

Trabalho de Conclusão de Curso

Curso de Graduação em Geologia

**MODELO MATEMÁTICO DE FLUXO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NA
REGIÃO DO HORTO FLORESTAL DE RIO CLARO – SP**

Frederico de Figueiredo Ramponi

Prof(a).Dr(a). Chang Hung Kiang (orientador)

Prof(a).Dr(a). Elias Hideo Teramoto (co-orientador)

Rio Claro (SP)

2019

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

Frederico de Figueiredo Ramponi

MODELO MATEMÁTICO DE FLUXO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NA
REGIÃO DO HORTO FLORESTAL DE RIO CLARO – SP

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas
- Câmpus de Rio Claro, da Universidade
Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para
obtenção do grau de Geólogo.

Rio Claro – SP

2019

FREDERICO DE FIGUEIREDO RAMPONI

**MODELO MATEMÁTICO DE FLUXO DE ÁGUAS
SUBTERRÂNEAS NA REGIÃO DO HORTO FLORESTAL
DE RIO CLARO – SP**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Instituto de Geociências e
Ciências Exatas - Câmpus de Rio Claro, da
Universidade Estadual Paulista Júlio de
Mesquita Filho, para obtenção do grau de
Geólogo.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Chang Hung Kiang (orientador)

Me. Roger Dias Gonçalves

Geol. Juan Navarro

Rio Claro, 02 de dezembro de 2019.

Assinatura do(a) aluno(a)

assinatura do(a) orientador(a)

RESUMO

A administração de águas em qualquer área é de vital importância para o desenvolvimento humano no local. O conhecimento de seu equilíbrio com o meio é necessário para que se realize a gestão de demanda em relação a disponibilidade de água. O que se faz perceber que, estudos hidrogeológicos são necessários para melhor entendimento do comportamento de um aquífero, para que sua gestão seja efetuada de maneira a não exaurir ou prejudicar o mesmo. O objetivo deste trabalho é a modelagem numérica de fluxo em regime permanente de uma porção do aquífero Rio Claro no intuito de obter respostas acerca de seus parâmetros hidrogeológicos. A revisão bibliográfica e caracterização conceitual do aquífero, possibilita a construção de um modelo matemático através de diferenças finitas, por meio do algoritmo computacional MODFLOW 6®. O local de estudo inclui o Horto Florestal Edmundo Navarro de Andrade, no município de Rio Claro e áreas adjacentes da cidade de Rio Claro. A topografia do terreno e os contatos geológicos foram obtidos de estudos geológicos presentes no relatório de áreas contaminadas cedido pela CETESB, bem como de perfis de poços de monitoramento presentes na área de uma empresa de tratamento de madeira. Os poços presentes na área da empresa foram utilizados como pontos de observação de carga hidráulica para calibração dos resultados da simulação. A Fm. Rio Claro e a Fm. Corumbataí subjacente destacam uma alta heterogeneidade litológica e hidrológica para a formação aquífera. Os resultados das simulações apontam para valores de condutividade hidráulica de ordem entre 10^{-5} e 10^{-8} m/s.

Palavras-chave: Água subterrânea. Aquífero Rio Claro. Regime permanente. Modelagem Modflow. Diferenças finitas.

ABSTRACT

Water management in any area is of vital importance for local human development. Knowledge of its balance with the environment is necessary for demand management in relation to water availability. It is clear that hydrogeological studies are necessary to better understand the behavior of an aquifer, so that its management is done in a way that does not exhaust or damage it. The objective of this work is the steady state numerical flow modeling of a portion of the Rio Claro aquifer in order to obtain answers about its hydrogeological parameters. The literature review and conceptual characterization of the aquifer, allows the construction of a mathematical model through finite differences, through the computational algorithm MODFLOW 6®. The study site includes the Edmundo Navarro de Andrade Forest Garden, in the municipality of Rio Claro and adjacent areas of the city of Rio Claro. The terrain topography and geological contacts were obtained from geological studies in the CETESB report of contaminated areas, as well as from monitoring well profiles in the area of a wood treatment company. The wells present in the company area were used as hydraulic load observation points for calibration of the simulation results. The Fm. Rio Claro and the Fm. Underlying Corumbataí highlight a high lithological and hydrological heterogeneity for aquifer formation. The results of the simulations point to hydraulic conductivity values of order between 10^{-5} and 10^{-8} m / s.

Keywords: Groundwater. Rio Claro Aquifer. Permanent regime. Modflow modeling. Finite differences.

Sumário

RESUMO	4
ABSTRACT	5
1.Introdução	8
2.Objetivos	9
3. Revisão conceitual.....	9
3.1. Aquíferos	9
3.2 – Transmissividade	11
3.3 – Armazenamento	11
3.4 – Modelos Matemáticos	13
3.5 – Equações Governantes.....	13
3.6 – Condições de Contorno	14
3.7 – Condições iniciais	17
3.8 – Etapas da elaboração de um modelo Matemático de Fluxo.....	17
3.9 – Modelos analíticos	20
3.10 – Modelos Numéricos de Fluxo de Águas Subterrâneas.....	20
3.11 – Método das Diferenças Finitas.....	20
4 - Caracterização da área	21
4.1 - Contexto Geológico Regional.....	21
4.2 Contexto geológico da Bacia do Paraná no Estado de São Paulo	23
4.2.1 - Contexto estratigráfico	23
4.3 - Contexto geomorfológico regional	28
4.4 - Caracterização Climática	30
5. - Materiais e métodos de trabalho.....	31
5.1 - Contextualização da área de estudos	32
5.2 - Simulação Numérica de Fluxo em Regime Permanente	34
6. - Resultados	34
6.1 - Ensaios Hidrogeológicos.....	34
6.2 - Levantamento Topográfico	35
6.3 – Modelo Conceitual	36
6.2 - Modelo Hidrogeológico Conceitual.....	36
6.3 - Configuração do Domínio Simulado.....	37
6.4 - Distribuição dos Valores de Condutividade Hidráulica	38
6.5 – Condições de Contorno	39
6.6 - Simulação em regime permanente.....	42
6.7 - Calibração do modelo em regime permanente	42

7- Considerações Finais e Conclusão.....	45
8. - Bibliografia	46
Anexo 1 - Perfis litológico construtivos das sondagens 2008.....	50

1.Introdução

Devido à escassez ou baixa qualidade das águas superficiais, a utilização de águas subterrâneas é muito importante na gestão de cidades, para auxiliar nesse processo é possível se utilizar modelos que possam auxiliar no conhecimento geral e que simulem situações reais, possibilitando o planejamento e a gestão destes recursos (CETESB, 2004). Um modelo é a reprodução, gráfica, conceitual ou visual das características físicas de um comportamento natural em escala adequada (WENDLAND & RUBER, 1998).

A cidade de Rio Claro– SP está localizada na Bacia do Paraná, uma bacia sedimentar que possui extensos e importantes aquíferos como os sistemas aquíferos Guarani, Itararé, Bauru e Serra Geral. A maior parte da área urbana de Rio Claro se situa sobre as Formações Rio Claro e Corumbataí, o sistema aquífero Rio Claro é bastante importante no abastecimento da cidade.

Neste trabalho será desenvolvido um modelo numérico de fluxo hídrico dentro do parque Floresta Estadual Edmundo Navarro de Andrade, em uma área pertencente a uma empresa de tratamento de madeira que atua a mais de 80 anos no local. Ao longo desse período foi requerido pela CETESB um estudo ambiental, realizado pela empresa GEMMAM, em 2008, que comprovou uma área contaminada pelos produtos utilizados no processo. Para a realização desse estudo foram instalados poços de monitoramento, que são aqueles utilizados neste trabalho.

Para modelagem de águas subterrâneas são utilizados principalmente três tipos de modelo: físico, onde o sistema é representado por meio de um protótipo em escala menor, análogo, baseando-se na analogia de diferentes processos físicos e matemático, que irá representar a natureza via equações matemáticas. (WANG & ANDERSON, 1982).

Além dessa classificação geral, pode-se classificar os modelos em: conceitual e empírico, que consiste no conjunto de suposições que mesclam valores calculados com dados observados na natureza e estabelecem regras para a relação entre eles; estocástico, que leva em conta variedades e probabilidades de eventos aleatórios; e determinístico, que são modelos que se baseiam em determinações e se subdividem em duas categorias: analítico, utilizado para problemas específicos de geometria simples, com parâmetros homogêneos e relações lineares e numérico, usado na solução de problemas gerais, independentemente de sua complexidade geométrica e de seus parâmetros físicos (FREEZY e CHERRY, 1979).

Utilizando-se modelos hidrogeológicos, podemos prever direções preferenciais de fluxo de água subterrânea, analisar alternativas de locação de poços (CLEARY, 2007) e dar suporte no planejamento e previsões de situações reais (FEITOSA et al., 2008). É preciso sempre lembrar que a modelagem é uma representação mais simples de uma realidade complexa, possui algumas desvantagens tal qual a simplificação, aproximação e generalização dos

processos e parâmetros físicos, o que exige que se tenha familiaridade com os conceitos utilizados no modelo para que se tenha noção dos limites da modelagem.

2. Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é o entendimento do comportamento hidráulico do aquífero Rio Claro e Corumbataí na região pertencente a uma empresa de tratamento de madeira, instalada dentro do Horto Florestal Navarro de Andrade e suas particularidades, através do desenvolvimento de um modelo geológico conceitual e um modelo numérico de fluxo.

O modelo de águas subterrâneas de fluxo desenvolvido, que simula o escoamento de água, os fluxos naturais dos aquíferos e suas recargas pode ser utilizado no desenvolvimento de modelos de transporte de massa, para simulação de direção e velocidade de espalhamento de uma substância poluente, o que ocorre na área.

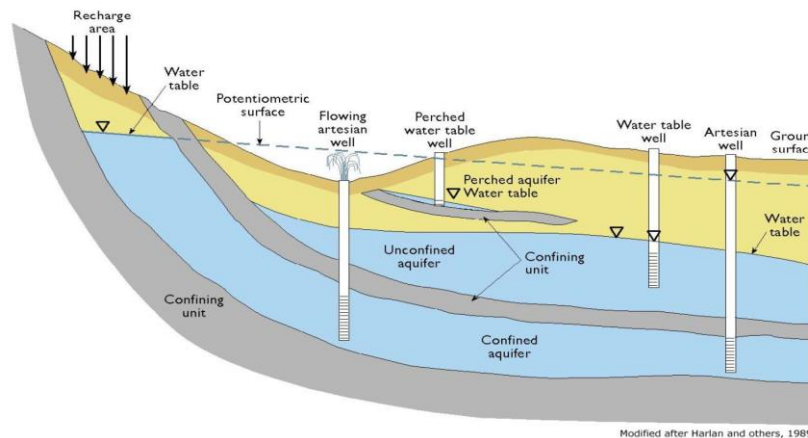
3. Revisão conceitual

3.1. Aquíferos

Aquíferos são formações geológicas capazes de armazenar e transmitir água em seus interstícios porosos (FETTER, 1994).

Existem três grandes grupos de aquíferos: os aquíferos em meios porosos e os aquíferos fissurais e os cársticos. Os aquíferos em interstícios porosos são aqueles que armazenam água na matriz das rochas, nos interstícios não ocupados por grãos minerais, denominada de porosidade primária, já os fissurais, são aqueles que armazenam água em fissuras (fraturas, falhas e juntas), correspondendo à porosidade secundária, tendo em vista que essa não é uma propriedade da rocha desde sua formação. Os aquíferos cársticos, são aqueles onde a água ocupa cavidades geradas pela dissolução parcial de rochas carbonáticas.

Figura 1 - Diagrama esquemático de aquíferos confinados e não-confinados.



A Figura 1 apresenta um poço artesiano (Flowing artesian well) e um aquífero suspenso (Perched aquifer). Ainda é possível observar o nível potenciométrico (Potentiometric surface) do aquífero confinado. (Fonte da imagem: NOGUEIRA, 2014).

Os aquíferos em podem ser separados em aquíferos confinados e aquíferos livres. (FETTER, 1994).

Aquíferos confinados são delimitados tanto no topo como na base por camadas impermeáveis, sendo considerados aquíferos não drenantes, ou por camadas semipermeáveis, definindo estes aquíferos como drenantes. Estas camadas fazem com que exista uma pressão litostática sobre o substrato subjacente e consequentemente na água nela contida, o que leva a carga hidráulica destes aquíferos ser superior à elevação altimétrica que estas ocupam. Outra característica que marca os aquíferos confinados é o seu estado permanente de saturação.

Os aquíferos podem ser considerados livres quando não possuem camadas confinantes, com o topo da porção saturada destes aquíferos submetido somente à pressão atmosférica. Levando a carga hidráulica do topo da porção saturada destes aquíferos a coincidir com a sua cota altimétrica, tomando-se o nível do mar como referência, além disso o gradiente hidráulico e a inclinação da superfície do freático coincidem. (TERAMOTO, 2007)

3.2 – Transmissividade

Os parâmetros mais importantes para que se entenda o sistema de fluxo em aquíferos são a transmissividade e o armazenamento específico. (SELIM, 2011).

A transmissividade é a taxa de escoamento d'água cedida por uma unidade de segmento do aquífero, com 1 metro de largura e altura equivalente a espessura do aquífero, por unidade de tempo, submetido a um gradiente hidráulico unitário como representado pela Equação: $T = Kb$. (Figura 2)

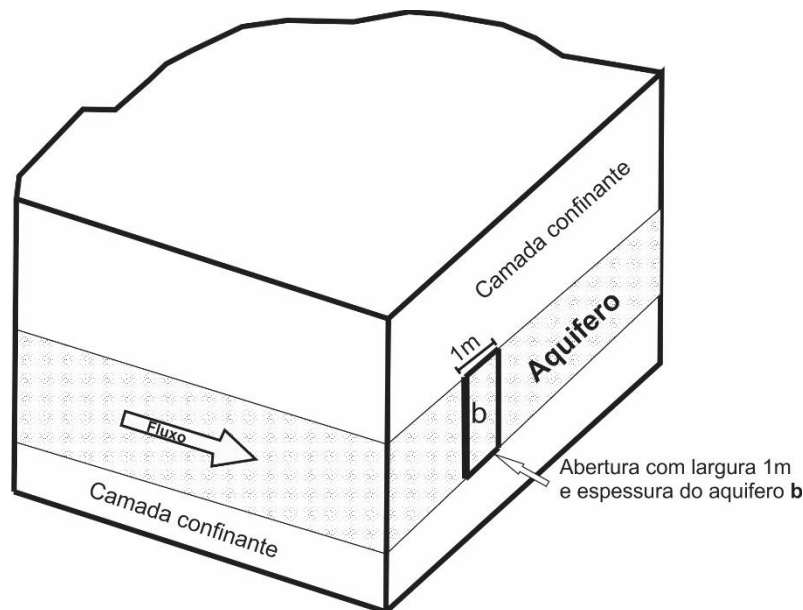
Onde:

T é a transmissividade (L^2/T),

K é a Condutividade hidráulica (L/T),

b é a espessura do aquífero (aquíferos confinados) ou a cota da carga hidráulica (aquíferos não confinados).

Figura 2 - Ilustração do conceito de transmissividade para um aquífero confinado



Fonte: modificado de Teramoto 2007.

3.3 – Armazenamento

Uma das propriedades mais importantes para se definir o comportamento de um aquífero é o coeficiente de armazenamento (S), representando o volume d'água absorvido ou expelido do armazenamento, por área de superfície unitária, por mudança unitária de carga, representando uma variável adimensional (FETTER, 1994).

O coeficiente de armazenamento específico (S_s) é o volume de água cedido por um volume elementar saturado da formação, armazenado ou expelido pela formação, através da compressibilidade do arcabouço mineral e água dos poros por unidade de variação na carga hidráulica.

Sua dimensão é dada por $1/L$.

$$S_s = \rho_w g (\alpha + n\beta)$$

Nesta expressão:

ρ_w é a densidade da água (M/L^3),

g é a aceleração da gravidade (L/T^2),

α é a compressibilidade do arcabouço do aquífero ($1/(M/LT^2)$),

n é a porosidade (L^3/L^3),

β é a compressibilidade da água ($1/(M/LT^2)$).

Em aquíferos confinados, a carga pode diminuir sem que necessariamente ocorram mudanças na espessura saturada do aquífero. Nestes aquíferos, o armazenamento (S) é o produto do armazenamento específico e sua espessura b :

$$S = bS_s$$

Em aquíferos não-confinados, o nível correspondente à porção saturada se eleva ou reduz com mudanças na quantidade de água armazenada. Quando o nível d'água diminui, a água é drenada dos poros intersticiais. Esta diminuição no armazenamento de água devido à mudança de carga hidráulica corresponde ao rendimento específico do aquífero (S_y) (FETTER, 1994).

