

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS  
CÂMPUS DE BOTUCATU

**MODELAGEM DOS NÍVEIS FREÁTICOS DO SISTEMA AQUÍFERO  
BAURU (SAB) EM DIFERENTES USOS DA TERRA NO MUNICÍPIO  
DE ASSIS - SP**

**AIRA NAVA**

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp – Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia (Irrigação e Drenagem).

BOTUCATU – SP  
Junho – 2015

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS  
CÂMPUS DE BOTUCATU

**MODELAGEM DOS NÍVEIS FREÁTICOS DO SISTEMA AQUÍFERO  
BAURU (SAB) EM DIFERENTES USOS DA TERRA NO MUNICÍPIO  
DE ASSIS - SP**

**AIRA NAVA**

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Lilla Manzione

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp – Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia (Irrigação e Drenagem).

BOTUCATU – SP  
Junho – 2015

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - DIRETORIA TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

N316m Nava, Aira, 1988-  
Modelagem dos níveis freáticos do sistema aquífero Bauru (SAB) em diferentes usos da terra no município de Assis - SP / Aira Nava. - Botucatu : [s.n.], 2015  
viii, 71 f. : fots. color., grafcs., ils. color., tabs.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, 2015  
Orientador: Rodrigo Lilla Manzione  
Inclui bibliografia

1. Águas subterrâneas. 2. Análise de séries temporais. 3. Bacias hidrográficas. 4. Ciclo hidrológico. 5. Solo - Uso. I. Manzione, Rodrigo Lilla. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Câmpus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agronômicas. III. Título.



**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO:** MODELAGEM DOS NÍVEIS FREÁTICOS DO SISTEMA AQUÍFERO BAURU (SAB) EM DIFERENTES USOS DA TERRA NO MUNICÍPIO DE ASSIS - SP

**AUTORA:** AIRA NAVA

**ORIENTADOR:** Prof. Dr. RODRIGO LILLA MANZIONE

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE EM AGRONOMIA (IRRIGAÇÃO E DRENAGEM), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. RODRIGO LILLA MANZIONE  
Coordenadoria de Curso / Unidade de Ourinhos

Profa. Dra. CÉLIA REGINA LOPES ZIMBACK  
Dep de Solos e Recursos Ambientais / Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu

Prof. Dr. PAULO MILTON BARBOSA LANDIM  
Dep de Solos e Recursos Ambientais / Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu

Data da realização: 23 de julho de 2015.

*Dedico aos meus pais.*

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Dr. Rodrigo Lilla Manzione, pela paciência e orientação durante este trabalho.

À Prof. Dra. Célia Regina Lopes Zimback, pelo acolhimento junto ao GEPAG.

À minha família por estar sempre presente na minha vida.

Aos meus amigos pelos momentos de felicidade e pelo apoio nos momentos difíceis.

## SUMÁRIO

	<b>Página</b>
LISTA DE FIGURAS .....	VI
LISTA DE TABELAS .....	VIII
RESUMO .....	1
SUMMARY .....	3
1. INTRODUÇÃO .....	5
2. REVISÃO DE LITERATURA .....	7
2.1. Águas subterrâneas .....	7
2.2. Sistema Aquífero Bauru (SAB) .....	10
2.3. Monitoramento como ferramenta de gestão .....	14
2.4. Análise de séries temporais.....	17
2.4.1. Funções de autocorrelação (FAC) e autocorrelação parcial (PFAC).....	18
2.4.2. Processos de funções de transferência de ruído .....	20
3. MATERIAL E MÉTODOS .....	22
3.1. Área de estudo .....	22
3.1.1. Estação Ecológica (EEcoA) e Floresta Estadual de Assis (FEA) .....	22
3.1.2. Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios (APTA).....	24
3.2. Modelagem dos dados .....	25
3.2.1. Modelo PIRFICT.....	25
3.3. Dados de monitoramento .....	29
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	33
4.1. Análise exploratória dos dados .....	33
4.2. Funções de autocorrelação (FAC) e autocorrelação parcial (PFAC).....	38
4.3. Calibração dos dados pelo modelo PIRFICT aos poços da EEcoA e APTA .....	41
4.4. Calibração dos dados pelo modelo PIRFICT aos poços da APTA (baixo), Vêncio e FEA .....	46
4.5. Calibração dos dados pelo modelo PIRFICT aos poços do Ribeirão do Barro Preto entre 2013 e 2015 e análise de tendências nos níveis freáticos .....	51
5. CONCLUSÕES.....	54
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	56

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Perfil hidrológico do Estado de São Paulo..	9
<b>Figura 2:</b> Delimitação do Sistema Aquífero Bauró (SAB) com base no mapa geológico do Estado de São Paulo - CPRM/ SGB..	11
<b>Figura 3:</b> Quadro estratigráfico do Grupo Bauró.	12
<b>Figura 4:</b> Representação modelos abordados.	16
<b>Figura 5:</b> Representação esquemática de um modelo de transferência com um ruído adicionado.	20
<b>Figura 6:</b> Esquema de uma combinação de única entrada no modelo de transferência de função de ruído.	21
<b>Figura 7:</b> Águas do córrego Campestre no interior da EEcoA.	23
<b>Figura 8:</b> Mapa de uso e cobertura da terra no entorno da Estação Ecológica e Floresta Estadual de Assis-SP.	24
<b>Figura 9:</b> Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios e os poços de monitoramento de 1 a 5.	25
<b>Figura 10:</b> Transformação da entrada para a saída no caso de um IR exponencial e de três blocos de pulsos com diferentes alturas e durações.	26
<b>Figura 11:</b> Localização dos poços no município de Assis/SP.	30
<b>Figura 12:</b> Parcela de recomposição com <i>Pinus</i> e serapilheira formada nesta parcela.	31
<b>Figura 13:</b> Parcela de recomposição referente ao cultivo florestal de <i>Tapirira</i> .	31
<b>Figura 14:</b> Parcela de recomposição feita com angico-do-cerrado ( <i>Anadenanthera falcata</i> ).	32
<b>Figura 15:</b> Histogramas dos poços de monitoramento da Estação Ecológica de Assis.	35
<b>Figura 16:</b> Histogramas do poço de monitoramento da estação meteorológica da APTA.	36
<b>Figura 17:</b> Histogramas dos poços de monitoramento próximos à rede de drenagem da APTA.	36
<b>Figura 18:</b> Histogramas dos poços de monitoramento do Vêncio.	36
<b>Figura 19:</b> Histogramas dos poços de monitoramento das parcelas de recomposição da FEA.	37
<b>Figura 20:</b> Histogramas dos novos poços de monitoramento da FEA (2013 -2015).	37
<b>Figura 21:</b> Função de autocorrelação (FAC) para o poço de monitoramento da EEcoA.	39
<b>Figura 22:</b> Função de autocorrelação (FAC) para o poço de monitoramento da estação meteorológica da APTA_EM.	39

<b>Figura 23:</b> Função de autocorrelação (FAC) para o poço de monitoramento “P7” da APTA_baixo.....	39
<b>Figura 24:</b> Função de autocorrelação (FAC) para o poço de monitoramento “V9” do Vêncio, na FEA.....	40
<b>Figura 25:</b> Função de autocorrelação (FAC) para o poço de monitoramento da parcela de recomposição com angico-de-cerrado (PAB), na FEA. ....	40
<b>Figura 26:</b> Função de autocorrelação (FAC) para o poço de monitoramento v26 das séries entre 2013 e 2015 da FEA, Ribeirão do Barro Preto (FEA_BP).....	40
<b>Figura 27:</b> Comparação entre os dados observados e calibrados pelo modelo PIRFICT para o poço EEcoA.....	42
<b>Figura 28:</b> Comparação entre os dados observados e calibrados pelo modelo PIRFICT para o poço da APTA. ....	43
<b>Figura 29:</b> Função IR ajustada aos dados de monitoramento da EEcoA. ....	44
<b>Figura 30:</b> Função IR ajustada aos dados de monitoramento da APTA (EM).....	45
<b>Figura 31:</b> Modelo PIRFICT ajustado (linha) aos dados de observação de alturas do lençol freático (pontos) no poço de monitoramento “P9” da APTA.....	48
<b>Figura 32:</b> Modelo PIRFICT ajustado (linha) aos dados de observação de alturas do lençol freático (pontos) no poço de monitoramento “V9” do Vêncio.....	48
<b>Figura 33:</b> Modelo PIRFICT ajustado (linha) aos dados de observação de alturas do lençol freático (pontos) nos poços de monitoramento da FEA (parcela com angico-do-cerrado).....	48
<b>Figura 34:</b> Função de IR ajustada aos níveis dos poços de monitoramento das parcelas de recuperação do ribeirão do Barro Preto. ....	51
<b>Figura 35:</b> Tendência gerada para o poço 14 com base nas séries históricas de precipitação e evapotranspiração, entre outubro de 2013 e abril de 2015.....	53

**LISTA DE TABELAS**

<b>Tabela 1:</b> Medidas de posição amostral calculadas para as séries temporais analisadas .....	34
<b>Tabela 2:</b> Medidas de dispersão amostral calculadas para as séries temporais analisadas. ....	35
<b>Tabela 3:</b> Medidas de forma amostral calculadas para as séries temporais analisadas.....	38
<b>Tabela 4:</b> Estatísticas da calibração do modelo PIRFICT às séries temporais observadas. ....	42
<b>Tabela 5:</b> Parâmetros físicos estimados através da calibração do modelo PIRFICT. ....	43
<b>Tabela 6:</b> Estatísticas de calibração do modelo PIRFICT às séries temporais das alturas do lençol freático observadas nos poços da APTA .....	46
<b>Tabela 7:</b> Estatísticas de calibração do modelo PIRFICT às séries temporais das alturas do lençol freático observadas nos poços do Vêncio .....	47
<b>Tabela 8:</b> Estatísticas de calibração do modelo PIRFICT às séries temporais das alturas do lençol freático observadas nos poços da FEA .....	47
<b>Tabela 9:</b> Parâmetros e desvios padrões estimados a partir da calibração pelo modelo PIRFICT para os poços da APTA .....	49
<b>Tabela 10:</b> Parâmetros e desvios padrões estimados a partir calibração pelo modelo PIRFICT para os poços do Vêncio .....	49
<b>Tabela 11:</b> Parâmetros estimados a partir da calibração pelo modelo PIRFICT para os poços da FEA.....	50
<b>Tabela 12:</b> Estatísticas da calibração do modelo PIRFICT às séries temporais observadas nos poços da FEA_RP (2013 – 2015). .....	52

## RESUMO

A água subterrânea destaca-se pela boa qualidade, baixo custo de captação e relativa abundância no Estado de São Paulo. Na região hidrográfica do Médio Paranapanema, o Sistema Aquífero Bauru (SAB) é uma reserva estratégica e seu monitoramento é importante para que a exploração seja feita de maneira sustentável e o aquífero continue desenvolvendo seu papel no fornecimento de água para a região. A pressão exercida por sistemas agrícolas e florestais em áreas de recarga de aquíferos é uma variável ligada à tomada de decisão e ao planejamento dos recursos hídricos em uma bacia. A identificação de respostas do aquífero, em relação ao uso da terra, pode ser realizada utilizando dados de monitoramento freático e modelos de séries temporais. Neste sentido, ressalta-se a importância do estudo do comportamento e aproveitamento da água na bacia hidrográfica, a fim de determinar a evolução dos recursos hídricos no tempo e no espaço e mensurar o impacto da modificação da bacia sobre processos hidrológicos. Com base em tais pressupostos, este trabalho teve como objetivo verificar o comportamento do SAB a partir de dados de altura do nível freático coletados em poços de monitoramento localizados em diferentes parcelas experimentais no município de Assis/SP. Para isso, as séries históricas das alturas do nível freático foram ajustadas aos dados de precipitação e evapotranspiração, através do modelo de transferência de ruído PIRFICT. Os resultados mostraram um comportamento distinto entre os poços localizados sob a mesma formação geológica, mas com diferentes usos da terra. Notou-se que em área agrícola os níveis foram mais sensíveis às variações sazonais e às práticas de manejo ali empregadas, denotando células de fluxo local. Enquanto que em área de conservação florestal, onde não há perturbações antrópicas, os dados de monitoramento refletem o escoamento de base em direção à drenagem mais próxima, influenciada principalmente pelo fluxo intermediário/regional das águas

subterrâneas. As análises das tendências obtidas através do monitoramento dos poços da Floresta Estadual de Assis mostraram uma queda média de 0,50 metro nos níveis freáticos locais, indicando uma relação dinâmica entre as águas subterrâneas e as variações climáticas.

-----  
**Palavras-chave:** monitoramento; águas subterrâneas; séries temporais; modelo PIRFICT

SPACE-TEMPORAL MODEL APPLICATION IN THE EVALUATION SYSTEM OF LEVELS GROUNDWATER AQUIFER BAURU (SAB) IN AREAS WITH DIFFERENT USES OF LAND IN THE MUNICIPALITY OF ASSISI / SP. Botucatu, 2015. 78 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Irrigação e Drenagem) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.  
Author: Aira Nava  
Advisor: Prof. Dr. Rodrigo Lilla Manzione

## **SUMMARY**

Groundwater outstands for good quality, low withdrawing cost and relative abundance in the State of São Paulo. In the Médio Paranapanema river basin, the Bauru Aquifer System (BMS) is a strategic reserve, its water monitoring is essential for a sustainable way of exploration, and the aquifer keeps developing its role in supplying water for the region. All of the state territory aquifers are exposed to progressive deterioration, given the impacts to geological structures by growing urban settlement, industrial and agricultural blast climbing. Pressure inputted by agricultural and forestry systems in groundwater recharge areas is an important decision variable to water resources planning in the basin. The identification of aquifer responses to the use of land can be done using groundwater monitoring data and time series models. In this context, it have been highlighted the importance of studying the behavior and use of water in the basin, to determine the evaluation of water resources in time and space and measure the impact of modification on the basin hydrological processes. Based on these premises, this study aimed to verify the effects of different crops in the oscillation processes of groundwater levels in the study area. And the application of models based on observations and time series of groundwater levels to understand the processes occurring during the hydrologic cycle and affect the availability of groundwater resources of the Bauru Aquifer System in Assis / SP. Results have shown a distinct behavior between the wells located in the same geological formation, but with different land uses. It have noted that agriculture levels were more sensitive to seasonal variations and the management practices employed there, denoting local flow cells, while in wooded conservation area, where there is no human disturbance, monitoring data reflect the flow base toward the nearest drain, mainly influenced by the intermediate / regional

groundwater flow. The tendency analysis obtained from State Forest wells monitoring shows an average decay about 50 cm of local phreatic levels, indicating a dynamic relationship between groundwater and climate variations.

-----  
**Keywords:** monitoring; groundwater; time series; PIRFICT model.

## 1. INTRODUÇÃO

A conversão da paisagem natural para usos agrícolas e urbanos pode afetar o ciclo hidrológico de uma bacia hidrográfica, pois altera variáveis importantes como taxas de interceptação, infiltração e evapotranspiração. Os efeitos produzidos pela substituição da cobertura vegetal afetam o equilíbrio hidrológico, gerando impactos no funcionamento dos ecossistemas. Tais impactos podem comprometer o acesso aos recursos naturais e matérias primas necessárias para as diversas atividades humanas (BAKER; MILLER, 2013; NOSETTO et al., 2012).

O volume explorável de um aquífero é uma variável de decisão a ser determinada como parte de um plano integrado de gestão do sistema de águas de uma região ou bacia hidrográfica. A exploração desse tipo de recurso deve ser feita com cautela, pois a renovação das águas retiradas ou recarga do aquífero, não se faz na mesma velocidade da extração. O que pode resultar em uma exploração de partes das reservas permanentes do aquífero, com riscos de exaustão quando a captação não é devidamente monitorada (MANZIONE, 2007; ANDRADE, et al., 2008).

Desta forma, o monitoramento e a avaliação das condições que este meio natural encontra-se são instrumentos fundamentais para tomada de medidas preventivas e/ou proativas que buscam conciliar a qualidade e a quantidade dos recursos. Assim, tendo em vista as diferentes funções das águas subterrâneas (social, ambiental ou mesmo econômica), um programa de monitoramento que seja eficiente deve envolver o controle da qualidade e quantidade, considerando as inter-relações existentes com as águas superficiais, condições climáticas e usos locais (MESTRINHO, 2008).

Por estas razões, este trabalho teve como objetivo verificar o comportamento do Sistema Aquífero Bauru (SAB), a partir de dados de altura do nível freático coletados em poços de monitoramento, localizados em diferentes parcelas experimentais no município de Assis/SP. A partir das diferenças entre as parcelas, verificou-se os efeitos de

diferentes cultivos agrícolas e florestais nos processos de oscilação dos níveis freáticos da área de estudo.

Além disso, procurou-se analisar possíveis tendências e não linearidades presentes nas séries temporais e entender como as variáveis climatológicas (precipitação e evapotranspiração), somada às necessidades hídricas das diferentes vegetações, interferem nos mecanismos de recarga em aquíferos livres. E, por fim, através dos resultados obtidos pelos modelos, inferir sobre a dinâmica dos níveis freáticos do Sistema Aquífero Bauru, um dos principais mananciais subterrâneos disponíveis na região do Médio Paranapanema, sobre a formação Adamantina no município de Assis (SP).

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1. Águas subterrâneas**

A água subterrânea é aquela parcela do ciclo hidrológico que circula abaixo da superfície do terreno, nas fraturas e nos poros (ou espaços vazios) existentes entre as partículas não consolidadas que formam os solos e as rochas sedimentares e magmáticas. Seu processo de formação se dá quando, ao infiltrar no solo, a água da chuva passa por uma camada chamada de zona não saturada, na qual os poros são preenchidos tanto por água quanto por ar. Parte desta água é absorvida pelas raízes das plantas, por outros organismos vivos ou evapora, e o restante continua em movimento descendente devido à ação da gravidade, acumulando-se nas zonas mais profundas e preenchendo totalmente os poros, formando a zona saturada. O limite entre as zonas não saturada e saturada é conhecido como lençol freático (IRITANI; EZAKI, 2012).

A profundidade do nível da água pode sofrer oscilações ao longo do ano, variando de acordo com o clima e as mudanças do tempo. Em áreas naturais, períodos chuvosos tendem a gerar uma maior infiltração e, por consequência, a elevação dos níveis freáticos; já nos de estiagem, aonde o processo de evapotranspiração é maior e a infiltração é baixa, o nível da água tende a ser mais profundo.

Os reservatórios de água subterrânea são conhecidos como aquíferos e caracterizam-se por “camadas ou formações geológicas suficientemente permeáveis, capazes de armazenar e transmitir a água em quantidades que possam ser aproveitadas como fonte de abastecimento para diferentes usos” (IRITANI; EZAKI, 2012, p.19). Os aquíferos podem ser

classificados segundo o tipo de porosidade da rocha armazenadora (granular ou sedimentar, fissural ou fraturado e cárstico) e, também, de acordo com suas características hidráulicas, sendo livre ou confinado, dependendo da pressão a que estão submetidos.

Os aquíferos livres encontram-se mais próximos à superfície e estão sujeitos diretamente à pressão atmosférica. Neste caso, a zona não saturada e saturada possui contato direto, fazendo com que a água proveniente da infiltração recarregue diretamente o aquífero. Já, o aquífero confinado é limitado em seu topo e em sua base por camadas constituídas de rocha que apresentam baixa permeabilidade. Os aquíferos confinados são geralmente aquíferos de grande produção, enquanto que os aquíferos livres são os mais explorados devido ao seu fácil acesso (CAICEDO, 2007).

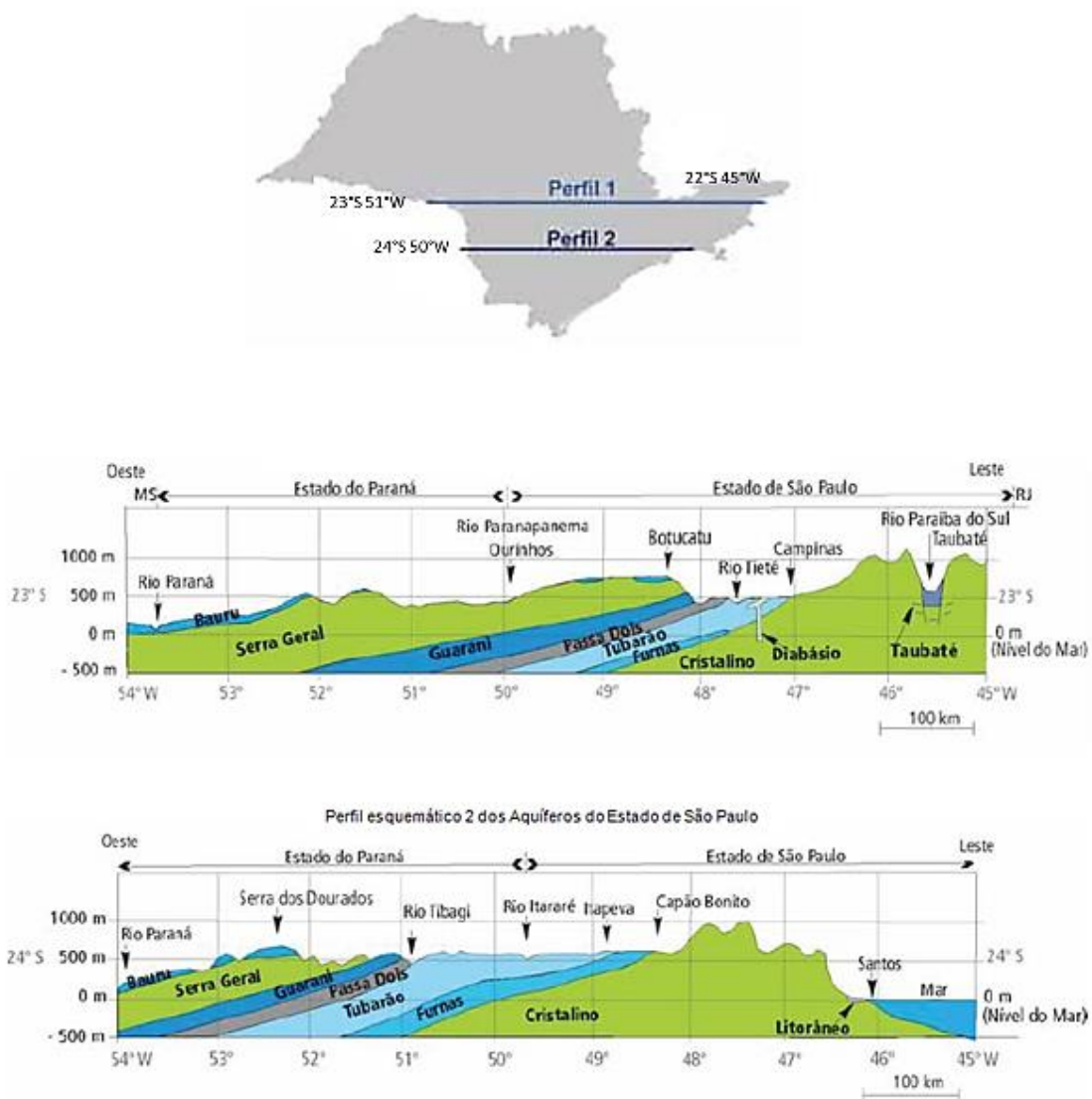
Segundo Hirata et al. (2010), no Brasil as recargas renováveis de águas subterrâneas (recargas efetivas) chegam a cerca de  $42.300 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , correspondendo a 24% do escoamento dos rios no território e a 49% da vazão de estiagem (considerada aquela com 95% de permanência). Esta vazão de água é distribuída, em geral, entre dois grupos de aquífero: os formados por rochas e materiais sedimentares e os de rochas fraturadas.

Os sistemas aquíferos de rochas sedimentares ocupam aproximadamente 4,13 milhões de  $\text{km}^2$  ou 48,5% do território nacional e estão associados às grandes bacias sedimentares do Proterozóico/Paleozóico, Proterozóico/Mesozóico e Paleozóico e às bacias menores do Mesozóico e Cenozóico. Nesta extensão, são encontrados 27 sistemas aquíferos de porosidade granular e, subordinadamente, cársticos e fraturados, com área de afloramento ou de recarga de 2,76 milhões de  $\text{km}^2$  (32 % do país). As maiores bacias brasileiras têm idade paleozóica e são: Bacia do Paraná (contendo os sistemas aquíferos Bauru-Caiuá, Guarani, Tubarão, Ponta Grossa e Furnas); Bacia do Parnaíba (sistemas aquíferos Itaperucu, Corda, Motuca, Poti-Piauí, Cabeças e Serra Grande); e Bacia do Amazonas (com os sistemas aquíferos Boa Vista, Solimões e Alter do Chão). As bacias sedimentares do Mesozóico têm dimensões menores e se concentram nas regiões costeiras, sendo, em geral, de grande espessura, podendo alcançar milhares de metros (HIRATA et al., 2010).

Em sistemas aquíferos fraturados, os terrenos cristalinos pré-cambrianos ocupam a área de cerca de 4,38 milhões de  $\text{km}^2$ , cerca de 51,5 % do território brasileiro. Estes terrenos coincidem com os embasamentos dos crátons do Amazonas e do São Francisco e com cinturões de dobramentos Neoproterozóico, sendo constituídos por rochas com diferentes graus de metamorfismo. Basaltos e diabásios da Formação Serra Geral da Bacia do

Paraná constituem, em conjunto com as rochas pré-cambrianas, os principais aquíferos fraturados do país (HIRATA et al., 2010).

No Estado de São Paulo, também há o predomínio destes dois grandes grupos que se diferem em suas características hidrogeológicas, as quais se refletem em suas produtividades. A Figura 1 mostra os perfis hidrológicos do Estado de São Paulo, permitindo uma melhor visualização da disposição dos aquíferos.



