UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E SANEAMENTO

DERLY ESTEFANNY GÓMEZ GARCÍA

**Modelo empírico linear para previsão da disponibilidade hídrica
integrada em função da média móvel da precipitação**

VERSÃO CORRIGIDA

São Carlos

2016

DERLY ESTEFANNY GÓMEZ GARCÍA

**Modelo empírico linear para previsão da disponibilidade hídrica
integrada em função da média móvel da precipitação**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia
de São Carlos, da Universidade de São Paulo,
como parte dos requisitos para obtenção do título
de Mestre em Ciências: Engenharia Hidráulica e
Saneamento.

Orientador: Prof. Titular Edson Cezar Wendland

VERSÃO CORRIGIDA

São Carlos

2016

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte

Gómez García, Derly Estefanny
G633m Modelo empírico linear para previsão da
disponibilidade hídrica integrada em função da média
móvel da precipitação / Derly Estefanny Gómez García;
orientador Edson Wendland. São Carlos, 2016.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
e Área de Concentração em Hidráulica e Saneamento --
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, 2016.

1. Análise de séries temporais.. 2. Correlação. 3.
Análise espectral. 4. Wavelet. 5. Gestão integrada de
recursos hídricos. 6. Vazão sustentável. 7. Interação
Rio-Aquífero . I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **DERLY ESTEFANNY GOMEZ GARCIA.**

Título da dissertação: "Modelo empírico linear para previsão da disponibilidade hídrica em função da média móvel da precipitação".

Data da defesa: 30/06/2016

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Titular **Edson Cezar Wendland**
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovada

Prof. Titular **Hildebrando Munhoz Rodrigues**
(Instituto de Ciências e Matemáticas de São Carlos/ICMC)

Aprovada

Prof. Dr. **Ademir Paceli Barbassa**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

APROVADA

Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento:

Profa. Associada **Maria Bernadete A. Varesche Silva**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Luís Fernando Costa Alberto**

*A Deus; á minha mãe, Angela Liliana;
ao meu pai, Carlos Arturo; á minha avó, Ana
Francisca; ao meu avô, Jose Ángel; e ao meu
irmão, Julián. Amo imensamente cada um de
você.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, meu pai, amigo e companhia contínua nesta viagem. Por ter cuidado de mim, por ajudar-me, por cada milagre, por sustentar-me em cada circunstância, por sempre abrir caminhos nas dificuldades, e por tornar meus erros em oportunidades para crescer e amadurecer. Enfim, obrigada pela tua envolvente presença cada dia Papai!

À minha mãe, a eng. Angela L., por ensinar-me com o seu exemplo de vida, a lutar pelos meus sonhos, sem importar o árduo das circunstâncias. Obrigada por mostrar-me o que significa ser valente e esforçada.

Ao meu pai, o eng. Carlos A., por ensinar-me a ser forte disciplinada e com caráter (apesar da minha obstinação), e por reiterar estes últimos anos que meu lar não está num lugar ou numa casa, senão que está na presença de Deus. Agora entendi!

À minha avó Ana, uma mulher aguerrida, corajosa e extremamente amorosa; digna do maior reconhecimento por ser o exemplo de força e caráter, combinado com ternura e simpatia. Obrigada por sempre mimar-me.

Ao meu avô Jose Ángel, quem sempre me mostrou a través da sua experiência os atributos que deve ter um bom engenheiro: imaginação e criatividade. Um homem que não necessita de condições favoráveis, equipamentos adequados ou inclusive de um título universitário, para conseguir transformar cada problema numa bela obra de engenharia. Sempre achei o senhor, o mais integral e melhor engenheiro que já conheci. Obrigada!

Ao meu orientador, o professor Edson Wendland, principalmente, por ajudar-me, ensinar-me, e corrigir-me com paciência sempre que precisei. Por ter me dado a oportunidade de fazer parte desta equipe de trabalho, e mostrar-me o exemplo da excelência em tudo.

À minha família, pelo apoio. *Los amo, no habría podido sin ustedes, Gracias!*

À minha querida amiga Vanessa Rangel, Aos meus amigos do peito *El trio dinámico* Adriana e Andrés, Ximena Gómez, William Beltrán, Rosmira Acevedo, porque mesmo na distância me acompanharam e apoiaram o tempo todo.

Aos meus amigos e colegas do LHC: Nat (por ter me acompanhado nos momentos gratos e também nos desfavoráveis, e ser esse abraço confortante sempre!), Jamil (meu querido amigo obrigada por me ajudar sem importar horário ou lugar). Tiago, *Mi paisano* Andrés, Livia e Ana, (pela ajuda e boa convivência), Camilo (principalmente por deixar-me roubar as suas bolachinhas Oreo e os seus doces do bandex), Murilo e Paulo (pela ajuda e exemplo de disciplina e excelência), Davi (pela sua ajuda constante e pela sua amizade), Camila (pela parceria e paciente ajuda na escrita da dissertação, obrigada!), Dulce (pelas dicas e conselhos

para ajudar-me melhorar o meu trabalho), Vinicius (por tornar-se meu amigo nestes últimos meses de intenso trabalho, obrigada pela companhia, *Roar!*).

Ao meu amigo Hugo Gualdrón, uns dos melhores programadores do ICMC, e à minha amiga Maria Mercedes pela ajuda e apoio.

À Sá e à Priscila, secretárias de Pós-Graduação do Departamento de Hidráulica e Saneamento, por ajudar-me resolver os meus problemas e me orientar sempre que precisei.

Aos funcionários da biblioteca da Escola de Engenharia de São Carlos.

Á CAPES pela concessão da bolsa de mestrado.

...Farei um caminho no deserto e rios, no ermo.

Isaías 43:19

RESUMO

GÓMEZ, D. E **Modelo empírico linear para previsão da disponibilidade hídrica integrada em função da média móvel da precipitação**. 2016. 132p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

Variações climáticas podem resultar na entrada insuficiente de água no balanço hídrico de uma região, acarretando em inconsistências relacionadas à outorga de água superficial. O sistema de outorga de água superficial utiliza as vazões percentis ($Q_{7,10}$, Q_{90} , Q_{95}) para definir a vazão máxima outorgável. No entanto, em períodos de estiagem tais vazões de referência podem não ser suficientes para atender a demanda outorgada, demandando a captação de águas subterrâneas para contrabalançar essa insuficiência hídrica do manancial superficial. Portanto, a outorga dos recursos hídricos deve ocorrer de forma integrada e sustentável, considerando a alteração da descarga do aquífero para o rio devido à captação subterrânea. O objetivo deste trabalho é estimar a disponibilidade hídrica integrada (superficial e subterrânea), por meio de um modelo empírico linear, proposto como função da média móvel da precipitação de períodos anteriores relacionados ao tempo de regulação do aquífero. Técnicas de correlação e espectrais foram empregadas na análise de séries temporais de precipitação (P) e vazão (Q) da bacia hidrográfica do Ribeirão da Onça, com o objetivo de determinar os tempos de resposta de Q em relação a P. A metodologia proposta foi verificada para precipitação e vazões observadas na bacia com área de 65 km² no período de 2003 a 2014. Os resultados indicam que o aquífero armazena uma parcela de água precipitada e controla o fluxo para o rio, com tempos de regulação de aproximadamente 60 dias para o escoamento subsuperficial e de aproximadamente 2 anos para o escoamento de base. A metodologia também foi testada para duas sub-bacias hidrográficas do Rio Jacaré-Guaçu, com áreas de 1867 e 3519 km². A adoção da metodologia proposta permite calcular uma vazão de referência sustentável, possibilitando prever a variação da vazão de base nos períodos de recessão, por estar definida em função de precipitações passadas. Portanto, tal vazão seria mais condizente com as observadas no meio ambiente, proporcionando um adequado funcionamento do ecossistema, garantindo assim a sua preservação.

Palavras-chave: Análise de séries temporais. Correlação. Análise espectral. Wavelet. Gestão integrada de recursos hídricos. Vazão sustentável. Interação Rio-Aquífero

ABSTRACT

GÓMEZ, D. E **Empirical linear model for water availability forecast as a function of the rainfall moving average**. 2016. 132p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

Climatic variation may result in insufficient input of water in the water balance in a region, resulting in inconsistencies in the water rights permits. Brazilian water allocation system uses the flow duration curves ($Q_{7,10}$, Q_{90} , Q_{95}) to establish the maximum allowable discharge. However, during droughts such reference discharges may not reach the water rights permits, requiring groundwater extraction to compensate this deficiency in surface water bodies. Hence, the water right permits must be integral, considering the base flow variation due to the groundwater extraction. The aim of this study is to determine the integrated water availability (surface and groundwater), using an empirical linear model, proposed as a function of the average rainfall of previous periods related to the aquifer regulation time. Correlation and spectral techniques were employed for time-series analysis of precipitation (P) and discharge (Q) in the Ribeirão da Onça watershed, to determine response times of Q as a function of P. The proposed methodology was developed for precipitation and discharge observed from 2003 to 2014 in a watershed with an area of 65 km². The obtained results indicate that the aquifer stores the rainfall water with regulation times of approximately 60 days for the subsurface flow, and approximately 2 years for the base flow. The methodology was also tested for two sub-basins of the Jacaré-Guaçu River watershed, with areas of 1867 and 3519 km². The proposed methodology allows the estimation of a sustainable reference discharge making it possible to predict the base flow variation during recession periods, since it is defined as a function of past rainfall. Therefore, this discharge is more consistent with the values observed in the environment, allowing a proper functioning of the ecosystem, thereby ensuring their preservation.

Key-words: Time series analysis; Correlation; Spectral analysis; Wavelet; Integrated water resources planning; Water Sustainability; Stream-Aquifer interaction.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Representação esquemática do hidrograma e a sua curva de permanência. Fonte: Cruz (2011)	28
Figura 2. Hidrograma com a vazão natural e a vazão de base do rio sem exploração (superior) e vazões naturais e de base depois de captar água do aquífero (inferior). Fonte: Ana (2014a)31	
Figura 3. Interação rio-aquífero, a) Água em direção ao rio b) Perda de fluxo em direção ao aquífero c) Perda de fluxo quando o rio está desconectado do aquífero, Fonte: adaptado de Winter et al. (1998).....	33
Figura 4. Zonas do aquífero, em que ocorrem os tipos de escoamento: superficial, subsuperficial e subterrâneo. Fonte: Adaptado de Winter et al. (1998)	34
Figura 5. Métodos gráficos de separação do hidrograma, a) método da linha reta, b) método da base fixa, c) método da inclinação variável Fonte: Adaptado de Chow (1988).....	35
Figura 6. Representação da família de Wavelet “Mães” mais usadas: Em que a) Morlet e Mexican hat b) Haar e Derivative of gaussian. Fonte: adaptado de Gargour et al. (2009)	41
Figura 7. Localização da Bacia Hidrográfica do Ribeirão da Onça.	44
Figura 8. Altimetria da Bacia Hidrográfica do Ribeirão da Onça Fonte: Mattos (2015)	45
Figura 9. Distribuição da rede de monitoramento e uso do solo da BRO para o ano 2015	47
Figura 10. Mapa pedológico na região da bacia do Ribeirão da Onça. Fonte: Castro Júnior (2008)	48
Figura 11. Precipitação média mensal na estação do CRHEA. Obtida no período de 1973 a 2015	49
Figura 12. Comparação da vazão modelada JAMS e da vazão instantânea e da precipitação diária, no período de 01/09/2006 a 31/08/2008.....	50
Figura 13. Seção de monitoramento de vazão por meio de um molinete hidrométrico na BRO.	51
Figura 14. Localização do sistema Jacaré formado pelas bacias contíguas do Jacaré-Guaçu (mais ao norte) e do Jacaré-Pepira (mais ao sul), em relação ao Estado de SP . Fonte: Rabelo (2006)	52
Figura 15. Modelo digital de elevação das bacias Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira. Localização das estações fluviométricas: E1 estação da Fazenda Boa Vista do Jacaré, e E3 estação da Fazenda Palmeiras Fonte: Rabelo (2006)	52
Figura 16. Precipitação mensal na estação pluviométrica Chibarro, para o período de 1931 a 2015.	53

Figura 17. Precipitação mensal na estação pluviométrica Sítio Esperança, para o período de 1943 a 2015.....	54
Figura 18. Exemplo da separação do hidrograma usando os três métodos para separar as componentes de fluxo superficial e subterrâneo. a) método do intervalo fixo, b) método do intervalo móvel, c) método mínimo local. Fonte: Adaptado de Sloto e Crouse (1996)	56
Figura 19. Esquema da hipótese formulada: o escoamento de base pode ser definido em função de precipitações passadas.....	60
Figura 20. Algoritmo 1: Determinação da média móvel da precipitação	62
Figura 21. Algoritmo 2: Determinação do parâmetro α_k	63
Figura 22. Separação do hidrograma por meio do filtro de Nathan & McMahon (1990)	67
Figura 23. Separação do hidrograma por meio do software HYSEP.....	69
Figura 24. Autocorrelação R_y da série diária de vazão total, para o período de 09/2003 a 08/2014.....	72
Figura 25. Espectro simples S_y , da série diária de vazão total, para o período de 09/2003 a 08/2014.....	73
Figura 26. Correlação cruzada R_{xy} dos dados diários de precipitação e vazão total, para o período de 09/2003 a 08/2014.....	74
Figura 27. Espectro cruzado S_{xy} dos dados de precipitação e vazão total, para o período 09/2003 a 08/2014.....	75
Figura 28. Autocorrelação R_y , da série diária de escoamento de base, para o período de 09/2003 a 08/2014.....	76
Figura 29. Espectro simples S_y da série de escoamento de base, para o período de 09/2003 a 08/2014.....	77
Figura 30. Correlação cruzada R_{xy} , dos dados de precipitação e escoamento de base, para o período de 09/2003 a 08/2014.....	78
Figura 31. Espectro cruzado S_{xy} dos dados de precipitação e escoamento de base, para o período de 09/2003 a 08/2014.....	78
Figura 32. Autocorrelação R_y da série diária de escoamento direto, para o período de 09/2003 a 08/2014.....	79
Figura 33. Espectro simples S_y da série diária de escoamento direto, para o período de 09/2003 a 08/2014.....	80
Figura 34. Correlação cruzada R_{xy} dos dados de precipitação e escoamento direto, para o período de 09/2003 a 08/2014.....	81

Figura 35. Espectro cruzado S_{xy} dos dados de precipitação e escoamento direto, para o período de 09/2003 a 08/2014.	81
Figura 36. Transformada contínua Wavelet dos dados diários de precipitação e vazão total, para o período de 09/2003 a 08/2014.	83
Figura 37. Transformada contínua Wavelet das séries de precipitação e escoamento direto, para o período de 09/2003 a 08/2014.	85
Figura 38. Transformada cruzada de Wavelet dos dados diários de precipitação e vazão total, para o período de 09/2003 a 08/2014.	86
Figura 39. Curva de permanência para os meses de setembro, outubro, novembro e dezembro, no período de 01/09/2003 a 31/08/2014.	89
Figura 40. Curva de permanência para os meses de janeiro, fevereiro, março e abril, no período de 01/09/2003 a 31/08/2014.	90
Figura 41. Curva de permanência para os meses maio, junho, julho e agosto, no período de 01/09/2003 a 31/08/2014.	90
Figura 42. Dados de precipitação mensal na BRO, utilizados para aplicar o modelo empírico linear.	92
Figura 43. Esquema do Algoritmo 1, para calcular a média móvel da precipitação 93	93
Figura 44. Série de precipitação mensal e série de média móvel da precipitação na BRO.	93
Figura 45. Séries de média móvel da precipitação, Q_b do filtro de Nathan & McMahon e razão de Q_b/P_{TRa} necessárias para estimar α_1 , α_2 e α_3 (Equação 20 e 21).....	94
Figura 46. Esquema do Algoritmo 2, para determinação de α_k . A linha superior representa a série de precipitação P transladada um instante k , a qual comparada com a P média de longo prazo, determina a série de α_k , assignando valores de α_1 , α_2 ou α_3	95
Figura 47. Hidrograma da vazão total, escoamento de base estimado pelo filtro de Nathan & McMahon e escoamento de base estimado pelo modelo empírico linear, avaliando a situação 1, na BRO para o período de 09/2003 a 08/2014.	96
Figura 48. Hidrograma da vazão total, escoamento de base estimado pelo filtro de Nathan & McMahon e escoamento de base estimado pelo modelo empírico linear, avaliando a situação 2, na BRO para o período de 09/2003 a 08/2014.	97
Figura 49. Comparação do escoamento de base do filtro de Nathan e McMahon, com os escoamentos de base do modelo empírico para cada situação, na BRO para o período de 09/2003 a 08/2014.	98
Figura 50. Precipitação mensal na BRO do período de 09/2014 a 06/2015.....	99

Figura 51. Previsão da disponibilidade hídrica na BRO para o ano hidrológico de 09/2014 a 08/2015, utilizando as curvas de permanência de cada mês e o modelo empírico linear.	100
Figura 52. Dados mensais de precipitação para a sub-bacia 1, da estação pluviométrica Chibarro, para o período de 09/1974 a 08/2005.....	104
Figura 53. Vazão mensal total da estação fluviométrica da Fazenda Palmeiras, escoamento de base estimado pelo filtro de Nathan & McMahon comparado com o escoamento de base estimado pelo modelo empírico. Para o período de 09/1974 a 08/2005.	104
Figura 54. Dados mensais de precipitação para a sub-bacia 2, da estação pluviométrica Sítio Esperança, para o período de 09/1971 a 08/1992.	105
Figura 55. Vazão total da estação fluviométrica da Fazenda Boa Vista do Jacaré, escoamento de base estimado pelo filtro de Nathan & McMahon comparado com o escoamento de base estimado pelo modelo empírico. Para o período de 09/1971 a 08/1992.	105
Figura 56. Botão Dados no formulário DHI permite inserir a data e selecionar o arquivo de entrada.....	116
Figura 57. Arquivo de entrada de dados em formato xlsx	118
Figura 58. Visualização dos resultados, utilizando o botão Calcular do Formulário DHI. ..	119
Figura 59. O Botão exportar permite salvar os resultados em um novo arquivo xlsx.....	120
Figura 60. O botão Sobre permite visualizar as informações dos autores	120
Figura 61. Transformada contínua Wavelet da série de precipitação e escoamento de base na BRO, para o período de 01/09/2003 a 31/08/2014.	121
Figura 62. Transformada cruzada Wavelet da série de precipitação e escoamento de base na BRO, para o período de 01/09/2003 a 31/08/2014.	121
Figura 63. Transformada cruzada Wavelet da série de precipitação e escoamento direto na BRO, para o período de 01/09/2003 a 31/08/2014.....	122
Figura 64. Separação do escoamento de base, aplicando o filtro de Nathan & McMahon aos dados de vazão total da estação fluviométrica da Fazenda Palmeiras.	123
Figura 65. Resultados das análises de correlação e análises espectrais simples e cruzadas, usando séries de dados de precipitação e vazão total, para o período de 01/09/1974 a 31/08/2005 na Fazenda Palmeiras. Em que R_y é o coeficiente de Autocorrelação, R_{xy} é o coeficiente de correlação cruzada, S_y é o coeficiente do espectro simples e S_{xy} é o coeficiente do espectro cruzado.	124
Figura 66. Resultados das análises de correlação e análises espectrais simples e cruzadas, usando séries de dados de precipitação e escoamento de base para o período de 01/09/1974 a 31/08/2005 na Fazenda Palmeiras. Em que R_y é o coeficiente de Autocorrelação, R_{xy} é o	

coeficiente de correlação cruzada, S_y é o coeficiente do espectro simples e S_{xy} é o coeficiente do espectro cruzado.	124
Figura 67. Resultados das análises de correlação e análises espectrais simples e cruzadas, usando séries de dados de precipitação e escoamento direto para o período de 01/09/1974 a 31/08/2005 na Fazenda Palmeiras. Em que R_y é o coeficiente de Autocorrelação, R_{xy} é o coeficiente de correlação cruzada, S_y é o coeficiente do espectro simples e S_{xy} é o coeficiente do espectro cruzado.	125
Figura 68 Transformada contínua Wavelet, dados de precipitação e vazão total para o período de 01/09/1974 a 31/08/2005	125
Figura 69. Transformada contínua Wavelet da precipitação e vazão total na Fazenda Palmeiras para o período de 01/09/1974 a 31/08/2005	126
Figura 70. Transformada contínua Wavelet da precipitação e escoamento de base na Fazenda Palmeiras para o período de 01/09/1974 a 31/08/2005	126
Figura 71. Transformada contínua Wavelet da precipitação e escoamento direto na Fazenda Palmeiras para o período de 01/09/1974 a 31/08/2005	127
Figura 72. Separação do escoamento de base, aplicando o filtro de Nathan & McMahon aos dados de vazão total da estação fluviométrica da Fazenda Boa Vista do Jacaré.....	128
Figura 73. Resultados das análises de correlação e análises espectrais simples e cruzadas, usando séries de dados de precipitação e vazão total, para o período de 01/09/1971 a 31/08/1992 na Fazenda Boa Vista do Jacaré. Em que R_y é o coeficiente de Autocorrelação, R_{xy} é o coeficiente de correlação cruzada, S_y é o coeficiente do espectro simples e S_{xy} é o coeficiente do espectro cruzado.	129
Figura 74. Resultados das análises de correlação e análises espectrais simples e cruzadas, usando séries de dados de precipitação e escoamento de base, para o período de 01/09/1971 a 31/08/1992 na Fazenda Boa Vista do Jacaré. Em que R_y é o coeficiente de Autocorrelação, R_{xy} é o coeficiente de correlação cruzada, S_y é o coeficiente do espectro simples e S_{xy} é o coeficiente do espectro cruzado.....	129
Figura 75. Resultados das análises de correlação e análises espectrais simples e cruzadas, usando séries de dados de precipitação e escoamento direto, para o período de 01/09/1971 a 31/08/1992 na Fazenda Boa Vista do Jacaré. Em que R_y é o coeficiente de Autocorrelação, R_{xy} é o coeficiente de correlação cruzada, S_y é o coeficiente do espectro simples e S_{xy} é o coeficiente do espectro cruzado.....	130
Figura 76. Transformada contínua Wavelet, dados de precipitação e vazão total para o período de 01/09/1971 a 31/08/1992.	130