Como esta propriedade também define o armazenamento e expulsão da água, em aquíferos não confinados, o armazenamento da formação aquífera tem a seguinte equação:

$$S = S_y + bS_s$$

Deste modo, podemos calcular o volume de água drenado de um aquífero pela mudança de carga utilizando a expressão abaixo.

$$V_w = S.A \Delta h$$

Onde:

V_w é o volume da água (L^3),

S é a armazenamento (adimensional),

A é a área da superfície drenante do aquífero (L^2),

Δh é o declínio médio da carga (L).

3.4 – Modelos Matemáticos

Em modelos matemáticos, os processos de natureza física, tal como o fluxo de água subterrânea no meio poroso, são representados por um conjunto de formulações matemáticas. Este tipo de modelo teve sua evolução alicerçada no desenvolvimento de computadores mais potentes, uma vez que os modelos matemáticos, na maioria dos casos, requerem a solução de um grande número de equações. Os modelos matemáticos podem ser divididos em duas grandes categorias: analíticos e numéricos. Invariavelmente, o modelo matemático é composto por certo número de elementos como os descritos nos tópicos seguintes. (ANDERSON et al., 2015).

De acordo com Adam e Bollomo (1997), modelos matemáticos de dependem de propriedades físicas e processos do meio e de seu método de solução, um modelo matemático hidrogeológico necessita dos seguintes elementos principais: Equações Governantes, Condições de Contorno e Condições Iniciais.

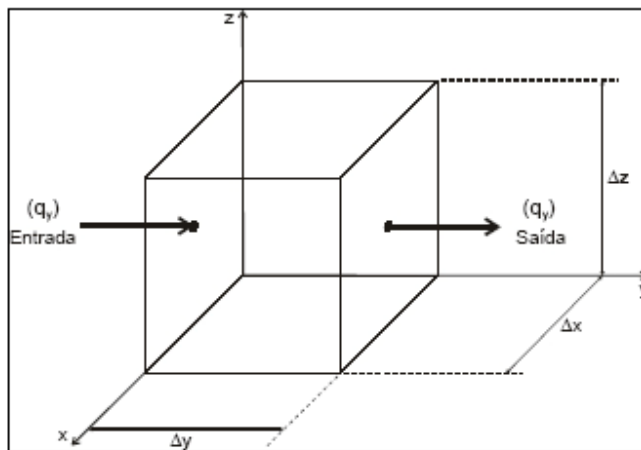
As equações governantes são as mesmas que regem o fluxo subterrâneo da água e derivam-se da Lei de Darcy em combinação com a Equação de Laplace, da continuidade e da conservação de massa.

3.5 – Equações Governantes

As equações governantes representam a estrutura básica dos Modelos Matemáticos, constituindo expressões generalizadas que descrevem fenômenos físicos, tais como fluxo de corrente elétrica, fluxo térmico, propagação de deformação mecânica e fluxo de água subterrânea (WANG e ANDERSON, 1982). Patankar (1980) define as equações governantes como equações diferenciais parciais que satisfazem um princípio de conservação; assim, as formulações de um modelo matemático, em essência, trabalham com balanço de massa ou energia.

A Figura 3 ilustra a representação física de um volume elementar representativo para um problema de fluxo de água subterrânea. As equações governantes para fluxo de água subterrânea resultam do balanço de água que flui por um VER (Volume Elementar Representativo).

Figura 3 – Volume Representativo Elementar



Fonte: Teramoto (2007)

A equação governante que representa o fluxo de água subterrânea em sua forma analítica é derivada da combinação da Lei de Darcy com a de conservação de massa:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = Ss \frac{dh}{dt}$$

Onde K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} = condutividade hidráulica nos eixos ortogonais x, y e z respectivamente; Ss = armazenamento específico; W = recarga.

3.6 – Condições de Contorno

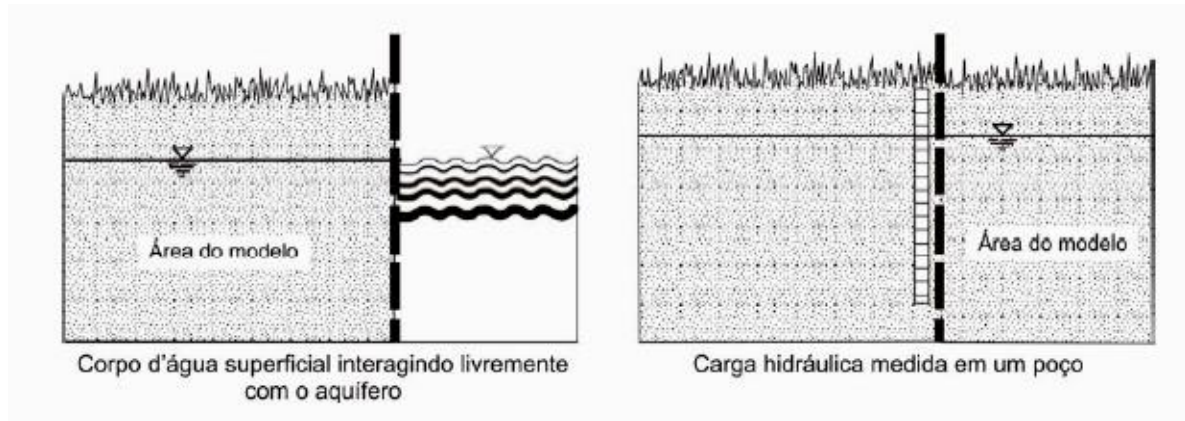
As condições de contorno, presentes em todos os modelos matemáticos, são elementos essenciais à sua solução. Em princípio, um modelo pode convergir para um número infinito de soluções. Entretanto, as condições de contorno, presentes nos modelos, delineiam uma solução única, representativa da realidade. (ZHENG & BENETT, 1995)

Embora representem elementos físicos tais como falhas geológicas e rios, as condições de contorno são, em modelos matemáticos, expressões matemáticas que explicitam certos parâmetros específicos conhecidos do modelo. Matematicamente, como explicitado por Franke et al. (1987), as condições de contorno são de três tipos principais.

Tipo I - Contorno de carga hidráulica especificada (Figura 4) ou carga hidráulica constante (condição de Dirichlet), que pode ser matematicamente representado pela expressão:

$$h(x,y,z,t) = \text{conhecido}$$

Figura 4 - Exemplos de condição de carga hidráulica especificada (Tipo I).



Fonte: Teramoto (2007)

Neste tipo de contorno, como apresentado em sua expressão matemática, a carga hidráulica é conhecida em algumas regiões do domínio simulado e, portanto, servem como referência para a solução do modelo. Reilly et al. (1987) exemplificam tais condições de contorno por rios e lagos, que possuam valores de carga hidráulica conhecida e pode ter ligação com o aquífero, como ilustrado na Figura 4.

Tipo II - Condição de contorno de fluxo especificado (Condição de Neumann), que expressa uma condição em que uma quantidade de fluxo que passa por um contorno é conhecida, sendo assim expressa:

$$\frac{dh(x,y,z,t)}{dn} = \text{especificado}$$

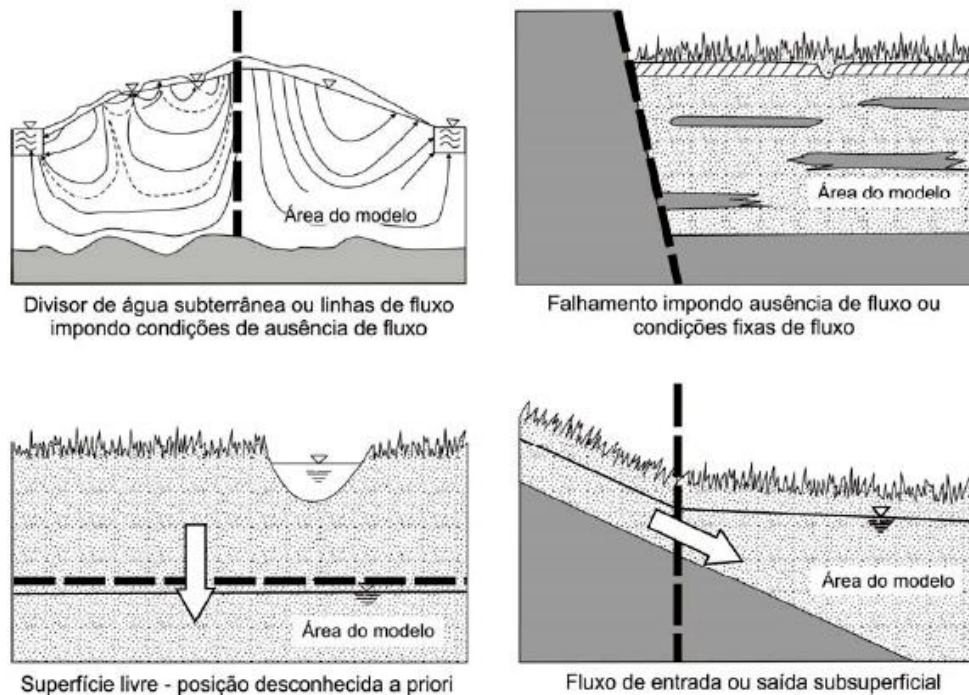
Onde $dh(x,y,z,t)$ = variação elementar tridimensional e temporal de carga hidráulica; dn = variação elementar da distância perpendicular à direção de fluxo.

A condição com ausência de fluxo, isto é, fluxo nulo, é aplicável quando existe um contorno impermeável, uma linha de simetria, uma linha de fluxo, ou seja, quando inexistir fluxo transversal a este contorno (Figura 5). É comum que se use este tipo de condição de contorno em simulações de dimensões reduzidas, situação em que não se conhece a extensão real do aquífero, sendo a forma deste limite delineada a partir de uma linha de fluxo obtida a partir da elaboração da potenciométrica local.

Reilly et al. (1987) designa lagos e rios como tipos de condições de contorno de fluxo especificado (não nulo), desde que estes tenham interação bem conhecida com o aquífero, como representado na Equação:

$$q = f(x, y, z, t)$$

Figura 5– Exemplos de condição de fluxo especificado (Tipo II ou Neumann).



Fonte: Teramoto (2007)

Tipo III - Condição de fluxo dependente da carga (condição de Cauchy), expressa pela equação:

$$\frac{dh}{dn} + ch = c$$

Um exemplo comumente usado para este tipo de contorno é aquele no qual existe uma camada semipermeável separando dois aquíferos (Figura 6) ou um aquífero e um corpo de água superficial. (ZHENG & BENETT, 1995). O fluxo que passa deste corpo aquoso sobrejacente para o aquífero, através da camada semipermeável, é expresso pela equação de Darcy:

$$q = K' \frac{H - h}{b'}$$

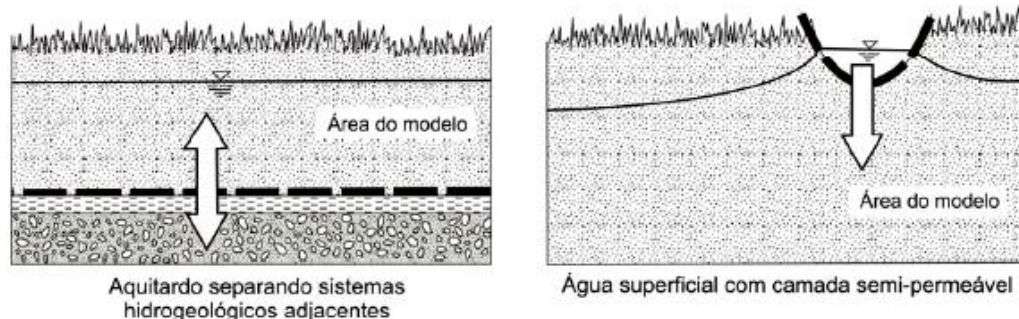
Onde: q = volume de água que atravessa a camada semipermeável em virtude da diferença de carga hidráulica;

K' = condutividade hidráulica da camada semiconfinada;

$H'-h$ = diferença de carga entre o aquífero livre e o semiconfinado;

b' = espessura da camada semiconfinante.

Figura 6 – Condição de contorno de fluxo dependente da carga (Tipo III ou Cauchy).



Fonte: Teramoto (2007)

Desta forma, a queda da carga no aquífero induz a um menor fluxo através da camada semiconfinante e, na condição oposta, seu incremento leva a um aumento na taxa de fluxo, segundo uma relação linear (FRANKE et al., 1987).

3.7 – Condições iniciais

As condições iniciais são componentes essenciais em modelos matemáticos. Para se realizar uma simulação em regime estacionário, é necessário anteriormente à simulação, uma distribuição de carga hidráulica, sendo que os valores de cargas hidráulicas calculadas em um determinado passo de tempo dependem dos valores de carga hidráulica do passo anterior.

Deste modo, torna-se necessária a existência informações a respeito de valores de carga hidráulica ou da concentração de soluto no início da simulação. Com a simulação em regime permanente é possível se obter de valores iniciais de carga hidráulica. (FOWLER, 1997). Nesta etapa são definidos os objetivos e o modelo conceitual, representativo das principais características hidrogeológicas que alimentarão o modelo matemático, como, por exemplo, unidades relevantes no meio, seus processos controladores, as condições de contorno e condições iniciais (SPITZ & MORENO, 1996).

3.8 – Etapas da elaboração de um modelo Matemático de Fluxo

O processo de simulação segue a um fluxograma elaborado e proposto por diversos autores. Chamado de Protocolos para Aplicação de Modelos Matemáticos (PAMMs), exprime o método geral e organiza as etapas contidas

no processo de simulação matemática. Dentro dos PAMMs verifica-se que na construção de modelos é necessária a realização de etapas que precisam ser adequadamente efetuadas para viabilizar as etapas seguintes.

Diversos autores têm propostos PAMMs em suas publicações, porém estas exibem algumas diferenças metodológicas, como pode ser verificado a partir da comparação do trabalho de autores como Bear (1982), Anderson et al. (2015), Kresic (1997), Spitz & Moreno (1996), entre outros.

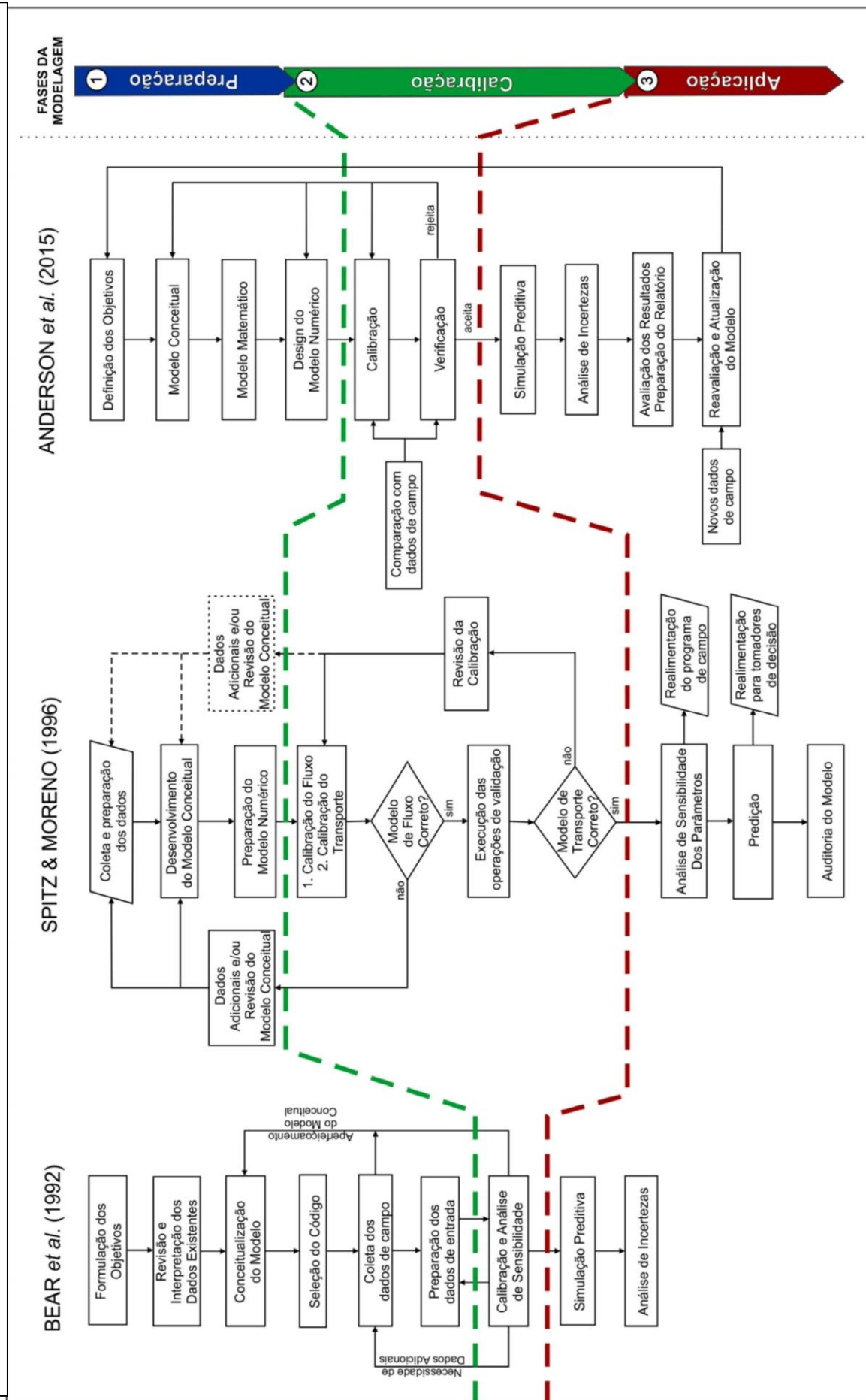
A Figura 7 é uma comparação entre 3 destes protocolos. Alberto (2005) demonstra que, mesmo havendo divergências em alguns aspectos, as etapas contidas nas PAMMs podem ser separadas em 3 grandes etapas: Preparação, Calibração e Aplicação.

