

**Universidade de São Paulo
Instituto de Matemática e Estatística**

Centro de Estatística Aplicada

Relatório de Análise Estatística

RAE – CEA – 20P05

RELATÓRIO DE ANÁLISE ESTATÍSTICA SOBRE O PROJETO:

**“ENOS: Consequências do fenômeno na dinâmica hidroclimática da bacia hidrográfica
do Rio Piracicaba - SP”**

**Chang Chiann
Guilherme Camargo Matos de Paula
Pedro Paulo Sousa Argôlo da Silva**

São Paulo, julho de 2020

CENTRO DE ESTATÍSTICA APLICADA - CEA – USP

TÍTULO: Relatório de Análise Estatística sobre o Projeto: “ENOS: Consequências do fenômeno na dinâmica hidroclimática da bacia hidrográfica do Rio Piracicaba - SP”.

PESQUISADOR: Adriano Antunes

ORIENTADOR: Prof. Dr. Emerson Galvani

INSTITUIÇÃO: Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas. Departamento de Geografia, FFLCH - USP

FINALIDADE DO PROJETO: Doutorado

RESPONSÁVEIS PELA ANÁLISE: Chang Chiann

Guilherme Camargo Matos de Paula

Pedro Paulo Sousa Argôlo da Silva

REFERÊNCIA DESTE TRABALHO: SILVA, B.A.; TAKARA, V.J.; YAMBARSTEV, A. **Relatório de análise estatística sobre o projeto: “Otimização da previsão de risco geológico utilizando a simulação de Monte Carlo aplicado às estruturas geológicas”.** São Paulo, IME-USP, 2020. (RAE–CEA-20P04)

FICHA TÉCNICA

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

CHALITA, D.D. e TRAZZI, J.S. (2019). **ENOS: consequências do fenômeno na dinâmica hidroclimática da bacia hidrográfica do rio Piracicaba-SP**. Relatório de consulta do CEA. São Paulo, IME-USP, 18p.

CORREA, M.G.G. (2017). **Dinâmica hidroclimática e o fenômeno ENOS na bacia hidrográfica do Rio Piquiri-PR**. São Paulo. 129p. Tese (Doutorado). Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas – USP.

MORETTIN, P.A. e TOLOI, C.M.C. **Análise de Séries Temporais**. 2.ed., Editora Blucher, 538p.

MORETTIN, P.A.; CHIANN, C.; SIQUEIRA, L.; AKAMA, L., **Relatório de análise estatística sobre o projeto: “Impactos da gestão do clima organizacional no desempenho das empresas”**. São Paulo, IME-USP, 2019. (RAE–CEA-19P04)

PENA, R.F.A. **El Niño e La Niña**. Disponível em <<https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/geografia/el-nino-la-nina.htm>>. Acesso a 16 de abril de 2020.

PROGRAMAS COMPUTACIONAIS UTILIZADOS:

Microsoft Word for Windows (versão 2016)

Microsoft Excel for Windows (versão 2016)

RStudio (versão 1.1.442)

R (versão 3.5.3)

Python (versão 3.7.1)

TÉCNICAS ESTATÍSTICAS UTILIZADAS

Análise Descritiva Unidimensional (03:010)

Séries Temporais (11:010)

Outros (07:990)

ÁREA DE APLICAÇÃO

Ciências Físicas e Geoestatística (14:010)

Resumo

O presente trabalho se debruçou sobre o fenômeno El Niño Oscilação Sul (ENOS), que comprovadamente exerce influência na chuva de algumas localidades, e seus efeitos na bacia hidrográfica do rio Piracicaba-SP. Para isso, analisaram-se as séries de precipitação de 27 estações, as séries de vazão de 4 estações e a medida IOS (Índice de Oscilação Sul), entre janeiro de 1981 e dezembro de 2017 e foram ajustados modelos de regressão generalizados voltados a séries temporais para avaliar o efeito do ENOS, aqui medido pelo IOS, sobre a chuva e sobre a vazão na bacia, e o efeito da chuva na vazão da bacia. Os resultados foram satisfatórios, comprovando influência do mês atual até pelo menos 7 meses anteriores da chuva nos níveis de vazão, dependendo da localidade na bacia. E influência do mês anterior do ENOS na chuva e de oitavo mês anterior na vazão. Além disso, notou-se uma tendência histórica de queda dos níveis de vazão nessa região.

Sumário

1. Introdução	8
2. Objetivos	8
3. Descrição do estudo	9
4. Descrição das variáveis	10
5. Análise descritiva	10
5.1 IOS	11
5.2 Estações fluviométricas.....	11
5.3 Estações pluviométricas	12
6. Análise Inferencial	13
6.1 Vazão ajustada pela Chuva na sub-bacia Bairro da Ponte.....	15
6.2 Vazão ajustada pela Chuva na sub-bacia Monte Alegre do Sul	16
6.3 Vazão ajustada pela Chuva na sub-bacia Usina Ester.....	17
6.4 Vazão ajustada pela Chuva na sub-bacia Ártemis.....	18
6.5 Vazão na sub-bacia Ártemis ajustada pelo IOS.....	19
6.6 Chuva na sub-bacia Ártemis ajustada pelo IOS	20
7. Conclusão	21
APÊNDICE A	22
APÊNDICE B	27

1. Introdução

“O fenômeno El Niño Oscilação Sul (ENOS) é caracterizado pelo aquecimento das águas superficiais e sub-superficiais do Oceano Pacífico Equatorial próximo à costa do Peru e do Equador” (Correa, 2017), se opondo ao fenômeno La Niña. Tais fenômenos geralmente são cíclicos, isto é, se alternam de tempos em tempos, mas não sazonais, ou seja, seu período de alternância não é constante. A Figura B.1 ilustra o comportamento do El Niño e a Figura B.2 mostra a média trimestral da TSM (Temperatura da Superfície do Mar) na região 3.4 (região central do Pacífico equatorial) do Niño entre 2000 e 2016. Ainda segundo Correa, “os reflexos do ENOS nos padrões de tempo da América do Sul são diversos, o fenômeno é responsável por provocar alterações importantes na distribuição das chuvas sobre o continente”. Assim, a presente pesquisa surge devido à ausência de estudos sobre o impacto de tal fenômeno especificamente na bacia hidrográfica do rio Piracicaba-SP.

Em adição, sabemos que o Índice de Oscilação Sul (IOS), diferença de pressão entre Taiti e Darwin, também fornece evidências da ocorrência do fenômeno ENOS (Correa, 2017). Tendo isso em conta, uma das estratégias que serão adotadas nessa análise pretende relacionar o IOS com os dados de precipitação de 27 estações pluviométricas e com os dados de vazão de 4 estações fluviométricas, todas elas localizadas na região da bacia hidrográfica do rio Piracicaba-SP. Os dados usados no estudo são do período de janeiro de 1981 a dezembro de 2017.

2. Objetivos

Os objetivos deste trabalho são:

- Correlacionar o fenômeno ENOS com as vazões no período de janeiro de 1981 a dezembro de 2017 na bacia hidrográfica do rio Piracicaba-SP;
- Correlacionar o fenômeno ENOS com os níveis de precipitação no período de janeiro de 1981 a dezembro de 2017 na bacia hidrográfica do rio Piracicaba-SP;
- Correlacionar as vazões com os níveis de precipitação no período de janeiro de 1981 a dezembro de 2017 na bacia hidrográfica do rio Piracicaba-SP, para cada sub-bacia.

3. Descrição do estudo

Foram selecionadas 4 estações fluviométricas que se encontram em pontos estratégicos dentro da bacia. A seguir estão seus códigos e entre parênteses um apelido dado a cada estação: 4D-007 (Ártemis), 3D-006 (Bairro da Ponte), 62622000 (Monte Alegre do Sul) e 62632000 (Usina Ester). Essas estações foram utilizadas para os dados de vazão. Pensou-se em utilizar os dados para cota, mas essa ideia inicial foi posteriormente descartada, devido à correlação entre cota e vazão.

Foram também selecionadas 27 estações pluviométricas. A seguir encontram-se seus apelidos e códigos entre parênteses: Amparo (2246023), Artur Nogueira (D4-099), Atibaia (2346095), Barão Geraldo (2247042), Barreiro (2246087), Bragança Paulista (D3-063), Camanducaia (2246057), Campinas (D4-044), Fazenda Monte d'Este (2247041), Fazenda Primavera (2346329), Jaguariúna (2247055), Joanópolis (D3-054), Ipeúna (2247021), Itirapina (2247180), Limeira (D4-064), Morungaba (D3-046), Martim Francisco (D3-009), Monte Alegre do Sul (2246022), Pedra Bela (D3-035), Pedreira (D3-052), Pinhalzinho (2246025), Piracaia (2346094), Piracicaba (D4-104), Recreio (D4-109), Rio Abaixo - Faz. Cachoeira (2246033), Usina Ester (D4-052), Vargem (D3-018).

A bacia está localizada entre os paralelos 22°00' e 23°30' de latitude Sul e os meridianos 46°00' e 48°30' de longitude Oeste, com 12.400 km² de área aproximada, cerca de 250 km de comprimento e 50 km de largura, médios, e um desnível topográfico de aproximadamente 1400 m entre a foz e suas cabeceiras. A Figura B.3 apresenta um mapa da bacia e das 4 estações fluviométricas utilizadas na análise.

Para alinhar os dados pluviométricos com os dados fluviométricos em termos de localização, os pesquisadores dividiram a bacia em quatro sub-bacias, onde cada uma delas tem uma estação de vazão e algumas de precipitação. Cada uma dessas sub-bacias foi nomeada com o apelido da sua estação de vazão. As quatro sub-bacias são:

- Ártemis, onde estão todas as estações de precipitação do estudo, além da estação de vazão de mesmo nome. Essa sub-bacia funcionará como a sub-bacia inteira, uma vez que a estação de vazão Ártemis está localizada na baixa altitude do rio

em relação às demais estações, assim obtendo valores mais altos de vazão e sofrendo influência de toda a bacia;

- Bairro da Ponte, com sua estação de vazão homônima e as seguintes estações de precipitação: Atibaia, Barreiro, Fazenda Primavera e Piracaia;
- Monte Alegre do Sul, onde se encontram a sua estação de vazão homônima e duas estações de precipitação: Monte Alegre do Sul e Pedra Bela;
- Usina Ester, onde além da homônima estação de vazão estão as seguintes estações de precipitação: Amparo, Artur Nogueira, Braganca Paulista, Camanducaia, Jaguariúna, Joanópolis, Martim Francisco, Pedreira, Pinhalzinho, Rio Abaixo - Faz. Cachoeira, Usina Ester, Vargem.

Os dados de IOS foram recolhidos do Australian Government – Bureau of Metereology. Uma possível abordagem trazida pelo pesquisador é categorizar a variável IOS, classificando-a de acordo com os fenômenos, da seguinte forma: La Niña, se $IOS > 7$, El Niño, se $IOS < -7$ e neutros, caso contrário, onde 7 é um possível ponto de corte sugerido pela literatura. Entretanto, após algumas análises, decidimos por utilizar os valores originais de IOS.

4. Descrição das variáveis

As variáveis de interesse, avaliadas no período de janeiro de 1981 a dezembro de 2017 são:

- Chuva diária (em mm) em cada uma das 27 estações pluviométricas;
- Vazão diária (quantidade de água que passa num determinado ponto, em m^3/s) em cada uma das 4 estações fluviométricas;
- IOS – Índice de Oscilação Sul;
- Sub-bacias: Ártemis, Bairro da Ponte, Monte Alegre do Sul e Usina Ester

5. Análise descritiva

Dividiremos essa etapa da análise entre a medida IOS, as estações fluviométricas e as estações pluviométricas. Os dados originais (diários) das séries de Vazão e Chuva foram transformados em dados mensais, uma vez que a série de IOS apresenta valores

mensais. Para transformar as séries diárias em mensais, a média dos dias com valores válidos no mês foi adotada. Note então, por exemplo, que se em um mês havia 23 valores e os demais são dados faltantes, o valor para o mês será a média desses 23 registros. Além disso, a fim de preservar as peculiaridades de cada estação presente em cada sub-bacia na respectiva série resumo daquela sub-bacia, realizamos um procedimento chamado médias móveis para substituir (interpolar) valores faltantes nas séries mensais de cada estação de chuva e de vazão. Para isso, se em um mês não havia um dado válido, esse dado faltante é substituído pela média dos valores daquele mesmo mês nos dois anos posteriores e anteriores.

Nesta seção apresentamos os gráficos das séries diárias originais e depois prosseguimos todas as demais análises com as séries mensais e interpoladas.

5.1 IOS

A Figura B.4 mostra a série do IOS com retas horizontais indicando possíveis limites onde a evidência de um fenômeno é sugerida. Já a Figura B.5 mostra o gráfico de autocorrelação para essa série, e nele não vemos sinais de sazonalidade, uma vez que as alturas das retas verticais caem suavemente e constantemente, sem alternância de subidas e descidas.

5.2 Estações fluviométricas

Primeiramente, deve-se observar as Figuras B.6, B.8, B.10 e B.12, que mostram os gráficos de vazão diária das quatro sub-bacias. Nota-se que os gráficos têm comportamento semelhante com picos dentro do mesmo instante.

Após análise da série diária para sumarizar os dados calcula-se média mensal da vazão, desta forma, uma nova série é obtida, como pode ser observado nas Figuras B.7 B.9 B.11 e B.13. Os gráficos mostram que o comportamento das séries não se altera.

A série vazão média mensal será utilizada para atingir o objetivo deste estudo. Consequentemente, foram calculadas as medidas-resumo da série que são apresentadas na Tabela A.1. Outra análise feita é a detecção de outliers na série que é mostrada nas Figuras B.14 à B.17. Vale ressaltar que a séries apresentam comportamentos similares.

Para a análise de sazonalidade, foram construídos gráficos de autocorrelação mostrados nas Figuras B.18 à B.21. Os gráficos mostram que há sazonalidade nas séries.

As Figuras B.22 à B.25 apresentam os *box plots* das vazões mensais para cada mês, mostrando comportamentos similares entre as sub-bacias.

5.3 Estações pluviométricas

Para sumarizar as séries das estações pluviométricas em uma só série para cada sub-bacia, foi calculada a mediana das observações válidas de cada dia (para os gráficos de dados diários) e de cada mês (para os gráficos de dados mensais) das estações da sub-bacia.

Na Tabela A.2 encontram-se as medidas-resumo de chuva das quatro sub-bacias. Relembre que a sub-bacia Ártemis representa a bacia inteira. As outras sub-bacias não compartilham de nenhuma estação em comum entre si, além disso, há estações que só estão presentes na sub-bacia Ártemis. A sub-bacia Bairro da Ponte tem o menor máximo, a menor média, a menor mediana e o menor desvio padrão. Já a sub-bacia Monte Alegre do Sul tem o maior máximo, a maior média, a maior mediana e o maior desvio padrão. Interessante notar que os coeficientes de variação são iguais na aproximação feita até duas casas decimais.

Na Figura B.26 podemos ver a série da chuva diária da sub-bacia Ártemis, enquanto na Figura B.27 encontra-se sua série transformada para mensal. Note que ambas se parecem muito entre si, com exceção que a série mensal está mais suave e contém uma quantidade de zeros bem inferior à série original. A comparação entre esses gráficos mostra que a transformação de fato foi útil. A mesma comparação pode ser feita nas Figuras B.28 à B.33, para as outras três sub-bacias. Os comentários são similares.

Já nas Figuras B.34 à B.37, estão dispostos os *box plots* da chuva mensal para as quatro sub-bacias. Nota-se que em todas as séries existem pontos outliers à direita, ou seja, valores muito altos de chuva. A sub-bacia com maior quantidade de valores outliers é a Monte Alegre do Sul, mas isso não parece ser um grande problema, dada a boa quantidade de observações (444).

Além disso, calculamos o percentual de dados faltantes de cada estação para os dados diários. Para isso, calculamos os dados faltantes por estação e tiramos a média do percentual de dados faltantes entre as estações de cada sub-bacia. Em seguida, tiramos a diferença entre essa média de percentual de dados faltantes diários para cada sub-bacia. Foi obtido que a sub-bacia com maior média de percentual de dados faltantes para dados diários é a Monte Alegre do Sul, a mesma que tem a maior quantidade de outliers. Além do que já foi dito sobre os *box plots*, podemos dizer que, como era esperado, em todos os quatro casos o *box plot* é assimétrico à direita, mas a mediana está próxima do centro entre o primeiro e terceiro quartil. Isso é um indício que os dados podem não se ajustar à suposição de normalidade, comumente feita.

As Figuras B.38 à B.41 apresentam as autocorrelações dos dados mensais para cada sub-bacia. Nota-se que os resultados são muito similares para todas as sub-bacias, com comportamento sazonal de 12 meses, isto é, os valores sobem e descem com mesmo período de alternância (a cada 12 meses). Grande parte das autocorrelações aparenta ser estatisticamente diferente de zero, uma vez que estão fora do intervalo de confiança tracejado em azul.

Finalmente, as Figuras B.42 a B.45 mostram os *box plots* da chuva mensal por mês para cada sub-bacia. Nota-se que, os valores parecem crescer desde junho, para todas as sub-bacias. A partir de agosto a quantidade de chuva cresce até janeiro, decrescendo a partir de fevereiro. Além disso, nos meses em que os quartis e limites superiores e inferiores crescem, também cresce a variabilidade dos dados. Outro fato interessante é que, à exceção da sub-bacia Bairro da Ponte, o mês de junho parece ser aquele com maior quantidade de outliers.

6. Análise Inferencial

Nesta seção realizamos a análise inferencial, modelando a relação entre a vazão mensal e a chuva mensal em cada sub-bacia e, para a sub-bacia Ártemis, também foi modelada a relação entre a vazão mensal e o IOS e entre a chuva mensal e o IOS. A fim de facilitar a leitura, dividimos essa seção em seis sub-seções. Como todas as séries são sazonais, realizamos um procedimento para eliminar a sazonalidade dos dados. Para

isso, calculamos a média para cada um dos doze meses do ano ao longo do período de estudo e subtraímos cada observação da média do respectivo mês.

As Figuras B.46 à B.49 apresentam as séries da chuva para cada sub-bacia com o procedimento para retirada da sazonalidade, como descrito acima. Comparando as novas séries com as séries sem esses procedimentos (ver as Figuras B.27, B.29, B.31 e B.33), observamos que alguns dos pontos de máximo visíveis pelo gráfico se mantêm enquanto que outros são suavizados, isso se dá justamente devido ao procedimento de retirada da sazonalidade, que busca evitar que se leve em consideração o aumento (ou queda) dos níveis de chuva ou vazão em consequência alheia à sazonalidade natural dos dados. Segundo a análise descritiva apresentada, naturalmente os níveis de chuva tendem a serem maiores no fim/começo do ano que no meio dele devido à sazonalidade, mas o que queremos saber é se, em relação ao nível esperado de chuva (ou vazão) para aquele mês, o valor pode ter crescido ou diminuído por influência do IOS.

As Figuras B.50 à B.53 apresentam os gráficos das séries de vazão das quatro estações (sub-bacias) aqui analisadas, já tendo sido realizado o procedimento de retirada da sazonalidade.

Os seguintes procedimentos foram seguidos para ajustar todos os modelos aqui apresentados:

- Primeiro, construímos um gráfico de correlação cruzada entre X no instante $(t+h)$ (a série explicativa) e Y no instante t (a série resposta). Como pretendemos que X explique Y , mesmo que haja correlações parciais significativas nos lags maiores que zero ($h > 0$), elas serão ignoradas, pois X no instante t só pode influenciar Y no instante maior ou igual a t (no futuro ou no presente), nunca no passado. Utilizaremos nesta seção com frequência o termo lag, que significa a distância entre duas observações, ou seja, quando a chuva é de oito meses atrás em relação à vazão do mês atual, nosso lag é oito. Por meio desse gráfico escolhemos quais lags deveriam ser testados para ficar ou não no modelo. Os lags escolhidos foram aqueles que estavam acima do intervalo de confiança tracejado no

gráfico, ou seja, aquelas correlações estatisticamente superiores a zero. Além disso, testamos a tendência, para saber se há indícios de que Y vem caindo ou crescendo ao longo do tempo.

- A próxima etapa foi ajustar o modelo de regressão. Inicialmente testamos o modelo clássico onde supõe-se que os dados tenham distribuição Normal. Em nenhum dos casos tal suposição foi válida, o que foi possível avaliar através dos gráficos de resíduos. Então, utilizando-se a função `fitDist` do pacote `Gamlss`, disponível no software R, ajustamos um modelo de regressão com uma distribuição sugerida que se adequasse aos dados. Em seguida, selecionamos o melhor modelo através do método *stepwise*, que usa o AIC (Critério de Informação de Akaike, em inglês) como critério de seleção das variáveis do modelo. O procedimento foi feito com a opção `direction=both`. Isto é, o modelo com menor AIC será selecionado, e como optamos pela opção “ambas” (*both* em inglês) para a direção do modelo, então o modelo diminuirá e crescerá o número de variáveis conforme o AIC diminui até que encontre o modelo com melhor combinação de variáveis.

Aqui cabe explicar que para testar a influência de um lag, por exemplo a do lag 8, foi necessário eliminar os primeiros oito meses da variável resposta, para comparar o primeiro mês da variável explicativa com o nono mês da variável resposta. Como a nossa amostra é grande o suficiente isso não foi um problema.

6.1 Vazão ajustada pela Chuva na sub-bacia Bairro da Ponte

A série de vazão mensal sem sazonalidade é mostrada na Figura B.51 e a série de chuva mensal sem sazonalidade está na Figura B.47. Observando-se as figuras citadas, é possível ver uma certa similaridade entre os gráficos, no início da série das chuvas podemos notar uma tendência maior de chuva o que pode ser visto também na série de vazão. Ao decorrer da série podem ser observados outros períodos com o mesmo tipo de similaridade. No início dos anos 2000 temos um período com menos chuva e analisando o mesmo período, agora para a vazão, podemos notar uma menor vazão. Isto é um indicativo da relação procurada neste trabalho.