Figura 77. Transformada cruzada Wavelet, dados de precipitação e vazão total para o período de 01/09/1971 a 31/08/1992.....	131
Figura 78. Transformada cruzada Wavelet, dados de precipitação e escoamento de base para o período de 01/09/1971 a 31/08/1992.	131
Figura 79. Transformada cruzada Wavelet, dados de precipitação e escoamento direto para o período de 01/09/1971 a 31/08/1992.	132

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Caracterização física da bacia do BRO	46
Tabela 2. Resultados do escoamento de base, valores médios anuais, aplicando filtro de Nathan & McMahon (1990).....	67
Tabela 3. Resultados do escoamento direto, valores médios anuais, aplicando filtro de Nathan & McMahon (1990).....	68
Tabela 4. Resultados do escoamento de base, valores médios anuais, aplicando software HYSEP	69
Tabela 5. Resumo análises de correlação e espectral das séries de vazão total, escoamento de base e direto.....	82
Tabela 6. Resumo dos tempos de resposta dos tipos de escoamento observados no rio, em relação à precipitação.	88
Tabela 7. Vazão Q_{95} mensal que representa a disponibilidade hídrica superficial, para o ano hidrológico 09/2014 a 08/2015, a partir das curvas de permanência mês a mês. Vazão em (m^3/s)	91
Tabela 8 - Valores calibrados do parâmetro do modelo empírico em relação com a média de longo período de tempo	94
Tabela 9. Avaliação por meio de métricas estatísticas do modelo para DHI	98
Tabela 10. Valores de previsão de escoamento de base para disponibilidade hídrica para o ano hidrológico 09/2014 a 08/2015.....	100
Tabela 11. Avaliação por meio de métricas estatísticas do modelo empírico para DHI e da Q_{95} mensal, estes resultados foram comparados com o Q_b calculado pelo filtro de N&M.....	101
Tabela 12. Avaliação do Q_b estimado pelo modelo empírico, nas duas sub bacias das estações fluviométricas da fazenda Palmeiras e Boa vista do Jacaré, comparadas com o Q_b estimado pelo filtro de N&M.....	106
Tabela 13. Atraso temporal entre os dados de precipitação e cada tipo de escoamento na sub bacia 1.....	127
Tabela 14. Atraso temporal entre os dados de precipitação e cada tipo de escoamento na sub-bacia 2.....	132

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
BRO	Bacia do Ribeirão da Onça
DHI	Disponibilidade Hídrica Integrada
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
EM	Efeito Memória
S	Sazonalidade
FC	Frequência de Corte
TCW	Transformada Contínua Wavelet
TXW	Transformada Cruzada Wavelet
CRHEA	Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada
SRTM	Shuttle Radar Topography Missin
BJG	Bacia do Rio Jacaré Guaçu
TRa	Tempo de Regulação do Aquífero
TRss	Tempo de Regulação do Escoamento Subsuperficial
TQs	Tempo de Resposta do Escoamento Direto
N&M	Filtro de Separação de Nathan & McMahon

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
2	OBJETIVOS	26
2.1	Objetivo geral	26
2.2	Objetivos específicos	26
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
3.1	Terminologia no gerenciamento hídrico	27
3.1.1	Procedimentos técnicos sobre a disponibilidade hídrica	28
3.2	Interação entre água subterrânea e superficial	33
3.2.1	Conceitos básicos.....	33
3.2.2	Técnicas de separação do escoamento de base	34
3.3	Análise de séries temporais para determinação de tempos de resposta na bacia.....	36
3.3.1	Considerações gerais.....	37
3.3.2	Análise de correlação e análise espectral de Fourier	37
3.3.3	Transformada contínua Wavelet.....	40
4	ÁREA DE ESTUDO	44
4.1	Localização e clima	44
4.2	Caracterização da bacia hidrográfica	45
4.3	Uso e ocupação do solo	46
5	MATERIAS E MÉTODOS	49
5.1	Monitoramento de dados na BRO	49
5.1.1	Precipitação.....	49
5.1.2	Vazão	50
5.2	Estudo de caso: Bacia do rio Jacaré-Guaçu (BJG)	51
5.2.1	Informações relevantes das estações.....	53
5.3	Separação do escoamento	55
5.3.1	Filtro digital de Nathan & Mc Mahon	55
5.3.2	Software HYSEP	55
5.4	Determinação de tempos de resposta na bacia	56
5.4.1	Análise de correlação e análise espectral de Fourier	57
5.4.2	Transformada contínua Wavelet.....	59
5.5	Modelo empírico para disponibilidade hídrica integrada (DHI)	59
5.5.1	Determinação da DHI	60

5.5.2	Calibração dos parâmetros do modelo empírico	61
5.5.3	Métricas estatísticas.....	63
5.6	Curva de permanência	65
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	66
6.1	Separação do escoamento de base	66
6.1.1	Filtro de separação Nathan & Mc Mahon	66
6.1.2	Modelo HYSEP.....	68
6.1.3	Análise comparativa dos resultados	70
6.2	Determinação de tempos de resposta na bacia	70
6.2.1	Análise de correlação e análise espectral de Fourier.....	70
6.2.2	Aplicação da transformada contínua Wavelet.....	82
6.2.3	Análise comparativa das duas técnicas e conclusões dos tempos de resposta	88
6.3	Curva de permanência	89
6.4	Modelo empírico para disponibilidade hídrica integrada (DHI)	91
6.4.1	Calibração dos parâmetros do modelo empírico	92
6.4.2	Determinação da DHI.....	95
6.4.3	Previsão da disponibilidade hídrica integrada.....	99
6.4.4	Análise comparativa das vazões de referência	101
6.5	Avaliação do modelo empírico linear para DHI: Estudo de caso sub-bacias do rio Jacaré-Guaçu (BJG)	102
6.5.1	Separação do hidrograma e tempos de resposta nas sub-bacias.....	103
6.5.2	Determinação da previsão da DHI nas sub-bacias do rio Jacaré Guaçu	104
7	CONCLUSÕES	107
8	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109
	APÊNDICE A- Manual da interface gráfica do modelo empírico para DHI.....	116
	APÊNDICE B- Resultados análise Wavelet das Séries de Qb e P da BRO.....	121
	APÊNDICE C- Resultados análise Wavelet das Séries de Qs e P da BRO	122
	APÊNDICE D- Resultados da Estação Fluviométrica da Fazenda Palmeiras	123
	APÊNDICE E-Resultados da Estação Fluviométrica da Fazenda Boa Vista do Jacaré	128

1 INTRODUÇÃO

A escassez hídrica, associada à demanda crescente de água, tanto para usos consuntivos, como não consuntivos, afeta negativamente o balanço hídrico e consequentemente o sistema de outorga de água superficial. No Brasil, o comprometimento da vazão superficial devido à grande quantidade de outorgas tem resultado no uso das águas subterrâneas como forma de suprir a demanda de água (ANA, 2014a). A gestão dos recursos hídricos atualmente ocorre de maneira separada, desconsiderando que a vazão do rio é alimentada pela vazão de base do aquífero, principalmente nos períodos de estiagem. Nestas situações de escassez hídrica, podem ocorrer inconsistências nos processos de outorga devido à seca dos mananciais superficiais.

Na literatura, podem ser encontradas diversas discussões abordando temas como o da segurança hídrica, usados frequentemente no contexto das mudanças climáticas. Esses estudos alertam sobre a urgência em se adotar uma vazão sustentável no gerenciamento dos recursos hídricos, e não uma mera vazão renovável (vazão de segurança) no cálculo da disponibilidade subterrânea (GREY; SADOFF, 2007; COOK; BAKKER, 2012). Outros autores como Foster e Macdonald (2014) afirmam que, ao considerar esse recurso proveniente dos aquíferos, haveria um aumento significativo da segurança hídrica, uma vez que o volume de água subterrânea armazenada dentro dos aquíferos pode ser utilizado para contrabalançar o efeito da seca sobre o fornecimento de água superficial. Tendo em vista a capacidade amortecedora dos aquíferos, estes seriam mais resistentes às mudanças climáticas, podendo substituir as águas subterrâneas perdidas durante a seca (CALOW *et al.*, 2010).

Desta forma, verifica-se a necessidade de uma nova estratégia, para resolver essa problemática na gestão integrada dos recursos hídricos, em que seja considerada a interação entre o recurso hídrico superficial e subterrâneo de forma conjunta (sistema aquífero-rio). Para tanto, foi formulada a seguinte hipótese, a ser avaliada neste trabalho: existe uma relação entre a precipitação e as reservas de água subterrânea. Por tanto, é possível definir o escoamento de base em função de séries históricas de precipitação. Isto resultaria na determinação de uma vazão sustentável, por incluir a descarga de água armazenada do aquífero.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo principal

O objetivo principal deste trabalho é estimar a disponibilidade hídrica integrada, por meio de um modelo empírico linear e prever o escoamento de base, utilizando séries históricas de precipitação, na bacia hidrográfica do Ribeirão da Onça (BRO).

2.2 Objetivos específicos

- Determinar o escoamento de base observado no rio mediante a separação do hidrograma, visando conhecer a sua interação com o aquífero;
- Calcular o “tempo de regulação”, isto é, o tempo de atraso do escoamento de base, em relação à precipitação na bacia hidrográfica;
- Desenvolver um modelo empírico baseado em séries históricas de precipitação, para determinação do escoamento de base, que representaria a disponibilidade hídrica integrada de águas superficiais e subterrâneas (DHI);
- Avaliar o modelo empírico para a estimativa da DHI, analisando os dados de precipitação da BRO.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Terminologia no gerenciamento hídrico

A outorga para captação de água superficial tem dois enfoques principais. O primeiro trata das derivações a fio d'água em rios, córregos e ribeirões, e o segundo em reservatórios. Este trabalho está focado na determinação da disponibilidade hídrica integrada, que pode ser usada como critério para a outorga nos cursos de água.

De acordo com a Agência Nacional de Águas, ANA (2011), são definidas as seguintes terminologias:

- Vazão ecológica: Vazão necessária no rio para manter os requisitos do meio ambiente.
- Vazão ambiental: Vazão necessária para garantir a preservação da bacia de forma integrada. Isto é, preservar o ecossistema, assegurando a sua sustentabilidade além das atividades antrópicas.
- Vazão outorgável: Quantidade de água a ser captada no corpo hídrico para os diversos usos. Depende da oferta e da demanda de água na área em estudo.
- Vazão de referência: Corresponde a um dos principais critérios da outorga, consiste em estabelecer um valor de vazão, que representa o limite superior de utilização de água em um curso de água.

A vazão de referência para este trabalho possui elevada importância, por constituir um parâmetro fundamental para a obtenção de outorgas preventivas e de direito de uso de recursos hídricos. Sendo assim, pode ser considerado um procedimento adequado para a proteção dos rios, e caracteriza uma condição de alta garantia de água no manancial (CAMARA, 2003). Na prática, a vazão de referência corresponde às chamadas vazões mínimas de estiagem, consideradas como fluxo de base na maioria dos rios brasileiros (MACHADO, 2010).

Há duas abordagens como critério para sua definição: vazões mínimas com determinado tempo de recorrência e vazões da curva de permanência.

A primeira abordagem tem origem no setor de saneamento e é usada como critério em vários estados (São Paulo, Rio de Janeiro, Minas Gerais, etc.) usualmente por meio da vazão mínima de 10 anos e 7 dias de duração ($Q_{7,10}$), em que a estatística de vazão mínima é obtida

por meio do ajuste de uma distribuição estatística, por exemplo, a distribuição de Gumbel ou de Weibull (ANA, 2011).

A segunda abordagem consiste em ordenar as vazões de maior a menor e identificar a vazão que é superada em uma porcentagem grande do tempo, a partir da curva empírica de permanência (Figura 1). Esta porcentagem do tempo é usualmente denominada garantia. O valor complementar à garantia, ou seja, o tempo em que esta não é satisfeita, é usualmente denominado de risco. A ANA adota como vazão de referência a vazão percentil que é superada em 95% do tempo (Q_{95}) (ANA, 2014b). Esta vazão percentil é utilizada para caracterizar a distribuição temporal probabilística da disponibilidade hídrica para outorga.

A permanência de uma vazão representa a probabilidade de excedência no tempo. Isto significa que é definida como a probabilidade de ocorrência da vazão do rio ser maior ou igual a um determinado valor, no período da sua amostra (CRUZ, 2011).

Figura 1. Representação esquemática do hidrograma e a sua curva de permanência. Fonte: Cruz (2011)

3.1.1 Procedimentos técnicos sobre a disponibilidade hídrica

De acordo com as legislações vigentes, os critérios de outorga no Brasil são estabelecidos na Resolução do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) n° 16 de 8 de maio de 2001. A outorga confere o direito de uso de recursos hídricos condicionado à disponibilidade hídrica e ao regime de racionamento (ANA, 2011).

I. Séries hidrológicas e previsão de vazões

No que concerne ao gerenciamento dos recursos hídricos, na disponibilidade hídrica, existe uma questão muito importante, que se refere à avaliação, medição e priorização de riscos como medida de incertezas (CRUZ; LOPES, 2007). Portanto, a partir do estudo das séries temporais de vazão associado às probabilidades de ocorrência, são fornecidas as informações relativas à disponibilidade hídrica, obtidas por diferentes métodos e funções. Estes estudos consideram certas características para determinar a disponibilidade hídrica, como aleatoriedade, homogeneidade e riscos (CRUZ; LOPES, 2007).

O conceito de aleatoriedade pressupõe que não há meio de prever um valor exato de uma variável, para um instante de tempo futuro. Isto significa, está relacionada à quantidade de flutuação que não é controlável de uma variável. No entanto, as séries temporais, geralmente possuem componentes estocásticos, isso significa, podem ser controladas por leis probabilísticas (BOX; JENKINS, 1976).

Um processo estocástico é estacionário quando a sua trajetória se desenvolve de forma aproximadamente constante em torno de uma média. Assim, pode-se dizer, que independente do ponto de partida em uma determinada série, suas características não mudam, ou seja, permanecem as mesmas sob translações no tempo (BOX; JENKINS, 1976). Isto significa que as frequências de ocorrência do passado, serão validas para descrever as probabilidades de ocorrência no futuro (TUCCI, 1998). Portanto, para determinar a previsão da disponibilidade hídrica são incluídas as flutuações naturais devido à sazonalidade, como ciclos anuais que aparecem em escoamentos de rios, precipitações e outras variáveis hidrológicas, a partir das curvas de permanência (HAAN, 1977).

II. Disponibilidade hídrica superficial

A maioria das regiões apresentam sazonalidade nas vazões naturais, ou seja, existem épocas específicas do ano em que as vazões são mais baixas. Sendo assim, a ANA considera natural que a vazão de referência deve refletir esta característica, permitindo uma demanda maior nos meses mais úmidos quando comparado aos meses mais secos. Sempre que possível, a ANA tem adotado vazões Q95 mensais, ao invés da Q95 anual, ordenando todas as vazões ocorridas no mês e identificando o valor da Q95 mensal, obtida a partir da curva empírica de permanência de cada mês (ANA, 2014b).

III. Disponibilidade hídrica subterrânea

De forma geral a disponibilidade subterrânea como critério para outorga está em função das reservas exploráveis de um aquífero, as quais são constituídas por uma parte das reservas renováveis e uma pequena fração das reservas permanentes. A porcentagem a ser adotada das reservas renováveis e permanentes para o cálculo da reserva explorável dos aquíferos é ainda controversa, principalmente em face da dinâmica de fluxo e resposta de cada aquífero à exploração. Entende-se como reservas reguladoras ou renováveis as que correspondem ao volume de água armazenada no aquífero acima do nível freático mínimo, e as permanentes são aquelas que se situam abaixo da variação anual do nível freático (ANA, 2005).

IV. Gestão integrada no Brasil

A partir da determinação da disponibilidade hídrica superficial e subterrânea de forma separada, a ANA adotou uma gestão para determinar vazões outorgáveis superficiais e subterrâneas. Esta gestão consiste em parcelar o fluxo de base do rio em três componentes: uma porcentagem que corresponde à potencialidade superficial (em termos das vazões de referência $Q_{7.10}$, Q_{90} , Q_{95}), uma porcentagem da reserva potencial explorável de água subterrânea e em uma parcela que corresponde à vazão ambiental (ANA, 2014a).

Porém, essa gestão não considera a consequência trazida pela captação de águas subterrâneas, pois a descarga do aquífero ao rio acarreta um menor fluxo de base, o que provocaria uma diminuição na vazão natural do rio. Estes fatores geram problemas ao gerenciamento dos recursos hídricos, principalmente nos períodos de recessão, comprometendo assim, a vazão outorgável (Figura 2).

Figura 2. Hidrograma com a vazão natural e a vazão de base do rio sem exploração (superior) e vazões naturais e de base depois de captar água do aquífero (inferior). Fonte: ANA (2014a)

Segundo Oliveira, Bueno e Lopes (2007) essa gestão integrada ainda é muito incipiente no Brasil, uma vez que não se dispõe ainda de um balanço hídrico realístico, podendo deixar lacunas importantes no cálculo do escoamento de base e uma redução significativa na disponibilidade hídrica de uma bacia dada.

V. *Regionalização de vazões*

A regionalização hidrológica consiste em um conjunto de ferramentas que exploram as informações existentes, tendo em vista a estimativa de variáveis hidrológicas em regiões com dados limitados (TUCCI, 1998). São definidas regiões hidrologicamente homogêneas, isto significa regiões onde a variável aleatória possui tendências semelhantes (CRUZ; LOPES, 2007). Estas regiões homogêneas estabelecidas pelo agrupamento espacial de distribuições estatísticas semelhantes (NERC, 1975).

Existem modelos de regionalização, baseados na parametrização da curva de permanência. As bases conceituais associadas às metodologias de regionalização podem ser resumidas em:

Método Tradicional: utiliza a análise de regressão múltipla para investigar como as variações nas variáveis independentes afetam a variação da variável dependente, aplicando diferentes modelos de regressão, linear, potencial, exponencial, logarítmico e recíproco (HOFFMANN; VIEIRA, 1997).

Método da curva adimensional: Para este método, apenas a vazão mínima e a máxima podem ser regionalizadas, pois são aplicadas às séries anuais de eventos extremos.

Método da conservação de massas: Este método se aplica para regionalizar vazão mínima e média, ajustando modelos de regressão não lineares que representem vazões em função da área de drenagem ou alguma outra variável explicativa para o rio e cada afluente dele. (ANA, 2013)

3.2 Interação entre água subterrânea e superficial

Este item apresenta os conceitos básicos da conexão hidráulica rio-aquífero e os principais métodos de separação do hidrograma para determinação do escoamento de base.

3.2.1 Conceitos básicos

A água superficial comumente está hidráulicamente conectada à água subterrânea, e estão sujeitas a mudanças, tanto de entrada como de saída no corpo hídrico. Por exemplo, o bombeamento de água subterrânea em um aquífero pode reduzir a descarga aos rios, lagos, etc. As interações entre o aquífero e o rio são apenas observadas e medidas, tornando difícil a articulação do uso das águas subterrâneas no gerenciamento dos recursos hídricos (DAVIDS; MEHL, 2015).

I. Interação aquífero-rio

A interação rio-aquífero pode acontecer de duas maneiras. A primeira ocorre quando aquífero alimenta o rio, chamado de rio efluente ou perene. A segunda forma ocorre quando o rio alimenta o aquífero, chamado de rio influente ou intermitente (BEAR, 1979).

As regiões úmidas geralmente possuem rios que drenam água do aquífero (Figura 3a). Por outro lado, a segunda interação é comum em regiões áridas e semiáridas, onde os rios formam fontes localizadas de recarga e estão hidráulicamente conectados ao aquífero (Figura 3b) ou estão desconectados dele (Figura 3c) (SCANLON, 2002).

Figura 3. Interação rio-aquífero, a) Água em direção ao rio b) Perda de fluxo em direção ao aquífero c) Perda de fluxo quando o rio está desconectado do aquífero, Fonte: adaptado de Winter *et al.* (1998).

II. Escoamento direto, subsuperficial e subterrâneo

Existem três tipos de escoamento que podem ocorrer numa bacia. O que ocorre na superfície do solo é conhecido como escoamento direto, e está associado ao fluxo rápido ou direto que chega ao rio proveniente da precipitação. Abaixo da superfície do solo, o escoamento ocorre em duas zonas principais, na zona saturada (escoamento subterrâneo) e na zona água-solo (escoamento subsuperficial) (Figura 4).

Através da zona água-solo, ocorre o escoamento subsuperficial. Nesta zona, os vazios entre os grãos de cascalho, areia, silte, argila e rochas podem conter ar ou água. Por outro lado, em contraste com a zona não saturada, na zona saturada os vazios são ocupados totalmente por água. O escoamento de água nessa zona é chamado de subterrâneo (WINTER *et al.*, 1998).

Figura 4. Zonas do aquífero, em que ocorrem os tipos de escoamento: superficial, subsuperficial e subterrâneo. Fonte: Adaptado de Winter *et al.* (1998)

3.2.2 Técnicas de separação do escoamento de base

A vazão em um curso d'água pode ser decomposta em escoamento direto e escoamento de base, para assim, quantificar a contribuição do aquífero na vazão no rio. Segundo Barreto *et al.* (2006) alguns dos métodos utilizados para esse fim são os métodos do balanço hídrico, o uso de infiltrômetros, mini piezômetros, lisímetros de fundo de rio, traçadores, os modelos hidrométricos em escala da bacia hidrográfica, e também mediante a análise de hidrogramas (LERNER, 2003).

Em essência, a separação do hidrograma é tradicionalmente considerada um processo de desconstrução da vazão a um processo de multicomponente, comumente em escoamento direto e escoamento de base. A seguir, são apresentados os três métodos gerais para separação do hidrograma.

I. Métodos gráficos

O método gráfico consiste em identificar o início do evento de precipitação e o pico do hidrograma. Depois, aplicando a equação em função da área de drenagem da bacia é encontrado o tempo a partir do pico do hidrograma no qual o escoamento direto termina e começa a recessão (TUCCI, 2009).

Identificados esses pontos: inicial, máximo e final do escoamento direto basta só com separar graficamente por algum dos seguintes métodos: o método da linha reta, o método da base fixa e o método da inclinação variável (Figura 5) (CHOW, 1988).