Primeiramente deve-se definir os objetivos de se realizar um modelo de fluxo de água subterrânea. A segunda etapa é representada pela formulação de modelo hidrogeológico conceitual, a partir do levantamento de informações relevantes do domínio a ser simulado, como aquelas relacionadas aos aspectos geológicos, propriedades hidráulicas e potenciométrica da área a ser simulada.

O software a ser utilizado deve ser o mais adequado à complexidade do problema e à proposta inicialmente aceita. O modelo conceitual construído durante a caracterização hidrogeológica da área a ser simulada é representado dentro do modelo matemático a partir do algoritmo selecionado, considerando-se suas simplificações e suposições.

Para se calibrar o modelo devemos adequar os parâmetros hidrogeológicos, até que se atinja elevadas correlações entre os valores observados e calculados. Se o modelo é representativo das observações de campo, os resultados auxiliam na predição do fenômeno de interesse, caso contrário, é necessária a coleta de novos dados de campo visando o aprimoramento dos modelos conceitual e matemático.

Figura 7 – Comparação entre os PAMMs elaborados por Bear et al. (1992), Spitz & Moreno (1996) e Anderson et al. (2015)



3.9 – Modelos analíticos

Um modelo analítico envolve a solução direta de equações diferenciais parciais, o que resulta na solução exata do problema (MASSMANN & HAGLEY, 1995).

Outra característica que distingue este tipo de modelo dos modelos numéricos é que suas formulações são de natureza contínua e descrevem o fenômeno para qualquer parte do domínio. Porém, modelos analíticos requerem que se considere o aquífero como isotrópico, homogêneo e de geometria simples, o que acontece muito raramente na natureza. Com o aumento da complexidade do problema estudado devido à heterogeneidade e anisotropia do meio, ocorre grande perda de representatividade na solução do modelo por técnicas analíticas, sendo então o modelo numérico muito mais adequado para a situação. (MASSMANN & HAGLEY, 1995)

3.10 – Modelos Numéricos de Fluxo de Águas Subterrâneas

Os modelos numéricos diferem dos modelos analíticos por realizarem sua simulação em intervalos discretos. O processo de discretização, que caracteriza os modelos numéricos, resulta da segmentação do domínio simulado em intervalos finitos. Este processo envolve o truncamento de equações parciais diferenciais em equações algébricas simples, o que resulta em soluções aproximadas. Deste modo, quanto menor o intervalo discreto do modelo, maior sua aproximação com a solução analítica e com a situação real.

Na simulação numérica, em que os diversos elementos deste domínio se inter-relacionam, cria-se uma rede de equações com incógnitas a serem solucionadas. Por este motivo, o desenvolvimento de computadores de alto rendimento, por volta dos anos 1960, permitiu o desenvolvimento de modelos numéricos, inclusive para problemas hidrogeológicos (WANG E ANDERSON, 1982).

A discretização dos métodos numéricos permite que problemas relacionados à heterogeneidade, anisotropia e contornos irregulares do domínio sejam representados, uma vez que porções diferenciadas podem ser individualizadas.

3.11 – Método das Diferenças Finitas

O Método das Diferenças Finitas (MDF) baseia-se na aproximação de equações diferenciais parciais em um conjunto de equações algébricas inter-relacionadas entre si, que representam elementos discretos de espaço e tempo. Como assinalado por Burden & Faires (1993), o MDF pode ser obtido de aproximações numéricas pelo truncamento da série polinomial de Taylor.

Fazendo uso dessas equações, pode se verificar que este método resulta em aproximações de equações diferenciais parciais, que foram convertidas em um sistema de equações algébricas. Um exemplo bastante simples desta aproximação pode ser extraído de Wang & Anderson (1982), em que uma equação laplaciana que descreve o fluxo em regime permanente e meio homogêneo e isotrópico pode ser aproximada a uma notação numérica em diferenças finitas.

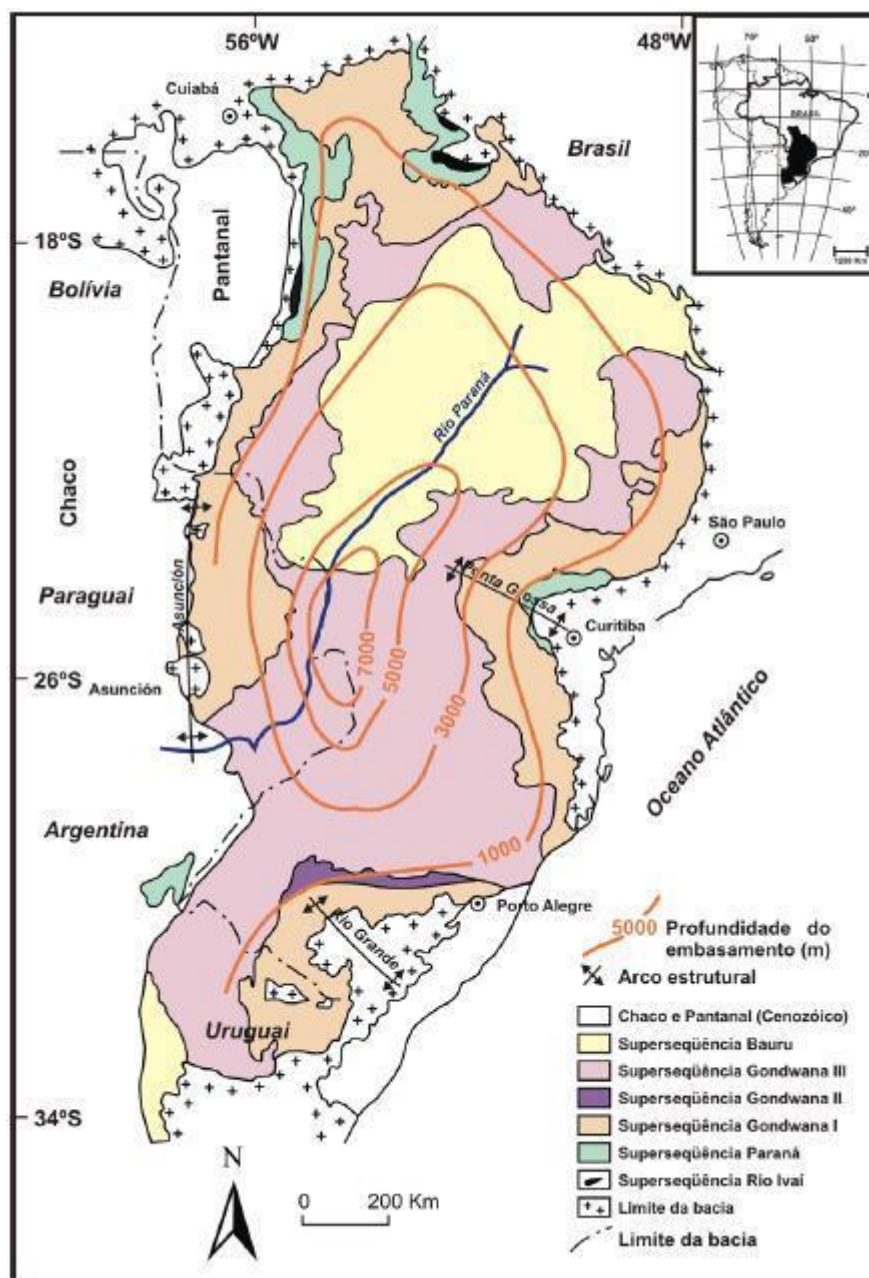
4 - Caracterização da área

4.1 - Contexto Geológico Regional

A área de estudos encontra-se sobre a Bacia do Paraná, uma bacia intracratônica que localizada no continente sul-americano, situada, geograficamente, nos territórios do Brasil meridional, leste do Paraguai, nordeste da Argentina e porção norte do Uruguai, perfazendo uma área de cerca de 1,5 milhão de quilômetros quadrados (MILANI et al. 2007).

A bacia tem uma forma ovalada com eixo maior de cerca de 30 km alongado na direção NE-SW e menor de 15 km na direção E-W (SIQUEIRA, 2011) contornado por limites erosivos relacionados à evolução geotectônica do continente durante o Mesozoico/Cenozoico. Seu flanco leste foi erodido em função do soerguimento crustal causado pelo rifteamento do Atlântico Sul e seu flanco ocidental é caracterizado por uma feição flexural (MILANI et. al., 2007). Possui cerca de 5.000 metros de espessura (Figura 8) preenchida por sedimentos do Paleozoico e Mesozoico assim como coberturas cenozoicas e derrames basálticos (SCHNEIDER et. al., 1974).

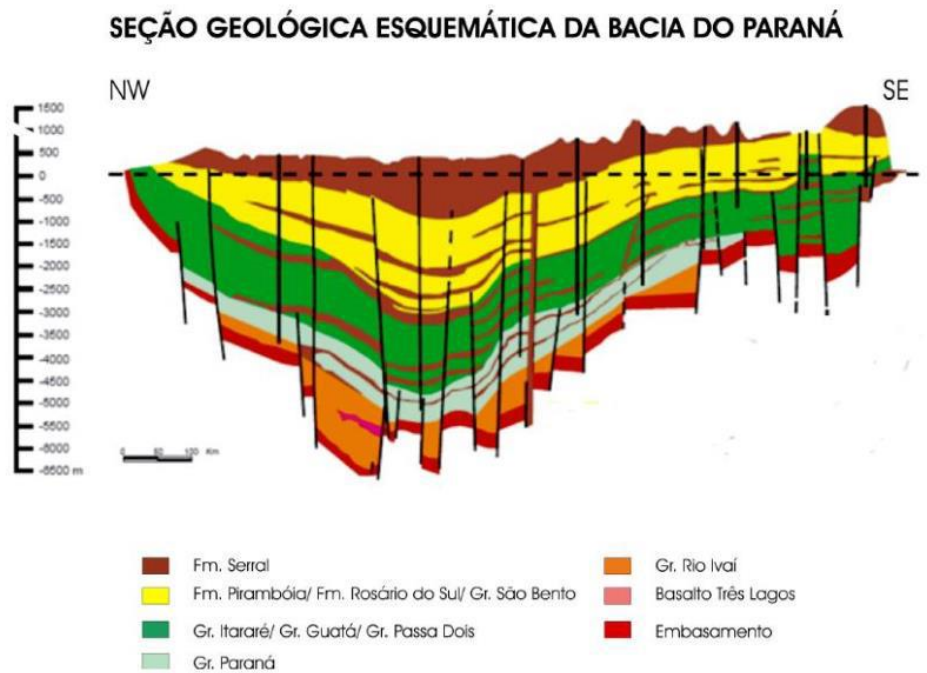
Figura 8 - Mapa Geológico simplificado da Bacia do Paraná, com referências geográficas e profundidade do embasamento.



Fonte: Milani (1997).

O registro estratigráfico compreende um pacote sedimentar-magmático com uma espessura total máxima em torno de sete mil metros, medido na calha do Rio Paraná, onde fica o depocentro estrutural da bacia (MILANI et al., 2004). Segundo a Carta estratigráfica de Millani et al. (2004), a Bacia do Paraná é subdividida em seqüências do Grupo Ivaí, Grupo Paraná (Formações Furnas e Ponta Grossa), Grupo Itararé, Grupo Guatá, Grupo Passa Dois (Formações Irati e Corumbataí), Formações Piramboia, Botucatu, Serra Geral e Grupo Bauru, sendo os quatro últimos de idade Mesozoica.

Figura 9 - Seção Geológica esquemática da Bacia do Paraná.



. Fonte: modificado Milani & Zalán (1998).

4.2 Contexto geológico da Bacia do Paraná no Estado de São Paulo

4.2.1 Contexto estratigráfico

As unidades litoestratigráficas da Bacia do Paraná localizadas no Estado de São Paulo, datam desde o Carbonífero ao Neocretáceo e são correspondentes às Supersequências Gondwana I, Gondwana II, Gondwana III e Bauru (MILANI, 1994). As unidades correspondentes à Sequência Gondwana I são o Supergrupo Tubarão (Fm. Itararé) e Grupo Passa Dois (Formações Irati e Corumbataí). A Fm. Tatuí pertence ao Grupo Guatá (ROVERI, 2010). As sequências Gondwana II e Gondwana III abrangem as Formações Pirambóia, Botucatu e Serra Geral (Grupo São Bento) e a Sequência Bauru está inserida na Formação Itaqueri. A Figura 10 mostra o empilhamento estratigráfico da bacia.

Figura 10: Coluna estratigráfica da Bacia do Paraná na região de estudo.

COLUNA ESTRATIGRÁFICA DA BACIA DO PARANÁ NA REGIÃO MAPEADA							
ERA	PERÍODOS	GRUPO	FORMAÇÃO	LITOLOGIA	Espes. Aprox. (metros)	DESCRIÇÃO SUCINTA	AMBIENTE DE DEPOSIÇÃO
CENOZÓICA	QUATERNÁRIO		RIO CLARO		30	ARENITOS POUCO CONSOLIDADOS COM LENTES DE ARGILAS E NÍVEIS CONGLOMERÁTICOS NA BASE <i>(Arenitos = reservatório de água subterrânea em poços rasos da região de Rio Claro)</i>	CONTINENTAL: PLANÍCIE ALUVIAL E LACUSTRES. COLUVIÕES
	TERCIÁRIO		ITAQUERI		100	ARENITOS CONGLOMERÁTICOS E ARENITOS SILICIFICADOS / FERRICRETES	CONTINENTAL: LEQUES ALUVIAIS
MESOZÓICA	CRETÁCEO	SÃO BENTO	SERRA GERAL		100	DERRAMES DE BASALTOS COM LENTES DE ARENITO NA BASE. DIQUES E SOLEIRAS DE DIABÁSIO <i>(Basalto e diabásio = matéria-prima para brita)</i>	MAGMATISMO FISSURAL
	JURÁSSICO		BOTUCATU		100	ARENITOS BEM SELECIONADOS COM GRÃOS BEM ARREDONDADOS E SEM ESFÉRICOS, POUCA ARGILA	CONTINENTAL DESÉRTICO
	TRIÁSSICO		PIRAMBOIA		150	ARENITOS COM GRÃOS ARREDONDADOS E ESFÉRICOS. DIVERSOS NÍVEIS DE LAMITOS	CONTINENTAL: FLUVIAL E DESÉRTICO
			CORUMBATAI		100	SILTITOS CONTENDO LENTES DE ARENITOS FINOS ARGILITOS, SILTITOS, ARENITOS FINOS, NÍVEIS DE CALCÁRIOS DOLOMÍTICOS E COQUINAS <i>(Argilitos = matéria-prima para a indústria cerâmica da região de Rio Claro)</i>	
PALEOZÓICA	PERMIANO	PASSA DOIS	IRATI		40	FOLHELHOS, SILTITOS, FOLHELHOS PIROBETUMINOSOS, CALCÁRIOS DOLOMÍTICOS <i>(produtos de calcário na região de Assistência, Itapira e Piracicaba/Sulista)</i>	MISTO:LAGUNA/PLATAFORMA
		TATUI		50	SILTITOS E SILTITOS ARENOSOS	MISTO:PLANÍCIE COSTEIRA/PLATAFORMA	
		ITARARÉ	Grupo ITARARÉ (dividido no Estado de São Paulo)		900	ARENITOS, SILTITOS, VARVITOS E DIAMICTITOS (ALGUNS VERDADEIROS TILITOS) <i>(Arenitos = reservatórios de água subterrânea em poços profundos da região)</i>	CONTINENTAL: GLACIAL FLUVIAL LACUSTRE MISTO MARINHO (GLÁCIO-MARINHO)
	CARBONIFERO						
Pré-Cambriano			EMBASAMENTO			GRANITOS, MIGMATITOS, GNAISSES, XISTOS, QUARTZITOS	

Fonte: modificada de Zaine et al, 2008.