Pela Figura B.55, os lags 0 e negativos até 7 foram os escolhidos para serem testados no modelo inicial.

Na primeira etapa, utilizando-se a função `fitDist`, como descrito acima, determinou-se que a melhor distribuição que se ajusta aos dados foi a Skew t (Azzalini type 1).

Em seguida foi ajustado um modelo de regressão considerando a distribuição Skew t (Azzalini type 1). Todos os lags candidatos se mostraram significativos, ao nível de 5% de significância (Tabela A.3). A Figura B.56 mostra que o modelo está bem ajustado, pois seus resíduos aparentam satisfazer as suposições feitas de Normalidade, aleatoriedade (independência) e homocedasticidade.

Portanto o modelo final pode ser escrito como: $Vazão(t) = 4,976 - 0,025 t + 0,272 \cdot Chuva(t-7) + 0,348 \cdot Chuva(t-6) + 0,337 \cdot Chuva(t-5) + 0,62 \cdot Chuva(t-4) + 0,674 \cdot Chuva(t-3) + 0,966 \cdot Chuva(t-2) + 1,218 \cdot Chuva(t-1) + 2,192 \cdot Chuva(t)$.

Esse modelo nos diz que, para a sub-bacia Bairro da Ponte, a vazão sofre influência da chuva desde o mês atual até 7 meses anteriores. Tal influência é maior conforme aproximamo-nos dos meses mais recentes. Além disso, vemos que existe uma tendência de queda nos níveis de vazão da sub-bacia dentro do período de estudo.

6.2 Vazão ajustada pela Chuva na sub-bacia Monte Alegre do Sul

A série de vazão mensal sem sazonalidade é mostrada na Figura B.52 e a série de chuva mensal sem sazonalidade está na Figura B.57.

É possível notar pontos de similaridade entre os gráficos. Como na Seção 6.1, há cenários onde há períodos em que quando há maior chuva e há maior vazão.

Aplicou-se a função `fitDist` a fim de se determinar a melhor distribuição que se ajustava aos dados da variável resposta. A distribuição obtida foi a Johnson Su original.

Prosseguindo foram determinados os lags candidatos a serem significantes. Para esta parte realizou-se a autocorrelação cruzada entre as séries de chuva e vazão média mensal da sub-bacia Monte Alegre do Sul. O resultado obtido é mostrado na Figura B.58. Os lags negativos 0 até 8 mostraram-se candidatos.

Por fim, ajustado o modelo, foi observado que todos lags, inclusive a tendência, se mostraram significantes, ao nível de 5% de significância, como mostra a Tabela A.4. A Figura B.59 mostra que o modelo está bem ajustado. O modelo final pode ser escrito como: $Vazão(t) = 0,76 - 0,004 t + 0,757 \cdot Chuva(t) + 0,383 \cdot Chuva(t-1) + 0,327 \cdot Chuva(t-2) + 0,215 \cdot Chuva(t-3) + 0,195 \cdot Chuva(t-4) + 0,146 \cdot Chuva(t-5) + 0,144 \cdot Chuva(t-6) + 0,094 \cdot Chuva(t-7) + 0,096 \cdot Chuva(t-8)$.

O modelo acima nos mostra que, para a sub-bacia Monte Alegre do Sul, a vazão é influenciada pela chuva desde o mês atual até 8 meses anteriores. Essa influência é maior nos meses mais recentes e menor nos mais distantes. Também vemos que a vazão na sub-bacia tem uma tendência negativa no período do estudo.

6.3 Vazão ajustada pela Chuva na sub-bacia Usina Ester

É interessante notar que se compararmos as Figuras B.49 e B.53, podemos perceber que no período do começo da década de 1980 em que há um crescimento bastante acentuado nos níveis de vazão, acontece o mesmo com os níveis de chuva nesta sub-bacia. Note que algo semelhante acontece com o período próximo a 2010, a 2000, 1995 e 1990, aumentos esses menores comparados ao de 1980 para a vazão, mas ainda sim crescimentos locais perceptíveis visualmente.

Avançando para a Figura B.60, podemos ver que de fato o procedimento adotado retirou a sazonalidade da vazão na estação Usina Ester. Pela Figura B.61 podemos ver que a correlação cruzada entre vazão e a chuva aponta como candidatos os lags negativos 0 a 8, e depois os lags 10, 11 e 12. São esses lags que serão testados para avaliar qual o melhor modelo final para esse caso.

A função `fitDist` do pacote `Gamlss` nos sugeriu ajustar a vazão com a distribuição Seno hiperbólico-arccosseno hiperbólico. Rodamos o modelo com todas as variáveis (lags e tendência) e manualmente escolhemos o melhor modelo final, dado que a maioria dos lags foi significativo logo no modelo inicial. A Tabela A.5 apresenta o modelo final com os lags negativos 0 a 8, mais os lags 10 e 11 e a tendência.

Analisando os resíduos na Figura B.62 podemos observar que o modelo está bem ajustado.

O modelo final pode ser escrito como: $Vazão(t) = 13,612 - 0,049 t + 5,476 \cdot Chuva(t) + 2,759 \cdot Chuva(t-1) + 2,534 \cdot Chuva(t-2) + 1,428 \cdot Chuva(t-3) + 1,456 \cdot Chuva(t-4) + 0,962 \cdot Chuva(t-5) + 0,975 \cdot Chuva(t-6) + 0,502 \cdot Chuva(t-7) + 0,695 \cdot Chuva(t-8) + 0,895 \cdot Chuva(t-10) + 0,679 \cdot Chuva(t-11)$.

No modelo acima concluímos que, dentro da sub-bacia Usina Ester, a vazão é influenciada pela chuva desde o mês atual até 8 meses antes e então 10 e 11 meses antes. Essa influência é maior nos meses mais recentes e cai linearmente, com exceção do quarto mês anterior - que mostra uma influência bem próxima a do terceiro mês -, do sexto mês - com influência muito próxima a do quinto -, do oitavo mês - que influencia mais que o sétimo -, do décimo - que influencia mais que o sétimo e oitavo, e do décimo primeiro - que influencia mais que o sétimo. O modelo também capta que a vazão tem tido uma tendência negativa no período do estudo.

6.4 Vazão ajustada pela Chuva na sub-bacia Ártemis

Analisando as Figuras B.46 e B.50, referentes à sub-bacia Ártemis, podemos observar que em alguns momentos quando a vazão mais claramente cresce, a chuva também cresce. Isso se dá próximo aos anos de 1982, 1991, 1995 e em dois picos bem próximos um do outro perto do ano 2010. Ao avaliar a Figura B.63 podemos notar que a sazonalidade da série de vazão não mais existe, como esperado. Já a Figura B.64 mostra que os lags negativos 0 a 7 são candidatos a participar do modelo. Pela função fitDist escolhemos a distribuição de Johnson Su para a variável resposta. Todas as variáveis foram significativas no modelo ajustado final.

A Figura B.65 mostra que o modelo está bem ajustado.

O modelo final pode ser escrito como: $Vazão(t) = 18,056 - 0,03 t + 18,733 \cdot Chuva(t) + 10,07 \cdot Chuva(t-1) + 7,838 \cdot Chuva(t-2) + 4,776 \cdot Chuva(t-3) + 4,598 \cdot Chuva(t-4) + 2,495 \cdot Chuva(t-5) + 2,97 \cdot Chuva(t-6) + 2,152 \cdot Chuva(t-7)$.

Pela Tabela A.6 podemos notar que a tendência e todos os lags entre 0 e 7 são negativos e significativos ao nível de significância de 5%. Podemos interpretar o modelo acima da seguinte forma: na sub-bacia Ártemis (representativa da bacia toda), a vazão é influenciada pela chuva desde o mês atual em até 7 meses anteriores. Tal influência é maior nos meses mais recentes e sempre menor no mês mais antigo, com exceção do sexto mês se comparado ao quinto.

6.5 Vazão na sub-bacia Ártemis ajustada pelo IOS

Nessa análise é mais difícil notar uma relação entre a série apresentada na Figura B.4 e a série apresentada na Figura B.50, mas é curioso notar que justamente no período com maior crescimento da vazão temos o menor valor de IOS, próximo ao ano 1982. Pela Figura B.66 podemos observar que os lags negativos candidatos para o modelo de regressão são aqueles de 2 a 12. Nesse caso as correlações cruzadas são negativas.

Iniciamos buscando uma distribuição para a variável resposta, uma vez que novamente não conseguimos ajustar bem um modelo com variável resposta normal. A distribuição sugerida pela função `fitDist` foi a de Johnson Su, assim como no caso anterior comentado nesta seção, visto que em ambos os casos a variável resposta é a mesma. Para esse caso, escolhemos o modelo final através do processo *stepwise*. O modelo final é composto de três variáveis: os lags negativos 8 e 11 e a tendência e encontra-se na Tabela A.7.

O modelo final pode ser escrito como: $Vazão(t) = 12,556 - 0,054 t + 0,442 \cdot IOS(t-8) - 0,387 \cdot IOS(t-11)$.

A Figura B.67 mostra que o modelo está bem ajustado.

Vemos, novamente, que existe uma tendência negativa na vazão no período estudado dentro dessa bacia, o que é consistente com os demais modelos. Além disso, podemos verificar que o oitavo mês anterior do IOS influencia na vazão nesta sub-bacia, de maneira positiva, ou seja, maior IOS naquele mês implica uma vazão maior do que a esperada para aquele mês do ano. Note que o décimo primeiro mês anterior do IOS está como variável controle, já que ele não é significativo. Seu valor é negativo, ou seja, se no

décimo primeiro mês anterior havíamos um valor baixo de IOS e então ele fica alto no oitavo mês anterior, por exemplo, então a vazão nesse mês atual é esperada mais alta.

6.6 Chuva na sub-bacia Ártemis ajustada pelo IOS

As Figuras B.46 e B.68 mostram que a sazonalidade foi retirada.

Como na análise anterior, é difícil verificar similaridade entre a série IOS e a série Chuva na sub-bacia Artemis. Entretanto, consegue-se notar alguns desvios maiores que a média histórica na Figura B.46 quando na Figura B.4 o IOS atinge alguns valores mais extremos.

Após retirar a sazonalidade o próximo passo foi aplicar a função `fitDist` do pacote `Gamlss`, a fim de obter-se a distribuição que melhor ajustasse aos dados da variável resposta, esta função retornou a Skew exponential power (Azzalini type 1).

Na sequência estabelecemos os candidatos a lags para uso na modelagem. Foram utilizadas as correlações cruzadas entre a série IOS e a série de chuvas da sub-bacia Ártemis, apresentadas na Figura B.69. Essa figura mostra que os candidatos são os lags 6, 5 e 1, negativos.

Estabelecidos os candidatos à modelagem, o próximo estágio foi ajustar o modelo e analisar os resíduos. Por meio da Tabela A.8, vemos que os lags 6 e 5, assim como a tendência, não foram significantes, ao nível de significância de 5%, enquanto, o lag 1 foi significativo.

A Figura B.70 mostra que podemos considerar o modelo bem ajustado.

O modelo final pode ser escrito como: $\text{Chuva}(t) = -1,169 - 0,02 \cdot \text{IOS}(t-1)$.

Vemos aqui que a chuva na sub-bacia Ártemis (isto é, na bacia inteira) é influenciada pelo IOS do mês anterior. Interessante notar que a influência é mais próxima do que a do IOS na vazão, o que era esperado. Como tal influência é negativa, o IOS baixo (indicador de El Niño), por exemplo, implica num aumento da chuva na sub-bacia.

7. Conclusão

Todos os modelos finais apresentados tiveram bons ajustes e os resultados foram interessantes. Foi possível perceber a tendência negativa e significativa em todos os casos, exceto no modelo da chuva pelo IOS, o que mostra que a vazão modelada para cada caso tem diminuído durante o período do estudo. Os ajustes dos modelos de vazão por chuva ficaram excelentes em todos os quatro casos, mostrando que a chuva influencia na vazão da bacia em até 11 meses após o período da chuva.

Finalmente, em relação aos modelos de maior importância para o pesquisador, concluímos que o IOS influencia no aumento ou queda da vazão (a nível de 10% de significância) e da chuva na bacia em relação aos níveis esperados para aquele mês. Para a chuva, a influência acontece 1 mês antes, enquanto que para a vazão, a influência maior acontece 8 meses antes, o que faz sentido pois é esperado que a chuva seja influenciada primeiro e depois a vazão. Note ainda que o IOS se mostra mais significativo (a nível de 5%) para a chuva do que para a vazão (a 10%), o que é algo que também parece fazer sentido.

APÊNDICE A

Tabelas

Tabela A.1 Medidas-resumo de Vazão mensal para cada Sub-bacia.

Sub-bacias	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	DP	CV
Ártemis	10,75	643,13	129,53	101.63	94,79	0,73
Bairro da Ponte	3,33	124,77	22,43	18,29	15,55	0,69
Monte Alegre do Sul	0,69	3,63	7,02	5,58	4,77	0,68
Usina Ester	1,61	245,24	39,35	29,46	32,93	0,84

Tabela A.2 Medidas-resumo mensais de chuva para cada sub-bacia.

Sub-bacias	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	DP	CV
Ártemis	0	16,43	3,94	3,35	3,02	0,77
Bairro da Ponte	0	15,74	3,84	3,09	2,95	0,77
Monte Alegre do Sul	0	17,46	4,47	3,78	3,43	0,77
Usina Ester	0	16,46	3,95	3,25	3,03	0,77

Tabela A.3 Resumo do modelo final para Vazão explicada pela Chuva na sub-bacia Bairro da Ponte.

	Estimativa	Erro Padrão	Estatística do teste	Valor-p
Intercepto	4,976	1,034	4,812	<0,001
Tendência	-0,025	0,002	-12,508	< 0,001
Chuva [t-7]	0,272	0,107	2,539	0,011
Chuva [t-6]	0,348	0,111	3,119	0,002
Chuva [t-5]	0,337	0,116	2,902	0,004
Chuva [t-4]	0,62	0,116	5,357	< 0,001
Chuva [t-3]	0,674	0,127	5,315	< 0,001
Chuva [t-2]	0,966	0,121	8,000	< 0,001
Chuva [t-1]	1,218	0,13	9,377	< 0,001
Chuva [t]	2,192	0,149	14,716	< 0,001

Tabela A.4 Resumo do modelo final da Vazão explicada pela Chuva na sub-bacia Monte Alegre do Sul.

	Estimativa	Erro Padrão	Estatística do teste	Valor-p
Intercepto	0,760	0,257	2,962	0,003
Tendência	-0,004	0,001	-6,333	< 0,001
Chuva [t-8]	0,095	0,033	2,878	0,004
Chuva [t-7]	0,094	0,032	2,945	0,003
Chuva [t-6]	0,144	0,033	4,340	< 0,001
Chuva [t-5]	0,146	0,034	4,248	< 0,001
Chuva [t-4]	0,195	0,033	5,956	< 0,001
Chuva [t-3]	0,215	0,038	5,693	< 0,001
Chuva [t-2]	0,327	0,038	8,574	< 0,001
Chuva [t-1]	0,383	0,038	9,925	< 0,001
Chuva [t]	0,757	0,042	18,178	< 0,001

Tabela A.5 Resumo do modelo final da Vazão explicada pela Chuva na sub-bacia Usina Ester.

	Estimativa	Erro Padrão	Estatística do teste	Valor-p
Intercepto	13,612	1,127	12,082	< 0,001
Tendência	-0,049	0,004	-12,090	< 0,001
Chuva [t]	5,476	0,373	14,681	< 0,001
Chuva [t-1]	2,759	0,267	10,325	< 0,001
Chuva [t-2]	2,534	0,27	9,397	< 0,001
Chuva [t-3]	1,428	0,249	5,744	< 0,001
Chuva [t-4]	1,456	0,228	6,396	< 0,001
Chuva [t-5]	0,962	0,208	4,624	< 0,001
Chuva [t-6]	0,975	0,199	4,905	< 0,001
Chuva [t-7]	0,502	0,216	2,322	0,021
Chuva [t-8]	0,695	0,244	2,840	0,005
Chuva [t-10]	0,895	0,244	3,670	< 0,001
Chuva [t-11]	0,679	0,213	3,196	0,001

Tabela A.6 Resumo do modelo final da Vazão explicada pela Chuva na sub-bacia Ártemis.

	Estimativa	Erro Padrão	Estatística do teste	Valor-p
Intercepto	18,056	2,813	6,419	< 0,001
Tendência	-0,030	0,01	-3,094	0,002
Chuva [t]	18,733	0,879	21,318	< 0,001
Chuva [t-1]	10,07	0,723	13,934	< 0,001
Chuva [t-2]	7,838	0,694	11,296	< 0,001
Chuva [t-3]	4,776	0,668	7,148	< 0,001
Chuva [t-4]	4,598	0,631	7,289	< 0,001
Chuva [t-5]	2,495	0,521	4,791	< 0,001
Chuva [t-6]	2,97	0,52	5,712	< 0,001
Chuva [t-7]	2,152	0,625	3,444	< 0,001

Tabela A.7 Resumo do modelo final da Vazão na sub-bacia Ártemis explicada pelo IOS.

	Estimativa	Erro Padrão	Estatística do teste	Valor-p
Intercepto	12,556	5,244	2,394	0,017
Tendência	-0,054	0,016	-3,300	0,001
IOS [t-8]	0,442	0,227	1,946	0,052
IOS [t-11]	-0,387	0,238	-1,624	0,105

Tabela A.8 Resumo do modelo final da Chuva na sub-bacia Ártemis explicada pelo IOS.

	Estimativa	Erro Padrão	Estatística do teste	Valor-p
Intercepto	-1,169	0,066	-17,650	< 0,001
IOS [t-1]	-0,020	0,006	-3,310	0,001

APÊNDICE B

Figuras

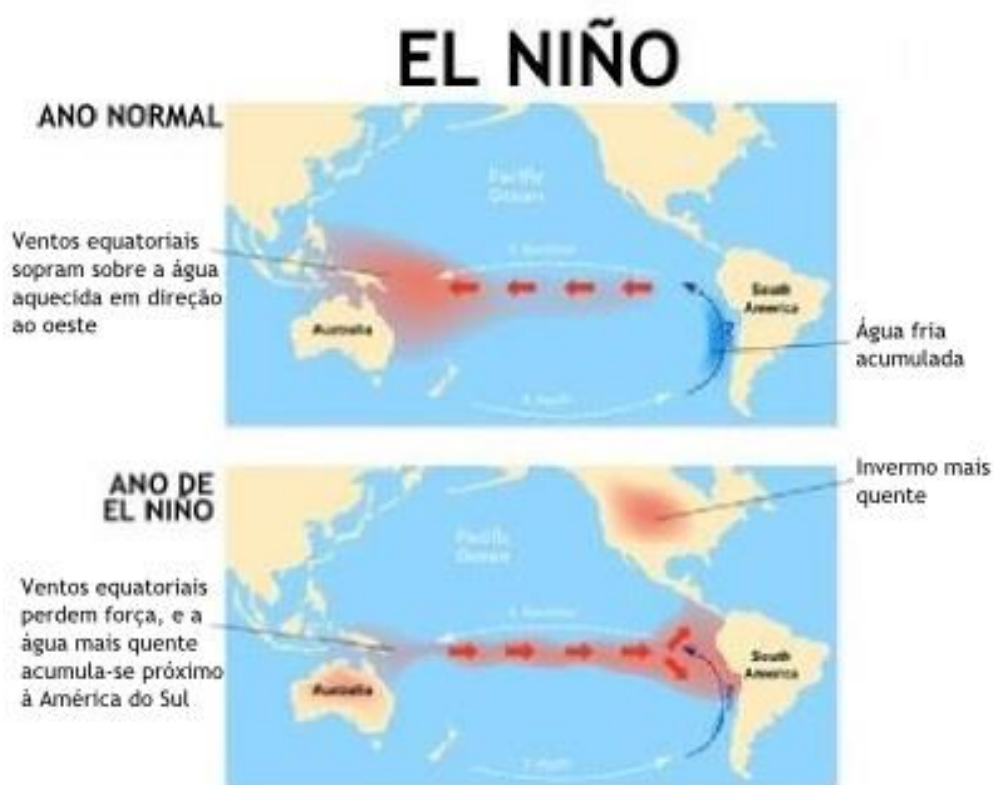


Figura B.1 Ilustração do comportamento do El Niño.