**Figura 1:** Perfil hidrológico do Estado de São Paulo. Fonte: Iritani e Ezaki, 2012.

Sobre os Aquíferos Sedimentares, tem-se que são formados por depósitos de sedimentos eólicos, fluviais e marítimos, dos quais se destacam o Bauru, Guarani, Taubaté, São Paulo e Tubarão. Com relação ao grupo dos Aquíferos Fraturados, este é formado por rochas ígneas e metamórficas, sendo o granito o mais comum. Por se caracterizarem como

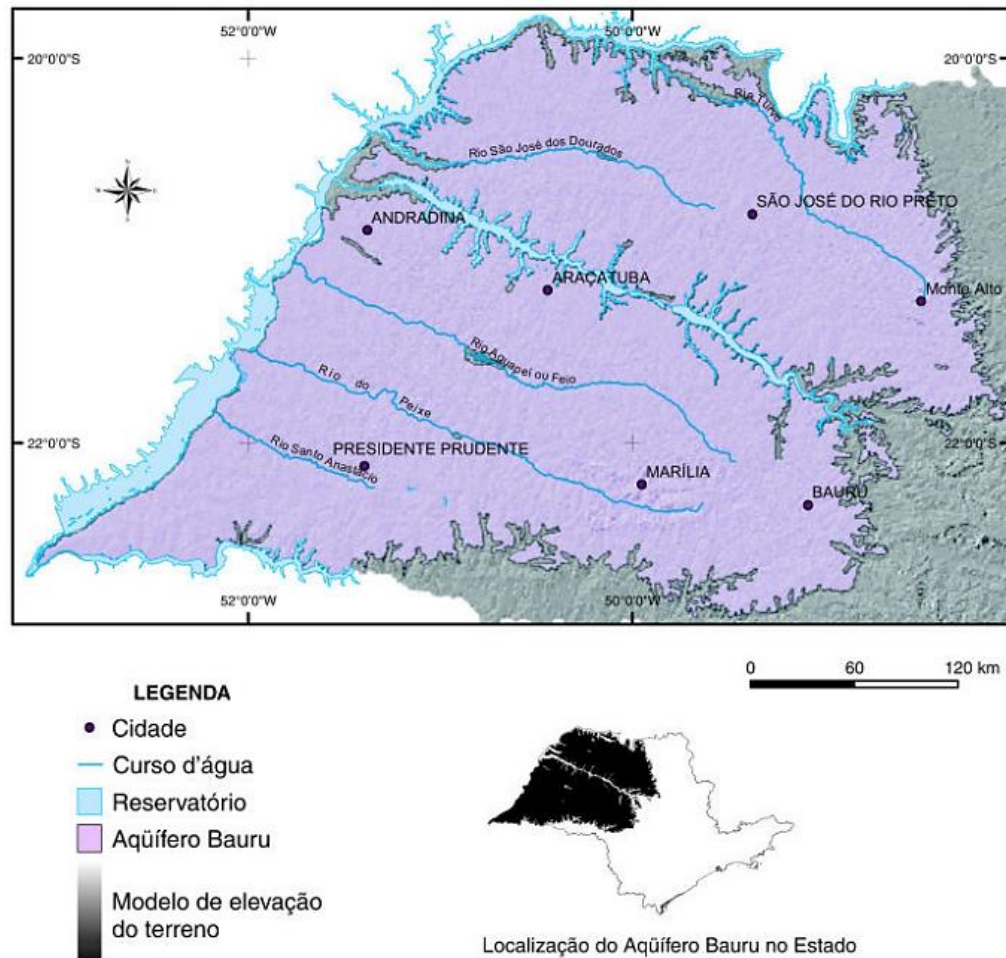
rochas maciças e compactas (sem espaços vazios entre os minerais que as compõem), a água circula por suas fraturas. Neste grupo, destacam-se os aquíferos Serra Geral e o Cristalino, incluindo, também, as rochas carbonáticas de porosidade carstica, tais como calcário e mármore (IRITANI; EZAKI, 2012).

## **2.2. Sistema Aquífero Bauru (SAB)**

O derrame vulcânico continental da Bacia do Paraná é composto, em mais de 90% em volume, por basaltos toleíticos e andesito basáltico, apresentando vesículas e amídalas no topo e na base do derrame. Intercalados aos sucessivos derrames, localmente, há depósitos de arenitos eólicos, formando um sistema intertrapeano (MEAULO, 2004). Cessados os derrames de lava da Formação Serra Geral que marcaram o final dos eventos deposicionais e vulcânicos generalizados na área da bacia do Paraná, observou-se uma tendência geral para o soerguimento epirogênico em toda a Plataforma Sul-Americana, em território brasileiro. A porção norte da bacia, entretanto, comportou-se como área negativa, relativamente aos soerguimentos marginais à zona central da bacia, marcando o início de uma fase de embaciamentos localizados em relação à área da bacia como um todo. Nessa área deprimida acumulou-se o Grupo Bauru, no Cretáceo superior (CPTI, 1999).

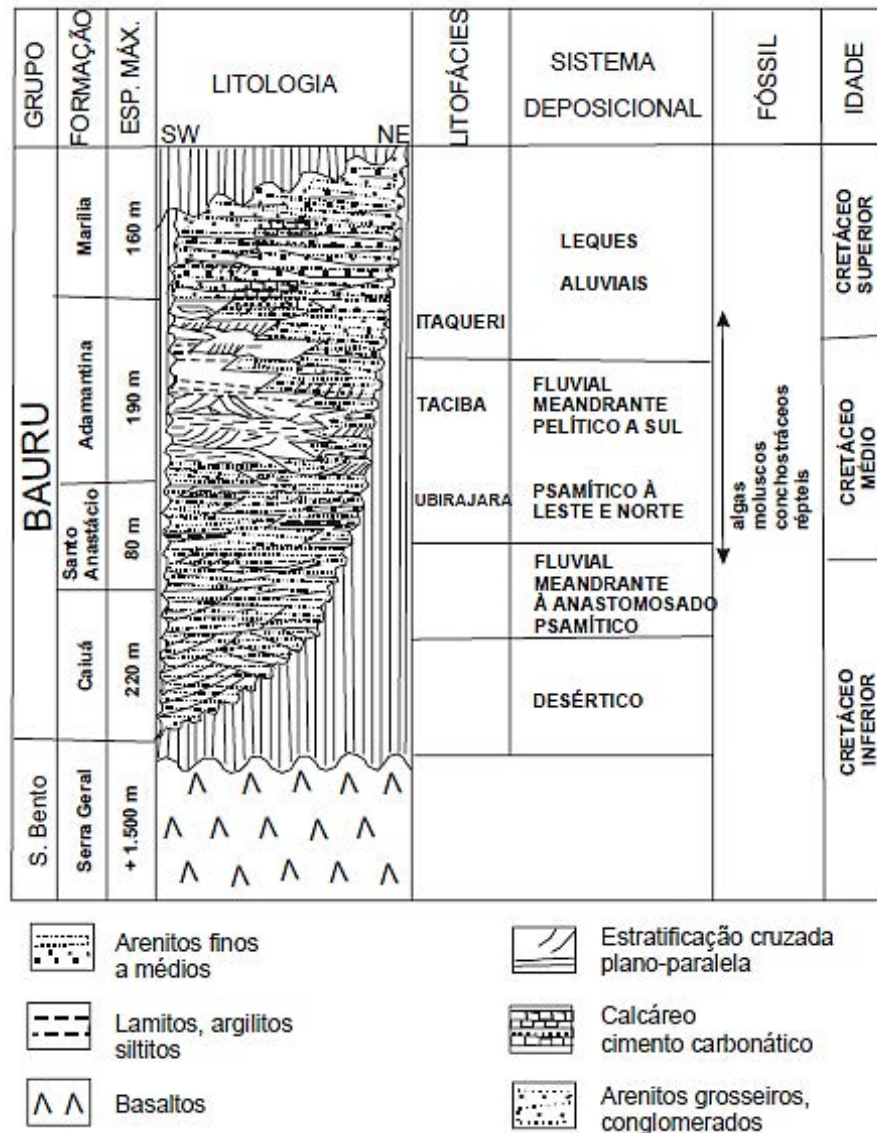
O Sistema Aquífero Bauru ocupa uma porção de aproximadamente metade da extensão oeste do Estado de São Paulo, numa área de cerca de 96.900 km<sup>2</sup> (Figura 2). As rochas sedimentares que constituem o aquífero estão dispostas sobre o basalto que cobre a Formação Serra Geral. Estas rochas sedimentares (arenosas, areno-argilosas e siltosas dos Grupos Bauru) que compõem o aquífero foram depositadas em ambientes desérticos e fluviais, em clima árido e semiárido (MANZIONE, 2015).

O aquífero apresenta uma espessura média de 75 metros, podendo atingir valores superiores a 300 metros no Planalto Residual de Marília, onde os espigões e escarpas são sustentados por espessa sequência de sedimentos areno-argilosos e carbonáticos. As menores espessuras são encontradas em seus limites sul, leste e norte, próximas aos basaltos da Formação Serra Geral (MANCUSO; CAMPOS, 2005).



**Figura 2:** Delimitação do Sistema Aquífero Bauro (SAB) com base no mapa geológico do Estado de São Paulo - CPRM/ SGB. Fonte: Perrotta et al., 2005.

O Grupo Bauru, no Estado de São Paulo, subdivide-se nas formações Caiuá, Santo Anastácio, Adamantina e Marília (SOARES et al., 1980). A Figura 3 mostra o quadro estratigráfico do Grupo Bauru.



**Figura 3:** Quadro estratigráfico do Grupo Bauru. Fonte: Soares et al., 1980.

As águas subterrâneas do SAB ocorrem de forma livre e o sentido do escoamento regional é dado em direção às drenagens principais, como os rios Turvo, Preto, São José dos Dourados, Tietê, Aguapeí, Peixe e Santo Anastácio, Paraná e Paranapanema, principais exutórios do sistema. A produtividade do aquífero é considerada de média a alta, entretanto, é variável ao longo de sua extensão. Assim, enquanto suas porções norte, leste e sudeste, apresentam suas capacidades diminuídas em virtude dos arenitos intercalados por camadas de sedimentos de granulometria fina (lamitos e siltitos), ou possuem uma cimentação de mineral carbonático entre os grãos de areia; as porções inferiores e oeste imprimem uma melhor produtividade, pois há o predomínio de arenitos com baixo teor de material fino, conforme apontado em estudo realizado pelo DAEE/IG/IPT/CPRM (2005).

As águas do SAB se mostram, em geral, com boa qualidade para o consumo humano. De acordo com Silva et al. (2005), o Aquífero Bauru é utilizado por cerca de duzentos e quarenta municípios paulistas, sendo que destes, 87% são abastecidos integralmente por águas subterrâneas. Entretanto, Iritani e Ezaki (2012) destacaram que alguns poços de monitoramento do aquífero vêm indicando concentrações de cromo e nitrato que ultrapassam padrões de potabilidade de água para consumo humano.

Os poços de monitoramento do SAB, neste estudo, estão localizados em áreas com diferentes usos da terra em Assis/SP. O município, segundo a classificação climática de Köppen, encontra-se em uma região de transição entre dois tipos climáticos: Cwa (tropical com a concentração de chuvas no verão, com temperatura média do mês mais quente superior a 22 °C) e Cfa (tropical, sem estação seca). Sua pluviosidade média anual é maior que 1.400 mm/ano, com a concentração de chuvas entre os meses de novembro e abril. Sendo que, entre junho e setembro, chove 15% do total anual, época em que os solos se tornam deficitários em água e os rios têm seus níveis mais baixos (CEPAGRI, 2015).

O município está posicionado na porção centro nordeste da Bacia do Paraná. Segundo Bongiovanni (2008), as unidades litoestratigráficas presentes são constituídas por rochas ígneas (pertencentes à Formação Serra Geral) e rochas sedimentares (da Formação Adamantina), ambas de idade predominantemente mesozóica; e por depósitos sedimentares recentes, de idade cenozoica, conforme observado no Apêndice 1. A formação Adamantina contempla 41,45% de área aflorante no Médio- Paranapanema. O contato entre a Formação Adamantina e os basaltos da Formação Serra Geral é marcado por discordância erosiva, apresentando algumas vezes delgados níveis de brecha basal.

Recoberto praticamente todo o município de Assis, encontram-se sedimentos inconsolidados com coloração variando de vermelho intenso a vermelho alaranjado a amarelo pálido, com baixos teores de argila, denominadas de Aloformação Paranaíba. No município, afloram rochas das formações Serra Geral, Adamantina e sedimentos atribuídos à Aloformação Paranaíba, unidades que se encontram parcialmente cobertas por solo, normalmente recente e de pequena espessura. No município, predominam as classes de solos Latossolo, Argissolo, Nitossolo, Neossolo e Gleissolo, sendo que 80% da área do município têm predominância da classe dos Latossolos (BONGIOVANNI, 2008).

### 2.3. Monitoramento como ferramenta de gestão

Importante para os mais diversos fins, a água pode ser utilizada de modo consuntivo (quando o recurso é captado em seu curso natural e apenas uma parte, geralmente de qualidade inferior a inicial, retorna ao curso normal); não consuntivo (em que toda água captada retorna com a mesma qualidade e quantidade para o curso) e local (usos que aproveitam a disponibilidade natural em sua fonte sem causar qualquer modificação relevante). Neste sentido, o abastecimento urbano e a irrigação são exemplos de usos consultivos, enquanto atividades como pesca e navegação se caracterizam como não consultivas (LANNA, 2007).

As fontes de poluição das águas subterrâneas são inúmeras e geradas tanto pela contaminação decorrente das diversas atividades antrópicas quanto pela extração excessiva. Dessa forma, poluição pode ser definida como alterações nas características físicas, químicas ou biológicas de águas naturais decorrentes de atividades humanas (BENETTI; BIDONE, 2007).

Apesar das águas subterrâneas estarem naturalmente melhores protegidas dos agentes contaminantes, quando comparadas às águas superficiais, o aumento das áreas urbanas e a expansão agrícola tende a acelerar os processos de contaminação. Isso faz com que, em muitos casos, a percepção destes processos seja bastante tardia devido às características de fluxo dos meios aquíferos que, geralmente, variam de poucos centímetros a alguns metros por dia (CBH-MP, 2007). Assim, a hidrogeologia possui papel importante no estudo do “comportamento e aproveitamento da água na bacia hidrográfica, quantificando os recursos hídricos no tempo e no espaço e avaliando o impacto da modificação da bacia sobre o comportamento dos processos hidrológicos” (TUCCI, 2007, p.26).

Segundo Manzione (2015), dados de monitoramento de águas subterrâneas são escassos no Brasil e os pontos de coleta se encontram distribuídos de forma irregular ao longo do território. Além disso, é comum encontrar inúmeras falhas nas séries históricas devido à falta de profissionais em campo ou de recursos para a manutenção de equipamentos. Com base nisso, o governo, nos âmbitos federais e estaduais, tem realizado diversos esforços com a finalidade de ampliar a rede de monitoramento e aumentar as informações sobre as reservas aquíferas.

Entre estas iniciativas, encontra-se a Rede de Monitoramento das Águas Subterrâneas (RIMAS) que é operada por meio da Companhia de Pesquisa de Recursos Mineirais (CPRM). Esta rede de monitoramento tem como principal objetivo obter um

conhecimento mais detalhado a respeito dos aquíferos, por meio de um programa capaz de integrar as águas subterrâneas e as superficiais. Para isto, o CPRM também é responsável por estabelecer e operar redes hidrometeorológicas, de qualidade de água, monitoramento de níveis em açudes, entre outros. O que torna possível identificar impactos às águas subterrâneas em decorrência da exploração ou das formas de uso da terra; estimar da disponibilidade do recurso hídrico subterrâneo; avaliar a recarga e estabelecer o balanço hídrico; e determinar de tendências de longo termo frutos das mudanças nas condições naturais e/ou derivadas de atividades antrópicas (CPRM, 2012).

No Estado de São Paulo, destacam-se as redes instaladas pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) e pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). Com ênfase ao programa Rede Hidrológica Básica que, operado pelo DAEE desde 1951, representa a maior fonte de dados quantitativo do Estado e à Rede Piezométrica Básica criada em conjunto com a Agência Nacional de Águas (ANA) e o CPRM, no ano de 2007. Esta rede opera com 42 poços instalados, em sua maioria, nos aquíferos Bauru e Guarani (MANZIONE, 2015).

Nota-se, assim, a importância do planejamento dos recursos hídricos como forma de avaliação da relação entre a demanda e a disponibilidade, cuja principal finalidade é obter um bom aproveitamento, garantindo melhores benefícios socioeconômicos, sem que ocorra uma demasiada degradação ambiental. A administração de recursos hídricos é um conjunto de ações necessárias para tornar efetivo o planejamento, caracterizando-se como um instrumento de revisão permanente que permite ajustar objetivos e metas a novas conjunturas (SETTI et al., 2000).

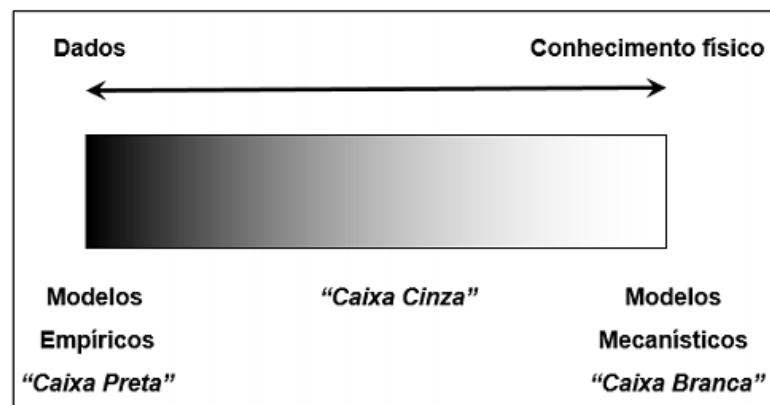
Na gestão dos recursos hídricos subterrâneos, é importante determinar os efeitos dos fatores climáticos e do uso da terra sobre as águas de um aquífero, para que as melhores estratégias sejam traçadas frente aos riscos que suas modificações (declínio/elevação e salinização, por exemplo) trazem para a agricultura e abastecimento urbano. Segundo Yihdego e Webb (2011), modelos capazes de fornecer informações sobre as respostas aos estímulos gerados são importantes instrumentos de gestão, pois representam o tempo que o sistema leva para alcançar um novo estado de equilíbrio após sofrer perturbações.

Desta forma, o monitoramento das águas subterrâneas tem se mostrado uma ferramenta importante para diagnosticar a situação de um aquífero. A aplicação de modelos hidrológicos aos dados de observações dos níveis freáticos permite um maior entendimento sobre os processos e variáveis que influenciam em sua recarga. A avaliação do

comportamento do aquífero, principalmente nas áreas de afloramento e recarga direta, fornece dados importantes para sua conservação e subsídios aos projetos de proteção ambiental e desenvolvimento sustentável. (OAS/GEF, 2001; SOLDERA; MANZIONE, 2012).

Os modelos são abstrações da realidade e se justificam através da necessidade de se conhecer o comportamento de um sistema. O que os tornam instrumentos úteis na gestão dos recursos hídricos, pois são capazes de fornecer informações sobre a situação atual de uma bacia hidrográfica, permitindo projetar condições futuras através da simulação de cenários (TUCCI, 2005).

Como descreveu Manzione (2014), genericamente, os modelos dividem-se entre determinísticos e estocásticos. Modelos determinísticos descrevem um processo por meio de equações e leis físicas, baseados no formalismo matemático, cujos resultados são soluções exatas. Estes modelos, também são denominados de caixa branca, pois todos os seus parâmetros de entrada, bem como estruturas e condições de contorno, são conhecidos e controlados pelo modelador. Já, os modelos estocásticos, também conhecidos como caixa preta, seguem uma abordagem estatística, e considerando as leis de probabilidade, seus resultados se remetem à esperança de que certo valor seja alcançado. São modelos empíricos e se apoiam nos dados de entrada, cujos parâmetros não são determinados pelo modelador, mas sim por sua formulação. Na Figura 4 está disposta uma representação esquemática dos modelos abordados.



**Figura 4:** Representação modelos abordados. Fonte: Manzione, 2014.

Existem também abordagens que buscam integrar ambos os modelos descritos, conhecidas como caixa cinza. Para isso, introduzem as leis físicas em uma ótica estatística, mesclando os modelos de caixa preta e caixa branca.

## 2.4. Análise de séries temporais

Séries temporais consistem em um conjunto de observações organizadas cronologicamente, aonde a ordem de ocorrência dos dados deve ser respeitada para que suas informações sejam mantidas, possibilitando, assim, a modelagem de sistemas. A principal característica de uma série temporal, também chamada de série histórica, é a dependência entre as observações ao longo de intervalos de tempo e sua análise consiste em técnicas que permitem entender esta dependência (BOX; JENKINS, 1976).

Assim, se um polinômio puder ser adaptado para uma série temporal conhecida e suas entradas futuras puderem ser determinadas com precisão, então a série temporal segue uma função determinística. Quando os futuros valores das series temporais não puderem ser calculados com exatidão, descritos somente em termos probabilísticos, a série passa a ser descrita por modelos estatísticos ou estocásticos. No caso de fenômenos naturais, é impossível inferir sobre o seu comportamento de forma determinística. Entretanto, uma vez que o evento ocorre, o valor de sua série temporal é conhecido e expressão matemática que descreve a sua estrutura probabilística é dada por meio processo estocástico (HIPEL; MCLEOD, 1994).

Segundo Bezerra (2006), os objetivos de se analisar uma série temporal consistem em investigar seu mecanismo gerador, fazer previsões de valores futuros da série a curto ou longo prazo, descrever seu comportamento através de gráficos, procurar periodicidades relevantes nos dados, entre outros. Em todos os casos, é possível construir modelos estocásticos, tanto no domínio do tempo como no domínio da frequência.

Para Manzione (2015), modelos de séries temporais são formas sistemáticas e empíricas de prever o comportamento temporal de um sistema hidrológico. As series históricas podem ser contínuas (coletadas em intervalo de tempo regular) ou discretas (observações registradas em instantes isolados). Seus modelos podem, ainda, se apresentarem como processos estacionários ou não estacionários. O processo é tido como estacionário quando suas propriedades estatísticas não se alteram com o tempo (média e variância, por exemplo) e, como visto, não ocorre nos fenômenos naturais, apenas assume-se a estacionaridade sobre determinado período ou intervalo de tempo.

As séries temporais possuem componentes específicos que podem ser reconhecidos com base em sua análise, tais como: tendência (representa uma mudança unidirecional gradual que pode aumentar ou diminuir ao longo do tempo, em relação ao valor médio da série); periodicidade (variação cíclica da série histórica hidrológica); aleatoriedade

(resultado da incerteza natural do processo estocástico que pode ser modelado com um componente autorregressivo, por exemplo); e o ruído aleatório, referente ao que o modelo não consegue explicar (HIPEL; MCLEOD, 1994; MANZIONE, 2015).

De acordo Box e Jenkins (1976), é possível identificar três passos para a construção de um modelo de séries temporais: identificação, estimação (calibração) e diagnóstico (validação). O estágio de identificação começa por meio da análise visual do gráfico de series temporal e é importante para indicar a presença de um componente sazonal ou alguma outra forma de tendência. Este estágio pode ser útil para filtrar a série, a fim de se obter uma suavização da imagem, exibindo seu nível médio mais claramente. Neste estágio, busca-se compreender a ordem e o tipo que o processo estocástico que pode assumir (autorregressivo – AR; média móvel – MA ou autorregressivo/média móvel - ARMA, por exemplo), o que é feito por meio da representação gráfica das ferramentas de identificação conhecidas como funções autocorrelação (FAC) e autocorrelação parcial (PFAC).

No estágio seguinte, valores dos parâmetros são estimados por meio de um algoritmo de otimização, com base num critério de mínimos quadrados ou um critério de máxima verossimilhança. E, em última instância, procura-se verificar se as premissas dos modelos foram respondidas, o que é feito com base na análise dos resíduos (BOX; JENKINS, 1976).

#### ***2.4.1. Funções de autocorrelação (FAC) e autocorrelação parcial (PFAC)***

Como visto anteriormente, os fenômenos naturais possuem um comportamento dinâmico, que pode ser descrito com base nos modelos de séries temporais, utilizados para estimar parâmetros específicos. Estes parâmetros são obtidos com a finalidade de se encontrar as características dos processos naturais ao longo do tempo e a sua extrapolação para situações futuras. Processos que são totalmente conhecidos são chamados de determinísticos, no qual seu estado futuro pode ser calculado com exatidão, resultando em uma série. Enquanto que o estado futuro de um processo estocástico só pode ser previsto, o que leva à formação de várias séries resultantes de experimentos de probabilidade (KNOTTERS, 2004).

Hipel e Mcleod (1994) afirmaram que a função de autocorrelação (FAC) é usada como forma de se inferir o tipo de processo que gerou uma determinada série temporal de comprimento  $N$ , com base na autocorrelação de seus diferentes instantes. Ou seja, é a correlação de uma variável com ela mesma em diferentes instantes de tempos.

Depois de calculada, a FAC pode ser plotada a partir de um atraso (lag)  $k$  contra um atraso máximo de cerca de  $N/4$ , para determinar quais os valores da estimativa são significativamente diferentes de zero. No gráfico são incluídos limites de confiança, o que requer um conhecimento da variância da amostra relacionada à FAC,  $rk$ . Além disso, entende-se que, o coeficiente de autocorrelação ( $pk$ ) de uma série temporal varia entre -1 e 1. Se,  $pk$  assumir valor de 1, pode-se dizer que as duas variáveis medidas possuem uma autocorrelação positiva absoluta, logo, assume-se valor de -1, diz-se que possuem uma autocorrelação negativa absoluta e, se  $pk$  for igual a zero, a autocorrelação é nula. Já, a PFAC mede a intensidade da relação entre duas observações da série, controlando (mantendo constante) o efeito das demais HIPEL; MCLEOD, 1994).

