Atlântico, que concorda com os resultados de Amarasekera et al., 1997;Mechoso et al., 1988. Pelas figuras de 4.5 a 4.9 observamos que todos os modelos explicam qualitativamente de forma satisfatória os níveis de água do Rio Negro.

De maneira geral vemos que os três modelos retornam boas previsões dos níveis de águas mensais. Esses modelos podem ainda ser extrapolados para outras estações hidrométricas da Amazônia com o intuito de servirem de ferramentas para o geren-

ciamento de atividades tais como: pesca, extrativismo vegetal, agricultura na várzea, extração de madeira ou até como subsidio para a devesa civil quando da ocorrência de eventos singulares como fortes secas e grandes cheias. O aprimoramento dos modelos propostos serão objetos de estudos para trabalhos futuros.

Referências

[1] Capra, Fritjof., 2006. A Teoria da Vida: Uma nova compreensão científica dos sistemas vivos/ tradução: Newton Roberval Eichemberg. São Paulo : Cultrix.

[2] Junk, W.J., 1997. The Central Amazon Floodplain: Ecology of a Pulsing System. Springer, Berlin, Heidelberg, New York.

[3] Junk, W.J., Ohly, J.J., Piedade, M.T.F., Soares, M.G.M., 2000. The Central Amazon Floodplain: Actual Use and Options for a Sustainable Management. Backhuys Publishers B.V, Leiden.

[4] Piedade, M.T.F., Long, S.P., Junk, W.J., 1994. Leaf and Canopy Photosynthetic Co_2 Uptake of a stand of Echinochoa Polysrachya on the central Amazon : floodplain. Oecology.97: 193-201.

[5] Parolin, P., Simone, O. D.E., Haase, K.,Waldhoxx, D., Hottenberger, S., Kuhn, U., kesselmeier, J., Kleiss, B., Schimidt, W., Piedade, M. T. F., Junk, W.J., 2004. Central Amazonia floodplain forests: Botanical Review, The New York Botanical Garden, v.70, n. 3, p. 357-380.

[6] Irion, G., Junk, W.J., de Mello, J.A.S.N., 1997. The large Central Amazonian river floodplains near Manaus: geological, climatological, hydrological, and geomorphological aspects. In: Junk, W.J. (Ed.), The Central Amazon Floodplains. Ecology of a Pulsing System. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, pp. 23–46.

[7] Richey, J.E., Nobre, C.A., Deser, C., 1989. Amazon river discharge and climate variability: 1903–1985. Science 246, 101–103.

[8] Williams, E., Antonia, A.D., Antonia, V.D., Almeida, J.D., Suarez, F., Liebmann, B., Malhado, A.C.M., 2005. The drought of the century in the Amazon basin: an analysis of the regional variation of rainfall in South America in 1926. Acta Amazônica 35 (2), 231–238.

[9] Schongart., Jochen., Junk W.J., 2007. Forecasting the ‡ood-pulse in Central Amazonia by ENSO-indices. Journal of Hydrology. 335, 124–132.

[10] Amarasekera, K.N., Lee, R.F., Williams, E.R., Eltahir, E.A.B., 1997. ENSO and the natural variability in the flow of tropical rivers. Journal of Hydrology 200, 24–39.

[11] Trenberth, K.E., 1997. The definition of El Niño. Bulletin of the AmericanMeteorological Society 78, 2771–2777.

[12] Hansen, J., Lebedeff. S., 1987. Global trends of measured Surface air Temperature. Jounal Geophys. Res. 92. 13 345-13 372.

[13] Marengo, J.A., 1992. Interannual variability of surface climate in the Amazon basin. Journal of Climatology 12, 853–863.

[14] Whetton, P., Rutherfurd, I., 1994. Historical ENSO teleconnection in the eastern hemisphere. Climatic Change 28, 221–253.

[15] Adis, J., Latif, M., 1996. Amazonian arthropods respond to El Niño. Biotropica 28, 403–408.