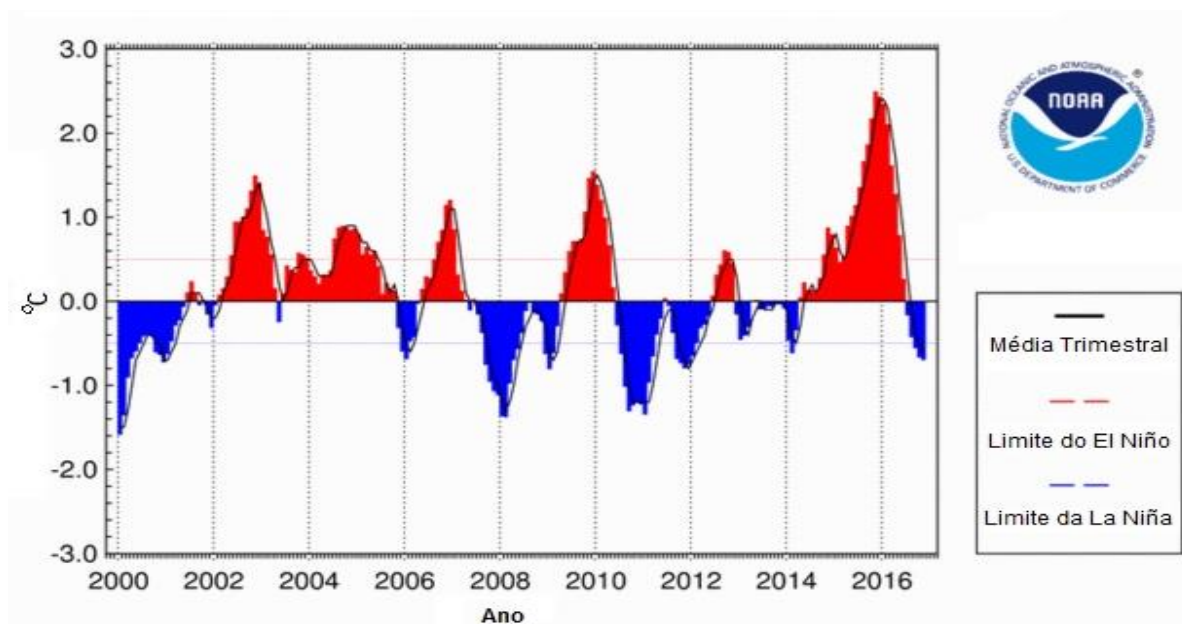


Figura B.2 Gráfico da média trimestral da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) na região 3.4 (região central do Pacífico equatorial) do Niño.

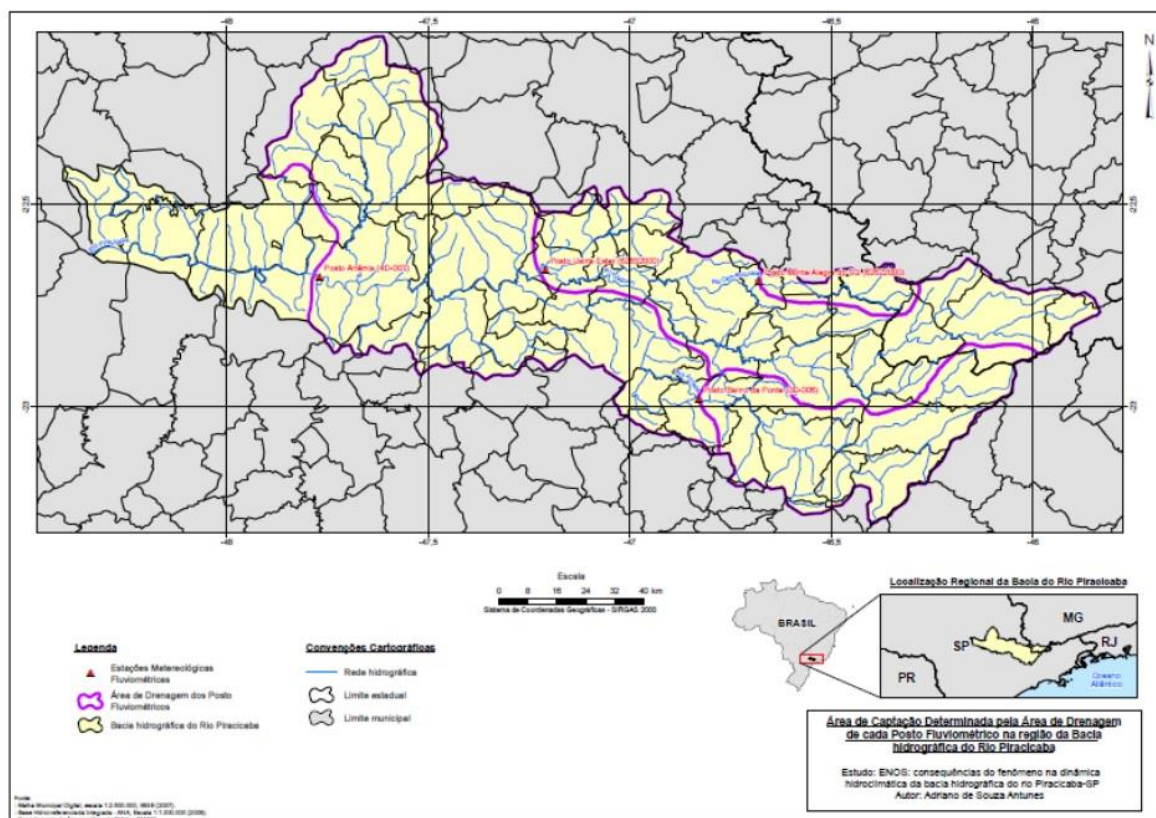


Figura B.3 Mapa da Bacia hidrográfica do Rio Piracicaba-SP e das 4 estações fluviométricas utilizadas na análise.

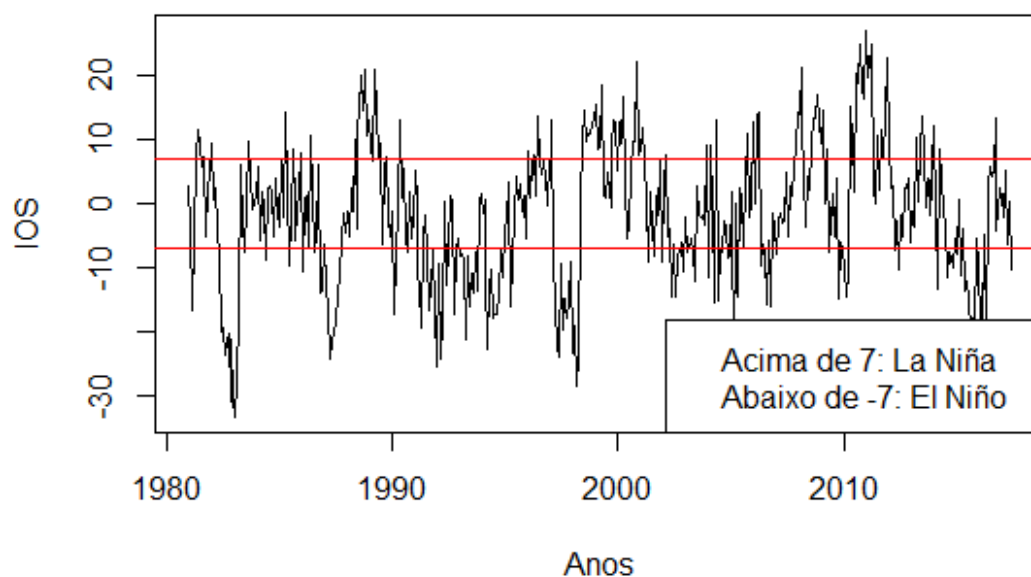


Figura B.4 Gráfico da série de IOS com retas indicando possível classificação de fenômeno.

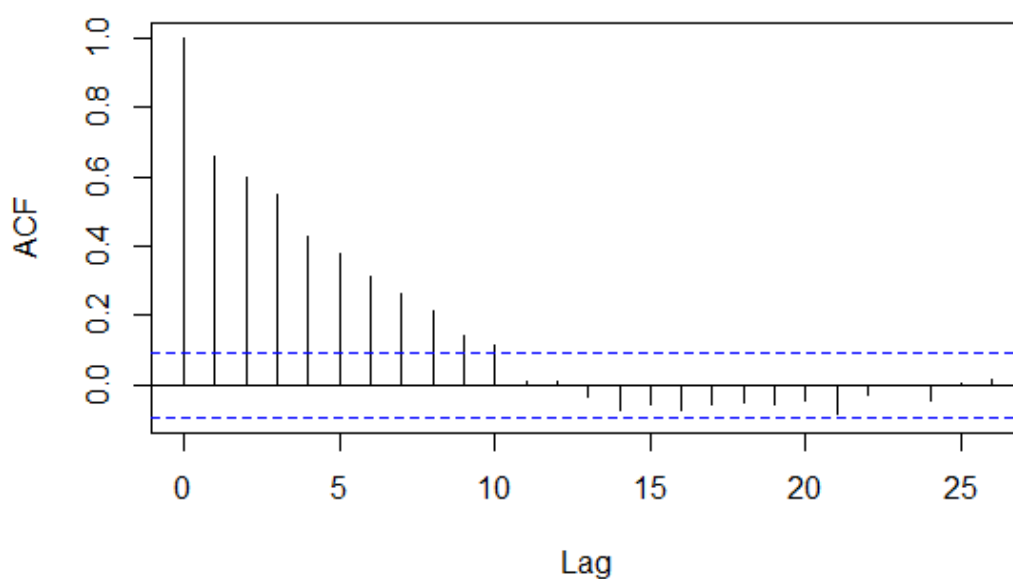


Figura B.5 Gráfico de autocorrelação da série IOS.

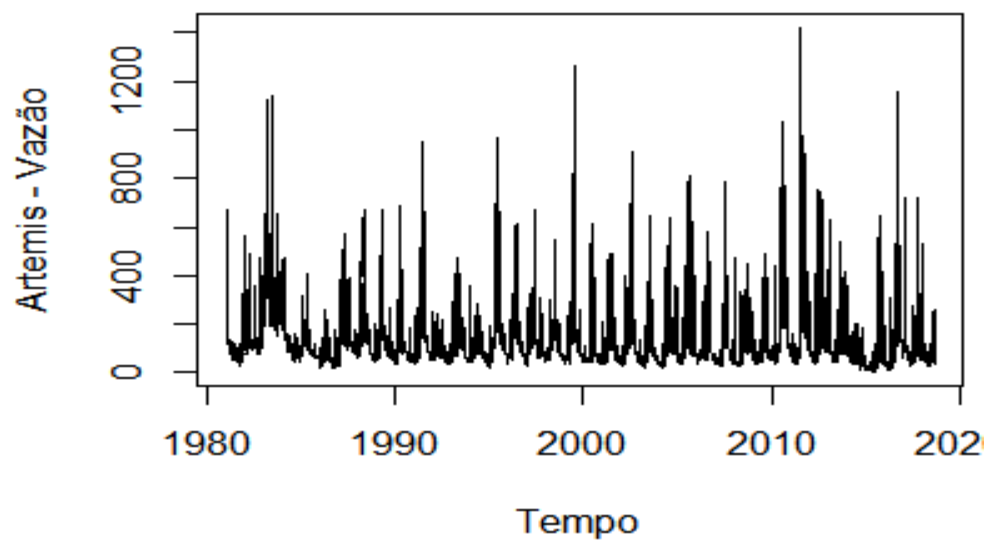


Figura B.6 Gráfico da série Vazão diária da sub-bacia Ártemis.

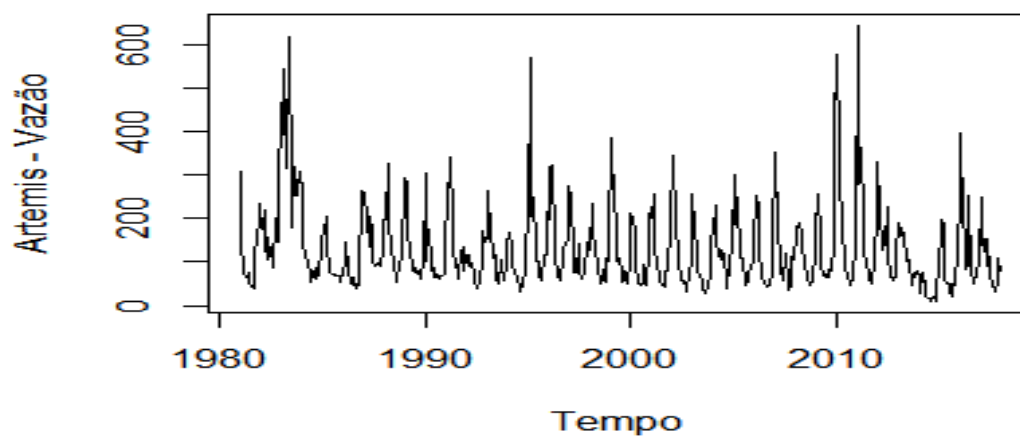


Figura B.7 Gráfico da série Vazão mensal da sub-bacia Ártemis.

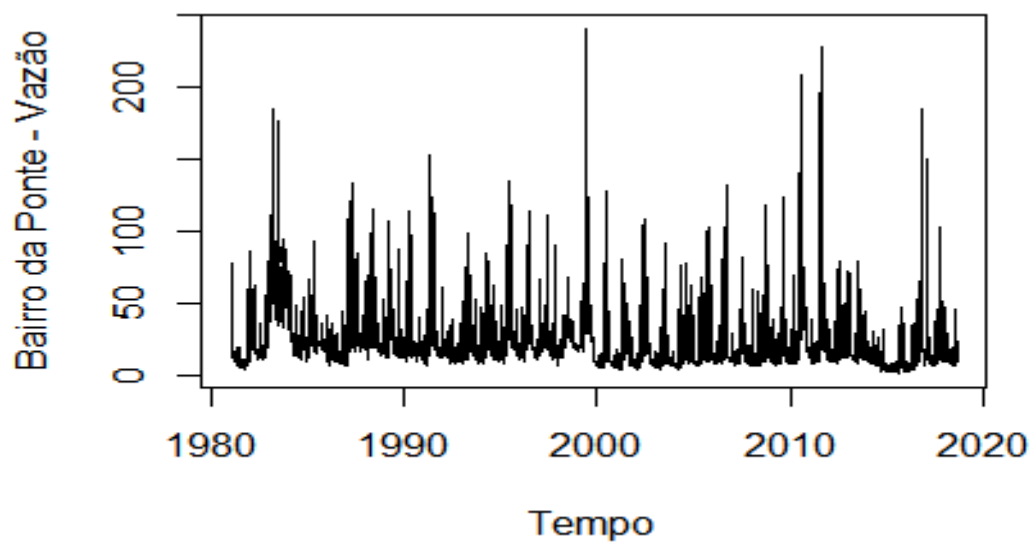


Figura B.8 Gráfico da série Vazão diária da sub-bacia Bairro da Ponte.

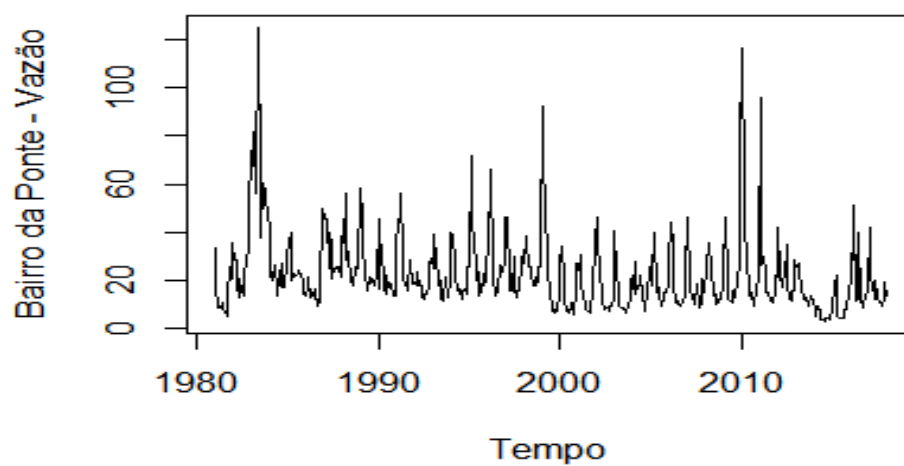


Figura B.9 Gráfico da série Vazão mensal da sub-bacia Bairro da Pote.

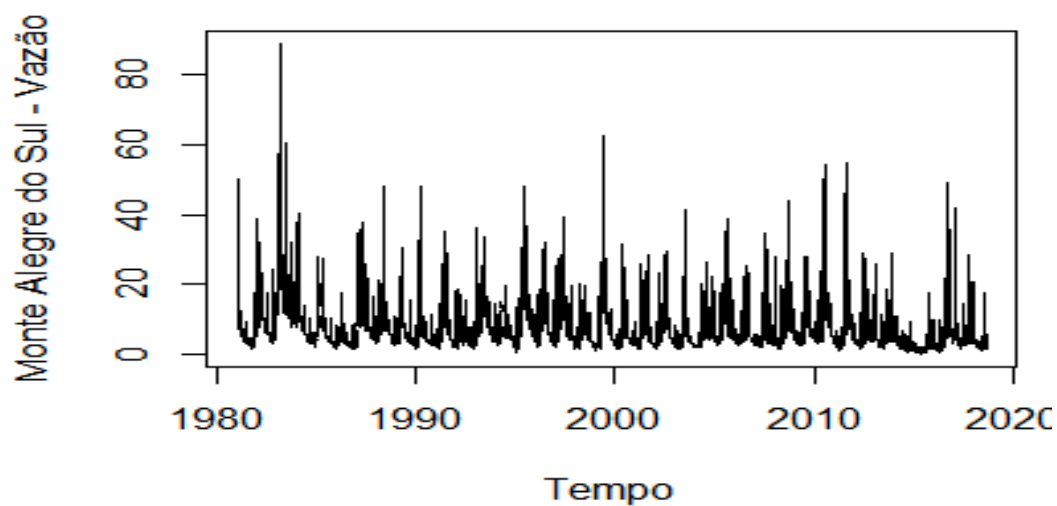


Figura B.10 Gráfico da série Vazão diária da sub-bacia Monte Alegre do Sul.

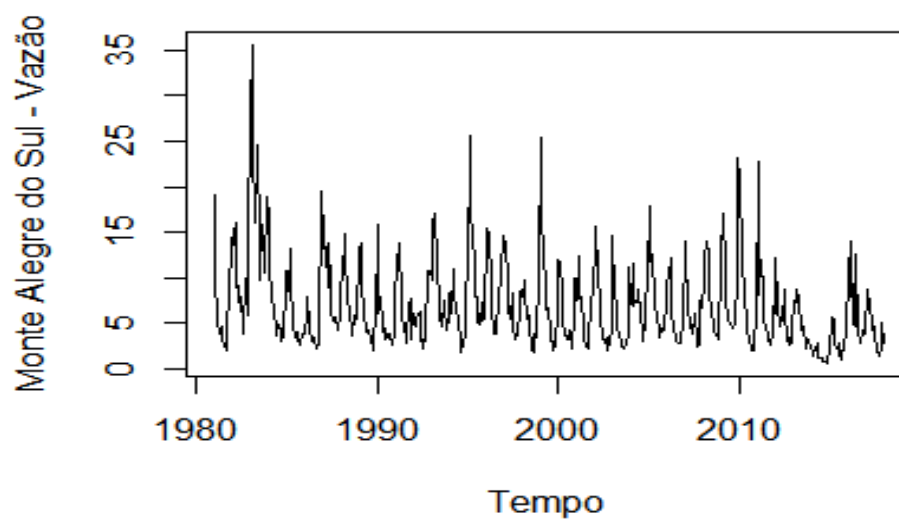


Figura B.11 Gráfico da série Vazão mensal da sub-bacia Monte Alegre do Sul.

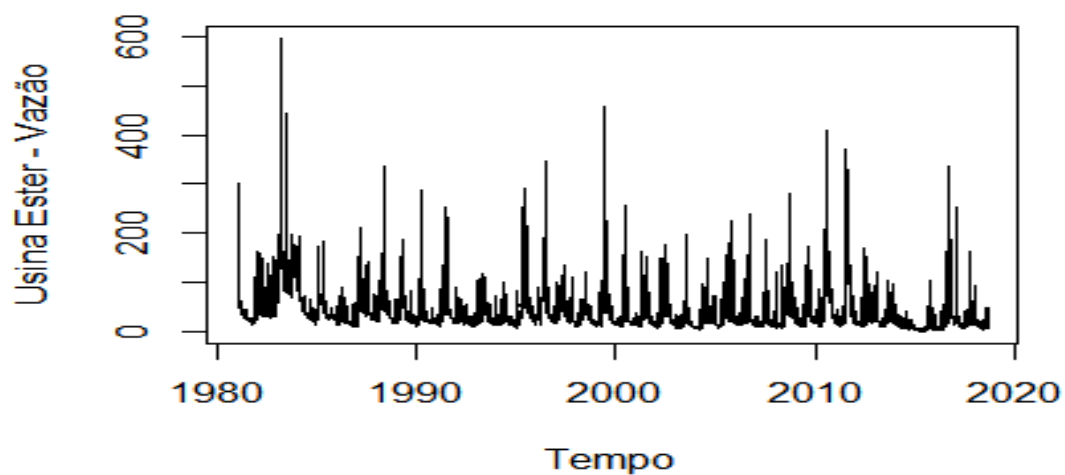


Figura B.12 Gráfico da série Vazão diária da sub-bacia Usina Ester.

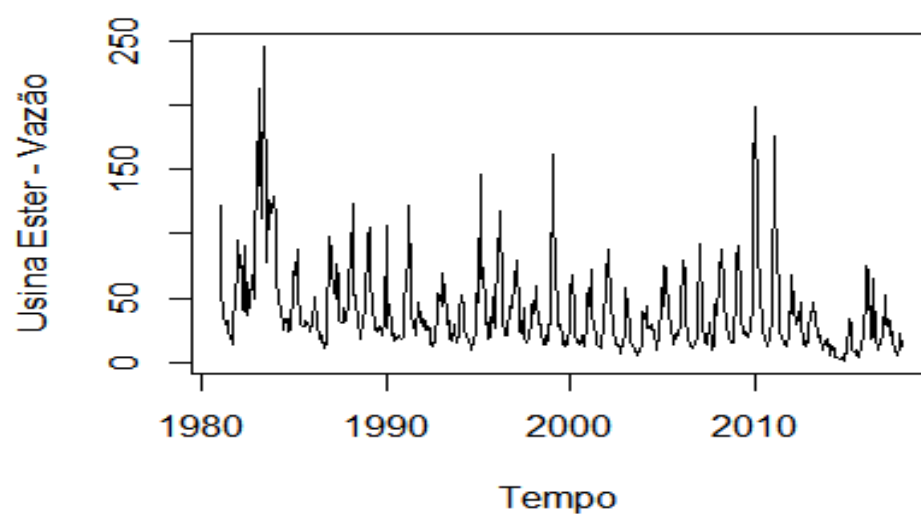


Figura B.13 Gráfico da série Vazão mensal da sub-bacia Usina Ester.