É importante ressaltar que os modelos nos quais os dados serão ajustados podem assumir dois tipos de processos: estacionários (AR, MA, ARMA) ou não estacionários. Segundo Knotters (2004), um processo estacionário ocorre quando suas propriedades estatísticas não se alteram com o tempo. Isto não pode ser encontrado na natureza, sendo possível apenas em determinados períodos ou intervalos de tempo. Entretanto, processos estacionários de segunda ordem podem ser descritos com base na média e variância da função de autocorrelação. Os processos não estacionários caracterizam-se por possuir normalmente uma tendência, como a variabilidade sazonal que faz com que a média e a variância, por exemplo, sejam fortemente variáveis.

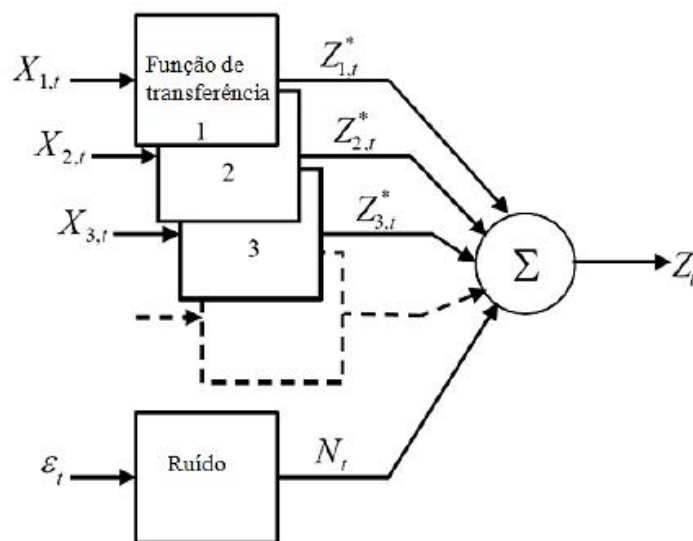
Assim, o processo autorregressivo (AR) ocorre quando as observações da série são dependentes entre si, e esta dependência tende a se perder com o afastamento da primeira observação até o ponto que os dados se tornam ruídos brancos (aleatórios). Quando a ordem do processo é um (1), este é chamado de Processo de Markov. Já, o processo de MA ( $q$ ) refere-se aquele em que há forte presença do ruído branco. Deste modo, a correlação entre os dados sofre uma queda brusca devido a este efeito aleatório. A partir disso o modelo de MA busca compreender o quanto este ruído está relacionado com as observações anteriores (HIPEL; MCLOED, 1994).

Há casos em que ambos os processos, AR e MA, estão presentes simultaneamente na série. Desse modo, há uma correlação entre as primeiras observações que tendem a diminuir lentamente. Posteriormente, um processo MA caracteriza a série a partir de certo momento, a levar a uma queda brusca do coeficiente de correlação. Segundo Copertwait e Metcalfe (2009), o AR ( $p$ ) é um caso especial de ARMA ( $p, 0$ ) enquanto que o MA ( $q$ ) é um caso especial de ARMA ( $0, q$ ).

### 2.4.2. Processos de funções de transferência de ruído

Modelos de funções de transferência de ruído (FTR) utilizam regressões múltiplas para transformar séries de observações de entrada (precipitação e evapotranspiração, por exemplo) em séries de saída (como resposta dos níveis freáticos). Neles, um sistema linear de entrada e saída pode ser totalmente caracterizado por uma função de impulso e resposta (IR). Estes modelos compartimentam a série observada em uma soma de componentes relacionados a causas conhecidas (entradas/*inputs*) que influenciam na variação temporal de saída (*output*), bem como a um componente desconhecido (ruído) (ZIEMER et al., 1998; VON ASMUTH, 2002)

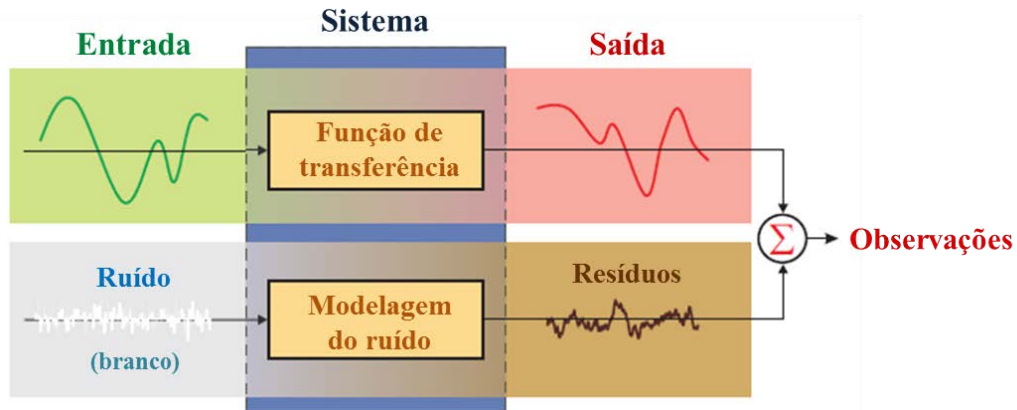
O esquema de um modelo FTR pode ser visto na Figura 5, em que as variáveis de entrada ( $X_{1,t}, X_{2,t}, X_{3,t}, \dots$ ) e os componentes de transferência ( $Z_{1,t}, Z_{2,t}, Z_{3,t}, \dots$ ) são inseridos junto ao ruído ( $\varepsilon_t$  corresponde ao ruído branco, cuja variância,  $\sigma_\varepsilon^2$ , é finita e constante). Sendo  $N_t$ , o componente do ruído e  $Z_t$  a variável de saída (MANZIONE, 2015).



**Figura 5:** Representação esquemática de um modelo de transferência com um ruído adicionado. Fonte: Manzione, 2015.

Os componentes conhecidos de transferência são aditivos e cada um descreve parte da profundidade do lençol freático. Modelos de transferência relacionam o comportamento das séries investigadas a valores presentes e passados de uma ou mais série. O componente o relativo ao ruído descreve a estrutura autorregressiva que se relaciona às diferenças entre os níveis de água subterrânea observados e o resumo (soma) desses

componentes conhecidos, conforme pode ser visualizado na Figura 6. Segundo Manzione (2015), a entrada do modelo de ruído é uma série de observações independentes e identicamente distribuídas com média zero e variância finita e constante (ruído branco). Modelos de FTR são muitas vezes utilizados para distinguir as influências antrópicas sobre as séries de água subterrânea (VAN GEER; ZUUR, 1997; YIHDEGO; WEBB, 2011).



**Figura 6:** Esquema de uma combinação de única entrada no modelo de transferência de função de ruído. Fonte: Adaptado de VON ASMUTH, 2012.

Segundo Hipel e Mcleod (1994), a função teórica de impulso e resposta (IR) reflete as mesmas características autorregressivas e de média móvel de uma função de autocorrelação teórica. Para Von Asmuth e Knotters (2004), em modelos que explicam empiricamente o comportamento de um regime hidrológico com base no somatório de fenômenos relacionados a ele, o número de variáveis de entrada deve ser mantido o mais baixo possível a fim de evitar comportamentos superestimados ou correlações coincidentes.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. Área de estudo

##### *3.1.1. Estação Ecológica (EEcoA) e Floresta Estadual de Assis (FEA)*

Segundo o Plano de Manejo elaborado pelo Instituto Florestal (IF, 2010), a Estação Ecológica detém uma área de 1.760,64 ha (17,61 km<sup>2</sup>), enquanto que a Floresta Estadual possui uma área de 2.816,42 ha (28,16 km<sup>2</sup>). Isto representa 10% das áreas de cerrado protegidas em Unidades de Conservação (UC) no Estado de São Paulo. São locais de proteção dos recursos naturais que visam à preservação da natureza, sendo permitido apenas o uso indireto dos seus recursos, tais como pesquisa científica e educação ambiental. Seu principal objetivo é a preservação da vegetação de “cerrado *lato sensu*”.

O local como um todo (EEcoA e FEA) destaca-se por sua condição ecotonal, com parte sendo ocupada por vegetação de transição devido ao contato entre o Cerrado e a Mata Atlântica (Floresta Estacional Semidecidual). Esse fato garante uma maior relevância na conservação não apenas de espécies, mas de processos ecológicos importantes, como os ecossistemas derivados de mudanças climáticas. Segundo Durigan e Ratter (2006), a baixa representatividade das áreas ecotonais nas UC tem sido apontada como uma importante lacuna no sistema.

Ressalta-se que entre os anos de 1962 e 2001, 88,3% das áreas de cerrado existentes no Estado de São Paulo haviam sido desmatadas. Nessas décadas, a vegetação perdeu seu espaço para os seguintes usos do solo: cana-de-açúcar, pastagens, agricultura anual, citricultura e reflorestamento.

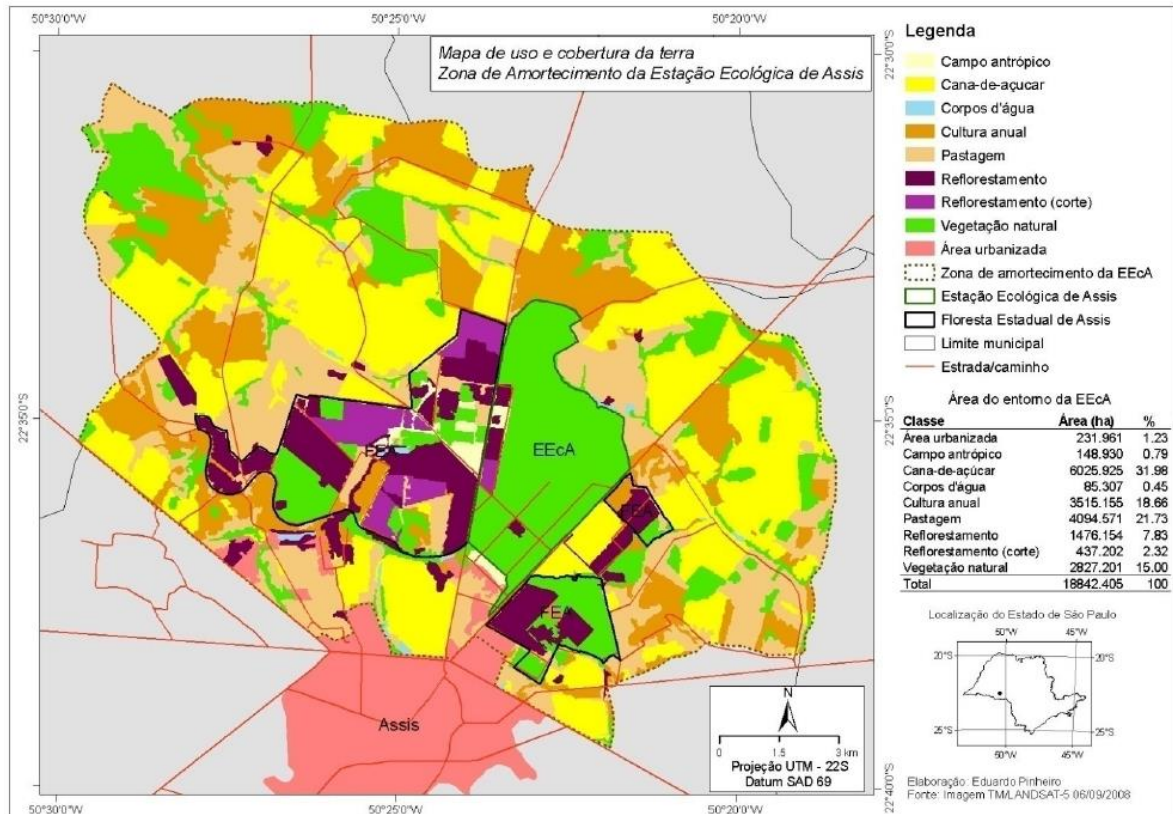
Sabe-se que todos os fragmentos remanescentes sofrem as consequências do isolamento, dos riscos de incêndio e de invasões biológicas. Com base nisso, o Plano de Manejo da Floresta Estadual de Assis estabeleceu zonas de recuperação em grandes áreas contíguas, nas quais os reflorestamentos de *Pinus sp.* e *Eucalyptus sp.* estão sendo gradativamente revertidos em vegetação de cerrado, resultando em considerável ampliação do habitat para a fauna silvestre na zona de entorno da unidade (IF, 2010).

Acerca dos recursos hídricos, o local possui em seu interior a nascente do principal manancial da região (ribeirão do Cervo) e detém todas as sub-bacias que abastecem o reservatório da SABESP de Assis, localizadas total ou parcialmente na Zona de Amortecimento da Unidade de Conservação (UC). Além disso, os corpos de água que compõem a rede de drenagem da Estação Ecológica (Palmitalzinho, Campestre, Xaxim e Pirapitinga) “tem suas nascentes no interior da UC. Esses córregos pertencem às unidades hidrográficas Pari e Capivara, integrantes da bacia hidrográfica do Rio Paranapanema” (IF, 2010, p.48). A Figura 7 ilustra o interior da EEcoA e a proteção dos recursos hídricos garantida pela preservação da vegetação.



**Figura 7:** Águas do córrego Campestre no interior da EEcoA. Fonte: IF, 2010.

A EEcoA e a FEA estão inseridas em um ambiente bastante modificado, entre diferentes culturas agrícolas e a área urbana, o que as tornam importantes reservatórios fornecedores de água para a região. A Figura 8 mostra o uso e cobertura da terra no entorno das áreas de conservação.



**Figura 8:** Mapa de uso e cobertura da terra no entorno da Estação Ecológica e Floresta Estadual de Assis-SP. Fonte: IF, 2010.

A escolha do local deve-se ao fato de que em um ecossistema florestal, parte da água da precipitação que infiltra permanece armazenada no subsolo ou acumulada no lençol freático, dando origem às nascentes de pequenos rios e suprimindo a necessidade hídrica dos ecossistemas locais (ANDRADE et al., 2008).

### 3.1.2. Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios (APTA)

Os poços de monitoramento, deste trabalho, estão instalados nas dependências do IAC/APTA – Pólo do Médio Paranapanema e são provenientes do projeto de “Ampliação e modernização da rede de monitoramento hidrológico na região do CBH-MP”, Figura 9 . Este projeto possibilitou a perfuração de onze poços de monitoramento com verbas do Fundo Estadual de Recursos Hídricos (FEHIDRO), os quais são monitorados sistematicamente pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE) desde 2008 (APTA, 2015). Destes poços, nove foram utilizados para as análises, sendo 8 poços rasos localizados próximos ao acesso da APTA e um poço tubular profundo de 60 metros.



**Figura 9:** Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios e os poços de monitoramento de 1 a 5. Fonte: Soldera, 2011; APTA, 2015.

Estes poços estudados estão geograficamente localizados entre as coordenadas 22°38'S e 50°23'W, em uma área de rotação entre o cultivo das culturas de milho e mandioca, operados por meio de técnicas mecanizadas (SOLDERA, 2011).

### **3.2. Modelagem dos dados**

#### ***3.2.1. Modelo PIRFICT***

O modelo PIRFICT (Predefined Impulse Response Function In Continuous Time) foi desenvolvido por Von Asmuth et al. (2002) para lidar com series cujas entradas e saídas apresentam diferentes frequências de observações e intervalos tempo irregulares. O modelo representa uma alternativa aos modelos de transferência de ruídos (FTR) em intervalos de tempo discretos, sendo o pulso de entrada transformado em uma série de saída por uma função de transferência em tempo contínuo, conforme pode ser observado na Figura 10. Os coeficientes dessa função não dependem da frequência de observação (YIHDEGO; WEBB, 2011).



**Figura 10:** Transformação da entrada para a saída no caso de um IR exponencial e de três blocos de pulsos com diferentes alturas e durações. Fonte: Adaptado de Von Asmuth, 2012.

Para o caso de um sistema linear simples, sem perturbações freáticas, que é influenciado somente pela precipitação excedente, o modelo FTR, escrito como uma convolução integral (Equações 1, 2 e 3), pode ser usado para descrever a relação entre alturas de lençol freático e a precipitação excedente (VON ASMUTH et al., 2002; MAZIONE, 2007):

$$h(t) = h(t) + d + r(t) \quad (1)$$

$$h^*(t) = \int_{-\infty}^t p(\tau)\theta(t - \tau)d\tau \quad (2)$$

$$r(t) = \int_{-\infty}^t \phi(t - \tau)dW(\tau) \quad (3)$$

onde:  $h(t)$  é a altura de lençol freático observada no tempo  $t$  [T];  $h^*(t)$  é a altura de lençol freático predita no tempo  $t$  creditado ao excedente de precipitação relativa a  $d$  [L];  $d$  é o nível de  $h^*(t)$  sem a precipitação, ou em outras palavras o nível da drenagem local, relativo a superfície do solo [L];  $r(t)$  é a série dos resíduos [L];  $p(\tau)$  é a intensidade do excedente de precipitação no tempo  $t$  [L/T];  $\theta(t)$  é a função de transferência de impulso/resposta (IR) [-];  $\phi(t)$  é a função IR do ruído [-]; e  $W(t)$  é um processo de ruído branco contínuo (Wiener) [L], com propriedades  $E\{dW(t)\}=0$ ,  $E[\{dW(t)\}^2]=dt$ ,  $E[dW(t_1)dW(t_2)]=0$ ,  $t_1 \neq t_2$ .

O nível da drenagem local  $d$  é obtido a partir dos dados conforme a Equação 4, sendo  $N$  o número de observações de alturas de lençol freático, conforme Von Asmuth (2012):

$$d = \frac{\sum_{i=0}^N h(t_i)}{N} - \frac{\sum_{i=0}^N h^*(t_i)}{N} - \frac{\sum_{i=0}^N r(t_i)}{N} \quad (4)$$

Considerando a linearidade no sistema, a função IR é estimada a partir da correlação entre a série de precipitação excedente, descontando a evapotranspiração, e a altura do lençol freático, o que permite modelar as flutuações nos níveis freáticos. Como a precipitação excedente é o componente de maior influência nas flutuações dos níveis freáticos, o componente relacionado ao ruído pode ser atribuído a causas não climáticas como, por exemplo, o uso da terra e a extração da água subterrânea, o que resulta em uma tendência nos resíduos quando as variáveis explicativas são consideradas (YIHDEGO e WEBB, 2011). As influências não climáticas podem ser modeladas como uma terceira variável de entrada nas series temporais, possibilitando quantificar seus efeitos. A validação do modelo pode ser obtida a partir do uso da autocorreção, da correlação cruzada, da matriz de covariância e da variância das funções de impulso e resposta, como descrita em Von Asmuth (2012).

Neste sentido, várias tensões importantes podem ser identificadas. Para este trabalho, os estresses considerados são frutos da precipitação ( $p$ ) e da evaporação ( $e$ ). Ainda que, de um ponto de vista físico, um sistema de água do solo seja suscetível a responder aos múltiplos de estresses de formas diferentes, também há certas tensões que causam respostas bastante semelhantes. Tais tensões não precisam, necessariamente, gerar funções de resposta separadas. Por exemplo, o efeito de evaporação ( $e$ ) na profundidade do nível freático ( $h$ ) é essencialmente a mesma que a precipitação ( $p$ ), mas com efeito negativo, e pode ser modelado pela Equação 5 (VON ASMUTH, 2008):

$$h_e(t) = \int_{-\infty}^1 -e(\tau) f \theta_p (1 - \tau) d\tau \quad (5)$$

sendo,  $\theta_p$  a resposta do sistema de precipitação e  $f$  uma redução da  $e$  quando em comparação com a série de referência evaporação. O fator de evaporação  $f$  é um parâmetro constante que se relaciona com a cobertura da terra.

A área e forma da função IR (Pearson tipo III) dependem das circunstâncias hidrológicas locais. A opção por esse tipo de função dá-se por sua natureza flexível, ajustando-se a uma grande gama de respostas hidrológicas. A função de distribuição de Pearson III (PIII df) assume formas que variam gradualmente de curva exponencial à uma

gaussiana, segundo os valores de seus parâmetros (MANZIONE et al., 2010). Nesse caso, os parâmetros podem ser definidos segundo Von Asmuth et al. (2002):

$$\theta(t) = A \frac{a^n t^{n-1} e^{-at}}{\Gamma(n)} \quad (6)$$

$$\phi(t) = \sqrt{2\alpha\sigma_r^2} e^{-\alpha t} \quad (7)$$

onde  $\theta(t)$  é uma função de distribuição Pearson tipo III (PIII df, ABRAMOWITZ; STEGUN, 1965);  $A$ ,  $a$ ,  $n$ , são os parâmetros da curva ajustada,  $\Gamma(n)$  é a função Gamma e  $\alpha$  controla a taxa de decaimento de  $\phi(t)$  e  $\sigma_r^2$  é a variância dos resíduos.

Os parâmetros da Equação 6 possuem sentido físico, conforme assinalado por Von Asmuth e Knotters (2004). Desta forma, parâmetro  $A$  relaciona-se com a resistência a drenagem (a área da função de IR é igual à razão entre a altura média do lençol freático e a recarga média). O parâmetro  $a$  é determinado pelo coeficiente de armazenamento do solo (porosidade) e  $n$  pelo tempo de convecção e dispersão da precipitação pela zona não saturada. As bases físicas são explicadas por funções de transferência de uma série de reservatórios lineares. O parâmetro  $n$  demonstra o número de reservatórios e  $a$  é igual ao inverso do coeficiente de reservatório normalmente usado. Um reservatório linear (PIII df com  $n=1$ ) é igual a um simples modelo físico de coluna de solo unidimensional, descartando fluxo lateral e o funcionamento da zona não-saturada (KNOTTERS; BIERKENS, 2000).

Segundo Manzione (2015), o modelo PIRFICT é capaz de lidar com qualquer frequência de dados por ser contínuo no tempo, fazendo com que os intervalos das séries de saída não sejam determinados pela frequência de entrada. Isto representa uma das vantagens do modelo, uma vez que as séries temporais de níveis de águas subterrâneas são, geralmente, coletadas de forma manual e não equidistantes, contendo dados ausentes.

Além disso, as funções matemáticas do modelo possuem bases físicas. A seleção dessas funções é feita através de um procedimento iterativo de identificação do modelo, estimativa, diagnóstico e checagem. A vantagem dos procedimentos em PIRFICT sobre os modelos discretos consiste em: uma função IR contínua pode ter uma forma flexível e se assemelhar a uma série de funções de transferência autorregressiva de média móvel (ARMA); a etapa de identificação é simplificada, pois a frequência de observações não interfere

em seus parâmetros e a flexibilidade de uma simples função IR contínua pode compreender inúmeras variedades de funções de transferência ARMA; o modelo pode ser rapidamente identificado quando se tem o conhecimento físico das condições hidrogeológicas locais (VON ASMUTH et al., 2002; MANZIONE, 2015).

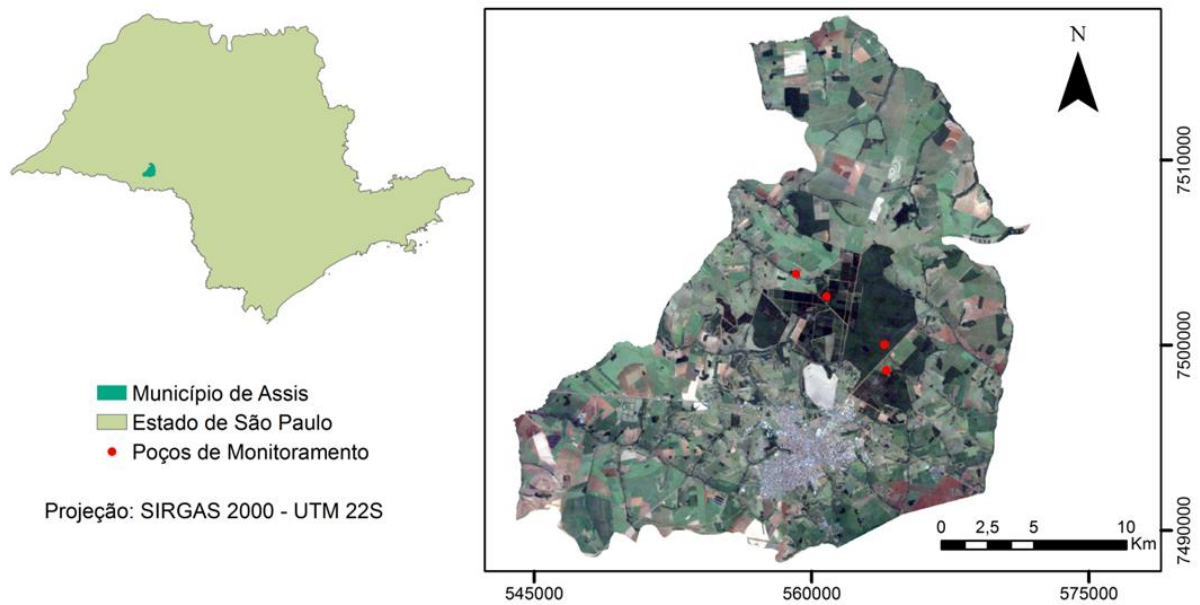
### **3.3. Dados de monitoramento**

Na EEcoA, os níveis foram medidos em um poço de monitoramento de 60 metros, com uma frequência diária, através de um transdutor eletrônico de pressão instalado em um piezômetro em seu interior. Esse poço faz parte da RIMAS (Rede Integrada de Monitoramento de Águas Subterrâneas) operada pela CPRM (Serviço Geológico do Brasil). A série de observação do nível das águas subterrâneas cobre o período entre novembro de 2010 e novembro de 2014.

