LINA MARIA OSORIO OLIVOS

**Sustentabilidade do uso dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos no
município de São Carlos-SP**

**São Paulo
2017**

LINA MARIA OSORIO OLIVOS

Sustentabilidade do uso dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos no município de São Carlos-SP

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração:
Engenharia Hidráulica e Ambiental

Orientador:
Prof. Dr. Arisvaldo Vieira Mello Junior

**São Paulo
2017**

Catálogo-na-publicação

Olivos, Lina Maria

Sustentabilidade do uso dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos no município de São Carlos-SP / L. M. Olivos -- São Paulo, 2017.
83 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Hidráulica e Ambiental.

1.Gerenciamento integrado de Recursos Hídricos 2.WEAP 3.Demandas I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Hidráulica e Ambiental II.t.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiro a Deus, por ter me dado a perseverança para desenvolver este trabalho.

Ao meu orientador Professor Arisvaldo Vieira Mello Junior, por ter aceitado a orientação, pela paciência e apoio ao longo de tudo o processo.

Aos meus pais e irmã por serem minha grande fonte de apoio e animo.

Ao meu namorado Andrés Zabala pela paciência, amor, inspiração e ajuda no trabalho.

Aos Professores Rubem La Laina Porto e Amarilis Lucia Casteli Figueiredo Gallardo pelas contribuições durante o Exame de Qualificação.

A todos os professores do departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental pelos ensinamentos e conhecimento transmitidos.

À diretoria do comitê da bacia CHHT-TJ, ao Doutor Julio Cesar Perroni e ao Geólogo Marcos Domingues Muro pela colaboração no acesso e levantamento de dados.

Aos Doutores Carlos Humberto Mora e Alexandra Arellano pela motivação e apoio para começar o mestrado.

Aos meus amigos pela companhia, pelos momentos compartilhados e principalmente por me fazerem sentir em casa mesmo estando a milhares de quilômetros da minha terra.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (**CAPES**) pelo apoio financeiro.

RESUMO

A interação existente entre a água superficial e subterrânea nas bacias hidrográficas faz necessário o gerenciamento conjunto de ambos os recursos. Nesse sentido, o Soil Moisture Model (SMM) e a ferramenta WEAP (Water Evaluation and Planning system) foram utilizados para simular o sistema atual e avaliar os impactos do uso conjunto dos recursos hídricos superficial e subterrâneo nas bacias que abastecem o município de São Carlos, SP. O modelo foi calibrado com o objetivo de avaliar o comportamento das bacias no período de 1997-2007. Para a vazão mensal, as etapas de calibração e validação do WEAP geraram coeficientes de Nash-Sutcliffe e de porcentagem de viés considerados bons pela literatura. A robustez e facilidade de uso do modelo foram analisados, avaliando seu potencial como sistema de apoio a decisão. Também, foram gerados seis cenários futuros a partir da combinação de mudanças no uso do solo e aumento de demandas usando prioritariamente algum dos dois recursos. Nas simulações feitas para a década de 2030 não se apresentaram diferenças significativas com respeito a variável de uso do solo, contrastando com o comportamento variável da demanda. Os resultados indicaram que o município não apresenta deficiência na quantidade de água necessária para abastecer as demandas futuras, porém o rebaixamento pronunciados do nível estático do aquífero poderá produzir efeitos adversos na operação de poços existentes e no sistema hidrológico geral.

Palavras-chave: WEAP, Interação água superficial e subterrânea, Demanda, Cenários de alocação de água.

ABSTRACT

The interaction between surface and groundwater in river basins makes it necessary an integrated management of both resources. In this sense, the o Soil Moisture Model (SMM) and the WEAP (Water Evaluation and Planning system) tool were used to simulate the current system and to evaluate the impacts of the joint use of surface and underground water resources in the basins that supply the city of São Carlos, SP. With the aim of evaluating the behavior of the basins in the period 1997 to 2007. For the monthly flow, the WEAP calibration and validation stages generated Nash-Sutcliffe coefficients and percentage of bias considered goods. The robustness and ease of use of the model were analyzed, evaluating its potential as a decision support system. The results of the simulations for the 2030s for six future scenarios did not show significant differences respect to the variable of land use, different from the behavior with the demand variable. The results indicated that the municipality does not present a deficiency in the quantity of water needed to supply the futures demands. However, the pronounced lowering of the static level of the aquifer could produce adverse effects on the operation of existing wells and the general hydrological system.

KEYWORDS: WEAP, Surface and underground water interaction, Demand, Water allocation scenarios.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Trecho de rio que ganha água do aquífero (WINTER <i>et al.</i> , 1998)	11
Figura 2 - Trecho de rio que perde água para o aquífero (WINTER <i>et al.</i> , 1998).....	12
Figura 3 - Trecho de rio desconectado que perde água para o aquífero (WINTER <i>et al.</i> , 1998)	12
Figura 4 – Armazenamento de talude (WINTER <i>et al.</i> , 1998)	13
Figura 5 - Esquema do problema considerado por Theis (1941) (HUNT, 1999)	14
Figura 6 - Esquema do problema considerado por Hantush (1965) (HUNT, 1999)..	15
Figura 7 - Esquema do problema considerado por Hunt (1999) (HUNT, 1999).....	17
Figura 8 - Localização do município de São Carlos na UGRHI 13. Modificado de Campanelli (2011).	22
Figura 9 - Localização da área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani (SAG) na UGRHI 13 e no município de São Carlos. (Modificado de Albuquerque Filho, <i>et al.</i> , 2010)	23
Figura 10 - Bacias hidrográficas dos Rio Monjolinho e Ribeirão do Feijão.....	24
Figura 11 - Mapa de uso e ocupação de solo das bacias do Rio Monjolinho e Ribeirão do Feijão (Modificado de Dalla, 2010 e Cunha, 2012).	26
Figura 12 - Demandas superficial e subterrânea do município de São Carlos (Modificado de Costa, 2010)	27
Figura 13 - Esquema do modelo Soil Moisture Method para uma área j. Modificado de YATES (2005)	28
Figura 14 - Representação estilizada da conexão rio-aquífero do WEAP. (YATES, 2005)	30
Figura 15 - Exemplo formato dados de entrada no WEAP.....	31
Figura 16 - Procedimento Metodológico	43
Figura 17 - Sub-bacias da área de estudo.	44
Figura 18 - Polígonos de Thiessen gerados a partir de estações utilizadas no estudo	45
Figura 19 - Pontos de captação e lançamento nas bacias	46
Figura 20 - Modelo conceitual das bacias.	47

Figura 21 - Série de vazão e precipitação observada da Bacia do Rio Monjolinho mostrando os valores atípicos de vazão nos meses chuvosos de 2006 e 2007.	48
Figura 22 - Comparação de vazão simulada e observada para a sub-bacia do Rio Monjolinho	49
Figura 23 - Comparação de vazão simulada e observada para a sub-bacia do Ribeirão do Feijão.....	50
Figura 24 - Variação normalizada dos níveis estáticos estimados pelo WEAP e dados medidos nos poços Tramer, Parque Industrial e Parque Ferh na bacia do Rio Monjolinho.	52
Figura 25 - Modelo conceitual das bacias para avaliação de cenários.....	56
Figura 26 - Curvas de permanência de vazões do Ribeirão do Feijão para os cenários avaliados.	57
Figura 27 - Curvas de permanência de vazões do Rio Monjolinho para os cenários avaliados.	58
Figura 28 - Variação do nível estático para cada cenário na bacia do Ribeirão do Feijão.	60
Figura 29 - Variação do nível estático para cada cenário na bacia do Rio Monjolinho.	62
Figura 30 - Confiabilidade de entrega de água dos cenários avaliados para cada demanda.	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Unidades Geológicas no Município de São Carlos Modificado de IPT (1999).....	25
Tabela 2 - Parâmetros básicos de entrada do WEAP. Modificado de Amato et al. (2006).....	32
Tabela 3 - Estações Pluviométricas utilizadas no estudo.	33
Tabela 4 - Estações Climatológicas com dados disponíveis na área de estudo.....	34
Tabela 5 - Estações fluviométricas utilizadas no estudo.....	34
Tabela 6 - Parâmetros categorias uso do solo.....	35
Tabela 7 - Volumes diários de água utilizados por tipo de uso e tipo de fonte	36
Tabela 8 - Cenários com mudança de uso do solo e de demandas avaliados	41
Tabela 9 - Valores obtidos para a avaliação estatística dos resultados da simulação	51
Tabela 10 - Valores anuais de evapotranspiração e recarga estimados pelo WEAP para a bacia do Rio Monjolinho	53
Tabela 11 - Comparação valores de vazão de base estimada pelo WEAP e dados de estação fluviométrica para meses de pouca precipitação na bacia do Rio Monjolinho.	53
Tabela 12 -Valores anuais de evapotranspiração e recarga estimados pelo WEAP para a bacia do Ribeirão do Feijão.....	54
Tabela 13 - Comparação dos valores de vazão de base estimada pelo WEAP e dados de estação fluviométrica para meses de pouca precipitação na bacia Ribeirão do Feijão.	54
Tabela 14 - Valores dos parâmetros do modelos após a calibração.	54
Tabela 15 - Comparação Q_{95} dos cenários avaliados com Q_{95} serie 1997-2007 da bacia Ribeirão do Feijão.....	59
Tabela 16 - Variação do nível estático no início e final da simulação para cada cenário na bacia do Ribeirão do Feijão.....	60
Tabela 17 - Comparação Q_{95} dos cenários avaliados com Q_{95} serie 1997-2007 da bacia do Rio Monjolinho.	61

Tabela 18 - Variação do nível estático no início e final da simulação para cada cenário na bacia do Rio Monjolinho.62

Tabela 19 - Demanda para o ano de 2030 para cada cenário de cada sub-bacia e seu impacto na Q_{95} 65

Conteúdo

INTRODUÇÃO	13
1. JUSTIFICATIVA	9
2. OBJETIVOS	10
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
3.1 Interação de águas superficiais e subterrâneas	11
3.2 Modelos de interação de águas superficiais e subterrâneas.	14
3.2.1 Modelos analíticos	14
3.2.2 Modelos numéricos.....	18
3.2.3 Modelos acoplados de águas superficiais E subterrâneas	19
4. MATERIAIS E MÉTODOS	22
4.2 Situação atual dos recursos hídricos na Area de estudo	26
4.3 DESCRIÇÃO DO MODELO WEAP	27
4.4 CONSTRUÇÃO DO MODELO	31
4.4.1 Discretização da Bacia	31
4.4.2 Dados de entrada DO modelo WEAP.....	32
4.5 Calibração do Modelo	37
4.5.1 Calibração Modelo Água Superficial.....	37
4.5.2 Calibração DO Modelo Água Subterrânea.....	39
4.5 Cenários de avaliação de sustentabilidade	39
4.6 Resumo DO Procedimento Metodológico.....	42
5. RESULTADOS.....	44
5.1 Discretização da Bacia	44
5.2 Espacialização da Precipitação	45
5.3 Construção do modelo.....	45

5.4 CALIBRAÇÃO DOS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO.....	47
5.5 CENARIOS DE AVALIAÇÃO.....	55
5.6 O MODELO WEAP COMO SISTEMA DE APOIO A DECISÃO.	66
6. CONCLUSÃO	67
7. REFERÊNCIAS.....	69
APÊNDICE A	77

INTRODUÇÃO

O planejamento integrado dos recursos hídricos tem-se tornado um tópico com grande relevância na atualidade por causa da pressão existente sobre o mesmo devido ao crescimento da demanda e a degradação da qualidade da água disponível para supri-la. Essa pressão distribui-se para ambos os tipos de recurso: superficial e subterrânea. Embora o recurso hídrico superficial continue sendo o principal foco dos estudos, a valorização do recurso subterrâneo tem crescido em razão da sua quantidade, disponibilidade e qualidade (SHAH, 2014).

As águas subterrâneas e superficiais têm sido percebidas e gerenciadas como duas entidades separadas, mesmo quando se conhece que estes sistemas interagem em uma variedade de configurações geológicas, topográficas e climáticas (WINTER et al., 1998; IVKOVIC, 2006). Porém, com o aumento da demanda do recurso hídrico e os impactos da mudança climática, o tópico da interação água superficial - água subterrânea tornou-se de interesse e começou a apresentar um desafio para os gerenciadores (FLECKENSTEIN, 2010). A descarga de águas subterrâneas constitui uma proporção significativa do fluxo total na maioria dos rios, e o fluxo de intercâmbio entre as águas superficiais e subterrâneas impacta significativamente o equilíbrio geral do sistema com sérias implicações durante condições de baixa vazão (RASSAM, 2011). Assim, o problema torna-se uma questão importante na alocação do recurso, porquanto o objetivo da sua gestão, que é a busca de “água para todos”, compromete-se quando a integração de ambos os recursos não é levada em consideração.

Em geral, os modelos hidrológicos têm sido aplicados aos problemas de gerenciamento das águas superficiais sem considerar em detalhe as águas subterrâneas, ao mesmo tempo, os modelos de águas subterrâneas geralmente não consideram apropriadamente as águas superficiais na modelação (ESTRADA, 2009). Tentativas para conseguir integrar ambos os sistemas na modelação encontram-se na literatura, assim, existem modelos que integram modelos hidrológicos com modelos de águas subterrâneas, e.g., o modelo SWATMOD (SOPHOCLEOUS et al. 1999) e o modelo GSFLOW (MARKSTROM et al., 2008). Além desses sistemas, têm sido desenvolvidos modelos acoplados com a integração de modelos hidráulicos e

modelos de águas subterrâneas, como o MODBRANCH (SAWWAIN e WEXER,1996), e o DAFLOW (JOBSON e HARBAUGH,1999).

Além dos modelos mencionados, o Stockholm Environment Institute desenvolveu o pacote WEAP (*Water Evaluation and Planning System*), uma ferramenta que permite, além de modelar o recurso hídrico superficial, integrar as interações de água superficial e subterrânea e fazer uma análise das demandas de ambos os recursos, conseguindo alimentar um sistema de suporte a decisão.