O embasamento da bacia é constituído por granitos, migmatitos, gnaisses, xistos e quartzitos. Aflora em principalmente na porção nordeste da bacia. Tendo como base a coluna estratigráfica extraída de Perinotto & Zaine (2008) para descrever as unidades sedimentares aflorantes no Estado de São Paulo, tem-se, inicialmente, em ordem estratigráfica, o Grupo Itararé. Constituído por uma sequência sedimentar permo-carbonífera, atinge uma espessura de até 1.400 metros no sudoeste do Estado de São Paulo (Zaine, 1994) e é composto principalmente por diamictitos, arenitos brancos, avermelhados e arroxeados de granulometria variável de fina a conglomerática, lamitos, folhelhos e ritmitos associados a sistemas glaciais de deposição e que constituem pacotes de grande extensão (Schneider et al., 1974). Ocorrem ainda pelitos, ritmitos e tilitos. Quanto ao conteúdo fóssilífero, ainda que escasso, pode ocorrer braquiópodos, gastrópodos e lamelibrânquios, associados a fácies marinhas (Zaine, 1994).

Sobreposto ao Grupo Itararé está a Formação Tatuí, de idade permiana e composta por siltitos e folhelhos marrom arroxeados plataformais, além de siltitos cinzas, verdes ou amarelos, arenitos e calcários, depositados em planície costeira. O registro fóssil é composto por palecípodas, gastrópodos,

braquiópodos, ofiuróides e asteróides de origem marinha além de restos vegetais e palinomorfos (SCHNEIDER et al., 1974). Segundo a literatura, a espessura da formação é variável, mas não ultrapassa os 100 metros (ZAINE, 1994)

A Formação Irati, também permiana, corresponde à base do Grupo Passa Dois, e se encontra estratigraficamente acima da Fm. Tatuí. Os folhelhos a ela pertencentes indicam uma transgressão marinha, havendo retrabalhamento através de agentes marinhos costeiros, gerando ravinamentos por onda no topo da Fm. Tatuí, na qual depositaram-se conglomerados ricos em seixos de sílex e bioclastos, segundo Assine et al. (2003). É composta por dois membros, sendo o inferior chamado de Taquaral e o superior de Assistência (ZAINE, 1994). O Membro Taquaral é composto por argilitos e folhelhos de coloração cinza escuro a claro e por siltitos acinzentados na base, indicando ambiente marinho de baixa energia. Sua espessura média varia entre 10 e 20 metros e o registro fóssilífero é composto por restos de peixes e crustáceos em geral, como *Clarkecaris*, *Paulocaris* e *Liocaris* (ZAINE, 1994). O Membro Assistência, situado no topo da Formação Irati, é composto por uma sequência de folhelhos cinza escuros e folhelhos negros pirobetuminosos, associados a calcários, localmente marcados por ondulações, laminações cruzadas e convolutas, oolitos, brechas intraformacionais e laminações de microbialitos (SCHNEIDER et al., 1974).

O contato superior da Formação Irati é concordante com a base da Formação Corumbataí, cujo topo se encontra no limite Permiano-Triássico. Seu ambiente deposicional é bastante controverso, mas há registros na literatura de sedimentação em ambiente marinho de águas rasas (SCHNEIDER et al., 1974) planície de maré, relacionada a um sistema deltaico (GAMA JR., 1979) e sistema lacustre (SANFORD & LANGE, 1960). Com espessura média em torno de 130 metros no estado de São Paulo, a Formação Corumbataí possui característica estratificação plano-paralela e laminação flaser (SCHNEIDER et al., 1974). É composta por argilitos, folhelhos e siltitos de cores cinza escuro na base e argilitos, folhelhos e siltitos arroxeados a avermelhados, intercalados por bancos carbonáticos, com presenças pontuais de oólitos, e camadas de arenitos muito finos na porção superior.

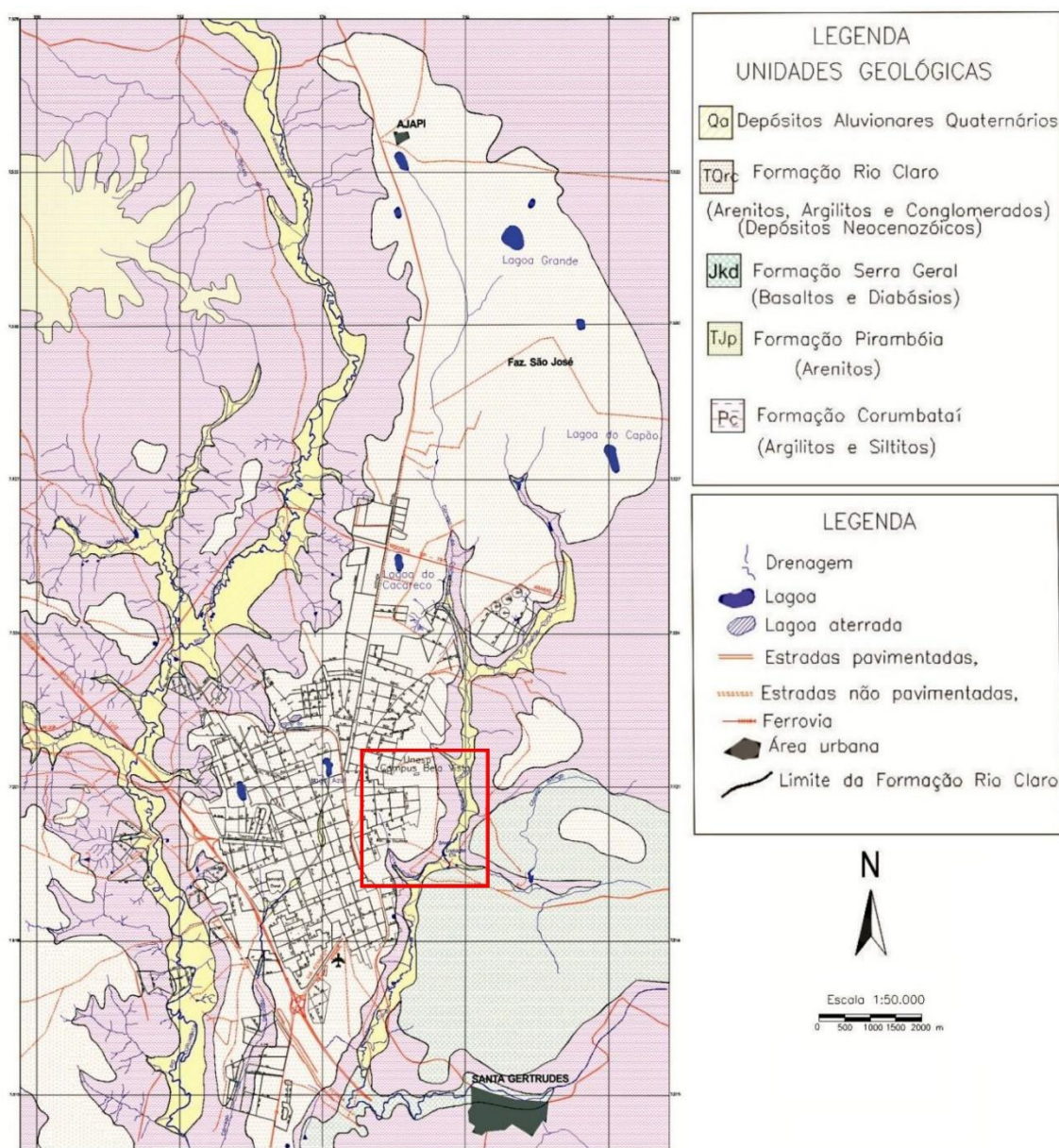
Em contato discordante com o topo da Formação Corumbataí encontra-se a Formação Piramboia, de idade triássica. Composta por arenitos brancos a amarelados, avermelhados, de granulação média a muito fina, silto-argilosos, com grãos bem polidos, subarredondados e finas intercalações de argilitos e siltitos, apresentando estratificações cruzadas de médio e grande porte (ZAINE, 1994). Embora apresente conteúdo fóssilífero restrito, são descritos fragmentos de conchostráceos e ostracodes de água doce, bem como de restos vegetais. O contexto estratigráfico da unidade está associado a uma sedimentação continental fluvial, marcada por depósitos de rios meandantes e lagos relacionados a condições oxidantes (SCHNEIDER et al., 1974). Seu contato superior com a Formação Botucatu se encontra no limite Triássico-Jurássico e é concordante. A Formação Botucatu, de idade Jurássica, é composta por arenitos

finos a médios, mas, por não aflorar na área mapeada, não será tratada neste relatório.

Sobreposta à Formação Botucatu está a Formação Serra Geral, que compreende uma sequência de derrames de lavas basálticas toleíticas datadas do Cretáceo. Esta sequência ígnea constitui o relevo das cuestas que bordejam o flanco do Planalto Ocidental Paulista (ROVERI, 2010). É resultado de um intenso vulcanismo fissural (SCHNEIDER et al., 1974).

Por fim, na região do município de Rio Claro, encontra-se comumente uma formação, datada do quaternário, chamada de Formação Rio Claro. Esta formação ocorre geralmente como coberturas significativas, porém descontínuas, sobre superfícies de relevo suave e aplainado (ZAIANE, 1994), não ultrapassando 40 metros de espessura na região. É composta por arenitos arcossianos mal consolidados, arenitos conglomeráticos e argilitos vermelhos com estruturas de estratificação cruzada, estruturas de corte e preenchimento e estruturas resultantes de ressecamento. Zaine (1994) admite um paleoambiente fluvial com conteúdo fossilífero representado principalmente por restos vegetais de angiospermas.

Figura 11: Mapa geológico simplificado da área de estudo.



Fonte: modificado de NOGUEIRA, 2014.

Das unidades litoestratigráficas que compõem a bacia no estado de São Paulo, ressaltam-se aqui apenas aquelas que afloram na região estudada. São elas: a Fm. Corumbataí, pertencente ao Grupo Passa Dois (Permiano) e as coberturas Cenozóicas Fm. Rio Claro e Cobertura aluvionar.

Segundo Zaine (1994) a Formação Rio Claro apresenta o registro mais significativo e, provavelmente, o mais antigo do Cenozoico dentro da Depressão Periférica Paulista. São ocorrências isoladas, como a que capeia grande parte do município homônimo (Zaine, 2000) a mesma é composta por sedimentos predominantemente areníticos, apresenta como características marcantes: a fraca litificação, profunda alteração pedogenética, espesso solo arenoso e domínio de litotipos arenosos, esbranquiçados, amarelados a avermelhados, variando de areia fina a grossa, com intercalação de camadas de conglomerados

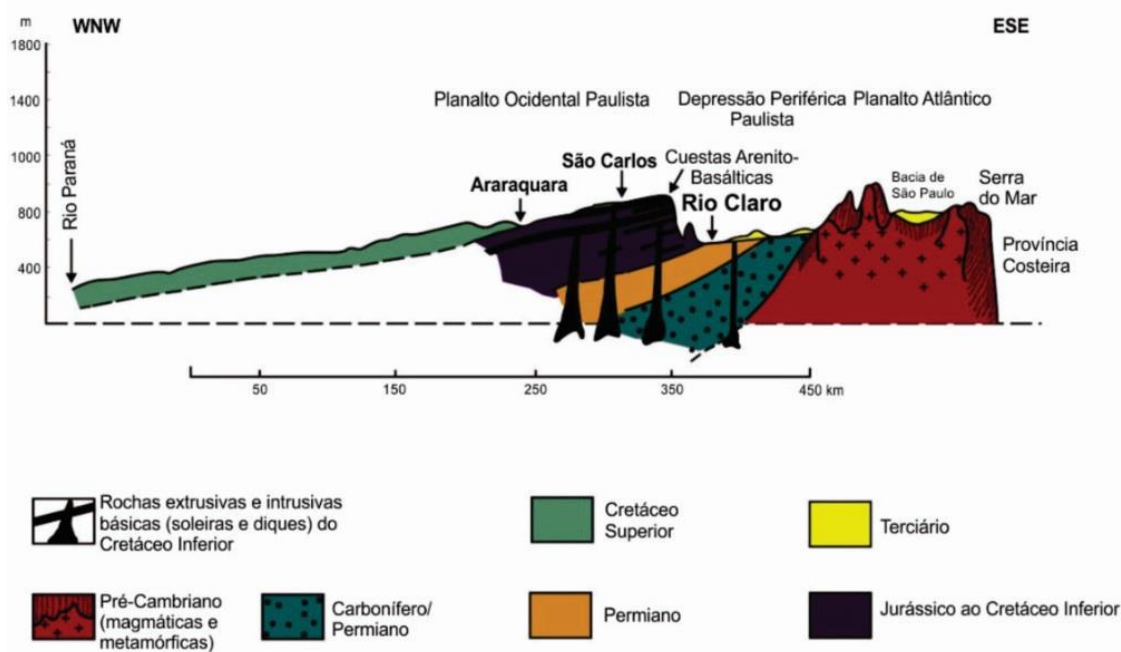
e de sedimentos argilosos e conteúdo fossilífero de vegetais do Quaternário (IPT, 1981). O contato da Fm. Rio Claro com a Fm. Corumbataí é erosivo, marcado por um nível de cascalheiras de seixos centimétricos na base da Fm. Rio Claro (ZAINÉ, 1994).

A Formação Corumbataí é composta por depósitos possivelmente marinhos de planícies de maré, incluindo argilitos, folhelhos e siltitos cinza, arroxeados ou avermelhados, com intercalação de bancos carbonáticos, silexiticos e camadas de arenitos finos (IPT, 1981).

4.3 Contexto geomorfológico regional

O Estado de São Paulo é caracterizado por uma geomorfologia predominantemente composta por planaltos com processos epirogênicos associados. O Estado se estende sobre um escudo cristalino pré-cambriano até a bacia do Paraná (ALMEIDA, 1964), que por sua vez se associa à Depressão Periférica Paulista, aos altos estruturais e ao relevo de cuestas. Segundo Ab'Saber (1956), o Estado de São Paulo é dividido em setores geomorfológicos denominados, de leste para oeste, Planície Costeira, Planalto Atlântico, Depressão Periférica e Planície Costeira. Segundo Ab'Saber (1956), o Estado de São Paulo é dividido em setores geomorfológicos denominados, de leste para oeste, Planície Costeira, Planalto Atlântico, Depressão Periférica e Planície Costeira.

Figura 12 - Seção WNW-ESE mostrando os domínios geomorfológicos da Bacia do Paraná no Estado de São Paulo.



Fonte: modificado de AB'SABER, 1956.

A Depressão Periférica, onde está localizada a área de estudo, é uma região sensivelmente rebaixada pela erosão e se encontra cercada pelas terras altas do Planalto Atlântico a leste e pelas Cuestas Basálticas a oeste. De acordo com Almeida (1964), as terras altas do Planalto são resultado de uma situação geográfica peculiar com estruturas rochosas heterogêneas, tornando sua topografia bem diversificada; já as Cuestas Basálticas se apresentam como uma faixa montanhosa.

A topografia da região é pouco acidentada, com desníveis raramente superiores a 200 metros. Predominam colinas suaves, separadas por vales recentes, com planícies aluviais em geral pouco expressivas. As redes de drenagem apresentam em geral morfologia dendrítica, embora respondam diretamente às propriedades dos tipos litológicos sobre os quais correm (ALMEIDA, 1964). Predominam três rios: Tietê e seus dois afluentes, os rios Piracicaba e Sorocaba.

Relacionando-se a litoestratigrafia com as feições geomorfológicas presentes na região, constata-se que o Grupo Itararé aflora nos vales dos rios Corumbataí e Passa Cinco, na Depressão Periférica e no Domo de Pitanga. A Formação Tatuí ocorre tanto no Domo de Pitanga como nos vales dos rios Corumbataí, Passa Cinco e Cabeças, enquanto a Formação Corumbataí ocorre no vale do rio de mesmo nome. A Formação Botucatu costuma ocorrer próximo às linhas de cuestas no degrau de relevo entre a Depressão Periférica e o Planalto Ocidental Paulista, além de aflorar na Serra de Santana e outros morros testemunhos. As rochas basálticas da Formação Serra Geral são os mais comuns nas faixas de cuestas e ao longo dos principais rios. Na Serra de Santana e nos leitos dos rios Corumbataí e Passa Cinco há afloramentos de sills e diques de diabásio que resultam em feições de relevo acentuadas na bacia do rio Corumbataí. A Formação Itaqueri tem ocorrência no Planalto Ocidental acima dos sedimentos da Formação Serra Geral no reverso das cuestas areno-basálticas, ao passo que a Formação Rio Claro forma extensos chapadões sobre os depósitos da Formação Corumbataí. Por último, existem depósitos aluvionares nos fundos de vales e terraços, além de depósitos coluvionares e de reversos de escarpa nas bacias de São Paulo e Taubaté (ZAINÉ, 1994).