Figura 5. Métodos gráficos de separação do hidrograma, a) método da linha reta, b) método da base fixa, c) método da inclinação variável Fonte: Adaptado de Chow (1988)

II. Métodos químicos

Os traçadores químicos são usualmente isótopos estáveis da água e se classificam em três categorias: traçadores ambientais naturais, traçadores históricos e traçadores aplicados (HEALY, 2010).

O conteúdo isotópico da água no rio está relacionado com o conteúdo isotópico da precipitação, o qual pode ser determinado por meio da equação da conservação de massa. Cada componente do hidrograma do rio tem uma relação isotópica diferente, caracterizando a cada componente um tempo de resposta diferente, do mais rápido ao mais lento. O escoamento direto e subsuperficial correspondem à água nova, e o escoamento subterrâneo a águas de maior idade (GÓMEZ; GUZMÁN, 2011; RAO *et al.*, 2015).

III. Métodos de algoritmos numéricos

Os métodos denominados de algoritmos numéricos ou filtros digitais são utilizados na separação do hidrograma quando se tem registros históricos de vazões. Esses filtros foram desenvolvidos para reproduzir sinais de alta frequência relacionada com a resposta do escoamento direto a partir de hidrograma, e sinais de baixa frequência relacionada com a resposta do escoamento subterrâneo de forma repetitiva. Os primeiros autores a sugerir o uso do filtro digital foram Lyne e Hollick (1979) e propuseram estimar uma média entre o escoamento direto e o escoamento de base no intervalo anterior. Ainda que essa técnica não tenha sido desenvolvida com bases físicas, alguns autores têm proposto filtros incluindo conceitos físicos a partir do esgotamento de água nos aquíferos, por meio da curva de recessão, que expressa o resultado de um armazenamento linear (NATHAN; MCMAHON, 1990).

3.3 Análise de séries temporais para determinação de tempos de resposta na bacia

Alguns autores têm usado séries de dados para estudar o comportamento hidrológico, analisando as tendências e periodicidades presentes nas séries temporais. O foco desses estudos foi estimar tempos de resposta de recarga, tempos de resposta dos escoamentos na bacia e na identificação de tendências, usando modelos paramétricos e não paramétricos. Foram aplicadas especificamente técnicas utilizando transformada de Fourier e Wavelet. Tendo como exemplos os trabalhos de Padilla e Pulido-Bosch (1995), Labat, Ababou e Mangin (1999b), Labat, Ababou e Mangin (1999a), Labat, Ababou e Mangin (2000), Lee e Lee (2000), Labat, Ababou e Mangin (2002), Elouazanj *et al.* (2004), Bouananp *et al.* (2005), Groppo *et al.* (2005), Budge e Sharp (2009), Jiménez (2010), Jiménez e Navarro (2012), Karthikeyan e Nagesh Kumar (2013), Mc Cabe e Wolock (2014), Duvert *et al.* (2015), Walker *et al.* (2015).

3.3.1 Considerações gerais

Uma série temporal é qualquer conjunto de observações ordenadas no tempo. Têm-se séries temporais contínuas e discretas, as quais são obtidas através de amostragem de uma série temporal contínua em intervalos de tempos iguais (KENDALL, 1976).

São possíveis dois enfoques principais para determinação de tempos de resposta: o enfoque paramétrico, feito no domínio temporal, e o enfoque não paramétrico, feito no domínio das frequências. Para ambos os enfoques, são considerados modelos estocásticos e estacionários (MORETTIN; TOLOI, 2006). Neste trabalho foram utilizadas duas técnicas:

- A primeira técnica contempla o enfoque paramétrico na análise de autocorrelação (análise simples) e correlação cruzada (análise entre duas séries), a partir da função da autocovariância. Também considera o enfoque não paramétrico na análise espectral (simples e cruzada) a partir da transformada de Fourier da função de correlação do enfoque paramétrico;
- A segunda técnica contempla os enfoques paramétricos e não paramétricos de forma combinada por meio da transformada contínua de Wavelet de séries temporais discretas, tanto de forma simples, quanto cruzada.

3.3.2 Análise de correlação e análise espectral de Fourier

A análise de correlação e análise espectral a partir da transformada de Fourier são metodologias de tratamento de séries temporais aplicadas no domínio do tempo e no domínio das frequências. Foram desenvolvidas inicialmente por Jenkins e Watts (1969) e anos depois melhoradas e utilizadas por Mangin (1984).

Segundo Mangin (1984) a aplicação das análises de correlação e espectral às séries temporais de precipitação e vazão tanto de forma simples, quanto cruzada, contribui com informações sobre o efeito amortecedor produzido pelo aquífero a partir de eventos de precipitação.

I. Análise de correlação (domínio temporal)

Este tipo de análise pode ser aplicado de forma simples e cruzada. O primeiro caso é chamado de autocorrelação, analisa-se a função de autocovariância com respeito à média de uma série temporal. O segundo caso utiliza duas séries temporais a partir da função de covariância.

i. Análise de autocorrelação ou correlação simples

A função de autocorrelação é útil para descrever as propriedades dos sistemas (SHUMWAY; STOFFER, 2006). O autocorrelograma quantifica a dependência linear de sucessivos valores sobre um período de tempo e, portanto, descreve a memória do sistema. Se um evento tem uma influência de longo prazo na série temporal, a declividade do autocorrelograma decresce lentamente, isto é, quanto menos inercial for o processo que está afetando os dados de entrada (impulso), o autocorrelograma vai decrescer mais rápido (LAROCQUE *et al.*, 1998). Isto significa, se o sistema (aquífero), realizara um processo de filtração (amortecimento) dos sinais de impulso (precipitação), o sinal de resposta (vazão) no rio, seria detectada no autocorrelograma, e este tenderia a estabilizar-se nos valores com coeficiente de autocorrelação R_y mais baixos.

Por conseguinte, o tempo associado com valores de R_y na faixa de 0,1 a 0,2 é um indicador do efeito amortecedor do aquífero, o qual está relacionado com as curvas de recessão e as reservas de águas subterrâneas. Segundo Mangin (1984), esse indicador é chamado de efeito memória. Isto significa, quanto maior for o tempo correspondente ao $R_y = 0,1$ do correlograma, a reserva de água subterrânea é considerada mais importante, e mais inercial (amortecedor) o processo controlado pelo aquífero.

ii. Análise de correlação cruzada

A análise de correlação cruzada é usada para estabelecer uma ligação entre os dados de impulso e resposta. Como os dados de impulso (precipitações) correspondem a um processo aleatório no nosso domínio climático, o correlograma cruzado mostra a relação causa-efeito entre a precipitação e a vazão. Portanto, permite conhecer a resposta impulsionada do sistema, ou seja, o hidrograma unitário do aquífero (JIMÉNEZ; NAVARRO, 2012).

II. Análise espectral a partir da transformada de Fourier (domínio da frequência)

Em geral, a partir de registros de comprimento finito, ou séries temporais, a análise de Fourier consiste em decompor esta série em uma soma de funções senos e cossenos. A característica fundamental é o espectro, o qual corresponde à transformada de Fourier da função de autocovariância. Sob o ponto de vista da quantidade de informação probabilística, o espectro e a função de autocovariância são ferramentas complementares (CHIANN, 1997).

iii. Análise espectral de Fourier simples

O espectro simples permite identificar diferentes picos que representam fenômenos periódicos. Portanto, é possível caracterizar o sistema por meio da interpretação dessa informação. Devido à natureza dos dados analisados, o sistema (aquífero) filtra sinais de impulso (precipitação) de alta frequência, isto significa, o aquífero tem um efeito amortecedor (filtragem) dos eventos de precipitação, isto é chamado de processo inercial e análogo ao efeito memória descrito no autocorrelograma.

Essa técnica permite caracterizar os sistemas de aquíferos analisados, por meio da interpretação de alguns parâmetros que estão relacionados com a capacidade e a importância das reservas subterrâneas. Além do efeito memória, Mangin (1984) determinou outro parâmetro a partir do espectro simples, chamado de Tempo de Regulação (Equação 1). Na área de tratamento de sinais, esse tempo define a duração da influência de algum processo, que está influenciando sobre um sinal de impulso. Portanto, o Tempo de Regulação também é um indicador do amortecimento realizado pelo aquífero dos impulsos de precipitação, e quanto maior for o seu valor, mais importante é considerada a reserva subterrânea.

$$S_o = \frac{S_y(0)}{2} \quad (1)$$

Em que S_y é o espectro simples de Fourier de uma série hidrológica.

iv. Análise espectral de Fourier cruzada

Como mencionado, a função de entrada apresenta um caráter aleatório. Portanto, a função de resposta, além de possuir uma componente relacionada com a estrutura do sistema, neste caso do aquífero, também possui uma componente aleatória.

Essa técnica de correlação cruzada, tanto temporal quanto espectral, mostra a componente estrutural do sinal de resposta (vazão) a partir do estudo das funções aleatórias de impulso (precipitações) no qual o aquífero se comporta como um filtro entre ambos os sinais, isso significa, é responsável por uma maior ou menor regulação do sistema.

Outro parâmetro definido por Mangin (1984) para caracterizar o sistema, é chamado de frequência de corte, que corresponde à largura da faixa espectral. Esta frequência do espectro (simples e cruzado) é a última que contém informação interpretável, ou seja, os períodos associados às frequências maiores a este valor são considerados períodos desprezíveis. Em outras palavras, a frequência de corte, é a máxima frequência, na qual foi detectado um período com informação relevante entre os sinais de impulso e resposta.

Os sistemas que filtram o sinal de impulso, isto é, os aquíferos que realizam um processo de amortecimento dos impulsos de precipitação. Tem uma inércia grande e contêm reservas importantes d'água devido ao seu grande poder regulador. Os sistemas que apenas conseguem filtrar o sinal de impulso e não mostram comportamento inercial, nem de memória, geralmente apresentam escassas reservas. Apresentando correlogramas que decrescem rapidamente, tempos de regulação muito curtos e faixas espectrais grandes (MANGIN, 1984).

3.3.3 Transformada contínua Wavelet

O conceito de espectro Wavelets, sendo representado pela decomposição da variância total de um processo estacionário, em diferentes escalas, as quais são as componentes que representam contribuições de períodos diferentes. Simplificadamente pode-se afirmar que cada escala do espectro, explora diferentes frequências ao longo do tempo, intensificando as frequências encontradas na forma de potências (CHIANN, 1997). Esta potência indica a presença ou a constância dessa frequência detectada no sinal analisado. As escalas estão relacionadas com os períodos, os quais são os valores inversos da frequência. Por conseguinte, o espectro de Wavelet além de poder caracterizar as propriedades de um processo estacionário

como a análise de Fourier, também caracteriza as propriedades de um processo não estacionário (MORETTIN, 2014).

A construção do espectro Wavelet é realizada mediante dilatações e translações de uma função Wavelet “mãe”. Estas dilatações e contrações da Wavelet representam as diferentes escalas mencionadas, as quais mediante estas translações no tempo efetuam a exploração das diferentes frequências no sinal (MORETTIN, 1999). Por fim, o objetivo desta técnica, é permitir analisar uma série no domínio do tempo e escala simultaneamente. Isto significa conseguir uma representação completa do domínio de tempo-frequência de padrões transitórios que ocorrem em uma série de tempo (LABAT; ABABOU; MANGIN, 1999a).

Existem várias famílias de Wavelets (Figura 6), sendo a forma desta onda dependente da ordem escolhida (KARTHIKEYAN; NAGESH; KUMAR, 2013). Neste trabalho foi usada a Wavelet Morlet, por ser a mais utilizada na literatura.

Figura 6. Representação da família de Wavelet “Mães” mais usadas: Em que a) Morlet e Mexican hat b) Haar e Derivative of gaussian. Fonte: adaptado de Gargour *et al.* (2009)

I. Transformada contínua Wavelet de uma série temporal (TCW)

Essa técnica permite identificar padrões de frequência não estacionária de uma série temporal. Segundo Torrence e Compo (1998) a transformada contínua de Wavelet (TCW) $W_t^x(S)$ (Equação 2) de uma série temporal discreta x_t com um passo uniforme Δt , é definida como a convolução de x_t , com uma Wavelet $\psi_0(\eta)$ de escala S (YU; LIN, 2015). A seguir:

$$TCW = W_t^x(S) = \sqrt{\frac{\Delta t}{S}} \sum_{t'=1}^N x_{t'} \psi_0 \left(\frac{(t' - t)\Delta t}{S} \right) \quad (2)$$

$$\psi_0(\eta) = \pi^{-1/4} e^{i\omega_0\eta} e^{-1/2\eta^2} \quad (3)$$

Em que $\psi_0(\eta)$ é a função de Wavelet com parâmetro de tempo adimensional η (Equação 3). Neste trabalho, foi utilizada a Wavelet Morlet em que ω_0 é a frequência adimensional (Figura 6a).

Como mostrado na Equação 2, a TCW aplica a uma função Wavelet mãe um filtro que decompõe a série temporal x_t , mediante a translação da Wavelet mãe ao longo de um tempo t com diferentes escalas (dilatações e contrações) de Wavelet S .

Além disso, devido ao caráter discreto das séries temporais, são produzidos certos erros no cálculo da transformada Wavelet, por exemplo, nos extremos das séries, quando são analisadas escalas para detectar baixas frequências no sinal. Com o objetivo de resolver este erro, é utilizada frequentemente a técnica “*cero-padding*”, que consiste em preencher a série com zeros até alcançar um número potência de 2 (TORRENCE; COMPO, 1998). No entanto, a introdução de zeros à série, na TCW implica uma redução da amplitude perto das bordas das séries quanto mais baixa é a frequência. Portanto, no espectro é produzido o chamado “cone de influência” com os valores dos extremos das séries. Por conseguinte, os valores dentro do cone de influência, não devem ser utilizados para extrair resultados da série temporal (TORRENCE; COMPO, 1998).

II. Transformada cruzada de Wavelet (TXW)

Uma análise bivariável foi desenvolvida para examinar as relações no espaço tempo e frequência entre duas séries de dados, e para entender como o ângulo de fase representa o mecanismo causal e as relações físicas entre duas séries temporais (GRINSTED; MOORE; JEVREJEVA, 2004).

Entre essas análises de duas variáveis encontra-se a transformada cruzada Wavelet (TXW) (Equação 4), desenvolvida para identificar a potência Wavelet cruzada entre duas séries temporais.

$$TXW = W_t^{xy}(S) = W_t^x(S)W_t^{y*}(S) \quad (4)$$

Em que $W_t^{xy}(S)$ é a transformada cruzada Wavelet, $W_t^x(S)$ é a transformada Wavelet da série temporal de impulso e $W_t^{y*}(S)$ é o complexo conjugado da série temporal de resposta.

A TXW também pode estar representada em coordenadas polares como mostrado na Equação 5.

$$W_t^{xy}(S) = |W_t^{xy}(S)|e^{t\varphi_t(S)} \quad (5)$$

Em que $|W_t^{xy}(S)|$ é a potência da Wavelet cruzada, $\varphi_t(S)$ é o ângulo de fase. O ângulo de fase indica o tempo de atraso entre duas séries temporais, em um instante t em uma escala S.

O atraso temporal (ΔT) (Equação 6) para uma escala S específica entre duas séries temporais, segundo Yu e Lin (2015) é definido como:

$$\Delta T = T(s) * \frac{\varphi_t(s)}{2\pi} \quad (6)$$

Em que $T(s)$ é um período associado às frequências detectadas em uma escala S.

4 ÁREA DE ESTUDO

4.1 Localização e clima

A bacia hidrográfica do Ribeirão da Onça (BRO), com área de 65 km², está localizada no município de Brotas, no centro-leste do Estado de São Paulo, entre os meridianos 47°55' e 48°00' de longitude oeste e os paralelos 22°10' e 22°15' de latitude sul (Figura 7). O Ribeirão da Onça é um dos formadores do Rio Jacaré-Guaçu, afluente do Rio Tietê pela margem direita.

Figura 7. Localização da Bacia Hidrográfica do Ribeirão da Onça.

A partir dos dados obtidos na estação climatológica do Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada (CRHEA), verificou-se a temperatura média anual da região é de $20,6 \pm 3,1$ °C. Segundo Mattos (2015) a região possui clima subtropical úmido com precipitação s de verão, apresentando variação para clima tropical úmido com inverno seco, conforme as indicações da classificação climática de Köppen.

4.2 Caracterização da bacia hidrográfica

A caracterização física e geográfica da bacia do Ribeirão da Onça (BRO) foi elaborada por Matos (1987) sobre mapas em escala 1:10.000, e são mostrados na Tabela 1. A Figura 8 apresenta o mapa de variação de altitude na BRO, assim como seus cursos d'água e área de drenagem. Este mapa foi construído por Mattos (2015), a partir de imagens tipo SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*).

Figura 8. Altimetria da Bacia Hidrográfica do Ribeirão da Onça Fonte: Mattos (2015)

Tabela 1. Caracterização física da bacia do BRO

Caracterização da Bacia do Ribeirão da Onça	
Área de Drenagem	65 Km ²
Perímetro	42 km
Comprimento Axial	11 km
Extensão do curso d'água principal	16 km
Comprimento total dos cursos d'água	50 km
Altitude máxima	840 km
Altitude mínima	640 km
Declividade média	7,6 m.Km ⁻¹

A densidade de drenagem (Dd) definida como a razão entre o comprimento total dos cursos d'água e a área de drenagem, e o índice de compactidade k_c , definido como a razão entre o perímetro da bacia e o perímetro da circunferência de área igual à da bacia. São parâmetros indicadores do grau de desenvolvimento do sistema de drenagem de uma bacia, e da susceptibilidade da bacia a inundações nas partes baixas.

Segundo Pompêo (1990) uma bacia com drenagem pobre, apresenta valores de Dd em torno de 0,75 km.km², de outro modo, é considerada com drenagem rica em torno de 1,5 km.km². Em relação ao k_c , segundo Pompêo (1990), quando mais próximo à unidade, maior sujeição a enchentes. Na BRO obtiveram-se valores de Dd e k_c , em 0,77 km.km² e 1,5. O que indica, a BRO apresenta um desenvolvimento mediano em seu sistema de drenagem, e tem baixa susceptibilidade a ocorrência de enchentes.

4.3 Uso e ocupação do solo

A bacia do Ribeirão da Onça é usada para práticas agrícolas, pecuárias, e plantio florestal. A bacia tem no cerrado a sua cobertura original. Atualmente está coberta por 36% de eucaliptos, 23% de citros, 10% de cana, 10% de mato, 7% de soja, 6% de pastagem, e 8% de solo nu. (MATTOS, 2015) (Figura 9).

Figura 9. Distribuição da rede de monitoramento e uso do solo da BRO para o ano 2015

Trata-se de uma bacia inteiramente localizada em área de afloramento do aquífero Guarani, a qual fornece informações de interesse para o entendimento sobre o comportamento da recarga subterrânea sobre esse sistema-aquífero. Existem estudos sobre a recarga subterrânea, realizados anteriormente na BRO por Wendland, Barreto e Gomes (2007), Lucas *et al.* (2015), Melo, Wendland e Guanabara (2015), Wendland, Gomez e Troeger (2015). Estes trabalhos indicam um valor aproximado de recarga de 440 mm/ano, correspondente a uma faixa de 20 e 30% da precipitação média anual, registrada em 1494 mm/ano, para cada período estudado.

O solo está agrupado em cinco tipos pedológicos principais (Figura 10): Areias Quartzosas profundas, Latossolo vermelho-Amarelo álica, Latossolo Roxo eutrófico, Terra

Roxa Estruturada distrófica ou eutrófica, Solos Hidromórficos, Latossolo Vermelho-Escuro distrófico ou álico (CASTRO JÚNIOR, 2008).

Figura 10. Mapa pedológico na região da bacia do Ribeirão da Onça. Fonte: Castro Júnior (2008)

5 MATERIAS E MÉTODOS

5.1 Monitoramento de dados na BRO

5.1.1 Precipitação

Desde o ano de 1973, dados de precipitação são monitorados na Estação Climatológica do Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada (CRHEA) da USP, localizada nas coordenadas 22°10'13,7" S e 47°53'55"W. Os dados foram coletados com um pluviômetro de tipo Ville de Paris.

De acordo com os valores de precipitação mensal, da estação climatológica do CRHEA. O período de maior ocorrência de precipitação está registrado entre os meses de setembro a março como mostrado na Figura 11.

Figura 11. Precipitação média mensal na estação do CRHEA. Obtida no período de 1973 a 2015

No presente estudo, foram usados dados de precipitação diária no período compreendido entre setembro de 2003 a agosto de 2014, que corresponde ao intervalo de tempo em que há disponibilidade de dados de vazão na área de estudo.

5.1.2 Vazão

Foi usada neste trabalho, a série sintética de vazões médias diárias do modelo hidrológico chuva-vazão J2000 do framework JAMS. Esta série foi construída por Machado, Wendland e Krause (2016) para o período de 01/09/2003 a 31/08/2014 e calibrada de forma visual e por meio do coeficiente de Nash-Sutcliffe (0,76).

A vazão também é calculada na BRO por meio de um molinete hidrométrico na seção de monitoramento na Fazenda Maria da Fábrica, usando o método da seção média (Figura 13).

Com o intuito de verificar as vazões obtidas a partir da modelagem, a Figura 12 compara a vazão diária do modelo JAMS com as medidas de vazão instantâneas do molinete hidrométrico para os anos hidrológicos de 09/2006 a 09/2008. Em alguns meses as medidas com o molinete hidrométrico apresentaram medidas menores, isto devido provavelmente ao crescimento da vegetação na seção de controle ocasionando a diminuição na velocidade de giro da hélice do molinete. Em caso contrário, em alguns meses as medidas com o molinete são maiores, isto é atribuído a possíveis ondas de cheia no instante da medição da vazão em períodos onde foi registrado um aumento da precipitação. Contudo, a imprecisão do modelo J2000 é pequena e está dentro do erro aceitável para ser utilizado (RIBEIRO, 2012).

Figura 12. Comparação da vazão modelada JAMS e da vazão instantânea e da precipitação diária, no período de 01/09/2006 a 31/08/2008

Figura 13. Seção de monitoramento de vazão por meio de um molinete hidrométrico na BRO (Data:2015)

5.2 Estudo de caso: Bacia do rio Jacaré-Guaçu (BJG)

Com o intuito de validar o modelo empírico (item 5.5) proposto neste trabalho, foram utilizadas séries de dados de precipitação e vazão diárias de duas estações localizadas na bacia hidrográfica do rio Jacaré Guaçu (BJG) (Figuras 14 e 15). Para ambos os casos, o período de maior ocorrência de precipitação está registrado nos meses de outubro e março. Os dados foram obtidos no site do DAEE (<http://www.hidrologia.dae.sp.gov.br/>).