Por fim, o presente trabalho visa simular o comportamento dos recursos hídricos das Bacias que abastecem o município de São Carlos, por meio do uso da ferramenta WEAP, incluindo as interações rio-aquífero, estimando os impactos em seis cenários avaliados com variações nas demandas e usos do solo.

1. JUSTIFICATIVA

O intercâmbio de fluxo entre rio-aquífero é um componente chave que influencia além do fluxo do rio, a qualidade da água, a evolução geomorfológica, a natureza e composição da zona riparia e a estrutura do ecossistema (SOPHOCLEOUS, 2010).

O uso indiscriminado do recurso subterrâneo ao longo do tempo, gera processos de infiltração induzida ou recarga induzida, provocando uma diminuição da vazão dos corpos superficiais (SOPHOCLEOUS, 2002). Assim, junto com o aumento da pressão sobre os recursos hídricos superficiais e subterrâneos, a gestão conjunta se apresenta como um elemento necessário para garantir a sustentabilidade do uso.

No contexto regional, no estado de São Paulo, 80% dos municípios usam água subterrânea para suprir parcial ou totalmente a demanda de água de abastecimento público (IRITANI e EZAKI, 2009). No caso específico do aquífero Guarani, livre na área de estudo, tem-se evidência de grande rebaixamento dos níveis potenciométricos (PERRONI E WENDLAND, 2008) e do consumo crítico da reserva ativa (SANTOS, 2009), revelando a importância de alocar o recurso por meio do planejamento integrado dos recursos, para evitar que a super-exploração do recurso subterrâneo tenha impactos negativos sobre os corpos hídricos superficiais e o sistema natural.

2. OBJETIVOS

O objetivo principal da dissertação é simular conjuntamente os recursos hídricos superficiais e subterrâneos nas bacias dos mananciais do município de São Carlos, SP, por meio da aplicação do modelo WEAP.

Espera-se verificar o desempenho do modelo como ferramenta de apoio a gestão e o planejamento integrado dos recursos hídricos. Para isso, os seguintes objetivos específicos foram considerados:

- Gerar e analisar cenários que envolvam o aumento ou diminuição das demandas e mudanças no uso do solo atuais da bacia, permitindo avaliar os impactos no sistema.
- Avaliar a robustez do modelo em termos de processamento de dados, calibração e facilidade de uso.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 INTERAÇÃO DE ÁGUAS SUPERFICIAIS E SUBTERRÂNEAS

Sophocleous (2010) e Winter et. al.(1998) apresentaram revisões das interações físicas entre os sistemas de águas superficiais e subterrâneas, expondo os impactos das atividades humanas nesses processos físicos e na qualidade da água. A seguir são apresentados alguns princípios básicos que descrevem as interações rio-aquífero.

Os rios interagem com a água subterrânea basicamente em três formas (WINTER et al., 1998):

1. O rio ganha água (rio efluente) pelo fluxo de água subterrânea através do leito do rio (Figura 1).
2. O rio perde água (rio efluente) pela saída de vazão através do leito do rio para o aquífero (Figura 2).
3. O rio é alimentado em alguns trechos, e recarrega o aquífero em outros, ou, é alimentado ou recarregado em um mesmo trecho mas em tempos diferentes.

Figura 1 - Trecho de rio que ganha água do aquífero (WINTER et al., 1998)

Figura 2 - Trecho de rio que perde água para o aquífero (WINTER et al., 1998)

Para que o aquífero descarregue no rio, o nível freático deve estar acima do curso de água, por sua vez, para que o rio recarregue o aquífero, o nível freático deve estar por baixo do leito do curso de água. Assim, a direção do fluxo entre o aquífero e o rio depende da diferença de elevação entre o leito do rio e o nível de água do aquífero. Além disso, o material do leito deve ser permeável para permitir o movimento da água entre os sistemas.

Os cursos efluentes podem estar conectados ao aquífero por uma zona saturada contínua ou podem estar desconectados por uma zona insaturada (Figura 3). Neste caso, a água drena por gravidade e o fluxo entre os dois sistemas não está relacionado com a diferença de elevação mencionada.

Figura 3 - Trecho de rio desconectado que perde água para o aquífero (WINTER et al., 1998)

Outro tipo de interação está dado por um incremento rápido do nível do rio, o que gera o movimento de água para o talude (Figura 4). A água infiltra no aquífero conectado hidráulicamente enquanto o nível do rio é maior, depois, sua volta durante a recessão da vazão recarrega a corrente do rio. O volume de água armazenado é liberado após

um pico de vazão é conhecido como armazenamento de banca. Este processo ocorre por um evento de precipitação significativo, degelo ou pela descarga de um reservatório a montante (WINTER et al., 1998).

A maioria da água armazenada retorna para o rio em poucos dias ou semanas, porém, se o aumento do nível do rio é suficiente para superar as bancas e alcançar as planícies de inundação, pode-se apresentar uma recarga generalizada e o retorno da água ao canal pode aumentar para semanas, meses ou anos.

Figura 4 – Armazenamento de talude (WINTER et al., 1998)

O fator com maior influência no fluxo de água entre o rio e ao aquífero é seu grau de conexão (IVKNOVIC, 2006). Esse grau de conexão tem a ver como o material do leito do rio e as bancas, a existência de aquíferos ou material de aquífero não saturado, e o comprimento da conexão entre o leito do rio e a zona saturada (KIRK e HEBERT, 2002).

As interações entre água superficial e subterrânea são dinâmicas, podendo mudar espacial e temporalmente. A variabilidade climática afeta a quantidade de precipitação e portanto o escoamento. Também, as atividades antropogênicas como irrigação, exploração de poços e usos diversos do solo afetam a dinâmica de interação entre os sistemas.

3.2 MODELOS DE INTERAÇÃO DE ÁGUAS SUPERFICIAIS E SUBTERRÂNEAS.

3.2.1 MODELOS ANALÍTICOS

Os modelos analíticos resolvem a equação de fluxo de água subterrânea para um espaço e tempo específicos. Assim, são úteis para a solução de problemas simples, porém, as simplificações feitas provocam perda de aderência com a realidade, pelo qual são considerados em análises preliminares e para a validação de outros enfoques de modelação (BRODIE et al., 2007). A seguir, apresentam-se alguns modelos analíticos.

MODELO GLOVER-JENKINS

Este modelo permite calcular a diminuição da vazão do rio, gerada pelo bombeamento de água do aquífero. O modelo considera o aquífero homogêneo e isotrópico, com transmisividade T (m^2/dia) e coeficiente de armazenamento S (adimensional). Considera também que o aquífero está limitado por um rio completamente penetrante e conectado perfeitamente com o aquífero, conforme a Figura 5.

Figura 5 - Esquema do problema considerado por Theis (1941) (HUNT, 1999)

O modelo assume que as mudanças na superfície livre são pequenas e que o aquífero não varia as suas propriedades hidráulicas com as mudanças de nível, assim, o modelo torna-se linear, sendo possível aplicar o princípio de superposição. A

diminuição da vazão do rio Q_r (m^3/dia) devida ao bombeamento Q_w (m^3/dia), a uma distância l (m) foi derivada por Glover e Balmer (1954) como:

$$Q_r(t) = Q_w \cdot erfc \left(\sqrt{\frac{Sl^2}{4Tt}} \right) \quad (1)$$

Onde **erfc** é a função de erro complementar, que encontra-se tabulada, sendo definida como:

$$erfc(x) = \frac{2}{\pi} \int_x^\infty e^{-t^2} dt \quad (2)$$

A tabela da função $erf(x) = 1 - erfc(x)$ encontra-se disponível no apêndice G de Javandel, et. al. (2013). Também pode ser calculada com o comando `erfc()` de Matlab.

Definindo a função de influência *s.d.f.* sobre a vazão de um rio como:

$$s.d.f. = \frac{Sl^2}{T}, \quad (3)$$

E substituindo (3) em (1) obtém-se,

$$Q_r(t) = Q_w \cdot erfc \left(\sqrt{\frac{s.d.f.}{4t}} \right). \quad (4)$$

O MODELO DE HANTUSH

Hantush (1965) incorporou ao esquema proposto por Theis (1941) o efeito da conexão hidráulica imperfeita entre rio e aquífero devido a uma capa semipermeável na solução analítica, como mostrado na Figura 6.

Figura 6 - Esquema do problema considerado por Hantush (1965) (HUNT, 1999)

Seguindo as unidade da Eq. 1, a solução analítica neste caso está dada por:

$$\frac{Q_r}{Q_w} = \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{Sl^2}{4Tt}} \right) - \exp \left(\frac{Tt}{SL^2} + \frac{l}{L} \right) \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{Tt}{SL^2}} + \sqrt{\frac{Sl^2}{4Tt}} \right), \quad (5)$$

Em que L é um fluxo de corrente que tem dimensões de comprimento (m), e é definido como uma combinação da permeabilidade do aquífero K (m/dia), a permeabilidade K' (m/dia) e a espessura b' da capa semipermeável, ou seja:

$$L = \frac{K}{K'} b'. \quad (6)$$

A equação (5) se reduz a equação (1) quando $L \rightarrow 0$, o que é equivalente a que b' seja igual a zero para um valor fixo K/K' . Hantush sugere que os efeitos da penetração parcial da corrente poderiam se aproximar usando um valor “efetivo” para l que exceda seu valor medido no problema físico.

O MODELO DE HUNT

A avaliação por meio de modelos numéricos dos resultados das soluções propostas por Glover-Jenkins e Hantush evidenciaram erros significativos em sua aplicação devido a que geralmente os rios só estão parcialmente conectados com os aquíferos (HUNT, 1999). Assim, Hunt propôs uma solução ao problema considerando obstrução do leito do rio e penetração parcial da corrente (Ver Figura 7). A equação apresentada por Hunt foi:

$$\frac{Q_r}{Q_w} = \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{Sl^2}{4Tt}} \right) - \exp \left(\frac{\lambda^2 t}{4ST} + \frac{\lambda l}{2T} \right) \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{\lambda^2 t}{4ST}} + \sqrt{\frac{Sl^2}{4Tt}} \right). \quad (7)$$

Figura 7 - Esquema do problema considerado por Hunt (1999) (HUNT, 1999)

A solução de Hunt (1999) assume que:

- O aquífero tem extensão infinita e é homogêneo e isotrópico em todas as direções horizontais.
- A relação da componente vertical e horizontal da velocidade é pequena.
- Os abatimentos são suficientemente pequenos quando comparados com a espessura do aquífero, o que permite linearizar as equações governantes.
- A secção transversal do leito tem dimensões horizontais e verticais pequenas quando comparados com a espessura do aquífero.
- As mudanças da elevação do nível d'água no rio geradas pelo bombeamento são pequenos quando comparados com as mudanças na elevação do nível de água no aquífero na capa semipermeável.
- A taxa de bombeamento do poço, Q_w , é constante para $0 < t < \infty$
- As taxas de fluxo desde o rio para o aquífero são linearmente proporcionais à mudança na nível piezométrico ao longo da camada semipermeável.

MODELO DO RESERVATÓRIO LINEAR OU MODELO UNICELULAR

Este modelo simula a descarga do aquífero ao rio como uma função matemática linear (PULIDO et al. 2005) da forma:

$$Q(t) = \alpha V(t), \quad (8)$$

Sendo α o coeficiente de descarga do aquífero, $V(t)$ o volume existente no reservatório (aquífero) no instante t e $Q(t)$ a vazão que fornece o aquífero ao rio.

Considerando-se uma perturbação externa E no aquífero (recarga ou bombeamento) a equação de continuidade no aquífero pode-se expressar como:

$$\frac{dV(t)}{dt} = E(t) - Q(t). \quad (9)$$

Substituindo (9) em (8) e solucionando a equação diferencial (supondo $E(t) = E$, E constante) obtém-se:

$$V(t) = \frac{E}{\alpha}(1 - e^{-\alpha t}) + V_0 e^{-\alpha t}, \quad (10)$$

Onde V_0 é o volume inicial no aquífero.

Se a perturbação externa é igual a uma vazão de bombeamento q ($E=q$, q com sinal negativo pois sai do volume de controle definido no sistema rio aquífero), a vazão extraída do rio a causa do bombeamento pode-se expressar,

$$Q_r(t) = q(1 - e^{-\alpha t}). \quad (11)$$

O parâmetro α pode ser obtido da pendente da curva de recessão de vazões num período influenciado pelo bombeamento.

O modelo descrito apresenta problemas de acurácia quando o bombeamento é realizado próximo ao rio, por esta razão o autor desenvolveu um novo modelo chamado de reservatórios pluricelulares englobados para representar melhor a interação rio-aquífero.

3.2.2 MODELOS NUMÉRICOS

Como mencionado, apesar dos métodos analíticos serem mais simples, os modelos numéricos são mais realistas, embora demandem altos custos (computacionais e financeiros) e tempo. Estes métodos de soluções numéricas fazem uso de equações de fluxo e consistem em modelos matemáticos de simulação, que pela sua complexidade são processados em computadores.

Sendo o objetivo dos modelos a obtenção de uma melhor compreensão do sistema real, possibilitando a previsão de situações (IRITANI, 1998), estes permitem avaliar cenários como o impacto ao longo prazo de retiradas de água e a interação água superficial-água subterrânea.

Os métodos numéricos mais utilizados para solucionar as equações de fluxo subterrâneo são o método dos elementos finitos e o método das diferenças finitas. Uma descrição completa da aplicação desses métodos a problemas de águas subterrâneas é apresentada no trabalho de Wang e Anderson (1982). No método dos elementos finitos o domínio do problema, que no caso das águas subterrâneas é a extensão do aquífero simulado, é dividido em um conjunto de elementos que podem ser de diferentes formatos ou tamanhos. Modelos como o MODFE utilizam elementos triangulares e em outros modelos, como o SUTRA, são utilizados quadriláteros.

O MODFLOW é um modelo tridimensional de fluxo de água subterrânea desenvolvido pelo U.S. Geological Survey (USGS), que usa o método de diferenças finitas. O modelo tem sido usado amplamente em estudos hidrogeológicos e em estudos de interações de águas superficiais e subterrâneas, utilizando pacotes como RIVER e DRAIN (MCDONALD Y HARBAUGH, 1988) e STREAM (PRUDIC, 1989).