Hidrograficamente Rio Claro está inserida na Bacia dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí, que possui cerca de 15.320 km² e é composto por 74 municípios, sendo 69 dentro do estado de São Paulo e os 5 no Estado de Minas Gerais (RELATÓRIO INSTITUCIONAL DAS BACIAS PCJ, 2018) (Figura 13)

Figura 13 – Localização do município de Rio Claro com suas principais feições hidrográficas dentro das bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá



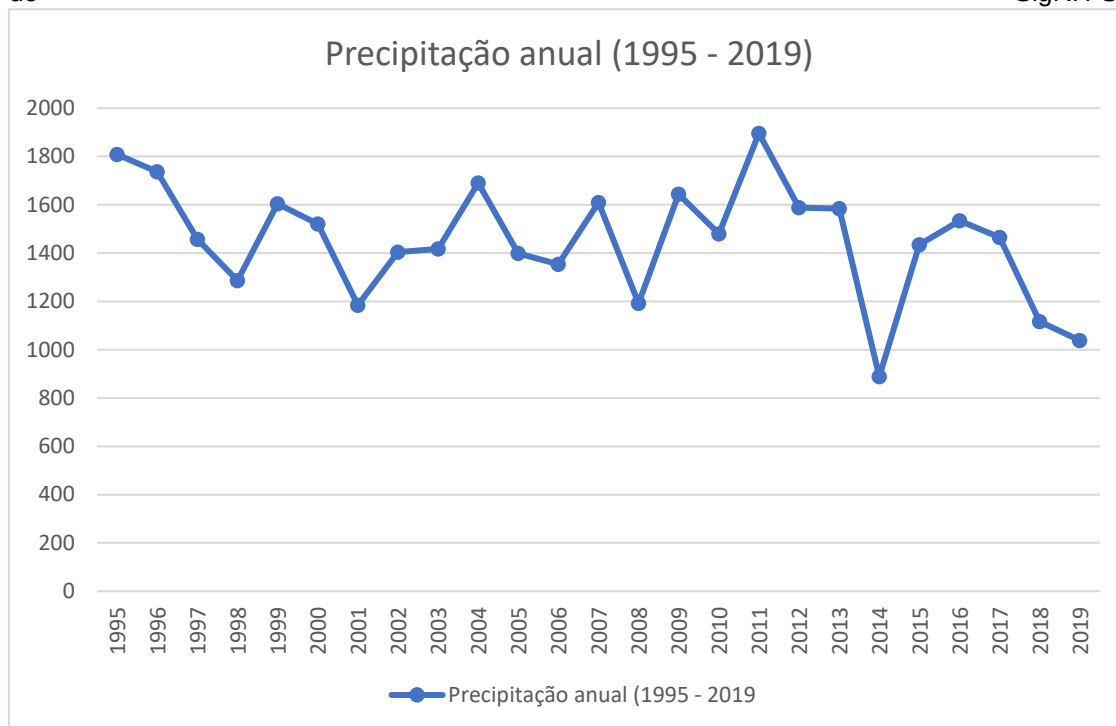
Fonte: Relatório institucional das bacias PCJ, 2018

4.4 - Caracterização Climática

Na classificação Köppen-Geiger, o clima da região é considerado subtropical úmido com duas estações bem definidas – Cwa, sendo w: inverno seco, a: verão quente. As chuvas se concentram nos meses mais quentes, entre outubro e março, correspondendo a mais de 80% das precipitações totais. As temperaturas médias anuais situam-se entre 18 e 20 °C (Posto Ceapla – UNESP), sendo a mínima já registrada de -1,8 °C e máxima de 37,8 °C.

A média pluviométrica para o município é da ordem de 1400 mm/ano, já sendo registrados em anos anteriores, extremos de 730 mm/ano a 2300 mm/ano (SigRH - SP) (Figura 14).

Figura 14 – Variação registrada das taxas pluviométricas anuais de 1995 a 2019, segundo dados do SigRH-SP.



5. - Materiais e métodos de trabalho

Primeiramente foi realizado o pedido de vistas ao processo na CETESB, para se identificar os estudos prévios realizados na área, tendo sido realizados estudos geofísicos, elaboração de mapeamento, demarcação e execução de poços de monitoramento e amostragem de solo e água subterrânea.

Os dados obtidos por meio de sondagens realizadas durante instalação de poços de monitoramento pela GEMMAM permitiram a obtenção de informações a respeito da composição do solo local e da presença do nível d'água. Neste estudo a amostragem de solo e água subterrânea foi realizada em "liner" e "baillers" respectivamente, utilizados pelo órgão ambiental para análise de concentrações de Boro, Cromo e Cobre

Foram realizados ensaios de permeabilidade – testes de Slug para caracterização hidráulica do Aquífero Rio Claro e da Formação Corumbataí em água e solo com o propósito de se determinar a condutividade hidráulica de aquíferos, o método de interpretação para o bail test e o slug test utilizado foi o métodos de Hvorslev (1951).

Para a simulação numérica foi utilizado o software MODFLOW 6, com interface gráfica ModelMuse 4.1.0, através do método de diferenças finitas para simular as condições hidrogeológicas na área. Esse método foi escolhido devido a seu baixo custo, velocidade de processamento, simplicidade da área e do projeto. Em regime permanente é definida a distribuição da condutividade hidráulica no aquífero simulado e a distribuição das taxas de recarga iniciais.

A carga hidráulica medida nos poços serve para comparação dos níveis d'água observados nos poços com os calculados pela simulação.

Após a confecção do modelo inicial, é realizada a Calibração, que consiste na adequação dos parâmetros do modelo conceitual, até obter-se uma significativa correlação entre os valores reais, obtidos em campo e calculados.

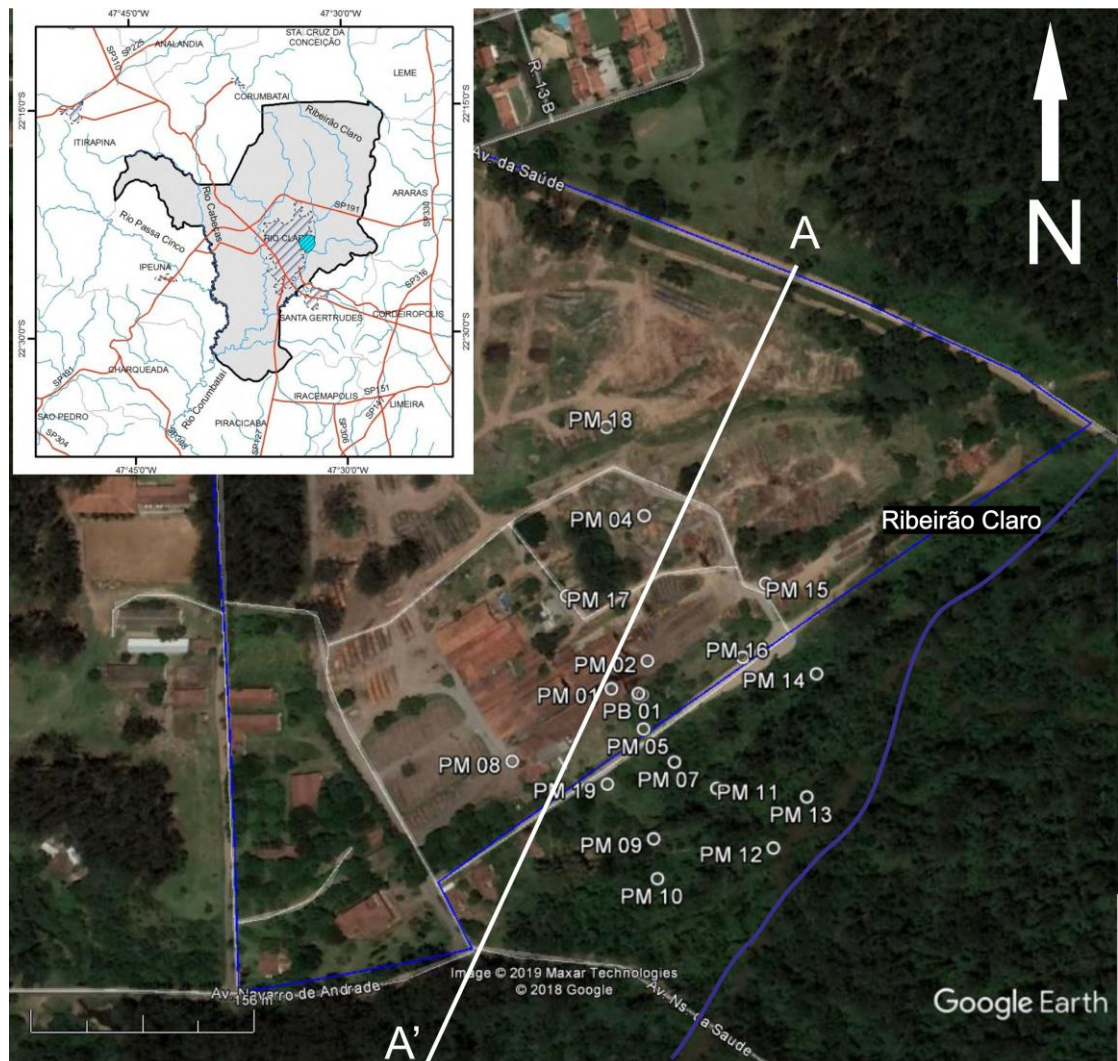
Normalmente é utilizado um erro aceitável de menos de 5%, para se obter esse resultado, ajustes sucessivos nos parâmetros de entrada do modelo são efetuados e novas simulações são feitas até o erro quadrático médio normalizado (NRMSE) estar dentro do nível aceitável.

5.1 - Contextualização da área de estudos

A área estudada pertence ao município de Rio Claro – SP e é delimitada pelo polígono de vértices 238330.71m E 7519990.80m S, 237448.23m E 7519961.67m S, 237502.43m E 7519271.24m S, 238390.50m E 7519301.18m S.

Os 23 poços de monitoramento estão dispostos na área conforme a Figura 15, foram instalados de forma a delimitar a pluma de contaminantes existente. A CETESB instalou a seção filtrante com tubo filtro variando de 2,0m a 3,0m nos poços de monitoramento, pré-filtro de 1,0 a 2,0mm até aproximadamente 50cm acima do topo da seção filtrante, válvula de pé e sourceblock.

Figura 15- Localização da Área de estudo



Fonte: Modificado de CETESB, 2008 e PUPIM (2010)

No campo realizado pela GEMMAM foram identificados 6 camadas distintas sendo: Formação Rio Claro: presente principalmente nos poços mais a norte, na parte superficial, como no PM04. Possui uma característica arenosa, pouco argilosa; Formação Rio Claro retrabalhada: observada nos poços próximos a fonte de contaminação, na parte mais superficial (até 3,0m) possui granulometria arenosa mal selecionada; Solo de alteração da Formação Corumbataí: Observada somente nos poços multiníveis na porção mais profunda (de 7,5 até 11m de profundidade). É constituída de argilas plásticas. Formação Corumbataí alterada: observada em toda extensão do local, desde os poços de montante até a margem do Ribeirão Claro. Essa litologia teve como característica ser um solo argiloso extremamente duro e compacto, o que dificultou a penetração dos equipamentos de perfuração. Formação Corumbataí sã: corresponde à litologia do local encontrada nos poços multiníveis, na profundidade de 10 a 11 metros e depósitos aluvionares da várzea do Ribeirão Claro.

Os resultados indicam que o horizonte saturado se encontra abaixo da Formação Rio Claro, predominantemente contido nos solos argilo siltsos de alteração da Formação Corumbataí.

5.2 - Simulação Numérica de Fluxo em Regime Permanente

O sistema computacional selecionado para a aplicação do método de diferenças finitas foi o MODFLOW 6, um programa interativo de simulação de processos de fluxo e transporte de calor e de massa em águas subterrâneas e zona não saturada.

Este programa é considerado o mais adequado por utilizar o método das diferenças finitas, bastante versátil para lidar com geometrias complexas, contorno irregular, condições de contorno internas ao domínio, como rios ou zonas de falha, e níveis d'água dinâmicos (ANDERSON e WOESSNER, 2002), e por suportar bem malhas pesadas, com grande número de elementos, necessárias para a modelagem de problemas como bacias hidrográficas (BARRETO, 2010).

A calibração do modelo é feita por adequações sucessivas nos parâmetros de entrada, taxa de recarga, condutividade hidráulica e condições de contorno até que exista uma relação satisfatória entre os valores de carga hidráulica mensuradas em campo e aquelas calculadas pela simulação.

Existem inúmeras técnicas de calibração como a descrita por Yeh & Mock (1996) e códigos de solução automática. Entretanto, a calibração, comumente, é feita através de ajustes manuais, empregando-se a técnica de tentativa e erro (trial-and-error).

6. - Resultados

6.1 - Ensaios Hidrogeológicos

Foi realizado um ensaio do tipo Slug test em três poços de monitoramento para se calcular a condutividade hidráulica da área.

Este ensaio foi realizado pela GEMMAM (CETESB, 2008) em três poços de monitoramento construídos no local: PM08, PM11 e PM17. A Tabela 1 mostra os resultados encontrados para condutividade hidráulica nesses poços, interpolada pelo método Hvorslev (1951). O perfil construtivo dos poços pode ser encontrado no anexo 1

Tabela 1 Condutividade hidráulica dos poços

Poço	Condutividade Hidráulica (K)	Litologia
	m/s	
PM08	$8,6 \times 10^{-8}$	Fm. Corumbataí alterada
PM11	$4,57 \times 10^{-6}$	Fm. Rio Claro
PM17	$4,22 \times 10^{-8}$	Fm. Corumbataí alterada

Pode-se identificar que os resultados obtidos de condutividade hidráulica correspondem à descrição litológica realizada em campo. Os poços PM08 e PM17 apresentam uma tendência mais argilosa, já o PM11, localizado mais perto do rio, possui sedimentos de pior seleção e estrutura mais arenosa, corroborando com uma condutividade hidráulica mais alta do que as áreas mais distantes dos rios.

6.2 - Levantamento Topográfico

Foram obtidos dados topográficos do terreno e de 23 poços, instalados no local pela GEMMAM (CETESB, 2008). A Tabela 2 mostra as cotas obtidas no levantamento topográfico e as coordenadas dos poços.

Tabela 2 Cotas, coordenadas e NA dos poços

Pontos	Latitude	Longitude	Cota	NA
PB 01	237979.39	7519512.44	579.36	-
PM 01	237960.82	7519515.05	579.92	576,190
PM 02	237985.49	7519535.21	579.86	579,270
PM 03	237982.37	7519511.83	578.66	575,400
PM 04	237981.12	7519636.17	592.16	587,910
PM 05	237983.50	7519487.40	578.57	575,020
PM 07	238005.47	7519464.38	573.75	573,230
PM 08	237891.65	7519464.90	583.06	574,570
PM 09	237991.94	7519410.72	572.09	570,810
PM 10	237994.16	7519382.92	572.43	569,510
PM 11	238035.16	7519446.65	571.19	570,510
PM 12	238075.14	7519405.55	570.12	568,900
PM 13	238098.23	7519441.51	570.61	569,600
PM 14	238104.27	7519527.03	571.74	571,070
PM 15	238067.20	7519590.84	580.67	576,820
PM 16	238052.20	7519538.11	582.58	579,040
PM 17	237928.68	7519580.50	589.25	583,500
PM 18	237954.55	7519696.06	596.11	587,260
PM 19	237958.81	7519448.02	579.37	573,620
PMN 01	237960.11	7519516.03	580.12	574,820

Continuação Tabela 2 - Cotas, coordenadas e NA dos poços

PMN02	237961.55	7519516.85	580.06	575,270
PMN 03	237979.53	7519509.44	579.10	574,320
PMN 04	237978.89	7519510.25	579.02	574,760

6.3 – Modelo Conceitual

A partir da análise de dados de cunho geológico contido nos resultados de investigações diretas realizadas pela empresa GEMMAM presentes no relatório da CETESB (2008), foi elaborado um modelo geológico conceitual.

Para um estudo do meio físico foram feitas seções hidrogeológicas para análise das principais características da geologia local conforme descrições feitas em campo, presentes no relatório da CETESB(2008).

Os furos de sondagem realizados pela GEMMAM (2008) executados durante a perfuração dos poços de monitoramento permitiram determinar as litologias presentes na porção superior e inferior do aquífero, atingindo profundidades máximas de 25 metros, sendo possível inferir, com alguma segurança, as litologias presentes em profundidade, o que permite separar o substrato geológico em duas camadas, a partir da variação das propriedades em profundidade.

A primeira destas camadas é representada pela porção superior do aquífero, marcada por rochas arenosas com presença de lentes mais argilosas. A segunda camada é representada pelo predomínio de rochas pelíticas (silitos), com alternância de camadas pouco expressivas de areia.

Foi adotada a cota altimétrica de 570m para a base impermeável do aquífero, uma vez que este valor representa o valor médio da cota do Ribeirão Claro e para o Córrego do Curtume

6.2 - Modelo Hidrogeológico Conceitual

Esta etapa fundamenta-se na elaboração de um modelo conceitual preliminar, a partir da compilação e interpretação das informações obtidas no relatório da CETESB (2008).

