

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**DELIMITAÇÃO DE PERÍMETROS DE PROTEÇÃO  
DOS POÇOS TUBULARES (PPP) EMPREGANDO A  
TÉCNICA DE MODELAGEM NUMÉRICA  
TRIDIMENSIONAL**

**Mário de Brito Marcelino**

**Orientador: Prof. Dr. Uriel Duarte**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia**

**SÃO PAULO  
1999**

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**DELIMITAÇÃO DE PERÍMETROS DE PROTEÇÃO  
DOS POÇOS TUBULARES (PPP) EMPREGANDO A  
TÉCNICA DE MODELAGEM NUMÉRICA  
TRIDIMENSIONAL**

*MÁRIO DE BRITO MARCELINO*

Orientador: Prof. Dr. Uriel Duarte

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

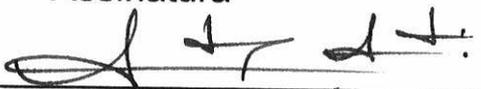
COMISSÃO JULGADORA



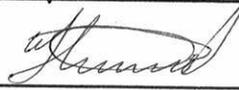
Nome

Assinatura

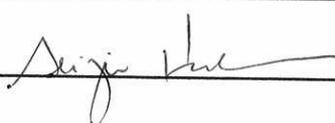
Presidente: Prof. Dr. Uriel Duarte



Examinadores: Dr. Hélio Nóbile Diniz



Dr. Seiju Hassuda



SÃO PAULO  
1999

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

DEDALUS - Acervo - IGC



30900005173

**DELIMITAÇÃO DE PERÍMETROS DE PROTEÇÃO DOS  
POÇOS TUBULARES (PPP) EMPREGANDO A  
TÉCNICA DE MODELAGEM NUMÉRICA  
TRIDIMENSIONAL**

**Mário de Brito Marcelino**

**Orientador: Prof. Dr. Uriel Duarte**



**Dissertação de Mestrado**

**Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia**

**São Paulo  
1999**

À minha esposa Christiane e minha filha Giovanna.

## **AGRADECIMENTOS**

Registro meus agradecimentos a todos aqueles que colaboraram direta ou indiretamente para realização deste trabalho, e, principalmente àqueles que acreditaram que iria terminá-lo.

Saliento meus especiais agradecimentos à:

- Professor Dr. Uriel Duarte, pela orientação deste trabalho;
- meus amigos, André Rebouças, Lídia Senf, Rinaldo Marques e Sérgio Ogihara, pelo apoio e incentivo à esta dissertação;
- Professores Dr. Aldo Rebouças e Nelson Ellert pela discussões técnicas e críticas;
- Instituto de Geociências da USP e o Centro de pesquisa de Água Subterrâneas – CEPAS, pelo apoio técnico;
- Nilson Guiguer pela atenção dispensada e esclarecimentos técnicos sobre modelos matemáticos;
- Hidro Ambiente e todos àqueles que trabalham ou trabalharam na empresa, pelo apoio ao desenvolvimento deste trabalho;
- Serginho, técnico do CEPAS, pelo ajuda no trabalho final de campo;
- Benedito Ubiratã da Silva, pelo auxílio na verificação da profundidade da Raia Olímpica;
- Márcia Maria Marche dos Santos pela correção e edição final das figuras.

## **RESUMO**

O Campus USP "Armando Salles de Oliveira" possui 6 poços tubulares com potencial de suprir parte de sua demanda de água potável. Visando estabelecer os Perímetros de Proteção dos Poços (PPP) que exploram o aquífero sedimentar, foi efetuada uma modelagem numérica tridimensional do sistema aquífero sedimentar da área.

A área modelada é constituída por 4 unidades aquíferas: sedimentar superior e inferior, manto de alteração e cristalino; com fluxos subterrâneos predominantes de sudoeste para nordeste. A área é limitada a nordeste pelo Rio Pinheiros, a leste e sudeste pelo Córrego Pirajussara, a norte e noroeste pelo Córrego Jaguaré, e sul e sudoeste por um divisor de águas. Dos 6 poços tubulares existentes na área, 4 estão localizados no sistema aquífero sedimentar e 2 no cristalino.

O modelo foi calibrado e validado para um período de 10 anos, e, através da técnica de traçado de partículas, foi estabelecido o Perímetro de Alerta Contra Poluição (PAP), correspondente a 50 dias de trânsito de partículas na zona saturada; Perímetro de Prevenção (PP), correspondente a 150 dias de trânsito e o Perímetro de Contribuição (PC), correspondente a zona de captura do referido poço em regime de equilíbrio.

Foi avaliada a dinâmica de possíveis poluentes no sistema aquífero com e sem a influência do bombeamento dos poços, e definidas medidas de proteção e controle dos recursos hídricos subterrâneos.

## **ABSTRACT**

The 6 deep wells existing at the Campus " Armando Salles of Oliveira " of the University of São Paulo presents a potential yield of supplying part of its drinkable water demand. Four (4) of these deep wells were constructed at a sedimentary area, and two (2) deep wells at a crystalline context. Seeking to establish the Well Protection Perimeters of the deep wells of the sedimentary context, a three-dimensional numeric modelling of the sedimentary aquifer of the area was made.

The modelled area is constituted of 4 aquifer units: two sedimentary units (superior and inferior), weathered layer and crystalline rocks. These present a predominant underground flow from the Southwest to the Northeast. The area is limited at the Northeast part by Pinheiros River, at the East and Southeast by the Pirajussara Creek, the North and Northwest by the Jaguaré Creek and the South and Southwest by a topographic height.