No Brasil, a modelagem numérica, tem sido amplamente utilizada em estudos em diversas regiões para o auxílio na gestão dos recursos hídricos (CARVALHO, 2013).

3.2.3 MODELOS ACOPLADOS DE ÁGUAS SUPERFICIAIS E SUBTERRÂNEAS

Em geral os modelos hidrológicos têm sido aplicados aos problemas de gerenciamento das águas superficiais sem considerar em detalhe as águas subterrâneas, ao mesmo tempo, os modelos de águas subterrâneas geralmente não consideram apropriadamente as águas superficiais na modelação (ESTRADA, 2009).

Porém, na literatura já são encontrados estudos abordando o problema interligando ambos os sistemas. Assim, por exemplo, Sophocleous et al. (1999) apresentam o modelo SWATMOD, integrando o modelo hidrológico SWAT (Arnold et al., 1993) e MODFLOW, para estudar as interações rio-aquífero numa bacia nos Estados Unidos.

Também, Markstrom et al. (2008) desenvolveram o modelo acoplado GSFLOW, integrando o modelo precipitação- escoamento PRMS do USGS com o MODFLOW. Kollet et al. (2006) desenvolveram uma nova classe de modelos totalmente integrados para a simulação do sistema rio-aquífero, resultando no desenvolvimento do modelo ParFlow.

Além desses sistemas, têm sido desenvolvidos modelos acoplados desde a integração de modelos hidráulicos com modelos de águas subterrâneas, e.g., Swain e Wexler (1996) desenvolveram o modelo MODBRANCH, o qual integrava o MODFLOW com o BRANCH, simulando fluxo transitório e variante pela solução das equações de St. Venant. Também Jobson e Harbaugh (1999) apresentaram o DAFLOW, sendo um modelo hidráulico que simula vazões em fluxo transitório por meio da solução da equação da onda difusiva acoplado ao MODFLOW; Rodriguez et al. (2008) apresentaram uma integração completa do modelo hidráulico HEC-RAS com MODFLOW para simular as interações rio-aquífero numa bacia na Argentina. Outra ferramenta com grande uso é o modelo MIKE SHE, o qual se constitui em um modelo distribuído acoplado de água superficial e subterrânea, onde as demandas podem ser calculadas baseadas nas culturas, e a alocação pode ser determinada usando sistemas de suporte decisão de irrigação (DHI, 2007).

Finalmente, o modelo WEAP (YATES, et. al, 2005), se apresenta como uma ferramenta que permite modelar o recurso hídrico superficial e subterrâneo de maneira conjunta, tendo como objetivo integrar essa modelação com as políticas adotadas, assim, ele coloca no mesmo nível as demandas com a oferta e permitindo examinar diversos cenários. WEAP tem sido usado em estudos em mais de 40 bacias ao redor do mundo (WEAP,2015) como suporte para abordar diferentes tipos de problemas. Assim, autores como Amato (2006) e Sandoval (2010) usaram WEAP para modelar hidrologicamente grandes bacias nos Estados Unidos, apresentando resultados consistentes com outros modelos já calibrados. Joyce et al. (2010) modelaram o recurso hídrico do estado da Califórnia utilizando o módulo de interação de água subterrânea e superficiais do WEAP. Além deles, outros autores têm usado o WEAP como componente em modelos mais complexos, para aportar dados a respeito de demandas de água (BARTHEL et al, 2008; GAISE et al. 2008). Também, Hoff (2011), Hermans(2008) e Schuler(2013) utilizaram o pacote para modelar bacias levando em

consideração os aquíferos presentes nas áreas de estudo. Le Page (2012) apresentou a integração completa do modelo WEAP com o MODFLOW para a gestão conjunta dos recursos hídricos numa bacia no Marrocos. No caso Brasileiro, o modelo já tem sido usado exibindo resultados consistentes (DA SILVA, 2009), com a vantagem de ser uma ferramenta de fácil uso e acesso para os planejadores.

Figura 10 - Bacias hidrográficas dos Rio Monjolinho e Ribeirão do Feijão

CLIMA

A área de estudo é uma região de clima predominantemente do tipo Cwa - clima quente e úmido, com inverno seco-, de acordo a classificação de Köppen, O mês mais seco apresenta totais de chuvas inferiores a 30 mm. No mês mais quente apresenta temperaturas médias superiores a 22°C no, e temperaturas menores que 18°C no mês mais frio. O índice de chuvas médias anuais é de 1.500 a 2.000 mm.

PEDOLOGIA

Na área de estudo, de acordo com o levantamento semidetalhado das quadrículas Brotas e São Carlos, escala 1:100.000 (OLIVEIRA e PRADO,1984; ALMEIDA, et. al,1981) (IPT, 1.990), ocorrem seis grandes grupos de solos: Latossolo Roxo e Terra Roxa Estruturada; Latossolo Vermelho-Escuro e Latossolo Vermelho-Amarelo de textura média; Podzólico Vermelho-Amarelo; Areias Quartzosas. Os tipos de solo estão diretamente relacionados ao relevo e ao substrato rochoso. A influência do relevo na formação do solo manifesta-se principalmente pela interação entre as suas formas e a dinâmica da água. Assim, em sistemas de colinas e planícies, há uma

tendência à infiltração da água, que, ao entrar em contato com o substrato favorecerá o desenvolvimento de solos mais profundos (Latossolos); enquanto em relevos de alta declividade, a ação do escoamento superficial sobrepõe-se à infiltração, levando à formação de solos rasos (IPT, 1999).

GEOLOGIA

A geologia da zona de estudo tem sido objeto de diversos mapeamentos por autores como Aguiar (1989), Zuquette (1981) e Niyishama (1991). Na área de estudo ocorrem unidades pertencentes ao grupo São Bento, constituídas pelos arenitos da Formação Botucatu e Piramboia e pelos derrames basálticos da Formação Serra Geral (Tabela 1). Além dessas unidades, cobrindo-as, ocorrem conglomerados e arenitos do grupo Bauru e sedimentos cenozoicos.

Tabela 1 - Unidades Geológicas no Município de São Carlos Modificado de IPT (1999).

Era	Grupo	Formação	Tipos de Rochas (litologia)
Quaternário			Sedimentos Aluvionares (Qa): aluviões em geral, incluindo depósitos de terraço. Cobertura da Serra de São Carlos e similares (TQi):arenitos conglomeráticos.
Cretáceo	BAURU	Itaqueri (KTi)	Predominantemente arenitos com cimento argiloso com lentes alongadas de folhelhos e com conglomerados limíticos.
	SÃO BENTO	Serra Geral (JKsg)	Rochas vulcânicas toleíticas dispostas em derrames basálticos, com coloração cinza a negra, textura afanítica, com intercalações de arenitos intertrapeanos, finos a médios, apresentando estratificação cruzada tangencial. Ocorrem esparsos níveis vitrofirios não individualizados
Jurássico		Botucatu (JKb)	Arenitos eólicos avermelhados de granulação fina a media, com estratificações cruzadas de médio a grande porte. Ocorrem restritamente depósitos fluviais de natureza areno - conglomeratica e camadas localizadas de siltitos e argilitos lacustres.
Triásico		Pirambóia (TJp)	Depósitos de arenitos finos a médios, avermelhados, silitico-argilosos, com estratificação cruzada ou plano-paralela, com níveis de folhelhos e arenitos argilosos variegados e raras intercalações de natureza areno-argilosa.

USO DO SOLO

O mapa de uso e ocupação do solo (Figura 11) foi gerado a partir dos dados de Dalla Nora (2010) e Cunha (2012). Na bacia do Rio Monjolinho insere-se a maioria da população urbana do município de São Carlos. Dentro da área de estudo encontram-

se a Área de Preservação Ambiental (APA) do Corumbataí, mas segundo dados da prefeitura apenas 16,4% da bacia do Ribeirão Feijão está recoberta por fragmentos florestais, onde o normal deveria ser de 65% a 70%.

Portanto, mesmo pertencendo em sua maioria a uma APA e a áreas de preservação de mananciais, as bacias apresentam como componentes dominantes do uso do solo, culturas como cana-de-açúcar (29% da área), eucalipto (6% da área) citro (6% da área) e áreas de pastagem (20%) e urbana (11%)

Figura 11- Mapa de uso e ocupação de solo das bacias do Rio Monjolinho e Ribeirão do Feijão (Modificado de Dalla, 2010 e Cunha, 2012).

4.2 SITUAÇÃO ATUAL DOS RECURSOS HÍDRICOS NA AREA DE ESTUDO

Segundo o relatório de situação dos recursos hídricos da bacia com ano base 2014, a disponibilidade *per capita* de água no município de São Carlos encontra-se em estado de atenção, sendo crítica a demanda de água subterrânea em relação à reserva explorável. Embora a demanda superficial não tenha mudado significativamente, a demanda total em relação ao $Q_{\text{médio}}$ e ao Q_{95} encontram-se em estado de atenção, próximo do estado crítico (CB-TJ, 2014). A Figura 12 apresenta as demandas de água subterrânea e superficial no período de 1989 a 2009, evidenciando um aumento progressivo no uso do recurso subterrâneo.

Figura 12 - Demandas superficial e subterrânea do município de São Carlos (Modificado de Costa, 2010)

Também com respeito ao uso da água subterrânea, Perroni (2005) avaliou o estado do sistema de abastecimento da cidade de São Carlos, encontrando rebaixamentos dos níveis estáticos de até 32 metros nos poços de abastecimento. Além disso, Santos (2009) encontrou que já está sendo usados 81% da reserva ativa do aquífero Guarani na área de afloramento no Estado de São Paulo. Isto confirma a necessidade de um manejo conjunto dos recursos que possibilite a sua sustentabilidade.

4.3 DESCRIÇÃO DO MODELO WEAP

WEAP21 integra uma série de processos físicos hidrológicos com a gestão das demandas e infraestrutura instalada de forma contínua e coerente (YATES et. al, 2005). A hidrologia física do modelo tem vários componentes conceitualmente simples que combinam-se para ser eficientes no cálculo, mas com especificação suficiente para capturar os processos hidrológicos importantes e avaliar assuntos claves nos aproveitamentos hídricos.

Inicialmente, o módulo de hidrologia é rodado, em certo intervalo, para obter os parâmetros do balanço de massa. Posteriormente, o modelo é rodado para calcular o

problema de alocação de água no mesmo intervalo. A bacia é representada por duas camadas de solo de forma unidimensional, e através de funções empíricas descrevem-se os processos de evapotranspiração, escoamento superficial, escoamento sub-superficial e percolação. A Figura 13 apresenta os componentes do modelo conceitual.

Figura 13 - Esquema do modelo Soil Moisture Method para uma área j . Modificado de YATES (2005)

WEAP permite que a bacia seja dividida primeiramente em sub-bacias e logo em áreas menores, calculando o balanço hídrico para cada uma dessas áreas. O balanço é calculado considerando o clima uniforme sob cada área, por meio da equação:

$$Rd_j \frac{dz_{1,j}}{dt} = P_e(t) - ETP(t)k_{c,j}(t) \left(\frac{5z_{1,j} - 2z_{1,j}^2}{3} \right) - P_e(t)z_{1,j}^{RRFj} - f_j k_j z_{1,j}^2 - (1 - f_j)k_j z_{1,j}^2 \quad (12)$$

Em que j é o índice que representa uma fração da área da bacia caracterizada pelo tipo e uso do solo; $Z_{1,j}$ é o armazenamento relativo dado em fração do armazenamento efetivo total, variando entre 0 e 1, onde 0 representa o ponto de murcha permanente, e 1 a capacidade de campo; Rd_j é o armazenamento efetivo da zona de raízes para uma porção j da área da bacia; P_e é a precipitação efetiva; ETP é a evapotranspiração potencial baseado no método de Penman-Montieth; $k_{c,j}$ é o coeficiente de cultura para uma porção j da área da bacia; RRF é o fator de resistência ao escoamento para

porção j da área da bacia; k é a condutividade da zona radicular para uma porção j da área da bacia; f é o coeficiente de particionamento do fluxo horizontal e vertical de acordo com o tipo de solo, tipo de cobertura do solo e topografia.

Quando no modelo não é implementada a conexão entre o aquífero e a bacia hidrográfica, o fluxo de base se origina de uma segunda camada e é determinado pela Equação:

$$S_{max} \frac{dz_2}{dt} = \left(\sum_{j=1}^N f_j k_j z_{1,j}^2 \right) - k_2 z_{2,j}^2. \quad (13)$$

Em que S_{max} é a percolação oriunda da camada superior, que é calculada por meio do balanço hídrico (Equação 12); K_2 é a condutividade da camada inferior; e $Z_2 \in [0,1]$ é o armazenamento relativo dado em fração do armazenamento da camada inferior.

Se houver uma conexão entre um aquífero e a bacia, a segunda camada é ignorada e a recarga R do aquífero é dada pela equação:

$$R = \sum_{j=1}^N A(f_j k_j z_{1,j}^2) \quad (14)$$

Em que A é a área de contribuição associada à porção j da bacia hidrográfica.