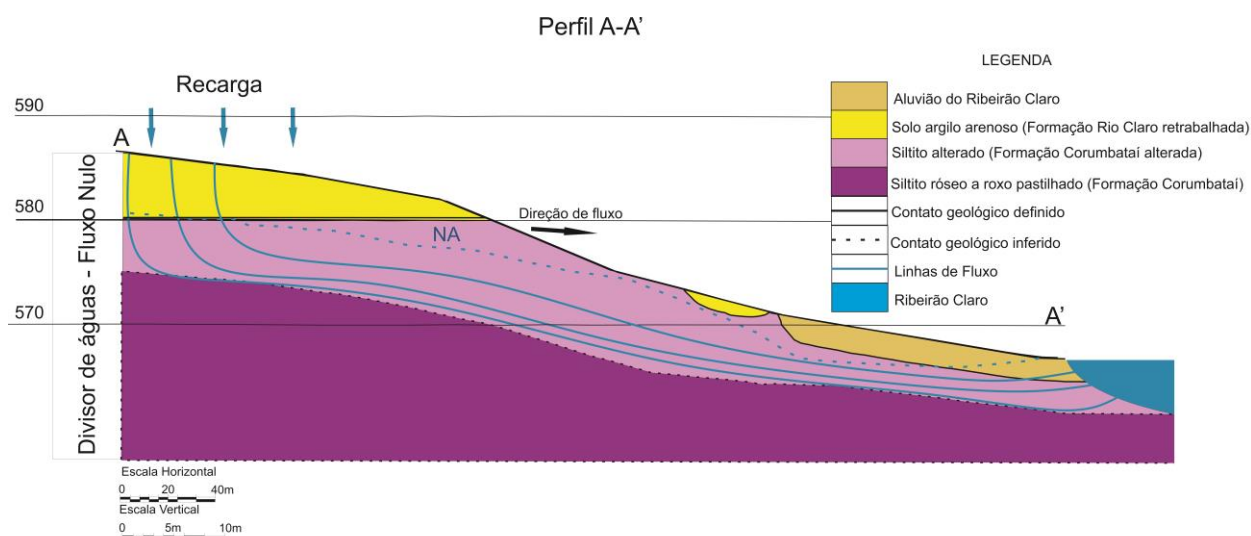
Dados os testes de slug realizados pela GEMMAM (2008), caracterização geológica, mapa de fluxo foi elaborado o modelo geológico conceitual para a área de estudo, com duas camadas. A primeira destas camadas é representada pela porção superior do aquífero, com arenitos pertencentes a Fm. Rio Claro, porções argilosas da Fm. Corumbataí e cobertura aluvionar. A segunda camada é representada pelo predomínio de rochas pelíticas da Fm. Corumbataí, com alternância de camadas pouco expressivas de areia.

No modelo matemático foi adotada a cota altimétrica de 570m para a base impermeável do aquífero, uma vez que este valor representa o valor médio das profundidades do topo do siltito pastilhado, medidas por meio de sondagem presente no relatório da CETESB (2008).

Tabela 3 – Distribuição de condutividade hidráulica no modelo conceitual

Litologia	Kx (m/s)
Fm. Rio Claro e Cobertura aluvionar	$6,55 \times 10^{-5}$
Fm. Corumbataí alterada	$4,07 \times 10^{-7}$
Fm. Corumbataí	$9,54 \times 10^{-8}$

Figura 16 – Modelo geológico conceitual



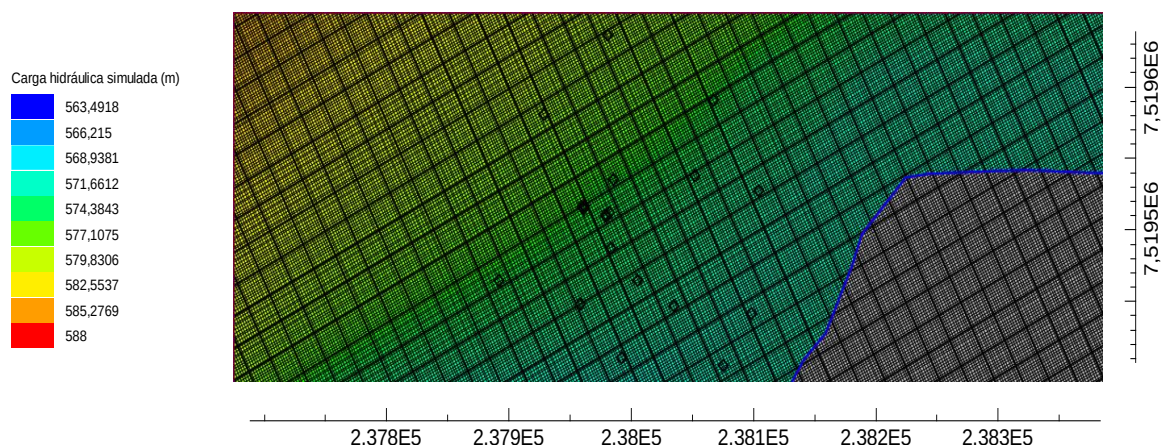
Fonte: modificado de CETESB, 2008.

Após confeccionado o modelo geológico conceitual, foi produzido o modelo numérico, através de simplificações e suposições, e então se realizam simulações de fluxo de água subterrânea.

6.3 - Configuração do Domínio Simulado

A área simulada possui aproximadamente 765000 m², que discretizada em 771 linhas, 632 colunas e 2 camadas. Inicialmente foram adotados espaçamentos regulares para as linhas e colunas, com espaçamento de 2,0m para as linhas e 2,0m para as colunas (Figura 17). A discretização do domínio, simulado em 2 camadas, foi nortado pelo modelo geológico conceitual, descrito no tópico referente ao modelo conceitual.

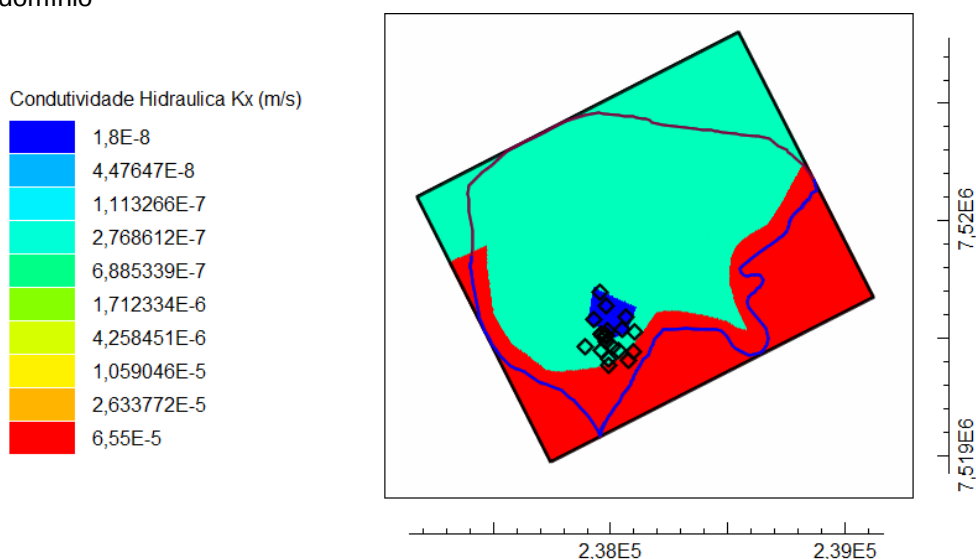
Figura 17 - Segmentação entre células ativas (colorido) e inativas (cinza) presentes no domínio simulado



6.4 - Distribuição dos Valores de Condutividade Hidráulica

A partir dos dados dos perfis de sondagem coletados do relatório da CETESB (2008), presentes no Anexo 1 foi possível estimar a distribuição espacial das litologias que compõem o aquífero na área de estudo, testes de slug permitiram atribuir um valor médio de condutividade hidráulica para cada um destes grupos litológicos, a partir disso foram atribuídos valores de condutividade hidráulica médios para toda a área de estudo e gerado a distribuição inicial dos valores iniciais de K (m/s) dentro do Modelo (Figura 18). Na direção Z foi adotado um valor de K com uma ordem de grandeza menor para todas as *camadas*.

Figura 18 - Distribuição inicial de condutividade hidráulica na camada superior do domínio simulado.



Deste modo para a ocorrência de um determinado grupo litológico foram atribuídos valores correspondente de condutividade hidráulica e gerado a distribuição inicial dos valores iniciais de K (m/s) dentro do Modelo (Figura 18).

Temos uma porção mais argilosa ao centro, com condutividade de $1,8 \times 10^{-8}$ m/s, a maior parte do modelo tem condutividade de $2,76 \times 10^{-7}$ m/s e próximo ao Ribeirão Claro e ao Corrego do Curtume temos camadas mais arenosas com uma condutividade de $6,55 \times 10^{-5}$ m/s.

6.5 – Condições de Contorno

A presença de elementos hidrológicos, tais como rios, lagos e córregos, nas adjacências da área de estudo, permite a utilização destes como condições de contorno.

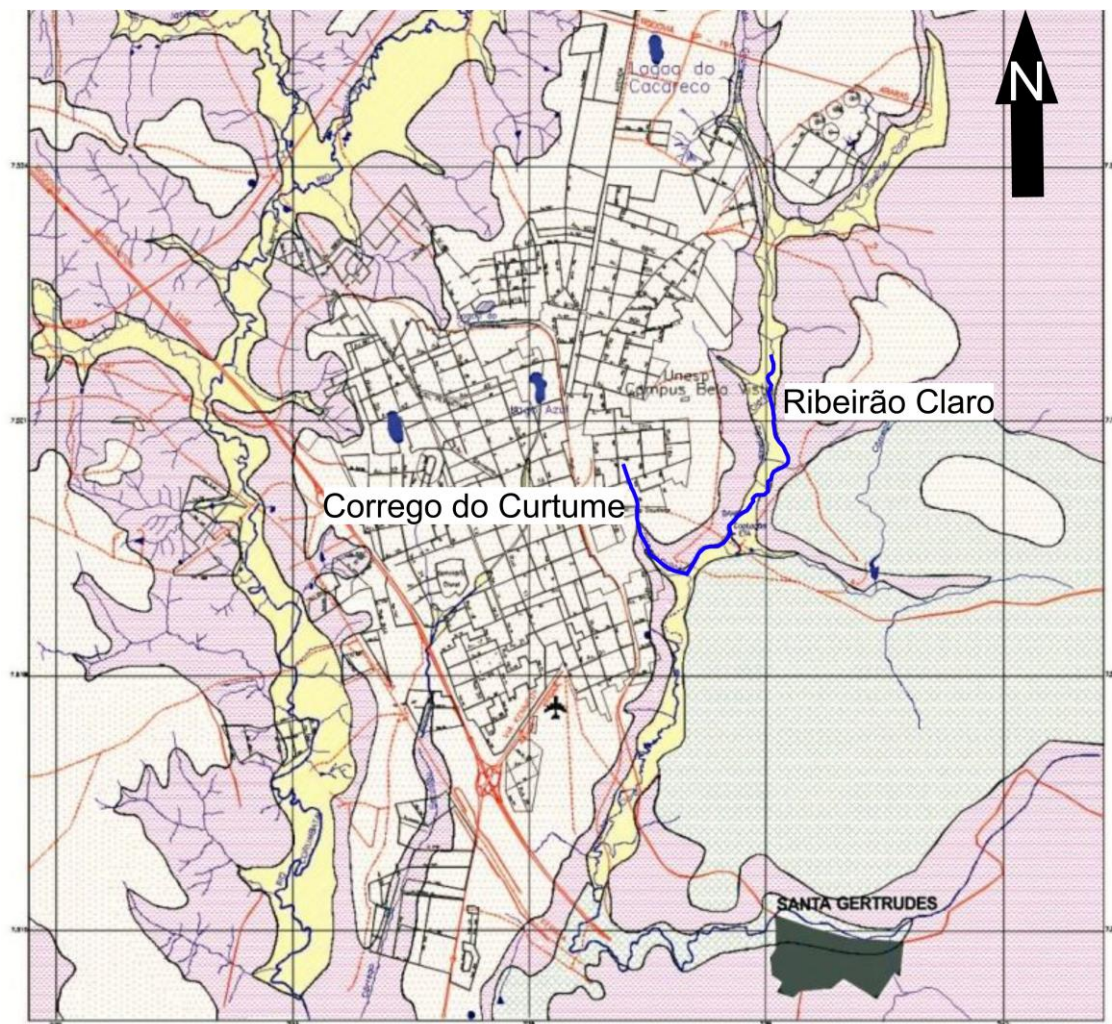
Sendo o caso do Ribeirão Claro e do Córrego do Curtume presentes nas adjacências da área de estudo (Figuras 19 e 20). Além destes elementos, foram adotadas condições de contorno do mapa potenciométrico presente no relatório da CETESB (2008).

Figura 19 – Mapa potenciométrico da área



Fonte: modificado de CETESB, 2008

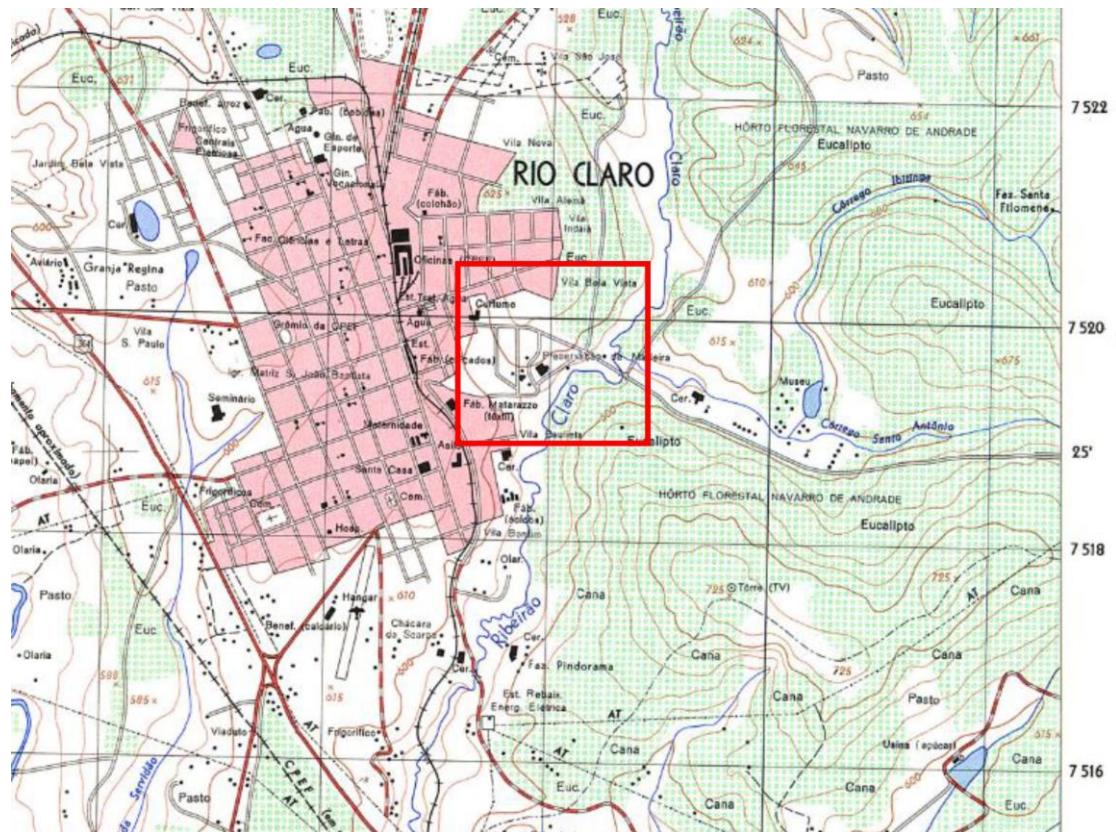
Figura 20 – Localização do Ribeirão Claro e Corrego do Curtume na cidade de Rio Claro



Fonte: modificado de Nogueira (2014)

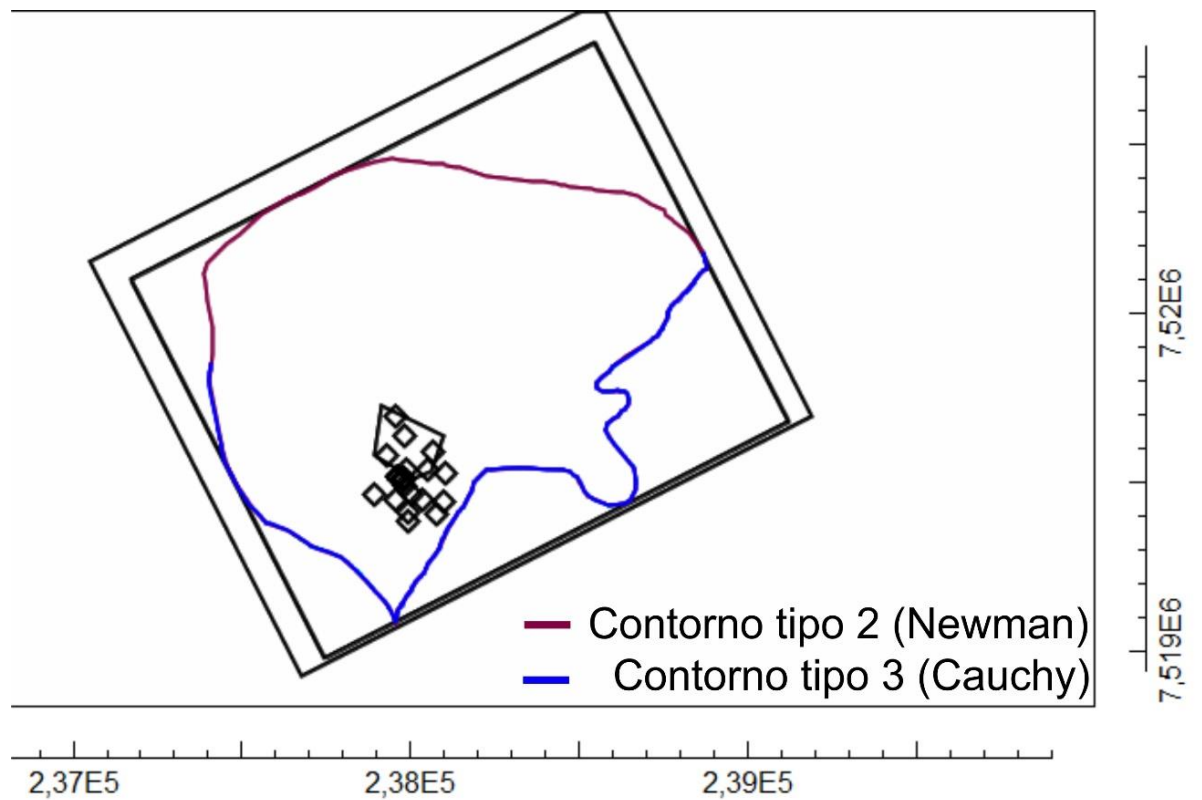
Com base na folha topográfica Rio Claro (IBGE, 1969) (Figura 21), foi estabelecido, nas porções nordeste e noroeste, uma condição de contorno do Tipo 2 (Neumman), com contornos de fluxo nulos, a partir da delineação de linhas de fluxo perpendiculares aos contornos de carga especificada citadas acima. Duas condições de tipo 3 (Cauchy), são estabelecidas nas porções sudeste e sudoeste, referentes ao Ribeirão Claro e a o Corrego do Curtume.