[16] Marengo, J.A., Tomasella, J., Uvo, C.R., 1998. Trends in streamflow and rainfall in tropical South America: Amazonia, eastern Brazil and north-western Peru. Journal of Geophysical Research 103 (D2), 1775–1783.

[17] Guyot, J.L., Calle‘de, J., Molinier, M., Guimarães, V., Oliveira, E.,1998. La variabilite´ hydrologique actuelle dans le bassin de l'Amazone. Bulletin de l'Institut Français des Etudes Andines 27 (3), 779–788.

[18] Uvo, C.B., Graham, N.E., 1998. Seasonal runoff forecast for northern South America. A statistical model. Water Resources Research 34 (12), 3515–3524.

[19] Zeng, N., 1999. Seasonal cycle and interannual variability in the Amazon hydrologic cycle. Journal of Geophysical Research 104 (D8), 9097–9106.

[20] Dettinger, M.D., Cayan, D.R., McCabe, G.J., Marengo, J.A., 2000. Multiscale streamflow variability associated with El Niño/Southern Oscillation. In: Diaz, H.F., Markgraf, V. (Eds.), El Niño/ Southern Oscillation: Multiscale Variability and Global and Regional Impacts. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 113–146.

[21] Uvo, C.B., Tolle, U., Berndtsson, R., 2000. Forecasting discharge in Amazonia using artificial neural networks. International Journal of Climatology 20, 1495–1507.

[22] Marengo, J.A., Nobre, C.A., 2001. General characteristics and variability of climate in the Amazon Basin and its links to the global climate system. In: McClain, M.E., Victoria, R.L., Richey, J.E. (Eds.), The Biogeochemistry of the Amazon Basin. Oxford University Press, pp. 17–41.

[23] Robertson, A.W., Mechoso, C.R., Garcia, N.O., 2001. Interannual prediction of the Parana River. Geophysical Research Letters 22, 4235–4238.

[24] Coe, M.T., Costa, M.H., Botta, A., Birkett, C., 2002. Long-term simulationsof discharge and floods in the Amazon Basin. Journal of Geophysical Research–Atmospheres 107 (D20). doi:10.1029/ 2001JD000740, art. no. 8044.

[25] Foley, J.A., Botta, A., Coe, M.T., Costa, M.H., 2002. El Niño-Southern Oscillation and the climate, ecosystems and rivers of Amazonia. Global Biogeo-chemical Cycles 16 (4), 1132. doi:10.1029/2002GB00187.

[26] Aalto, R., Maurice-Bourgoin, L., Dunne, T., Montgomery, D.R., Nittrouer, C.A., Guyot, J.-L., 2003. Episodic sediment accumulation on Amazonian floodplains in‡uenced by El Niño/Southern Oscillation. Nature 425, 493–497. Souza Filho, F.A., Lall, U., 2003. Seasonal to interannual ensemble streamflow forecasts for Ceara, Brazil: applications of a multivariate, semiparametric algorithm. Water Resources Research 39 (11), 1/1–1/13.

[27] Souza Everaldo. B, Mary T. Kaiano, Julio Tota, Luciano Pezzi, Gilberto Fisch, Carlos Nobre., 2000. On the In‡uences of the El-Niño, La-Niña and Atlantic Dipole Pattern on the Amazonian Rainfall During 1960-1998. Acta Amazonica 30(2): 205-318.

[28] Potter, C., Zhang, P., Klooster, S., Genovese, V., Shekhar, S., Kumar, V., 2004. Understanding controls on historical river discharge in the world's largest drainage basins. Earth Interactions 8 (2), 1–21.

[29] Schongart, J., Junk, W.J., Piedade, M.T.F., Ayres, J.M., Huttermann, A., Worbes, M., 2004. Teleconnection between tree growth in the Amazonian Floodplains and the El Niño-Southern Oscillation effect. Global Change Biol-ogy 10, 683–692.

[30] Labat, D., Ronchail, J., Guyot, J.L., 2005. Recent advances in wavelet analyses: Part 2 –Amazon, Parana, Orinoco and Congo discharges time variability. Journal of Hydrology 314, 289–311.