Figura 14. Localização do sistema Jacaré formado pelas bacias contíguas do Jacaré-Guaçu (mais ao norte) e do Jacaré-Pepira (mais ao sul), em relação ao Estado de SP. Fonte: Rabelo (2006)

Figura 15. Modelo digital de elevação das bacias Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira. Localização das estações fluviométricas: E1 estação da Fazenda Boa Vista do Jacaré, e E3 estação da Fazenda Palmeiras. Fonte: Rabelo (2006)

5.2.1 Informações relevantes das estações

I. Sub-bacia 1 (E3=Fazenda Palmeiras)

Dados de vazão

Prefixo do DAEE: 5C-013

Nome da estação fluviométrica: Fazenda Palmeiras

Município: Araraquara, SP

Latitude: 21° 52' 02"

Longitude: 48° 16' 35"

Área de drenagem: 1867 km²

Período de tempo analisado: 01/09/1974 a 31/08/2005

Dados de precipitação

Prefixo do DAEE: C5-017

Nome da estação pluviométrica: Chibarro

Latitude: 21° 53' 17"

Longitude: 48° 09' 06".

A Figura 16 mostra a variabilidade das precipitações medidas na estação pluviométrica Chibarro, obtidas para o período de 1931 a 2015 no site do DAEE.

Figura 16. Precipitação mensal na estação pluviométrica Chibarro, para o período de 1931 a 2015.

II. Sub-bacia 2 (E1=Fazenda Boa Vista do Jacaré)

Dados de vazão

Prefixo do DAEE: 5C-021

Nome da estação fluviométrica: Fazenda Boa Vista do Jacaré

Município: Ibitinga, SP

Latitude: 21° 48' 46"

Longitude: 48° 48' 12"

Área de drenagem: 3519 km²

Período de tempo analisado: 01/09/1971 a 31/08/1992

Dados de precipitação

Prefixo do DAEE: C5-081

Nome da estação pluviométrica: Sítio Esperança

Latitude: 21° 49' 00"

Longitude: 48° 48' 00"

Na Figura 17 é possível observar a variabilidade das precipitações medidas na estação pluviométrica Sítio Esperança, obtidas para o período de 1943 a 2015 no site do DAEE.

Figura 17. Precipitação mensal na estação pluviométrica Sítio Esperança, para o período de 1943 a 2015.

5.3 Separação do escoamento

Com a finalidade de conhecer a relação entre o sistema rio-aquífero na bacia hidrográfica, foi determinado o escoamento de base observado (Q_b) e o escoamento direto (Q_s), a partir da separação do hidrograma da vazão total (Q_t). Foi utilizado o software HYSEP, o qual está baseado em métodos gráficos (SLOTO; CROUSE, 1996). Também foi aplicado o filtro de Nathan e McMahon (1990), utilizando a ferramenta de análise de hidrograma G2, implementada por Gómez e Gómez (2012) para realizar a separação dos tipos de escoamento.

5.3.1 Filtro digital de Nathan & Mc Mahon

O filtro digital de Nathan e McMahon (1990) está baseado no estudo das curvas de recessão e foi proposto originalmente por Lyne e Hollick (1979). Esta equação filtra os sinais de altas frequências detectados na série de vazão total, e são relacionados com o fluxo rápido ou superficial (Equação 7). Pela diferença entre o valor da vazão total e o escoamento direto, é determinado o escoamento de base (Equação 8).

$$Q_{s_i} = 0,925Q_{s_{i-1}} + \frac{(1 + 0,925)}{2}(Q_{t_i} - Q_{t_{i-1}}) \quad (7)$$

$$Q_{b_i} = Q_{t_i} - Q_{s_i} \quad (8)$$

Em que Q_{s_i} é a resposta do fluxo superficial filtro no instante i , Q_{t_i} é a vazão total no rio, e Q_{b_i} é o escoamento de base.

5.3.2 Software HYSEP

Este software utiliza três métodos gráficos, para separar os componentes do escoamento de base e superficial: o intervalo fixo, o intervalo móvel e o mínimo local do hidrograma (Figura 18) em função da área da bacia (Equação 9). Estes métodos podem ser descritos como três algoritmos diferentes para desenhar linhas de conexão entre os pontos baixos do hidrograma, sendo a sequência destas linhas a definição do hidrograma do fluxo de base (SLOTO; CROUSE, 1996). O software encontra-se disponível para acesso em: http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/36387-hydrograph-separation-using-hysep/content/f_hysep.m.

Figura 18. Exemplo da separação do hidrograma usando os três métodos para separar as componentes de fluxo superficial e subterrâneo. a) método do intervalo fixo, b) método do intervalo móvel, c) método mínimo local. Fonte: Adaptado de Sloto e Crouse (1996)

Para todos os três casos a duração do escoamento direto é calculada a partir da Equação 9:

$$N = A^{0,2} \quad (9)$$

Em que N: o número de dias após o pico do escoamento direto e A: a área da bacia em milhas quadradas (SLOTO; CROUSE, 1996).

5.4 Determinação de tempos de resposta na bacia

Com o intuito de estimar o tempo de regulação do aquífero, analisaram-se séries históricas de precipitação (P), de vazão total (Qt), escoamento de base (Qb) e escoamento direto (Qs), usando a análise de correlação e espectral de Fourier e a transformada contínua Wavelet.

5.4.1 Análise de correlação e análise espectral de Fourier

I. Análise de autocorrelação (domínio temporal)

A função de autocorrelação (Equação 11) analisa a variância com respeito à média de uma série temporal. Esta função está definida a partir da função de autocovariância mostrada na Equação 10 (JENKINS; WATTS, 1969).

$$C(k) = \frac{1}{n} * \sum_{t=1}^{n-k} (x_t - \bar{x})(x_{t+k} - \bar{x}) \quad (10)$$

$$Ry(k) = \frac{C(k)}{C(0)} \quad (11)$$

Em que k é o *time lag*, n é o tamanho da série temporal, x_t é um evento único, $\bar{x}$ é a média dos eventos, $Ry(k)$ é o autocorrelograma. $C(0)$ é o ponto de corte ou o ponto inicial, que determina o intervalo no qual a análise começa, ou seja, o *time lag* é igual zero. Geralmente é escolhido para representar o comportamento em longo prazo (LAROCQUE *et al.*, 1998).

II. Análise de correlação cruzada (domínio temporal)

Para conhecer a relação causa-efeito entre a precipitação e a vazão, ou seja, a resposta impulsionada do sistema. Foi usada a função de correlação cruzada entre as séries de P e Q_t , P e Q_b , P e Q_s , mostrada na Equação 13. Esta função analisa a variância com respeito à média de duas séries temporais, a partir da função de covariância (Equação 12).

$$C_{xy}(k) = \frac{1}{n} * \sum_{t=1}^{n-k} (x_t - \bar{x}) * (y_{t+k} - \bar{y}) \quad (12)$$

$$R_{xy}(k) = \frac{C_{xy}(k)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (13)$$

Em que x_t é a série de dados do impulso, y_t é a série de resposta, $R_{xy}(k)$ é o correlograma cruzado, σ_x e σ_y são as variações das séries de tempo.

III. *Análise espectral simples (domínio da frequência)*

A função de densidade espectral ou densidade de variância (Equação 14) corresponde à mudança a partir do modo de tempo para o modo de frequência, através da aplicação da transformação de Fourier da função de autocorrelação (Equação 11) (JENKINS; WATTS, 1969).

$$S_y(f) = 2 * \left[1 + 2 * \sum_{k=1}^m D(k) * R_y(k) * \cos(2\pi Fk) \right] \quad (14)$$

Em que $S_y(f)$ é o espectro simples, k é o *time lag*, $R_y(k)$ é a função de autocorrelação (Equação 11), f é a frequência, m é o comprimento da série temporal, $F = \frac{j}{2m}$, desde $j = 1$ até m . $D(k)$ é o filtro do Tukey II, da transformada de Fourier (Equação 15).

$$D(k) = \frac{(1 + \cos \pi \frac{k}{m})}{2} \quad (15)$$

IV. *Análise espectral cruzada (domínio da frequência)*

Análoga à função da densidade espectral (Equação 8), a função de densidade espectral cruzada (Equação 16), corresponde à transformada de Fourier da função de correlação cruzada (Equação 13) (BOX; JENKINS, 1976).

$$|S_{xy}(f)| = \sqrt{h_{xy}^2 + \lambda_{xy}^2} \quad (16)$$

Em que $S_{xy}(f)$ é o espectro cruzado, $h_{xy}(f)$ e $\lambda_{xy}(f)$ as componentes cartesianas (Equações 17 e 18), k é o *time lag*, f é a frequência, R_{xy} é a função de correlação cruzada (Equação 13), $D(k)$ o filtro Tukey II (Equação 15).

$$h_{xy}(f) = 2 * \left[R_{xy}(0) + \sum_{k=1}^m (R_{xy}(k) + R_{yx}(k)) D(k) \cos(2\pi f k) \right] \quad (17)$$

$$\lambda_{xy}(f) = 2 * \left[R_{xy}(0) + \sum_1^m \left(R_{xy}(k) + R_{yx}(k) \right) D(k) \sin(2\pi f k) \right] \quad (18)$$

5.4.2 Transformada contínua Wavelet

Essa técnica ao invés de usar somas de funções seno e cosseno para representar a série temporal (transformada de Fourier), utiliza para tanto uma função Wavelet ou ondaleta com características próprias. A ondaleta é uma função localizada, e como tal pode assumir diferente posição relativa (se trasladar ao longo da série temporal), além de diferentes escalas (visando explorar as diferentes frequências presentes no sinal) (GRAPS, 1995). Assim, as potências obtidas na nova representação transformada correspondem às faixas de frequência presentes em diferentes tempos no sinal original (GARGOUR, 2009). Portanto, esta transformada combina o enfoque paramétrico (domínio temporal) e não paramétrico (domínio de frequências) na mesma análise.

Foi utilizado o software implementado por Grinsted, Moore e Jevrejeva (2004), para construir o espectro da transformada contínua Wavelet (TCW) de cada uma das séries de P, Qt, Qb e Qs, ou seja, a TCW para cada série de forma independente. O mesmo software foi utilizado para construir o espectro da transformada cruzada Wavelet (TXW) a partir das séries de valores de correlação entre a precipitação e cada tipo de escoamento. Este software está disponível no site <http://noc.ac.uk/using-science/crosswavelet-wavelet-coherence>.

5.5 Modelo empírico para disponibilidade hídrica integrada (DHI)

Foi proposto um modelo empírico linear (Equação 19), utilizando a informação obtida de tempos de resposta, interpretados a partir de análises das séries temporais de P e Q (Item 5.3), com o intuito de avaliar a hipótese formulada no início deste trabalho. Isto é, prever o escoamento de base em função da precipitação histórica (Figura 19). Desta forma é possível determinar a vazão mínima no rio, que foi contribuída pelo aquífero, proveniente de precipitações passadas. Isto significa, é possível fazer uma previsão da disponibilidade hídrica para outorga, que integra águas superficiais e subterrâneas (DHI) em função da média móvel da precipitação.

Figura 19. Esquema da hipótese formulada: o escoamento de base pode ser definido em função de precipitações passadas.

5.5.1 Determinação da DHI

A vazão mínima no rio, em um instante ζ , que considera a descarga do aquífero e representaria a disponibilidade hídrica integrada (DHI) para outorga, é calculada a partir da Equação 19.

$$D(\zeta) = \alpha_{\kappa} * \overline{P_{TR}}(\zeta) \quad (19)$$

Em que:

D : a disponibilidade hídrica integrada DHI (m³/s).

α_{κ} : o fator de regulação, em função da precipitação observada em um instante κ , adimensional.

$\overline{P_{TR}}(\zeta)$: a série da média móvel da precipitação (m³/s).

5.5.2 Calibração dos parâmetros do modelo empírico

A seguir, apresentam-se as variáveis a serem utilizadas, na calibração dos valores do fator de regulação (α_κ) e da média móvel da precipitação $\overline{P_{TR}}(\zeta)$ da Equação 19 (apresentada no item 5.5.1):

n : tamanho da série de precipitação e da série Q_b observada (filtro de Nathan & McMahon) (meses)

t : instante de tempo, 0,1,2,3,...,n (meses)

TRa : tempo de regulação do aquífero (meses)

$TRss$: tempo de regulação do escoamento subsuperficial (meses)

ζ : instante de tempo transladado, $\zeta=0$: $t+TRa+TRss, \dots, n+TRss$

κ : instante de tempo transladado, $\kappa=0$: $t+TRa, \dots, n$

I. Média móvel da precipitação $\overline{P_{TR}}$

O modelo empírico da Equação 19 está em função da média móvel da precipitação histórica, determinada em um instante ζ por meio do Algoritmo 1 (Figura 20). Este valor corresponde à média da precipitação entre um instante $\zeta-TRss$ até um instante $\zeta-TRss-TRa$. Isto significa, a vazão de base no rio pode ser estimada em função da média móvel da precipitação, que corresponde ao tempo de regulação do aquífero (TRa). Considerando conjuntamente, o tempo de resposta da vazão de base observada no rio, em relação à precipitação ($TRss$).

Ou seja, considerando a precipitação um instante $\zeta-TRss-TRa$, como o último valor da precipitação que contribuiu no cálculo da vazão de base em um instante ζ . Cabe salientar, que a área de drenagem da bacia é usada no Algoritmo 1, para conversão de unidades de precipitação a unidades de vazão.

Figura 20. Algoritmo 1: Determinação da média móvel da precipitação

Em que:

$P(t)$: precipitação no instante t (mm/mês).

A : área de drenagem da bacia (m^2).

II. Parâmetro $\alpha\kappa$

O fator $\alpha\kappa$ caracteriza a quantidade da precipitação média mensal, que corresponde ao escoamento de base. Está determinado utilizando o Algoritmo 2 (Figura 21), a partir dos valores de α_1 , α_2 e α_3 calculados por meio das Equações 20 e 21. Este Algoritmo assigna para um instante ζ o valor de $\alpha\kappa$, definido por meio da comparação da precipitação $P(\kappa)$ com a média de longo prazo de cada instante κ . Ou seja, para cada mês ζ , o algoritmo 2 calcula $\alpha\kappa$ a partir da comparação da precipitação do mês $\zeta - TR_{ss}(\kappa)$, com a média de longo prazo de cada mês κ analisado.

$$r_j = \frac{Qb(\zeta = 0:n)}{P_{tr}(\zeta = 0:n)} \quad (20)$$

$$\begin{cases} \alpha_1 = Mediana\{r(j)\} \\ \alpha_2 = Média\{r(j) \mid r(j) < \alpha_1\} \\ \alpha_3 = Média\{r(j) \mid r(j) > \alpha_1\} \end{cases} \quad (21)$$

Figura 21. Algoritmo 2: Determinação do parâmetro α_κ

Em que:

ε_κ : erro relativo entre a precipitação observada um instante κ , e a média de longo prazo de cada mês correspondente.

$r(j)$: razão da média móvel da precipitação e o Qb observado, adimensional.

$Qb(\zeta=0:n)$: escoamento de base observado, transladado um instante $t+TRa+TRss$ (m3/s).

$P(\kappa)$: precipitação transladada um instante de tempo, $\kappa=0$: $t+TRa$.

$\mu_{\kappa,i}$: média da precipitação de longo prazo mês a mês (mm).

5.5.3 Métricas estatísticas

A seguir, apresentam-se as métricas estatísticas utilizadas, para avaliar o ajuste do escoamento de base estimado pelo modelo empírico, tomando como valor observado o escoamento de base estimado pelo filtro de Nathan e McMahon (1990).

I. Erro absoluto médio (EAM)

O valor do EAM da Equação 22 é usado para estimar a magnitude média dos desvios entre os valores de escoamento de base teórico e do modelo, já que funciona melhor como estimativa da imprecisão ou incerteza da medida do que como medida de erro estatístico (WILLMOTT, 2005).

$$EAM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |O_i - E_i| \quad (22)$$

Em que N é o número de dados, O_i os dados observados e E_i os dados estimados.

II. Erro relativo médio (ERM)

O valor do EMR da Equação 23 corresponde à quantia da diferença medida entre os dados teóricos e os dados estimados. É uma grandeza adimensional.

$$ERM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|O_i - E_i|}{O_i} \quad (23)$$

Em que N é o número de dados, O_i os dados observados e E_i os dados estimados.

III. Índice refinado de concordância (dr)

O índice refinado de concordância (dr) ($-1 < dr < 1$), definido na Equação 24, quantifica o erro do modelo, em relação aos desvios e a média da série observada. Para um ajuste perfeito entre as duas séries $dr=1$. O valor de 0,5 indica que os erros do modelo são a metade dos erros resultantes do uso da média observada. O valor de 0 indica que a habilidade preditiva do modelo é similar do que a média teórica. Valores negativos indicam do que os erros do modelo excedem da média observada (WILLMOTT, ROBESON; MATSUURA, 2012).

$$d_r = \begin{cases} 1 - \frac{\sum_{i=1}^N |O_i - E_i|}{2 \sum_{i=1}^N |O_i - \bar{O}|} & \text{se } \sum_{i=1}^N |O_i - E_i| \leq 2 \sum_{i=1}^N |O_i - \bar{O}| \\ \frac{2 \sum_{i=1}^N |O_i - \bar{O}|}{\sum_{i=1}^N |O_i - E_i|} - 1 & \text{se } \sum_{i=1}^N |O_i - E_i| > 2 \sum_{i=1}^N |O_i - \bar{O}| \end{cases} \quad (24)$$

Em que O_i são os dados observados, E_i os dados estimados e N é o comprimento da série.

5.6 Curva de permanência

Com o intuito de comparar os resultados do modelo empírico descrito pela Equação 19, o qual propõe estimar uma vazão que pode representar a disponibilidade hídrica integrada, foi determinada a vazão percentil Q_{95} mensal. Isto, devido a que a vazão percentil mensal representa atualmente no gerenciamento hídrico, a disponibilidade hídrica superficial para outorga, contemplando os aspectos da sazonalidade (CRUZ; LOPES, 2007).

Utilizando a série de vazão desde 01/09/2003 a 31/08/2014, foi determinada a vazão Q_{95} mensal, a partir da curva de permanência de vazões mês a mês, usando uma função empírica de probabilidades acumuladas ou percentis (VOGUEL, 1995). Esta função empírica corresponde à equação de Weibull (Equação 25).

O gráfico da curva de permanência das vazões é traçado no eixo das ordenadas pelos valores de vazões, e nas abscissas pela porcentagem de permanência da vazão no tempo (CRUZ, 2011).

$$P_i = \frac{i}{n + 1} \quad (25)$$

Em que i é o número de ordem do $i^{\text{ésimo}}$ valor ordenado de vazão, n é o número de dados ordenados, e P_i é a probabilidade de excedência.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Separação do escoamento de base

Foi determinado o escoamento de base (Q_b) e o escoamento direto (Q_s), por meio da separação do hidrograma dos dados de vazão (Q_t), no período de 01/09/2003 a 31/08/2014 na BRO.

Aplicando os métodos mencionados de separação do hidrograma (item 5.3). Para cada ano hidrológico analisado, foram calculados os volumes e as lâminas d'água escoados na BRO, também o índice de fluxo de base ($IFB\% = Q_b/Q_t$), que indica a parcela de água que o escoamento de base representa na vazão total do rio. Além disso, foram calculadas as porcentagens da precipitação do escoamento de base Q_b/P (%) e do escoamento direto Q_s/P (%). Isto, com o intuito de conhecer a interação entre o aquífero e o rio, e a relação de cada tipo de escoamento com a precipitação.

6.1.1 Filtro de separação Nathan & Mc Mahon

Foi aplicado o filtro de Nathan e McMahon (1990) nos dados de vazão total (Q_t). A série de escoamento de base (Q_b), e da vazão total (Q_t) é apresentada no hidrograma da Figura 22. Foram calculados para toda esta série analisada, valores médios anuais de vazão, volume, lâmina de escoamento de base, índice de fluxo de base (Q_b/Q_t), e a porcentagem do escoamento de base da precipitação (Q_b/P), apresentados na Tabela 2.

Estes resultados indicam a importância do aquífero na vazão do rio. O índice de fluxo de base (Q_b/Q_t) mostrou para todos os anos, que a principal fonte de água do rio é proveniente do aquífero. Isto significa, ainda que não sejam registrados valores altos de precipitação durante um ano hidrológico, o manancial superficial, não se veria afetado imediatamente, já que o aquífero continuaria abastecendo-o. O que indica, existe uma reserva de água subterrânea.

Tabela 2. Resultados do escoamento de base, valores médios anuais, aplicando filtro de Nathan & McMahon (1990)

Ano Hidrológico	Vazão total (Qt)			Escoamento de base (Qb)					Precipitação mm
	m ³ /s	mm	%(Qt/P)	m ³ /s	10 ⁶ m ³	mm	Qb/Qt	%(Qb/P)	
2003-2004	0,67	327	21	0,62	20	303	92	20	1545
2004-2005	0,73	356	25	0,69	22	332	94	23	1444
2005-2006	0,71	347	29	0,67	21	327	94	27	1203
2006-2007	0,80	386	23	0,73	23	352	91	21	1714
2007-2008	0,82	395	29	0,76	24	369	93	27	1356
2008-2009	0,77	373	27	0,71	22	346	92	25	1397
2009-2010	0,93	450	29	0,83	26	404	89	26	1571
2010-2011	1,05	509	28	0,93	29	450	88	25	1817
2011-2012	1,01	491	30	0,92	29	448	91	28	1624
2012-2013	0,90	435	29	0,83	26	403	92	27	1517
2013-2014	0,72	350	31	0,69	22	336	96	30	1137

Figura 22. Separação do hidrograma por meio do filtro de Nathan & McMahon (1990)

Segundo Lucas *et al.* (2015) o valor médio de recarga anual na BRO, é 22% da precipitação. Este valor é próximo à porcentagem anual do escoamento de base da precipitação (Q_b/P), estimado em média para todo o período analisado em 25%. Este resultado é complementar ao índice de fluxo de base, porque permite verificar a importância da

contribuição subterrânea na vazão do rio, e, além disso, indica que é proveniente principalmente da precipitação.