The model was calibrated and validated for a 10 years period. Using the particles path method:

*a)*-an Alert Against Pollution Perimeter (PAP) was established , corresponding to a 50 days period of particles transit at the saturated zone (according to the São Paulo State Groundwater Protection Law);

*b)*- a Prevention Perimeter (PP), corresponding to a 150 days period of particles transit at the saturated zone and:

*c)*- a Contribution Perimeter (PC), corresponding to the capture zone of the referred well considering an equilibrium regime.

The dynamics of the probable pollutants in aquifer system was evaluated, considering both, with or without the influence of pumping. Protection measures and control of the groundwater resources were defined.

## SUMÁRIO

<b><u>AGRADECIMENTOS</u></b>	ii
<b><u>RESUMO</u></b>	iii
<b><u>ABSTRACT</u></b>	iv
<b><u>1. INTRODUÇÃO</u></b>	1
1.1. OBJETIVO	2
1.2. LOCALIZAÇÃO	2
1.3. TRABALHOS HIDROGEOLÓGICOS ANTERIORES NO CAMPUS	3
<b><u>2. POLUIÇÃO E CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS</u></b>	5
2.1. VULNERABILIDADE DO AQUÍFERO ÀS FONTES SUPERFICIAIS POTENCIAIS POLUENTES	5
2.2. FONTES POTENCIAIS DE POLUIÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NA ÁREA DA CIDADE UNIVERSITÁRIA	9
2.2.1. Fontes potenciais pontuais de poluição das águas subterrâneas	9
2.2.1.1. <i>Rejeitos radiativos</i>	9
2.2.1.2. <i>Tanques de estocagem de combustível</i>	9
2.2.1.3. <i>Transporte de produtos perigosos</i>	10
2.2.2. Fontes potenciais difusas de poluição das águas subterrâneas	11
2.2.2.1. <i>Rede de efluentes domésticos</i>	11
2.2.2.2. <i>Garagem de veículos</i>	11
2.2.2.3. <i>Rios e córregos</i>	12
<b><u>3. DELIMITAÇÃO DE PERÍMETROS DE PROTEÇÃO DOS POÇOS TUBULARES (PPP)</u></b>	14
3.1. SUBSÍDIO LEGAL	14

3.1.1. Nacional	14
3.1.2. Internacional	16
3.2. MÉTODOS EXISTENTES DE DELIMITAÇÃO DOS PPP	20
3.3. INCERTEZAS NA DELIMITAÇÃO DOS PPP	28
3.4. ESCOLHA DO MÉTODO DE DELIMITAÇÃO DOS PPP	34
<b>4. <u>ASPECTOS FÍSICOS DO CAMPUS USP</u></b>	
<b><u>“ARMANDO SALLES DE OLIVEIRA”</u></b>	35
4.1. CONTEXTO FISIAGRÁFICO	35
4.2. CONTEXTO GEOLÓGICO	35
4.3. CONTEXTO HIDROGEOLÓGICO	37
4.3.1. Aquífero cristalino	37
4.3.2. Aquífero sedimentar	39
4.3.3. Geometria do pacote sedimentar	40
4.3.4. Hidrogeoquímica	46
4.2.5. Recarga e evapotranspiração	47
<b>5. <u>MODELAGEM MATEMÁTICA</u></b>	50
5.1. INTRODUÇÃO À MODELAGEM MATEMÁTICA	50
5.1.1. Conhecimento do problema	52
5.1.1.1. <i>Definição do problema/objetivo</i>	52
5.1.1.2. <i>Detalhamento hidrogeológico</i>	52
5.1.2. Escolha do modelo matemático	54
5.1.2.1. <i>Modelo conceitual</i>	54
5.1.2.2. <i>Escolha do modelo</i>	56
5.1.3. Calibração e Validação	60
5.1.3.1. <i>Calibração</i>	60
5.1.3.2. <i>Validação</i>	60
5.1.4. Análise de Sensibilidade	61
5.2. MODELO CONCEITUAL DA ÁREA	61
5.3. MODELO ADOTADO – VISUAL MODFLOW®	64
5.3.1 Base teórica	65

<b>5.3.1.1. MODFLOW</b>	<b>65</b>
<b>5.3.1.2. MODPATH</b>	<b>67</b>
<b>5.4. ENTRADA DE DADOS</b>	<b>70</b>
<b>5.4.1 Malha ou grid</b>	<b>70</b>
<b>5.4.2. Unidades hidrogeológicas</b>	<b>70</b>
<b>5.4.3. Condições de contorno</b>	<b>72</b>
<b>5.4.3.1. Carga constante</b>	<b>73</b>
<b>5.4.3.2. Rios e lagos</b>	<b>74</b>
<b>5.4.3.3. Dreno</b>	<b>78</b>
<b>5.4.3.4. Carga hidráulica genérica "GHB"</b>	<b>81</b>
<b>5.4.3.5. Recarga e evapotranspiração</b>	<b>84</b>
<b>5.4.4. Poços de bombeamento</b>	<b>86</b>
<b>5.4.5. Traçado de partícula</b>	<b>90</b>
<b>5.4.6. Condição inicial e solução numérica</b>	<b>90</b>
<b>5.5. CALIBRAÇÃO</b>	<b>91</b>
<b>5.5.1. Critério de calibração qualitativo</b>	<b>92</b>
<b>5.5.2. Critério de calibração quantitativo</b>	<b>93</b>
<b>5.6. VALIDAÇÃO</b>	<b>96</b>
<b>5.7. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE</b>	<b>97</b>
<b>5.8. RESULTADOS</b>	<b>99</b>
<b>5.8.1. Perímetros de proteção dos poços – PPP</b>	<b>102</b>
<b>5.8.1.1 Perímetro imediato de proteção sanitária (PIPS)</b>	<b>104</b>
<b>5.8.1.2 Perímetro de alerta contra poluição (PAP)</b>	<b>106</b>
<b>5.8.1.3 Perímetro de prevenção (PP)</b>	<b>106</b>
<b>5.8.1.4 Perímetro de contribuição (PC)</b>	<b>107</b>
<b>5.8.2. Traçado de partículas provenientes das fontes potenciais de poluição</b>	<b>108</b>
<b>5.8.3. Medidas de proteção e controle dos recursos hídricos subterrâneos</b>	<b>111</b>
<b><u>6. CONCLUSÕES</u></b>	<b>115</b>