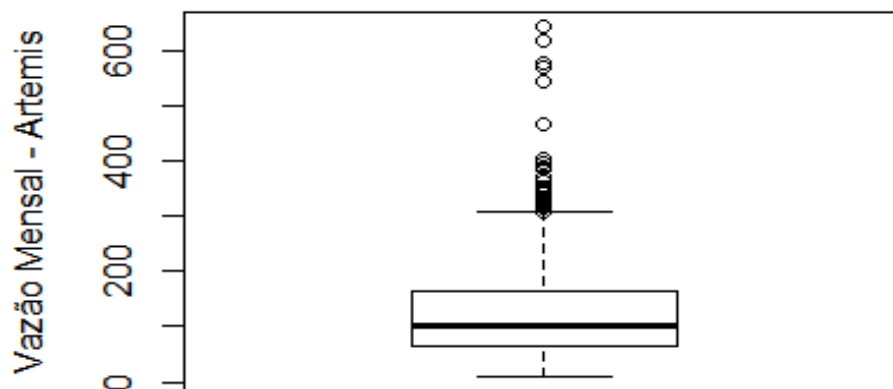


Figura B.14 *Box plot* da série de Vazão mensal da sub-bacia Ártemis.

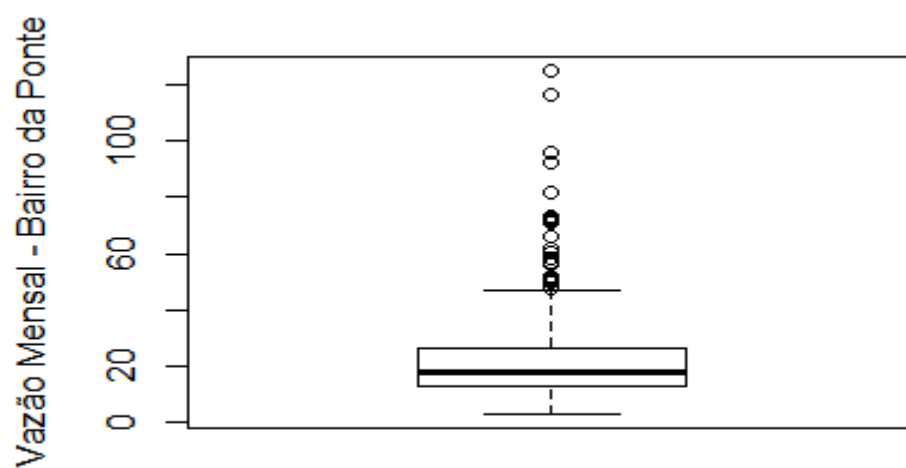


Figura B.15 *Box plot* da série de Vazão mensal da sub-bacia Bairro da Ponte.

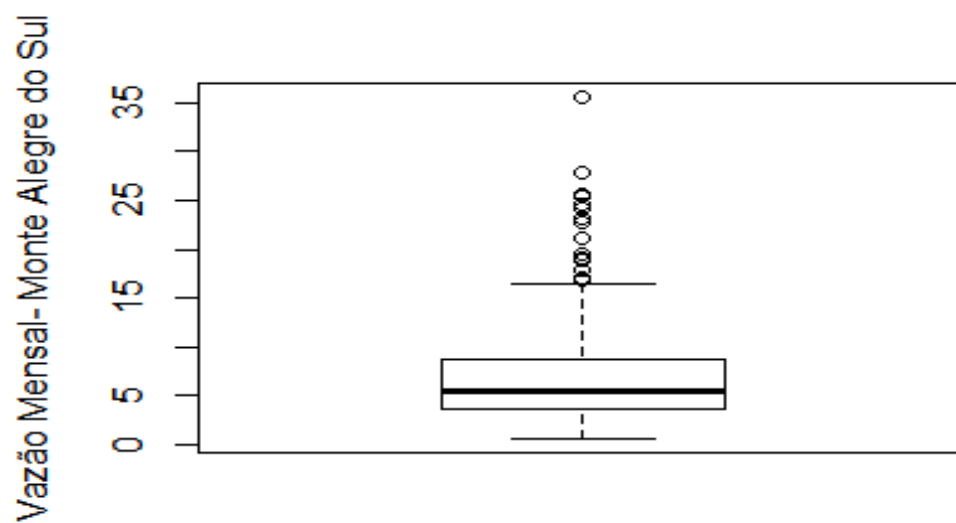


Figura B.16 *Box plot* da série de Vazão mensal da sub-bacia Monte Alegre do Sul.

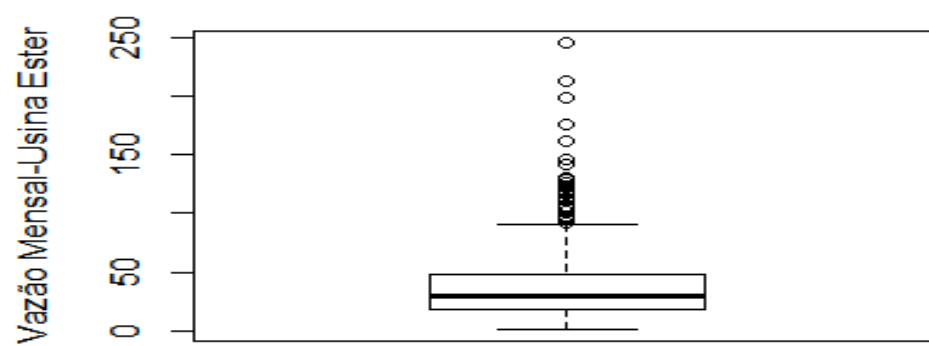


Figura B.17 *Box plot* da série de Vazão mensal da sub-bacia Usina Ester.

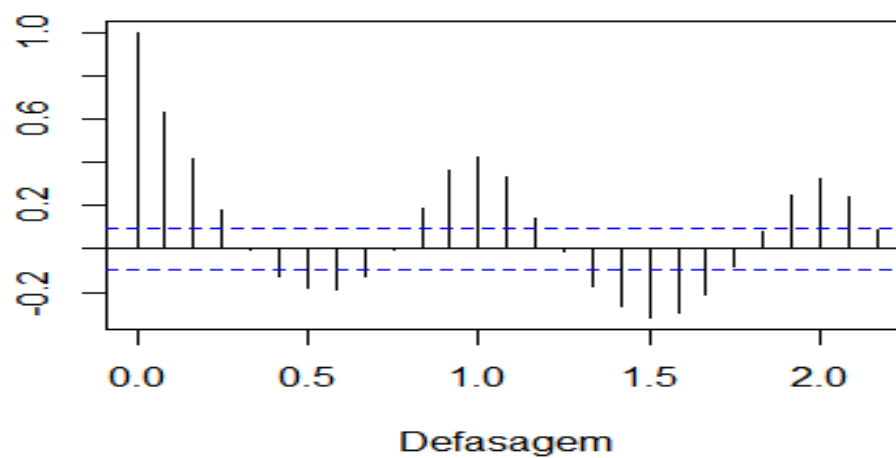


Figura B.18 Autocorrelações da Vazão mensal da sub-bacia Ártemis.

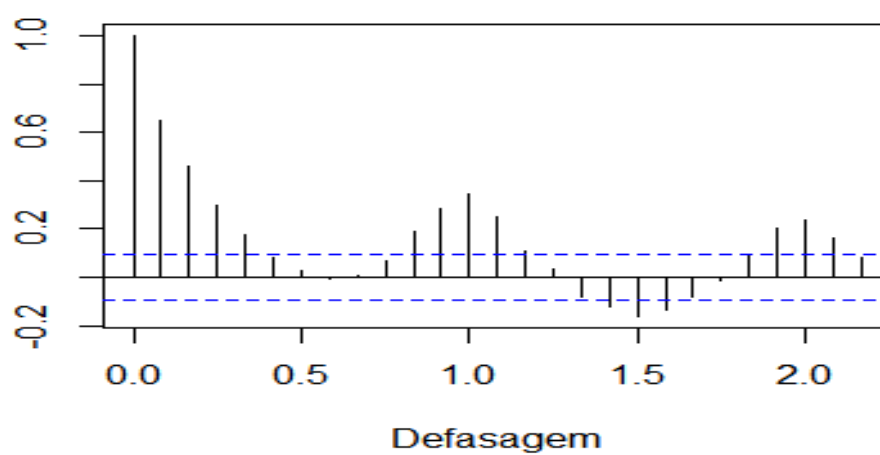


Figura B.19 Autocorrelações da Vazão mensal da sub-bacia Bairro da Ponte.

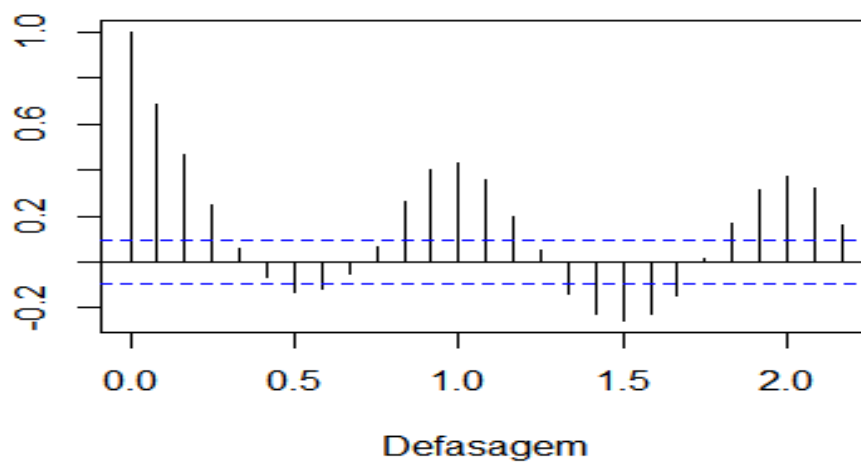


Figura B.20 Autocorrelações da Vazão mensal da sub-bacia Monte Alegre do Sul.

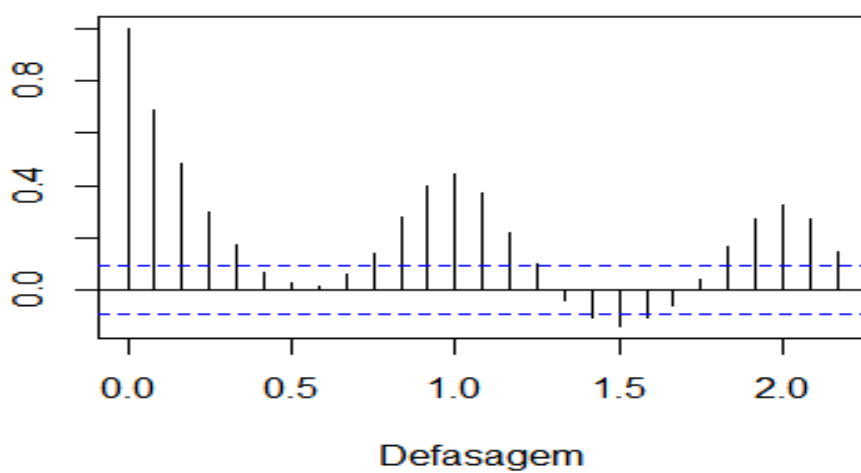


Figura B.21 Autocorrelações da Vazão mensal da sub-bacia Usina Ester.

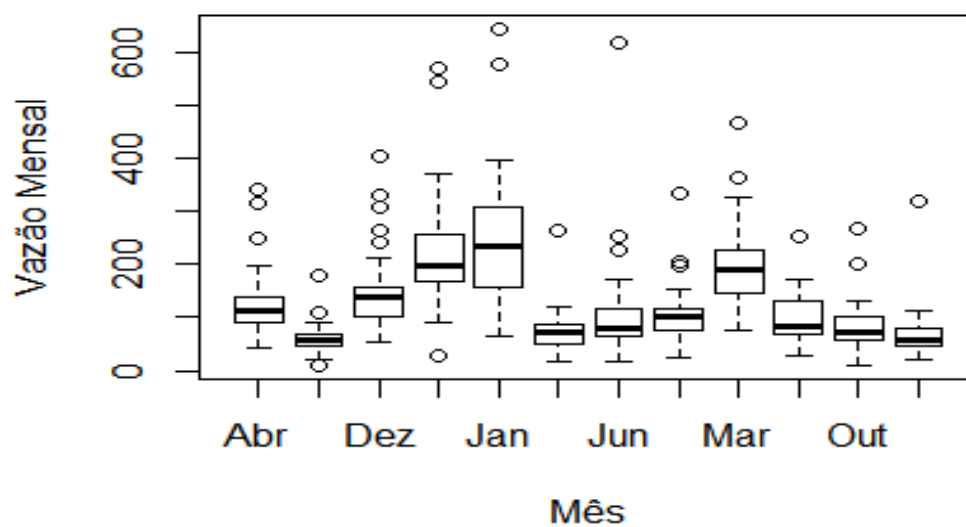


Figura B.22 *Box plots* por mês para a Vazão mensal da sub-bacia Ártemis.

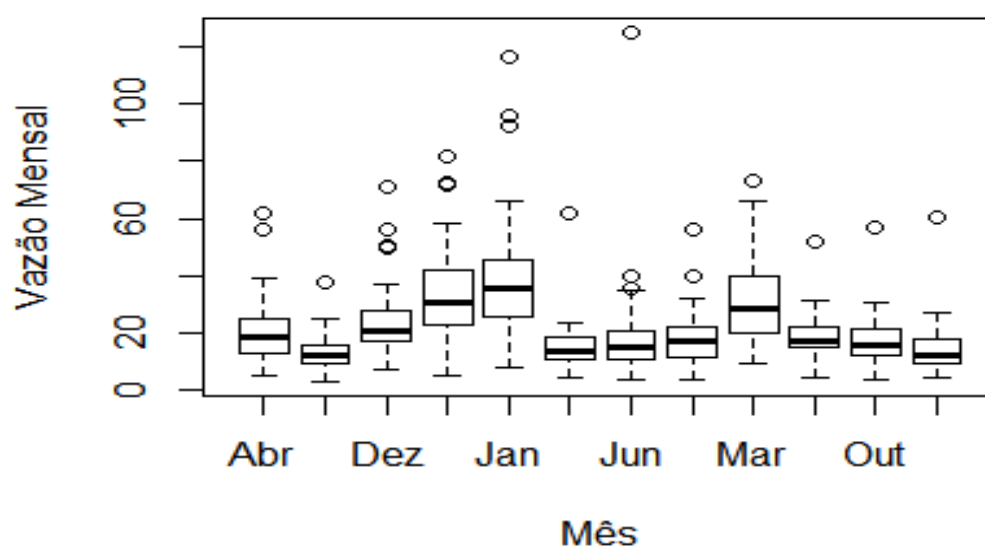


Figura B.23 *Box plots* por mês para a Vazão mensal da sub-bacia Bairro da Ponte.

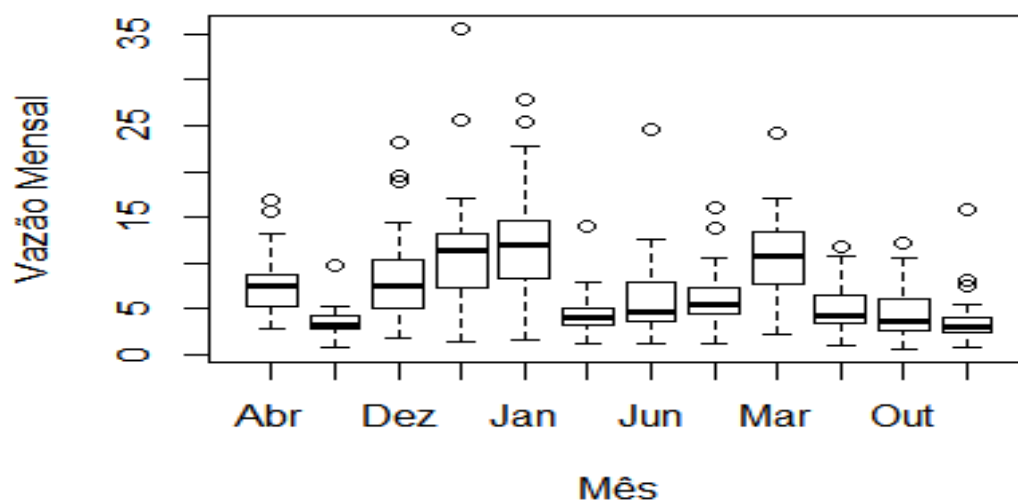


Figura B.24 Box plots por mês para a Vazão mensal da sub-bacia Monte Alegre do Sul.

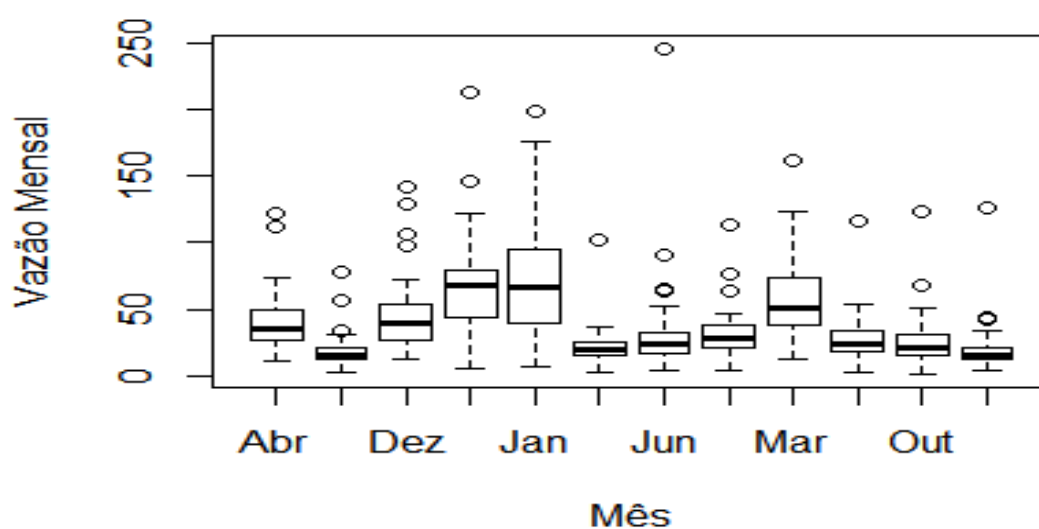


Figura B.25 Box plots por mês para a Vazão mensal da sub-bacia Usina Ester.

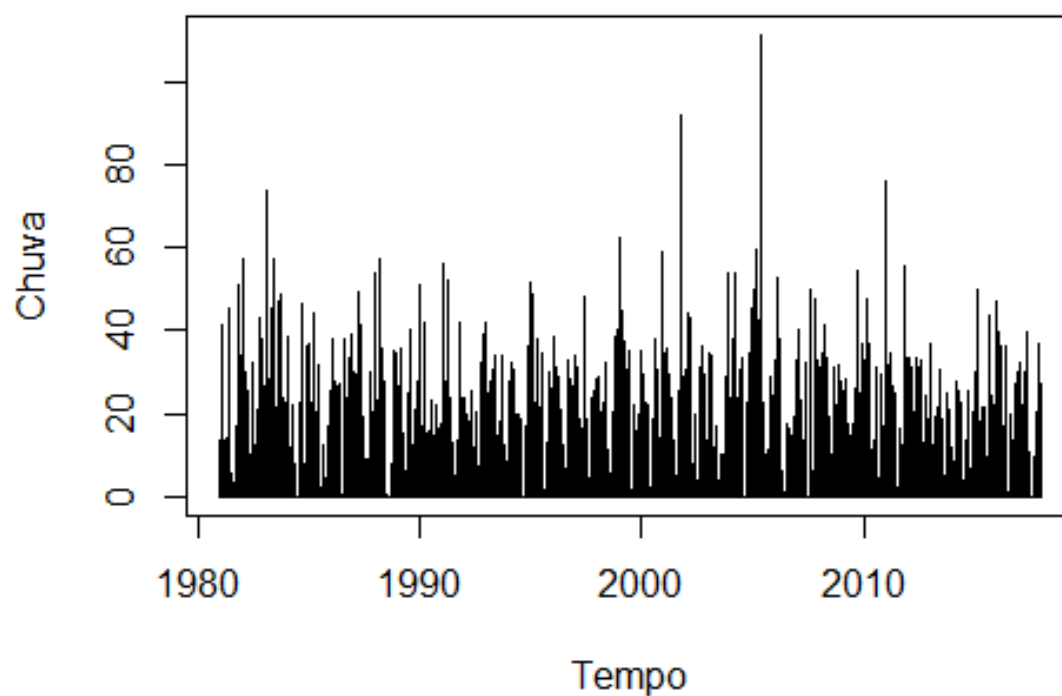


Figura B.26 Gráfico da série de Chuva diária da sub-bacia Ártemis.