[31] Ronchail, J., Labat, D., Calle'de, J., Cochonneau, G., Guyot, J.L., Filizola, N., Oliveira, E., 2005. In: Discharge variability within the Amazon basinRegional Hydrological Impacts of Climatic Changes –Hydroclimatic Variability, 296. IAHS Publications, pp. 21–30.

[32] Mechoso, C. R.., Lyons, S. W., 1988. On the Atmospheric to SST Anomalies Associeted with dhe Atlantic Warm Event during 1984. Journal of Climate. 422-428.

[33] Campello, Fernando D, Jaci M.B. Saraiva, Nisia Krusche., 2004. Periodicity of atmospheric phenomena occurring in the extreme South of Brazil. Royal Meterological Society 5 65–76.

[34] Andreoli, Rita Valéria, Mary Toshie Kayano, Roberto Lage Guedes, Marcos Daisuke Oyama,Maria Aparecida Senaubar Alves., 2004. A Influência da Temperatura da Superfície do Mar dos Oceanos Pacífico e Atlântico na Variabilidade de Precipitação em Fortaleza. Revista Brasileira de Meteorologia, v.19, n.2, 113-122.

[35] Hastenrath, S., and L. Heller, 1977: Dynamics of climatic hazards in north-east Brazil. Quart. J. R. Meteor. Soc., 110, 411-425.

[36] Moura, A. D., and J. Shukla, 1981: On the dynamics of droughts in north-east Brazil: Observations, theory and numerical experiments with a general circulation model. J. Atmos. Sci., 38, 2653-2675.

[37] Hastenrath, S., 1984: Interannual variability and annual cycle: mechanisms of circulation and climate in the tropical Atlantic. Mon. Wea. Rev., 112, 1097-1107.

[38] Chu, P. S., 1984: Time and space variability of rainfall and surface circulation in the northeast Brazil - tropical Atlantic sector. J. Meteorol. Soc. Japan, 62, 363-370.

[39] Hastenrath, S., 1990: Prediction of Northeast Brazil rainfall anomalies. J. Climate, 3, 893-904.

[40] Nobre, P., and J. Shukla, 1996: Variations of sea surface temperature, wind stress, and rainfall over the tropical Atlantic and South America. J. Climate, in press.

[41] Box, G. E. P., Jenkins, G. M., 1970. Time Series Analysis Forecasting and Control San Francisco: Holden-Day (Revised edition, 1976).

[42] Sáfadi, Thelma., 2004. Uso de séries temporais na análise de vazão de água na represa de furnas.Ciênc. agrotec., Lavras, v. 28, n. 1, p. 142-148.

[43] Brockwell, D. J., Davis, R. A. 2002. Introduction to Time Series and Forecasting. Second Edition. New York : Springer.

[44] Bovas, A., Ledolter, J., 2005. Statistical Methods for Forecasting. New York: John Wiley-Interscience.

[45] Pierce, D. A. 1979. Seasonal adjustment when both deterministic and stochastic sea sonality are present. In Seasonal Analysis of Economic Time Series (Arnold Zellner, ed.), 242-269. Washingnton, D. C., U.S. Dept. of Commerce, Bureau of the Census.

[46] Brillinger, D. R., 1989. Consistent detection of a monotonic trend superposed on a esta-tionary time series. Biometrika (1989) 76, 1, 23-30.

[47] Brillinger, D. R., 1994. Trend analysis: Time series and point process problems.Environ-metrics, vol 5, 1-19.

Apêndice A

Cronograma de Atividades

Nº	Descrição	Ago 2008	Set	Out	Nov	Dez	Jan 2009	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul
1	Revisão bibliográfica.	x	x	x									
2	Atividades de Campo e coletas de dados.		x	x	x	x							
3	Análise de dados.				x	x	x	x					
4	Elaboração do Programa Computacional					x	x	x	x	x			
5	Preparação do Relatório Parcial					x							
6	Analise dos Resultados									x	x	x	
7	Elaboração do Resumo e Relatório Final											x	
8	Preparação da Apresentação Final para o Congresso												x