**7. BIBLIOGRAFIA** 117**TABELAS**

<b>Tabela 1 - Resumo dos PPP em vários países europeus</b>	<b>17</b>
<b>Tabela 2 - Vantagens e desvantagens dos métodos de delimitação de PPP</b>	<b>22</b>
<b>Tabela 3 - Alguns fatores que influenciam na sensibilidade e confiabilidade dos métodos de delimitação dos PPP</b>	<b>30</b>
<b>Tabela 4 - Valores de porosidade específica para o aquífero sedimentar</b>	<b>39</b>
<b>Tabela 5 - Sondagens elétricas verticais executadas na área</b>	<b>41</b>
<b>Tabela 6 - Principais características dos poços cadastrados</b>	<b>44</b>
<b>Tabela 7 - Balanço hídrico anual (mm/ano) da região das Sub-bacias de Sumaré e Pompéia, Município de São Paulo/SP</b>	<b>48</b>
<b>Tabela 8 - Comparação da abordagem numérica por diferenças finitas e por elementos finitos</b>	<b>58</b>
<b>Tabela 9 - Exemplos de Critérios de Calibração</b>	<b>61</b>
<b>Tabela 10 – Unidades hidrogeológicas consideradas – parâmetros hidráulicos adotados</b>	<b>71</b>
<b>Tabela 11 – Parâmetros de carga constante, rios e drenos adotados no modelo</b>	<b>75</b>
<b>Tabela 12 – Parâmetros de carga genérica, recarga e evapotranspiração adotados no modelo</b>	<b>83</b>
<b>Tabela 13 – Vazões dos poços tubulares considerados no modelo</b>	<b>88</b>
<b>Tabela 14 – Principais características das soluções numéricas contida no aplicativo VISUAL MODFLOW®</b>	<b>91</b>
<b>Tabela 15 – Cargas utilizadas na calibração e os resíduos verificados no modelo</b>	<b>94</b>
<b>Tabela 16 – Resíduos verificados no modelo calibrado</b>	<b>95</b>
<b>Tabela 17 – Balanço hídrico final apresentado pelo modelo</b>	<b>96</b>
<b>Tabela 18 – Cargas utilizadas na validação do modelo</b>	<b>97</b>

<b>Tabela 19 – Análise de sensibilidade. Influência do aumento em 50% de alguns parâmetros do modelo no resíduo final normalizado das cargas</b>	<b>98</b>
<b>Tabela 20 – Contribuição dos parâmetros de contorno ao sistema hídrico subterrâneo modelado</b>	<b>101</b>
<b>Tabela 21 – Balanço hídrico final apresentado pelo modelo com influência dos bombeamentos dos poços (BH2) e a diferença em relação à área sem os poços operando (BH1)</b>	<b>104</b>

## **QUADROS**

<b>Quadro 1 – Sistema de classificação da vulnerabilidade natural dos sistemas aquíferos</b>	<b>8</b>
<b>Quadro 2 - Características do comportamento hidrogeológico</b>	<b>29</b>

## **GRÁFICOS**

<b>Gráfico 1 - Média plurianual das precipitações na Cidade Universitária no período de Set/73 a Fev/93, Estação E3-251</b>	<b>49</b>
<b>Gráfico 2 - Variação da condutância em função da espessura do sedimento de fundo nas células rio representativas da Raia Olímpica</b>	<b>77</b>
<b>Gráfico 3 - Variação da condutância em função da espessura do sedimento de fundo nas células rio representativas do Rio Pirajussara</b>	<b>77</b>
<b>Gráfico 4 - Variação da condutância em função da espessura do sedimento de fundo nas células rio representativas do Rio Jaguaré</b>	<b>77</b>
<b>Gráfico 5 - Variação da condutância em função da espessura do sedimento de fundo nas células dreno representativas do dreno da Politécnica em seu trecho mais largo (4,5m)</b>	<b>80</b>

<b>Gráfico 6 - Variação da condutância em função da espessura do sedimento de fundo nas células dreno representativas dos drenos da Politécnica, Av. da Universidade e da Av. Corifeu de Azevedo Marques</b>	<b>81</b>
<b>FIGURAS</b>	
<b>Figura 1 - Mapa de localização do Campus-USP</b>	<b>2</b>
<b>Figura 2 - Mapa de localização das fontes potenciais de poluição das águas subterrâneas</b>	<b>13</b>
<b>Figura 3 - Relação entre as zonas de proteção em aquífero não-confinado em meio poroso</b>	<b>19</b>
<b>Figura 4 - Zonas de proteção de poços determinadas para tempo de trânsito de 10 anos</b>	<b>31</b>
<b>Figura 5 - Zonas de proteção de poços determinadas para tempo de trânsito de 25 anos</b>	<b>32</b>
<b>Figura 6 - Mapa geológico da região da Cidade Universitária</b>	<b>38</b>
<b>Figura 7 - Mapa de localização dos poços cadastrados e sondagens elétricas</b>	<b>42</b>
<b>Figura 8 - Blocodiagrama da distribuição espacial dos litotipos</b>	<b>43</b>
<b>Figura 9 - Mapa de isolinhas de espessura de sedimentos</b>	<b>45</b>
<b>Figura 10 - Compartimentação hidráulica da Cidade Universitária</b>	<b>49</b>
<b>Figura 11 - Sugestão de etapas a serem seguidas para a elaboração de um modelo hidrogeológico matemático</b>	<b>53</b>
<b>Figura 12 - Processo de elaboração de um modelo hidrogeológico conceitual</b>	<b>54</b>
<b>Figura 13 - Exemplos de condições de contorno</b>	<b>57</b>
<b>Figura 14 - Considerações das dimensões do aquífero a ser modelado na escolha do modelo matemático</b>	<b>59</b>
<b>Figura 15 - Modelo conceitual da área de estudo</b>	<b>63</b>
<b>Figura 16 - Representação dos componentes do VISUAL MODFLOW®</b>	<b>64</b>