Por outro lado, foram calculados para o escoamento direto (Q_s), valores médios anuais de vazão, volume, lâmina de escoamento direto e porcentagem da P, apresentados na Tabela 3. Estes resultados permitiram verificar que o escoamento direto não contribui significativamente na vazão do rio. Isto porque o valor médio de todo o período analisado de Q_s da precipitação (Q_s/P), foi estimado em 2%.

Tabela 3. Resultados do escoamento direto, valores médios anuais, aplicando filtro de Nathan & McMahon (1990)

Ano Hidrológico	Vazão total (Q_b) m^3/s	Escoamento direto (Q_s)			Precipitação mm
		m^3/s	mm	%(Q_s/P)	
2003-2004	0,67	0,05	25	2	1545
2004-2005	0,73	0,05	24	2	1444
2005-2006	0,71	0,04	20	2	1203
2006-2007	0,80	0,07	34	2	1714
2007-2008	0,82	0,06	27	2	1356
2008-2009	0,77	0,06	27	2	1397
2009-2010	0,93	0,09	45	3	1571
2010-2011	1,05	0,12	59	3	1817
2011-2012	1,01	0,09	44	3	1624
2012-2013	0,90	0,07	32	2	1517
2013-2014	0,72	0,03	14	1	1137

6.1.2 Modelo HYSEP

Com o objetivo de constatar a discussão anterior, foi utilizado o software HYSEP, o qual está baseado nos métodos gráficos de separação do hidrograma, para estimar o escoamento de base (Q_b) e superficial (Q_s) na BRO. Na Figura 23 é apresentada a separação do hidrograma, e na Tabela 4, as informações médias anuais, calculadas para o Q_b .

Tabela 4. Resultados do escoamento de base, valores médios anuais, aplicando software HYSEP

Ano Hidrológico	(Qt)	(Qb)					P mm
	m ³ /s	m ³ /s	10 ⁶ m ³	mm	Qb/Qt	%(Qb/P)	
2003-2004	0,67	0,64	20	311	95	20	1545
2004-2005	0,73	0,70	22	339	95	23	1444
2005-2006	0,71	0,68	21	330	95	27	1203
2006-2007	0,80	0,74	23	360	93	21	1714
2007-2008	0,82	0,77	23	373	94	28	1356
2008-2009	0,77	0,73	24	354	95	25	1397
2009-2010	0,93	0,85	27	411	91	26	1571
2010-2011	1,05	0,97	31	471	92	26	1817
2011-2012	1,01	0,93	29	453	92	28	1624
2012-2013	0,90	0,84	27	409	94	27	1517
2013-2014	0,72	0,70	22	340	97	30	1137

Figura 23. Separação do hidrograma por meio do software HYSEP

Em resumo, os valores anuais do escoamento de base, calculados por meio do software HYSEP, foram calculados em média para todo o período analisado de 01/09/2003 a 31/08/2014, em 0,78 m³/s e o índice de fluxo de base em 94% (Qb/Qt). Isto permitiu reforçar as conclusões obtidas a partir dos valores de Qb estimados pelo filtro de Nathan & McMahon (N&M). Devido

a que os resultados de Q_b/Q_t e Q_b/P continuaram mostrando que a vazão do rio, está conformada principalmente pela componente de escoamento de base.

6.1.3 Análise comparativa dos resultados

Finalmente, foram comparados estes resultados com os trabalhos anteriores na BRO, encontrando a mesma faixa de valores. Segundo Arantes (2003) para o período de 2002 a 2003 usando infiltrômetros, na BRO foi estimada uma vazão de base média anual de 0,61 m³/s correspondente a 33% da precipitação (Q_b/P). Segundo Barreto (2006) a porcentagem Q_b/P foi de 30% para o ano 2005. Segundo Gomes (2008) para o período de 2004 a 2007 a faixa de valores de escoamento direto foi de $1,2\% \leq Q_s/P \leq 3,3\%$ e de $24\% \leq Q_b/P \leq 26\%$ para o escoamento de base. Finalmente, segundo Lucas (2012), para o período de 2008 a 2011, a faixa de valores calculados de escoamento de base foi de $21\% \leq Q_b/P \leq 28\%$ e em relação ao escoamento direto foi de $4\% \leq Q_s/P \leq 5\%$.

Portanto, é possível concluir que existe uma conexão entre os sistemas de água superficial e subterrânea na BRO, e o escoamento direto é pouco significativo. O que indica, existem reservas subterrâneas, devido a que o aquífero está contribuindo de maneira importante na vazão observada no rio, e estas reservas, originam-se principalmente da precipitação.

6.2 Determinação de tempos de resposta na bacia

A seguir serão apresentados os resultados das técnicas de análise de correlação e espectral de Fourier e da transformada contínua Wavelet, a partir das séries temporais registradas no período de 01/09/2003 a 31/08/2014. O sinal de impulso corresponde à precipitação diária e o sinal de resposta corresponde às vazões diárias.

6.2.1 Análise de correlação e análise espectral de Fourier

Segundo Mangin (1984) as periodicidades, associadas às frequências, as quais são possíveis detectar nas análises, estão limitadas por um intervalo. O limite inferior desse intervalo corresponde $2k$ (k =time lag). O limite superior deste intervalo está definido como $n/3$, em que n é o comprimento da série.

Neste trabalho, o valor de n é 4018 dias (11 anos) e o valor do time lag utilizado foi de 1 dia. Portanto, o intervalo de possíveis periodicidades a serem detectadas foi de 2 e 1340 dias. Isto significa, se existir um evento periódico presente na série, superior a esse limite do intervalo, não poderia ser detectado.

I. Séries temporais de precipitação e vazão total

i. Autocorrelação no domínio temporal de Qt

Os resultados da autocorrelação da vazão total são mostrados na Figura 24. O eixo das abscissas mostra a sequência da série analisada em dias, e no eixo das ordenadas o coeficiente de autocorrelação (R_y) da Equação 11.

A princípio, observam-se picos anuais, os quais foram associados com o ciclo anual da precipitação. Por outro lado, a forma do autocorrelograma da Figura 24 é bastante estendida, isso significa que as variâncias decrescem lentamente.

Portanto, este resultado indica, existe um processo inercial (filtragem) relacionado aos dados analisados. Este processo inercial é atribuído ao processo de regulação, realizado pelo aquífero da água armazenada. Simplificadamente o aquífero estaria filtrando o sinal de impulso (precipitação), que posteriormente é liberada ao rio. Este processo de filtragem encontra-se registrado no sinal de resposta (vazão).

O primeiro parâmetro indicador, que permitiria verificar a afirmação realizada anteriormente, é o efeito memória (EM). Este valor foi de 445 dias, determinado a partir do autocorrelograma, correspondente ao coeficiente R_y igual a 0,1 (JIMÉNEZ, 2010).

Segundo Jiménez (2010) um EM para um sistema analisado em torno de 10-20 dias, é considerado pouco ou nada inercial. Um valor em torno a 70-79 dias é um sistema medianamente inercial, e um EM igual ou superior a 96 dias é bastante inercial.

Portanto, este resultado na BRO, manifesta um efeito inercial produzido pelo aquífero nos dados de precipitação, indicando ademais que existe uma importante reserva de água subterrânea.

Figura 24. Autocorrelação R_y da série diária de **vazão total**, para o período de 09/2003 a 08/2014.

ii. Autocorrelação no domínio da frequência de Q_t

No enfoque não paramétrico, a densidade da variância (S_y) da Equação 14, é mostrada na Figura 25. O eixo das abscissas mostra as frequências associadas aos períodos detectados na série temporal analisada. A escala dos dados analisados neste trabalho é diária, portanto, as unidades da frequência são de um ciclo a cada dia (1/dia).

Para conhecer e comparar o comportamento dos aquíferos, complementar à análise temporal, tem-se além do parâmetro do EM, dois parâmetros denominados de frequência de corte (FC) e tempo de regulação (S_o) calculado por meio da Equação 1.

Segundo Mangin (1984) A frequência de corte (FC) permite detectar o último período associado a um evento físico o qual contém informação relevante, é determinado quando o coeficiente S_y é aproximadamente constante. Nos dados de vazão total, a informação da precipitação, encontra-se filtrada em torno de 10 dias, por conseguinte, se for analisado o sistema com uma periodicidade inferior a essa, em teoria não se obterá informação significativa. Este período foi associado com a resposta do escoamento direto como resultado da precipitação.

Também, o tempo de regulação (S_o) (Equação 1) é um indicador sobre a importância das reservas subterrâneas. Isto é, quanto maior for o seu valor, mais importantes estas reservas. Este valor foi determinado em 260 dias. Portanto, verifica-se a afirmação feita a partir do parâmetro de EM do correlograma. Isto é, na BRO o aquífero realiza um efeito inercial, ou efeito amortecedor nos dados da precipitação, permitindo concluir que existe uma reserva importante de água subterrânea.

Figura 25. Espectro simples S_y , da série diária de **vazão total**, para o período de 09/2003 a 08/2014.

Por outro lado, foi possível constatar a sazonalidade na vazão, devido a que um dos maiores picos do espectro foi detectado na frequência de 0,00282 (1/dia), correspondente a um período de 354 dias, associado ao ciclo anual da precipitação (CAP).

Além disso, detectaram-se componentes periódicas em frequências menores de 0,0081 e 0,00548 (1/dia), ou seja, picos menores do espectro com períodos de 123 e 181 dias. Esse ciclo relacionou-se com a variabilidade temporal, ou sazonalidade de períodos mais chuvosos e mais secos (S).

iii. Correlação cruzada no domínio temporal da P e Qt

O resultado da correlação cruzada da precipitação e vazão é apresentado na Figura 26. No eixo das abscissas observa-se a sequência da série analisada em dias, e no eixo das ordenadas observa-se o coeficiente de correlação cruzada R_{xy} (Equação 13).

A análise de correlação simples é complementar à análise cruzada, considerando uma das séries hidrológicas (precipitação) a causa de outra (vazão). Portanto, o correlograma cruzado representa a resposta impulsionada do sistema (JIMÉNEZ; NAVARRO, 2012).

Figura 26. Correlação cruzada R_{xy} dos dados diários de precipitação e **vazão total**, para o período de 09/2003 a 08/2014.

O R_{xy} apresentou valores máximos de coeficiente de correlação de 0,297 e um correlograma estendido. Isso sugere uma transmissão lenta do sinal de impulso, ou seja, um sistema inercial. Além disso, observaram-se picos associados aos ciclos anual da precipitação, e de períodos mais chuvosos e secos. Isto foi inferido devido às declividades observadas no correlograma indicadas na Figura 26. As declividades negativas indicam a transição do ciclo de períodos chuvosos a secos, e consequentemente as positivas indicam o processo contrário, isto é, de períodos secos a chuvosos (JIMÉNEZ; NAVARRO, 2012).

iv. Correlação cruzada no domínio da frequência da P e Q_t

O espectro cruzado S_{xy} da precipitação e vazão é mostrado na Figura 27. O eixo das abcissas mostra as frequências associadas aos períodos detectados (1/dia), o eixo das ordenadas mostra o coeficiente do espectro cruzado S_{xy} (Equação 13). É observada uma amplificação do sinal de impulso para frequências baixas, isto significa, potências fortes do espectro foram detectadas em frequências menores a 0,005 (1/dia). Estas potências indicam a presença ou intensidade das frequências encontradas no espectro.

A potência maior foi encontrada em 0,00274 (1/dia) que corresponde a 365 dias, e foi atribuída ao ciclo anual da precipitação.

Figura 27. Espectro cruzado S_{xy} dos dados de precipitação e **vazão total**, para o período 09/2003 a 08/2014.

Também foi possível detectar outros picos de potências fortes no espectro cruzado em torno de 0,00129 a 0,00106 (1/dia) correspondentes aos períodos de 2,1 e 2,6 anos. Estes períodos foram associados ao tempo de resposta do escoamento de base, resposta atribuída ao tempo de regulação do aquífero (TRa).

Outras potências de 0,00821 e 0,00552 (1/dia), ou seja, períodos de 121 e 181 dias, foram encontradas no espectro cruzada e associadas com o ciclo de sazonalidade de períodos mais chuvosos e mais secos (S). Além disso, foram detectados picos de frequências de 0,0175 a 0,0212 (1/dia), períodos de 47-57 dias, atribuídos ao tempo de resposta do escoamento subsuperficial (TRss) como resultado da precipitação.

Finalmente, a frequência de corte (FC) foi determinada em torno de 0,15 1/dia, período de 7 dias, associada com a resposta do escoamento direto.

II. Séries temporais de precipitação e escoamento de base

i. Autocorrelação no domínio temporal de Q_b

Os resultados da autocorrelação R_y (Equação 11) do escoamento de base são mostrados na Figura 28. Em comparação com os resultados de autocorrelação de vazão total, a forma do autocorrelograma do escoamento de base é mais estendida. Isto, em conjunto com o EM determinado em 792 dias (2 anos) além de verificar o processo inercial pelo aquífero, e a

importância das reservas subterrâneas, permitem constatar que existe uma memória nos dados associados a baixas frequências, relacionadas ao tempo de regulação do aquífero (TRa).

Também, é possível concluir que o escoamento de base, está influenciado pela sazonalidade, devido a que novamente foram observados picos no autocorrelograma associados aos ciclos anuais e de períodos mais chuvosos e secos.

Figura 28. Autocorrelação R_y , da série diária de **escoamento de base**, para o período de 09/2003 a 08/2014.

ii. Autocorrelação no domínio da frequência de Q_b

No enfoque não paramétrico, a densidade da variância S_{xy} (Equação 16) da série de escoamento de base, é mostrada na Figura 29.

Neste caso, só foram detectadas potências relacionadas às frequências baixas ($<0,03$), isto significa, períodos maiores. A potência mais forte do espectro correspondeu a o período de 370 dias (0,0027 1/dia).

A frequência de corte indicou o menor período associado ao sistema da precipitação e o escoamento de base observado. Este valor foi encontrado no espectro em 0,017 1/dia, portanto, a informação da precipitação encontra-se filtrada em 59 dias. Esse tempo de resposta foi associado com o escoamento subsuperficial (TRss).

Figura 29. Espectro simples S_y da série de **escoamento de base**, para o período de 09/2003 a 08/2014.

Além do parâmetro indicador do tempo de regulação (S_o) de 742 dias (2 anos). Encontraram-se componentes de frequências baixas de 0,00129 e 0,00106 (1/dia) que correspondem a 2,1 e 2,6 anos. Isto reforça o enunciado sobre o tempo de resposta do escoamento de base, o qual está associado com as baixas frequências e ao tempo de regulação do aquífero (TRa).

Cabe mencionar, que existe analogia entre o parâmetro S_o e o TRa. Esta relação dá-se devido a que as duas variáveis estão associadas à informação de frequências baixas, e, consequentemente com o tempo de resposta lento do aquífero, em resposta às precipitações. No entanto, o S_o é considerado por Mangin (1984), um parâmetro indicador da importância das reservas subterrâneas, e a diferença com os períodos detectados no espectro, este indicador não necessariamente prove informação quantitativa.

iii. Correlação cruzada no tempo da P e Qb

O resultado da correlação cruzada da precipitação e vazão de base é mostrado na Figura 30. O R_{xy} (Equação 13) apresentou o valor máximo de coeficiente de correlação de 0,128. Segundo Jiménez (2010) valores pequenos sugerem uma transmissão lenta do sinal de impulso. Também se observaram claramente picos no correlograma, associados a eventos sazonais.

Figura 30. Correlação cruzada R_{xy} , dos dados de precipitação e **escoamento de base**, para o período de 09/2003 a 08/2014.

iv. Correlação cruzada na frequência da P e Q_b

O espectro cruzado S_{xy} (Equação 16) da precipitação e escoamento de base é mostrado na Figura 31. Este espectro mostrou características semelhantes ao espectro da Figura 29. O qual permite verificar, a existência de fenômenos físicos sazonais relacionados ao sistema analisado. E tempos de resposta do aquífero (lento e rápido) como resultado da precipitação.

Figura 31. Espectro cruzado S_{xy} dos dados de precipitação e **escoamento de base**, para o período de 09/2003 a 08/2014.

Estes tempos de resposta do aquífero dependem da zona na qual a precipitação infiltrada permaneceu. A resposta lenta está relacionada com o armazenamento da zona saturada e a resposta rápida está relacionada com o armazenamento da zona água-solo (Figura 4). Isto significa que após um evento de precipitação, parte desta precipitação infiltrada permanece na zona água-solo (escoamento subsuperficial), e o restante recarrega o aquífero (zona saturada).

Esta precipitação infiltrada irá contribuir no escoamento de base do rio, desde um tempo de resposta rápido ($TR_{ss}=60$ dias) até um tempo de resposta lento ($TR_a=2$ anos).

III. Séries temporais de precipitação e escoamento direto

i. Autocorrelação no domínio temporal de Q_s

Os resultados da autocorrelação R_y (Equação 11) do escoamento direto são mostrados na Figura 32. A forma do autocorrelograma é muito mais tênue em comparação com os correlogramas da vazão total e do escoamento de base. Isto significa, o processo relacionado com os dados analisados é pouco ou nada inercial. Neste caso, por serem analisados dados de escoamento direto não é verificado o controle pelo aquífero.

Figura 32. Autocorrelação R_y da série diária de **escoamento direto**, para o período de 09/2003 a 08/2014.

O efeito memória (EM) foi de 8 dias, determinado a partir do autocorrelograma para o coeficiente R_y igual a 0,1. Este resultado é um indicador que a precipitação não está sendo filtrada. A precipitação está entrando no sistema e sendo detectada no rio em um tempo curto. Por último, os picos do correlograma mostram a sazonalidade fortemente marcada.

ii. Autocorrelação no domínio da frequência de Qs

No enfoque não paramétrico, a densidade da variância R_{xy} (Equação 13) dos dados de escoamento de base é apresentada na Figura 33.

A frequência de corte ou a faixa do espectro foi de 0,2 (1/dia), indica que a informação da precipitação encontra-se filtrada em 5 dias, por conseguinte, se for analisado o sistema com uma periodicidade inferior a essa, em teoria não será obtida informação significativa. Esse tempo de resposta foi associado com o escoamento direto em relação com a precipitação.

Figura 33. Espectro simples S_y da série diária de **escoamento direto**, para o período de 09/2003 a 08/2014.

Verificando as afirmações feitas no domínio temporal, as frequências relacionadas ao ciclo anual da precipitação ($0,0027$ 1/dia=370 dias) e ao ciclo de períodos mais chuvosos e mais secos ($0,0056$ 1/dia=180 dias) corresponderam às duas maiores potências detectadas no espectro. Além disso, neste caso as frequências maiores encontradas, inferem que existem eventos com periodicidades menores associados ao sistema analisado.

iii. Correlação cruzada no tempo e na frequência da P e Qs

Para concluir os resultados de análise de correlação e espectral de Fourier, foram construídos o correlograma R_{xy} (Figura 34) e o espectro S_{xy} (Figura 35) cruzado da precipitação e escoamento direto. Encontraram-se semelhantes às análises simples realizadas anteriormente. No entanto, o espectro da Figura 35 permite definir mais claramente o tempo de resposta do escoamento direto em 6 dias ($FC=0,163$ 1/dia).

Figura 34. Correlação cruzada R_{xy} dos dados de precipitação e **escoamento direto**, para o período de 09/2003 a 08/2014.

Figura 35. Espectro cruzado S_{xy} dos dados de precipitação e **escoamento direto**, para o período de 09/2003 a 08/2014.

Por último, a Tabela 5 resume os parâmetros indicadores (EM=efeito memória, FC=frequência de corte, S_o =Tempo de regulação) e as principais potências detectadas (Maior potência e outros picos associados com frequências maiores e menores do que aquela frequência associada com o pico espectral maior), definidos nas análises estudadas e associados aos principais eventos físicos na bacia hidrográfica encontrados para cada série hidrológica.

Tabela 5. Resumo análises de correlação e espectral das séries de vazão total, escoamento de base e direto

Análise de Correlação e Análise Espectral Fourier				
	Qt (m^3/s)	Qb (m^3/s)	Qs (m^3/s)	Eventos Associados
EM (dias)	445	792 dias	8 dias	TRa, TRa, TQs
FC (dias)	10	59 dias	5 dias	TQs, TRss, TQs
So (dias)	260	742 dias	-	TRa
Potência Maior	354 dias	370	370	CAP
Potências fortes (Freq. maiores)	123-181 dias	123-180	180	S
Potências fortes (Freq. menores)	2,1-2,6 anos	2,1-2,6 anos	-	TRa

6.2.2 Aplicação da transformada contínua Wavelet

Com a finalidade de avaliar a variabilidade temporal dos dados hidrológicos de precipitação (P), vazão total (Qt), escoamento de base (Qb) e escoamento direto (Qs) da BRO. Foi aplicada a transformada contínua Wavelet (TCW) para cada série temporal de forma independente, e a transformada cruzada de Wavelet (TXW) entre estas séries hidrológicas. Para isto, foi utilizado o software implementado por Grinsted, Moore e Jevrejeva (2004), para construção de cada espectro.

Similarmente à análise de Fourier estudada anteriormente, os espectros de Wavelet de cada variável hidrológica avaliada são semelhantes entre si. Portanto, foram designados como resultados representativos da técnica Wavelet, os espectros construídos para as séries de P e Qt. Os espectros de Qb e Qs são apresentados nos Apêndices B e C (Figuras 61 a 63).

I. Transformada contínua de Wavelet (TCW)

Como resultado da translação da Wavelet mãe ao longo da série, e à exploração das diferentes frequências no sinal analisado a distintas escalas (contrações e dilatações). É construído o espectro da transformada contínua Wavelet.

A Figura 36 apresenta o espectro de (TCW) da P e Qt. O eixo das abcissas corresponde à sequência da série temporal, e o eixo das ordenadas corresponde aos períodos associados com as frequências encontradas nas diferentes escalas analisadas. Segundo Chiann (1997), este período está relacionado com as escalas ($\text{período} = 2^{\text{escala}}$) e depende da frequência da

amostragem. Neste trabalho, a frequência de amostragem é 1/dia, portanto, os períodos são unidades diárias.

A faixa de cores do espectro caracterizam as potências nas diferentes frequências detectadas. Assim, na Figura 36 quanto maior for a presença ou a intensidade desta frequência no sinal, o espectro estará representado pela cor vermelha.