Na APTA, a medição foi realizada semanalmente pela equipe do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE), entre março de 2008 e maio de 2015. Esta área foi dividida em duas partes com base na proximidade dos poços com a rede de drenagem do córrego da Veada. Assim, os oito poços localizados mais próximos da drenagem foram identificados como APTA\_baixo. E o poço a montante do córrego que se encontra próximo a uma estação meteorológica, como de APTA\_EM.

Os poços da FEA foram divididos em três áreas: FEA, FEA\_BP e Vêncio. Estas áreas são monitoradas pela equipe do Instituto Florestal de Assis que conduz experimentos de recomposição de mata ciliar utilizando diferentes espécies florestais.

A divisão das áreas fez-se necessária devido às oscilações nos níveis freáticos responderem de formas distintas aos eventos de precipitação, segundo as condições particulares dos meios em que se encontram. A localização dos poços pode ser visualizada na Figura 11.



**Figura 11:** Localização dos poços no município de Assis/SP.

A área chamada de FEA diz respeito a quatro parcelas de recomposição florestal bem definidas, as quais são feitas através do plantio de *Pinus* (*Pinus sp.*), *Tapirira* (*Tapirira sp.*), angico-do-cerrado (*Anadenanthera falcata*) e uma misturas de espécies nativas, como pode ser visto nas Figuras de 12 a 14. Em cada uma dessas parcelas estão instalados dois piezômetros, um próximo ao curso d'água (Ribeirão do Barro Preto) e outro 10 metros a montante deste, sendo dois por parcela, num total de oito poços de monitoramento. Os dados foram coletados entre março de 2008 e dezembro de 2014.

Os poços FEA\_BP também se localizam próximo ao Ribeirão do Barro Preto, totalizando mais de quarenta poços dispostos ao longo de seu curso. Entretanto, os monitoramentos de seus níveis tiveram início em outubro de 2013, cobrindo um período até abril de 2015, neste estudo.



**Figura 12:** Parcela de recomposição com *Pinus* e serapilheira formada nesta parcela.



**Figura 13:** Parcela de recomposição referente ao cultivo florestal de *Tapirira*.



**Figura 14:** Parcela de recomposição feita com angico-do-cerrado (*Anadenthera falcata*).

As análises das séries de precipitação e evapotranspiração tiveram como base os dados disponibilizados pelo Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas (CIIAGRO ONLINE – [www.ciiagro.sp.gov.br](http://www.ciiagro.sp.gov.br)) da estação meteorológica localizada na APTA. Para tal, estes dados foram coletados semanalmente e organizados entre os anos de 2002 e 2015. A série de evapotranspiração foi padronizada pelo método Penman-Monteith, reconhecido pela FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), conforme descrito em Allen et al. (1998), levando-se em consideração o coeficiente de cultura.

As análises preliminares dos dados foram realizadas através de estatísticas exploratórias, verificando medidas de posição (média), dispersão (desvio padrão, variância) e forma (assimetria e curtose), para um melhor conhecimento e entendimento dos conjuntos trabalhados. Foram verificadas as características das séries temporais, como as funções de autocorrelação (FAC) e autocorrelação parcial (PFAC), a fim de inferir o tipo de processo que ocorre com os dados (autoregressivo, média móvel).

Por fim, para compreender a relação dinâmica entre as variáveis climáticas e as flutuações dos níveis do lençol freático, foi utilizado o modelo de transferência de ruído PIRFICT, implementado através do programa Menyanthes (KWR WATERWARE, 2012).

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **4.1. Análise exploratória dos dados**

A análise exploratória garante um amplo repertório de métodos para o estudo detalhado dos dados, antes de adaptá-los às necessidades do analista (MEDRI, 2011). Além da construção de tabelas e gráficos, foi elaborada uma análise que abrange cálculos de medidas estatísticas que resumiram as informações obtidas, fornecendo uma visão geral dos dados. Dentre elas, as utilizadas foram as medidas de tendência central (ou de posição), as medidas de dispersão (ou de variabilidade) e as medidas de forma (estatísticas descritivas da distribuição) (MEDRI, 2011).

As medidas denominadas de tendência central foram aquelas capazes de resumir uma série de dados em um ou mais valores que a representam em sua totalidade. Estes valores caracterizaram uma sumarização do conjunto de mensurações e seus cálculos dependem da natureza da distribuição, do tipo de dados e das propriedades dos valores escolhidos.

Entre os vários tipos de medidas de posição destacam-se a média aritmética que divide a soma de todos os valores da série pelo número de observações e a mediana que é o valor que ocupa a posição central de uma série ordenada de forma crescente, dividindo a distribuição em duas partes iguais: 50% acima e 50% abaixo do seu valor. Foram calculados, ainda, os quartis das séries, fracionando-as em quatro partes (BUSSAB; MORETTIN, 2010; FERREIRA, 2005; MEDRI, 2011).

Para as análises descritivas dos dados de medições dos níveis freáticos, os poços de monitoramento foram agrupados segundo suas localizações. Uma vez que a variabilidade nas flutuações dos poços de mesma área se mostrou bastante similar, optou-se por sumarizar esses dados em blocos contendo valores médios apresentados pelas séries históricas. A Tabela 1 mostra os valores de tendência central calculados.

**Tabela 1:** Medidas de posição amostral calculadas para as séries temporais analisadas

MEDIDAS	EEcoA	APTA_EM	APTA_baixo	Vêncio	FEA (recomposição)	FEA_BP
Média	-30,18	-10,33	-3,06	-1,09	-1,82	-2,28
Mediana	-30,28	-10,37	-2,96	-1,09	-1,84	-2,28
Mínimo	-30,54	-12,21	-4,46	-1,38	-2,17	-2,77
1º quartil	-30,39	-10,81	-3,27	-1,21	-1,98	-2,51
3º quartil	-29,93	-9,95	-2,70	-0,97	-1,71	-2,12
Máximo	-29,72	-8,67	-1,58	-0,67	-1,26	-1,69

O “resumo de um conjunto de dados por uma única média representativa de posição central esconde toda a informação sobre a variabilidade do conjunto de observações” (BUSSAB; MORETTIN, 2010, p. 38). Para que isto seja superado, um dos critérios frequentemente utilizados é aquele que mede a dispersão dos dados em torno de sua média, sendo os mais comuns a variância e o desvio padrão. A variância caracteriza-se como a soma dos quadrados do desvio médio de uma mostra, mostrando-se uma boa opção se a distribuição dos dados for aproximadamente normal, indicando quão longe os seus valores se encontram do valor que se espera. A variância é zero quando todas as mensurações são iguais entre si e cresce à medida que se aumentam as diferenças (dispersão) entre os elementos do conjunto. Já, o desvio padrão corresponde à raiz quadrada da variância, sendo expresso na mesma unidade dos dados e, por esta razão, possui significado físico e de maior facilidade de interpretações. Assim, a dispersão de conjunto de dados é a variabilidade que estes apresentam entre si. Se todos os valores forem iguais, não há dispersão, sendo baixa quando os valores são próximos uns dos outros e elevada quando valores são muito diferentes entre si (BUSSAB; MORETTIN, 2010; FERREIRA, 2005; LANNA, 2007; MEDRI, 2011)

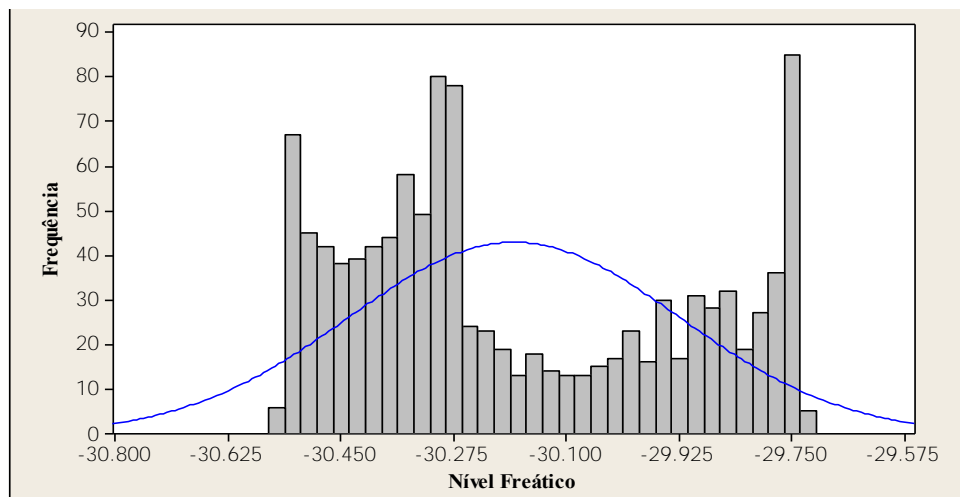
Neste trabalho, foram calculadas, ainda, os valores máximos, mínimos, amplitude total e o coeficiente de variação que, segundo Gomes (2000), podem ser classificados como baixos quando inferiores a 10%, médios entre 10 e 20%, altos entre 20 e 30% e muito altos se superiores a 30%. A Tabela 2 mostra os resultados das medidas de dispersão dos poços de monitoramento.

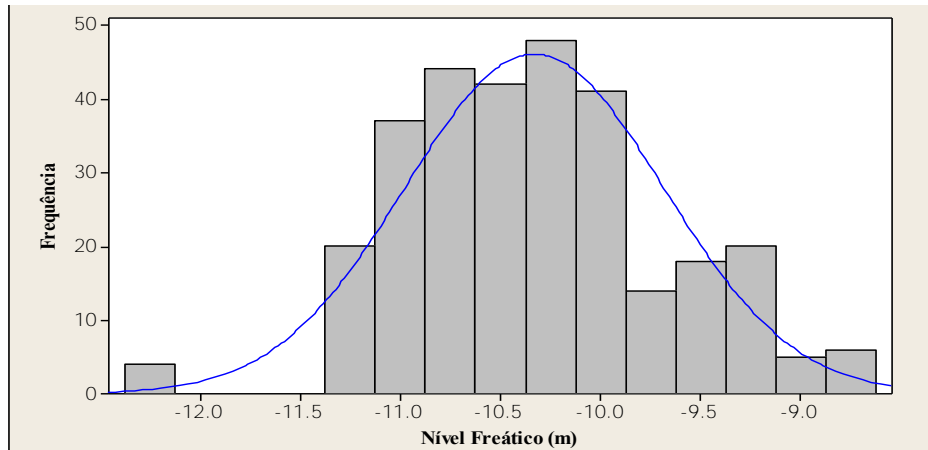
**Tabela 2:** Medidas de dispersão amostral calculadas para as séries temporais analisadas.

MEDIDAS	EEcoA	APTA_EM	APTA_baixo	Vêncio	FEA (recomposição)	FEA_BP
Amplitude Total	0,82	3,54	2,87	0,71	0,91	1,08
Variância	0,07	0,42	0,30	0,03	0,04	0,07
Desvio Padrão	0,26	0,65	0,54	0,16	0,19	0,27
Coefficiente Variação	0,01	0,06	0,18	0,15	0,08	0,13

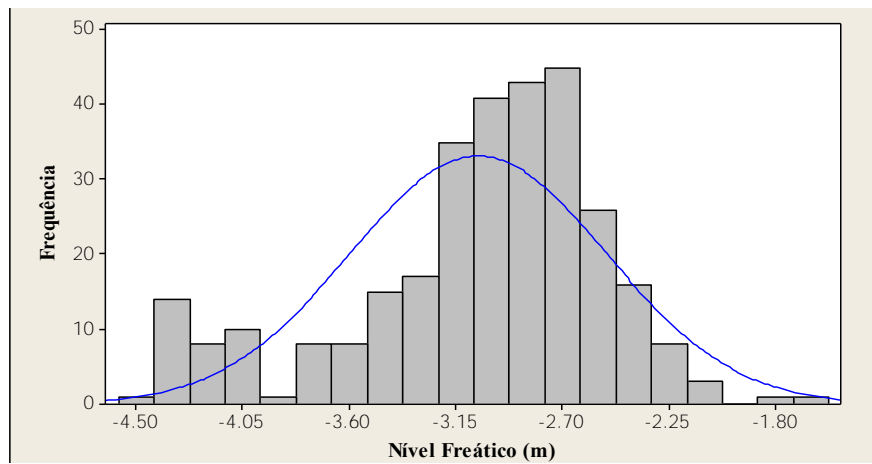
Observa-se que os coeficientes de variação caracterizaram-se como baixos na maioria dos poços e como médios na APTA\_baixo e no Vêncio. Além disso, tem-se que nos poços APTA os níveis apresentaram uma amplitude total maior que nas outras áreas, mostrando a influência que a rotação dos cultivos e o preparo do solo exercem nas flutuações dos níveis freáticos.

As medidas de posição e de variação possibilitaram descrever estatisticamente um conjunto de dados. Entretanto, uma vez que estas podem assumir praticamente qualquer forma, foi importante verificar o comportamento geral dessa distribuição através da distribuição de frequência e de histograma. As Figuras de 15 a 20 mostram a distribuição da frequência de dados por meio de histogramas para poços de monitoramento.

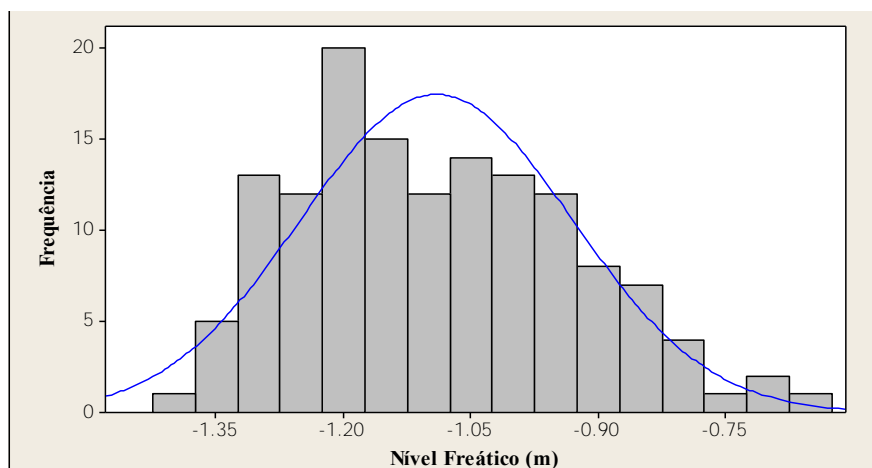
**Figura 15:** Histogramas dos poços de monitoramento da Estação Ecológica de Assis (EEcoA).



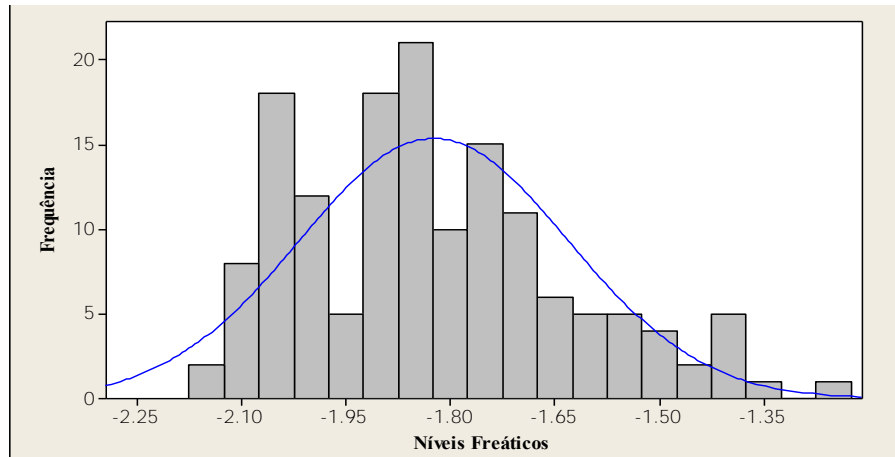
**Figura 16:** Histogramas do poço de monitoramento da estação meteorológica da APTA.



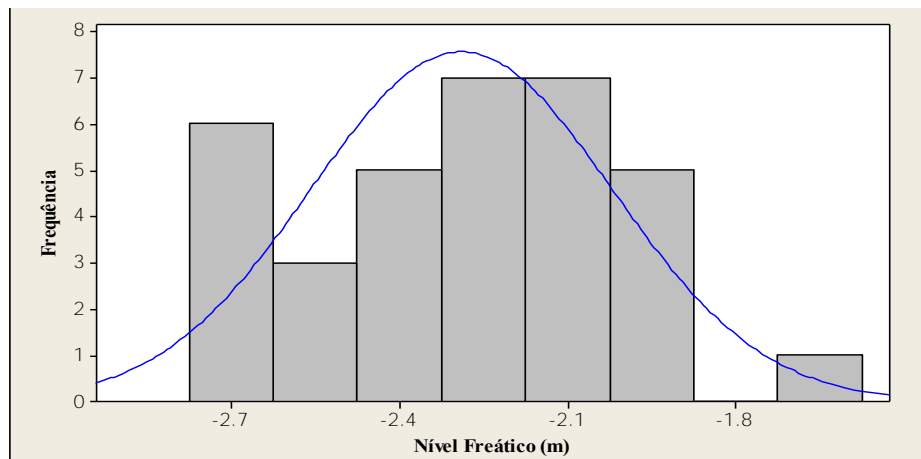
**Figura 17:** Histogramas dos poços de monitoramento próximos à rede de drenagem da APTA.



**Figura 18:** Histogramas dos poços de monitoramento do Vêncio.



**Figura 19:** Histogramas dos poços de monitoramento das parcelas de recomposição da FEA.



**Figura 20:** Histogramas dos novos poços de monitoramento da FEA (2013 -2015).

Uma vez que as distribuições de dados podem assumir praticamente qualquer forma, as consideradas simétricas se apresentam em forma de sino, em que a metade da esquerda do seu histograma é aproximadamente a imagem-espelho da metade direita. E, as distribuições assimétricas apresentam uma “cauda” em uma das extremidades que, quando á direita é positivamente assimétrica e, quando à esquerda, é negativamente assimétrica. Neste sentido, calcula-se, também, a curtose - pois se refere ao grau de achatamento de uma distribuição em relação a uma distribuição padrão, denominada de curva normal - e o grau de assimetria, cuja intensidade e sinal indicam sua direção. Assim, o valor em módulo do Coeficiente de Pearson indica a intensidade da assimetria, e o seu sinal indica a direção, desta forma: se  $0,15 \leq |As| \leq 1$ , então a assimetria é moderada; se  $|As| > 1$ , a assimetria é forte; se  $As < 0$ , a assimetria é negativa e, se  $As > 0$ , a assimetria é positiva. Já, para coeficientes de curtose (CC), tem-se que:  $CC = 0$ , distribuição mesocúrtica (distribuição normal);  $CC < 0$ , distribuição platicúrtica (curva de frequência mais aberta ou achatada em sua parte superior) e,

$CC > 0$ , distribuição leptocúrtica (apresenta uma curva de frequência mais fechada, aguda em sua parte superior). As características das distribuições dos poços de monitoramento podem ser observadas conforme através da Tabela 3 (BUSSAB; MORETTIN, 2010; FERREIRA, 2005; MEDRI, 2011, MAGRINI, 2013).

**Tabela 3:** Medidas de forma amostral calculadas para as séries temporais analisadas.

MEDIDAS	EEcoA	APTA_EM	APTA_baixo	Vêncio	FEA (recomposição)	FEA_BP
Coefficiente de Assimetria	1,54	0,18	-0,79	0,57	0,38	0,05
Coefficiente de Curtose	0,85	0,03	0,38	-0,18	-0,50	-0,62

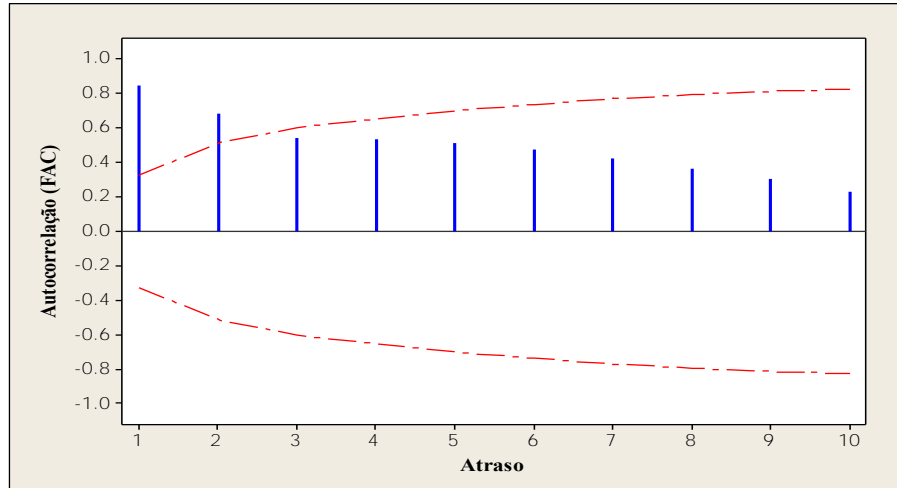
Com base nos resultados encontrados, nota-se que o coeficiente de assimetria se mostrou moderado em todos os poços, exceto na EEcoA cujo valor indicou forte assimetria. Além disso, o coeficiente de assimetria se mostrou negativo apenas na área dos poços localizados próximos ao curso d'água na APTA (APTA\_baixo).

Acerca do coeficiente de curtose, tem-se que os poços da APTA\_EM foram os que mais se aproximaram de uma distribuição normal ( $CC=0,03$ ). Nas áreas da EEcoA e da APTA\_baixo, foram encontradas distribuições platicúrtica e nas áreas do Vêncio, FEA (recomposição) e FEA\_BP, as distribuições configuraram-se como leptocúrtica.

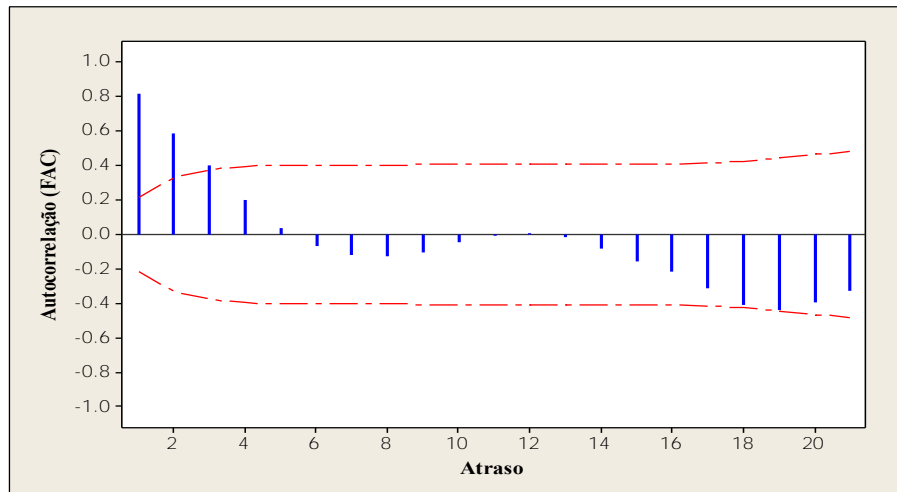
#### 4.2. Funções de autocorrelação (FAC) e autocorrelação parcial (PFAC)

A FAC indicou o grau de correlação entre os instantes de tempo de uma variável analisada na serie histórica, sendo importante para entender os processos que caracterizam e que levam à formação desta série. Para conhecer a relação existente entre os diferentes instantes de tempo das observações dos níveis freáticos nos diferentes locais de estudo, os dados foram ajustados em uma frequência mensal (atraso mensal). As FAC mostraram-se parecidas entre os poços de uma mesma área. Desta forma, as Figuras de 21 a 26 exemplificam os processos que caracterizaram as séries temporais.

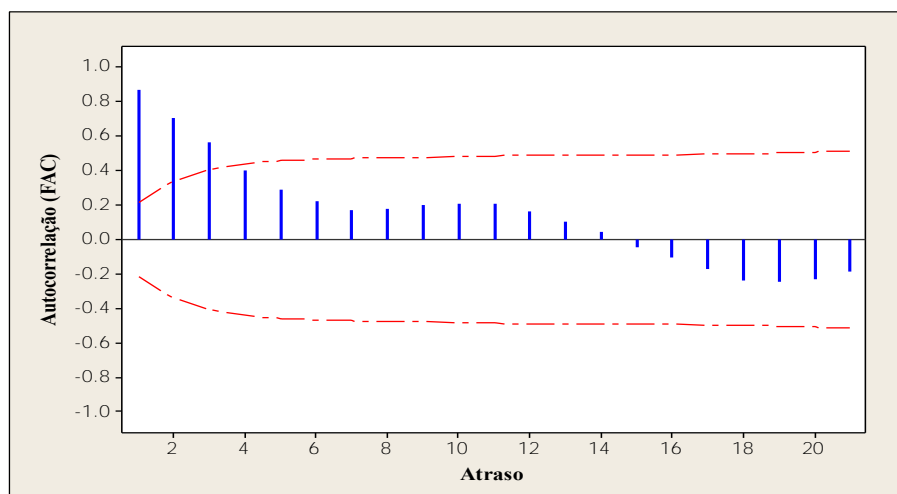
As PFACs medem a intensidade da relação entre duas observações da série e controlam (mantendo constante) o efeito das demais. Suas análises serviram como um diagnostico complementar à FAC e podem ser visualizadas no APÊNDICE 2.