<b>Figura 17 – Volume elementar representativo (VER) utilizado para obtenção da equação transiente de fluxo com o componente "Y" representado</b>	<b>66</b>
<b>Figura 18 – Diagrama esquemático de malha de um modelo tridimensional</b>	<b>68</b>
<b>Figura 19 – Relação entre os sistemas de coordenadas da diferenças finitas e do sistema de fluxo</b>	<b>68</b>
<b>Figura 20 – Condições de contorno admitidas pelo VISUAL MODFLOW®</b>	<b>72</b>
<b>Figura 21 – Representação das condições de contorno na malha</b>	<b>73</b>
<b>Figura 22 – Representação esquemática da célula de rio</b>	<b>76</b>
<b>Figura 23 – Ilustração de dreno fechado (a) e aberto (b)</b>	<b>79</b>
<b>Figura 24 - Nomenclatura dos drenos considerados no modelo</b>	<b>80</b>
<b>Figura 25 – Representação de uma carga hidráulica genérica "GHB"</b>	<b>82</b>
<b>Figura 26 – Representação de uma bacia hidrográfica "espelho" simulada pela carga GHB na área de estudo</b>	<b>83</b>
<b>Figura 27 – Representação das condições das recargas admitidas pelo MODFLOW®</b>	<b>85</b>
<b>Figura 28 – Representação da evapotranspiração no MODFLOW®</b>	<b>86</b>
<b>Figura 29 – Representação de um poço codificado pelo VISUAL MODFLOW®</b>	<b>87</b>
<b>Figura 30 – Perfil construtivo dos poços tubulares inseridos no modelo</b>	<b>89</b>
<b>Figura 31 – Influência da cargas constantes na superfície potenciométrica – Critério de calibração qualitativo</b>	<b>92</b>

<b>Figura 32 – Gráfico de correlação das cargas calculadas e as observadas – Calibração quantitativa</b>	<b>95</b>
<b>Figura 33 – Mapa potenciométrico sem o bombeamento dos poços no aquífero sedimentar</b>	<b>100</b>
<b>Figura 34 – Mapa potenciométrico com o bombeamento dos poços no aquífero sedimentar</b>	<b>103</b>
<b>Figura 35 – Perímetro de proteção dos poços tubulares que exploram o aquífero sedimentar</b>	<b>105</b>
<b>Figura 36 – Prognóstico de deslocamento de contaminantes sem o bombeamento dos poços tubulares</b>	<b>109</b>
<b>Figura 37 – Prognóstico de deslocamento de contaminantes com o bombeamento dos poços tubulares</b>	<b>110</b>
<b>Figura 38—Captura de partículas em pelo poço produtor PP-1</b>	<b>112</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A exploração das águas subterrâneas na região da Grande São Paulo remonta ao início do século, já tendo sido destacada em 1898 a possibilidade de sua exploração (LEINZ, 1955). Atualmente existem cadastrados cerca de 7.000 poços tubulares na Região Metropolitana de São Paulo - RMSP, extraindo 203 milhões de m<sup>3</sup>/ano de água subterrânea, apenas 25% das disponibilidades avaliadas para a região (CEPAS, 1994).

Estudos anteriores na área identificaram o potencial hidrogeológico do Campus da Cidade Universitária, o qual poderia suprir parcialmente seu consumo através da exploração das águas subterrâneas locais, com reserva permanente e reguladora da ordem de 11 milhões de m<sup>3</sup> e 900 mil m<sup>3</sup>/ano de água, respectivamente (CEPAS, 1988a e 1988b). Atualmente existem 06 poços tubulares no Campus - USP, com potencial de produção de cerca de 100m<sup>3</sup>/h, podendo atender 30% da demanda do Campus.

A diminuição da disponibilidade, aliada à degradação da qualidade da água, em decorrência da urbanização acelerada e de processos industriais e agrícolas na Região Metropolitana de São Paulo - RMSP, é fator determinante para a promoção do gerenciamento integrado e harmônico dos recursos hídricos subterrâneos.

Deve-se salientar que, após um aquífero ser contaminado, sua total descontaminação é tecnicamente difícil e economicamente inviável. Se realizada, o é apenas a um nível aceitável pela legislação existente.