Interação água superficial e água subterrânea

WEAP permite simular a transferência dinâmica de água entre o curso do rio e o aquífero. O aquífero é considerado uma cunha estilizada que é assumida como simétrica ao curso do rio (Figura 14). O armazenamento total do aquífero é estimado sob a hipótese de que o nível d água do aquífero está em equilíbrio com o rio. Assim, o armazenamento em equilíbrio para um lado da cunha, GS_e (m^3), está dado por:

$$GS_e = h_d * l_w * A_d * S_y \quad (15)$$

Em que h_d (m) representa a distância que estende-se horizontalmente desde o curso de água; l_w (m) é o comprimento molhado do aquífero em contato com o curso; S_y é o rendimento específico do aquífero, e A_d é a profundidade no equilíbrio. Uma estimativa da altura na qual o aquífero permanece acima ou abaixo do nível do armazenamento

em equilíbrio está dado por y_d , assim, o armazenamento inicial GS no aquífero em $t=0$, está dado por:

$$GS(0) = GS_e + (y_d * h_d * l_w * A_d * S_y). \quad (16)$$

A altura vertical do aquífero acima ou abaixo do nível do armazenamento em equilíbrio está dado por:

$$y_d = \frac{GS - GS_e}{h_d * l_w * S_y}. \quad (17)$$

Figura 14 - Representação estilizada da conexão rio-aquífero do WEAP. (YATES, 2005)

Quanto maior a diferença de nível entre o aquífero e o rio, maior a percolação em direção ao curso e vice-versa. A percolação total S de um lado do rio (m^3 /tempo) está definida por:

$$S = 2 \left(K_s * \frac{y_d}{h_d} \right) * l_w * d_w \quad (18)$$

Sendo K_s uma estimativa da condutividade hidráulica saturada do aquífero e d_w uma estimativa da profundidade da água na seção do rio, a qual supõe-se invariante no tempo. A profundidade da água e o comprimento molhado são as áreas através do qual o rio e o aquífero intercambiam água. A condutividade hidráulica saturada controla a taxa com que água se movimenta. Estimada a percolação, o armazenamento total do aquífero para o intervalo analisado é dado por:

$$GS(i) = GS(i - 1) + 0,5(R - Ex - S), \quad (19)$$

Onde E_x é a extração do aquífero para satisfazer a demanda e R é a contribuição da bacia para a recarga.

4.4 CONSTRUÇÃO DO MODELO

A construção do modelo seguiu as etapas de discretização da bacia hidrográfica, tabulação dos dados de entrada e inserção dos parâmetros físicos requeridos pelo modelo. A entrada de dados no modelo é feita por meio da geração de tabelas que alimentam o banco de dados (Figura 15).

WEAP Area: Jacaré_guacu			Use the buttons below to filter the data.			
Level 1	Level 2	Level 4...	Variable	Scenario	Unit	Expression (can be changed and imported back into WEAP)
Demand Sites and Catchments	Feijao_alto		Area	Current Accounts	km^2	21,39394879
Demand Sites and Catchments	Feijao_alto	AQ	Area	Current Accounts	km^2/km^2	3,081252222
Demand Sites and Catchments	Feijao_alto	AQ	Cana_acucar	Area	Current Accounts	% share of km^2 0
Demand Sites and Catchments	Feijao_alto	AQ	Cerrado	Area	Current Accounts	% share of km^2 30,37259497
Demand Sites and Catchments	Feijao_alto	AQ	Citros	Area	Current Accounts	% share of km^2 14,66812296
Demand Sites and Catchments	Feijao_alto	AQ	Eucalipto	Area	Current Accounts	% share of km^2 12,48049677
Demand Sites and Catchments	Feijao_alto	AQ	Pastagem	Area	Current Accounts	% share of km^2 42,4787853
Demand Sites and Catchments	Feijao_alto	AQ	Temporarias	Area	Current Accounts	% share of km^2 0
Demand Sites and Catchments	Feijao_alto	AQ	Urbano	Area	Current Accounts	% share of km^2 0
Demand Sites and Catchments	Feijao_alto	Hi	Area	Current Accounts	km^2/km^2	0,413067028
Demand Sites and Catchments	Feijao_alto	Hi	Cana_acucar	Area	Current Accounts	% share of km^2 0
Demand Sites and Catchments	Feijao_alto	Hi	Cerrado	Area	Current Accounts	% share of km^2 91,06775627
Demand Sites and Catchments	Feijao_alto	Hi	Citros	Area	Current Accounts	% share of km^2 1,194481452
Demand Sites and Catchments	Feijao_alto	Hi	Eucalipto	Area	Current Accounts	% share of km^2 7,737762279
Demand Sites and Catchments	Feijao_alto	Hi	Pastagem	Area	Current Accounts	% share of km^2 0
Demand Sites and Catchments	Feijao_alto	Hi	Temporarias	Area	Current Accounts	% share of km^2 0
Demand Sites and Catchments	Feijao_alto	Hi	Urbano	Area	Current Accounts	% share of km^2 0
Demand Sites and Catchments	Feijao_alto	LE	Area	Current Accounts	km^2/km^2	1,138563938
Demand Sites and Catchments	Feijao_alto	LE	Cana_acucar	Area	Current Accounts	% share of km^2 0

Figura 15 - Exemplo formato dados de entrada no WEAP.

4.4.1 DISCRETIZAÇÃO DA BACIA

A área de estudo foi dividida em 6 sub-bacias utilizando ferramentas do sistema de informação geográfica gvSIG 10.2. A subdivisão foi feita considerando pontos de interesse como confluência de rios, presença de estações de medição de vazão e da altitude (como indicativo do fluxo).

4.4.2 DADOS DE ENTRADA DO MODELO WEAP

Os parâmetros básicos de entrada do modelo WEAP são apresentados na Tabela 2. WEAP tem uma estrutura de modelo em termos da resolução dos parâmetros de entrada, portanto, a ferramenta força alguns parâmetros para descrever a bacia inteira e outros para descrever unidades de área menores, como a classificação por unidades de solo ou as categorias de uso do solo.

Como mencionado, a resolução de alguns parâmetros exige da classificação do tipo de solo e uso e ocupação do mesmo. Assim, para o caso da pedologia foram utilizados dados do Levantamento Pedológico semidetalhado do estado de São Paulo: Quadriculas de São Carlos e Brotas por OLIVEIRA e PRADO(1984) e ALMEIDA et. al (1981), e o mapa pedológico do Estado de São Paulo. Para o caso do uso do solo, foi gerado um mapa a partir de mapas disponibilizados por vários autores, especialmente Dalla Nora (2010), complementado com os trabalhos da zona de Cunha (2012), Muro (2000), e Mazione et. al (2011). Assim, uma nova subdivisão foi gerada para cada uma das 13 sub-bacias.

Tabela 2 - Parâmetros básicos de entrada do WEAP. Modificado de Amato et al. (2006).

Parâmetro	Unidades	Resolução
Clima		
Precipitação	mm/dia	Sub-bacia
Temperatura	C	Sub-bacia
Umidade	%	Sub-bacia
Latitude	Graus	Bacia
Vazão		
Dados de estações para calibração	m ³ /s	Estações distribuídas na área
Parâmetro	Unidades	Resolução
Uso do Solo		
Área	km ²	Sub-bacia
Capacidade de armazenamento de água na zona profunda	mm	Sub-bacia
Condutividade da zona profunda	mm/dia	Sub-bacia
Z ₂ Inicial	%	Sub-bacia
Capacidade armazenamento de água no solo (Sw)	mm	Tipo de solo

(Continuação)

Parâmetro	Unidades	Resolução
Condutividade na zona de raízes (Ks)	mm/dia	Tipo de solo
Direção preferencial do fluxo (f)	Sem unidades	Tipo de solo
Z1 Inicial	%	Tipo de solo
Coefficiente da cultura (Kc)	Sem unidades	Uso de solo
Coefficiente de Resistência ao escoamento (RRF)	Sem unidades	Uso de solo
Demandas		
Locais de demanda	Sem unidades	Sub-bacia
Vazão de demanda	m ³ /s	Local demanda
Caraterísticas locais de demanda (% de retorno, variação mensal)	Sem unidades	Local demanda
Hidrogeológicos		
Condutividade	m/dia	
Armazenamento específico	Sem unidades	
h _d , l _w , d _y	m	

PRECIPITAÇÃO

Para os valores de precipitação foram utilizados dados das estações pluviométricas apresentadas na Tabela 3, disponíveis no site HIDROWEB da ANA, além dos dados da estação do INMET de São Carlos.

Para a espacialização dos dados foi utilizado o Método dos Polígonos de Thiessen, gerando as series de precipitação para cada sub-bacia. Escolheu-se o período de 1997 a 2007 conforme a concomitância com os dados disponíveis de vazão.

Tabela 3 - Estações Pluviométricas utilizadas no estudo.

Código ANA	Nome	Latitude	Longitude	Altitude
2247206	Fazenda Santa Barbara	-22,6	-47,59	780
2247198	Faz. Pequena Holanda	-22,17	-47,78	780
2247196	CRHEA-BROA	-22,17	-47,89	732
2247182	Ribeirão Do Feijão	-22,15	-47,88	676
2148164	Ibaté	-21,95	-47,99	0
	INMET São Carlos	-21,96	-47,86	856

TEMPERATURA, UMIDADE RELATIVA E VELOCIDADE DO VENTO

Foram usadas as series mensais de duas estações climatológicas presentes na área de estudo (Ver Tabela 4).

Tabela 4 - Estações Climatológicas com dados disponíveis na área de estudo

Estação	Altitude (msnm)	Latitude	Longitude	Período de anos	Operador
CRHEA	733	22°10'	47°53'	1981-2015	EESC-USP
São Carlos	856	-21,96	-47,86	1977-2015	INMET

Devido à escassez de estações foi feita uma extrapolação por altitude da informação das variáveis de ambas as estações para cada sub-bacia.

VAZÃO

A tabela 5 apresenta as estações fluviométricas utilizadas no modelo.

Tabela 5 - Estações fluviométricas utilizadas no estudo.

Código ANA	Nome	Rio	Latitude	Longitude	Anos da serie
62770500	Fazenda São José	Ribeirão do Monjolinho	-22°03'34"	-48°05'24"	De 1987 a 2007
62760005	Ribeirão do Feijão	Ribeirão do Feijão	-22°09'16"	-47°52'53"	De 1977 a 2013

PARÂMETROS DO SOLO

Os parâmetros do solo foram derivados de diferentes estudos já realizados na área (PONS, 2006; BARTOLOMEU, 2012; MAZIERO, 2005; GOMEZ, 2008; MURO, 2000; VELOZO, 2006; ROSSATO, 2002; RIBEIRO, 2012). Nesses estudos foram coletadas amostras de solos em vários pontos da bacia, sendo descritos seus parâmetros físicos, tais como: porosidade, condutividade hidráulica, granulometria, além de ensaios de infiltração. Os seis tipos de solo apresentados nos levantamentos semidetalhados foram agrupados em três tipos de solo para diminuir custo

computacional e tempo de calibração, sendo considerados Latossolos, Neossolos e Argissolos.

PARÂMETROS DA COBERTURA VEGETAL

Os parâmetros relacionados com a cobertura vegetal são o índice de área foliar, o coeficiente de cultivos e o coeficiente de resistência ao escoamento. Estes dados foram extraídos da literatura consultada e são apresentados na Tabela 7, em alguns casos o parâmetro teve uma variação mensal representado por uma faixa de valores.

Tabela 6 - Parâmetros categorias uso do solo

Uso do solo	Kc	RRF
Culturas Temporárias	1	3
Pastagem	0,85-0,95	4
Eucalipto	1	5
Citros	0,8	3
Cana de açúcar	0,4-1,25	2
Cerrado	1	5
Urbano	1*	2

* O parâmetro Kc é exigido para todas áreas, assim, foi utilizado este valor em áreas urbanas para considerar as perdas por evapotranspiração das zonas verdes e a evaporação de água no solo.

DADOS DE DEMANDA

Os pontos de demandas foram gerados a partir do Cadastro de Outorga¹ cedido pelo DAEE (Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo), contendo as informações do município onde estão situados, o titular da outorga, código e o nome do curso d'água relacionado à outorga, finalidade da outorga: abastecimento público, agricultura, produção de água mineral, comércio, dessedentação animal, geração de energia hidrelétrica, hidroagrícola, industrial, irrigação, piscicultura, lazer, mineração, regularização de vazões, rural, saneamento, urbanístico, entre outros. A vazão outorgada é expressa em m³/hora e o período de operação representa o número de horas bombeada por dia. A Tabela 7 apresenta os volumes diários por tipo de uso e quanto desses volumes proveem de fontes superficiais e subterrâneas.

¹ Diretoria da Bacia do Baixo Tietê - Departamento de Águas e Energia Elétrica, mensagem recebida em 26 de novembro de 2014

Tabela 7 - Volumes diários de água utilizados por tipo de uso e tipo de fonte

Nome do uso	Volume diário total (m3)	Porcentagem de uso água superficial	Porcentagem de uso água subterrânea	Porcentagem do total da demanda
Abastecimento Público	78710	51,80	48,20	82,19
Dessedentação	1403	32,89	67,11	1,46
Industrial	3124	72,60	27,40	3,26
Irrigação	983	95,93	4,07	1,02
Lazer	183,8	5,88	94,12	0,19
Mineração	780	100,00	0,00	0,81
Sanitário*	10316	6,80	93,20	10,77
Outros	257,8	84,48	15,52	0,27

*Outorga de água para uso sanitário a privados.

Pode-se observar que o abastecimento público que representa 82% do total da demanda, faz uso conjunto de água subterrânea e superficial; e o uso sanitário que corresponde a 10,8%, utiliza majoritariamente água subterrânea (aclara-se que no cadastro cedido não se encontram as outorgas de água superficial para o abastecimento de município de São Carlos, que foram tomadas do trabalho de Costa (2010). Com respeito ao uso para irrigação, a ausência de um cadastro de irrigantes dificulta uma análise das áreas irrigadas e o tipo de cultura, porém presume-se que a maior proporção de água é usada para a irrigação de citros e eucalipto, uma vez que a cana de açúcar no estado de São Paulo não é irrigada (BARROS, 2011).

PARÂMETROS HIDROGEOLÓGICOS

Para cada uma das áreas de planejamento, foram definidos nós de água subterrânea recebendo recarga a partir da captação sobreposta, estes nós estão fisicamente conectados ao sistema fluvial adjacente. Os trechos de interação foram definidos conforme a geologia e materiais inconsolidados com base no trabalho de Rabelo (2008) e no Mapeamento geotécnico preliminar da quadricula de São Carlos (Nishisyama, 1991), complementados com os trabalhos de Correa (1995), Muro (2000) e Pons (2006).