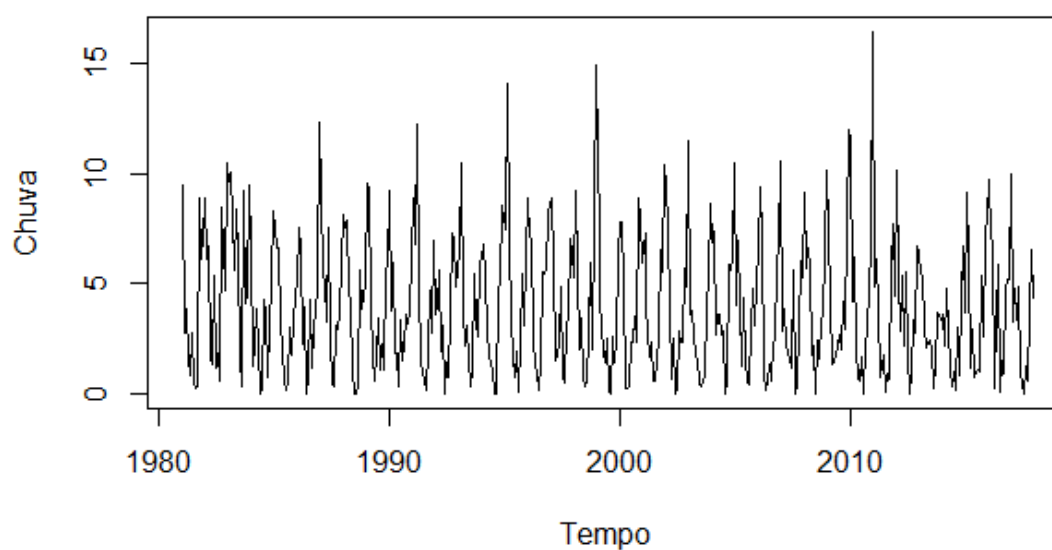


Figura B.27 Gráfico da série de Chuva mensal da sub-bacia Ártemis.

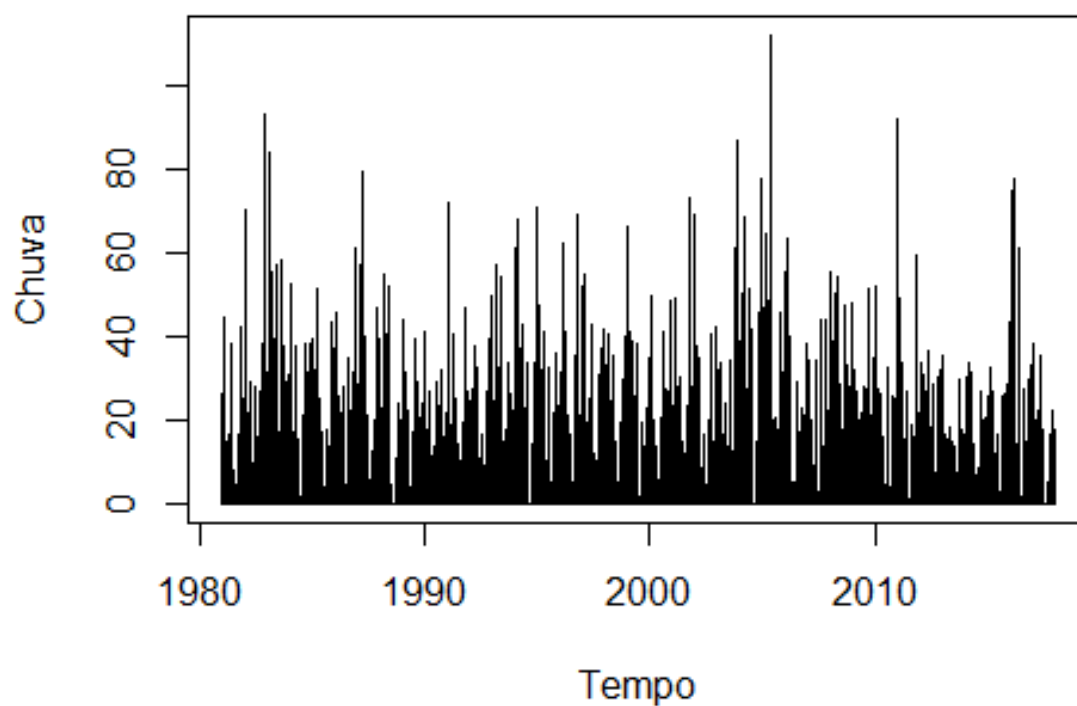


Figura B.28 Gráfico da série de Chuva diária da sub-bacia Bairro da Ponte.

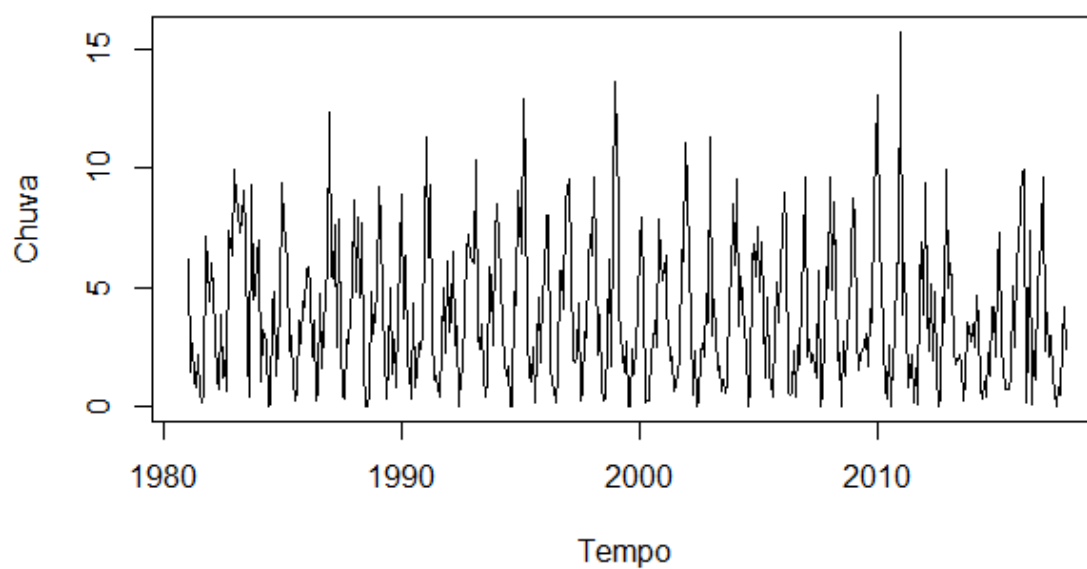


Figura B.29 Gráfico da série de Chuva mensal da sub-bacia Bairro da Ponte.

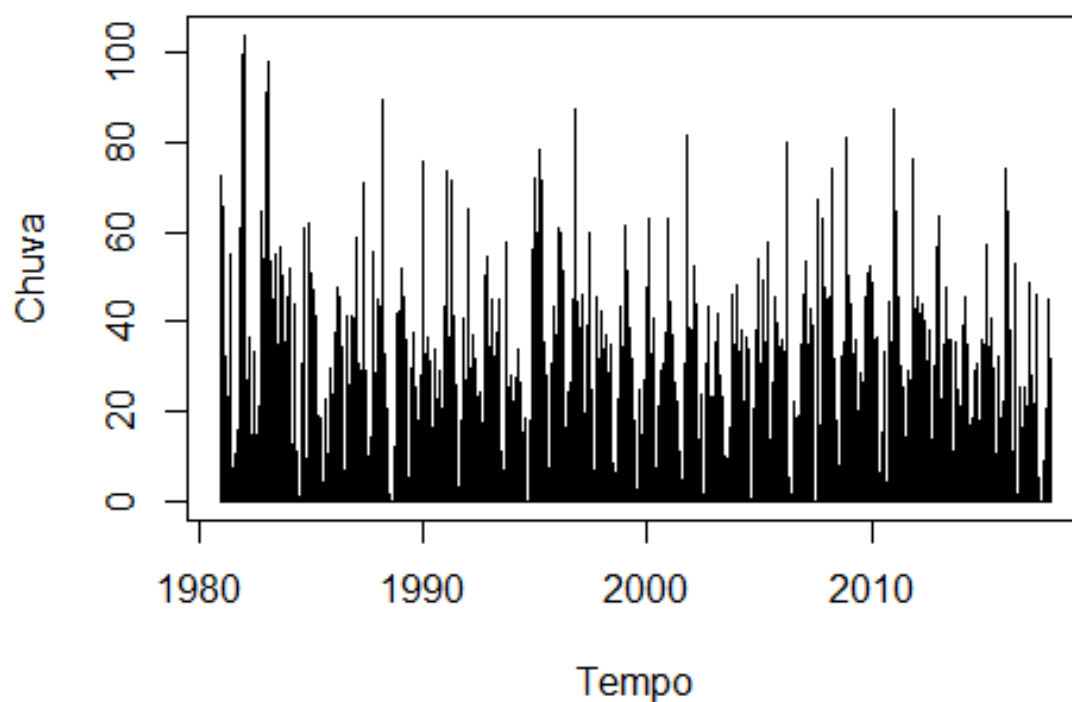


Figura B.30 Gráfico da série de Chuva diária da sub-bacia Monte Alegre do Sul.

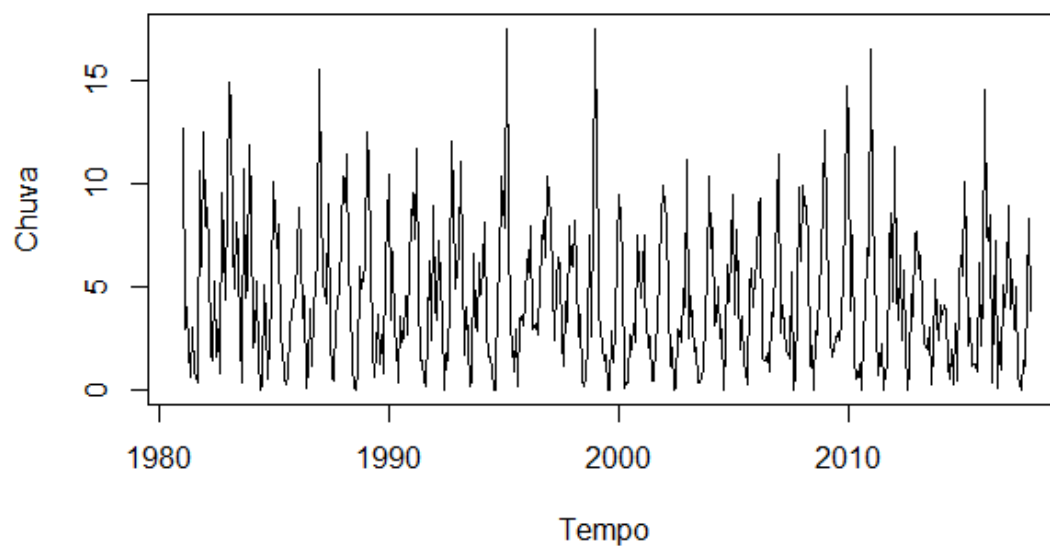


Figura B.31 Gráfico da série de Chuva mensal da sub-bacia Monte Alegre do Sul.

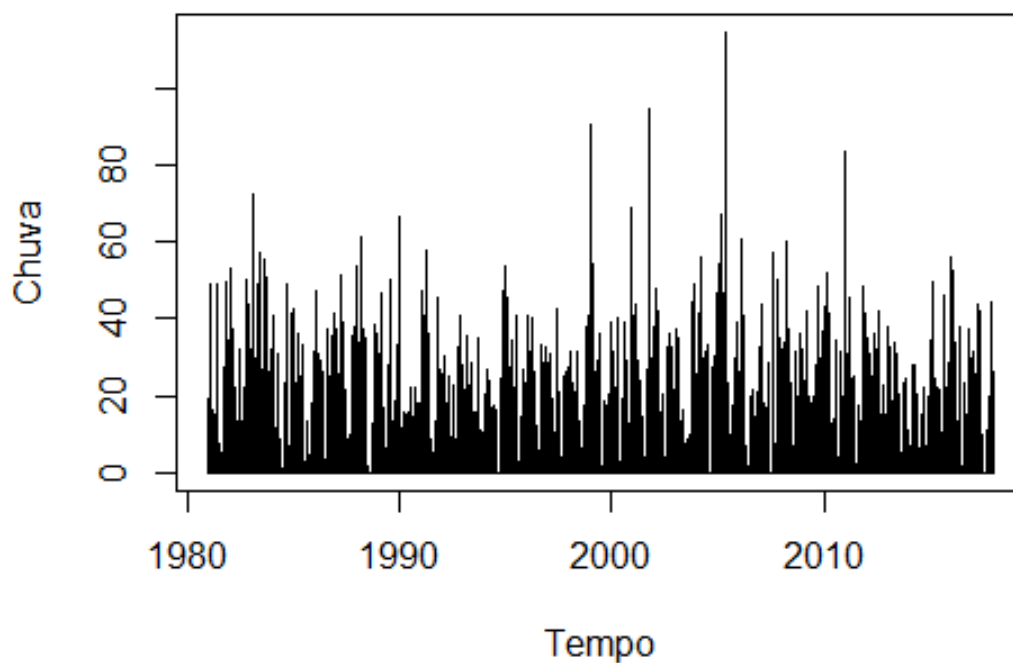


Figura B.32 Gráfico da série de Chuva diária da sub-bacia Usina Ester.

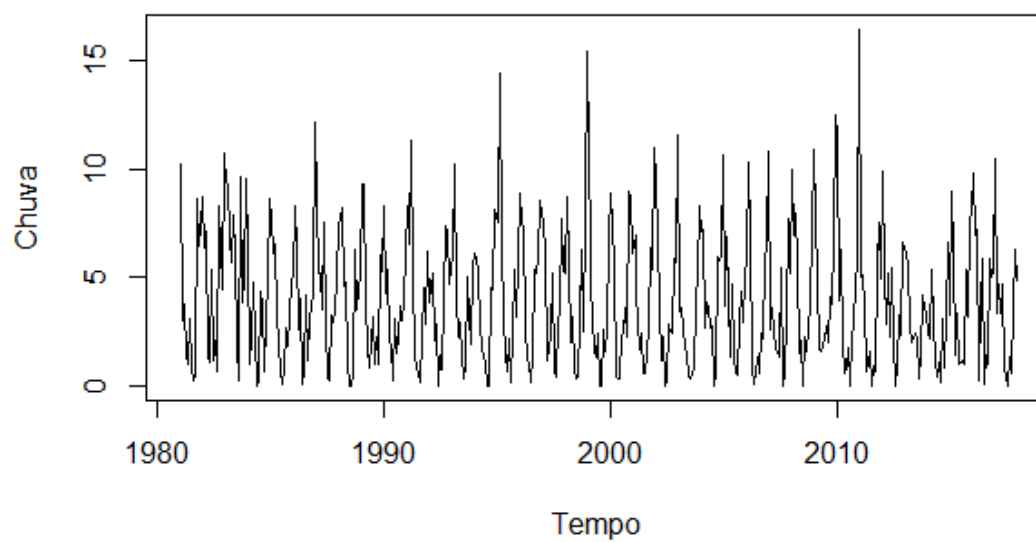


Figura B.33 Gráfico da série de Chuva mensal da sub-bacia Usina Ester.

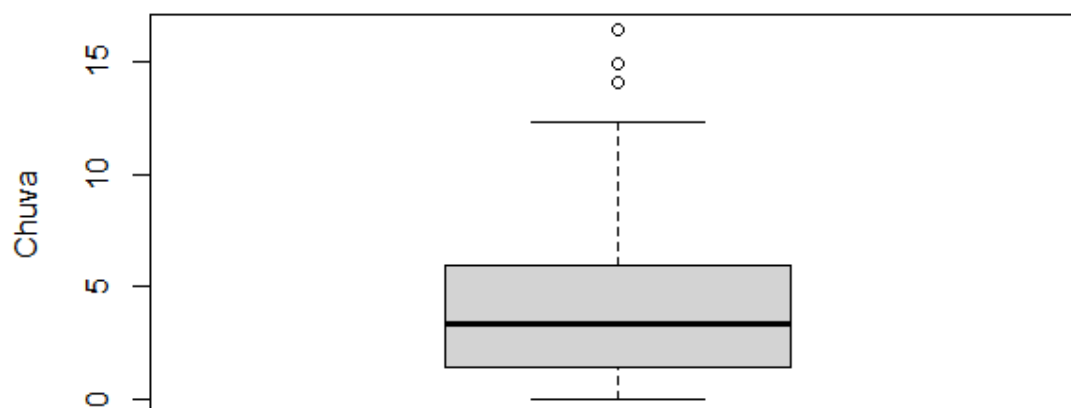


Figura B.34 *Box plot* da série de Chuva mensal da sub-bacia Ártemis.

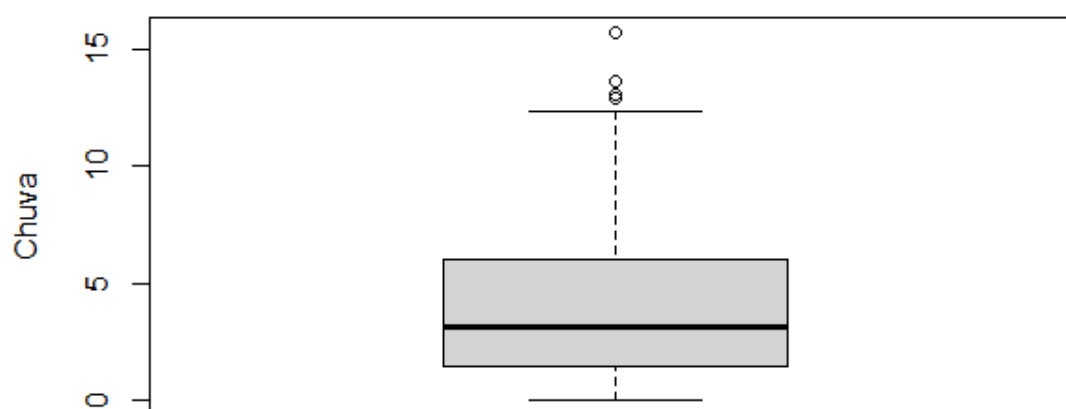


Figura B.35 *Box plot* da série de Chuva mensal da sub-bacia Bairro da Ponte.

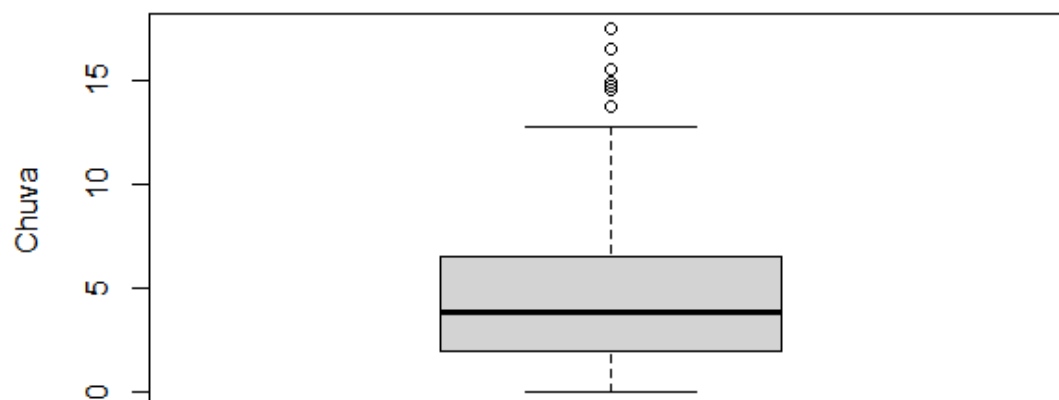


Figura B.36 *Box plot* da série de Chuva mensal da sub-bacia Monte Alegre do Sul.

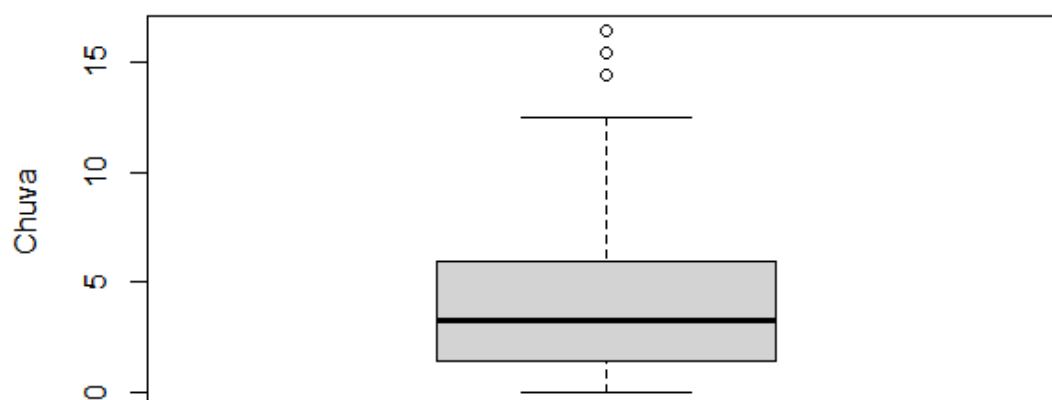


Figura B.37 *Box plot* da série de Chuva mensal da sub-bacia Usina Ester.