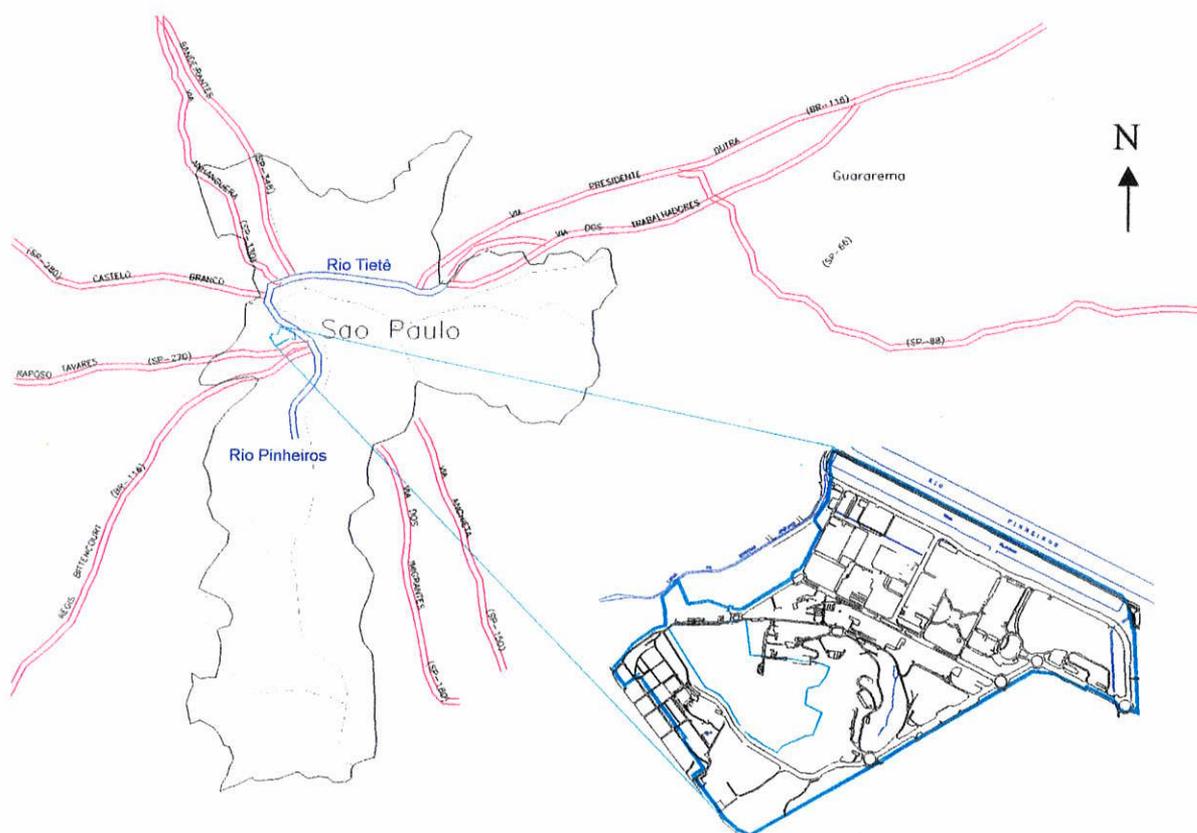
Assim, é mister um programa de proteção da qualidade dos recursos hídricos subterrâneos. Uma análise dos programas de proteção das águas subterrâneas de vários países realizada por HIRATA (1994), indica duas linhas de conduta: uma voltada ao poço através do estabelecimento de perímetros de proteção, e outra voltada ao aquífero, estabelecendo um gerenciamento do uso do solo frente à vulnerabilidade do aquífero e à importância relativa deste recurso.

## 1.1. OBJETIVO

Os trabalhos em apreço objetivam definir os perímetros de proteção dos poços tubulares profundos existentes na Cidade Universitária da USP em São Paulo/SP, Campus "Armando Salles de Oliveira", que exploram o sistema aquífero sedimentar local. Secundariamente, visa verificar uma possível inversão dos fluxos subterrâneos consequência da operação dos poços, que poderiam induzir uma recarga proveniente do Rio Pinheiros ou dos Córregos Jaguaré ou Pirajussara, degradando a qualidade das águas subterrâneas e estabelecer um plano de monitoramento dos recursos hídricos subterrâneos da área.

## 1.2. LOCALIZAÇÃO

O Campus USP "Armando Salles de Oliveira" localiza-se na região oeste do município de São Paulo, conforme apresentado na **Figura 1**.



**Figura 1 - Mapa de localização do Campus**

### 1.3. TRABALHOS HIDROGEOLÓGICOS ANTERIORES NO CAMPUS

O Campus USP "Armando Salles de Oliveira" tem servido para o desenvolvimento de dissertações de mestrado, treinamentos específicos em recursos hídricos às turmas de graduação e pós-graduação do Instituto de Geociências da USP.

Em 1983, AOKI verificou, através de técnicas de traçadores radioativos no solo superficial, que os fluxos subterrâneos na área do campo de provas do IPT possuíam direção norte, sentido à Av. Jaguaré.

Na Estação Experimental, instalada no Campus para estudo da evolução hidrogeoquímica da recarga do aquífero sedimentar local, foi determinado através de permeâmetros a condutividade hidráulica da ordem de  $3,7 \times 10^{-5}$  m/s nas camadas mais arenosas e  $8,4 \times 10^{-8}$  m/s nas mais argilosas,  $10^{-6}$  m/s em média para os 4 primeiros metros (SZIKSZAY et al., 1986 e 1987).

Em 1988, o CEPAS - Centro de Pesquisa das Águas Subterrâneas, identificou o potencial hidrogeológico do Campus da Cidade Universitária, o qual poderia suprir em até 50% o seu consumo por meio da exploração das águas subterrâneas locais, na época calculado como sendo de  $450.000 \text{ m}^3/\text{mês}$  (CEPAS, 1988a e 1988b). Fruto deste trabalho, atualmente existem 06 poços tubulares em funcionamento no Campus - USP, com potencial de produção de cerca de  $100 \text{ m}^3/\text{h}$ , 30% da demanda do Campus.