Os dados de entrada como a capacidade de armazenamento e outras propriedades hidrogeológicas que incluem o rendimento específico, S_y , e a condutividade saturada, K_s , foram estimados a partir de outros estudos feitos na área (RIBIERO, 2010;

RABELO, 2008; SANTOS, 2009). Por exemplo, a distância horizontal foi calculada inicialmente como a largura média das bacias na zona de recarga do aquífero Guarani. O comprimento rio foi calculado usando ferramentas do SIG.

Valores dos parâmetros de rendimento específico (0,15; Guanabara, 2011), condutividade hidráulica saturada (19 m /dia; Arantes, 2003), e profundidade molhada (0,8 a 1 m) foram prescritos para cada trecho rio-aquífero. Com respeito ao armazenamento inicial, foram utilizados os resultados de Santos (2009), que encontrou que a área de afloramento do aquífero guarani no Estado de São Paulo (18400 km²) tem uma reserva ativa de $4,4 \times 10^8$ m³/ano, este valor foi distribuído para cada nó de água subterrânea, levando em consideração a área de cada sub-bacia.

4.5 CALIBRAÇÃO DO MODELO

4.5.1 CALIBRAÇÃO MODELO ÁGUA SUPERFICIAL

Para a calibração do modelo primeiro foi analisado seu comportamento nas bacias contribuintes que correspondem às áreas de regime natural, depois foram avaliadas as bacias intermédias e finalmente o curso inferior.

Para uma primeira aproximação, foram estabelecidos os seguintes parâmetros de calibração gerais para toda a área mencionada:

- Capacidade de armazenamento de água na zona radicular, S_w ;
- Capacidade de armazenamento de água na zona profunda, D_w ;
- Fator de Resistência ao escoamento superficial, RRF;
- Condutividade da zona de raízes, K_s ;
- Condutividade da Zona profunda, K_d ; e
- Direção de fluxo preferencial, f .

Finalmente, é feita uma comparação dos fluxos modelados com registros históricos de estações hidrométricas na área. Para estabelecer o grau de correspondência entre os valores observados e os valores estimados, foram utilizados dois índices comumente usados na calibração de modelos hidrológicos: o índice de eficiência de Nash-Sutcliffe (Eq 20.) e a porcentagem de viés (Eq 21.), conforme Węglarczyk (1988). Além da coeficiente de determinação r^2 (Eq 22.).

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - Q_{o,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - \bar{Q}_o)^2}, \quad (20)$$

$$Vies = 100 * (\bar{Q}_s - \bar{Q}_o / \bar{Q}_o), \quad (21)$$

$$r^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - \bar{Q}_o)(Q_{s,i} - \bar{Q}_s)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - \bar{Q}_o)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - \bar{Q}_s)^2}} \right]^2, \quad (22)$$

Onde Q_s , e Q_o , correspondem às vazões simuladas e observadas para cada passo de tempo i , e n é o número total de passos de tempo.

Depois de obter-se um bom ajuste gráfico entre os fluxos simulados e observados, são estimadas as estatísticas dadas pelas Equações 20, 21 e 22 as quais servem para determinar a direção em que a calibragem deve ser ajustada em passos subsequentes. Em geral, os critérios de interpretação dos dados estatísticos são os seguintes:

- Nash-Sutcliffe: Quanto mais próximo de 1, melhor a correspondência entre os dados observados e simulados.
- Viés: Quanto menor o percentual de Viés, melhor a correspondência entre os dados observados e simulados.
- r^2 : Quanto mais próximo de 1, melhor a correspondência entre os dados observados e simulados.

4.5.2 CALIBRAÇÃO DO MODELO ÁGUA SUBTERRÂNEA

Os valores dos parâmetros de rendimento específico, condutividade hidráulica saturada e profundidade molhada, serão obtidos através de um processo de tentativa e erro, procurando que as variações observadas concordem com os dados de nível de água. Os parâmetros h_d e S_y serão ajustados de forma a melhorar a correspondência entre as altitudes simuladas e as observadas.

4.5 CENÁRIOS DE AVALIAÇÃO DE SUSTENTABILIDADE

Para avaliar os possíveis impactos futuros em função das alterações na demanda e o uso e ocupação do solo, foram utilizadas as expectativas descritas por trabalhos desenvolvidos na área. Assim, serão consideradas as combinações de duas alternativas para mudanças no uso do solo e três alternativas de mudanças nas demandas de ambos os recursos.

Para efeitos de construção dos cenários, foram considerados os resultados de Costa (2010), quem avaliou a expansão da mancha urbana e suas consequências sobre as bacias do Rio do Monjolinho e do Ribeirão do Feijão da cidade de São Carlos. O autor analisou o comportamento da população e o crescimento da área impermeável da bacia, chegando em duas equações que as descrevem, a seguir:

$$Pop = 3,7917(ano) - 7390,6 \quad (23)$$

Em que Pop corresponde à população em milhares de habitantes

$$A_{imp} = 0,0004(Pop) - 9,8147 \quad (24)$$

Em que Pop corresponde ao número de habitantes e A_{imp} superfície impermeabilizada em Km².

Além do trabalho de Costa, foi levado em consideração o trabalho e os dados apresentados por Martins (2004), que avalia o déficit de área de preservação para cada bacia.

Para o caso das demandas, foram estabelecidos aumentos nos usos para abastecimento público, sanitário e industrial. A demanda por irrigação foi mantida estável levando em consideração que a cana-de-açúcar não é irrigada e que segundo

estudos da EMBRAPA (CRISCUOLO, et. al., 2002) a mudança do uso do solo em São Carlos está na direção de aumento de áreas de pastagem.

O WEAP permite assinalar preferências de suprimento, assim, se um nó de demanda estiver conectado a mais de uma fonte de fornecimento (no caso foram conectados todos os nós de demandas sanitárias, industrial e abastecimento público, a fontes de água superficial e água subterrânea), é possível classificar as opções de suprimento com preferências de suprimento. Usando as preferências de fornecimento, WEAP determina a ordem de alocação a seguir quando atribuir a água. A ordem de alocação representa a ordem de cálculo real usada pelo WEAP para alocar água. Todos os links de transmissão com a mesma ordem de alocação são tratados ao mesmo tempo. Por exemplo, os fluxos através de ligações de transmissão com a ordem de alocação 1 são calculados, enquanto mantêm temporariamente os fluxos em outras ligações de transmissão (com números de ordem de alocação mais elevados) com fluxo zero. Logo, após os fluxos da ordem 1 terem sido determinados, são calculados os fluxos em ligações com a ordem de alocação 2, enquanto temporariamente o ajuste para zero flui em links de ordem 3 e superiores. Neste sentido os cenários foram gerados dando preferências diferenciadas para fontes subterrâneas e superficiais para o abastecimento das demandas. A tabela 8 mostra um resumo dos cenários avaliados, que vão até o ano de 2030, e que foram definidos a partir da combinação das projeções de demanda D1, D2 e D3 e de mudança de uso de solo S1 e S2, descritas como:

D1: A demanda para abastecimento público crescerá conforme ao crescimento populacional e ao consumo *per capita* atual sendo tomado 50% de fontes superficiais e 50% de fonte subterrâneas. A demanda industrial e sanitária crescerão 10% e 20% respetivamente, continuando com fontes atuais.

D2: A demanda de água para abastecimento público crescerá conforme ao crescimento populacional e ao consumo per capita atual. A demanda industrial e sanitária crescerão 10% e 20% respetivamente. Em todos os casos será dada uma preferência às fontes subterrâneas a partir do ano 2007 (os links de transmissão de água subterrânea terão ordem 1 e as superficiais terão ordem 2)

D3: A demanda de água para abastecimento público crescerá conforme ao crescimento populacional e ao consumo per capita atual. A demanda industrial e sanitária crescerão 10% e 20% respectivamente. Em todos os casos será dada uma preferência às fontes superficiais a partir do ano 2007 (os links de transmissão de água superficial terão ordem 1 e as subterrâneas terão ordem 2)

S1: A área impermeabilizada das bacias crescerá conforme aos cenários de Costa, ocupando áreas de recarga, substituindo o uso de solo de pastagem.

S2: A área impermeabilizada crescerá fora das bacias (crescimento na zona norte do município) e serão recuperadas as áreas delimitadas segundo o código florestal

Para a avaliação dos cenários, foram geradas as curvas de permanência de vazões e os resultados simulados pelo WEAP de cobertura de demanda e confiabilidade, esta última representa a porcentagem dos tempos em que uma demanda é totalmente satisfeita. Por exemplo, se um nó de demanda tem demanda não satisfeita em seis meses em um cenário de 10 anos, a confiabilidade seria $(10 * 12 - 6) / (10 * 12) = 95\%$.

Tabela 8 - Cenários com mudança de uso do solo e de demandas avaliados

	Uso do solo	
	S1 Aumento da área impermeabilizada em zonas de recarga	S2 Recuperação e aumento de áreas de proteção
Demandas D1 Abastecimento público ↑ conforme aumento populacional (50%superficial- 50%subterraneo) Industrial ↑10% Fontes atuais Sanitária ↑20% Fontes atuais	D1_S1	D1_S2
D2 Abastecimento público ↑ conforme aumento populacional Industrial ↑10% Sanitária ↑20% Todo o aumento suprido por fontes subterrâneas	D2_S1	D2_S2
D3 Abastecimento público ↑ conforme aumento populacional Industrial ↑10% Sanitária ↑20% Todo o aumento suprido por fontes superficiais	D3_S1	D3_S2

A simulação de cenários exigiu a geração de uma série de dados climáticos. Assim, foram geradas novas series de precipitação com polígonos de Thiessen a partir de dados de duas estações que tinham dados desde 1980 até 2014, sendo repetida a serie para a geração dos cenários (sob a suposição que choverá conforme as series históricas), o mesmo foi suposto para a geração dos dados de velocidade do vento, umidade relativa e temperatura.

4.6 RESUMO DO PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

A Figura 16 mostra o procedimento metodológico do presente trabalho. Definido o tema a ser desenvolvido, foi realizada uma revisão bibliográfica para servir de suporte conceitual de diversos assuntos relacionados com o problema para que este pudesse ser estruturado. Paralelamente foi iniciada a busca por possíveis locais onde o trabalho pudesse ser aplicado. Iniciou-se então a busca por informações e dados de algumas bacias, até que os mananciais do município de São Carlos foram escolhidos. O sistema de suporte a decisão WEAP começou a ser testado com os dados da bacia, o processo de calibração foi iniciado e os cenários começaram a ser analisados. Finalmente os resultados serão discutidos e as conclusões a respeito do desempenho do modelo na análise da alocação de água na bacia serão obtidas.

Figura 16 - Procedimento Metodológico

5. RESULTADOS

5.1 DISCRETIZAÇÃO DA BACIA

A Figura 17 apresenta as 6 Sub-bacias da área de estudo. Como mencionado, as bacias foram delimitadas levando em consideração pontos de confluência, presença de estações de monitoramento de vazão e a altimetria do local. Como resultado, a estação localizada no Rio Monjolinho (COD.62770500) tem como contribuintes as sub-bacias Monjolinho-Médio e Monjolinho Alto. Para a estação do Ribeirão do Feijão (COD.62760005) contribuem os afluentes das sub-bacias Laranja-Médio, Feijão-alto e Feijão-médio. O critério da altimetria gerou as sub-bacias com subrenome Alto, as quais respondem ao modelo conceitual da Figura 13, estando desconectadas do aquífero por causa da declividade.

Figura 17 - Sub-bacias da área de estudo.

5.2 ESPACIALIZAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO

A Figura 18 apresenta os polígonos de Thiessen gerados para a espacialização da precipitação. Assim, a bacia do Rio Monjolinho apresentou uma precipitação média anual de 1525 mm e a bacia do Ribeirão do Feijão de 1412mm.

Figura 18 - Polígonos de Thiessen gerados a partir de estações utilizadas no estudo

A partir do resultado anterior foram obtidas as series de precipitação para cada sub-bacia, as quais foram introduzidas no pacote como arquivos .cvs. Foi utilizada uma escala mensal, sendo os dados de entrada foram as chuvas acumuladas por mês.

5.3 CONSTRUÇÃO DO MODELO

A partir da discretização da bacia geraram-se os nós que representam as sub-bacias, o recurso subterrâneo e as demandas. A quantidade de outorgas presentes no cadastro (220 registros) fez necessária a sua agregação dependendo do tipo de uso (sanitário, irrigação, industrial), o recurso utilizado (superficial e subterrâneo), e a distância espacial entre eles, isto para diminuir o custo computacional. Um trabalho adicional foi a depuração do cadastro para determinar quais outorgas representavam

recurso efetivamente explorado no período escolhido para o estudo (1997-2007). Como o cadastro estava atualizado para o ano 2013, para o caso da exploração de poços, foi feita uma comparação dos dados de outorga com os presentes nos diferentes trabalhos mencionados. Para o caso da demanda superficial cujas maiores outorgas de vazão correspondiam ao abastecimento público, foram introduzidas séries a partir do trabalho de Costa (2012). Por fim, gerou-se no SIG um mapa com os pontos de demanda (Figura 19), que foram implementados com os valores correspondentes no WEAP somando uma demanda de 2,8 milhões de m³ por mês.

Figura 19 - Pontos de captação e lançamento nas bacias

Introduzida a rede hídrica e os diferentes tipos de nós (pontos de demanda, bacias e aquíferos), estabeleceram-se as conexões entre os nós. Cada nó de demanda foi conectado a sua fonte de abastecimento que no caso poderia ser um nó superficial ou um subterrâneo, os fluxos de retorno também foram estabelecidos. Além disso, os nós das bacias com toda a sua informação climática e de tipo e uso de solo foram conectados aos correspondentes rios e aquíferos, obtendo a espacialização do uso dos recursos hídricos e a hidrologia da bacia. A Figura 20 apresenta a tela do WEAP com o modelo construído.

Figura 20- Modelo conceitual das bacias.