Por último, se observa o “cone de influência”. O qual é produzido pela aplicação da técnica “zero-padding”, para resolver o erro nos extremos das séries, quando são analisadas escalas relacionadas com frequências baixas. Segundo Torrence e Compo (1998), devido a estes efeitos de borda, os resultados dentro do cone de influência, não são considerados confiáveis. Portanto, estes valores, não foram utilizados para extrair resultados da série temporal.

Figura 36. Transformada contínua Wavelet dos dados diários de precipitação e **vazão total**, para o período de 09/2003 a 08/2014.

i. Série de Precipitação (P)

O espectro da TCW da série de precipitação da Figura 36 mostrou potências fortes ao longo de toda a série, em torno de 384 dias (aproximadamente 1 ano). Indicando a existência de uma tendência física associada a esta periodicidade.

Além disso, para certos períodos de tempo da série analisada, o espectro indicou eventos importantes de precipitação, em períodos inferiores à componente anual. A título de exemplo, na Figura 33 é indicado, entre o período de julho de 2010 a novembro de 2011, potências fortes em períodos menores a 512 dias. Este ano hidrológico (09/2010 - 08/2011), registrou uma precipitação anual de 1817 mm. Foi possível verificar esta informação, devido a que no ano hidrológico de 2010 foi registrada, a maior precipitação de toda a série analisada.

Por último, de maneira oposta, o ano hidrológico 2013 registrou uma precipitação anual de 1137 mm, esta foi a menor precipitação anual de toda a série. Esta ocorrência, também foi detectada no espectro, mostrando notoriamente, uma diminuição da presença destas frequências maiores.

ii. Série de vazão total (Qt)

O espectro da TCW da série de vazão total da Figura 36 indicou que no sinal de resposta (Qt) existem principalmente duas tendências ou eventos físicos relacionados com estes dados.

A primeira delas, e segundo a discussão dos resultados do espectro da P, é a tendência anual da precipitação, devido à potência forte detectada em torno de 384 dias, ao longo de toda a série de Qt. Por outro lado, segundo a discussão dos resultados obtidos aplicando a correlação e o espectro de Fourier. Infere-se, que a segunda potência forte do espectro, em torno de 768 dias (aproximadamente 2 anos), é devida à regulação de água pelo aquífero.

Esta afirmação pode ser constatada, a partir da filtragem das frequências altas do sinal de impulso (P), no espectro de Qt, como indicado na Figura 36. Isto é, as potências fortes observadas no espectro de P, não são visíveis no espectro de Qt. Isto significa que existe um processo amortecedor pelo aquífero (regulador) das precipitações.

Finalmente, para confirmar esta filtragem mencionada, foi analisado o espectro do escoamento direto (Qs) apresentado na Figura 37. O espectro de Qs é similar com o espectro de P. Ou seja, apresenta características semelhantes mostrando além da tendência do ciclo anual da precipitação, potências fortes para frequências altas na série.

Isto significa, não existe um processo de filtragem do sinal de precipitação, sendo esta detectada em períodos menores na vazão do rio. Isto também pode ser constatado, pela diferença dos espectros de Qt (Figuras 36) e Qb (Figura 61 do Apêndice B) com o espectro de

Qs (Figura 37). No espectro de Qs não é verificado o controle pelo aquífero, devido a que não apresenta potências fortes associadas às frequências baixas.

Figura 37. Transformada contínua Wavelet das séries de precipitação e **escoamento direto**, para o período de 09/2003 a 08/2014.

II. Transformada cruzada de Wavelet (TXW)

O espectro da transformada cruzada Wavelet (TXW) das séries de P e Qt é mostrado na Figura 38. A diferença com o espectro de TCW, o espectro da TXW inclui na análise, os ângulos de fase $\varphi_t(s)$ entre as duas séries. Este ângulo é o resultado do produto da TCW do sinal de impulso (P) pelo complexo conjugado da CWT do sinal de resposta (Qt), e permite determinar o atraso temporal (ΔT) entre as duas séries (Equação 6), para um período específico T(s). Neste caso, o T(s) da Equação x foi definido em 365 dias, por ser a tendência relacionada com o sinal de impulso analisado (ciclo anual da precipitação).

Figura 38. Transformada cruzada de Wavelet dos dados diários de precipitação e vazão total, para o período de 09/2003 a 08/2014.

Portanto, o espectro TXW além de verificar as conclusões feitas a partir da TCW de cada série, permitiu calcular a variabilidade temporal entre o sinal de impulso (P) e resposta (Q_t , Q_b e Q_s). Ou seja, o tempo de resposta de cada componente da vazão do rio como resultado da precipitação anual.

O ângulo de fase $\varphi_t(s)$ entre as duas séries está representado pelas setas indicadas na Figura 38. Estas setas permitem obter informação sobre o sentido do processo. Isto é, permitem identificar o sinal de impulso e de resposta entre as séries analisadas. Quando as setas estão apontadas para baixo e para a direita, indicam que a série x_t conduz y_t (Equações 2 a 5) e que estão em fase. Isto é, as frequências máximas da série x_t estão relacionadas com as frequências máximas da segunda série analisada y_t (GRINSTED; MOORE; JEVREJEVA, 2004).

Neste caso, foi verificado o sentido do processo analisado, segundo a direção das setas geradas a partir da TXW. Isto significa, a vazão do rio está sendo uma consequência dos eventos de precipitação.

Foi estimado o atraso temporal (ΔT) para as séries de P e Qt, aplicando a Equação 6. O período T(s) foi definido em 365 dias. O ângulo de fase $\varphi_t(s)$ foi definido como o valor médio de todos os ângulos gerados para este período anual, em 61,88°. Os ângulos foram medidos utilizando AutoCAD. Cabe salientar, que os ângulos foram medidos em graus, portanto, neste caso 2π igual a 360°.

$$\text{Qt (Figura 38)} \quad \Delta T = T(s) * \frac{\varphi_t(s)}{2\pi} = 365 * \frac{61,88}{360} = 62,74 \cong 63 \text{ dias}$$

O atraso temporal (ΔT), também foi determinado para os dados de P e Qb, e para os dados de P e Qs, a partir dos espectros de TXW, apresentados nas Figuras 59 e 60 nos Apêndices B e C.

$$\text{Qb (Figura 62)} \quad \Delta T = T(s) * \frac{\varphi_t(s)}{2\pi} = 365 * \frac{76,32}{360} = 77,38 \cong 77 \text{ dias}$$

$$\text{Qs (Figura 63)} \quad \Delta T = T(s) * \frac{\varphi_t(s)}{2\pi} = 365 * \frac{9,18}{360} = 9,31 \cong 9 \text{ dias}$$

O atraso temporal corresponde à variabilidade temporal entre o sinal de impulso e o sinal de resposta. Isto é, o tempo de resposta do impulso analisado. No caso avaliado de P e Qt, infere-se que em 60 dias, é detectado um impulso da precipitação na vazão do rio. No entanto, só com essa informação de P e Qt, não seria possível conhecer com precisão a procedência deste impulso. Isto, devido a que na vazão total de rio está contemplada tanto a componente superficial, quanto a contribuição do aquífero. Por conseguinte, foram analisados os atrasos temporais calculados para P e Qb, e para P e Qs.

A partir do ΔT para P e Qb, foi possível complementar o resultado discutido anteriormente. Isto é, em torno de 70 dias é detectado um impulso da precipitação no rio, proveniente do aquífero. Este impulso em 70 dias corresponde à resposta rápida do aquífero, proveniente do escoamento subsuperficial. Isto, porque também foi verificado um tempo de resposta lento (tempo de regulação) do aquífero, correspondente ao escoamento de base. Esta última verificação foi feita por meio das potências fortes detectadas em torno de 800 dias (aproximadamente 2 anos) nas Figura 61 e 62 do Apêndice B.

Por último, a partir do ΔT para P e Qs, foi verificado o tempo de resposta mais rápido da precipitação, detectado na vazão do rio. Isto é, após um evento de precipitação na bacia hidrográfica, em 9 dias, parte desta precipitação irá contribuir superficialmente na vazão do rio.

Em relação à precipitação infiltrada, irá contribuir no escoamento de base do rio, desde um tempo de resposta rápido (70 dias) até um tempo de resposta lento (2 anos).

6.2.3 Análise comparativa das duas técnicas e conclusões dos tempos de resposta

A partir da discussão dos resultados da separação do escoamento de base (item 6.1), foi concluído que existem reservas subterrâneas provenientes principalmente da precipitação.

Portanto, foram analisadas séries históricas de precipitação (P), vazão total (Qt), escoamento de base (Qb) e escoamento direto (Qs) usando a análise de correlação e espectral de Fourier e a transformada contínua Wavelet. Isto, com o intuito de determinar a relação entre estas variáveis, estimando os tempos de resposta de cada tipo de escoamento observado no rio, após eventos ocorridos de precipitação.

Os resultados da análise de correlação e espectral de Fourier, e transformada Wavelet permitiram verificar, a sazonalidade presente nos dados hidrológicos. Isto é, durante toda a série de estudo e todas as análises realizadas, sempre foi detectada uma potência forte na frequência associada ao ciclo anual da precipitação. Além disso, foi possível determinar o ciclo de variabilidade de períodos chuvosos e secos em uma faixa de 4 a 6 meses. Isto significa, os primeiros 6 meses correspondem a períodos mais chuvosos, alternando os últimos 6 meses com períodos mais secos.

Por outro lado, estas técnicas permitiram constatar a existência de reservas importantes de água subterrânea. A Tabela 6 apresenta um resumo dos tempos de resposta encontrados, a partir das duas técnicas utilizadas, os quais relacionam a precipitação com cada componente da vazão observada do rio (Qb e Qs). Cabe salientar, que o tempo de resposta do escoamento subsuperficial (TRss) foi determinado como um valor médio de todos os TRss calculados a partir das duas técnicas (64 dias), por tanto, foi aproximado em 60 dias.

Tabela 6. Resumo dos tempos de resposta dos tipos de escoamento observados no rio, em relação à precipitação.

Tempos de cada tipo de escoamento como resposta à precipitação	
Esc. Direto (TQs)	9 dias
Esc. Subsuperficial (TRss)	60 dias
Esc. De base (TRa)	2 anos

Os resultados indicam que o aquífero armazena a água precipitada e controla o fluxo para o rio, com tempos de regulação de aproximadamente 60 dias para o escoamento subsuperficial e de aproximadamente 2 anos para o escoamento de base.

6.3 Curva de permanência

As Figuras 39, 40 e 41 apresentam as curvas empíricas de permanência, construídas mês a mês, a partir dos dados de vazão média diária na BRO, no período de 01/09/2003 a 31/08/2014. Cada curva empírica foi construída, com o objetivo de comparar com os resultados da previsão da disponibilidade hídrica integrada, calculada pelo modelo empírico linear proposto.

Figura 39. Curva de permanência para os meses de setembro, outubro, novembro e dezembro, no período de 01/09/2003 a 31/08/2014.

As curvas de permanência de cada mês permitiram determinar a previsão da disponibilidade hídrica na BRO para o ano hidrológico de 09/2014 a 08/2015. Esta disponibilidade está representada pela vazão percentil Q95 mensal, apresentada na Tabela 7. Estes valores correspondem à vazão mínima de cada mês ocorrida durante o 95% do tempo para todo o período analisado.

Figura 40. Curva de permanência para os meses de janeiro, fevereiro, março e abril, no período de 01/09/2003 a 31/08/2014.

Figura 41. Curva de permanência para os meses maio, junho, julho e agosto, no período de 01/09/2003 a 31/08/2014.

Tabela 7. Vazão Q_{95} mensal que representa a disponibilidade hídrica superficial, para o ano hidrológico 09/2014 a 08/2015, a partir das curvas de permanência mês a mês. Vazão em (m^3/s)

Mês	Q95
Setembro	0,57
Outubro	0,56
Novembro	0,56
Dezembro	0,59
Janeiro	0,61
Fevereiro	0,69
Março	0,71
Abril	0,69
Maio	0,67
Junho	0,65
Julho	0,63
Agosto	0,60

6.4 Modelo empírico para disponibilidade hídrica integrada (DHI)

Verificada a existência de reservas subterrâneas, provenientes principalmente da precipitação. Foram determinados os tempos aproximados de regulação do aquífero, como resposta aos eventos de precipitação. Com o intuito de verificar estes resultados discutidos nos itens 6.1 e 6.2, foi proposto um modelo empírico linear, para determinar o escoamento de base, em função de eventos históricos de precipitação associados aos tempos de regulação do aquífero.

A seguir são apresentados os resultados do modelo empírico linear proposto (Equação 19). Os dados de entrada e saída do modelo empírico foram definidos na escala mensal, devido ao tempo de resposta (TRss), e, para comparar os resultados do modelo, com as vazões de referência mensais (Q_{95}), geralmente adotadas pela ANA na determinação da disponibilidade hídrica superficial, utilizadas no processo de outorga.

Foi implementado um código com interface gráfica em Matlab, do modelo empírico linear proposto, para a determinação da DHI. O manual da interface é apresentado no Apêndice A. A Figura 42 apresenta os dados analisados de precipitação mensal na BRO, para um período de análise de 11 anos ($n=132$ meses) de setembro de 2003 a agosto de 2014.

Figura 42. Dados de precipitação mensal na BRO, utilizados para aplicar o modelo empírico linear.

6.4.1 Calibração dos parâmetros do modelo empírico

Como foi estudada na metodologia (item 5.5), a Equação 19 determina a disponibilidade hídrica integrada (DHI). O algoritmo 1 permite a obtenção da série de média móvel da precipitação, e o algoritmo 2 permite a obtenção do parâmetro α_k .

$$D(\zeta) = \alpha_k * \overline{P_{TR}}(\zeta) \quad (19)$$

I. Média móvel da precipitação $\overline{P_{TR}}$

A Figura 43 mostra esquematicamente o processo descrito no algoritmo 1. Nesta figura é apresentada a série de média móvel da precipitação, em um instante ζ , correspondente ao tempo de regulação (TRa), utilizando os dados de entrada de precipitação da Figura 42 da BRO. Isto significa que em cada instante ζ , é calculado um Qb proveniente das precipitações desde um instante $\zeta - TR_{ss}$ (tempo de resposta rápido do aquífero), até um instante $\zeta - TR_{ss} - TR_a$ (correspondente ao tempo de resposta lento do aquífero). Portanto, para uma série de precipitação de tamanho n, será possível prever o Qb após um TRss.

A título de exemplo, segundo o esquema da Figura 43 na BRO, a precipitação que recarregou o aquífero em setembro de 2003, continuou contribuindo no Qb observado no rio em outubro de 2005. Isto, devido ao processo de amortecimento do armazenamento subterrâneo controlado pelo aquífero decorrente ao tempo de regulação (TRa). No caso da BRO foi estimado em 2 anos. A Figura 44 apresenta os resultados apresentados da série de média móvel da precipitação.

Figura 43. Esquema do Algoritmo 1, usado para calcular a média móvel da precipitação

Figura 44. Série de precipitação mensal e série de média móvel da precipitação na BRO.

II. *Parâmetro $\alpha\kappa$*

Utilizando a equação 20, foi estimada a série de razão apresentada na Figura 45. A partir dos dados da média móvel e o Q_b estimado pelo filtro de N&M desde o instante $\zeta=0$ a $n=132$ meses.

Figura 45. Séries de média móvel da precipitação, Qb do filtro de Nathan & McMahon e razão de Qb/P_{TRa} necessárias para estimar α_1 , α_2 e α_3 (Equação 20 e 21)

Os valores representativos da porcentagem da precipitação que corresponde ao escoamento de base, de períodos mais chuvosos e mais secos, foram denominados α_2 e α_3 . Estes valores são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Valores calibrados do parâmetro do modelo empírico em relação com a média de longo período de tempo

Valores α	(Adimensional)
α_1	0,22
α_2	0,20
α_3	0,23
Maior $r(j)$	0,25
Menor $r(j)$	0,18

Finalmente, a Figura 46 mostra esquematicamente o processo descrito no algoritmo 2, para calcular α_k em cada instante ζ . Isto, comparando a precipitação observada um instante k com a precipitação média de longo prazo. Por exemplo, o valor de α_k do mês de outubro de 2005 na BRO foi determinado a partir da precipitação observada em agosto de 2005, registrada em 16,1 mm, comparada com a média de longo prazo do mês de agosto registrada em 25 mm. Neste caso, segundo o algoritmo 2 o valor de ε_k é 0,55, portanto, para outubro de 2005 $\alpha_k = \alpha_2 = 0,2$.

Figura 46. Esquema do Algoritmo 2, para determinação de α_{κ} . A linha superior representa a série de precipitação P transladada um instante κ , a qual comparada com a P média de longo prazo, determina a série de α_{κ} , assignando valores de α_1 , α_2 ou α_3 .

Obtidos os valores de α_{κ} e $\overline{P_{\text{TRa}}}$ na BRO, desde $\zeta=0$, correspondente ao mês de outubro de 2005. Foi possível aplicar a equação 19 para determinar a DHI até o mês de outubro de 2014. Isto, devido a que é possível prever o Q_b , até um tempo de resposta ($n+\text{TRss}$) após o último dado registrado (n). Neste trabalho, o último dado de precipitação foi registrado em agosto de 2014 e o valor de TRss foi estimado em 2 meses. Portanto, foi possível determinar o Q_b esperado em outubro de 2014.

6.4.2 Determinação da DHI

Para determinar a DHI, foi usada a Equação 19 e avaliaram-se duas situações. Na primeira, foi utilizado α_{κ} a partir do algoritmo 2. Na segunda situação, α_{κ} foi considerado uma constante igual α_1 . Isto para verificar o grau de influência deste parâmetro no cálculo da vazão modelada. Ou seja, no caso de não contar com dados de precipitação média de longo prazo e simplificar ao máximo o modelo linear proposto, poder estimar o valor de Q_b observado no rio.

I. Situação 1

A Figura 47 apresenta os resultados de Q_b modelado, considerando α_{κ} variável para cada instante de tempo ζ , a partir da precipitação observada um instante κ (Figura 42), como foi descrito no algoritmo 2.

$$D(\zeta) = \alpha_{\kappa} * \overline{P_{24}}(\zeta)$$

Figura 47. Hidrograma da vazão total, escoamento de base estimado pelo filtro de Nathan & McMahon e escoamento de base estimado pelo modelo empírico linear, avaliando a situação 1, na BRO para o período de 09/2003 a 08/2014.

Os resultados da Figura 47 indicam que o parâmetro $\alpha\kappa$ permite conhecer a resposta impulsionada do sistema. Indicando a variação da resposta do escoamento de base de acordo com as precipitações de cada mês. Isto significa que $\alpha\kappa$ permite adaptar a curva de Q_b à forma da curva do hidrograma, principalmente aos picos provenientes das precipitações mais intensas. Além disso, é possível afirmar, que visualmente tem uma boa aproximação ao Q_b observado e que o risco de calcular vazões maiores às observadas é pequeno, devido a que na maior parte do tempo Q_b modelado não supera Q_b observado.

II. Situação 2

A Figura 48 apresenta os resultados da segunda situação avaliada, na qual, foi considerando $\alpha\kappa = \alpha 1$. Isto significa que não é necessário conhecer a média de longo prazo da precipitação para cada mês. Portanto, estaria sendo avaliada a forma mais simples do modelo evitando usar o algoritmo 2.

$$D(\zeta) = 0,22 * \overline{P_{24}}(\zeta)$$

Figura 48. Hidrograma da vazão total, escoamento de base estimado pelo filtro de Nathan & McMahon e escoamento de base estimado pelo modelo empírico linear, avaliando a situação 2, na BRO para o período de 09/2003 a 08/2014.

É possível afirmar a partir dos resultados da Figura 48 que o Qb modelado visualmente tem uma melhor aproximação ao Qb observado, em comparação com os resultados da primeira situação estudada. Além disso, na maior parte do tempo o Qb modelado também não superou o Qb observado.

Ademais, estes resultados indicam que não é relevante conhecer a resposta impulsionada do sistema de curto prazo, para determinar o escoamento de base. Ou seja, é possível concluir, que o fator importante na determinação do escoamento de base é a média móvel da precipitação e não αK . Esta precipitação média mês a mês está renovando-se e liberando ao rio uma fração aproximadamente a 20%. Sendo este resultado concordante com o valor do escoamento de base estimado em 25% da precipitação média anual, discutido no item 6.1 deste trabalho.

III. Ajuste do modelo

A Tabela 9 apresenta os resultados das métricas estatísticas, usadas para avaliar os resultados do modelo empírico linear. Foi calculado o índice refinado de concordância (dr) (Equação 24), o erro absoluto médio (EAM) (Equação 22) e o erro relativo médio (ERM) (Equação 23). Estes resultados foram comparados com os valores do escoamento de base mensais determinado pelo filtro de Nathan e McMahon (1990) e são apresentados na Figura 49.

Figura 49. Comparação do escoamento de base do filtro de Nathan e McMahon, com os escoamentos de base do modelo empírico para cada situação, na BRO para o período de 09/2003 a 08/2014.

Tabela 9. Avaliação por meio de métricas estatísticas do modelo para DHI

Situação	dr	ERM	EAM (m ³ /s)
1(α_k)	0,57	0,08	0,06
2($\alpha_k = \alpha_1$)	0,60	0,08	0,05

Embora os valores de Qb observados, não sempre foram menores dos valores modelados indicando certo risco na previsão da disponibilidade hídrica. Os resultados da Tabela 9 indicam que os dados modelados concordam bem com os dados observados na maior parte do tempo ($dr \geq 0,57$), sugerindo confiabilidade na determinação da previsão da disponibilidade hídrica integrada, tanto pela acurácia indicada pelo (dr) quanto pelos valores obtidos de ERM inferiores a 10% em ambas as situações estudadas. Por último, a incerteza da medida determinada pelo EAM encontrou-se entre ($0,045 \leq EAM \leq 0,054$) indicando boa precisão entre os valores de Qb observados e os Qb determinados pelo modelo empírico. Isto significa que a hipótese formulada no início deste trabalho é aceita, fazendo possível a definição do escoamento de base no rio em função da precipitação histórica.