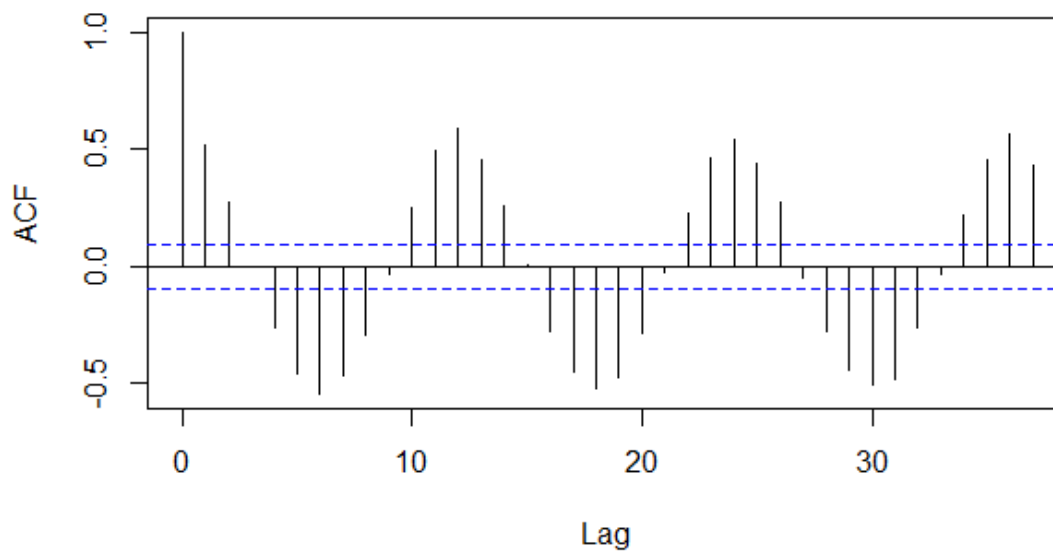


Figura B.38 Autocorrelações da Chuva mensal da sub-bacia Ártemis.

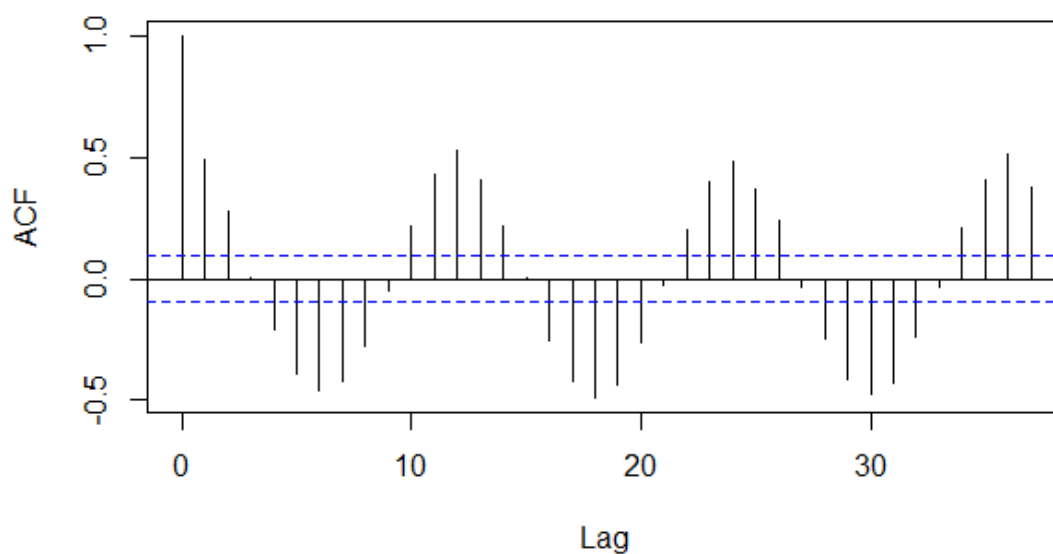


Figura B.39 Autocorrelações da Chuva mensal da sub-bacia Bairro da Ponte.

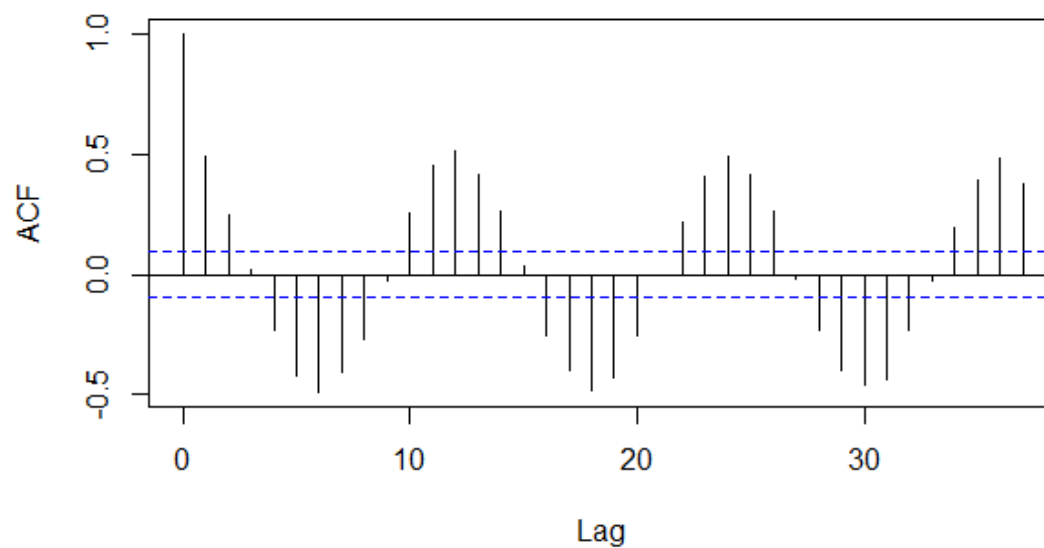


Figura B.40 Autocorrelações da Chuva mensal da sub-bacia Monte Alegre do Sul.

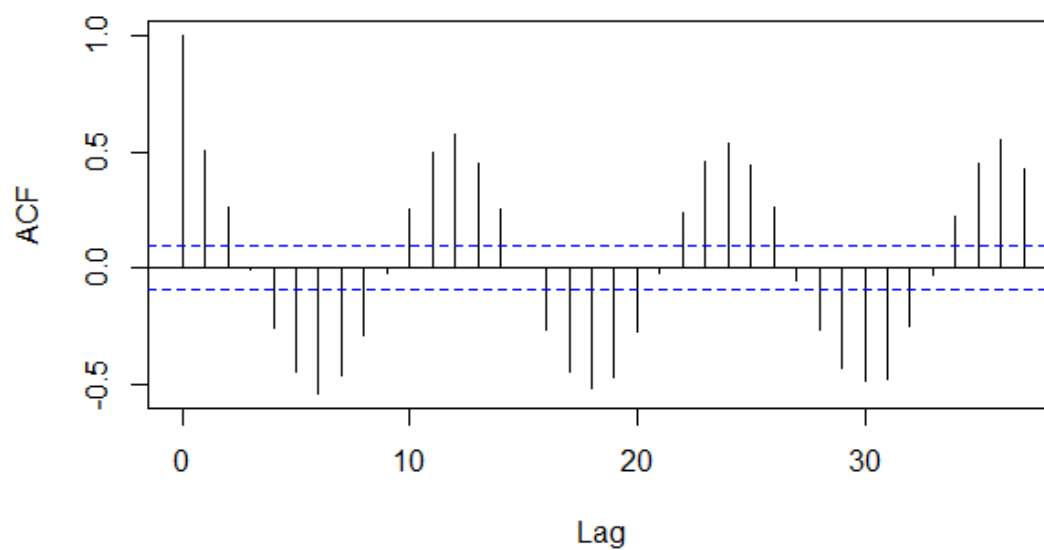


Figura B.41 Autocorrelações da Chuva mensal da sub-bacia Usina Ester.

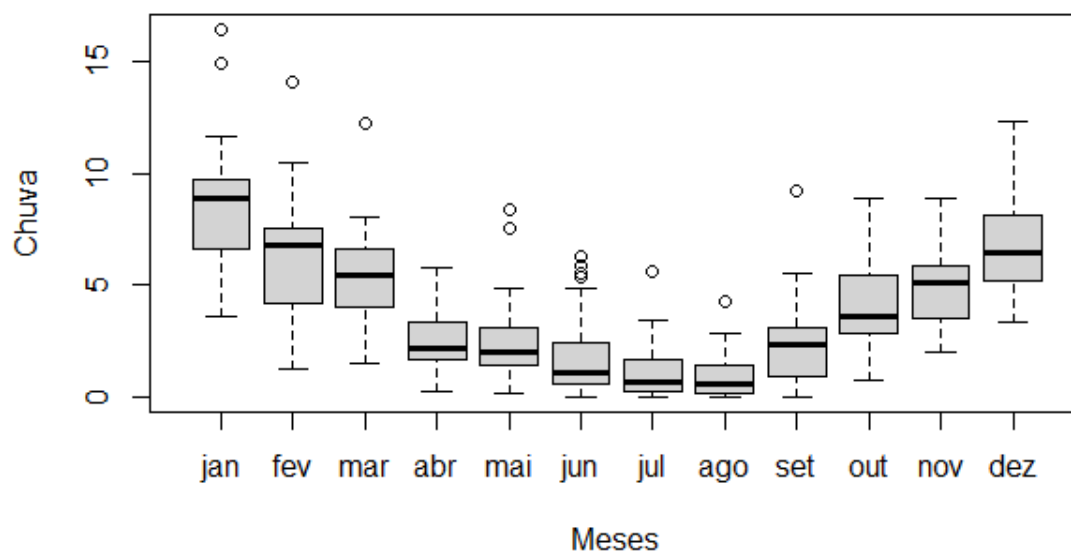


Figura B.42 *Box plots* por mês para a Chuva mensal da sub-bacia Ártémis.

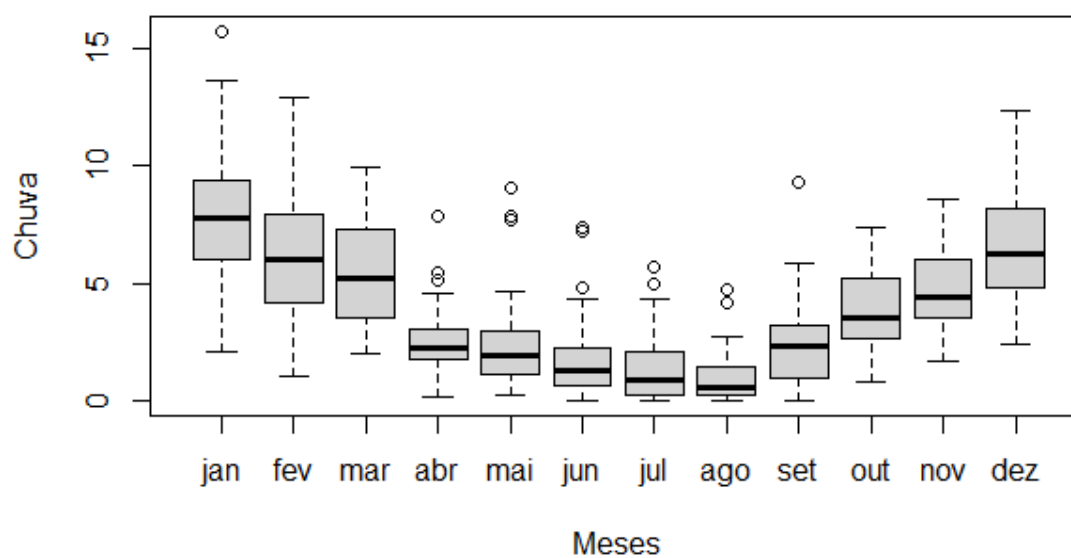


Figura B.43 *Box plots* por mês para a Chuva mensal da sub-bacia Bairro da Ponte.

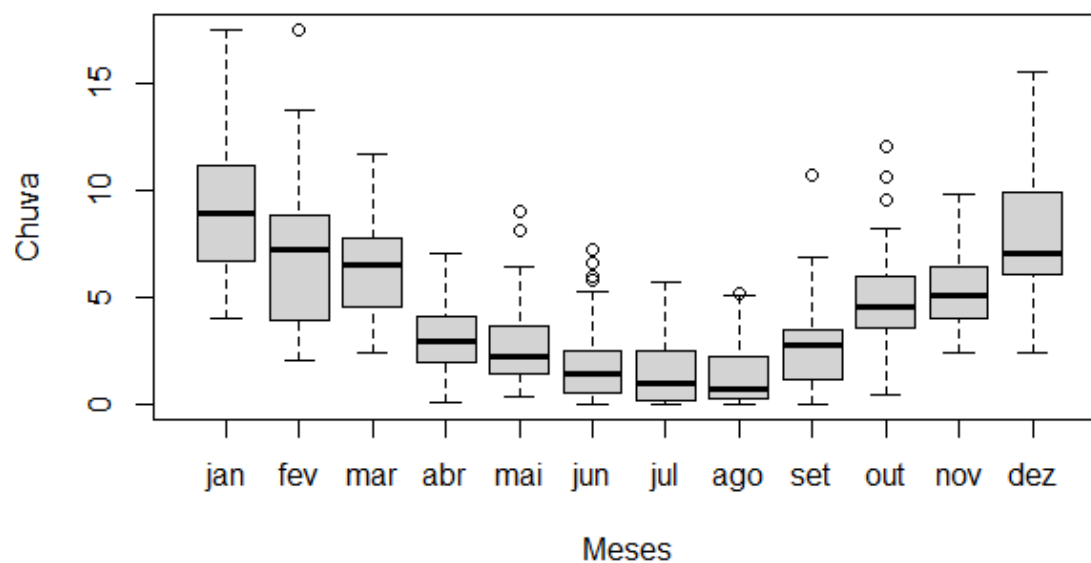


Figura B.44 Box plots por mês para a Chuva mensal da sub-bacia Monte Alegre do Sul.

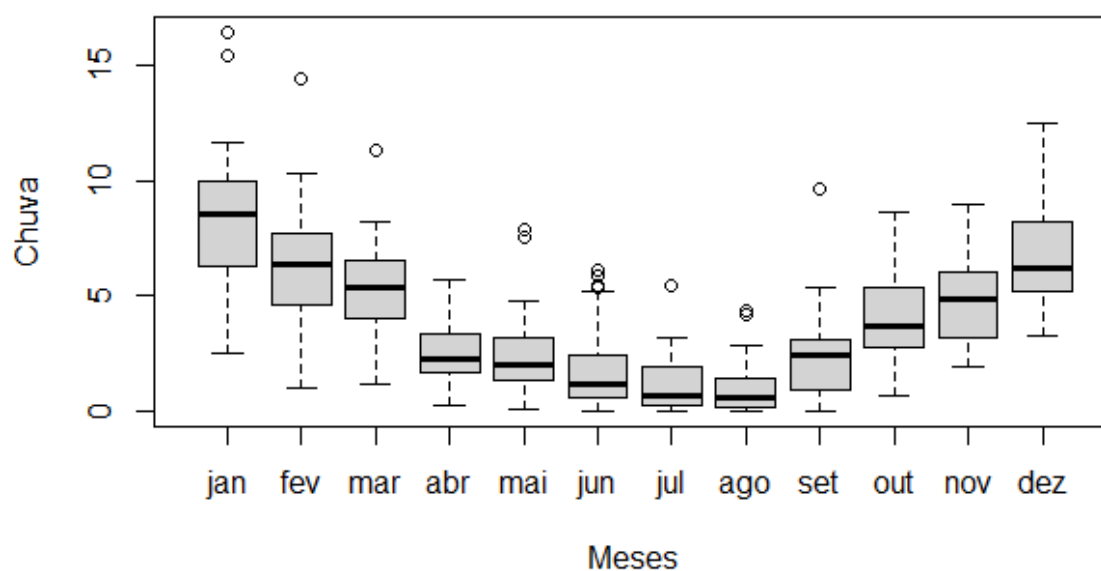


Figura B.45 Box plots por mês para a Chuva mensal da sub-bacia Usina Ester.

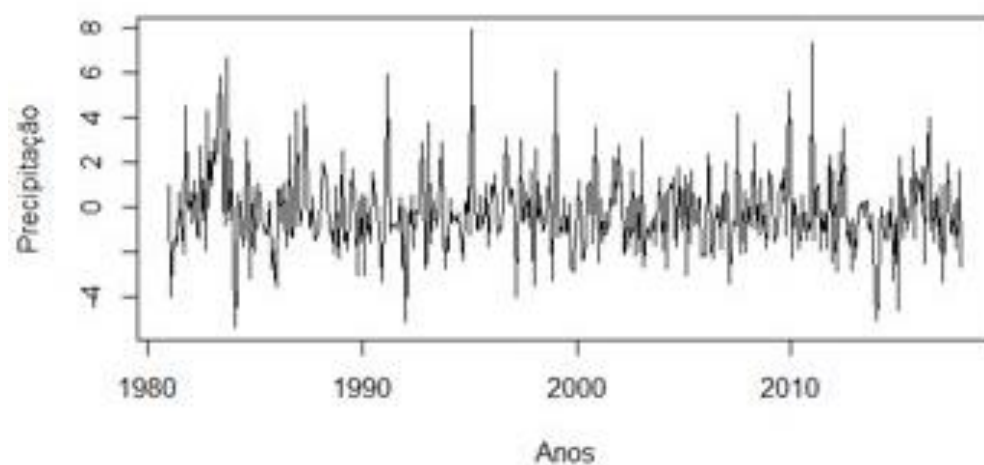


Figura B.46 Série da Chuva sem sazonalidade na sub-bacia Ártemis.

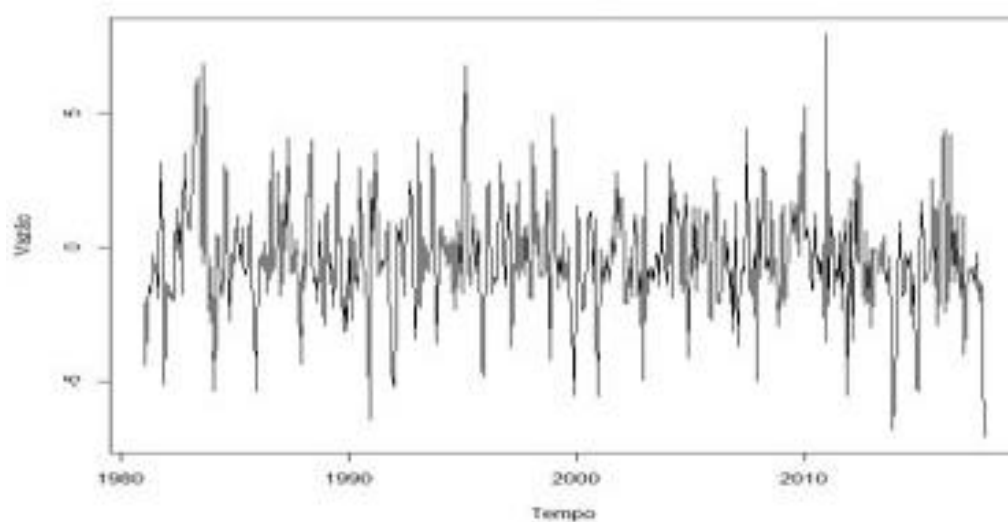


Figura B.47 Série da Chuva sem sazonalidade na sub-bacia Bairro da Ponte.

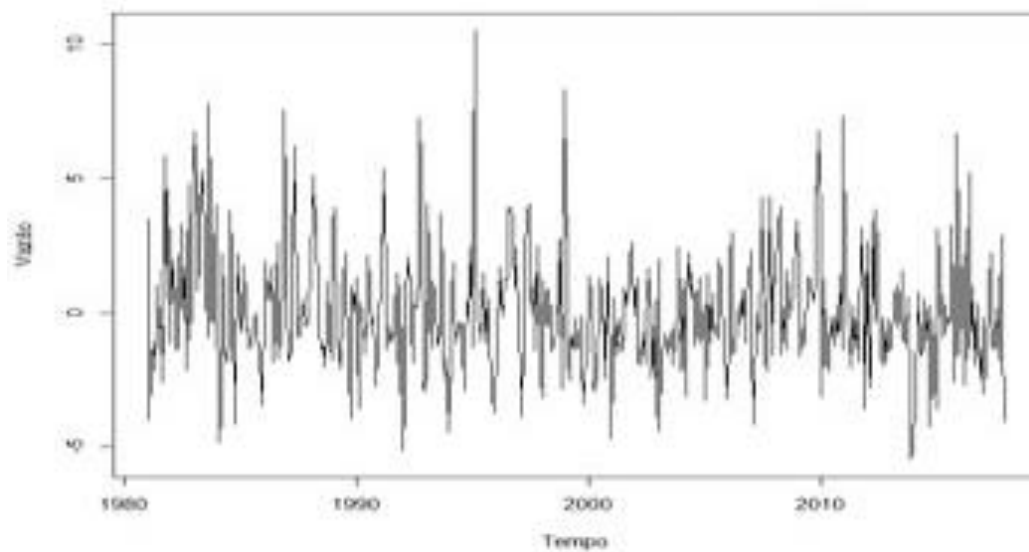


Figura B.48 Série da Chuva sem sazonalidade na sub-bacia Monte Alegre do Sul.

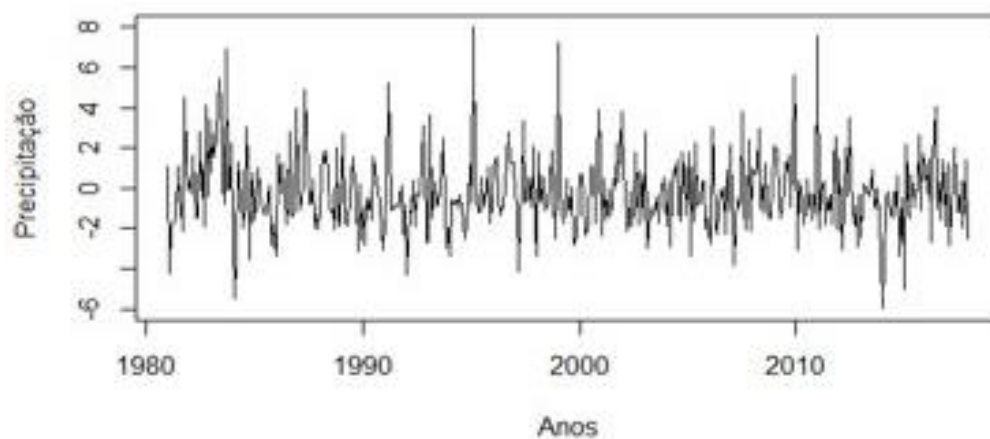


Figura B.49 Série da Chuva sem sazonalidade na sub-bacia Usina Ester.