Figura 21 – Detalhe da folha topográfica Rio Claro, com destaque para a área de estudos



Fonte: IBGE (1969)

Figura 22 - Localização das condições de contorno adotadas no modelo



6.6 - Simulação em regime permanente

Tendo sido realizada a formulação de um modelo geológico conceitual e sua representação computacional nos modelos matemáticos foram realizadas simulações em regime permanente para que se pudesse determinar os valores e a distribuição relativa das diferentes zonas de condutividade hidráulica presentes na área simulada.

Para ser considerada satisfatória, a determinação destes valores é necessária que se gere, na simulação, um valor de carga hidráulica nos poços semelhante a verificada na condição real, presente no relatório da CETESB (2008), dos 23 poços existentes na área, apenas 18 foram utilizados.

6.7 - Calibração do modelo em regime permanente

Para a calibração do modelo em regime permanente, foi empregada a metodologia de “trial and error”, onde os parâmetros hidrogeológicos que compõem o modelo são alterados, e posteriormente geradas simulações para avaliação dos resultados frente a cada uma destas modificações. Este processo é feito até que exista uma correspondência em nível satisfatório entre os parâmetros mensurados em campo, retirados do relatório. Neste caso a carga hidráulica, e aquelas calculadas pela simulação.

Foram alterados os parâmetros de condutividade hidráulica, sua distribuição, espessuras de camadas e valores de recarga.

A distribuição e valores de condutividade hidráulica foram inicialmente adotados pelos valores deste parâmetro mensurados em campo, respeitando sua distribuição espacial, como mencionado anteriormente. Salienta-se, contudo, que os valores de condutividade hidráulica eram modificados em até uma ordem de grandeza do valor mensurado em campo, evitando-se que destoassem demasiadamente destes valores.

Quando se atingia um determinado grau de modificações nos valores de condutividade hidráulica, outros parâmetros eram ajustados, tais como recarga e condutividade hidráulica das camadas.

Assumiu-se um valor de recarga igual a $4.1 \times 10^{-10} \text{ m}^3/\text{s}$ para toda a área, devido a sua pequena dimensão e para simplificação do modelo.

A recarga e a condutividade foram modificadas de maneira sucessiva, até que alcançasse um valor próximo do medido em campo.

Tabela 3 – Comparação entre o valor observado e o valor simulado no modelo numérico.

Valor observado	Valor Simulado	Resíduo
576,19	575,6712646	0,518738
575,4	575,1245728	0,275452
575,02	574,5283813	0,491638
573,23	573,5510254	-0,32104
574,57	575,4015503	-0,83154
570,81	571,861145	-1,05115
569,51	570,793457	-1,28345
570,51	572,6348267	-2,12482
568,9	571,7090454	-2,80902
569,6	571,8858643	-2,28589
571,07	573,0341797	-1,96417
573,62	573,7245483	-0,10455
574,82	575,710083	-0,89008
575,27	575,6976318	-0,42761
574,32	575,135498	-0,81549
574,76	575,1674194	-0,40741

O resíduo médio obtido para os valores de carga hidráulica, calculados pela simulação, e aquelas mensurados nos poços de monitoramento foi de 1,480m, o que indica grande discrepância entre ambos, e erro normalizado quadrático de 18,96%. O gráfico 1 ilustra a comparação dos valores de carga hidráulica reais e aquelas calculadas pela simulação.

Na segunda camada, definiu-se um valor de $6,55 \times 10^{-7} \text{m/s}$, devido ao predomínio de litologias de natureza pelítica, menos permeáveis nas porções mais profundas do aquífero. Pois supõe-se que em sub-superfície predominam rochas pertencem à Formação Corumbataí.

Figura 23 – Distribuição dos valores de carga hidráulica encontrados na calibração do modelo simulado em regime permanente

Carga Hidráulica Simulada

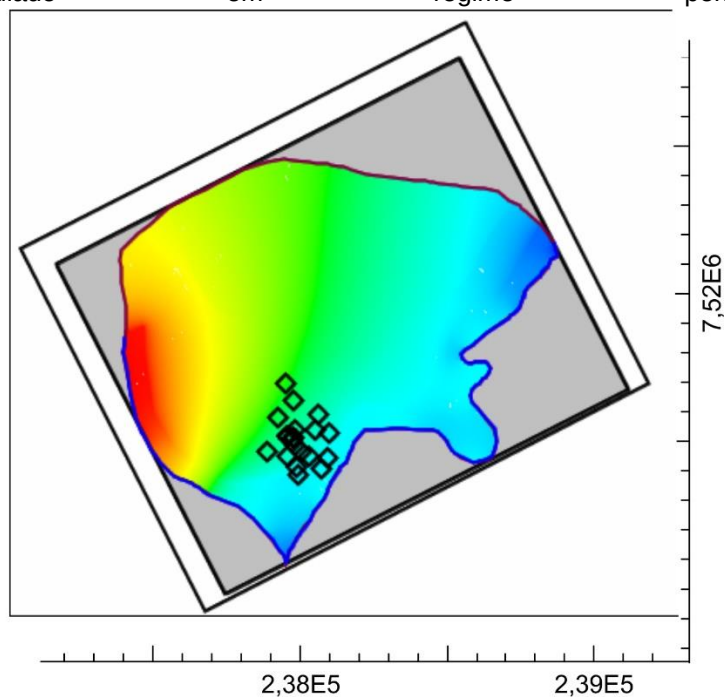
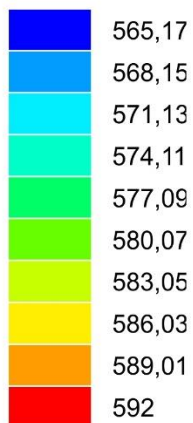
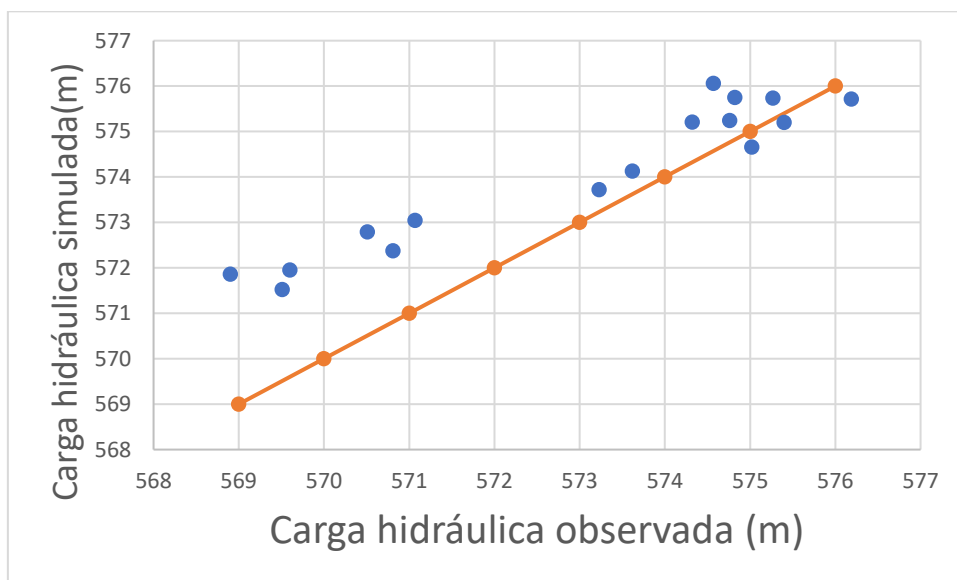


Gráfico 1 - Correlação entre os valores reais de carga hidráulica de 16 poços e aquelas calculadas pela simulação



7- Considerações Finais e Conclusão

A partir do levantamento dos dados presentes no relatório de investigação ambiental da CETESB (2008), foi confeccionado um modelo geológico conceitual, com camadas correspondentes às litologias da área. Formação Corumbataí, impermeável quando são e com pouca condutividade quando alterada, coerente com sua composição pelítica. Formação Rio Claro, com alta condutividade, devido a sua composição arenosa, assim como a cobertura aluvionar.

O modelo numérico de fluxo, por meio do método de diferenças finitas, teve resultados que permitem a validação do modelo hidrogeológico conceitual concebido, principalmente devido a integração de informações geológicas provenientes dos poços construídos pela CEMMAM (CETESB, 2008), que permitiu esboçar de maneira satisfatória a distribuição litológica de sub-superfície, principalmente na porção superior do aquífero.

Os resultados do modelo numérico em regime permanente, por mais que tenham sido considerados coerentes com o modelo geológico conceitual, não foram considerados suficientemente representativos para as condições reais, pois o coeficiente de correlação entre os valores de carga hidráulica mensuradas em campo e aquelas calculadas pela simulação são muito diferentes. Para se obter valores mais próximos seria interessante a realização de testes de sensibilidade enquanto são calibrados os parâmetros de entrada do modelo, permitindo identificar quais os parâmetros que exercem maior controle nos resultados obtidos. Isso permitiria a avaliação de quais informações devem ser detalhadas para elaboração de um modelo mais fidedigno.

8. - Bibliografia

AB'SÁBER A.N. Superfícies aplainadas do primeiro planalto do Paraná. Bol. Paran. Geografia, n. 4/5, p.116-125. 1956.

ADAM, J. A. AND BELLOMO N. A Survey of Models for Tumor-Immune System Dynamics, Birkhauser Boston, 1997.

ALBERTO, M.C. Fluxo da água subterrânea em sistema de encosta-rio, município de Paulínia: caracterização e simulação numérica. Dissertação de Mestrado, UNESP/IGCE/Rio Claro (SP),

ALMEIDA, F. F. M. Fundamentos Geológicos do relevo paulista. Bol. IGC, São Paulo, n. 41, p. 169-263, 1964

ANDERSON, M. P. & WOESSNER, W. W. Applied Groundwater Modeling: simulation of flow and advective transport. Academic Press, 381p., 2002.

ANDERSON, M. P.; WOESSNER, W. W.; HUNT, R. J. Applied Groundwater Modeling: simulation of flow and advective transport. Academic press, 564 p., 2015. 117p., 2005.

BARRETO, Carlos Eduardo AG; GOMES, Luís H.; WENDLAND, Edson. Balanço hídrico em zona de afloramento do Sistema Aquífero Guarani a partir de monitoramento hidrogeológico em bacia representativa. Águas Subterrâneas, 2010.

BEAR, J.; M. S. BELJIN; R. R. ROSS. Fundamentals of Groundwater Modeling, in EPA Groundwater Issue, EPA/540/S-92/005, 11pp., 1992.

BURDEN, Richard L.; FAIRES, J. Douglas. Numerical Analysis, PWS-Kent Pub. Co., Boston, 1993.

CETESB. Relatório de investigação detalhada e avaliação de risco toxicológico à saúde humana P.A. 0138-05 fls. 279-422, 2008

CETESB, Relatório de qualidade das águas interiores do estado de São Paulo 2004

CLEARY, R. W. Águas subterrâneas - Prince Groundwater, inc; Clean Enviromental Brasil, 1ª edição, 2007, capítulos 1, 2, 3 e 4.

DARCY, H. Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon: experience and application. Príncipes to follow and formulas to be used in question of distribution of water. Appendix D. Victor Dalmont, Imperial Corps of Bridges, Highways and Mines, Paris. Tranlation by Glenn Brown and Bruno Cateni, Oklahoma State University, Stillwater, 1856

FEITOSA, F. A. C; MANOEL FILHO, J. Coordenadores, Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações, 3ª edição, Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM, LabhidUFPE, Fortaleza, 2008.

FETTER, C. W. – Applied Hydrogeology. New York : Macmillan Publishing Company, 3º ed., 314 p., 1994.

FRANKE, O. R.; REILLY, T.E. E BENNET, G.D. Definition of Boundary and Initial Conditions in the Analysis of Saturated Ground-Water Flow Systems – An Introduction. Techniques of Water-Resources Investigations of the U.S. Geological Survey. Applications of Hydraulics, Books 3: Chapter B5, Reston, Virginia, USA, 1987.

FREEZE AND CHERRY, Groundwater - Prentice Hall Englewood Cliffs, 1979, Capítulo 2 – Propriedades e Princípios Físicos, traduzido por Gomes, R. M.; Galvão, P. e Oliveira Everton.

FULFARO, V.J.; GAMA JR, E.; SOARES, P.C. - Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná. São Paulo: PAULIPETRO, Consórcio IPT/CESP (Relatório 008/80). 1980.

GAMA JR, ERCÍLIO; BANDEIRA JR, ALFREDO N.; FRANÇA, ALMÉRIO B. DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL E TEMPORAL DAS UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS PALEOZÓICAS NA PARTE CENTRAL DA BACIA DO PARANÁ. Revista Brasileira de Geociências, v. 12, n. 4, p. 578-589, 2018.

GONÇALVES, R.D. Modelagem Numérica e Avaliação Hidrogeológica do Aquífero Rio Claro. 2016.

HVORSLEV, M. J. Time lag and soil permeability in ground water observations. Bul. Army Corps of Engineers Waterway Experimentation Station, U. S. n. 36, 1951.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA- IBGE. Folha topográfica em escala 1:50.000. Rio Claro. São Paulo: IBGE, 1975. Escala 1:50.000.

INSTITUTO DE PESQUISA TECNOLÓGICA DO ESTADO DE SÃO PAULO - IPT. Mapa Geológico do Estado de São Paulo 1:250.000. Relatório IPT, nº 28.545. 1981.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo. São Paulo, 1981b. 2 mapas Escala 1:1.000.000.

KRESIC, N. 1997. Quantitative solutions in hydrogeology and ground water modelling. CRC – Lewis Publishers, Boca Ranton – New York, 461 p.

MASSMANN, J. W.; HAGLEY, M. T. A comparison of model and parameter uncertainties in groundwater flow and solute transport predictions. Groundwater models for resources analysis and management, p. 3-24, 1995.

MELO, S.M. A Formação Rio Claro e depósitos associados: sedimentação neoceno-zóica na Depressão Periférica Paulista. São Paulo. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. 144 p., 1995

MILANI, E. J. Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu Relacionamento com a Geodinâmica Fanerozóica do Gondwana sul-ocidental. 1997. 2v. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

MILANI, E.J. Comentários sobre a origem e evolução tectônica da Bacia do Paraná. In: MANTESSO NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C.D.R.; NEVES, B.B.B. (Orgs.). Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. Editora Beca, São Paulo, p. 265-279, 2004.

MILANI, E. J.; GONÇALVES DE MELO, J.H; ALVES DE SOUZA, P.; FERNADES, L.A.; FRANÇA, A.B. Bacia do Paraná. Boletim de Geociências da PETROBRÁS, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 265- 287, 2007.