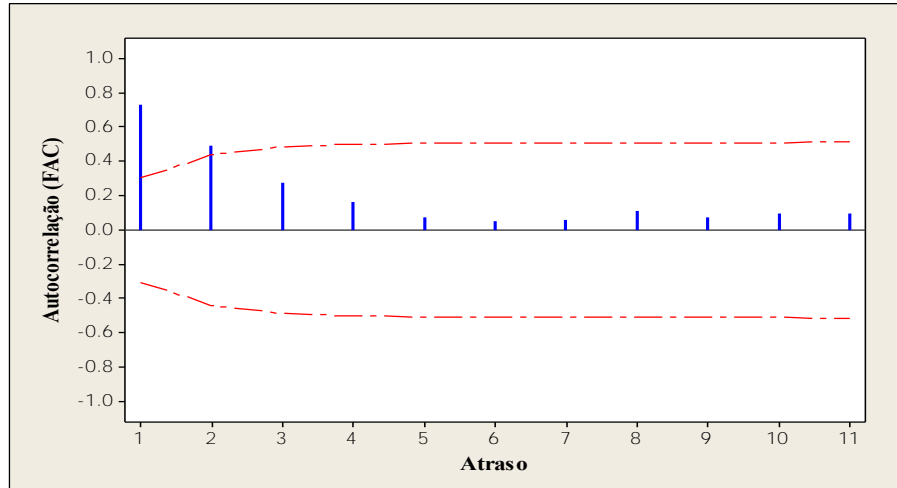
**Figura 21:** Função de autocorrelação (FAC) para o poço de monitoramento da EEcoA.



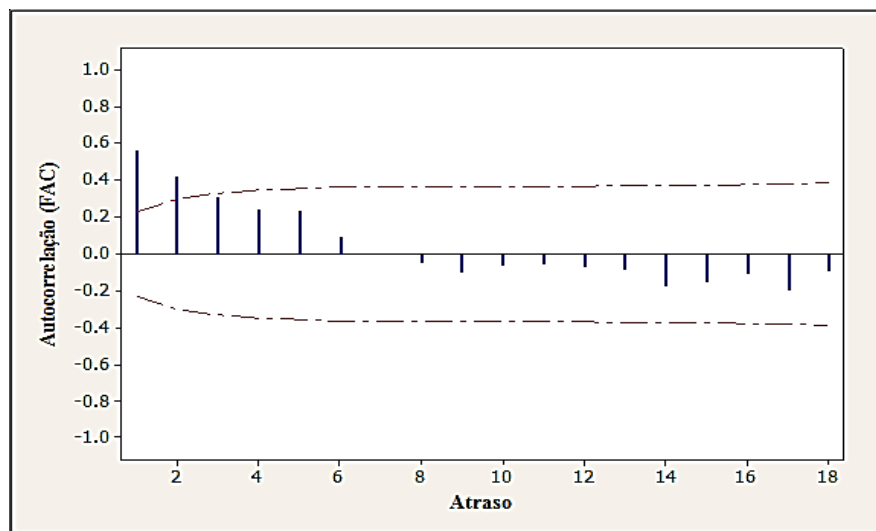
**Figura 22:** Função de autocorrelação (FAC) para o poço de monitoramento da estação meteorológica da APTA\_EM.



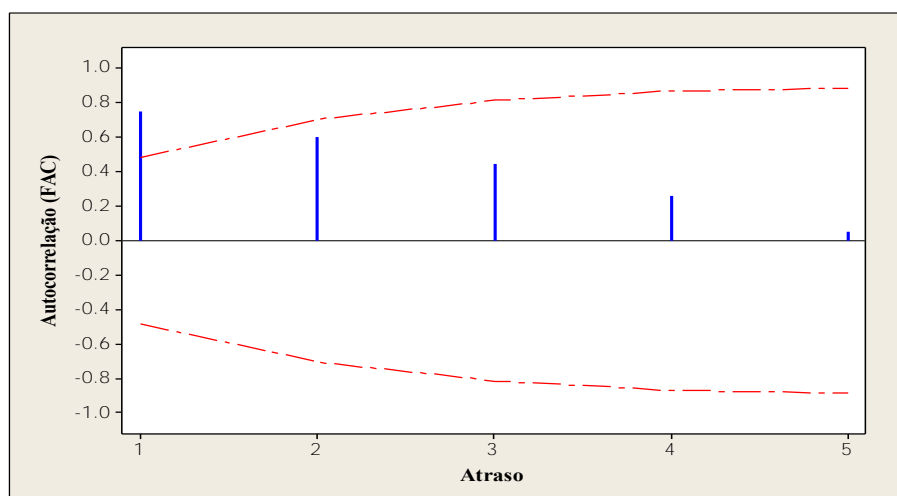
**Figura 23:** Função de autocorrelação (FAC) para o poço de monitoramento "P7" da APTA\_baixo.



**Figura 24:** Função de autocorrelação (FAC) para o poço de monitoramento “V9” do Vêncio, na FEA.



**Figura 25:** Função de autocorrelação (FAC) para o poço de monitoramento da parcela de recomposição com angico-de-cerrado (PAB), na FEA.



**Figura 26:** Função de autocorrelação (FAC) para o poço de monitoramento v26 das séries entre 2013 e 2015 da FEA, Ribeirão do Barro Preto (FEA\_BP).

A partir das FACs calculadas para uma frequência mensal de observações, verificou-se que os processos formadores das séries se caracterizaram como ARMA (autorregressivo e média móvel). Isso pode ser notado devido à dependência temporal entre as observações que decai ao longo do tempo em ciclos que variam de 5 a 7 meses, dependendo do caso e da profundidade dos níveis.

No poço da EEcoA, os níveis vão caindo ao longo do tempo de forma mais gradual, demorando um comportamento mais influenciado pelos níveis da água subterrânea como escoamento de base do que pela sazonalidade climática, uma vez que a vegetação não se altera na área de preservação. Nos poços da APTA, observa-se que o grau de dependência entre as séries decresce mais rapidamente na parte mais elevada do local (APTA\_EM), enquanto que nos poços próximos da rede de drenagem, esta dependência permanece por elevada por mais tempo, assim como na EEcoA. Isso também indica que no poço APTA\_EM, os níveis são mais influenciados pelos padrões sazonais do clima e nos poços da APTA\_baixo mais influenciados pelo córrego localizado a poucos metros.

Nos poços do Vêncio e nas parcelas de recomposição da FEA o comportamento da série é semelhante de um processo ARMA, com um decréscimo exponencial (processo autoregressivo) em janelas de aproximadamente 5-6 meses (processo média móvel).

As séries de monitoramento da FEA\_BP são mais curtas, por isso, a configuração do atraso para cinco meses dá somente indícios da natureza do processo, semelhante aos outros casos. As PFACs variaram, aproximadamente, entre zero e 0,2 em todos os poços, remetendo a uma fraca, porém constante correlação temporal.

### **4.3. Calibração dos dados pelo modelo PIRFICT aos poços da EEcoA e APTA**

Utilizando as séries históricas de precipitação e evapotranspiração como variáveis de entrada, o modelo PIRFICT foi calibrado com base nas séries temporais dos níveis freáticos do SAB para os poços de monitoramento da EEcoA e da APTA\_EM. Os resultados da calibração encontram-se na Tabela 4.

**Tabela 4:** Estatísticas da calibração do modelo PIRFICT às séries temporais observadas.

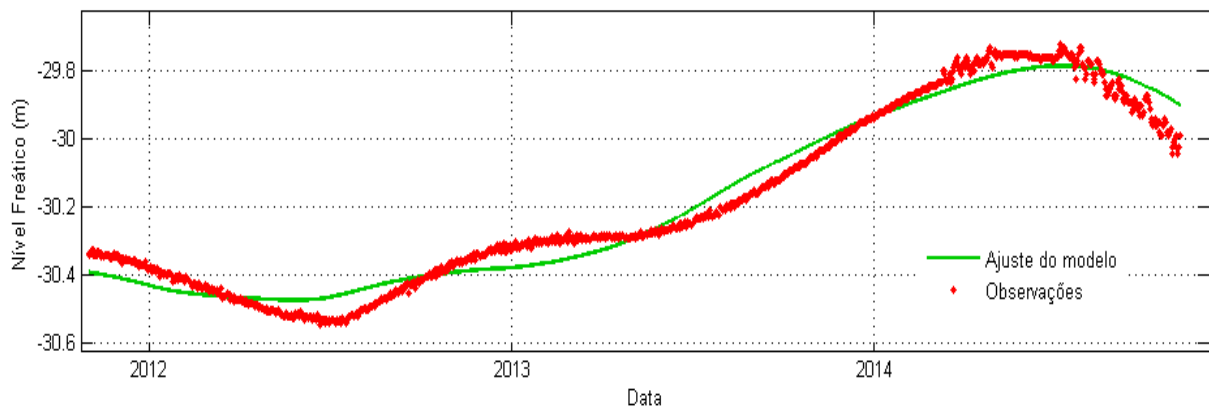
ID	EVP (%)	RMSE (m)	RMSI (m)
EEcoA	96,60	0,05	0,01
APTA_EM	86,80	0,25	0,12

EVP: variância explicada pelo modelo; RMSE (m): corresponde à raiz do erro quadrático médio; RMSI (m): erro do modelo entre um instante  $t$  em relação à  $t-1$ .

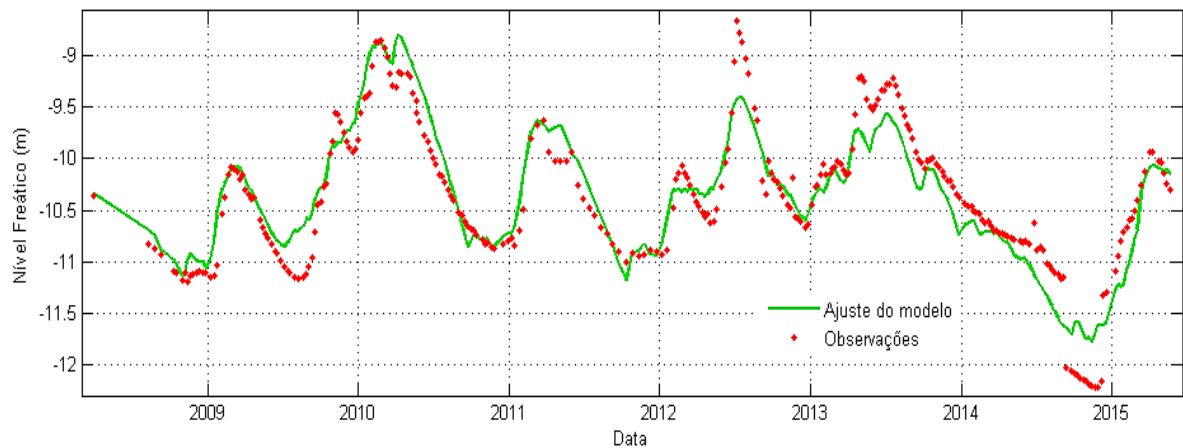
Por meio dos Percentuais da Variância Explicada pelo modelo (EVP), nota-se que houve um bom ajuste em ambos os poços de monitoramento. Apesar do poço da EEcoA apresentar um melhor ajuste, os valores da Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) mostraram-se baixos em ambos os casos, cerca de 5 cm na EEcoA e cerca de 25 cm na APTA. O mesmo se aplica aos valores da Raiz das Inovações Quadráticas Médias (RMSI), que são de 12 cm na APTA e de 1 cm na EEcoA, aproximadamente. Este parâmetro corresponde ao erro do modelo entre um instante  $t$  em relação à um instante anterior  $t-1$ .

A diferença dos valores de RMSE e RMSI encontrados nos poços ocorre principalmente pela irregularidade entre as séries observadas. Tem-se que as observações no poço da EEcoA são mais frequentes e possuem um espaçamento regular de tempo entre uma medição e outra. No poço da APTA, há uma menor quantidade de dados e uma frequência de monitoramento menos regular.

Entretanto, outros fatores podem causar estas diferenças estatísticas. Tais como, a proximidade dos níveis freáticos com a superfície, as condições físicas particulares do meio, a vegetação local e o uso do solo (VON ASMUTH, 2012). As Figuras 27 e 28 mostram os ajustes das séries dos níveis freáticos às variáveis de entrada.



**Figura 27:** Comparação entre os dados observados e calibrados pelo modelo PIRFICT para o poço EEcoA.



**Figura 28:** Comparação entre os dados observados e calibrados pelo modelo PIRFICT para o poço da APTA.

Na Figura 27, verifica-se que a linha ajustada (verde) acompanha os valores de observação registrados em campo (vermelho). Já na Figura 28, a linha ajustada não segue tão fielmente os valores das observações, cabendo à função IR capturar a relação dinâmica entre as variáveis de entrada e os níveis freáticos observados.

A calibração também possibilitou estimar os parâmetros de caráter físico que influenciam na oscilação dos níveis freáticos e os desvios padrões, conforme se observa na Tabela 5.

**Tabela 5:** Parâmetros físicos estimados através da calibração do modelo PIRFICT.

POÇO	$A$	$a$	$n$	$E$	$\alpha$
EEcoA	133684 (2,5.10 <sup>5</sup> )	0,0004 (2,8.10 <sup>-4</sup> )	2,54 (0,12)	0,08 (0,10)	47,01(10,86)
APTA_EM	1018 (47)	0,0064 (5,4.10 <sup>-4</sup> )	1,37 (0,05)	0,57 (0,07)	50,10 (9,76)

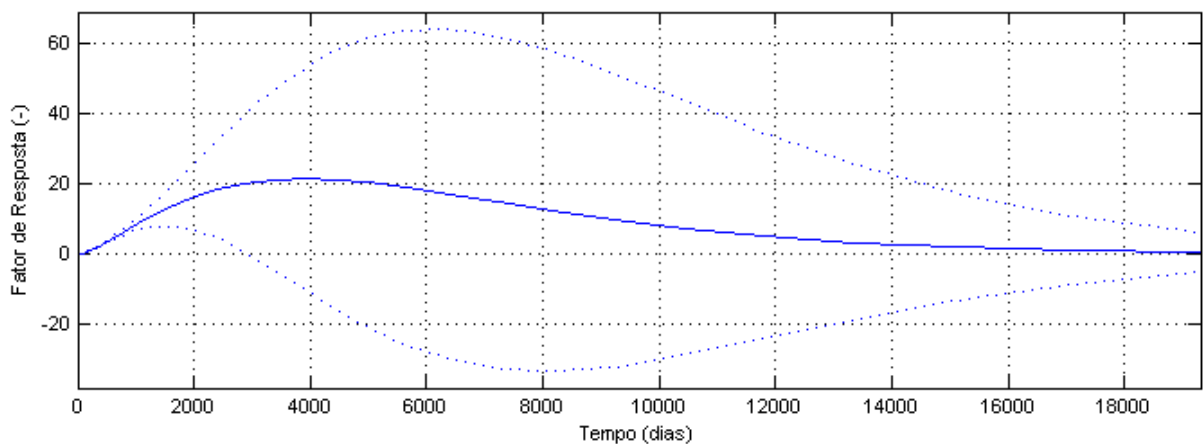
$A$ =resistência à drenagem (dias);  $a$ =coeficiente de armazenamento no solo (1/dias);  $n$ =tempo de convecção e dispersão (dias);  $E$  = fator de correção da evapotranspiração (-);  $\alpha$ = ruído branco.

Desta forma, tem-se que o parâmetro  $A$ , por definição, refere-se à resistência à drenagem apresentada pelo meio. Assim, com o aumento dessa resistência em função da espessura do meio poroso, a percolação da água ocorre mais lentamente. Por isso o parâmetro  $a$ , relacionado à porosidade, comporta-se de maneira inversa, sendo maior onde a resposta é mais rápida. O parâmetro  $n$  refere-se ao número de reservatórios lineares (de mesma característica) que se encontram acima do lençol freático. E, por fim, parâmetro  $E$  se relaciona ao ajuste da variável evapotranspiração, servindo como base para qualificar o desempenho do

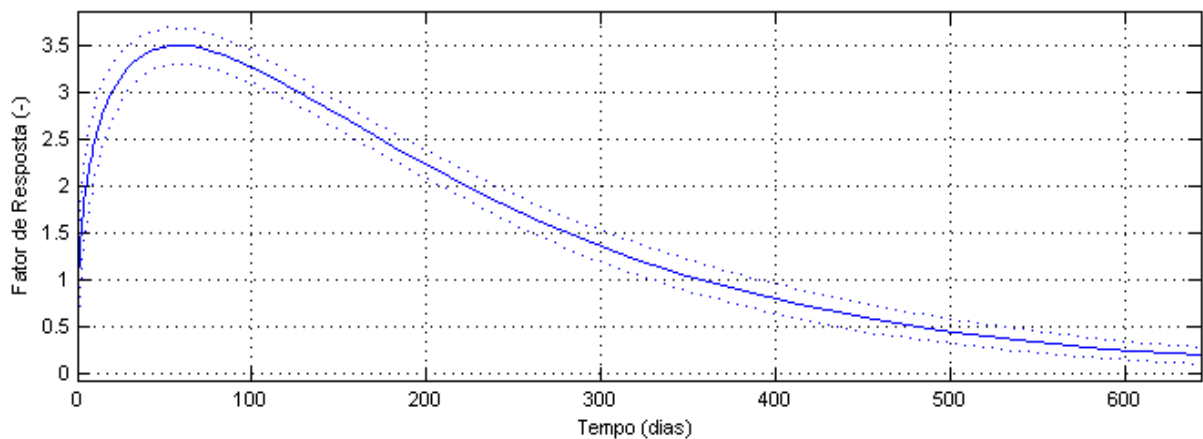
ajuste do modelo uma vez que, segundo Von Asmuth et al. (2002), este não deve ultrapassar o valor 3.

É importante ressaltar que quanto maior o parâmetro  $n$ , maior a influência da zona não saturada na dispersão da água no solo. Assim, aumentando este parâmetro, os pulsos gerados pela precipitação e evapotranspiração diminuem, causando um maior o atraso no tempo de resposta (VON ASMUTH, 2012). Tais informações são compatíveis com os dados ajustados pelo modelo, uma vez que na EEcoA são encontradas cerca de duas composições diferentes ( $n=2,54$ ), enquanto que na APTA apenas uma ( $n=1,37$ ). VON ASMUTH (2012) alerta que para casos onde  $n \neq 1$ , o parâmetro  $a$  referente à porosidade ou coeficiente de armazenamento não pode ser determinado exatamente.

As funções de impulso e resposta ajustadas aos dados caracterizaram uma relação dinâmica entre as variáveis explicativas (precipitação e evapotranspiração) e os níveis freáticos. As Figuras 29 e 30, a seguir, apresenta o momento em que os níveis respondem ao efeito da precipitação.



**Figura 29:** Função IR ajustada aos dados de monitoramento da EEcoA.



**Figura 30:** Função IR ajustada aos dados de monitoramento da APTA (EM).

Conforme o tipo de terreno e sua distribuição da paisagem, as águas subterrâneas interagirão de maneiras singulares (WINTER et al., 1998). Os caminhos da água subterrânea variam muito em comprimento, profundidade e tempo de trânsito, a partir dos pontos de recarga para pontos de descarga no sistema de águas subterrâneas. Os níveis freáticos do poço de monitoramento da EEcoA são mais profundos quando comparados aos da APTA, apresentando uma resposta mais demorada aos estímulos da precipitação. Isto pode ser observado, também, através das áreas encontradas nos gráficos das funções de IR calculadas pelo modelo. Tais áreas representam a zona não saturada pela qual a água deve percolar até gerar algum impacto nos níveis freáticos. Assim, nota-se que a EEcoA possui uma zona superficial não saturada maior que a encontrada na APTA, bem como uma resposta mais tardia aos estímulos.

A oscilação do poço da EEcoA é relativamente pequena, com uma diferença de 1,37 cm entre o nível médio mais baixo e o nível médio mais alto, enquanto que na APTA essa diferença foi de 3,54 cm. Nesses casos, a influência da vegetação presente nas áreas de cada poço pode ser verificada. Onde existem cultivos agrícolas, o uso do solo muda com uma frequência alta, de 3 a 4 meses, em virtude do ciclo das culturas ali desenvolvidas. Aliado ao preparo do solo, isso faz com que a água não seja apenas consumida pelas plantas, mas também percole e exerça influência na dinâmica dos níveis. Já na área da EEcoA, a vegetação de cerrado é adaptada à seca, fazendo com que seu desenvolvimento e evapotranspiração diminuam muito na ausência de água e volte a funcionar nos períodos mais úmidos. Assim, com a entrada da precipitação no sistema, o sistema radicular dessas plantas intercepta a maior parte desse conteúdo, fazendo com que pouca água atinja o lençol freático e exerça influência sobre ele.

Desta forma, percebe-se que o comportamento do lençol na área da APTA é mais sensível às variações sazonais e às práticas agrícolas ali desenvolvidas, denotando células de fluxo local, enquanto que na EEcoA os dados de monitoramento refletem o escoamento de base para a drenagem mais próxima, influenciada principalmente pelo fluxo intermediário/regional das águas subterrâneas. Isso justifica o alto valor estimado para o parâmetro  $A$  e o grande intervalo de confiança estipulado na função IR, para o poço da EEcoA.

#### 4.4. Calibração dos dados pelo modelo PIRFICT aos poços da APTA (baixo), Vêncio e FEA

Optou-se por organizar em um único tópico os blocos com os poços de monitoramento da APTA, Vêncio e FEA devido à proximidade destes com redes de drenagem, tais como ribeirão do Barro Preto e córrego da Veada. Ao longo das análises, percebeu-se que esta proximidade exerce forte influência nas águas subterrâneas em questão e, por consequência, nas estimativas dos parâmetros físicos realizadas pelo modelo PIRFICT.

Primeiramente, as séries históricas dos níveis freáticos foram calibradas com base nos dados de entrada de precipitação e evapotranspiração. As tabelas 6, 7 e 8 mostram as estatísticas destes ajustes.

**Tabela 6:** Estatísticas de calibração do modelo PIRFICT às séries temporais das alturas do lençol freático observadas nos poços da APTA

POÇO	EVP (%)	RMSE (m)	RMSI (m)
P1	79,3	0,253	0,128
P2	80,4	0,244	0,104
P3	80,3	0,245	0,117
P5	79,3	0,166	0,112
P6	79,2	0,256	0,122
P7	79,8	0,258	0,126
P8	79,7	0,255	0,118
P9	81,3	0,244	0,124
Média	79,9	0,240	0,119

EVP: variância explicada pelo modelo; RMSE (m): corresponde à raiz do erro quadrático médio; RMSI (m): erro do modelo entre um instante  $t$  em relação à  $t-1$ .

**Tabela 7:** Estatísticas de calibração do modelo PIRFICT às séries temporais das alturas do lençol freático observadas nos poços do Vêncio

POÇO	EVP (%)	RMSE (m)	RMSI (m)
V1	80,2	0,049	0,045
V2	71,1	0,105	0,092
V4	74,9	0,098	0,074
V6	75,9	0,099	0,073
V8	76,7	0,112	0,083
V9	84,2	0,065	0,048
V15	78,2	0,045	0,037
V16	82,2	0,055	0,043
Média	79,2	0,075	0,061

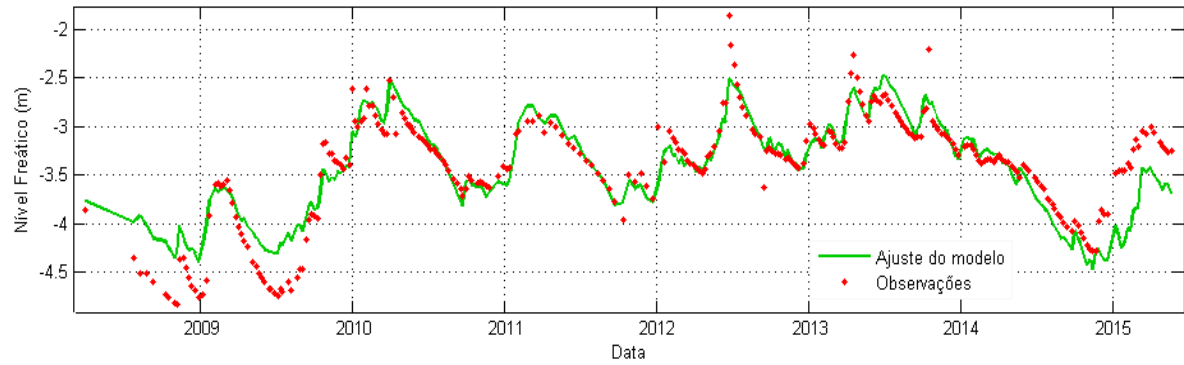
EVP: variância explicada pelo modelo; RMSE (m): corresponde à raiz do erro quadrático médio; RMSI (m): erro do modelo entre um instante t em relação à t-1.

**Tabela 8:** Estatísticas de calibração do modelo PIRFICT às séries temporais das alturas do lençol freático observadas nos poços da FEA

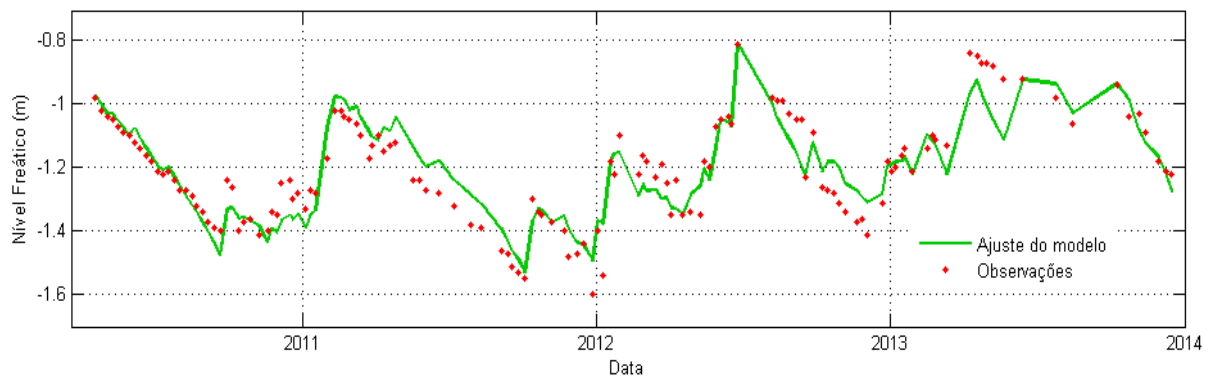
POÇO	EVP (%)	RMSE (m)	RMSI (m)
PAA	83,3	0,082	0,082
PAB	86,6	0,067	0,060
PMB	85	0,074	0,076
PPA	83,4	0,075	0,065
PPB	83,4	0,075	0,065
PTA	82,3	0,090	0,082
PTB	83,5	0,078	0,079
Média	83,9	0,077	0,073

EVP: variância explicada pelo modelo; RMSE (m): corresponde à raiz do erro quadrático médio; RMSI (m): erro do modelo entre um instante t em relação à t-1.