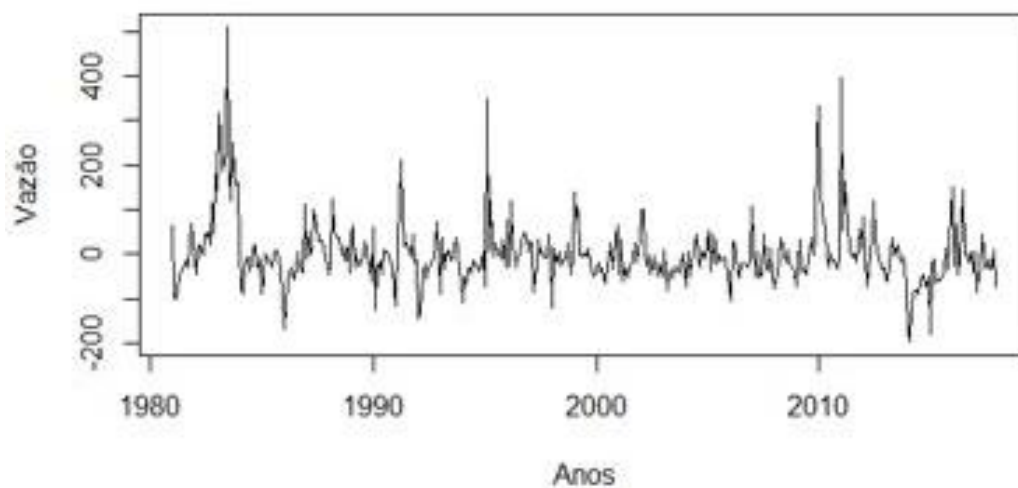


Figura B.50 Série da Vazão sem sazonalidade na estação Ártemis.

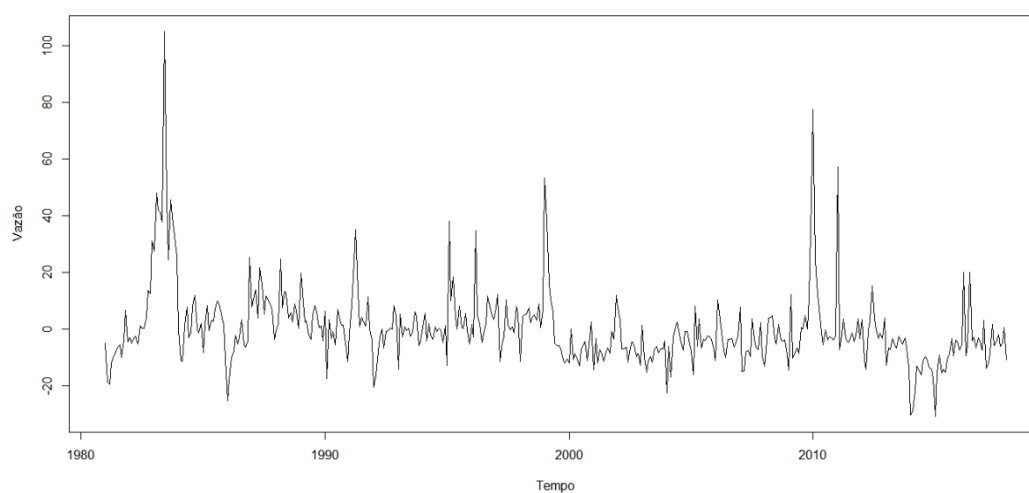


Figura B.51 Série da Vazão sem sazonalidade na estação Bairro da Ponte.

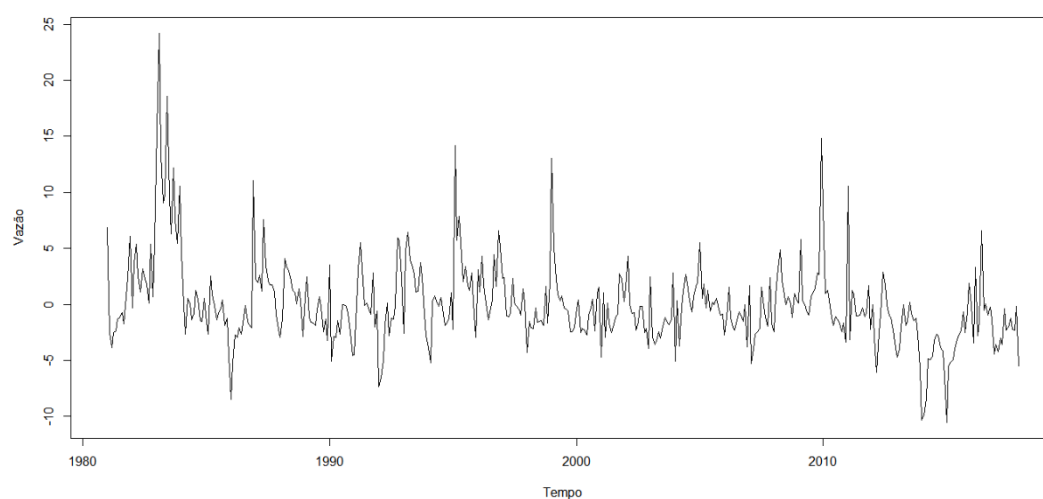


Figura B.52 Série da Vazão sem sazonalidade na estação Monte Alegre do Sul.

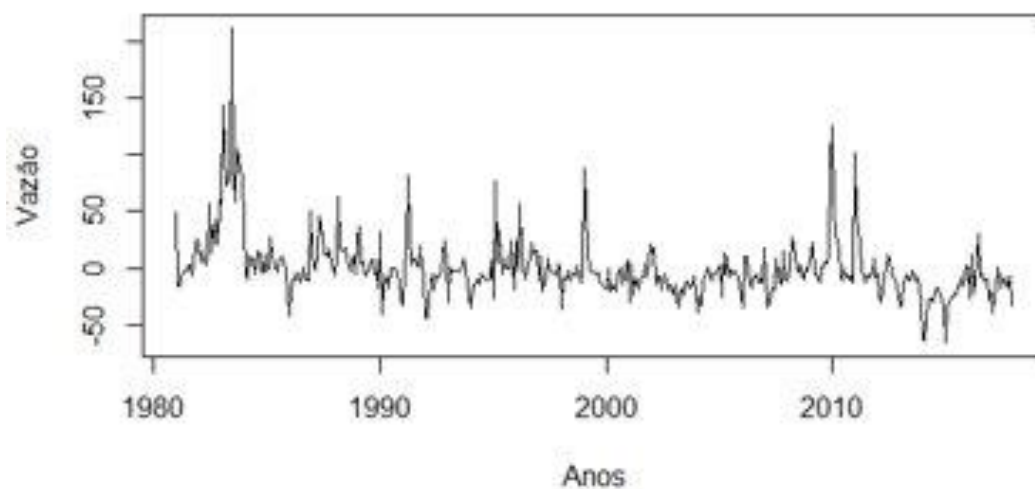


Figura B.53 Série da Vazão sem sazonalidade na estação Usina Ester.

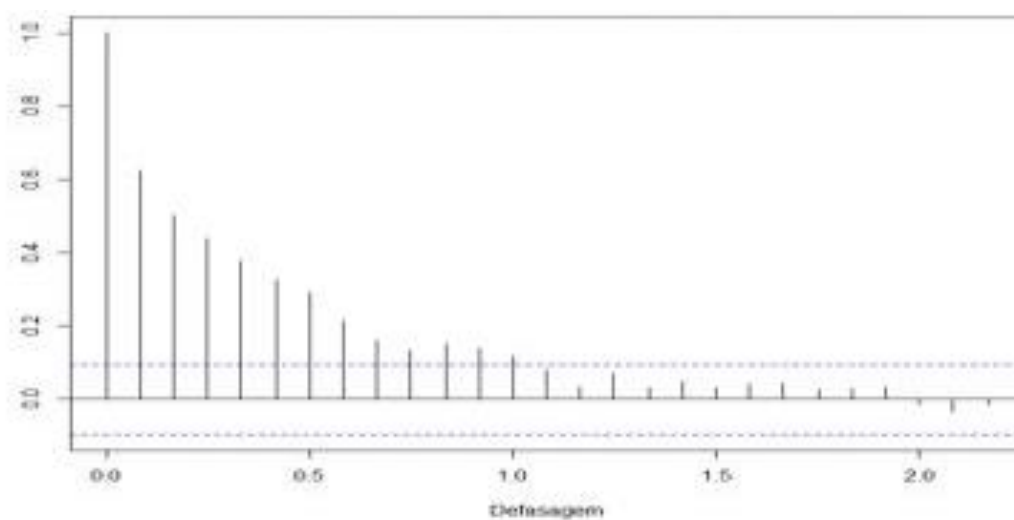


Figura B.54 Autocorrelações da Vazão na estação Bairro da Ponte.

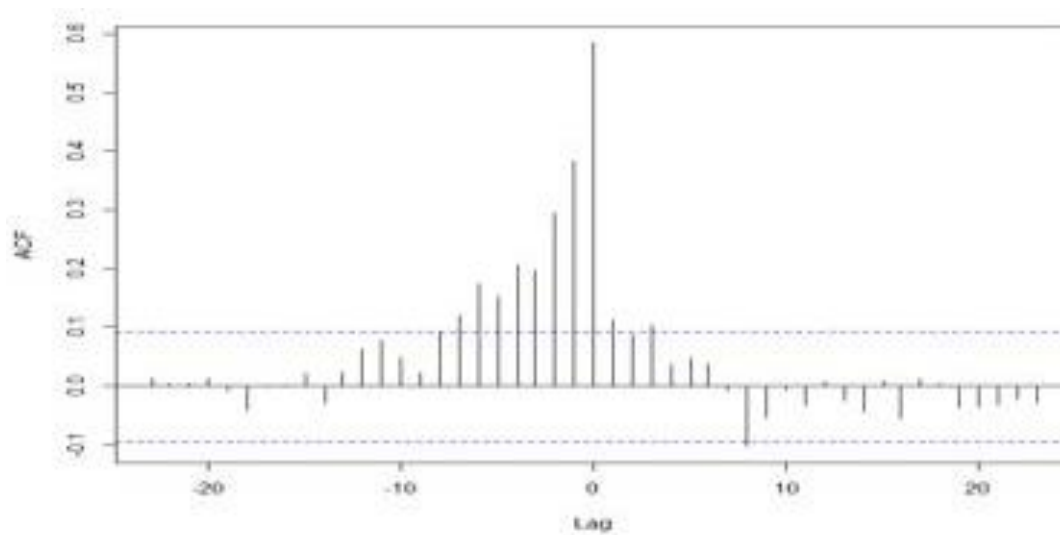


Figura B.55 Correlações cruzadas entre Vazão e Chuva na sub-bacia Bairro da Ponte.

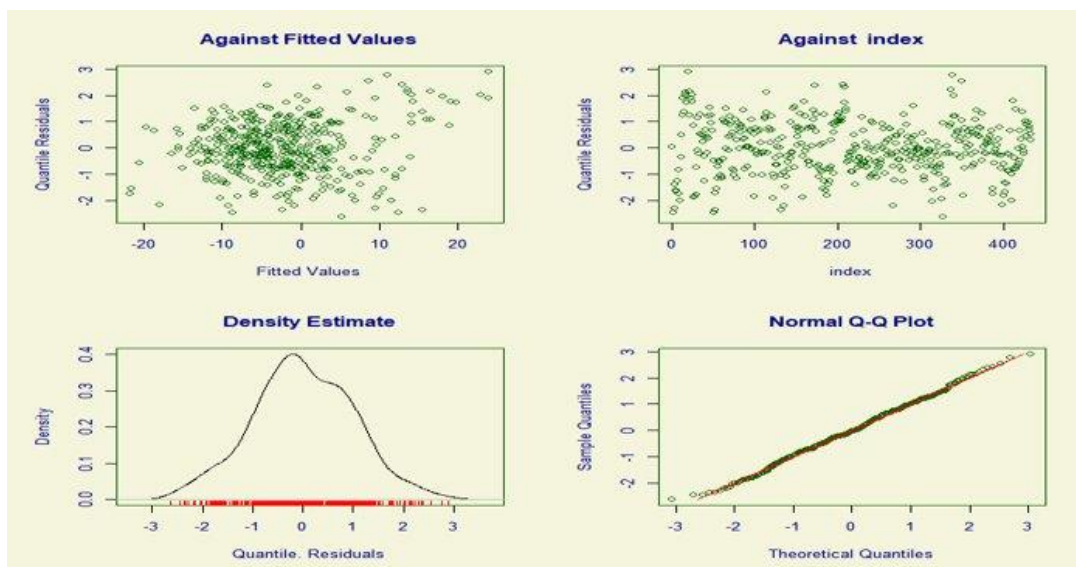


Figura B.56 Gráficos de resíduos para o modelo final da Vazão explicada pela Chuva na sub-bacia Bairro da Ponte.

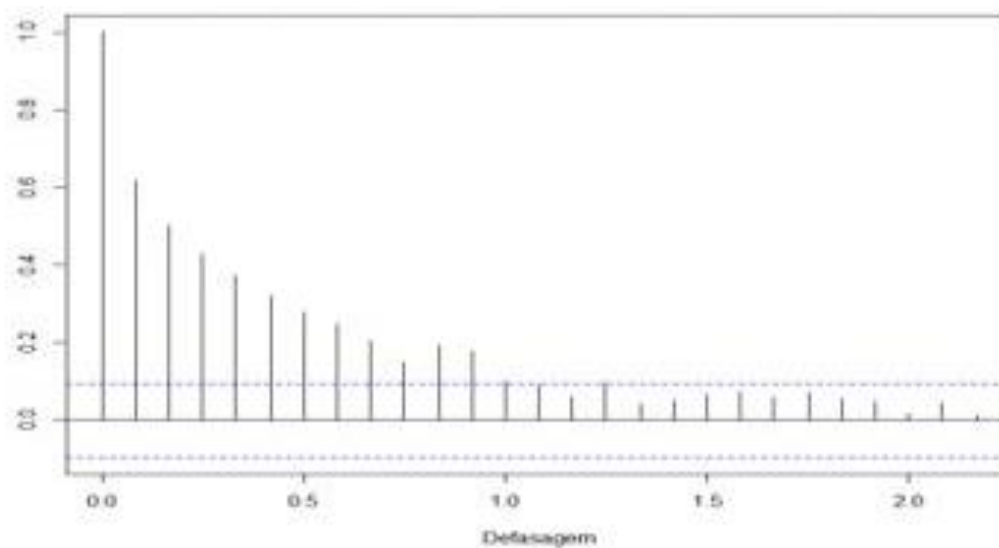


Figura B.57 Autocorrelações da Vazão na estação Monte Alegre do Sul.

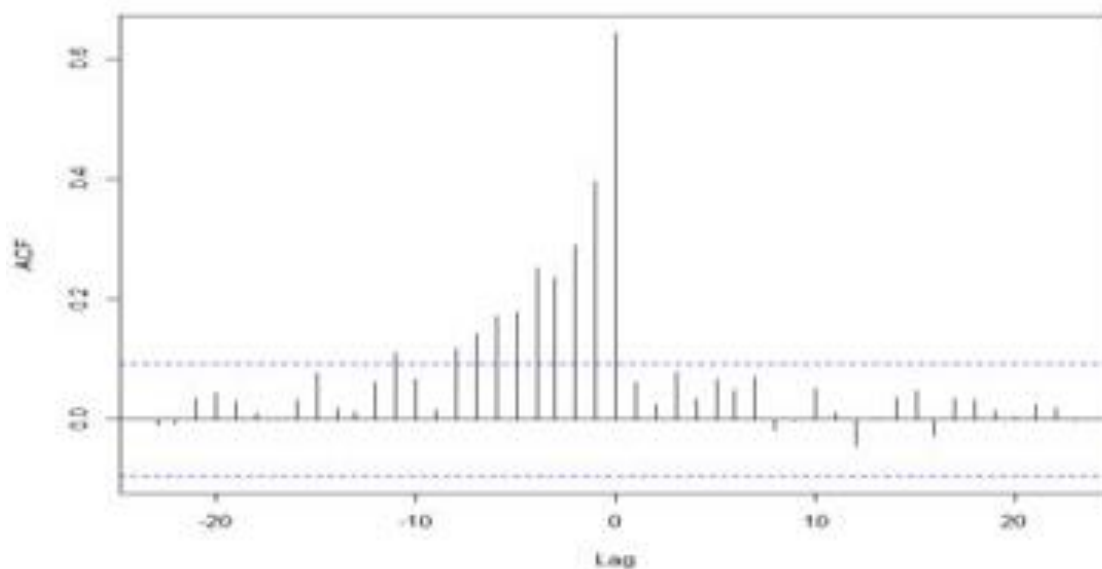


Figura B.58 Correlações cruzadas entre Vazão e Chuva na sub-bacia Monte Alegre do Sul.

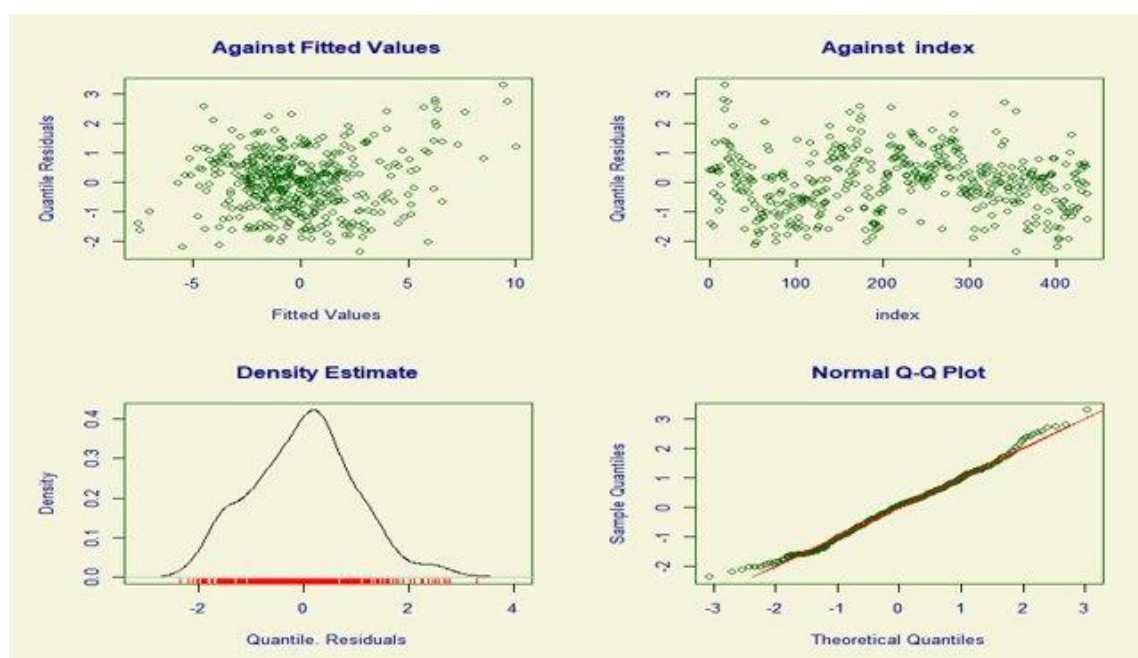


Figura B.59 Gráficos de resíduos para o modelo final da Vazão explicada pela Chuva na sub-bacia Monte Alegre do Sul.

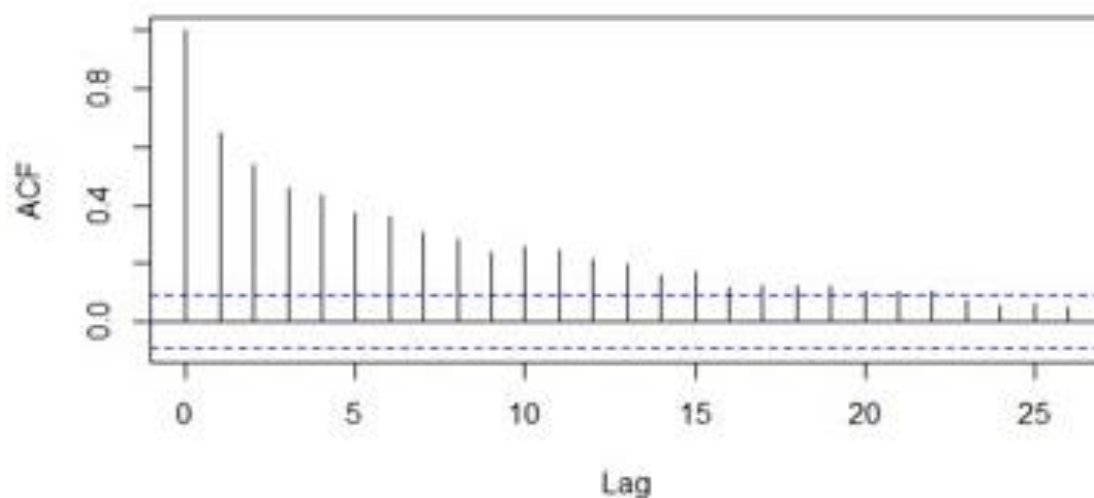


Figura B.60 Autocorrelações da Vazão na estação Usina Ester.