O estudo hidrogeoquímico na Estação Experimental verificou que a influência da água sulfatada cálcica da chuva ocorre nos primeiros 5 metros da zona não saturada, e, com o aumento da profundidade, ao percolar as camadas argilosas da zona não saturada, as águas adquirem caráter bicarbonatada sódica, mudando para bicarbonatada cálcica ao atingir o nível aquífero (SZIKSZAY et al., 1988 e 1990).

SZIKSZAY & TOLEDO-GROKE (1989) concluem que os processos de caolinização da muscovita e do microclínio refletem as altas concentrações de  $\text{K}^+$  nas águas de percolação.

Objetivando determinar a variação do topo rochoso no Campus, USSAMI & MOLINA (1991) realizam um levantamento gravimétrico da área e TAIOLI (1992) um perfil sísmico.

Em ensaios de bombeamento nos poços tubulares produtores existentes no aquífero sedimentar no Campus, IRATANI (1990 e 1993) avalia a produtividade do aquífero pela vazão ótima dos mesmos. ROSS (1990 e 1991) salienta que a exploração destes poços pode inverter a característica de zona de descarga do Rio Pinheiros, degradando qualitativamente as águas subterrâneas explotadas.

Em geral, o aquífero da Cidade Universitária, tem os fluxos subterrâneos em direção ao Rio Pinheiros, reserva permanente da ordem de 11 milhões de m<sup>3</sup> de água e reserva reguladora de 900 m<sup>3</sup>/ano. O aquífero cristalino apresenta capacidade específica em torno de 2,59 m<sup>3</sup>/d.m, já o aquífero sedimentar possui valores de condutividade hidráulica em torno de 4,32 m/d, transmissividade maior que 8,64 m<sup>2</sup>/d e coeficiente de armazenamento variando de 10<sup>-4</sup> a 10<sup>-1</sup>, com os maiores valores a menores profundidades (IRATANI, 1993).

IRATANI (1993) salienta ainda, que apesar do potencial produtivo do aquífero sedimentar revelar-se uma reserva estratégica ao abastecimento de água potável no Campus, a exploração inadequada destes recursos poderá deteriorar sua qualidade, através de contaminações provenientes do Rio Pinheiros e/ou córregos existentes na área, induzidas pelo bombeamento dos poços.

## **2. POLUIÇÃO E CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS**

Qualquer alteração química, física ou bacteriológica da água subterrânea, de origem antrópica no sistema aquífero, é denominada de poluição. Quando esta alteração possui potencial de prejudicar a saúde do homem ou dos animais que a consomem, é denominada contaminação.

As atividades humanas geram resíduos que são depositados nos solos e/ou lançados nos cursos d'água e/ou atmosfera, originando fontes potenciais de poluição/contaminação das águas subterrâneas. A Região Metropolitana de São Paulo, com características de grande centro industrial, apresenta um alto potencial de risco de acidentes ambientais.

De acordo com o grau de extensão das fontes potenciais de poluição, estas podem ser classificadas em :

- a) **Pontuais** - de pequena escala e facilmente identificáveis; e
- b) **Difusas** - relativamente dispersas, originadas de outras fontes menores, cujas localizações não são bem definidas.

Conforme a evolução temporal, as fontes podem ser agrupadas em permanentes, intermitentes e acidentais.

### **2.1. VULNERABILIDADE DO AQUÍFERO ÀS FONTES SUPERFICIAIS POTENCIAIS POLUENTES**

A característica química das águas subterrâneas nos sistemas aquíferos é função dos processos atuantes durante sua permanência no subsolo, das substâncias químicas orgânicas e inorgânicas (elementos e compostos) presentes no aquífero, formas de transporte e composição original da água quando da infiltração. Os processos químicos e suas reações são fortemente influenciados pelo ambiente onde se processam.

Dentre os princípios e processos que controlam a composição das águas, destacam-se a dissolução de gases, reações ácido-base, solubilidade e precipitação, complexação-quelação, oxidação-redução, adsorção e troca iônica.

Nos sistemas aquíferos distinguem-se dois ambientes hidrogeoquímicos distintos:

**a) Zona não Saturada** - região situada entre o nível de água e a superfície do terreno, onde a água infiltra em movimento predominantemente vertical descendente, ocasionalmente podendo ocorrer movimento ascendente.

Quando a água inicia o processo de infiltração no solo, passa a se enriquecer em elementos lixiviados das rochas/solo e com produtos da superfície. Este processo foi estudado por diversos pesquisadores na Estação Experimental localizada dentro do Campus "Armando Salles de Oliveira" (SZIKSZAY et al., 1988 e 1990).

De uma maneira geral, a zona não saturada, por possuir um fluxo lento em condições geralmente aeróbicas e alcalinas, possui alto potencial para interceptação, sorção e eliminação de bactérias, reações químicas envolvendo substâncias inorgânicas e biodegradação de muitos compostos orgânicos.

Pode-se dizer que a zona não saturada representa a primeira e a mais importante defesa natural contra a contaminação das águas subterrâneas.

**b) Zona Saturada** - região situada abaixo do nível de água, onde a água está acumulada nos poros primários e/ou secundários das rochas, com forte dinâmica horizontal. O poluente ao atingir esta zona adquire uma dinâmica horizontal originando uma pluma ou nuvem poluente.