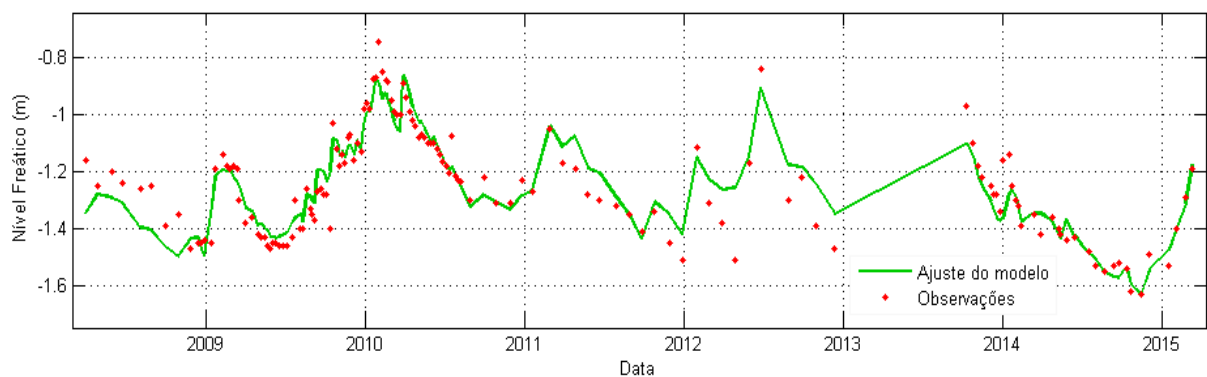
Os bons ajustes realizados pelo modelo possibilitaram transformar as séries de monitoramento com dados pontualmente observados (em datas definidas) em séries contínuas no tempo. As Figuras 31, 32 e 33 mostram os resultados destas transformações para os poços P9 (APTA), V9 (Vêncio) e para a parcela com plantio de angico-do-cerrado (PTA - FEA). Os ajustes para os demais poços encontram-se nos APÊNDICE 3, 4 e 5, pois os níveis flutuam de forma bastante similar dentro de suas respectivas áreas.



**Figura 31:** Modelo PIRFICT ajustado (linha) aos dados de observação de alturas do lençol freático (pontos) no poço de monitoramento “P9” da APTA.



**Figura 32:** Modelo PIRFICT ajustado (linha) aos dados de observação de alturas do lençol freático (pontos) no poço de monitoramento “V9” do Vêncio.



**Figura 33:** Modelo PIRFICT ajustado (linha) aos dados de observação de alturas do lençol freático (pontos) nos poços de monitoramento da FEA (parcela com angico-do-cerrado).

Através das Figuras de 31 a 33, é possível observar que os níveis da APTA variam em uma amplitude maior que os níveis do Vêncio e da FEA, reforçando a questão dos diferentes usos do solo. Além disso, nota-se a variação sazonal dos níveis freáticos que apresentam elevações em períodos chuvosos e diminuem nos períodos de seca. A presença de anos climatológicos atípicos também se faz muito perceptível ao longo das séries como, por

exemplo, a diminuição da precipitação em 2014 que ocasionou seca e quedas nos níveis freáticos.

Com relação aos parâmetros físicos, o modelo não conseguiu ajustes satisfatórios nos poços da APTA e do Vêncio. Isso se deve tanto pelo uso do solo quanto pela proximidade com redes de drenagem. A relação entre águas superficiais e subterrâneas, nestes locais, acontece com base nas interações entre rio e aquífero, sendo que, nas imediações da APTA, encontra-se uma lagoa que também exerce grande influência. As Tabelas 9 e 10 contêm as estatísticas das calibrações e os desvios padrões, entre parênteses, para cada ajuste.

**Tabela 9:** Parâmetros e desvios padrões estimados a partir da calibração pelo modelo PIRFICT para os poços da APTA

POÇO	$A$	$a$	$n$	$\alpha$
P1	$1,65 \cdot 10^6$ (1,30.10 <sup>8</sup> )	$1,22 \cdot 10^{-6}$ (9,60.10 <sup>-5</sup> )	0,966 (0,023)	55,92 (10,95)
P2	$1,30 \cdot 10^6$ (8,60. 10 <sup>7</sup> )	$1,37 \cdot 10^{-6}$ (9,60.10 <sup>-5</sup> )	0,951 (0,022)	80,90 (15,65)
P3	$1,45 \cdot 10^6$ (9,90. 10 <sup>7</sup> )	$1,32 \cdot 10^{-6}$ (9,50.10 <sup>-5</sup> )	0,960 (0,022)	66,25 (13,08)
P6	$1,83 \cdot 10^6$ (1,40.10 <sup>8</sup> )	$1,22 \cdot 10^{-6}$ (9,40.10 <sup>-5</sup> )	0,977 (0,023)	62,75 (12,05)
P7	$2,35 \cdot 10^6$ (2,00.10 <sup>8</sup> )	$1,03 \cdot 10^{-6}$ (9,00.10 <sup>-5</sup> )	0,982 (0,023)	62,67 (12,65)
P8	$1,94 \cdot 10^6$ (1,60.10 <sup>8</sup> )	$1,11 \cdot 10^{-6}$ (9,30.10 <sup>-5</sup> )	0,971 (0,023)	69,64 (13,30)
P9	$1,62 \cdot 10^6$ (1,20.10 <sup>8</sup> )	$1,22 \cdot 10^{-6}$ (9,10.10 <sup>-5</sup> )	0,962 (0,021)	56,37 (11,15)

$A$ =resistência à drenagem (dias);  $a$ =coeficiente de armazenamento no solo (1/dias);  $n$ =tempo de convecção e dispersão (dias);  $\alpha$ = ruído branco.

**Tabela 10:** Parâmetros e desvios padrões estimados a partir calibração pelo modelo PIRFICT para os poços do Vêncio

POÇO	$A$	$a$	$n$	$\alpha$
V1	$1,63 \cdot 10^3$ (1,50.10 <sup>3</sup> )	$2,86 \cdot 10^{-4}$ (3,2.10 <sup>-4</sup> )	0,839 (0,026)	9,44 (2,24)
V2	$9,96 \cdot 10^4$ (9,60. 10 <sup>6</sup> )	$2,39 \cdot 10^{-6}$ (2,9.10 <sup>-4</sup> )	0,785(0,031)	11,7 (2,47)
V4	$7,89 \cdot 10^4$ (3,50. 10 <sup>6</sup> )	$6,77 \cdot 10^{-6}$ (2,2.10 <sup>-4</sup> )	0,859 (0,030)	21,29 (5,03)
V6	$5,02 \cdot 10^4$ (8,70.10 <sup>5</sup> )	$1,06 \cdot 10^{-5}$ (1,9.10 <sup>-4</sup> )	0,843(0,024)	21,83 (3,82)
V8	$3,26 \cdot 10^4$ (2,40.10 <sup>5</sup> )	$2,48 \cdot 10^{-5}$ (2,1.10 <sup>-4</sup> )	0,865 (0,100)	21,78 (2,90)
V9	$8,37 \cdot 10^4$ (1,60. 10 <sup>6</sup> )	$6,98 \cdot 10^{-5}$ (1,5.10 <sup>-4</sup> )	0,890 (0,029)	22,68 (5,14)
V15	1,67 (3,10.10 <sup>3</sup> )	$2,70 \cdot 10^{-4}$ (6,2.10 <sup>-4</sup> )	0,873 (0,023)	16,96 (5,49)
V16	4681 (7,10.10 <sup>3</sup> )	$1,36 \cdot 10^{-4}$ (6,2.10 <sup>-4</sup> )	0,892 (0,046)	19,47(4,53)

$A$ =resistência à drenagem (dias);  $a$ =coeficiente de armazenamento no solo (1/dias);  $n$ =tempo de convecção e dispersão (dias);  $E$  = fator de correção da evapotranspiração (-);  $\alpha$ = ruído branco.

Segundo Winter et al. (1998), as duas formas mais frequentes de interação entre rios e águas subterrâneas são: correntes de ganho (ou rios efluentes), aonde o rio recebe as águas do aquífero através do seu leito, o que garante sua perenização em períodos de estiagem; e correntes de perda (ou rios influentes), na qual o fluxo do rio alimenta e abastece o aquífero, o que uma diminuição em sua vazão como consequência da recarga água

subterrânea. Ainda existem situações em que as cheias dos rios fazem com que as suas águas se movam para as bancadas do curso d'água, formando bancos de armazenamento. E quando os níveis se elevam mais que as bancadas formadas, a área da inundação recarrega as águas subterrâneas através das áreas alagadas.

Em estudos realizados por Soldera (2011), na área dos poços de monitoramento da APTA, mostraram que a permeabilidade na região da baixada (próxima à rede de drenagem) é bastante superior aos valores encontrados à montante, onde se localiza o poço da estação meteorológica analisado anteriormente. Além disso, relevo exerce um gradiente potencial da água para a baixada, o que faz com que área possua um fluxo subsuperficial constante. Além disso, próximo a estes poços, existe uma lagoa que acaba por influir naturalmente na dinâmica da água no solo.

As parcelas de recomposição da FEA apresentam em um estágio de recuperação mais avançado quando comparadas ao Vêncio (que também é parte de um projeto de recomposição). As técnicas de plantio e condução de mudas do local, descritas por Durigan e Silveira (1999) e por Gênova et al. (2007), tiveram início em meados dos anos 90. Desta forma, local não apresenta constantes perturbações (modificações) em sua estrutura (uso da terra), como ocorre nos poços da APTA.

Por isso, na FEA, o modelo apresentou boas estimativas dos parâmetros físicos do solo, conforme a Tabela 11. E a influência que a proximidade com o ribeirão do Barro Preto causa nos níveis dos poços monitorados pode ser observada através da função de IR encontrada (Figura 34).

**Tabela 11:** Parâmetros estimados a partir da calibração pelo modelo PIRFICT para os poços da FEA

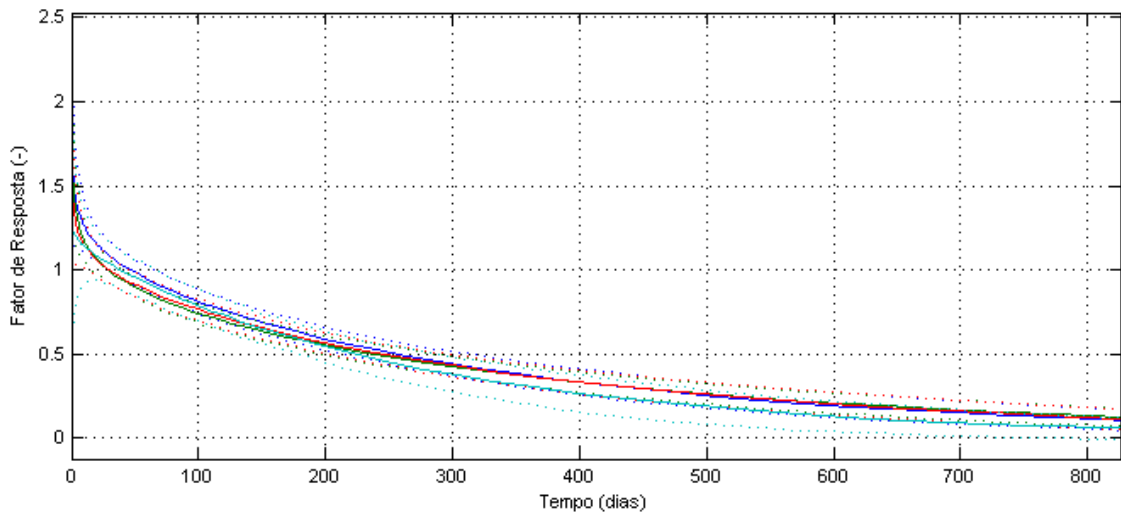
POÇO	<i>A</i>	<i>a</i>	<i>n</i>	<i>α</i>
FPAA	385,3 (44)	0,0025 (4,8.10 <sup>-4</sup> )	0,905 (0,041)	7,49 (1,81)
FPAB	387,9 (41)	0,0021 (3,6.10 <sup>-4</sup> )	0,879 (0,033)	17,96 (3,99)
FPMB	380,1 (42)	0,0024 (4,2.10 <sup>-4</sup> )	0,913 (0,038)	5,29 (1,26)
FPPA	312,4 (45)	0,0036 (9,3.10 <sup>-4</sup> )	0,976 (0,074)	25,83(5,68)
FPPB	387,6 (44)	0,0023 (4,1.10 <sup>-4</sup> )	0,921 (0,040)	22,31 (5,02)
FPTA	482,9 (56)	0,0021 (3,8.10 <sup>-4</sup> )	0,911 (0,039)	16,87 (3,74)
FPTB	344,2 (39)	0,0028 (5,3.10 <sup>-4</sup> )	0,919 (0,044)	6,19 (1,48)

*A*=resistência à drenagem (dias); *a*=coeficiente de armazenamento no solo (1/dias); *n*=tempo de convecção e dispersão (dias); *E* = fator de correção da evapotranspiração (-); *α*= ruído branco.

Os parâmetros estimados para os poços do ribeirão do Barro Preto mostraram que a água leva em média 383 dias para atingir a zona saturada e gerar uma resposta

nos níveis freáticos. Percebe-se que os parâmetros  $a$  e  $n$  apresentaram valores bastante semelhantes entre os poços de monitoramento, caracterizando uma homogeneidade nas características físicas do solo. Já, o parâmetro  $n$  estima que a água para chegar ao freático encontra apenas uma camada de solo com características físicas semelhantes, onde ocorre o processo de infiltração, representando somente um reservatório linear.

Apesar do bom ajuste do modelo às series históricas climatológicas, as funções de impulso e resposta justadas aos dados não caracterizaram a relação dinâmica entre as variáveis de entrada e as oscilações dos níveis freáticos, conforme pode ser observado na Figura 34.



**Figura 34:** Função de IR ajustada aos níveis dos poços de monitoramento das parcelas de recuperação do ribeirão do Barro Preto.

Através da função IR ajustada, nota-se que o local não é capaz de armazenar por muito tempo a água que percola e atinge o lençol freático. Observa-se que, em função escoamento subsuperficial, o fator relacionado à resposta dos níveis de água subterrânea cai para menos de 0,5 ao longo de, aproximadamente, duzentos dias em todos os poços.

#### **4.5. Calibração dos dados pelo modelo PIRFICT aos poços do Ribeirão do Barro Preto entre 2013 e 2015 e análise de tendências nos níveis freáticos**

O impacto das mudanças climáticas sobre o balanço hídrico é algo que vem sendo amplamente discutido. Em águas subterrâneas, o conhecimento das condições do clima é importante para o entendimento da dinâmica dos aquíferos e, um dos principais

elementos climatológicos associados às flutuações dos níveis freáticos é a precipitação. Como visto ao longo das discussões, períodos de seca tendem a causar o rebaixamento dos níveis que voltam a aumentar em períodos chuvosos. As informações extraídas dessa relação são importantes para o manejo e gestão das águas (HIRATA et al., 2010; NATKHIN et al. 2012).

Desta forma, realizou-se um estudo nos poços da Floresta Estadual que teve como objetivo avaliar o efeito da diminuição da precipitação, ocorrida no verão dos anos 2013/2014, nos níveis do lençol freático. Os poços escolhidos começaram a ser monitorados em outubro de 2013 e suas séries estendem-se até abril de 2015. Segundo Gonçalves et al. (2015), com base na distribuição espacial da precipitação acumulada no verão 2013/14, tem-se que a precipitação foi entre 15% e 50% menor que a média histórica dos últimos 10 anos, nas áreas de afloramento do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo.

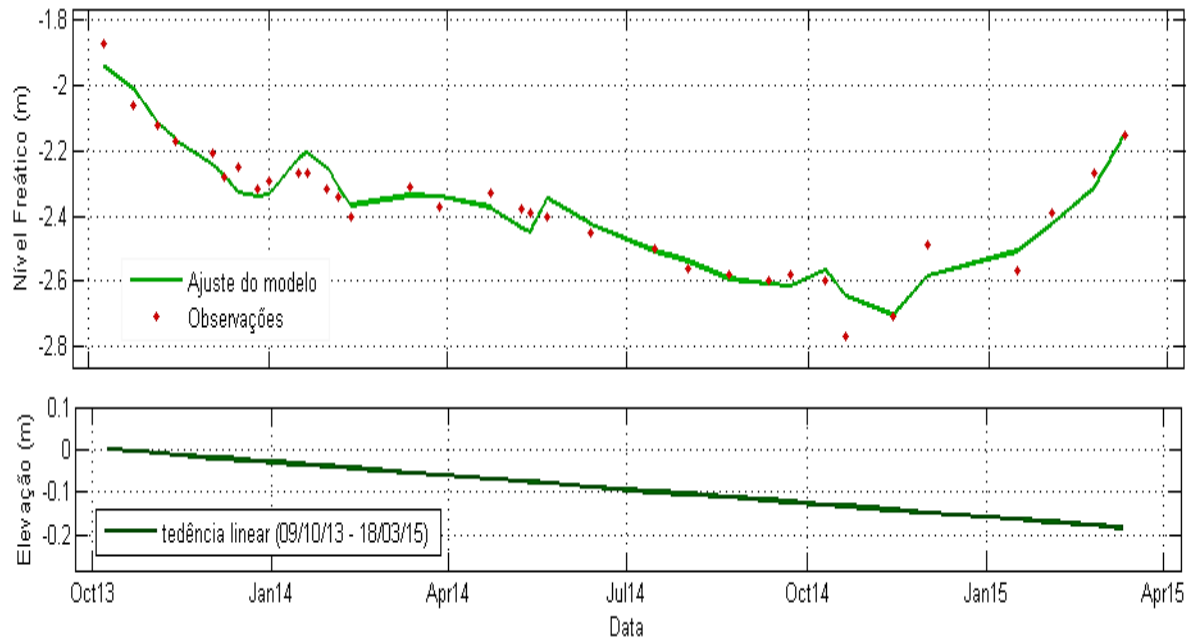
Para isso, realizou-se a ajuste dos níveis às variáveis de entrada (precipitação e evapotranspiração), conforme a Tabela 12. Ressalta-se que, nesta área, encontram-se 28 poços de monitoramento, entretanto a variação dos níveis ocorre de forma bastante similar e, por isso, optou-se por uma amostra com os dez poços que melhor se ajustaram às variáveis explicativas.

**Tabela 12:** Estatísticas da calibração do modelo PIRFICT às séries temporais observadas nos poços da FEA\_RP (2013 – 2015).

<b>POÇO FEA_RP</b>	<b>EVP (%)</b>	<b>RMSE (m)</b>	<b>RMSI (m)</b>	<b>NDB (m)</b>	<b>Tendência Linear (m)</b>
p14	93,1	0,049	0,045	-2,55	0,20
p20	92,5	0,059	0,069	-3,56	0,40
p23b	92,6	0,065	0,075	-3,30	0,40
p24	90,7	0,080	0,076	-3,18	0,40
p24b	93,2	0,067	0,071	-3,48	0,60
p25	93,2	0,073	0,080	-3,34	0,60
p25b	92,9	0,073	0,081	-2,92	0,6
p26	94,5	0,069	0,074	-3,73	0,6
p28b	93,4	0,077	0,089	-2,48	0,6
p29b	92,9	0,082	0,093	-3,53	0,8
Média	92,9	0,069	0,075	-3,21	0,52

EVP: variância explicada pelo modelo; RMSE (m): corresponde à raiz do erro quadrático médio; RMSI (m): erro do modelo entre um instante t em relação à t-1; NDB (m): nível da drenagem de base.

Analisando a tabela, observa-se que o modelo consegue explicar cerca de 93% da variância encontrada entre os dados, o que garante maior confiabilidade nas inferências da calibração. A partir destes ajustes, foi possível inserir a análise de tendências lineares sobre as flutuações dos níveis freáticos, conforme a Figura 35.



**Figura 35:** Tendência gerada para o poço 14 com base nas séries históricas de precipitação e evapotranspiração, entre outubro de 2013 e abril de 2015.

Durante o período observado, encontrou-se uma tendência de rebaixamento cerca de 20 cm (com rebaixamento médio estimado na área de 52 cm). Nota-se que mesmo com a recuperação dos níveis, em função do aumento dos índices pluviométricos em 2015, a tendência permaneceu decrescente, demonstrando, assim, o efeito em longo prazo que as mudanças geraram nas séries temporais. A permanência da influência desses efeitos nas séries varia de acordo as características do meio e uso da terra.

## 5. CONCLUSÕES

O modelo PIRFICT mostrou-se uma ferramenta bastante útil para as análises das séries temporais dos níveis freáticos do Sistema Aquífero Bauru, em Assis/SP. Os ajustes do modelo às variáveis de entrada permitiram transformar séries com observações pontuais em series contínuas no tempo, proporcionando uma melhor visualização das flutuações das águas subterrâneas. As análises das estimativas realizadas possibilitaram separar o efeito da variação climática dos efeitos causados pelos diferentes usos da terra.

Os resultados apresentaram comportamentos distintos entre os poços estudados. Na área da Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios (APTA), que se encontra mais afastada da rede de drenagem, e na Estação Ecológica de Assis (EecoA), as funções de impulso e resposta caracterizaram relações dinâmicas entre as variáveis de entrada e os níveis observados. Entretanto, na APTA, os níveis freáticos mostraram-se bastante suscetíveis às variações sazonais e às práticas agrícolas desenvolvidas, sendo que o tempo de resposta à perturbação gerada pela percolação da água denotou células de fluxos locais. Já, na EecoA, o atraso no tempo calculado para que ocorra alguma perturbação no lençol freático e a baixa frequência de impulsos gerados na série, remetem à possibilidade de que a recarga não ocorra diretamente no local, mas que suas oscilações estejam relacionadas a fluxos de intermediários a regionais, frutos da dispersão/percolação da água em áreas adjacentes.

As tendências estimadas para as séries com dados de monitoramento entre 2013 e 2015, dos poços da FEA, mostraram a forte relação entre a variação climática e os níveis freáticos. A queda dos índices pluviométricos em 2014 gerou uma tendência de

rebaixamento, entre 20 cm e 60 cm, que permaneceu mesmo com o aumento a precipitação no ano seguinte.

Desta forma, para que seja possível realizar uma gestão adequada das águas subterrâneas em áreas nos domínios do Sistema Aquífero Bauru, em consonância com o uso da terra e com a demanda por água das atividades nelas desenvolvidas, é necessário que sejam realizados estudos e monitoramentos contínuos para verificar o comportamento dos níveis freáticos frente a mudanças na cobertura da terra e alterações nos padrões climáticos.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAMOWITZ, M.; STEGUN, I. A. **Handbook of mathematical functions**. New York: Dover Publications Inc, 1965. 1046 p.

ANDRADE, N.L.R. et al. Macro-nutrients in the water sheet in Mature Forest, Management Forest and Pasture in the north of Mato Grosso. **Acta Amazônica**, v. 38, p. 667-671, 2008.

ALLEN R. G. et al. **Crop evapotranspiration** – Guidelines for computing crop water requirements. Roma: Food And Agriculture Organization Of The United Nations, 1998. 308 p. (FAO Irrigation and drainage paper 56).

APTA – AGÊNCIA PAULISTA DE TECNOLOGIA DOS AGRONEGÓCIOS. Pólo Médio Paranapanema. Disponível em: <http://www.aptaregional.sp.gov.br/polos-regionais/apta-regional-medio-paranapanema-assis.html>. Acesso em: mai/2015.

BAKER, T. J.; MILLER, S. N. Using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to assess land use impact on water resources in an East African watershed. **Journal of Hydrology**, v. 481-490, n. 486, p.100-111, 2013.

BENETTI, A.; BIDONE, F. O meio ambiente e os recursos hídricos. In: TUCCI, C.E.M. *et al.* **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. UFRGS/ABRH, Porto Alegre, 2007. p. 855 - 859.

BEZERRA, M. I. S. **Apostila de análise de séries temporais**. Apostila para o curso de Estatística, DMEC/ FCT / UNESP, Presidente Prudente, 2006. 84p.

BONGIOVANNI, S. **Caracterização geológica do município de Assis**: a importância do estudo das coberturas cenozóicas. 2008. 218 f. Tese (Doutorado em Geologia Regional) Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2008.

BOX, G. E. P.; JENKINS, G. M. **Time series analysis: forecasting and control**. 2 ed. San Francisco: Holden-Day, 1976. 575 p.

BUSSAB, W. O.; MORETTIN, P. A. **Estatística Básica**. 6ª edição. São Paulo. Editora Saraiva, 2010. 534 p.

CAICEDO, N.L. Águas Subterrâneas. In: TUCCI, C.E.M. *et al.* **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. UFRGS/ABRH, Porto Alegre, 2007. p. 289-316.

CBH-MP – COMITÊ DE BACIA HIDROGRÁFICA DO MÉDIO PARANAPANEMA.  
**Plano de Bacia da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Médio Paranapanema (UGRHI-17)**: Relatório Final. Marília: CBH-MP, 2007.

CEPAGRI - CENTRO DE PESQUISAS METEOROLÓGICAS E CLIMÁTICAS  
APLICADAS À AGRICULTURA. **Clima dos municípios de São Paulo**. Disponível em:  
<http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima-dos-municipios-paulistas.html>. Acesso em: mai/2015.