5.4 CALIBRAÇÃO DOS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO.

O resultado da simulação com os parâmetros iniciais, não gerou correspondência entre os dados de vazão simulados e os observados, assim, os parâmetros começaram a ser variados por tentativa para conseguir uma correspondência aceitável. Tendo dois pontos com medição de vazão foram feitas as variações por grupos de bacias contribuintes. A calibração do modelo é um processo difícil, porque o WEAP não possui uma ferramenta de calibração automática, como produto de um trabalho por meio de um processo de ensaio e erro, os parâmetros foram modificados até atingir um resultado admissível. Para a bacia do Ribeirão do Feijão foi escolhido como período de calibração os anos de 1997 a 2004 e como período de validação os anos 2005 a 2007. No caso do Rio Monjolinho, o período de calibração foi de 1997 a 2003 e o período de validação de 2005 a 2007, essa diferenciação foi feita depois da análise da série de vazão do Rio Monjolinho, que mostrou nos anos de 2006 e 2007 valores atípicos, que foram atribuídos a falhas na curva chave. A precipitação se manteve na média nesse períodos, como mostra a Figura 21, onde a linha tracejada indica a mudança de validade da curva-chave. Pela mesma razão, o cálculo dos índices

estatísticos para o período de validação foram feitos com e sem esses valores de série de vazão.

Figura 21 - Série de vazão e precipitação observada da Bacia do Rio Monjolinho mostrando os valores atípicos de vazão nos meses chuvosos de 2006 e 2007.

A calibração do modelo foi feita em duas etapas. Inicialmente foi feito um exercício de calibração do recurso hídrico superficial (pela modificação de parâmetros que afetavam só a parte superficial) até chegar num resultado visual satisfatório. Logo modificaram-se os parâmetros hidrogeológicos até conseguir um resultado aceitável tanto na comparação das curvas de vazões, como na variação dos níveis de água subterrânea. Durante a etapa de calibração foi evidenciado um erro no cálculo do WEAP no balanço de água subterrânea, porquanto o fator 0,5 da Equação 19, não era efetivamente aplicado ao valor da recarga mensal (R), o que gerou resultados inconsistentes. Optou-se por gerar uma conexão entre os nós de água subterrânea e novos nós que representariam aquíferos profundos, os quais receberiam a metade da recarga gerada. Finalmente, as Figura 23 e 24 apresentam a comparação entre a vazão simulada e a observada da sub-bacia do Rio Monjolinho e do Ribeirão do Feijão para os períodos de calibração e validação.

Figura 22 - Comparação de vazão simulada e observada para a sub-bacia do Rio Monjolinho

Figura 23 - Comparação de vazão simulada e observada para a sub-bacia do Ribeirão do Feijão.

A análise visual das curvas de vazões simuladas mostra um ajuste satisfatório com as curvas de vazões observadas. Como a calibração foi feita manualmente, não é possível saber se o melhor ajuste foi alcançado. Assim, a calibração foi realizada até chegar a valores dos índices estatísticos aceitáveis. Na tabela 9 apresentam-se os valores obtidos para os coeficientes

Tabela 9 - Valores obtidos para a avaliação estatística dos resultados da simulação

	Rio Monjolinho			Ribeirão do Feijão	
	Calibração	Validação sem outliers	Validação com outliers	Calibração	Validação
Nash-Sutcliffe	0,76	0,81	0,57	0,67	0,7
Viés	7,97	2,35	12,16	-4,13	-3,33
r²	0,79	0,81	0,73	0,73	0,74

O modelo mostrou uma previsão das vazões satisfatória. Os valores do Viés entre $\pm 10\%$ são referidos por Moriasi et. al. (2007) como muito bons. Os valores do Nash-Sutcliffe, também segundo o autor, foram *muito bom* para o Rio Monjolinho ($0,75 < \text{Nash} < 1,00$ para a avaliação sem outliers) e *bom* para o Ribeirão do Feijão ($0,65 < \text{Nash} \leq 0,75$).

A simulação do recurso hídrico subterrâneo foi avaliada comparando os resultados alcançados com dados de nível de água de diferentes poços da área de estudo cedidos por Perroni (2004). A expectativa é de que, se o modelo puder representar adequadamente o uso de águas superficiais e subterrâneas, ele deverá ser capaz de rastrear as tendências das observações de poços de água subterrânea. Um conjunto de três poços nomeados Tramer, Distrito Industrial e Parque Fehr, foi selecionado para estimar as flutuações, isto por estarem localizados na formação Botucatu e por terem um maior número de registros de nível. A simulação da elevação da água subterrânea no WEAP é estilizada (Figura 14), de modo que uma comparação um-para-um de valores observados versus simulados foi considerada inadequada. Em vez disso, a variação normal padrão da WSE observada e simulada foi calculada como: $z = (x - \mu) / \sigma$, onde x é a elevação da superfície da água observada ou simulada, μ é a média e σ o desvio padrão dos dados de nível estático de cada poço. A Figura 24 mostra a comparação para o aquífero pertencente à bacia do Rio Monjolinho.

Figura 24 - Variação normalizada dos níveis estáticos estimados pelo WEAP e dados medidos nos poços Tramer, Parque Industrial e Parque Fehr na bacia do Rio Monjolinho.

Pode-se observar que os dados gerados pelo modelo WEAP acompanham os dados medidos e a diminuição progressiva dos níveis estáticos, já identificada por Perroni (2004) para o caso do Rio Monjolinho. Com respeito à variação mensal, a ordem de grandeza de menos de um metro encontrada em outras áreas de estudo do aquífero Guarani, perto de São Carlos (Arantes, 2003) se mantém no presente trabalho. Foram realizados também um teste F (comparação variâncias) e um teste t-student (comparação médias), com o intuito de estabelecer a similitude (estatística) das séries dos valores simulados com o conjunto de valores observados. Os resultados dos testes, apresentados no Apêndice A, mostraram que os valores da estatísticas ($F=0,58872$ e $t = -0,14373$) encontram-se dentro dos intervalos de confiança de 95% ($0,3707627 ; 0,9348183$) e $(-0,3106414 ; 0,2685222)$, respectivamente.

Outra forma de identificar a validade dos resultados é a proximidade dos valores de evapotranspiração e recarga estimados (Tabela 10) com os estimados em outros estudos mais específicos na mesma área, como evapotranspiração anual de 914 mm (Barreto (2009)) e recarga anual de 250 mm para as formações da bacia (Rebello (2006)).

Tabela 10 - Valores anuais de evapotranspiração e recarga estimados pelo WEAP para a bacia do Rio Monjolinho

	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	Média
Evapotranspiração (mm)	916	910	910	888	911	974	870	859	912	856	940	904,18
Recarga (mm)	210	221	233	217	227	236	228	235	235	200	242	22,81
Precipitação (mm)	1453	1507	1407	1717	1351	1533	1405	1512	1467	1348	1452	1468,36

Além do mencionado, foi comparado o valor de vazão base estimado pelo WEAP com os valores da estação fluviométrica para meses de nula ou pouca precipitação, levando em consideração que ambos os valores deveriam ser muito próximos, o modelo apresentou resultados na mesma ordem de grandeza (Tabela 11).

Tabela 11 - Comparação valores de vazão de base estimada pelo WEAP e dados de estação fluviométrica para meses de pouca precipitação na bacia do Rio Monjolinho.

DATA	ago/97	jul/98	jul/99	ago/99	ago/04	set/07
Precipitação mm	0,03	0,16	0,32	0,00	0,10	0,01
Fluxo base de Bacias de cabeceira m³/s (1)	0,24	0,24	0,24	0,23	0,22	0,22
Fluxo da interação rio-aquífero m³/s (2)	2,48	2,46	2,44	2,44	2,34	2,28
Soma m³/s (1) + (2)	2,72	2,7	2,68	2,67	2,56	2,5
Dado estação fluviométrica m³/s	3,08	3,06	3,03	3,02	2,93	2,93
Diferença	0,36	0,36	0,35	0,35	0,37	0,43
Precipitação mm	0,47	0,1	0,64	-0,02	1,03	-0,27

Para o caso da bacia do Ribeirão do Feijão não foi possível obter medições de níveis estáticos para o período estudado de poços presentes na área da sub-bacia. Porém, admitiu-se que os valores estimados correspondem com a realidade, porque a demanda de água subterrânea na bacia, corresponde a menos do 0,05% da recarga. Além disso, já tem-se estabelecido que a exploração no Sistema Aquífero Guarani ainda não afetou de forma relevante zonas de afloramento com as mesmas características de recarga e demanda Barreto (2010). Da mesma forma que para a bacia do Rio Monjolinho, a Tabela 12 apresenta os valores anuais de evapotranspiração e recarga estimados pelo WEAP. A recarga é maior por conta das formações da bacia, correspondendo com o valor maior apresentado por Rebelo (2006). A Tabela 13 apresenta a comparação dos valores de vazão de base estimada pelo WEAP e dados da estação fluviométrica para meses de pouca precipitação.

Tabela 12 -Valores anuais de evapotranspiração e recarga estimados pelo WEAP para a bacia do Ribeirão do Feijão.

	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	Média
Evapotranspiração (mm)	974	932	922	998	1017	994	898	902	949	851	975	946,54
Recarga (mm)	371	340	355	408	399	368	351	345	367	267	372	358,45
Precipitação (mm)	1559	1471	1433	1984	1611	1481	1509	1518	1559	1354	1500	1543,5

Tabela 13 - Comparação dos valores de vazão de base estimada pelo WEAP e dados de estação fluviométrica para meses de pouca precipitação na bacia Ribeirão do Feijão.

DATA	ago/97	ago/99	jun/00	jul/03	jul/05	ago/07
Precipitação mm	0,00	0,00	0,19	0,41	0,44	0,00
Fluxo base de Bacias de cabeceira m ³ /s	0,84	0,84	0,87	0,86	0,83	0,80
Fluxo da interação rio-aquífero m ³ /s	1,61	1,62	1,65	1,61	1,59	1,55
Soma m ³ /s (1) + (2)	2,45	2,45	2,51	2,47	2,42	2,34
Dado estação fluviométrica m ³ /s	2,66	2,77	2,63	2,67	2,97	2,51
Diferença	0,21	0,32	0,12	0,20	0,55	0,17

Finalmente a Tabela 14 mostra os valores dos parâmetros do modelo após a calibração.

Tabela 14 - Valores dos parâmetros do modelos após a calibração.

Parâmetro	Unidades	Categorias	Rio Monjolinho	Ribeirão do Feijão
Capacidade de armazenamento de água na zona profunda	mm		20000	20000
Condutividade da zona profunda	mm/mês		500	500
Z ₂ Inicial	%		20	28
Capacidade armazenamento de água no solo (Sw)	mm	Temporárias	900	900
		Pastagem	1500	1500
		Eucalipto	5000	5000
		Citros	1500	1500
		Cana açúcar	1500	1500
		Cerrado	8000	8000
		Urbano	1500	1500
Condutividade na zona de raízes (Ks)	mm/mês	Latossolo	150	250
		Neossolo	200	400

(Continuação)

Parâmetro	Unidades	Categorias	Rio Monjolinho	Ribeirão do Feijão
Condutividade na zona de raízes (Ks)	mm/mês	Argissolo	-	300
		Urbano	100	250
Direção preferencial do fluxo (f)	Sem unidades	Latossolo	0,2	0,2
		Neossolo	0,2	0,2
		Argissolo	0,3	0,2
		Urbano	0,3	0,2
Z1 Inicial	%		30	35
Coeficiente da cultura (Kc)	Sem unidades	Temporárias	1	
		Pastagem	Jan-Feb-Mar:0,85;Apr-May-Jun: 0,9; Jul-Aug-Sep:0,95;Oct-Nov-Dec; 0,9	
		Eucalipto	1	
		Citros	0,8	
		Cana açúcar	Jan-Feb-Mar:0,85;Apr-May-Jun: 0,9; Jul-Aug-Sep:0,95;Oct-Nov-Dec; 0,9	
		Cerrado	1	
		Urbano	1	
Coeficiente de Resistência ao escoamento (RRF)	Sem unidades	Temporárias	5	6
		Pastagem	3	6
		Eucalipto	6	7
		Citros	4	5
		Cana açúcar	4	6
		Cerrado	6	8
		Urbano	0,5	0,5
Condutividade	m/dia		19	20
Armazenamento específico	Sem unidades		0,15	0,18
h_d	m		4000	2500
l_w	m		40800	10700
d_y	m		4	3

5.5 CENARIOS DE AVALIAÇÃO

Como mencionado na Seção 4.5, os nós de demandas de abastecimento público, sanitária e industrial foram conectados todos as fontes subterrâneas e superficiais, além do número de nós ser novamente simplificado. Para efeitos de avaliação, foram adicionados nós de fluxo mínimo nos exutórios das bacias representados pelas vazões $Q_{7,10}$ tomados de Montaño (2002). A Figura 25 mostra o modelo conceitual gerado. As curvas de permanência em escala logarítmica geradas a partir das series de vazão de cada cenário são apresentadas nas figuras 26 e 27.

Figura 25 - Modelo conceitual das bacias para avaliação de cenários

Figura 26 - Curvas de permanência de vazões do Ribeirão do Feijão para os cenários avaliados.

Figura 27 - Curvas de permanência de vazões do Rio Monjolinho para os cenários avaliados.

No caso do Ribeirão do Feijão, todos os cenários mostraram uma diminuição nos valores de vazão em todas as curvas. Se evidencia que a variável de mudança de uso do solo não teve muita repercussão no resultado, visto que os valores para uma mesma variável de demanda D (D1, D2 e D3) tem uma diferença mínima; mesmo assim, as vazões mínimas para uso de solo de conservação (S2) foram maiores quando comparadas com uso de solo de tendência urbana (S1). A Tabela 15 mostra as diferenças em porcentagem das Q_{95} de cada cenário com a Q_{95} do período de 1997-2007, sendo em todos os casos uma variação negativa. Os cenários D2_S1 e D2_S2 mostraram-se como os de menor afetação, porquanto a pressão sobre o recurso hídrico que em sua maioria está representada pela demanda para abastecimento público, foi transladada para a água subterrânea, que no caso da bacia do Ribeirão do Feijão é pouco utilizada (0,8 milhões m^3 /ano comparados com os 13,24 milhões m^3 /ano da bacia do rio Monjolinho).