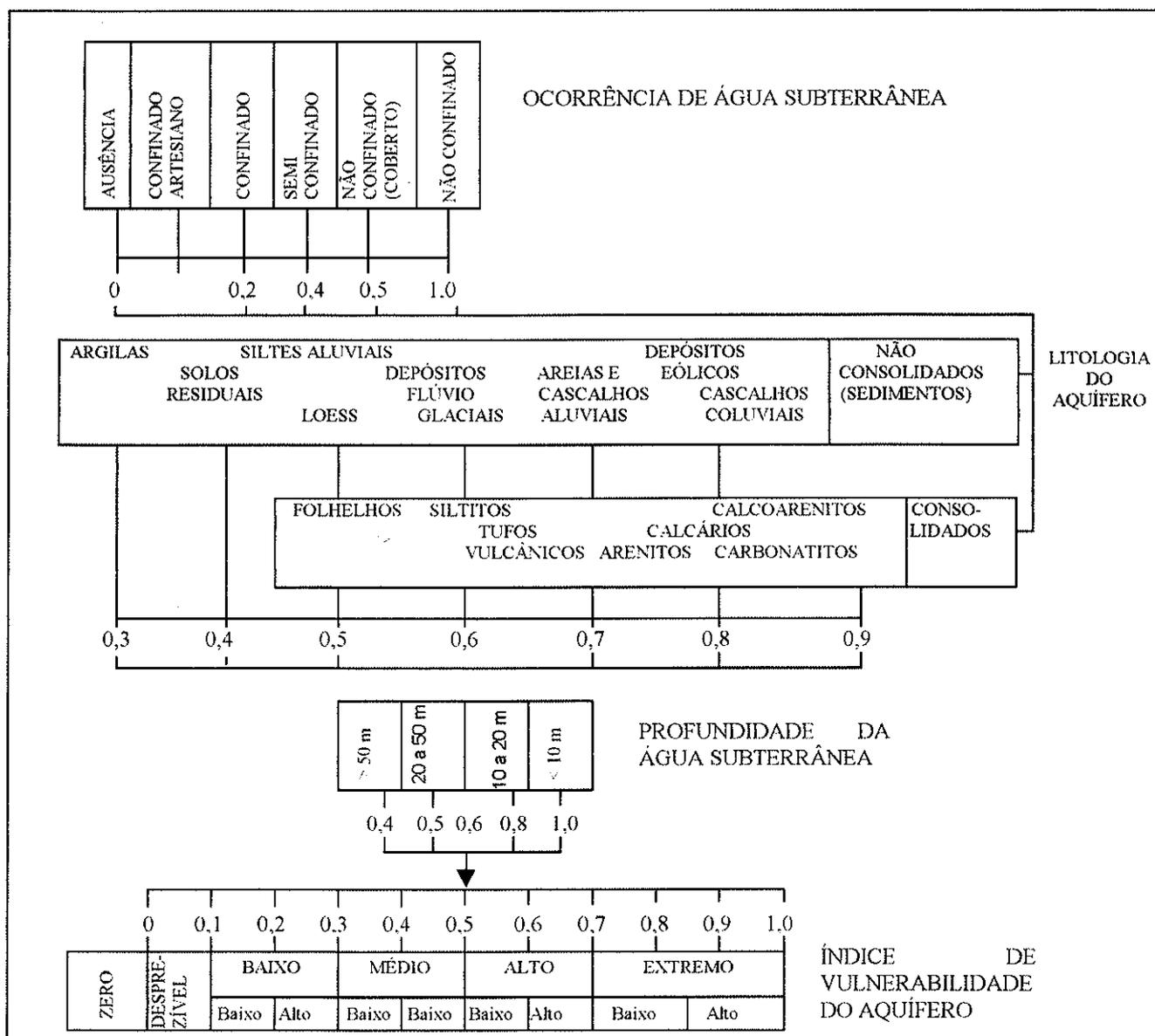
Dentre os fatores naturais que condicionam as características químicas das águas subterrâneas nesta zona, destaca-se o ambiente geológico, composição e volume das águas, tempo de trânsito, características climáticas da região e as reações químicas e biológicas.

O termo vulnerabilidade para um sistema aquífero ainda não é bem definido pelos diversos trabalhos existentes na área, sendo primeiramente introduzido por Margat (1960, *in* MESTRINHO, 1995) sintetizando as características dos sistema aquífero relacionadas com os fenômenos que regem a contaminação da água subterrânea.

REBOUÇAS (1994) resume a vulnerabilidade como sendo a suscetibilidade do aquífero à ação de uma determinada fonte contaminante. Assim, a vulnerabilidade pode ser definida como sendo a razão de dois fatores básicos:

- 1 - Intrínsecos - características naturais dos aquíferos (composição mineralógica, porosidade, permeabilidade, taxa de infiltração, espessura da zona não saturada, volume, velocidade de fluxo, etc.) que definem a acessibilidade e capacidade de atenuação do contaminante;
- 2 - Antrópicos - a carga poluente existente (concentrações, extensão, permanência dos processos poluidores, etc.) que pode ser maximizada pela sazonalidade climática local.

A vulnerabilidade natural dos sistemas aquíferos pode ser avaliada pela metodologia de classificação proposta por FOSTER & HIRATA (1988) e FOSTER et al. (1988), baseada na litologia do aquífero e a forma de ocorrência das águas subterrâneas. Por este sistema de avaliação modificado por SEM/IG/CETESB/DAEE (1997), o sistema aquífero sedimentar da área do Campus USP é classificado como de alta vulnerabilidade natural (**Quadro 1**).



**Quadro 1 – Sistema de classificação da vulnerabilidade natural dos sistemas aquíferos (SEM/IG/CETESB/DAEE, 1997)**

## **2.2. FONTES POTENCIAIS DE POLUIÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NA ÁREA DA CIDADE UNIVERSITÁRIA**

Dentro da área de estudo observam-se dois tipos de fontes potenciais de poluição das águas subterrâneas locais; fontes pontuais e fontes difusas (**Figura 2**), descritas a seguir:

### **2.2.1. Fontes potenciais pontuais de poluição das águas subterrâneas**

#### **2.2.1.1. *Rejeitos radioativos***

No Instituto de Pesquisa Nuclear - IPEN, localizado dentro da área do Campus "Armando Salles de Oliveira", são processados e armazenados produtos radioativos que originam rejeitos líquidos que são depositados em tanques de concretos semi-enterrados na área do IPEN.