COWPERTWAIT, P.S.P.; METCALFE, A.V. **Introductory Time Series with R**. 6ª edição. Springer. 2009. 256 p.

CPTI - COOPERATIVA DE SERVICOS, PESQUISAS TECNOLOGICAS E INDUSTRIAIS. **Diagnóstico da situação dos Recursos Hídricos da UGRH 17, Médio – Paranapanema**: Relatório Zero. São Paulo, 1999. 1 CD-ROM.

CPRM - COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINEIRAIS. **Implantação de Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas**. Disponível em: [http://rimasweb.cprm.gov.br/layout/pdf/proposta\\_monitoramento\\_CPRM\\_2009.pdf](http://rimasweb.cprm.gov.br/layout/pdf/proposta_monitoramento_CPRM_2009.pdf). Acesso em: mai/2015.

DAEE/SERH - DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA; IG/SMA - INSTITUTO GEOLÓGICO; IPT/SCTDE - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS; CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Mapa de águas subterrâneas do Estado de São Paulo. Escala: 1:1.000.000**. São Paulo: Conselho Estadual de Recursos Hídricos, 2005.

DURIGAN, G.; RATTER, J. A. Successional changes in Cerrado and Cerrado/ forest ecotonal vegetation in western São Paulo State, Brazil, 1962-2000. **Edinburgh Journal of Botany**, v. 63, p. 119-130, 2006.

DURIGAN, G.; SILVEIRA, E. R. Recomposição de mata ciliar em domínio de cerrado, Assis, SP. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n.56, p.15-28, 1999.

FERREIRA, D.F. **Estatística Básica**. Lavras: Ed. UFLA, 2005. 664p.

GÊNOVA, K.B et al. Processos hidrológicos em diferentes modelos de plantio de restauração de mata ciliar em região de Cerrado. **Revista Instituto Florestal**. v.19, n. 2. p. 189 – 200. 2007.

GOMES, F.P. **Curso de estatística experimental**. 14.ed. Piracicaba: Degaspari, 2000. 477 p.

GONÇALVES, V. F. M. et al. Distribuição espacial da precipitação acumulada no verão 2013/14 nas áreas de afloramento do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo. In: **XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR**. 2015. João Pessoa. Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (ONLINE). INPE: 2015. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/sumario.htm>. Acesso em: jun./2015.

HIPPEL, K. W.; McLEOD, A. I. **Time series modelling of water resources and environmental systems**. Elsevier, Amsterdam, 1994. 1013 p.

IF – INSTITUTO FLORESTAL. **Plano de Manejo**: Estação Ecológica de Assis (SP). 171p. São Paulo: IF, 2010.

IRITANI, M. A.; EZAKI, S. **As águas subterrâneas do Estado de São Paulo**. 3 ed. São Paulo: Secretaria do Estado do Meio Ambiente- SMA, 2012.

HIRATA, R. et al. Águas subterrâneas: reserva estratégica ou emergencial. In: Bicudo, C. E.; Tundisi, J. G.; Scheuenstuhl, M. **Águas do Brasil**: análises estratégicas. 1ed. São Paulo: Instituto de Botânica, v. 1, 2010. p. 149-164.

KNOTTERS, M. **Analysis of hydrological time series**: an introduction into discrete linear process. Wageningen: [s.n.], 2004. 25p.

\_\_\_\_\_ ; BIERKENS, M. F. P. Physical basis of time series models for water table depths. **Water Resources Research**, v. 36, p. 181-188, 2000.

KWR WATERWARE. Menyanthes. Disponível em: <<http://www.menyanthes.nl/>>. Acesso em: mai/2015.

LANNA, A.E. Elementos da estatística e probabilidades. In: TUCCI, C.E.M. *et al.* **Hidrologia**: Ciência e Aplicação. UFRGS/ABRH, Porto Alegre, 2007. p. 79 – 176; p.727-768.

MAGRINI, A. **Medidas de forma**. Disponível em: [www.magrini.eng.br](http://www.magrini.eng.br). Acesso em: jan./2015.

MANCUSO, M. A.; CAMPOS, J. E. Aquífero Bauru. In: ROCHA, G. (coord). **Mapa de águas subterrâneas do Estado de São Paulo**: escala 1:1000000: nota explicativa. São Paulo. DAEE/SERH - DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA; IG/SMA - INSTITUTO GEOLÓGICO; IPT/SCTDE - INSTITUTO DE PESQUISAS

TECNOIÓLOGICAS; CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL.. São Paulo: Conselho Estadual de Recursos Hídricos, 2005.

MANZIONE, R. L. **Regionalized spatio- temporal modeling of water table depths in the Brazilian Cerrado**. 2007. 141 p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto)- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2007.

\_\_\_\_\_. Incorporação de incertezas associadas à predição de modelos hidrológicos aos instrumentos de gestão dos recursos hídricos. **Caderno Prudentino de Geografia**. n. 36, p. 215 – 227, 2014.

\_\_\_\_\_; et al. Modelagem de níveis freáticos em área de recarga do Sistema Aquífero Guarani sob diferentes usos do solo. In: **XVI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas e XVII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços**, 2010, São Luis. Anais XVI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas e XVII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços. São Paulo, ABAS: 2010. CD-ROM.

\_\_\_\_\_. **Águas Subterrâneas: Conceitos e aplicações sob uma visão interdisciplinar**. Jundiaí: Paco Editorial, 2015. 386 p.

MEAULO, F. **Vulnerabilidade natural à poluição dos recursos hídricos subterrâneos da área de Araraquara (SP)**. 2004. 108f. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2004.

MEDRI, W. **Análise exploratória de dados**. Disponível em:

[http://www.uel.br/pos/estatisticaeducacao/textos\\_didaticos/especializacao\\_estatistica.pdf](http://www.uel.br/pos/estatisticaeducacao/textos_didaticos/especializacao_estatistica.pdf).

Acesso em: jan./2015.

MESTRINHO, S. S. P. Monitoramento em água subterrânea. In: FEITOSA, F.A.C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A. **Hidrogeologia: Conceitos e aplicações**. CPRM/LABHID, Rio de Janeiro, 2008. p. 673-686.

NATKHIN, M. Differentiating between climate effects and forest growth dynamics effects on decreasing groundwater recharge in a lowland region in Northeast Germany. **Journal of Hydrology**. v. 448. p. 245-254. 2012.

NOSETTO, M. D. et al. The hydrologic consequences of land cover change in central Argentina. **Agriculture, Ecosystems and Environment: Ecosystem Services and Land-Use Policy**, v. 151-160, p.2-11, 2012.

OAS/GEF (Organization of American States / Global Environment Facility). **Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible Integrado del SAG**. Montevideo, 2001. 133 p.

PERROTTA, M. M. et al. **Mapa Geológico do Estado de São Paulo**, escala 1:750.000. São Paulo: CPRM, 2005.

SILVA, F.P. et al. Hidroestratigrafia do Grupo Bauru (K) no Estado de São Paulo. **Águas Subterrâneas**, v.19, n.2, p.19-36, 2005.

SETTI, A. A. et al. **Introdução ao gerenciamento dos recursos hídricos**. 2 ed. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas, 2000, 207 p.

SOARES, P. C. et al. Ensaio de caracterização estratigráfica do cretáceo no Estado de São Paulo: Grupo Bauru. **Revista Brasileira de Geociências**. São Paulo, v. 10, p. 177-185, 1980.

SOLDERA, B. C. **Monitoramento dos níveis freáticos do Aquífero Bauru (Formação Adamantina) no município de Assis (SP)**. 2011. 75 p. Trabalho de Conclusão de Curso em Geografia – UNESP, Ourinhos. 2011.

\_\_\_\_\_ ; MANZIONE, R. L. Modelagem de níveis freáticos no Sistema Aquífero Bauru como ferramenta na gestão de recursos hídricos subterrâneos. **Ciência Geográfica**, v. 16, p. 54 – 61, 2012.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. 2 ed. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos / Editora da UFRGS, 2005. 678p.

\_\_\_\_\_. Hidrologia: Ciência e Aplicação. In: TUCCI, C.E.M. *et al.* **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. UFRGS/ABRH, Porto Alegre, 2007. p. 25 - 31.

VAN GEER, F. C.; ZUUR, A. F. An extension of Box-Jenkins transfer/noise models for spatial interpolation of groundwater head series. **Journal of Hydrology**, v. 192, 1997. p. 65-80.

VON ASMUTH, J. R. et al. Transfer function noise modelling in continuous time using predefined impulse response functions. **Water Resources Research**, v. 38, n.12, p. 23.1-23.12, 2002.

\_\_\_\_\_; KNOTTERS, M. Characterising groundwater dynamics based on a system identification approach. **Journal of Hydrology**, v. 296, p. 118-34, 2004.

\_\_\_\_\_; et al. Modeling time series of groundwater head fluctuations subjected to multiple stresses. **Ground Water**, v.46, p. 30-40, 2008.

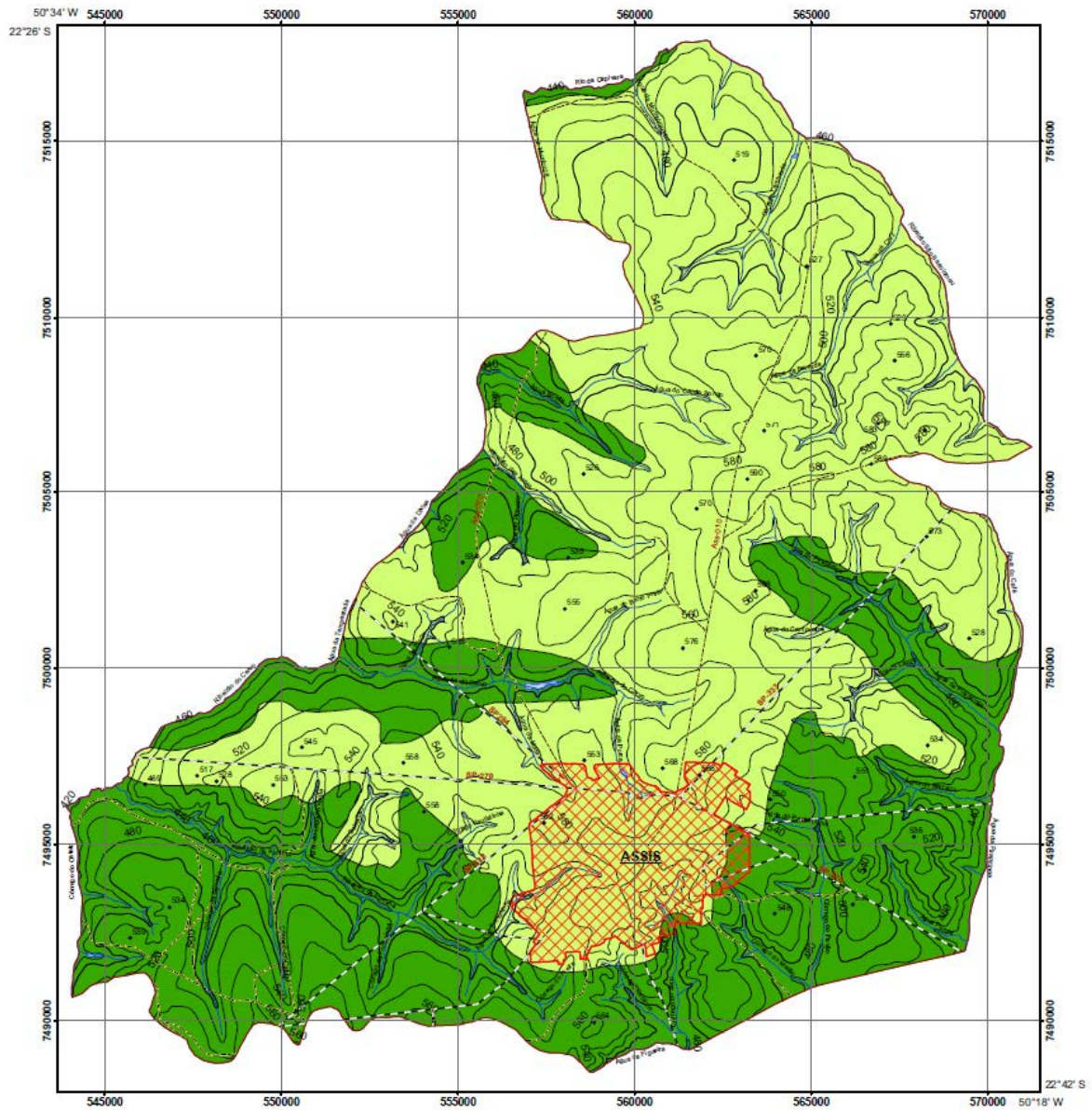
\_\_\_\_\_; **Groundwater system identification through time series analysis**. 221 p. Phd Thesis. TU Delft, Delft. 2012.

YIHDEGO, Y; WEBB, J.A. Modeling of bore hydrographs to determine the impact of climate and land-use change in a temperate subhumid region of southeastern Australia. **Hydrogeology Journal**, v.19, p.877-887, 2011.

WINTER, T.C. et al. **Ground water and surface water a single resource**. US Geological Survey, Denver, 1998.

ZIEMER, R. E. et al. **Signals and systems: continuous and discrete**. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 1998. 622p.

APÊNDICE 1 - Mapa geológico do município de Assis – SP. Geological map of Assis, SP.  
 Fonte: CPTI, 1999.



**LEGENDA**

Fm Adamantina (Ka) - arenitos finos a muito finos, siltos arenosos, arenitos argilosos, subordinadamente arenitos com granulometria média, quartzosos, localmente arcoseanos.

Fm Serra Geral (JKsg) - derrames basálticos toleíticos, textura afânica, com intercalações de arenitos finos a médios, intertrapeanos.

**CONVENÇÕES CARTOGRÁFICAS**

- Pontos cotados
- - Rodovia
- Estrada
- Curva de nível
- Drenagem
- Lagoa
- ⊠ Área Urbana

N

**Escala 1: 110 000**

0 0,5 1 2 3 4 Km

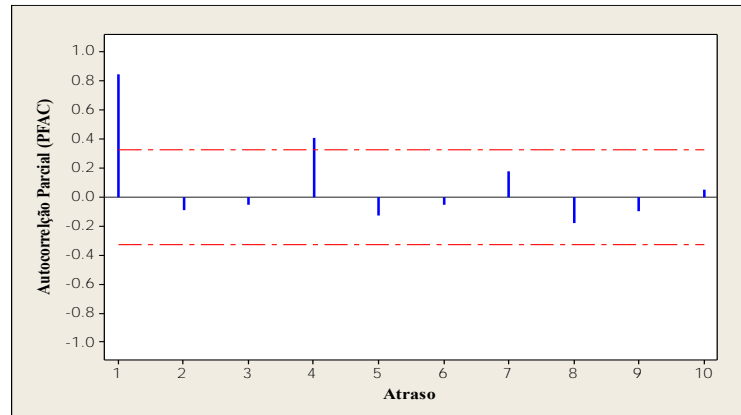
Equidistância das curvas de nível: 20m

Projeção: UTM - Universal Transverse Mercator  
 Fuso: 22S  
 Datum: Córrego Alegre  
 Data: julho/2008

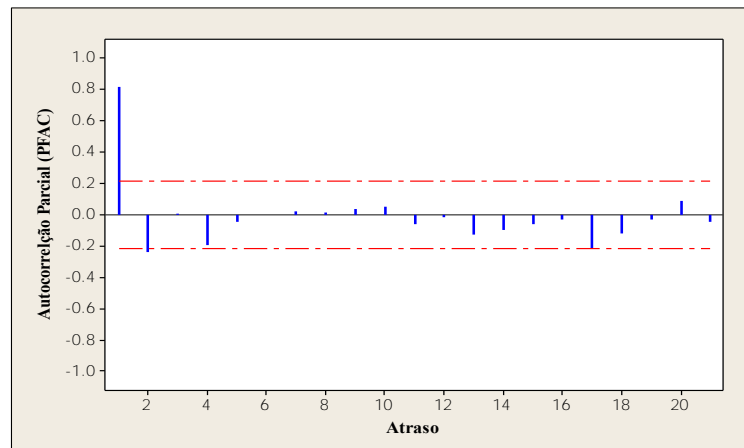
Organizadora  
 Solange Bongiovanni



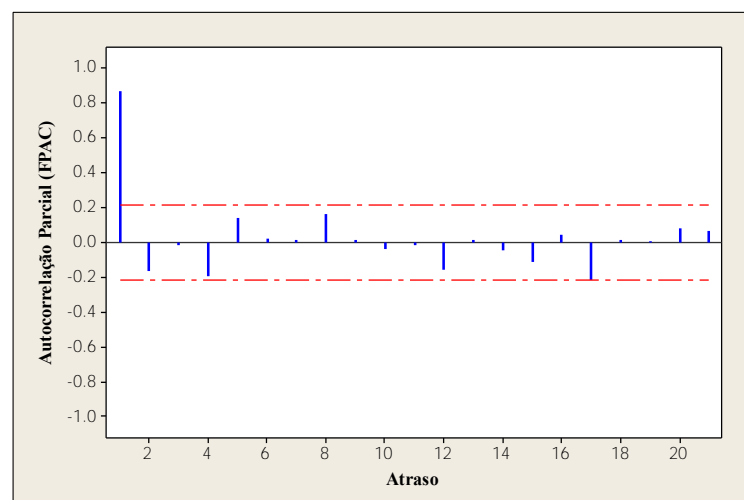
APÊNDICE 2 - Funções de autocorrelação parcial (PFAC) para os poços de monitoramento (atraso em meses).



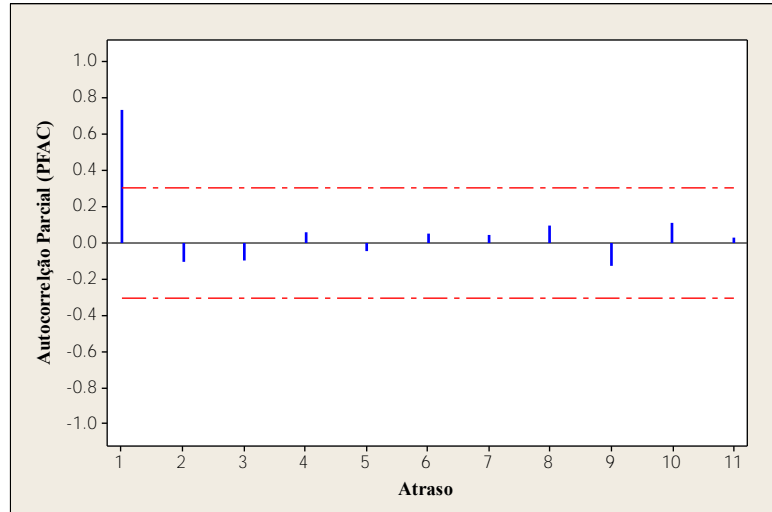
Função de autocorrelação parcial (PFAC) para o poço de monitoramento da EEcoA.



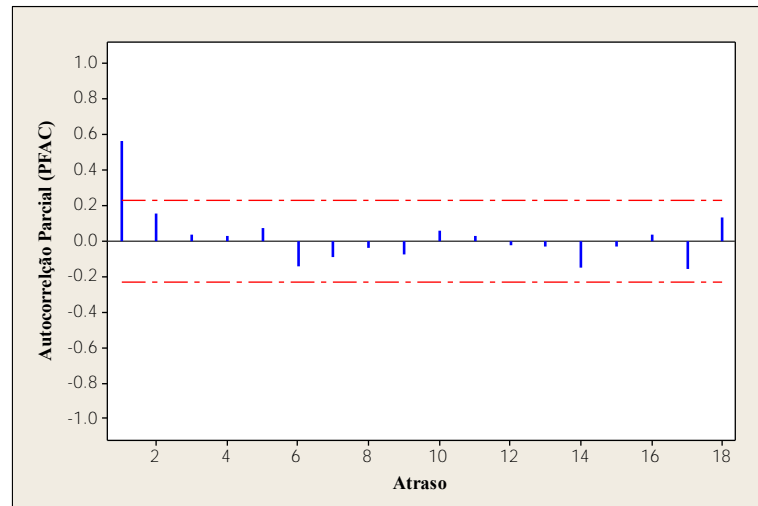
Função de autocorrelação parcial (PFAC) para o poço de monitoramento da APTA\_EM.



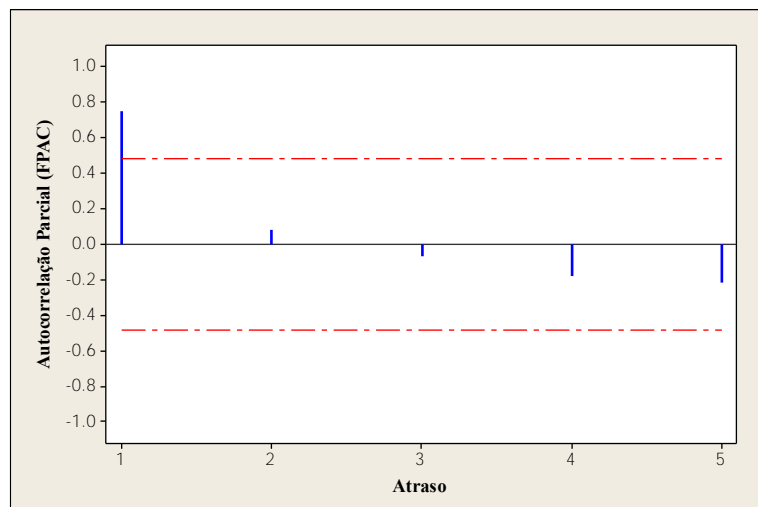
Função de autocorrelação parcial (PFAC) para o poço de monitoramento "P7" APTA\_baixo.



Função de autocorrelação parcial (PFAC) para o poço de monitoramento “V9” do Vêncio.

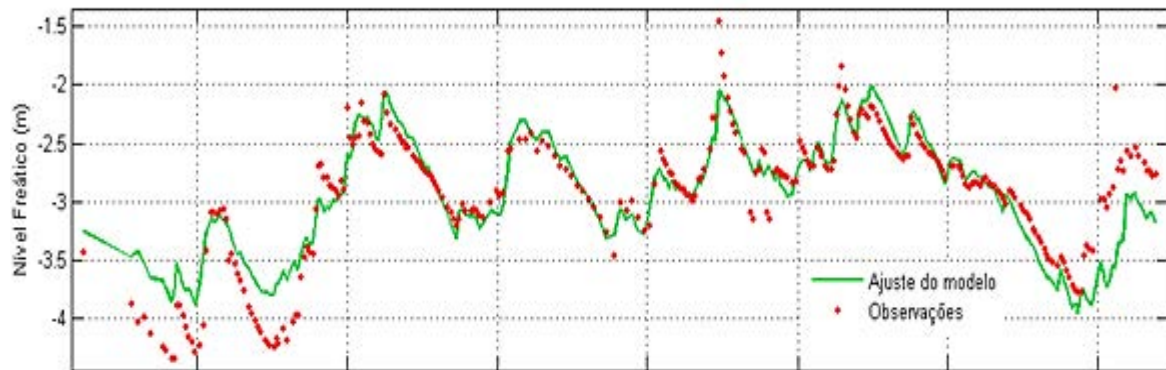


Função de autocorrelação parcial (PFAC) para o poço de monitoramento da parcela de recomposição com angico-do-cerrado, na FEA.

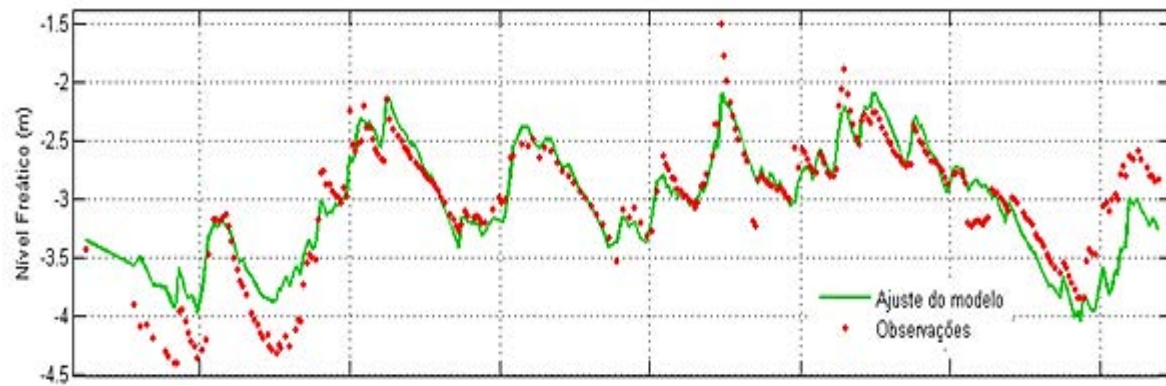


Função de autocorrelação parcial (PFAC) para o poço de monitoramento “p26” da FEA, ribeirão do Barro Preto.