PATANKAR, S. V. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow – Series in computational methods in mechanics and thermal sciences. New Jersey: Printice Hall. 243 p. , 1980

PENTEADO, M. M. Geomorfologia do setor centro-ocidental da Depressão Periférica Paulista. Universidade de S. Paulo, Instituto de Geografia, 1976.

PERINOTTO, J. A. J.; ZAINE, J.E. Coluna Estratigráfica da Bacia do Paraná na região de Rio Claro, com base em Soares & Landim (1975). 2008. Não publicado

PUPIM, F. N. 2010. Aspectos Fisiográficos do Município de Rio Claro-SP. Tese (Mestrado) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista (UNESP). Rio Claro, 2010. 121p.

REILLY, Thomas E.; FRANKE, Lehn; BENNETT, Gordon D. Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey. 1987.

RELATÓRIO INSTITUCIONAL DAS BACIAS PCJ, 2018. Disponível em <http://www.agencia.baciaspcj.org.br/docs/relatorios/relat-inst-agencia-2018.pdf>

ROVERI, Carolina Del. Petrologia aplicada da formação Corumbataí (região de Rio Claro-SP) e produtos cerâmicos. 2010.

SCHNEIDER, R. L.; MUHLMANN, H.; TOMMASI, E.; MEDEIROS, R. A.; DAEMON, R. F.; NOGUEIRA, A. A. Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná. Anais do XXVIII Congresso Brasileiro de Geologia, 1974.

SELIM, A. Aquifers Properties: Specific Yield and Specific Retention, August, 2011, Egypt.

SIQUEIRA, L. F. S., Tectônica Deformadora em Sinéclises Intracratônicas: a Origem do Alto Estrutural de Pitanga, Bacia do Paraná, SP. 2011. Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, São Paulo.

Sistema de Informações para o Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo – acesso online (Novembro, 2019): <http://www.sigrh.sp.gov.br>.

SPITZ, K.; MORENO, J. A Practical Guide to Groundwater and Solute Transport Modeling. John Wiley & Sons, New York, 461 p., 1996.

SANFORD, Robert M.; LANGE, Frederico W. Basin-study approach to oil evaluation of Paraná miogeosyncline, south Brazil. AAPG Bulletin, v. 44, n. 8, p. 1316-1370, 1960.

TERAMOTO, E. H. Simulação Numérica De Fluxo Como Subsídio ao Entendimento da Dinâmica Hidrogeológica em Área Localizada No Município de Paulínia (SP). (Trabalho de Formatura). Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro (SP). 46 p., 2004.

TERAMOTO, E. H. Caracterização hidrogeológica e simulação numérica de fluxo em uma região situada no Distrito Industrial de Paulínia (SP). (Tese de Mestrado), Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro (SP). 95 p., 2007.

WANG, H. F. and ANDERSON, M. P. Groundwater modelling with finite difference and finite element methods. Elsevier Publishing, Amsterdam, 1-137. 1982

WENDLAND, E; RUBER, O. Hydrogeologic Modelle, Lehrstuhl fur Angewandte Hydrogeologie, Ruhr, Universitat Bochum, 1998.

YEH, T.-C.J. e MOCK, P.A. A Structured Approach for Calibrating Steady-State Ground- Water Flow Models. Ground Water, 34 (3): 444-450, 1996

ZAINE, J. E. Geologia da Formação Rio Claro na Folha de Rio Claro (SP). 1994. 90 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro. 1994.

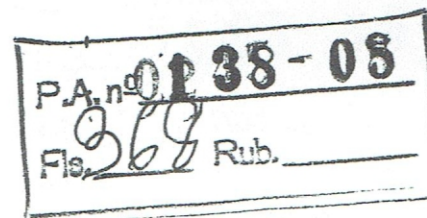
ZAINE, J. E. Mapeamento Geológico-Geotécnico Por Meio Do Método Do Detalhamento Progressivo: Ensaio De Aplicação Na Área Urbana Do Município De Rio Claro (SP). (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro (SP), 149 p., 2000.

ZAINE, M. F.; PERINOTTO, J. A. J. Patrimônios naturais e história geológica da região de Rio Claro, SP. Rio Claro: Arquivo público e histórico da Câmara Municipal de Rio Claro, 1996.

ZALÁN, P. V., WOLFF, S. J. C. J., CONCEIÇÃO, J. D. J., MARQUES, A., ASTOLFI, M. A. M., VIEIRA, I. S., & ZANOTTO, O. A. Bacia do Paraná. Origem e evolução das baciassedimentares, 135-168, 1990.

ZHENG, C., & G.D. BENNETT, 1995, Applied Contaminant Transport Modeling: Theory and Practice, Van Nostrand Reinhold (now John Wiley & Sons), New York, 440 pp.

Anexo 1 – Perfis litológico construtivos das sondagens 2008



<u>BOLETIM DIÁRIO DE SONDAGEM</u>		EQUIPE	Valdick/ Luiz Fabiano/ José Roberto
CLIENTE	PREMA	EQUIPAMENTO	Trado Mecanizado
END.	Horto Florestal Navarro de Andrade, s/no.	PERFURAÇÃO	Trado Mecanizado 6"
CIDADE	Rio Claro/SP	DISTÂNCIA	

FURO:	PM-08	Concreto/Asfalto de:	à	..	Energia no local:	220v	Distância:	20m
-------	-------	----------------------	---	----	-------------------	------	------------	-----

[illegible]

De (m)	Até (m)	Material utilizado	Qtde.
0,0	7,5	Revestimento Geomecânico de 2"	-----
7,5	10,5	Filtro Geomecânico de 2"	-----

Amostras d'água		sim	-----	Nível da Fase Livre	-----	09/2008
	X	Não		Nível d'água	8,44	
Quantidade				Espessura F. Livre	-----	

	Entupimento do furo com cimento	De (m)	Até (m)	Material utilizado
	Tampa proteção	0,0	0,2	Calda de cimento
X	Caps superior PVC 2"	0,2	7,0	Selo de Bentonita
	Tampa de calçada	7,0	10,5	Pré-Filtro, gran. 1,0 à 2,0mm
	Laje de proteção	----	----	-----
X	Câmara calçada	----	----	-----

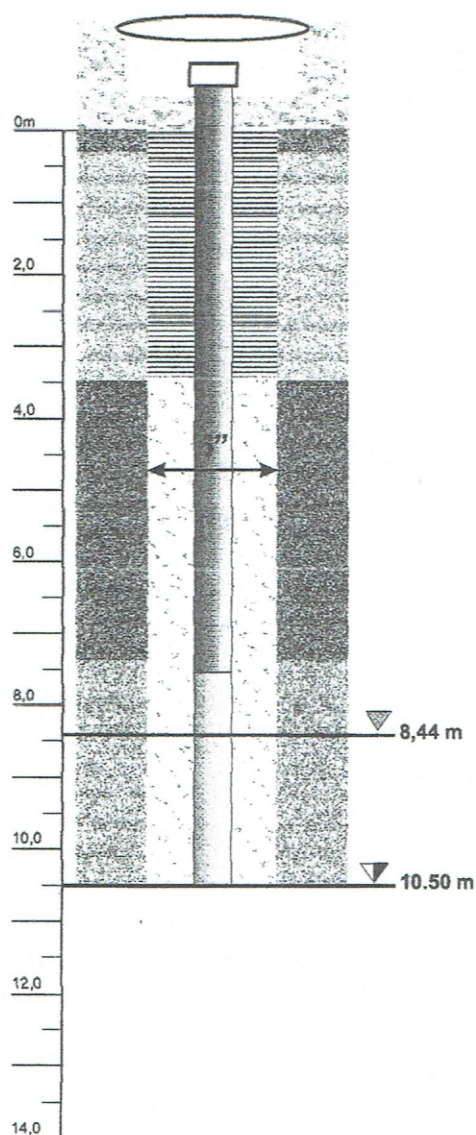
EQUIPAM.	Válvula de pé
TUB. INJETORA	5/8"
TUB. EDUTORA	5/8"
VOL. BOMBEADO	50 L
TEMPO DURAÇ	30 min

SONDAGEM

CLIENTE	PREMA
MUNICÍPIO	RIO CLARO / SP

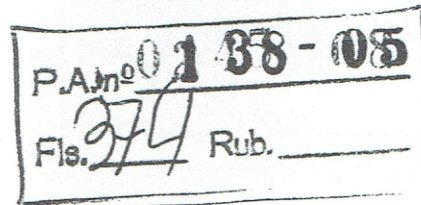
INÍCIO	NOV/2008
CONCLUSÃO	NOV/2008

FURO Nº	PM-08
---------	-------



	Selo de Bentonita (Compactolit)
	Selo Sanitário-Laje de Proteção-Cimentação
	Câmara de Calçada
	Cap de pressão 2"
	Pré-filtro Pérola 1,5 - 3,0 mm
	Tubo PVC 2" Geomecânico
	Filtro PVC Geomecânico 2" rosca e luva ab. 0,75 mm (fundo fechado)
	Nível d'água
	Nível da Fase Livre
	Profundidade final da sondagem
	Nível da amostra do solo

	Solo arenoso fino-médio, cor marrom escuro com raízes e matéria orgânica
	Solo argiloso com areia fina, cor marrom avermelhada, pouco plástico
	Solo argiloso com areia fina, compacto, cor marrom amarelado
	Solo argiloso fino, cor marrom escuro, plástico



<u>BOLETIM DIÁRIO DE SONDAGEM</u>		EQUIPE	Valdick/ Luiz Fabiano/ José Roberto
CLIENTE	PREMA	EQUIPAMENTO	Trado Mecanizado
END.	Horto Florestal Navarro de Andrade s/no.	PERFURAÇÃO	Trado Mecanizado 6"
CIDADE	Rio Claro/SP	DISTÂNCIA	

PERFURAÇÃO

REVESTIMENTO

Amostras d'água		sim	-----	Nível da Fase Livre	-----	09/2008
	X	Não		Nível d'água	0,57	
Quantidade				Espessura F. Livre	-----	

DESENVOLVIMENTO

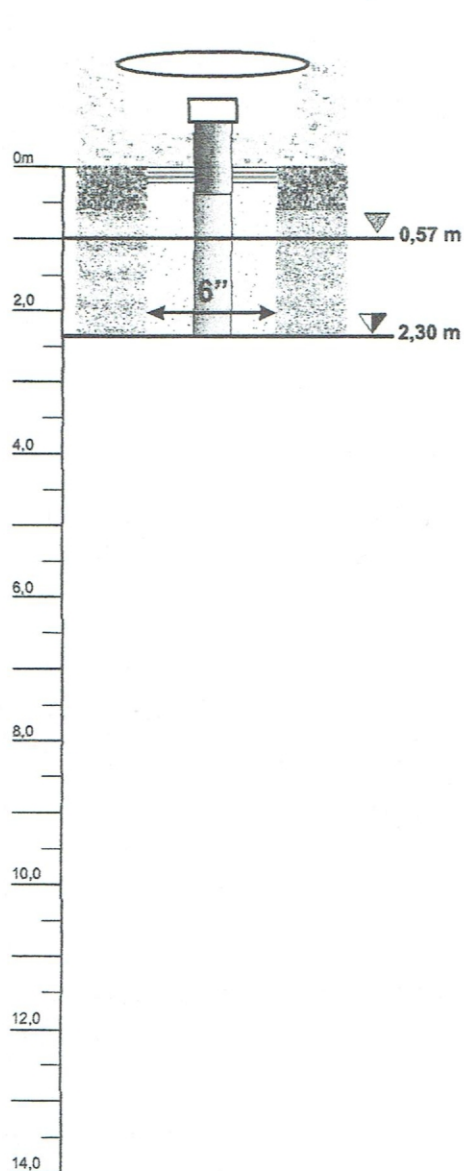
OBSERVAÇÕES:

SONDAGEM

CLIENTE	PREMA
MUNICÍPIO	RIO CLARO / SP

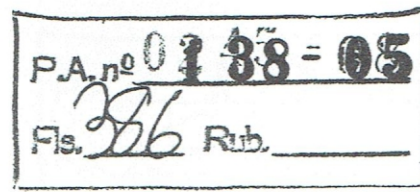
INÍCIO	NOV/2008
CONCLUSÃO	NOV/2008

FURO Nº	PM-11
---------	-------



	Selo de Bentonita (Compactolit)
	Selo Sanitário-Laje de Proteção-Cimentação
	Câmara de Calçada
	Cap de pressão 2"
	Pré-filtro Pérola 1,5 - 3,0 mm
	Tubo PVC 2" Geomecânico
	Filtro PVC Geomecânico 2" rosca e luva ab. 0,75 mm (fundo fechado)
	Nível d'água
	Nível da Fase Livre
	Profundidade final da sondagem
	Nível da amostra do solo

	Solo arenoso fino-médio, cor marrom escuro com raízes e matéria orgânica
	Solo argiloso com areia fina, pouco argiloso, cor cinza



<u>BOLETIM DIÁRIO DE SONDAGEM</u>		EQUIPE	Valdick/ Luiz Fabiano/ José Roberto
CLIENTE	PREMA	EQUIPAMENTO	Trado Mecanizado
END.	Horto Florestal Navarro de Andrade s/no.	PERFURAÇÃO	Trado Mecanizado 6"
CIDADE	Rio Claro/SP	DISTÂNCIA	

[illegible]

De (m)	Até (m)	Material utilizado	Qtde.
0,0	4,3	Revestimento Geomecânico de 2"	-----
4,3	7,3	Filtro Geomecânico de 2"	-----

Amostras d'água		sim	-----	Nível da Fase Livre	-----	09/2008
	X	Não		Nível d'água	5,15	
Quantidade				Espessura F. Livre	-----	

DESENVOLVIMENTO

	Entupimento do furo com cimento	De (m)	Até (m)	Material utilizado	EQUIPAM.	Válvula de pé
	Tampa proteção	0,0	0,2	Calda de cimento	TUB. INJETORA	5/8"
X	Caps superior PVC 2"	0,2	3,8	Selo de Bentonita	TUB. EDUTORA	5/8"
	Tampa de calçada	3,8	7,3	Pré-Filtro, gran. 1,0 à 2,0mm	VOL. BOMBEADO	50 L
	Laje de proteção	---	---	-----	TEMPO DURAÇ	30 min
X	Câmara calçada	---	---	-----		

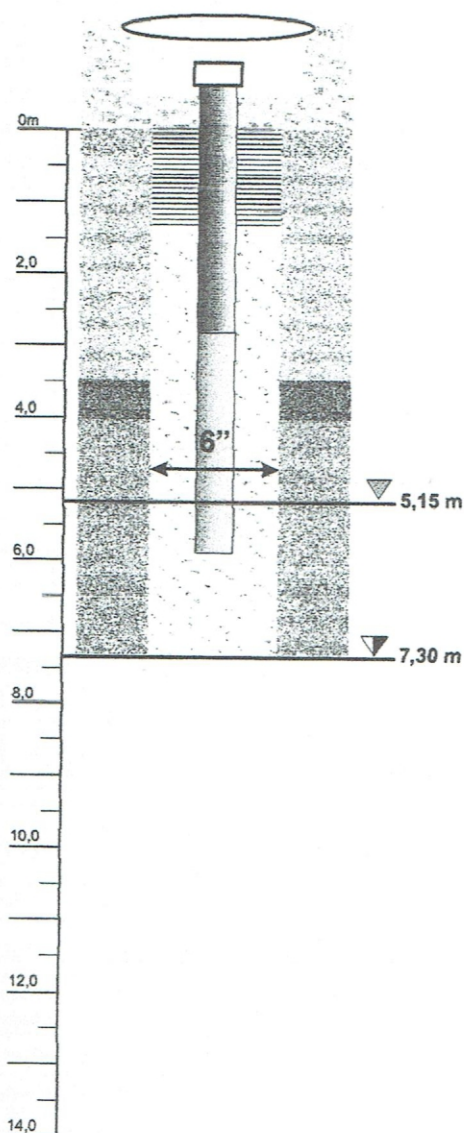
OBSERVATIONS:

SONDAGEM

CLIENTE	PREMA
MUNICÍPIO	RIO CLARO / SP

INÍCIO	NOV/2008
CONCLUSÃO	NOV/2008

FURO Nº	PM-17
---------	-------



	Selo de Bentonita (Compactolit)
	Selo Sanitário-Laje de Proteção-Cimentação
	Câmara de Calçada
	Cap de pressão 2"
	Pré-filtro Pérola 1,5 - 3,0 mm
	Tubo PVC 2\" Geomecânico
	Filtro PVC Geomecânico 2\" rosca e luva ab. 0,75 mm (fundo fechado)
	Nível d'água
	Nível da Fase Livre
	Profundidade final da sondagem
	Nível da amostra do solo

	Solo arenoso fino, pouco argiloso, presença de matéria orgânica, cor marrom escuro
	Solo argiloso, pouco arenoso, cor marrom escuro
	Solo argiloso, pouco arenoso, cor marrom, compacto
	Solo arenoso fino, pouco argiloso, cor marrom compacto
	Solo arenoso fino, plástico, cor creme