Tabela 15 - Comparação Q_{95} dos cenários avaliados com Q_{95} série 1997-2007 da bacia Ribeirão do Feijão.

Cenário	Q_{95} (m^3/s)	Diferença com Q_{95} da série 1997-2007 (%)
1997-2007	2,75	-
D1_S1	2,45	-10,97
D1_S2	2,45	-10,94
D2_S1	2,63	-4,25
D2_S2	2,64	-4,20
D3_S1	2,17	-21,12
D3_S2	2,18	-20,82

A avaliação dos cenários envolveu também a afetação nos níveis do aquífero, os quais para o caso da bacia do Ribeirão do Feijão não tiveram variações representativas entre cenários e no tempo. A Figura 28 e a Tabela 16, mostram as variações no tempo dos níveis, os quais não foram afetados, tendo períodos de decréscimo e acréscimo conforme acontece naturalmente, correspondendo com resultados de áreas do aquífero Guarani na região onde a demanda do recurso não é representativa (Barreto, 2010).

Figura 28 - Variação do nível estático para cada cenário na bacia do Ribeirão do Feijão.

Tabela 16 - Variação do nível estático no início e final da simulação para cada cenário na bacia do Ribeirão do Feijão.

Cenários	Nível Estático em jan/97 (m)	Nível Estático em dez/30 (m)	Diferença (m)
D1_S1	63,79	62,42	1,37
D1_S2	63,79	62,48	1,31
D2_S1	63,79	62,42	1,37
D2_S2	63,79	62,48	1,31
D3_S1	63,79	62,46	1,33
D3_S2	63,79	62,52	1,27

No caso da bacia do Rio Monjolinho, as curvas de todos os cenários estão acima da curva da série 1997-2007, o comportamento foi atribuído ao aporte de vazão de esgoto da cidade, o qual pelo tipo de sistema, tira grande quantidade de água do aquífero que depois é despejada no curso de água principal, gerando um aumento de vazão conforme o aumento da demanda para abastecimento público. Este comportamento atenua-se na vazões de longa permanência, sendo provável que numa janela de tempo maior, as vazões mínimas sejam menores do que as das series de 1997-2007.

É importante mencionar o comportamento encontrado, só foi possível de observar com a simulação conjunta dos recursos e das demandas, e que no caso da área de estudo, pela diversidade de fontes e usos da água é necessário levar em consideração a interação de todos os elementos do sistema, para alcançar resultados efetivos para a toma de decisões.

A Tabela 17 mostra as diferenças da vazão Q_{95} , evidenciando que quanto maior o uso de água subterrânea (D2) maiores as vazões mínimas. Para a bacia do Rio Monjolinho, as diferenças entre cenários com mudança de uso de solo diferentes são maiores, mostrando novamente que com uma mudança para maiores áreas de conservação, as vazões mínimas são maiores.

Tabela 17 - Comparação Q_{95} dos cenários avaliados com Q_{95} série 1997-2007 da bacia do Rio Monjolinho.

Cenário	Q_{95} (m ³ /s)	Diferença com Q_{95} da série 1997-2007 (%)
1997-2007	3,01	-
D1_S1	3,36	11,62
D1_S2	3,45	14,53
D2_S1	3,44	14,01
D2_S2	3,51	16,45
D3_S1	3,17	5,13
D3_S2	3,27	8,51

A respeito da afetação do recurso subterrâneo, embora os cenários com variáveis de demanda D1 e D2 apresentem pouca diferença nas vazões Q_{95} , existe uma grande diferença na afetação dos níveis estáticos. A Figura 29 e a Tabela 18, apresentam as variações no tempo dos níveis, mostrando que para o cenário D2 o rebaixamento do nível é em média 10 metros maior do que para o cenário D1. Além disso, as diferenças com respeito ao uso do solo mostram que em um solo S1 tem-se um rebaixamento entre 15% (D1 e D2) e 30% (D3) maior que em um solo S2.

Tabela 18 - Variação do nível estático no início e final da simulação para cada cenário na bacia do Rio Monjolinho.

Cenários	Nível Estático em jan/97 (m)	Nível Estático em dez/30 (m)	Diferença (m)
D1_S1	138,68	105,16	33,53
D1_S2	138,68	110,78	27,91
D2_S1	138,68	92,24	46,44
D2_S2	138,68	97,86	40,83
D3_S1	138,68	119,63	19,05
D3_S2	138,68	125,25	13,44

Figura 29 - Variação do nível estático para cada cenário na bacia do Rio Monjolinho.

A Figura 30 mostra a confiabilidade (porcentagem dos tempos em que uma demanda é totalmente satisfeita) para todos os cenários, sendo estas identificadas pelo tipo de recurso, subterrâneo (sub) ou superficial (sup) e o fim do uso (irrigação, industrial, sanitário, dessedentação, mineração). Em cada caso as demandas são satisfeitas durante todo o período de tempo, mostrando que as bacias têm uma produção de água que conseguiria sustentar o aumento progressivo das demandas. O panorama na bacia não parece ser alarmante, porém a diminuição progressiva dos níveis do aquífero pode trazer problemas de extração de água dos poços e diminuição de

vazões mínimas que podem tornar o sistema insustentável. Também, a tabela 19 mostra as demandas para cada sub-bacia no horizonte 2030 e a variação da Q_{95} para cada cenário.

É possível observar, que a bacia do Ribeirão do Feijão, ainda tendo uma demanda de água (total) significativamente menor do que a bacia do Rio Monjolinho (com áreas de captação parecidas), o uso das fontes superficiais gera um grande impacto na vazão mínima. O aumento da vazão destinada ao abastecimento do município e que não retorna ao sistema natural (sendo despejado na bacia contigua) pode causar problemas para o atendimento de novos usuários do recurso superficial, sendo necessário que todas as novas outorgas sejam de água subterrânea. No caso do Rio Monjolinho o aumento do uso de água superficial poderia ajudar a mitigar o problema do rebaixamento dos níveis estáticos sem comprometer a Q_{95} , porém, com a ligação existente com a bacia do Ribeirão do Feijão seria necessário revisar as combinações possíveis de uso, para diminuir o impacto mencionado anteriormente nesta última bacia, tendo em consideração que há disponibilidade do recurso. O problema de abastecimento público apresenta-se então como o de maior impacto no sistema, e é necessário abordá-lo de maneira eficiente, sendo por legislação o uso de máxima a prioridade em momentos de crise. Sua apropriada gestão pode garantir a disponibilidade de recurso para todos os usos.

Figura 30 - Confiabilidade de entrega de água dos cenários avaliados para cada demanda.

Tabela 19 - Demanda para o ano de 2030 para cada cenário de cada sub-bacia e seu impacto na Q₉₅

Fonte	Bacia	Rio Monjolinho						Ribeirão do Feijão					
	Uso	D1_S1	D1_S2	D2_S1	D2_S2	D3_S1	D3_S2	D1_S1	D1_S2	D2_S1	D2_S2	D3_S1	D3_S2
Superficial (1000m³/Ano)	Sanitária	57,67	57,67	0,00	0,00	2891,2	2891,2	93,31	93,31	X	X	2524	2524
	Abastecimento Publico	7745,24	7745,2	0,00	0,00	17451	17451	11252	11252	X	X	X	X
	Industrial	908,03	908,03	0,00	0,00	1245,1	1245,1	X	X	X	X	X	X
	Irrigação	111,64	111,64	111,64	111,64	111,64	111,64	705,60	705,60	705,6	705,6	705,6	705,6
	Lazer	3,89	3,89	3,89	3,89	3,89	3,89	X	X	X	X	X	X
	Mineração	306,72	306,72	306,72	306,72	306,72	306,72	X	X	X	X	X	X
	Dessedentação	57,60	57,60	57,60	57,60	57,60	57,60	X	X	X	X	X	X
Subterrânea (1000m³/Ano)	Sanitária	2833,62	2833,6	2891,2	2891,2	0,00	0,00	2431	2431	2524	2524	x	x
	Abastecimento Publico	9706,55	9706,5	17451	17451	0,00	0,00	X	X	X	X	X	X
	Industrial	337,12	337,12	1245,1	1245,1	0,00	0,00	X	X	X	X	X	X
	Irrigação	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Lazer	111,48	111,48	111,48	111,48	111,48	111,48	X	X	X	X	X	X
	Mineração	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Dessedentação	X	X	X	X	X	X	214	214	214	214	214	214
Total Demanda superficial (1000m³/Ano)		9190,79	9190,7	479,85	479,85	22068	22068	12050	12050	705	705	3229	3229
Total Demanda subterrânea (1000m³/Ano)		12988,7	12988	21699	21699	111,48	111,48	2645	2645	2738	2738	214	214
Diferença com a Q₉₅ da série 1997-2007 (%)		11,62	14,53	14,01	16,45	5,13	8,51	-10,97	-10,94	-4,25	-4,20	-21,1	-20,8

5.6 O MODELO WEAP COMO SISTEMA DE APOIO A DECISÃO.

O modelo WEAP mostrou-se como uma ferramenta com grande potencial para a gestão do recurso hídrico. A interface gráfica tem uma barra de tarefas intuitiva que facilita o seu uso. A disponibilidade de manuais de usuário permite um treinamento básico que possibilita que um técnico ou profissional da área consiga manipulá-lo.

A entrada de dados para simular com o sistema usando o Soil Moisture Method apresenta algumas dificuldades, a discretização da área de estudo resulta demorada, pela quantidade de subdivisões que devem ser adicionadas. Ao não ter incorporadas ferramentas próprias de um SIG, diferentes ações devem ser feitas de maneira manual demorando a construção do modelo conceitual. Além disso, a restrição para o uso de arquivos .csv exige um tratamento prévio das series históricas que leva um tempo considerável. A falta de um módulo de autocalibração torna o processo extremamente demorado mesmo tendo poucas bacias contribuintes.

A possibilidade de simular conjuntamente o recurso hídrico superficial e subterrâneo, além das demandas, permite abordar integralmente o problema de alocação de água, incluindo prioridades para os tipos de uso podendo levar sempre em consideração a proteção do recurso. Outras funções, não utilizadas neste trabalho, permitem considerar aspectos da qualidade da água e a geração de energia, podendo ser simulados circunstâncias muito complexas. Também, a rapidez no processamento tendo uma grande quantidade de dados, mostra o potencial para trabalhar tanto em bacias pequenas como em grandes sistemas.

Ao respeito do modelo específico para a simulação conjunta dos recursos superficiais e subterrâneos, foram observados alguns erros no cálculo do balanço hídrico. Estes problemas exigem uma revisão cuidadosa durante todo o processo, porém, é possível alcançar resultados ajustados com a realidade e que podem ser utilizados para a geração de cenários futuros e a toma de decisões. Comentando em outro aspecto, este tipo de simulação conjunta só é possível tendo disponíveis dados de monitoramento hidrogeológico o qual dificulta sua aplicação. Embora o anterior seja um problema, os resultados plausíveis de ser obtidos podem gerar interesse por desenvolver redes efetivas de monitoramento e o estudo de áreas críticas.

6. CONCLUSÃO

O modelo hidrológico WEAP foi utilizado para simular de maneira conjunta os recursos hídricos superficiais e subterrâneos das bacias que abastecem o município de São Carlos. Esta ferramenta apresenta-se como uma alternativa para avaliar o uso conjunto de ambos os tipos de recurso, conseguindo incluir as demandas no sistema, porém apresenta problemas nos cálculos do balanço, e a falta de um módulo de autocalibração faz com que o processo seja muito demorado.

O modelo construído foi capaz de simular o comportamento hidrológico das bacias quando foram comparados os hidrogramas de vazões e a variação dos níveis estáticos. Os índices estatísticos, mostraram-se muito bons para o caso do Viés nas duas sub-bacias e como bons e muito bons para o caso do índice de eficiência de Nash-Scutcliffe, tanto nos períodos de calibração quanto de validação. No caso da simulação do recurso hídrico subterrâneo, a falta de dados dificultou a tarefa da calibração, porém os testes estatísticos mostraram a similitude entre os dados simulados e observados.

O modelo foi calibrado e avaliado em seis cenários que envolveram mudanças no uso do solo, e o uso conjunto de recursos superficiais e subterrâneos. Se mostrou que para a bacia do Ribeirão do Feijão o melhor cenário tem a ver com maior uso de água subterrânea, o qual evita a diminuição da vazão mínima do rio sem comprometer a sustentabilidade da água do aquífero. Para o caso da bacia do Rio Monjolinho, o melhor cenário está relacionado com o aumento do uso de recurso hídrico superficial, porque o uso atual do recurso subterrâneo ou um eventual aumento no seu uso resulta numa diminuição pronunciada nos níveis do aquífero, a qual consegue suprir a demanda, porém carrega problemas para a operação dos poços, secando-os. Para as duas bacias, se evidencia que a recuperação de áreas de proteção contempladas no código florestal não é suficiente para contrariar os efeitos do aumento da demanda, sendo necessárias áreas maiores de proteção e programas de uso eficiente de água para diminuir a crescente demanda.

WEAP mostrou-se como uma ferramenta com uma robustez tal, que permite simular diferentes cenários, com variações de prioridades de atendimento e das fontes de água, além de ter a capacidade de processar grande quantidade de dados para bacias

de área considerável. As características da ferramenta, permitem recomendá-la para ser usada como sistema de apoio a decisão, que após um treinamento pode ser usada por diferentes usuários e gestores.

7. REFERÊNCIAS

AGUIAR, R. L. Mapeamento geotécnico da área de expansão urbana da São Carlos-sp: contribuição ao planejamento. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 1989.

ALBUQUERQUE FILHO, J. L. ; NICOLAU, M. C. ; MOREIRA, D. C. ; CARVALHO, A.M. Estudo da recarga na área de afloramento do sistema Aquífero Guarani na unidade de gerenciamento de recursos hídricos do Tietê/Jacaré, região central do Estado de São Paulo : resultados preliminares. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, São Luis. Anais.... São Paulo: Abas, 2010. p. 1-13.

ALMEIDA, C.L.A.; PRADO, H.; OLIVEIRA, J.B. Levantamento Pedológico semidetalhado do estado de São Paulo: Quadricula de Brotas. Mapa escala 1:100.000 Campinas, Instituto Agrônômico de Campinas, 188p. 1981.