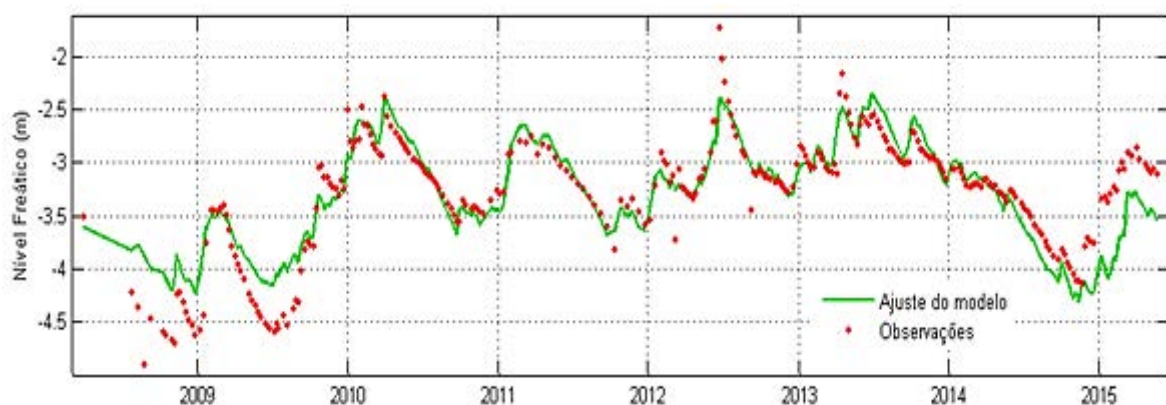
APÊNDICE 3 - Modelo PIRFICT ajustado (linha) aos dados de observação de alturas do lençol freático (pontos) nos poços de monitoramento da APTA.



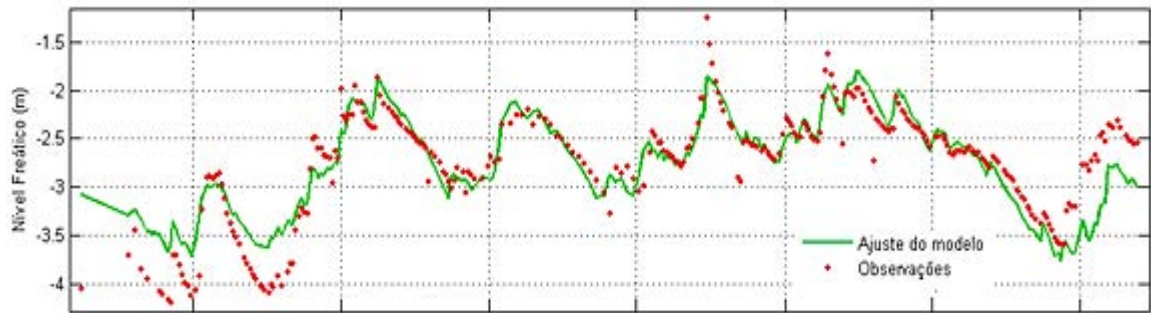
Modelo PIRFICT ajustado (linha) aos dados de observação de alturas do lençol freático (pontos) no poço de monitoramento "P1" da APTA.



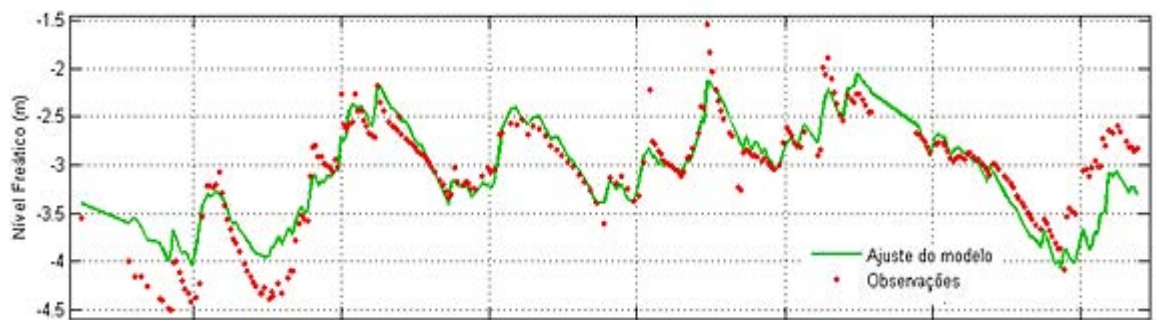
Modelo PIRFICT ajustado (linha) aos dados de observação de alturas do lençol freático (pontos) no poço de monitoramento "P2" da APTA.



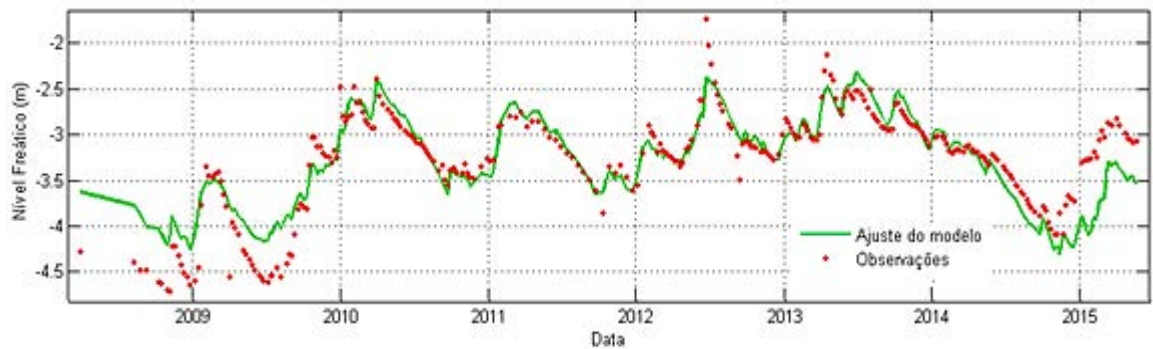
Modelo PIRFICT ajustado (linha) aos dados de observação de alturas do lençol freático (pontos) no poço de monitoramento "P3" da APTA.



Modelo PIRFICT ajustado (linha) aos dados de observação de alturas do lençol freático (pontos) no poço de monitoramento “P6” da APTA.

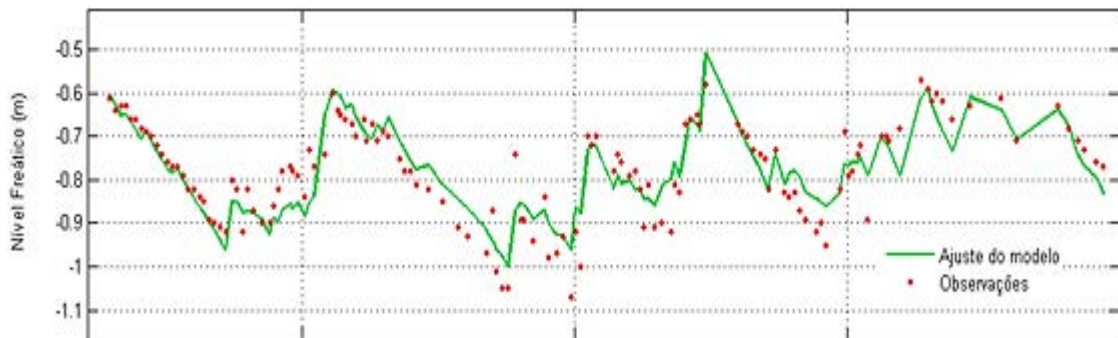


Modelo PIRFICT ajustado (linha) aos dados de observação de alturas do lençol freático (pontos) no poço de monitoramento “P7” da APTA.

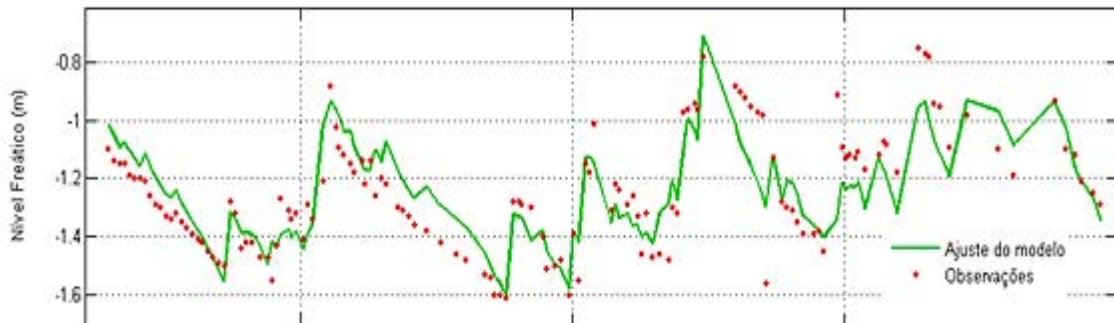


Modelo PIRFICT ajustado (linha) aos dados de observação de alturas do lençol freático (pontos) no poço de monitoramento “P8” da APTA.

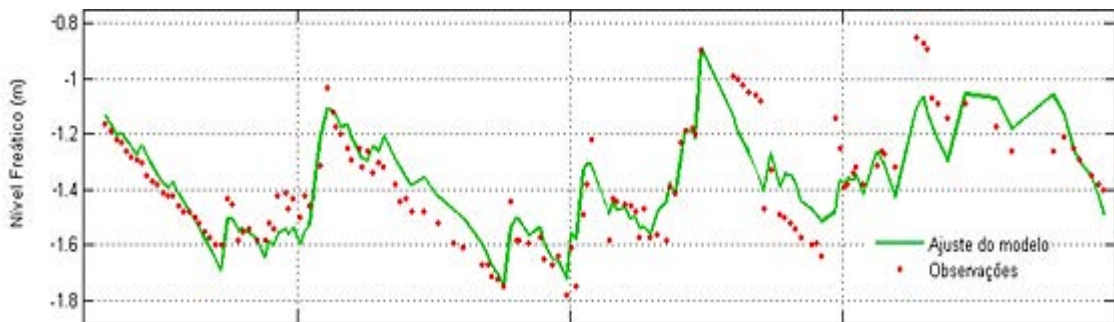
APÊNDICE 4 - Modelo PIRFICT ajustado (linha) aos dados de observação de alturas do lençol freático (pontos) nos poços de monitoramento do Vêncio.



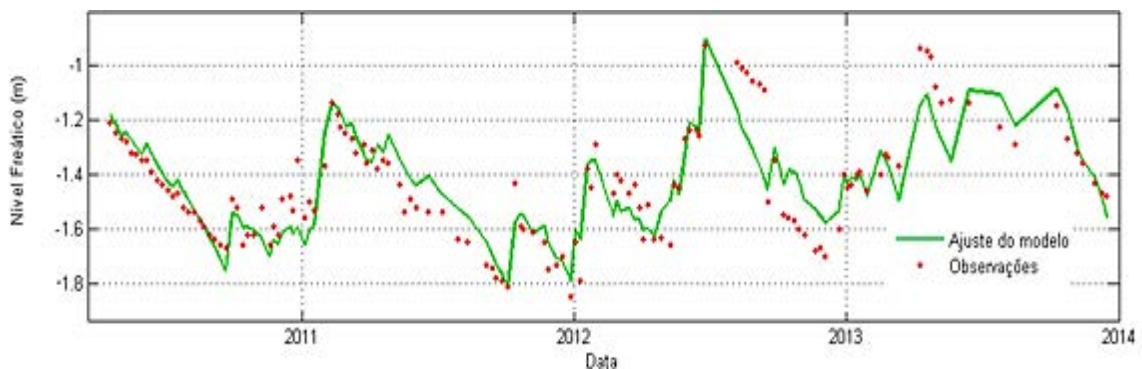
Modelo PIRFICT ajustado (linha) aos dados de observação de alturas do lençol freático (pontos) no poço de monitoramento "V1" do Vêncio.



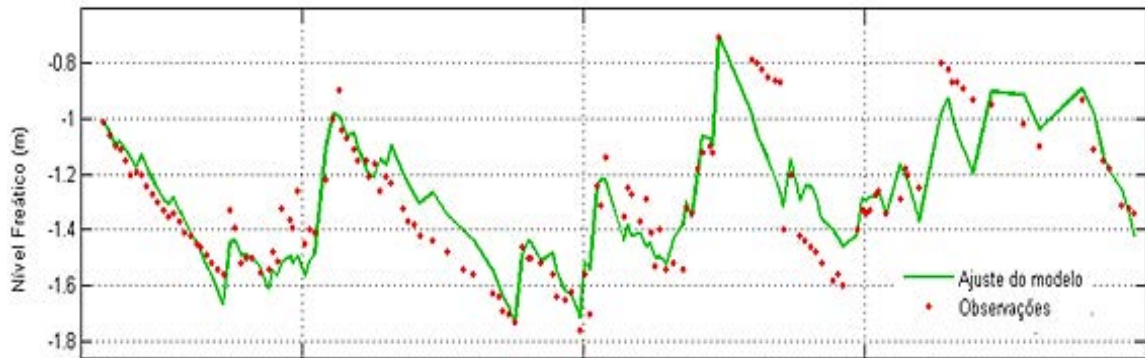
Modelo PIRFICT ajustado (linha) aos dados de observação de alturas do lençol freático (pontos) no poço de monitoramento "V2" do Vêncio.



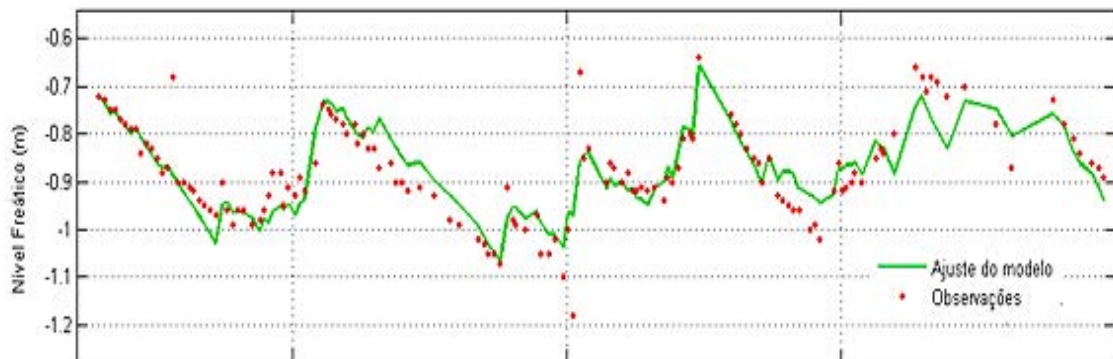
Modelo PIRFICT ajustado (linha) aos dados de observação de alturas do lençol freático (pontos) no poço de monitoramento "V4" do Vêncio.



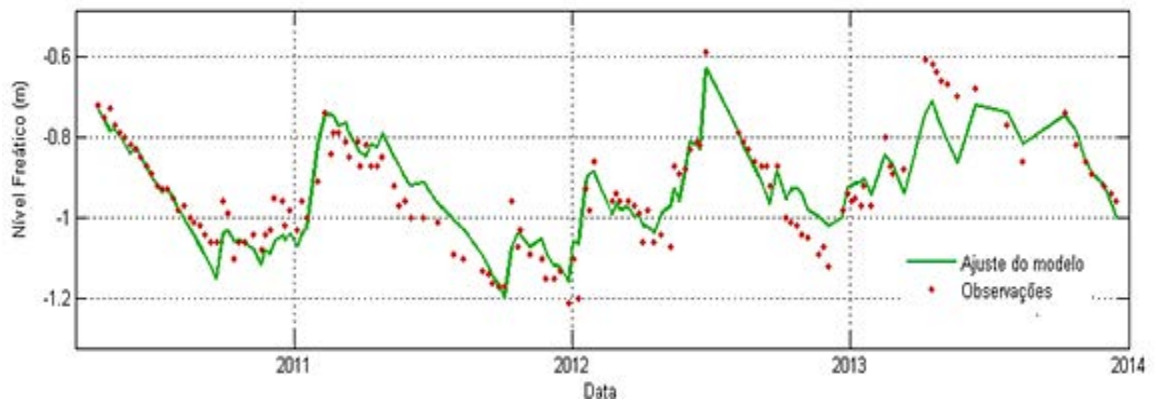
Modelo PIRFICT ajustado (linha) aos dados de observação de alturas do lençol freático (pontos) no poço de monitoramento "V6" do Vêncio.



Modelo PIRFICT ajustado (linha) aos dados de observação de alturas do lençol freático (pontos) no poço de monitoramento “V8” do Vêncio.

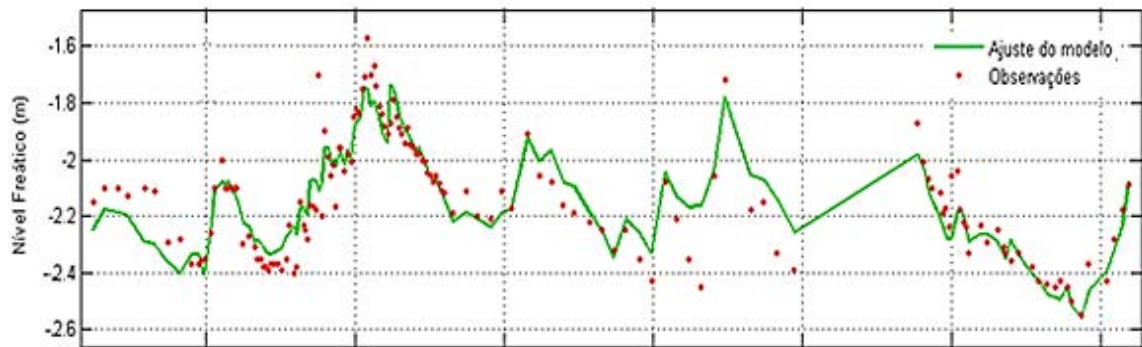


Modelo PIRFICT ajustado (linha) aos dados de observação de alturas do lençol freático (pontos) no poço de monitoramento “V15” do Vêncio.

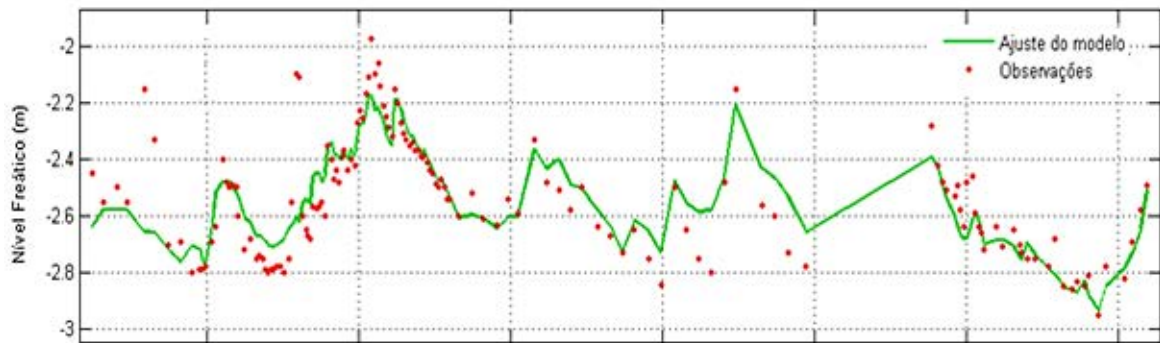


Modelo PIRFICT ajustado (linha) aos dados de observação de alturas do lençol freático (pontos) no poço de monitoramento “V16” do Vêncio.

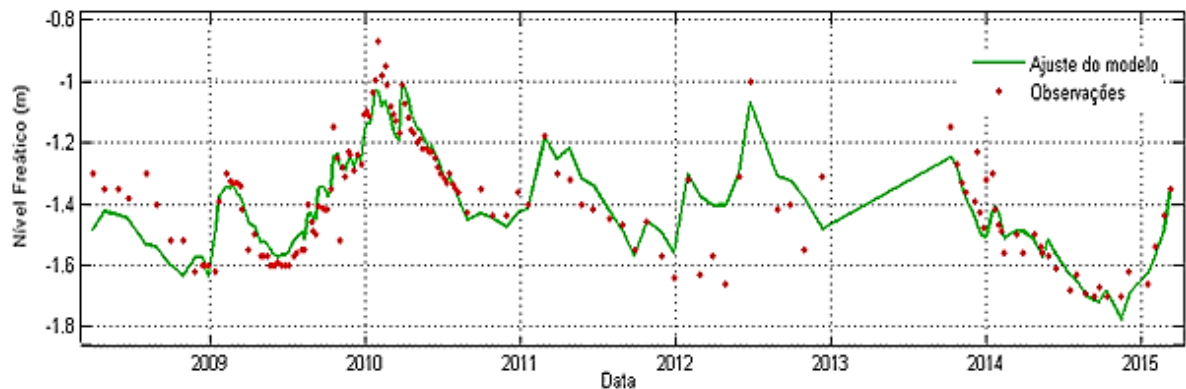
APÊNDICE 5 - Modelo PIRFICT ajustado (linha) aos dados de observação de alturas do lençol freático (pontos) nos poços de monitoramento das parcelas de recomposição da FEA.



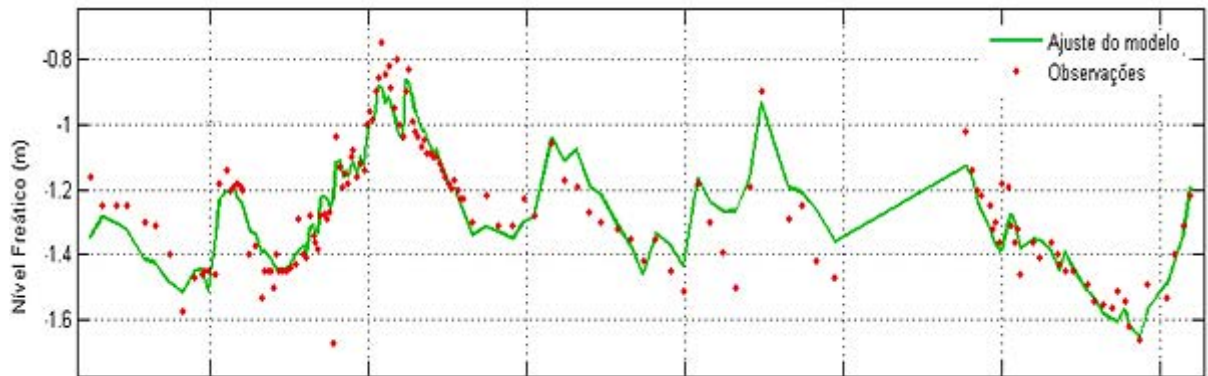
Modelo PIRFICT ajustado (linha) aos dados de observação de alturas do lençol freático (pontos) nos poços de monitoramento da FEA (parcela com angico-do-cerrado).



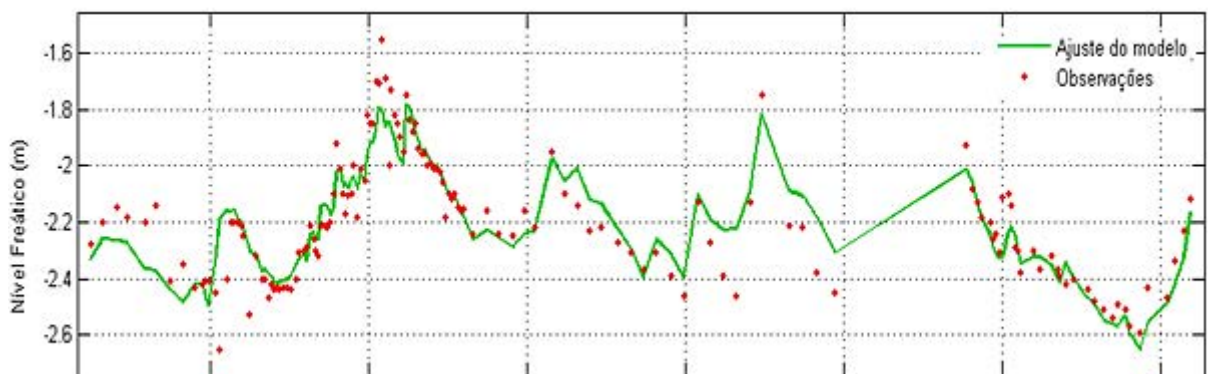
Modelo PIRFICT ajustado (linha) aos dados de observação de alturas do lençol freático (pontos) nos poços de monitoramento da FEA (*Pinus*).



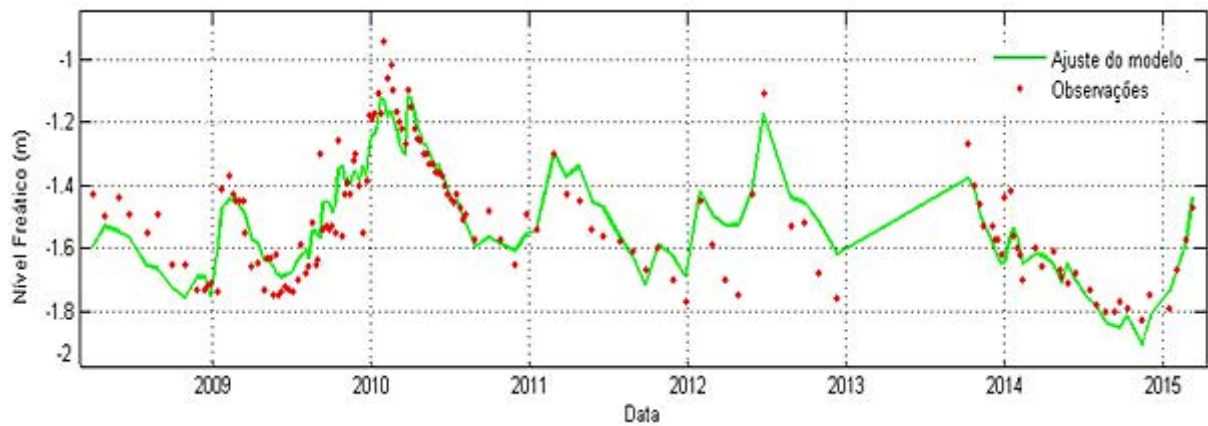
Modelo PIRFICT ajustado (linha) aos dados de observação de alturas do lençol freático (pontos) nos poços de monitoramento da FEA (*Pinus*).



Modelo PIRFICT ajustado (linha) aos dados de observação de alturas do lençol freático (pontos) nos poços de monitoramento da FEA (plantio misto).



Modelo PIRFICT ajustado (linha) aos dados de observação de alturas do lençol freático (pontos) nos poços de monitoramento da FEA (*Tapirira*).



Modelo PIRFICT ajustado (linha) aos dados de observação de alturas do lençol freático (pontos) nos poços de monitoramento da FEA (*Tapirira*).