6.4.3 Previsão da disponibilidade hídrica integrada

Como foi estudado, a partir do tempo de resposta rápido do aquífero (precipitações mais recentes), e do tempo de resposta lento do aquífero (precipitações mais antigas). É possível fazer uma previsão da disponibilidade hídrica integrada de águas superficiais e subterrâneas (DHI). Isto, devido a que seria contemplada na vazão determinada no rio, unicamente água contribuída pelo aquífero proveniente do escoamento subsuperficial e do escoamento de base. O alcance desta previsão está controlado pelo tempo de resposta rápido do aquífero (TRss).

No que se refere à disponibilidade hídrica superficial, a ANA tem adotado principalmente como vazão de referência a Q95 mensal com o intuito de permitir uma demanda maior nos meses mais úmidos e restringindo mais nos meses mais secos (Ana, 2014b). Portanto, foram calculados estes valores de Q95 mensais para previsão da disponibilidade hídrica, do ano hidrológico de setembro de 2014 a agosto de 2015. A partir das curvas de permanência para cada mês apresentadas no item 6.3 deste trabalho, usando a série de dados de vazão na BRO de 01/09/2003 a 31/08/2014. Isto, com o intuito de comparar os resultados do modelo empírico, com os resultados das vazões percentis Q95 mensais.

Para tal fim, foi necessário acrescentar à série de precipitações mostrada na Figura 50, os valores de precipitações do período de setembro de 2014 a junho de 2015 apresentadas na Figura 42.

Figura 50. Precipitação mensal na BRO do período de 09/2014 a 06/2015.

A Figura 51 e a Tabela 10 apresentam os resultados de Q95 mensal prevista para o ano hidrológico de 2014 na BRO, a partir dos últimos 11 anos de vazão registrada. Também, os resultados do modelo empírico considerando as duas situações estudadas anteriormente,

utilizando precipitações históricas até o mês de junho de 2015. Estes valores foram comparados com o Qb estimado pelo filtro de N&M, e os resultados das métricas estatísticas calculadas estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 10. Valores de previsão de escoamento de base para disponibilidade hídrica para o ano hidrológico 09/2014 a 08/2015

	Qb $(m^3/s/mês)$			Q ₉₅
	Qb Filtro N&M	$D(\zeta)=\alpha_k \overline{P_{24}}$	$D(\zeta)=0,22\overline{P_{24}}$	
Set/14	0,58	0,56	0,62	0,57
Out/14	0,62	0,56	0,62	0,56
Nov./14	0,63	0,64	0,62	0,56
Dez/14	0,63	0,54	0,60	0,59
Jan/15	0,62	0,62	0,62	0,61
Fev/15	0,62	0,61	0,61	0,69
Mar/15	0,61	0,52	0,58	0,71
Abr/15	0,60	0,62	0,60	0,69
Mai/15	0,59	0,63	0,61	0,67
Jun/15	0,58	0,54	0,60	0,65
Jul/15	0,58	0,61	0,59	0,63
Ago/15	0,62	0,52	0,58	0,60

Figura 51. Previsão da disponibilidade hídrica na BRO para o ano hidrológico de 09/2014 a 08/2015, utilizando as curvas de permanência de cada mês e o modelo empírico linear.

Tabela 11. Avaliação por meio de métricas estatísticas do modelo empírico para DHI e da Q95 mensal, estes resultados foram comparados com o Qb calculado pelo filtro de N&M

Situação	dr	ERM	EAM (m ³ /s)
1(α_k)	-0,3	0,07	0,04
2($\alpha_k=\alpha_1$)	0,45	0,03	0,02
Q ₉₅	-0,42	0,09	0,05

Os resultados da Tabela 11 indicam que os dados modelados a partir da curva empírica de permanência tem um bom ajuste, permitindo verificar mais uma vez, a condição de estacionariedade da série temporal de vazões (Haan, 1977), contemplada na previsão deste valor (Q95%) a partir da curva de permanência.

É possível concluir também, que os resultados modelados a partir da Equação 19 concordam tão bem quanto as vazões Q95 com o Qb observado no rio (filtro de N&M). Isto, porque os valores das métricas estatísticas (dr, ERM e EAM) das duas situações modeladas são próximos aos resultados do ajuste das vazões Q95 mensais.

Todavia, os resultados da segunda situação modelada para DHI, mostram um comportamento mais conveniente do que a Q₉₅. Isto, porque o dr indica que a acurácia do Qb calculado pelo modelo empírico não é superior do que o Qb observado na maior parte do tempo avaliado. Isso significa que o valor de Qb do modelo empírico seria mais adequado no momento de prever uma vazão de referência para outorga do que a vazão Q₉₅. Isto, porque além de aproveitar o excesso de precipitações mais intensas que influenciam na vazão do rio, consegue diminuir o risco contemplado na curva empírica de permanência em períodos de estiagem. (5% de risco de não ocorrência de uma vazão menor à vazão provável Q₉₅).

6.4.4 Análise comparativa das vazões de referência

Segundo Cruz (2007), caracterizar a disponibilidade hídrica é um assunto bastante questionável, devido à limitada representatividade das funções utilizadas para a sua determinação com os processos físicos e ambientais que ocorrem. Tendo como exemplos das funções hidrológicas tradicionais para esta determinação: Hidrogramas que descrevem o seu comportamento no tempo, mas não indicam a probabilidade da sua ocorrência. Curvas de permanência que representam a frequência de ocorrência, mas tem a limitação da falta da representatividade da sequência temporal. Curvas de probabilidades de vazão médias que não

retratam a variação do hidrograma. E curvas de probabilidade de vazões mínimas, que não descrevem como estes valores ocorrem ou variam durante os períodos de recessão (CRUZ; LOPES, 2007).

Portanto, a proposta de usar o modelo empírico linear para determinar a disponibilidade hídrica integrada (DHI) como critério de outorga, busca resolver esses problemas mencionados nesta análise comparativa. Por um lado, procura diminuir o risco de excedência da oferta hídrica representada pela vazão percentil Q_{95} mensal. Por outro lado, evitaria aos gestores dos recursos hídricos calcularem vazões outorgáveis a partir de disponibilidades determinadas de forma separada. Sendo este o problema mencionado no item 3.1 sobre a gestão integrada devido à captação subterrânea, provocando uma diminuição na vazão observada no rio principalmente em períodos de estiagem. Portanto, utilizar o valor da DHI calculado pelo modelo empírico diminuiria o risco de outorgar vazões duas vezes provenientes do mesmo volume de água. Isto, porque a DHI representaria o total da vazão disponível para ser usada como critério de outorga.

Além disso, o modelo empírico permite determinar uma vazão de referência sustentável porque considera a conexão hidráulica aquífero-rio, contemplando os processos físicos e ambientais que atuam neste sistema. Isto significa que o modelo empírico proposto, possibilita prever a variação da vazão de base nos períodos de recessão por estar definida em função de precipitações passadas. Portanto, o modelo empírico além de ser simples, prático e fácil de usar, resultaria em um valor mais concernente com o Q_b observado no rio.

6.5 Avaliação do modelo empírico linear para DHI: Estudo de caso sub-bacias do rio Jacaré-Guaçu (BJG)

Com o intuito de avaliar o modelo empírico linear proposto neste trabalho (Equação 19). Foram analisados dados de precipitação e vazão de duas sub-bacias (Figuras 14 e 15), localizadas na bacia hidrográfica do rio Jacaré Guaçu (BJG), apresentadas no item 5.2.

A sub-bacia 1 corresponde à estação fluviométrica da Fazenda Palmeiras com área de drenagem de 1867 km², analisada para o período de 01/09/1974 a 31/08/2005. A sub-bacia 2 corresponde à estação fluviométrica da Fazenda Boa Vista do Jacaré com área de drenagem de 3519 km², analisada para o período de 01/09/1971 a 31/08/1992.

Para aplicar a Equação 19 do modelo empírico linear, foi necessário determinar o tempo de regulação (TRa) e o tempo de resposta do escoamento subsuperficial (TRss) para cada sub-bacia. Portanto, foi feita a separação do hidrograma (item 5.3) e foram aplicadas as técnicas para determinação de tempos de resposta na bacia (item 5.4). Estes resultados são mostrados nos Apêndices D e E.

6.5.1 Separação do hidrograma e tempos de resposta nas sub-bacias

São apresentadas nesta discussão, as conclusões importantes destes resultados. Na separação do hidrograma, feita aplicando o filtro de Nathan e McMahon (1990) (Figuras 64 e 72 Apêndices D e E). O índice de fluxo de base (Q_b/Q_t) foi calculado em aproximadamente 85% para as duas sub-bacias estudadas. A porcentagem (Q_b/P) na sub-bacia 1 foi de 24%, e na sub-bacia 2 foi de 28%. Por tanto, infere-se que o aquífero está contribuindo de maneira importante na vazão observada no rio.

Os resultados das análises de correlação aplicados às séries de Q_t e Q_b permitiram estimar o efeito memória. Indicando uma capacidade significativa de armazenamento do sistema nas duas sub-bacias. Isto, porque o efeito memória na sub-bacia 1 correspondente à Fazenda Palmeiras (Figuras 65 e 66 do Apêndices D) foi de 93 dias para Q_t e de 108 dias para Q_b . O efeito memória na sub-bacia 2 da Fazenda Boa Vista do Jacaré (Figuras 73 e 74 do Apêndice E) foi de 103 dias para Q_t e de 113 dias para Q_b .

Por outro lado, a partir do espectro da transformada cruzada Wavelet e os resultados das análises espectrais de Fourier, foram definidos os tempos aproximados de regulação (TRa) e (TRss) para cada sub-bacia. Para a estação da Fazenda Palmeiras (Figuras 65 a 72) foram definidos em 2 anos e 60 dias. Para a estação da Fazenda Boa Vista do Jacaré (Figuras 73 a 79) foram definidos em 3 anos e 60 dias. (Tabelas 13 e 14 Apêndices D e E).

6.5.2 Determinação da previsão da DHI nas sub-bacias do rio Jacaré Guaçu

I. Sub-bacia 1: Estação fluviométrica da Fazenda Palmeiras

A Figura 52 apresenta os dados analisados de precipitação mensal da sub-bacia 1 da BJG, para um período de análise de 31 anos (n=372 meses) de setembro de 1974 a agosto de 2005.

Figura 52. Dados mensais de precipitação para a sub-bacia 1, da estação pluviométrica Chibarro, para o período de 09/1974 a 08/2005.

A seguir são apresentados na Figura 53 os resultados do modelo empírico linear, da sub-bacia 1. Aplicando a Equação 19 com $TRa=24$ meses e $TRss=2$ meses para a situação 2 (item 6.4). Isto, porque segundo as métricas estatísticas (Tabela 12), mostrou ter um melhor ajuste com os dados de Q_b observados (estimado pelo filtro de Nathan & McMahon) além de ser a forma mais simples do modelo empírico proposto.

Figura 53. Vazão mensal total da estação fluviométrica da **Fazenda Palmeiras**, escoamento de base estimado pelo filtro de Nathan & McMahon comparado com o escoamento de base estimado pelo modelo empírico. Para o período de 09/1974 a 08/2005.

II. Sub bacia 2: Estação fluviométrica da Fazenda Boa vista do Jacaré

A Figura 54 apresenta os dados analisados de precipitação mensal da sub-bacia 2 da BJJ, para um período de análise de 21 anos (n=252 meses) de setembro de 1971 a agosto de 1992.

Figura 54. Dados mensais de precipitação para a sub-bacia 2, da estação pluviométrica Sítio Esperança, para o período de 09/1971 a 08/1992.

A Figura 55 apresenta os resultados do modelo empírico linear, da sub-bacia 2. Aplicando a Equação 19 com $TRa=36$ meses e $TRss=2$ meses para a situação 2. Também foram calculados os valores do índice refinado de concordância (dr) e os erros médios relativos e absolutos (EMR e ERM) para as duas sub-bacias, e são apresentados na Tabela 12.

$$D(\zeta) = 0,2 * \overline{P_{36}}(\zeta)$$

Figura 55. Vazão total da estação fluviométrica da **Fazenda Boa Vista do Jacaré**, escoamento de base estimado pelo filtro de Nathan & McMahon comparado com o escoamento de base estimado pelo modelo empírico. Para o período de 09/1971 a 08/1992.

Tabela 12. Avaliação do Qb estimado pelo modelo empírico, nas duas sub bacias das estações fluviométricas da fazenda Palmeiras e Boa vista do Jacaré, comparadas com o Qb estimado pelo filtro de N&M

Situação	dr	ERM	EAM (m ³ /s)
Sub bacia 1	0,43	0,1	1,73
Sub bacia 2	0,59	0,12	3,70

Estes resultados do ajuste do modelo, tanto os valores das métricas estatísticas quanto os observados nas Figuras 53 e 55. Permitiram verificar a hipótese formulada no início deste trabalho, e, além disso, verificar as periodicidades e tempos de resposta obtidos a partir dos espectros de Fourier e de Wavelet. Isto significa que o modelo proposto permitiu comprovar que o escoamento de base pode ser definido em função de precipitações passadas, provenientes do armazenamento da zona água-solo (escoamento subsuperficial) e da zona saturada (escoamento de base).

Por outro lado, o modelo linear permitiu fazer uma previsão da disponibilidade hídrica integrada (DHI) na BRO, presumivelmente mais adequada do que a vazão da curva empírica de permanência Q95, devido a que consegue diminuir o risco de excedência, mostrando um melhor ajuste com os valores de Qb observados no rio.

7 CONCLUSÕES

Os valores médios do escoamento de base (Q_b de 0,76 m³/s, lâmina escoada de 370 mm, índice de fluxo de base de 93% e porcentagem da precipitação anual de 25%) do período analisado entre 2003 e 2014 permitiram concluir que existe uma conexão entre os sistemas de água superficial e subterrânea na bacia hidrográfica do Ribeirão da Onça. Também foi concluído que o escoamento direto médio anual é pouco significativo ($Q_s=0,06$ m³/s e 2% da precipitação anual). Portanto, verifica-se que a maior parte da vazão observada do rio, é contribuição de água subterrânea proveniente da precipitação.

Com o intuito de determinar a relação entre a precipitação e a vazão, foram aplicadas duas técnicas para a análise de séries temporais. Estas técnicas caracterizam-se pela utilidade na detecção de tendências e periodicidades associadas a fenômenos climáticos e hidrológicos que ocorrem na bacia. Na bacia hidrográfica do Ribeirão da Onça, detectaram-se ciclos associados com a variabilidade temporal de períodos mais chuvosos e mais secos, na faixa de 4 e 6 meses. Também foram determinados os tempos de cada tipo de escoamento, como resposta à precipitação, em 7 dias para o escoamentos superficial, em 60 dias para o escoamento subsuperficial e em 2 anos para o escoamento subterrâneo.

Sugere-se para trabalhos futuros, aproveitar as técnicas de correlação e espectral de Fourier e a transformada Wavelet, para aplicar e analisar em diferentes zonas, com diferentes características. Isto, para facilitar a obtenção dos tempos de resposta na bacia (TR_a e TR_{ss}), possibilitando a calibração desses valores em função dos parâmetros do aquífero estudado.

Conclui-se que a vazão do modelo empírico linear proposto, constitui uma vazão sustentável, em razão de que inclui a descarga da água subterrânea no rio. Isto está contemplado, na determinação da série de média móvel de precipitação. Ademais, consiste em uma metodologia de fácil determinação, devido a que depois de ter calibrado os parâmetros unicamente precisa de uma série histórica de precipitação para a sua estimativa.

Sugere-se continuar trabalhando conjuntamente o modelo empírico com a estimativa do tempo de regulação. Testando-o em diferentes zonas de estudo e incluindo outros parâmetros para melhorar o seu ajuste, e conseguir remover totalmente o risco de calcular um valor de Q_b superior ao Q_b observado, e aumentar o alcance na previsão da disponibilidade hídrica integrada. Isto significa aprimorar o modelo, para substituir a contribuição do escoamento

subsuperficial (precipitações mais recentes), possibilitando a determinação de Q_b , unicamente com a contribuição das reservas subterrâneas (precipitações mais antigas).

Por último, os resultados do modelo empírico linear proposto verificam a hipótese formulada neste trabalho, constatando as ideias discutidas nos itens 6.1 e 6.2. Isto é, o aquífero controla o fluxo armazenado, proveniente d'água precipitada. Permitindo sustentar uma vazão mínima, apesar de não serem registradas precipitações recentes na bacia. Em conclusão, é possível definir o escoamento de base em função de séries históricas de precipitação.

8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA. **Cadernos de capacitação em recursos hídricos/Outorga de direito de uso de recursos hídricos**. Brasília-DF, 2011. 50 p.

_____. **Disponibilidade E Demandas De Recursos Hídricos No Brasil**. 2005.

_____. **Gestão Integrada De Recursos Hídricos Superficiais E Subterrâneos**: Agência Nacional de Águas, WORKSHOP. Brasília-DF, 2014a.

_____. **Manual De Procedimentos Técnicos E Administrativos De Outorga De Direito De Uso De Recursos Hídricos Da Agência Nacional De Águas**. 2014b.

_____. **Sistema Computacional Para Regionalização De Vazões** Brasília-DF, 2013. 104 p.

ARANTES, E. J. **Emprego De Infiltrômetros Na Caracterização Da Interação Entre Rio E Aquífero**. 2003. f. Mestrado Hidráulica e Saneamento., Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.

BARRETO, C. **Balanço Hídrico Em Zona De Afloramento Do Sistema Aquífero Guarani A Partir De Monitoramento Hidrogeológico Em Bacia Representativa**. 2006. 249 f. Mestrado Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.

BARRETO, C. E.; WENDLAND, E.; GOMES, L.; MARCUSSI, F. A Interação Rio-Aquífero Na Bacia Do Ribeirão Da Onça: Aplicação De Equações Empíricas Para Estimativa Do Escoamento De Base. **Águas Subterrâneas**, 2006.

BEAR, J. **Hydraulics of groundwater** McGraw-Hill International Book Co, 1979. p.

BOUANANP, A.; BABA HAMED, K.; MANW, J.; BENSALAW, M. Le comportement d'un systeme hydrologique en climat méditerranéen par l'analyse corrélatoire et spectrale des débits et des pluies. Cas de trois sous bassins sud-méditerranéens: (oued Sebdou, Moulah et Isser - Tafna - NW Algérie). **REVUE DES SCIENCES DE L'EAU, Rev. Sci. Eau** p. 215-224, 2005.

BOX, G. E. P.; JENKINS, G. M. **Time Series Analysis: Forecasting and Control**. (Most recent edition: Box, G.E.P., Jenkins, G.M., Reinsel, G.C., 2008. **Time Series Analysis: Forecasting and Control**, fourth ed. Wiley, Hoboken, USA, pp. 784). Prentice Hall, Upper Saddle River. ed. USA: 1976. p.

BUDGE, T. J.; SHARP, J. M. Modeling the Usefulness of Spatial Correlation Analysis on Karst Systems. **Ground Water**, v. 47, n. 3, p. 427-437, May-Jun 2009.

CALOW, R. C.; MACDONALD, A.; NICOL, ALAN L ; ROBINS, N. S. Ground Water Security and Drought in Africa: Linking Availability, Access, and Demand. **Ground Water**, v. Vol. 48, No. 2, p. 246–256, 2010.

CAMARA, A. C. F. C. **Análise Da Vazão Máxima Outorgável E Da Introdução Simplificada Da Qualidade Da Água No Processo De Outorga Da Bacia Do Rio Gramame (PB)**. 2003. 219 f. Dissertação Mestrado UFRGS, Porto Alegre.

CASTRO JÚNIOR, P. R. **Mapeamento Morfopedológico Aplicado à Bacia-Piloto do Ribeirão da Onça (SP) e À Bacia-Escola do Rio Cachoeirinha (MT) em Áreas de Recarga do Aquífero Guarani**. Relatório (Pós Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

CHIANN, C. **Análise de ondaletas em séries temporais** 1997. 117 f. (Doutorado). Instituto de Matemática e Estatística Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil

CHOW, V. T. **Applied hydrology**. New york: McGraw-Hill, 1988. 585 p.

COOK, C.; BAKKER, K. Water security: Debating an emerging paradigm. **Global Environmental Change**, v. 22 p. 94–102, 2012.

CRUZ, J. C. **Disponibilidade Hídrica Para Outorga: Avaliação De Aspectos Técnicos E Conceituais**. 2011. 185 f. Doutorado Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul, Porto Alegre, Brasil.

CRUZ, J. C. S., GERALDO LOPES Disponibilidade hídrica para outorga (I): avaliação por seção hidrológica de referência. **REGA** v. Vol. 4, no. 2, , p. 51-64, 2007.

DAVIDS, J. C.; MEHL, S. W. Sustainable Capture: Concepts for Managing Stream-Aquifer Systems. **Groundwater**, v. 53, n. 6, p. 851-858, 2015.

DUVERT, C.; JOURDE, H.; RAIBER, M.; COX, M. E. Correlation and spectral analyses to assess the response of a shallow aquifer to low and high frequency rainfall fluctuations. **Journal of Hydrology**, v. 527, p. 894-907, 8// 2015.

ELOUAZANJ, A.; SAHBI, H.; TABYAOU, F.-Z.; CHADLI, K.; ESSAFFLAOU, A.; EL OUALI, A. apport de l'etude des debits de sources a la reconnalssance hydrogeologique - casdes soljrres ribaa-bittit au piemont moyen atlas-sais (maroc). **Geotnaghreb**, v. 2, p. 37-4.2, 2004.

FOSTER, S.; MACDONALD, A. The ‘water security’ dialogue: why it needs to be better informed about groundwater. **Hydrogeology Journal**, v. 22, p. 1489–1492, 2014.

GARGOUR, C.; GABREA, M.; RAMACHANDRAN, V.; LINA, J.-M. A short introduction to Wavelets and their applications **IEEE Circuits and systems magazine**, p. 12, 2009.

GARGOUR, C. G., MARCEL RAMACHANDRAN, VENKATANARAYANA LINA, JEAN-MARC. A short introduction to Wavelets and their applications **IEEE Circuits and systems magazine**, p. 12, 2009.

GOMES, L. H. **Determinação Da Recarga Profunda Na Bacia-Piloto Do Ribeirão Da Onça Em Zona De Afloramento Do Sistema Aquífero Guarani A Partir De Balanço Hídrico Em Zona Saturada**. 2008. f. Mestrado Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo.

GÓMEZ, D.; GÓMEZ, A. **Separación De Flujo Base En La Cuenca Del Río De Oro En La Estación Conquistador Alto Mediante La Programación De Algoritmos De No**

Linealidad. 2012. f. Escuela De Ingeniería Civil, Universidad Industrial De Santander, Bucaramanga, Colombia.