AMATO, C.C. et al. WEAP hydrology model applied: The Rio Conchos Basin. Center for Research in Water Resources. University of Texas at Austin, Austin, p. 69. 2006.

BAENA, L. G. Modelo para geração de series sintéticas de dados climáticos. 2004 Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2004.

BARROS, A. C. Utilização do modelo CANEGRO para estimativa da produtividade de cana-de-açúcar irrigada em diferentes regiões de Brasil. Tese (Doutorado em ciências). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

BARTHEL, R. et. al. Aspects of choosing appropriate concepts for modelling groundwater resources in regional integrated water resources management – Examples from the Neckar (Germany) and Oueme catchment (Benin). Physics and Chemistry of the Earth v. 33, p. 92–114. 2008.

BARTOLOMEU D. Analise da vulnerabilidade dos recursos hídricos na região urbana de São Carlos (SP) por vazamentos em postos de combustíveis, utilizando o método GOS e avaliação dos condicionamento geotécnicos. 2012. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

BRODIE, R. et al. An adaptive management framework for connected groundwater-surface water resources in Australia. Bureau of Rural Sciences, Canberra. 179 p. 2007.

CARVALHO, A. M. 2013, 171 p. Modelagem numérica como ferramenta para a gestão das águas subterrâneas em São Jose do Rio Preto (SP). 2013. Dissertação (Mestrado) Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

CORREA, U. M. P. Estudo das águas subterrâneas das bacias hidrográficas dos rio Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira no estado de São Paulo. 1995. 3v., 107p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 1995.

COSTA, C. W. Expansão da mancha urbana e suas consequências sobre os mananciais do rio do monjolinho e do ribeirão do feijão da cidade de São Carlos, SP. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal Itajubá. Itajubá (MG), 2010.

CRISCUOLO C., QUARTAROL C. F. I., DE MIRANDA, E. E., GUIMARÃES, M. C. CICARINI HOTT, M. Dinâmica de uso e cobertura das terras na Região Nordeste do Estado de São Paulo- Campinas 65 p. Embrapa Monitoramento por Satélite, 2002.

CUNHA, R. C. Analise da Influência das variáveis ambientais na determinação das vulnerabilidades ambientais da bacia hidrográfica do Ribeirão do Feijão, São Carlos, SP. 2012. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2012.

DA SILVA, C. et al., 2009. Caracterização Dos Aqüíferos Da Bacia Do Rio Siriri E Estimativa De Recarga Subterrânea Com Os Modelos Weap E Smap. I Congresso Internacional de Meio Ambiente Subterrâneo.

DALLA NORA, E. L. Caracterização ambiental das zonas de amortecimento de áreas naturais legalmente protegidas. Estudo de caso: Estação Ecológica de São Carlos e Itirapina. 2010. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2010.

(DHI), D.H.I., MIKE SHE User manual. Reference Guide, Dinamarca: DHI Software. vol. 2, 2007.

ESTRADA, O. Modelação Acoplada De Águas Superficiais e Subterrâneas Para a Gestão Conjunta do Recurso Hídrico. 2009. 85p, dissertação (Mestrado). Universidade Nacional da Colômbia. Medellin, 2009.

FLECKENSTEIN, J. et. al. Groundwater-surface water interactions: New methods and models to improve understanding of processes and dynamics. *Advances in Water Resources* n. 33, p. 1291–1295, 2010.

GAISER, T. et. al. Development of a regional model for integrated management of water resources at the basin scale. *Physics and Chemistry of the Earth* v. 33, p. 175–182. 2008.

GOMEZ, L.H. Mecanismos de infiltração e recarga em zona de afloramento do aquífero Guarani. 2008. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

GUANABARA, R.C. Modelo transiente de fluxo em área de aforamento de sistema aquífero guarani. 2011. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

HERMANS, E.; DROOGERS, P.; WINSEMIUS, H. Groundwater Management and Exploration Package: State of the Art for Northern China. *FutureWater Report* 74. Netherlands. 2008.

HOOFF, H.; et. al. A Water Resources Planning Tool for the Jordan River Basin Water 2011, 3, 718-736

HUNT, B., “Unsteady stream depletion from groundwater pumping”. *Ground Water* n.37, v 1,p. 98–102. 1999.

IRITANI, M. A.; EZAKI, S. As águas subterrâneas do Estado de São Paulo. São Paulo: Secretaria de Estado do Meio Ambiente - SMA, 104p, 2009.

IRITANI, M.A. 1998, 200 p. Modelação matemática tridimensional para a proteção das captações de água subterrânea. 1988. Tese (Doutorado). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998

ITP-INSTITUTO DE PESQUISA TECNOLÓGICA DO ESTADO DE SÃO PAULO
Diagnóstico da situação atual dos recursos Hídricos e estabelecimento de diretrizes técnicas para a elaboração do Plano da Bacia Hidrográfica do Tiete-Jacaré. IPT. Relatório 40.674. São Paulo 1999.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT.
2009. Diagnóstico Ambiental para subsidio ao Plano de Desenvolvimento e Proteção Ambiental da Área de Afloramento do Aquífero Guarani no Estado de São Paulo. Primeiro Relatório de Andamento.

IVKOVIC, K. M. Modelling groundwater–river interactions for assessing water allocation options. 2006. 229p. Tese (Doutorado em Filosofia) - The Australian National University, Canberra, 2006.

JAVANDEL, I., DOUGHTY, C., TSANG, C. Groundwater Transport. American Geophysical Union, ISBN: 9780875903132, 2013.

JOBSON, H.E., and HARBAUGH, A.W. “Modifications to the diffusion analogy surface-water flow model (DAFLOW) for coupling to the modular finite-difference ground-water flow model (MODFLOW)”. U.S. Geological Survey Open-File Report 99-217, 107 p. 1999.

JOYCE, B., PURKEY, D.R., YATES, D., GROVES, D., DRAPER, A. Integrated scenario analysis for the 2009 California water plan update. In: California Water Plan Update 2009, Bulletin 160-09. Department of Water Resources, 112 p, 2010

KIRK, S.; HEBERT, A. W. Assessing the impact of groundwater abstractions on river flows. Geological Society, London, Special Publications, n. 193, p.211-233, 2002.

KOLLET SJ, MAXWELL RM. Integrated surface-groundwater flow modeling: a freesurface overland flow boundary condition in a parallel groundwater flow model. Adv Water Resour; 29:945, 2006.

LE PAGE, M. An Integrated DSS for Groundwater Management Based on Remote Sensing. The Case of a Semi-arid Aquifer in Morocco. Water Resources Management, V. 26, n.11 pp. 3209-3230. 2012.

MANZIONE, R. L.; TANIKAWA, D. H.; WENDLAND, E. Analise de tendências nos níveis freáticos de uma bacia hidrográfica em área de recarga do Sistema aquífero guarani auxiliado por imagens de sensoriamento remoto. In: Anais do VX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, São Jose dos Campos. INPE, 2011, p. 5380-53385.

MARKSTROM, S.L.et al. GSFLOW—Coupled ground-water and surface-water flow model based on the integration of the Precipitation-Runoff Modeling System (PRMS) and the Modular Ground-Water Flow Model (MODFLOW-2005)".U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-D1, 240 p.2008.

MARTINS, O. S Determinação do Potencial de Seqüestro de Carbono na Recuperação de Matas Ciliares na Região de São Carlos – SP. 2004. 136p. Tese (Doutorado em Ecologia e Recursos Naturais) – Centro de Ciências Biológicas e da Saúde, UFSCar, 2004.

MAZIERO, T.A. Monitoramento de água subterrânea em área urbana: aspectos quantitativos. 2005. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

MCDONALD, M.G., HARBAUGH, A.W. "A modular three-dimensional finite-difference groundwater model". US Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, Book 6, Chapter A1, 586pp. 1988.

MONTAÑO, M. Os recursos hídricos e zoneamento ambiental: O caso do município de São Carlos (SP). 20002. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

MURO, M.D. Carta de zoneamento para seleção de áreas frente a instalação de aterros sanitários no município de São Carlos- SP- escala 1:50000. 2000. 201p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

NISHIYAMA, L. Mapeamento geotécnico preliminar da quadricula de São Carlos -SP. 1991. Tese (Doutorado em Geotecnia). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 1991.

OLIVEIRA, J. B.; PRADO, H. Levantamento Pedológico semidetalhado do estado de São Paulo: Quadricula de São Carlos. Campinas, Instituto Agrônomo de Campinas, 188p. 1984.

PONS, N.A.D. Levantamento e diagnósticos geológico- geotécnico de áreas degradadas na cidade de São Carlos SP, com auxílio de geoprocessamento. 2006. Tese (Doutorado em Geotecnia). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

PERRONI, J. C.; WENDLAND, E. C. Avaliação das condições de ocorrência e exploração do sistema aquífero guarani em São Carlos -- SP Águas Subterrâneas, v.22, n.01, p.13--24, 2008.

PRUDIC, D.E. "Documentation of a computer program to simulate stream-aquifer relations using a modular, finite difference, ground-water flow model". U.S. Geological Survey Open-File Report 88-729, 113 p.1989.

PULIDO, M. et al. Modeling of Stream – Aquifer Interaction: The Embedded Multireservoir Model". Journal of Hydrology. v. 10, p. 1-16. 2005.

RABELO, G. L. Estudo da recarga do Aquífero Guarani no sistema Jacaré-Tietê (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

RASSAM, D. A conceptual framework for incorporating surface-groundwater interactions into a river operation planning model. *Environmental Modelling & Software* n. 26, p. 1554-1567, 2011.

RIBIERO, A. Modelagem Chuva-Vazão Utilizando Framework JAMS em Área de Afloramento do Sistema Aquífero Guarani. 2012. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

RODRÍGUEZ, L., CELLO, P., VIONNET, C., GOODRICH, D. "Fully conservative coupling of HECRAS with MODFLOW to simulate stream-aquifer interactions in a drainage basin". *Journal of Hydrology*. 353, 129-142p. 2008.

ROSSATO, L. Estimativa da capacidade de armazenamento de água no solo do Brasil. Dissertação (Mestrado), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, 2002.

SANDOVAL-SOLIS, S.; McKINNEY, D. Evaluation of Water Conservation Measures Implemented in the Rio Grande/Bravo Basin. In *Proceedings of World Environmental & Water Resources Congress*, Providence, Rhode Island, USA, 16–20 May 2010; doi:10.1061/41114(371)212, 2010.

SANTOS, M. M. Gerenciamento de recursos hídricos Subterrâneos: uso atual e potencial do sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo (SP). 2009. Tese (Doutorado) Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Rio Claro - SP, 2009.

SCHULER, P. Water Balance for the Groundwater Contribution Zone of Jeita Spring using WEAP. TECHNICAL REPORT NO. 6. p. 117 Raifoun, 2013.

SHAH T. Groundwater Governance and Irrigated Agriculture. Suécia: Global Water Partnership, 2014. 68 p.

SOPHOCLEOUS, M. Review: groundwater management practices, challenges, and innovations in the High Plains aquifer, USA: lessons and recommended actions. *Hydrogeology Journal*. n.18, v.3, p. 559-575. 2010.

SOPHOCLEOUS, M.A., et al. "Integrated numerical modeling for basin-wide water management: the case of the Rattlesnake Creek Basin in south-central Kansas". *Journal of Hydrology* 214 (1–4), 179–196. 1999.

SOPHOCLEOUS, M. Interactions between groundwater and surface water: the state of the science. *Hydrogeology Journal*. V. 10, n.1 <http://link.springer.com/journal/10040/10/1/page/1>, p. 52-67. 2002.

SWAIN, E.D.; WEXLER, E.J. A coupled surface-water and ground-water flow model (MODBRANCH) for simulation of stream-aquifer interaction". U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, Book 6, Chapter A6, 125 p. 1996.

VELOZO, R. Caracterização geológico-geotécnica do lixão desativado de São Carlos-SP, com auxílio da geofísica. 2006. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

Ver website of Water Evaluation And Planning (WEAP) system. Disponível online: <http://www.weap21.org/index.asp?doc=05> (acessado em 11 Janeiro 2015).

WANG, J.F., ANDERSON, M.P. Introduction to Groundwater Modelling. Freeman, San Francisco, CA: 237 pp. 1982.

WINTER, T.C.; HARVEY, J.W.; FRANKE, O.L.; ALLEY, W.M. Ground-water and surface water, a single resource. Denver, CO: US Geological Survey. 79 p. 1998.

YATES, D. *et al.* WEAP21 – A demand, priority, and preference-driven water planning model: Part 1: Model Characteristics. IWRA, *Water International*, v. 30, n. 4, p. 487-500, 2005.

ZUQUETE, L. V. Mapeamento geotécnico preliminar na região de São Carlos. 1981. Tese (Doutorado em Geotécnica). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 1981.

APÊNDICE A

Teste F e t-student dos dados simulados e observados de variação de nível estático.

```
> var(observado) # Variância Observada
      DATOS.OBSERVADOS
DATOS.OBSERVADOS      0.5887238
> var(simulado) # Variância Simulada
      DATOS.SIMULADOS
DATOS.SIMULADOS      1
> var.test(observado,simulado )

      F test to compare two variances

data: observado and simulado
F = 0.58872, num df = 73, denom df = 73
alternative hypothesis: true ratio of variances is not equal to
1
95 percent confidence interval:
 0.3707627 0.9348183
sample estimates:
ratio of variances
 0.5887238

> qf(0.95,73,73)
[1] 1.473367
> #
> mean(observado) # Média Observada
[1] -0.02105958
> mean(simulado) # Média Simulada
[1] -3.350158e-14
> t.test(observado,simulado, var.equal=TRUE, paired=FALSE)

      Two Sample t-test

data: observado and simulado
t = -0.14373, df = 146
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to
0
95 percent confidence interval:
 -0.3106414 0.2685222
sample estimates:
 mean of x mean of y
-2.105958e-02 -3.350158e-14

> qt(0.975, 146)
[1] 1.976346

>
```