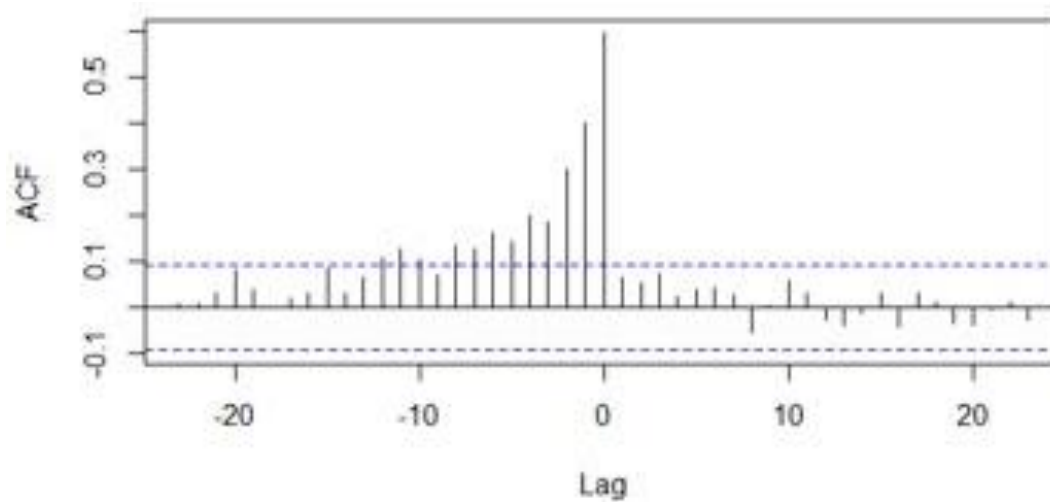


Figura B.61 Correlações cruzadas entre Vazão e Chuva na sub-bacia Usina Ester.

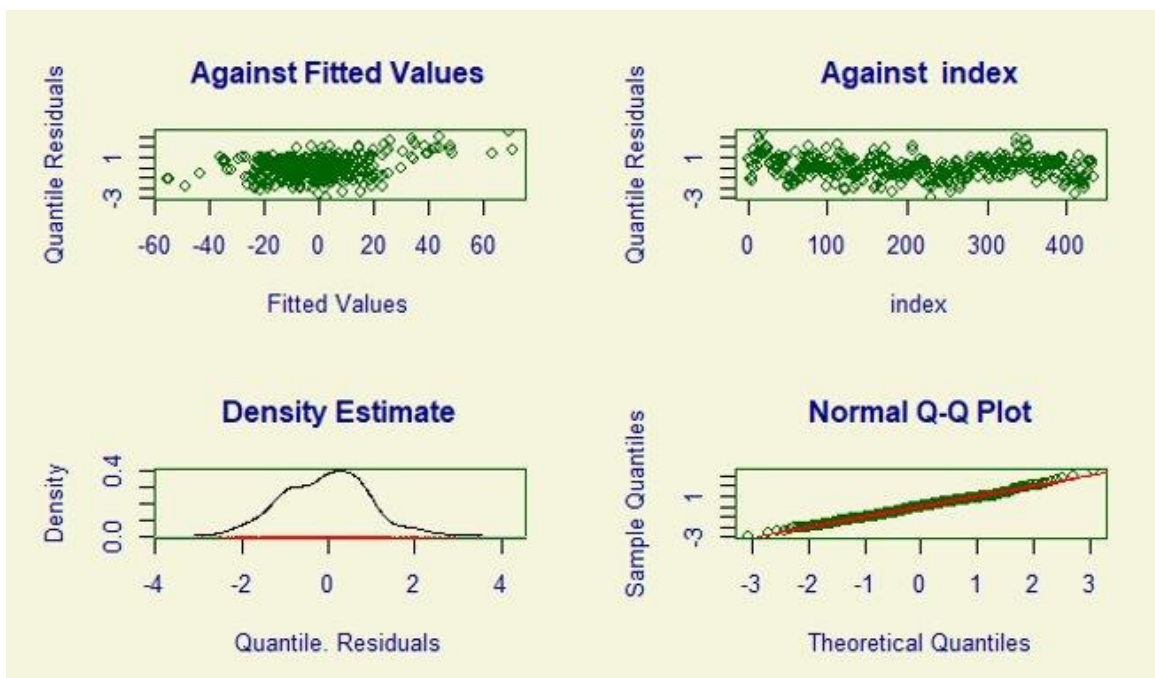


Figura B.62 Gráficos de resíduos para o modelo final da Vazão explicada pela Chuva na sub-bacia Usina Ester.

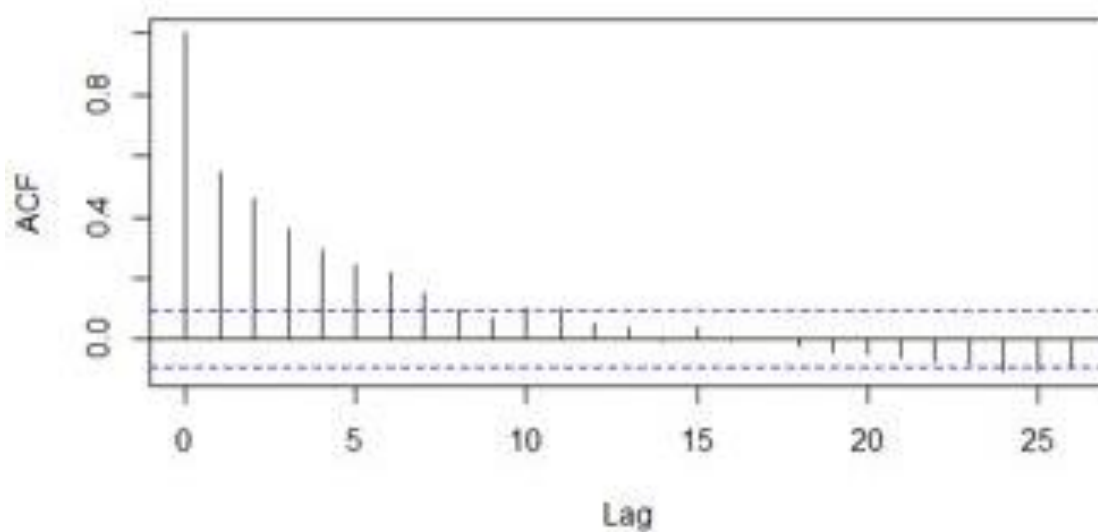


Figura B.63 Autocorrelações da Vazão na estação Ártemis.

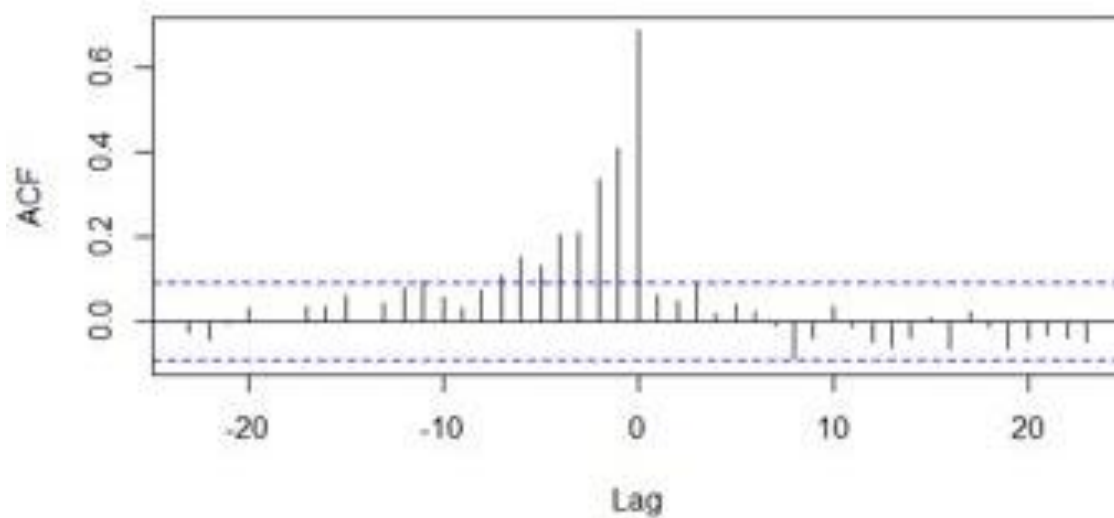


Figura B.64 Correlações cruzadas entre Vazão e Chuva na sub-bacia Ártemis.

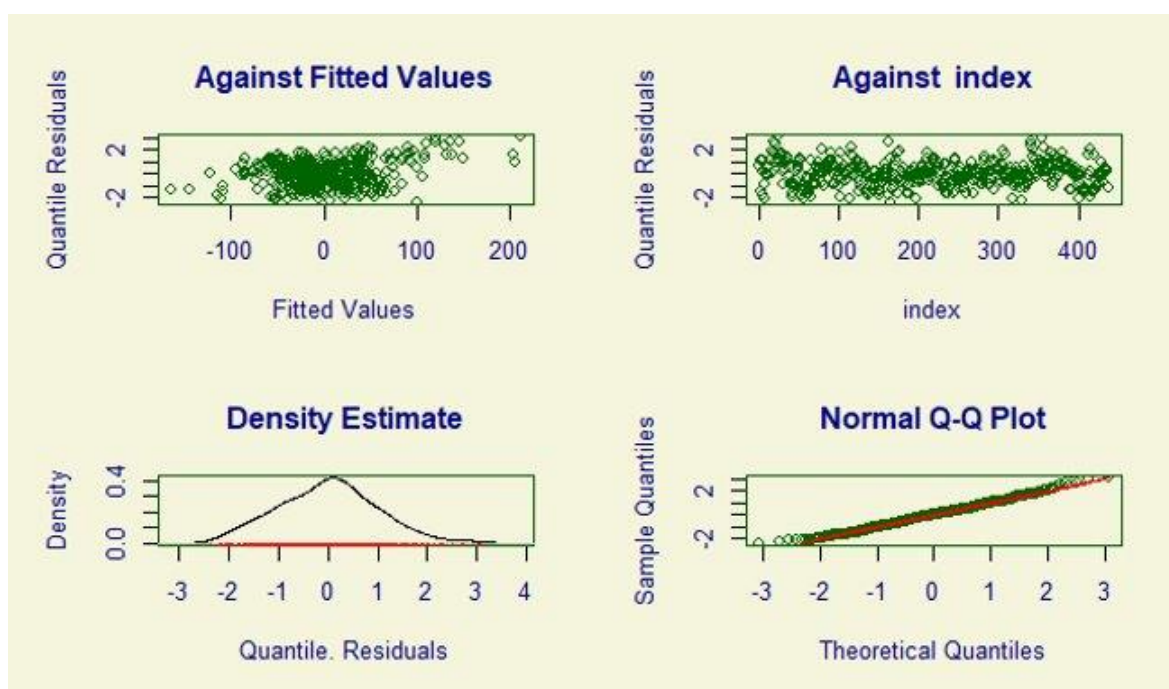


Figura B.65 Gráficos de resíduos para o modelo final da Vazão explicada pela Chuva na sub-bacia Ártemis.

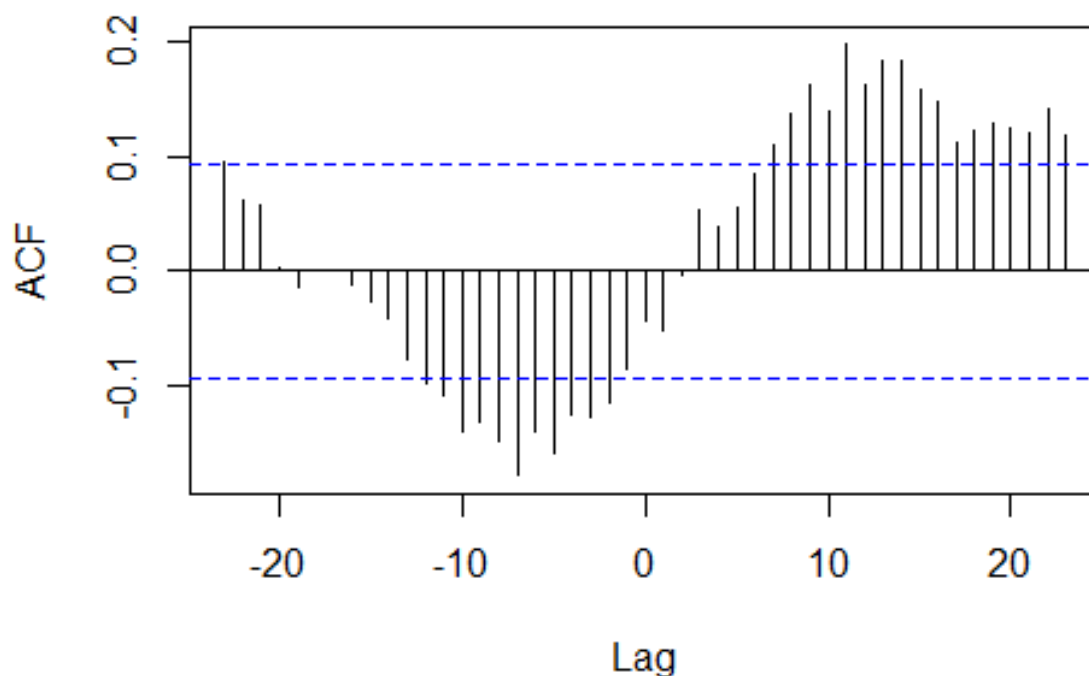


Figura B.66 Correlações cruzadas entre a Vazão na estação Ártemis e o IOS.

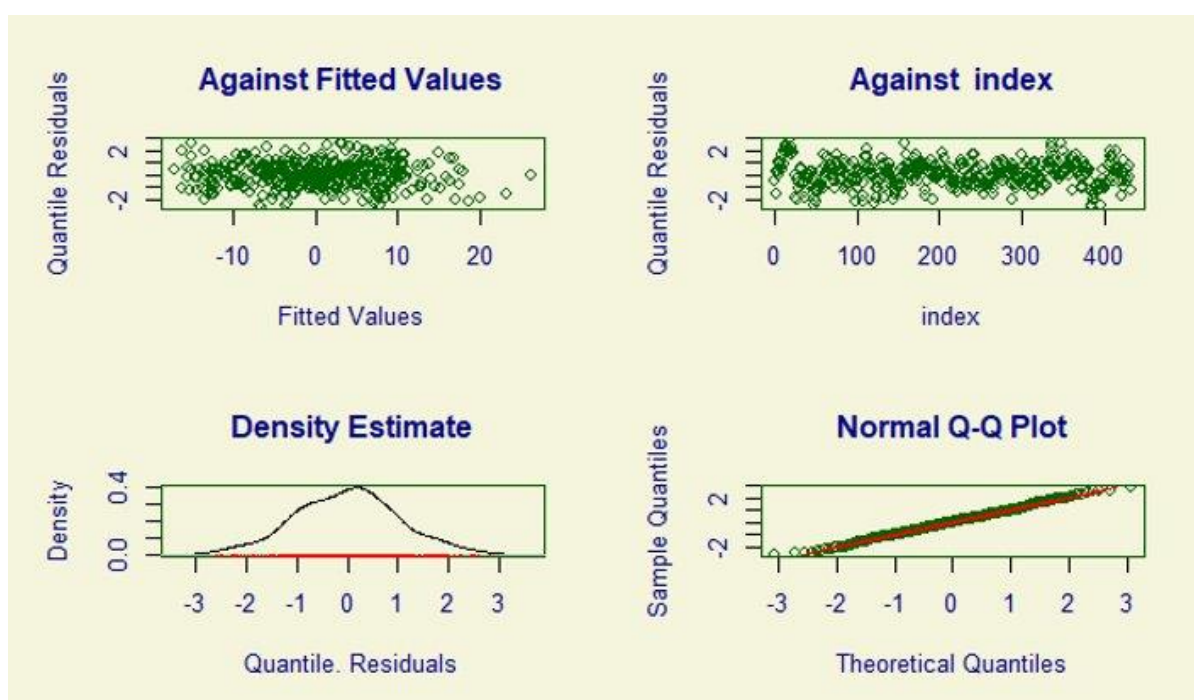


Figura B.67 Gráficos de resíduos para o modelo final da Vazão na estação Ártemis explicada pelo IOS.

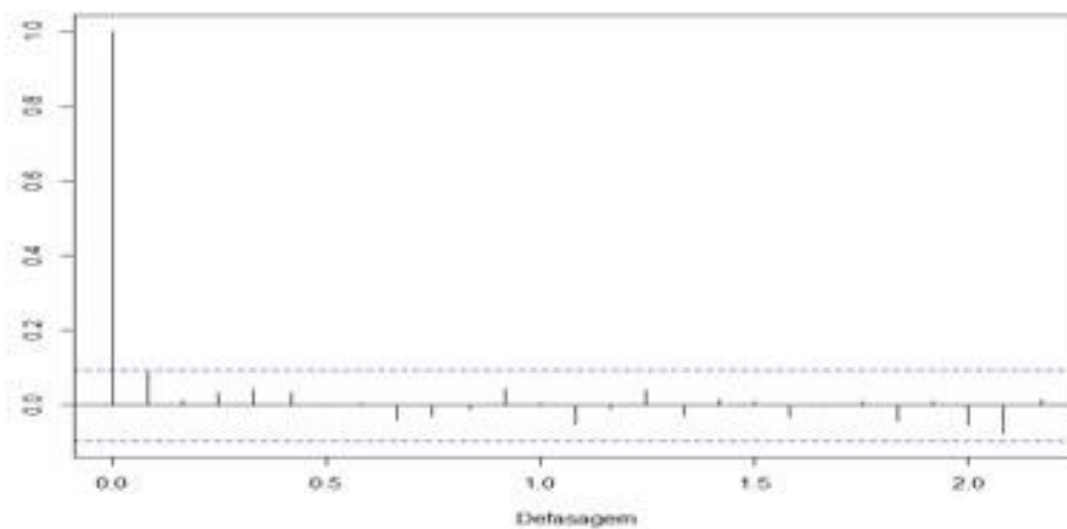


Figura B.68 Autocorrelações da Chuva na sub-bacia Ártemis.

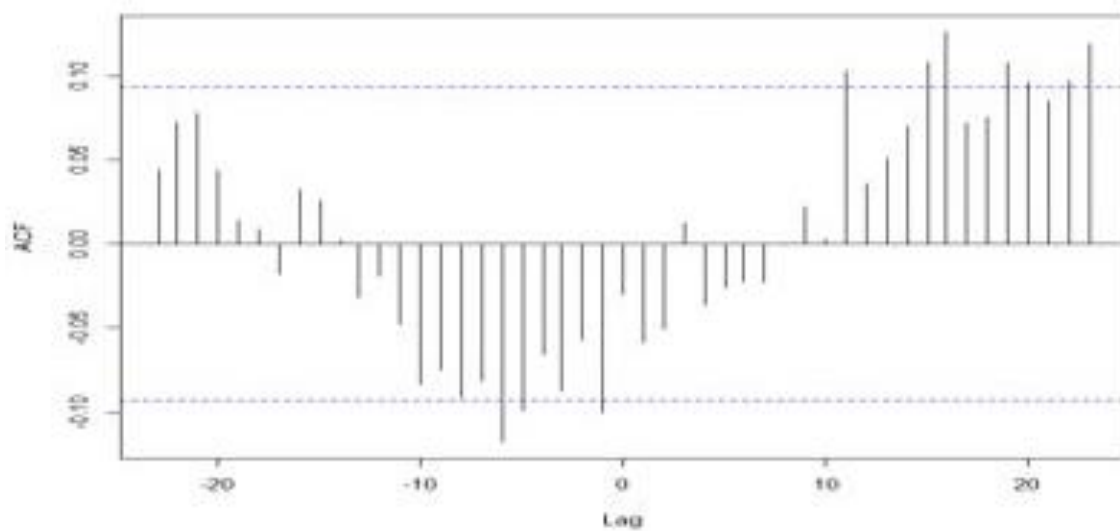


Figura B.69 Correlações cruzadas entre a Chuva na sub-bacia Ártemis e o IOS.

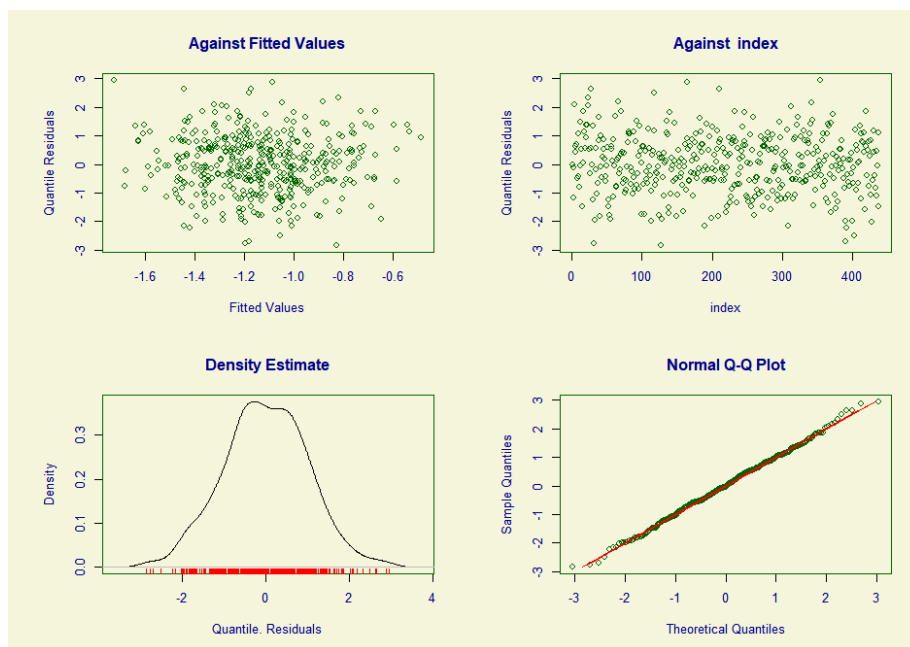


Figura B.70 Gráficos de resíduos para o modelo final da Chuva mensal na sub-bacia Ártemis explicada pelo IOS.