GÓMEZ, S.; GUZMÁN, J. Separación de flujo base en la cuenca superior del río Lebrija. **Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia, Colombia**, v. 61 p. 41-52, 2011.

GRAPS, A. **An introduction to Wavelets:** IEEE Computational Science and Engineering Sumeer. USA, 1995. 18 p.

GREY, D.; SADOFF, C. W. Sink or Swim? Water security for growth and development. **Water Policy**, v. 9 p. 545–571, 2007.

GRINSTED, A.; MOORE, J. C.; JEVREJEVA, S. Application Of The Cross Wavelet Transform And Wavelet Coherence To Geophysical Time Series. **Nonlinear Processes in Geophysics**, v. 11, p. 561–566, 2004.

GROPPO, J. D.; MORAES, J. M. D.; BEDUSCHI, C. E.; MARTINELLI, L. A. Análise De Séries Temporais De Vazão E Precipitação Em Algumas Bacias Do Estado De São Paulo Com Diferentes Graus De Intervenções Antrópicas. **São Paulo, UNESP, Geociências**, v. 24 n. 2, p. 181-193, 2005.

HAAN, C. T. **Statistical Methods in Hydrology.** The Iowa State University Press. IOWA, 1977. 378 p.

HEALY, R. W. **Estimating Groundwater Recharge.** RU: Cambridge University Press: 2010. 256 p.

HENDERSON, F. M. **Open Channel Flow** NY: Macmillan, 1966. 544 p.

HOFFMANN, R.; VIEIRA, S. **Análise De Regressão: Uma Introdução à Econometria.** São Paulo: Hucitec/Edusp, 1997.

JENKINS, G. M.; WATTS, D. G. **Spectral analysis and its applications** Second ed. San Francisco, California Holden-Day, 1969. p.

JIMÉNEZ GAVILÁN, P. **Caracterización Hidrogeológica De Acuíferos Carbonáticos Del Sur De España A Partir De Sus Respuestas Naturales.** 2010. 388 f. UNIVERSIDAD DE GRANADA.

JIMÉNEZ GAVILÁN, P.; NAVARRO BARTOLOMÉ, A. Estudio comparativo de la respuesta hidrodinámica de varios acuíferos carbonáticos del Sur de España a partir del análisis correlatorio y espectral. **GEOGACETA**, v. 52, p. 133-136, 2012.

KARTHIKEYAN, L.; NAGESH KUMAR, D. Predictability of nonstationary time series using wavelet and EMD based ARMA models. **Journal of Hydrology**, v. 502, n. 0, p. 103-119, 10/10/ 2013.

KENDALL, S. M. **Time-Series.** Second Edition. ed. London: Charles Griffin and Company Limited London and High Wycombe, 1976. p.

LABAT, D.; ABABOU, R.; MANGIN, A. Analyse en ondelettes en hydrologie karstique. 2e partie: analyse en ondelettes croisée pluie-débit. **Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science**, v. 329, n. 12, p. 881-887, 12/30/ 1999a.

_____. Analyse multirésolution croisée de pluies et débits de sources karstiques. **Comptes Rendus Geoscience**, v. 334, n. 8, p. 551-556, // 2002.

LABAT, D.; ABABOU, R.; MANGIN, A. Rainfall–runoff relations for karstic springs. Part II: continuous wavelet and discrete orthogonal multiresolution analyses. **Journal of Hydrology**, v. 238, n. 3–4, p. 149-178, 12/5/ 2000.

_____. Wavelet analysis in karstic hydrology. 1st part: univariate analysis of rainfall rates and karstic spring runoffs. **Comptes Rendus De L Academie Des Sciences Serie Ii Fascicule a-Sciences De La Terre Et Des Planetes**, v. 329, n. 12, p. 873-879, Dec 1999b.

LAROCQUE, M.; MANGIN, A.; RAZACK, M.; BANTON, O. Contribution of Correlation And Spectral Analyses To The Regional Study Of A Karst Aquifer. (Charente, France). **Journal of Hydrology**, v. 205, p. 217–231, 1998.

LEE, J.-Y.; LEE, K.-K. Use Of Hydrologic Time Series Data For Identification Of Recharge Mechanism In A Fractured Bedrock Aquifer System. **Journal of Hydrology**, v. 229, p. 190–201, 2000.

LERNER, D. N. **Surface Water – Groundwater Interactions In The Context Of Groundwater Resources.** : XU, Y.; BEEKMAN, H.E. (Org) (2003). Groundwater recharge estimation in Southern Africa. UNESCO IHP. Series N. 64. Paris., 2003.

LUCAS, M.; OLIVEIRA, P.; MELO, D. D. C. D.; WENDLAND, E. Evaluation of remotely sensed data for estimating recharge to an outcrop zone of the Guarani Aquifer System (South America). **Hydrogeology Journal**, 2015.

LUCAS, M. C. **Influência da precipitação e do uso do solo sobre a taxa de recarga em zona de afloramento do Sistema Aquífero Guarani.** 2012. 155 f. Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.

LYNE, V., AND M. HOLLIICK. **Stochastic time-variable modelling**, I.E. Aust., p. 89-93, Inst. Of Eng, Canberra, 1979.

MACHADO, A. R.; WENDLAND, E.; KRAUSE, P. Hydrologic Simulation for Water Balance Improvement in an Outcrop Area of the Guarani Aquifer System. **Springer International Publishing Switzerland**, p. 20, 2016.

MACHADO, G. **Regionalização De Vazões De Referência Q7,10 E Q90.** 2010. f. Dissertação de Mestrado Engenharia Ambiental, Universidade Federal Do Espírito Santo Centro Tecnológico Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Ambiental, Vitória.

MALDONADO, L. H. **Validação Experimental De Metodologias Para Quantificação Contínua De Vazão No Ribeirão Da Onça.** 2009. f. Mestrado Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo.

MANGIN, A. Pour Une Meilleure Connaissance Des Systeme Hydrologiques A Partir Des Analyses Corre Latoire Et Spectrale. **J. Hydrol.**, v. 67, p. 25–43, 1984.

MATOS, I. D. S. **Aplicação de um Modelo de Balanço Hídrico na Bacia do Rio Jacaré Guacu**. 1987. 189 f. (Dissertação). Hidráulica e Saneamento Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.

MATTOS S, T. **Avaliação do impacto da substituição de pastagem por eucalipto na recarga de aquífero freático** 2015. 130 f. Mestrado Hidráulica e Saneamento Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil.

MC CABE, G. J.; WOLOCK, D. M. Spatial and temporal patterns in conterminous United States streamflow characteristics. **Geophysical Research Letters**, v. 41, p. 6889-6897, 2014.

MELO, D. D. C. W., EDSON GUANABARA, RAFAEL CHAVES. Estimate Of Groundwater Recharge Based On Water Balance In The Unsaturated Soil Zone. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 39, p. 1335-1343, 2015.

MORETTIN, P. A. **Ondas e Ondaletas, Da análise de Fourier à Análise de Ondaletas** São Paulo, SP Brasil: EDUSP, 1999. p.

MORETTIN, P. A. **Ondas e Ondaletas: Da Análise de Fourier à Análise de Ondaletas de Séries Temporais** Segunda. ed. Brasil, SP: 2014. 310 p.

MORETTIN, P. A.; TOLOI, C. M. C. **Análise de Séries Temporais** Segunda Edição ed. São Paulo, SP Brasil 2006. 538 p.

NATHAN, R. J.; MCMAHON, T. A. Evaluation of Automated Techniques For Base Flow and Recession Analyses. **Water Resources Research**, v. 26 p. 1465-1473, 1990.

NERC. **Flood Studies Report**. London: 1975. p.

OLIVEIRA, F. R.; BUENO, F.; LOPES, P. **Panorama Da Gestão Integrada Água Subterrânea/Água Superficial No Brasil** XV Encontro Nacional De Perfuradores De Poços e I Simposio De Hidrogeologia do Sul-Sudeste. 2007.

PADILLA, A.; PULIDO-BOSCH, A. Study Of Hydrographs Of Karstic Aquifers By Means Of Correlation And Cross-Spectral Analysis. **Journal of Hydrology**, v. 168, n. 1–4, p. 73-89, 6// 1995.

POMPÊO, C. A. **Balanço hídrico da zona não saturada do solo na bacia do Ribeirão da Onça (SP)**. 1990. f. Doutorado Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.

RABELO, J. L. **Estudo Da Recarga Do Aquífero Guarani No Sistema Jacaré-Tietê**. 2006. f. Doutorado Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo.

RAO, W.; JIN, K.; JIANG, S.; TAN, H.; HAN, L.; TANG, Q. Chemical and strontium isotopic characteristics of shallow groundwater in the Ordos Desert Plateau, North China:

Implications for the dissolved Sr source and water–rock interactions. **Chemie der Erde - Geochemistry**, v. 75, n. 3, p. 365-374, 10// 2015.

RIBEIRO, A. D. S. **Modelagem chuva-vazão utilizando framework JAMS em área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani** 2012. f. (Mestrado). Engenharia Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP Brasil

SCANLON, B. H., R. COOK, P. . Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. **Hydrogeology Journal**, v. 10 n. 2, p. 347-347, 2002.

SHUMWAY, R. H.; STOFFER, D. S. **Time series analysis and its applications**. Second. ed. United States of America Springer, 2006. p.

SLOTO, R. A.; CROUSE, M. Y. HYSEP: A Computer Program For Streamflow Hydrograph Separation And Analysis. **U.S. GEOLOGICAL SURVEY** v. Water-Resources Investigations Report 96-4040, p. 46, 1996.

TORRENCE, C.; COMPO, G. P. A Practical Guide to Wavelet Analysis. **American Meteorological Society**, v. Vol. 79, No. 1, p. 61-78, 1998.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. Brasil: ABRH de Recursos Hídricos, 2009. 943 p.

_____. **Modelos Hidrológicos**. Porto Alegre: Ed. da Universidade/UFRGS. Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1998. p.

VOGUEL, R. M. F., N. M. Flow duration curves II: A review of applications in water resources planning. **Water Resources Bulletin**, v. 31 N°6, p. 1029-1039, 1995.

WALKER, G. R.; GILFEDDER, M.; DAWES, W. R.; RASSAM, D. W. Predicting Aquifer Response Time for Application in Catchment Modeling. **Groundwater**, v. 53, n. 3, p. 475-484, 2015.

WENDLAND, E.; BARRETO, C.; GOMES, L. H. Water balance in the Guarani Aquifer outcrop zone based on hydrogeologic monitoring. **Journal of Hydrology** v. 342, p. 261–269, 2007.

WENDLAND, E. G., LUIS H. TROEGER, UWE Recharge contribution to the Guarani Aquifer System estimated from the water balance method in a representative watershed. **Anais da Academia Brasileira de Ciências** v. 87 N° 2, p. 595-609, 2015.

WILLMOTT CJ; ROBESON SM; K., M. A refined index of model performance. **International Journal of Climatology**, v. 32, p. 2088–2094, Mar 2012.

WILLMOTT, C. J. J., M. L. . Resolution errors associated with gridded precipitation fields. **International Journal Of Climatology**, v. 25, p. 1957–1963, 2005.

WINTER, T. C.; HARVEY, J. W.; FRANKE, O. L.; ALLEY, W. M. **Ground Water and Surface Water A Single Resource**. Denver, Colorado: U.S. Geological Survey Circular 1139, 1998. p.

YU, H.-L.; LIN, Y.-C. Analysis of space–time non-stationary patterns of rainfall–groundwater interactions by integrating empirical orthogonal function and cross wavelet transform methods. **Journal of Hydrology**, v. 525, n. 0, p. 585-597, 6// 2015.

APÊNDICE A- Manual da interface gráfica do modelo empírico para DHI

Este apêndice apresenta o manual da interface gráfica implementada em GUIDE-MATLAB para determinar a DHI. Foram utilizados como exemplo, os resultados da BRO com uma escala de tempo mensal para o período de 01/09/2003 a 31/08/2014 (132 meses).

Iniciar

Dados

Para começar, o botão de dados aciona dois novos formulários (Figura 56), o primeiro usando 4 caixas permite ingressar o período de tempo (mês inicial, ano inicial, mês final, ano final). O segundo permite selecionar o arquivo de entrada (*.xlsx).

Figura 56. Botão Dados no formulário DHI permite inserir a data e selecionar o arquivo de entrada

Como mostrado no fluxograma , depende do usuário querer calibrar os parâmetros α_1 , α_2 e α_3 no programa (opção 1), ou calcular outros valores (opção 2), para determinar o Q_b das duas situações estudadas no item 6.4.

I. Opção 1

Dados de entrada: neste caso, é necessário inserir três columnas de dados. Precipitação, vazão total e vazão observada no rio, como mostrado na Figura 57.

	A	B	C	D
1	P	Qt	Qb obs.	
2	5.4	0.536857	0.268428	
3	60.5	0.535806	0.288521	
4	225.8	0.562177	0.308056	
5	161.1	0.602529	0.328629	
6	299.4	0.689684	0.352439	
7	260	0.777569	0.381028	
8	69.7	0.721826	0.408679	
9	57.3	0.68145	0.430651	
10	141.5	0.700039	0.450158	
11	37	0.663773	0.467539	
12	56.2	0.651171	0.481784	
13	170.8	0.634494	0.493862	
14	38.9	0.598477	0.503059	
15	125.9	0.612003	0.510723	
16	167.7	0.619863	0.518613	
17	182.5	0.641858	0.527032	
18	542.3	0.936474	0.546692	
19	69	0.766264	0.569543	
20	155.2	0.8266	0.58656	

Figura 57. Arquivo de entrada de dados em formato.xlsx

Situações:

1: É necessário preencher as caixas com a área de drenagem, tempo de resposta (TRss) e tempo de regulação (TRa). Além disso, inserir o erro relativo (ϵ_k) e os valores médios mensais de longo prazo de precipitação para cada mês ($\mu_{k,i}$).

2: Neste caso, basta unicamente preencher as caixas com a área da bacia para conversão de unidades e os tempos de resposta e de regulação.

II. Opção 2

Dados de entrada: neste caso, é necessário inserir duas colunas de dados. Precipitação e vazão total, e seguir as instruções anteriores para cada situação selecionada.

Calcular

Esse botão permite visualizar uma nova região no formulário principal DHI, chamada calibração α e avaliação do ajuste do modelo como mostrado na Figura 58. Também uma região de visualização dos gráficos. Para o exemplo mostrado na figura 58 foi selecionada a opção 1 descrita no fluxograma.

Figura 58. Visualização dos resultados, utilizando o botão Calcular do Formulário DHI.

Exportar

Esse botão permite salvar os resultados em um arquivo (*.xlsx), Figura 59.

Figura 59. O Botão exportar permite salvar os resultados em um novo arquivo xlsx

Sobre

Esse botão permite visualizar as informações dos autores, Figura 60.

Figura 60. O botão Sobre permite visualizar as informações dos autores

Limpar

Esse botão permite começar uma nova tarefa, limpando o formulário principal DHI

Sair

APÊNDICE B- Resultados análise Wavelet das Séries de Qb e P da BRO

Este apêndice apresenta os resultados da transformada contínua (Figura 61) e cruzada (Figura 62) de Wavelet, discutidos no item 6.2.2, dos dados de precipitação e escoamento de base na BRO para o período de setembro de 2003 a agosto de 2014.

Figura 61. Transformada contínua Wavelet da série de precipitação e **escoamento de base** na BRO, para o período de 01/09/2003 a 31/08/2014.

Figura 62. Transformada cruzada Wavelet da série de precipitação e **escoamento de base** na BRO, para o período de 01/09/2003 a 31/08/2014.

APÊNDICE C- Resultados análise Wavelet das Séries de Qs e P da BRO

Este apêndice apresenta os resultados da transformada cruzada de Wavelet (Figura 63), discutidos no item 6.2.2, dos dados de precipitação e escoamento direto na BRO, para o período de setembro de 2003 a agosto de 2014

Figura 63. Transformada cruzada Wavelet da série de precipitação e escoamento direto na BRO, para o período de 01/09/2003 a 31/08/2014.

APÊNDICE D- Resultados da Estação Fluviométrica da Fazenda Palmeiras

Este apêndice apresenta os resultados da sub-bacia da estação fluviométrica da Fazenda Palmeiras, para o período de setembro de 1974 a agosto de 2005, da separação do hidrograma (Figura 64), das análises de correlação e espectrais dos dados de vazão total (Figura 65), escoamento de base (Figura 66) e escoamento direto (Figura 67). Também os resultados da transformada contínua Wavelet dos dados de vazão total (Figura 68) e a transformada cruzada Wavelet dos dados de vazão total (Figura 69), escoamento de base (Figura 70) e escoamento direto (Figura 71). Por último, são apresentados na Tabela 13 os resultados dos atrasos temporais de cada variável apresentada. Estes resultados foram discutidos no item 6.5.1.

I. *Escoamento de base*

Figura 64. Separação do escoamento de base, aplicando o filtro de Nathan & McMahon aos dados de vazão total da estação fluviométrica da Fazenda Palmeiras.

II. Determinação de Tempos de Resposta da sub-bacia 1

Figura 65. Resultados das análises de correlação e análises espectrais simples e cruzadas, usando séries de dados de precipitação e **vazão total**, para o período de 01/09/1974 a 31/08/2005 na Fazenda Palmeiras. Em que R_y é o coeficiente de Autocorrelação, R_{xy} é o coeficiente de correlação cruzada, S_y é o coeficiente do espectro simples e S_{xy} é o coeficiente do espectro cruzado.

Figura 66. Resultados das análises de correlação e análises espectrais simples e cruzadas, usando séries de dados de precipitação e **escoamento de base** para o período de 01/09/1974 a 31/08/2005 na Fazenda Palmeiras. Em que R_y é o coeficiente de Autocorrelação, R_{xy} é o coeficiente de correlação cruzada, S_y é o coeficiente do espectro simples e S_{xy} é o coeficiente do espectro cruzado.

Figura 67. Resultados das análises de correlação e análises espectrais simples e cruzadas, usando séries de dados de precipitação e **escoamento direto** para o período de 01/09/1974 a 31/08/2005 na Fazenda Palmeiras. Em que R_y é o coeficiente de Autocorrelação, R_{xy} é o coeficiente de correlação cruzada, S_y é o coeficiente do espectro simples e S_{xy} é o coeficiente do espectro cruzado.

Figura 68 Transformada contínua Wavelet, dados de **precipitação** e **vazão total** para o período de 01/09/1974 a 31/08/2005

Figura 69. Transformada contínua Wavelet da precipitação e **vazão total** na Fazenda Palmeiras para o período de 01/09/1974 a 31/08/2005

Figura 70. Transformada contínua Wavelet da precipitação e **escoamento de base** na Fazenda Palmeiras para o período de 01/09/1974 a 31/08/2005

Figura 71. Transformada contínua Wavelet da precipitação e escoamento direto na Fazenda Palmeiras para o período de 01/09/1974 a 31/08/2005

Tabela 13. Atraso temporal entre os dados de precipitação e cada tipo de escoamento na sub bacia 1

	Ângulo de fase	Atraso temporal
Q	46,11	47 dias
Qb	62,08	63 dias
Qs	8,4	9 dias

APÊNDICE E-Resultados da Estação Fluviométrica da Fazenda Boa Vista do Jacaré

Este apêndice apresenta os resultados da sub-bacia da estação fluviométrica da Fazenda Boa Vista do Jacaré, para o período de setembro de 1971 a agosto de 1992, da separação do hidrograma (Figura 72), das análises de correlação e espectrais dos dados de vazão total (Figura 73), escoamento de base (Figura 74) e escoamento direto (Figura 75). Também os resultados da transformada contínua Wavelet dos dados de vazão total (Figura 76) e a transformada cruzada Wavelet dos dados de vazão total (Figura 77), escoamento de base (Figura 78) e escoamento direto (Figura 79). Por último, são apresentados na Tabela 14 os resultados dos atrasos temporais de cada variável apresentada. Estes resultados foram discutidos no item 6.5.1.

I. *Escoamento de base*

Figura 72. Separação do escoamento de base, aplicando o filtro de Nathan & McMahon aos dados de vazão total da estação fluviométrica da Fazenda Boa Vista do Jacaré.

II. Determinação de Tempos de Resposta da sub-bacia 2

Figura 73. Resultados das análises de correlação e análises espectrais simples e cruzadas, usando séries de dados de precipitação e **vazão total**, para o período de 01/09/1971 a 31/08/1992 na Fazenda Boa Vista do Jacaré. Em que R_y é o coeficiente de Autocorrelação, R_{xy} é o coeficiente de correlação cruzada, S_y é o coeficiente do espectro simples e S_{xy} é o coeficiente do espectro cruzado.

Figura 74. Resultados das análises de correlação e análises espectrais simples e cruzadas, usando séries de dados de precipitação e **escoamento de base**, para o período de 01/09/1971 a 31/08/1992 na Fazenda Boa Vista do Jacaré. Em que R_y é o coeficiente de Autocorrelação, R_{xy} é o coeficiente de correlação cruzada, S_y é o coeficiente do espectro simples e S_{xy} é o coeficiente do espectro cruzado.

Figura 75. Resultados das análises de correlação e análises espectrais simples e cruzadas, usando séries de dados de precipitação e **escoamento direto**, para o período de 01/09/1971 a 31/08/1992 na Fazenda Boa Vista do Jacaré. Em que R_y é o coeficiente de Autocorrelação, R_{xy} é o coeficiente de correlação cruzada, S_y é o coeficiente do espectro simples e S_{xy} é o coeficiente do espectro cruzado.

Figura 76. Transformada contínua Wavelet, dados de **precipitação** e **vazão total** para o período de 01/09/1971 a 31/08/1992.

Figura 77. Transformada cruzada Wavelet, dados de precipitação e **vazão total** para o período de 01/09/1971 a 31/08/1992.

Figura 78. Transformada cruzada Wavelet, dados de precipitação e **escoamento de base** para o período de 01/09/1971 a 31/08/1992.

Figura 79. Transformada cruzada Wavelet, dados de precipitação e **escoamento direto** para o período de 01/09/1971 a 31/08/1992.

Tabela 14. Atraso temporal entre os dados de precipitação e cada tipo de escoamento na sub-bacia 2

	Ângulo de fase	Atraso temporal
Q	51,83	53 dias
Qb	58,56	60 dias
Qs	13,39	9 dias