As informações, tanto do manuseio como a própria estocagem final do material radioativo são informações restritas, consideradas como de segurança nacional. Segundo o IPEN, todos os procedimentos obedecem a normas internacionais, não oferecendo riscos ao meio ambiente.

#### **2.2.1.2. *Tanques de estocagem de combustível***

Atualmente são cadastrados 4 (quatro) setores de armazenamento de combustíveis (diesel, gasolina e álcool) dentro do Campus, que representam fontes pontuais potenciais de poluição dos recursos hídricos do local.

a) Auto Posto Universitário Ltda. - Posto Revendedor da Petrobrás, localizado na Av. da Universidade, extremo leste da área, com 5 tanques enterrados (3 de gasolina e 2 de álcool etílico hidratado) e 3 aéreos (2 de gasolina e 1 de álcool etílico hidratado) de armazenamento, todos com capacidade de 15.000 litros. São consumidos aproximadamente 264.000 L/mês de gasolina e 176.000 L/mês de álcool etílico hidratado.

Atualmente, este posto revendedor sofreu uma extensiva reforma sob as novas diretrizes da Petrobrás, tendo sido executado um diagnóstico hidrogeológico com instalação de cerca de 11 (onze) poços de monitoramento do lençol freático. Segundo informações do gerente, já foram verificados vazamentos de combustíveis no posto.

**b) Posto de Abastecimento de Veículos da USP** - localizado na Prefeitura da USP, extremo oeste do Campus, com 2 tanques de diesel, 2 de álcool etílico hidratado e 1 de gasolina, de 15.000 litros de capacidade cada. Em média, são abastecidos 15 mil L/mês de diesel, 35 mil L/mês de álcool etílico hidratado e 45 mil L/mês de gasolina.

Em 1990, segundo o responsável local, foi verificado um vazamento de combustível no local, não sendo, no entanto, registrado o volume vazado. Atualmente não existe nenhum procedimento de monitoramento e controle de possíveis vazamentos de combustíveis na área.

**c) Posto de Abastecimento de Veículos do IPT** - localizado dentro da área do IPT, extremo centro-oeste da área de estudo, com 3 tanques de armazenamento com capacidade de 15.000 litros, contendo gasolina, álcool etílico hidratado e diesel.

Desde 1995 que o IPT não mais utiliza veículos a álcool, sendo que nesta época, o tanque de álcool foi desativado. São abastecidos 2.500 L/mês de diesel e 10.000 L/mês de gasolina.

**d) Posto de Abastecimento de Veículos do IPEN** - localizado dentro da área do IPEN, constituído de dois postos distintos, com 3 tanques de armazenamento com capacidade de 15.000 litros cada, com gasolina, álcool etílico hidratado e diesel.

### **2.2.1.3. Transporte de produtos perigosos**

Diariamente, dezenas de caminhões-tanque circulam pela Região Metropolitana de São Paulo - RMSP, principalmente utilizando-se das marginais Pinheiros e Tietê, transportando produtos perigosos suscetíveis de produzir impacto sobre o meio ambiente, em caso de acidentes, em especial aos recursos hídricos.

Na década de oitenta, 50% dos acidentes ocorridos no estado de São Paulo ocorreram na RMSP, que, segundo PACHECO (1984), observa-se a ausência de planos de ação de emergência eficientes e de recursos humanos e materiais disponíveis nessas ocasiões.

Possíveis acidentes que possam ocorrer no trecho da marginal Pinheiros limítrofe norte do Campus USP de São Paulo, podem contaminar diretamente as águas subterrâneas da área de estudo através da Raia Olímpica, localizada a menos de 10 metros da via expressa. Assim, apesar da ocorrência difusa dos caminhões, o ponto potencial de contaminação é conhecido (Raia Olímpica), sendo assim classificado como fonte potencial pontual de poluição.

Vale salientar que 3 dos 6 poços de produção atualmente existentes no Campus situam-se a menos de 100m da marginal, na área da Raia Olímpica.

### **2.2.2. Fontes potenciais difusas de poluição das águas subterrâneas**

Pode-se classificar três tipos distintos de fontes potenciais difusas de poluição dos recursos hídricos subterrâneos na área de estudo, a saber:

#### **2.2.2.1. Rede de efluentes domésticos**

Diversos laboratórios existentes nos institutos localizados dentro do Campus manuseiam produtos químicos sem que haja nenhuma estrutura especial para coleta dos rejeitos, sendo estes, despejados diretamente na rede de esgoto. O Hospital da USP, assim como os centros veterinários, possuem sistema de coleta de lixo sólido hospitalar, mas seus afluentes também são direcionados para o sistema de esgoto.

Assim, a rede de efluentes domésticos da USP, pode ser caracterizada como uma fonte potencial difusa de poluição química e bacteriológica das águas subterrâneas locais através dos pequenos e intermitentes vazamentos.

#### **2.2.2.2. Garagem de veículos**

Os Institutos de ensino e pesquisa localizados dentro do Campus, em sua maioria, possuem garagens para os seus veículos. Estas garagens mantêm pequenos estoques de derivados de petróleo ou álcool para manutenção dos veículos.

Até o momento, não existe nenhuma norma interna da USP estabelecendo os procedimentos necessários para o estoque, manuseio e descarte destes materiais, sendo comum o despejo destas substâncias na rede de esgoto local.

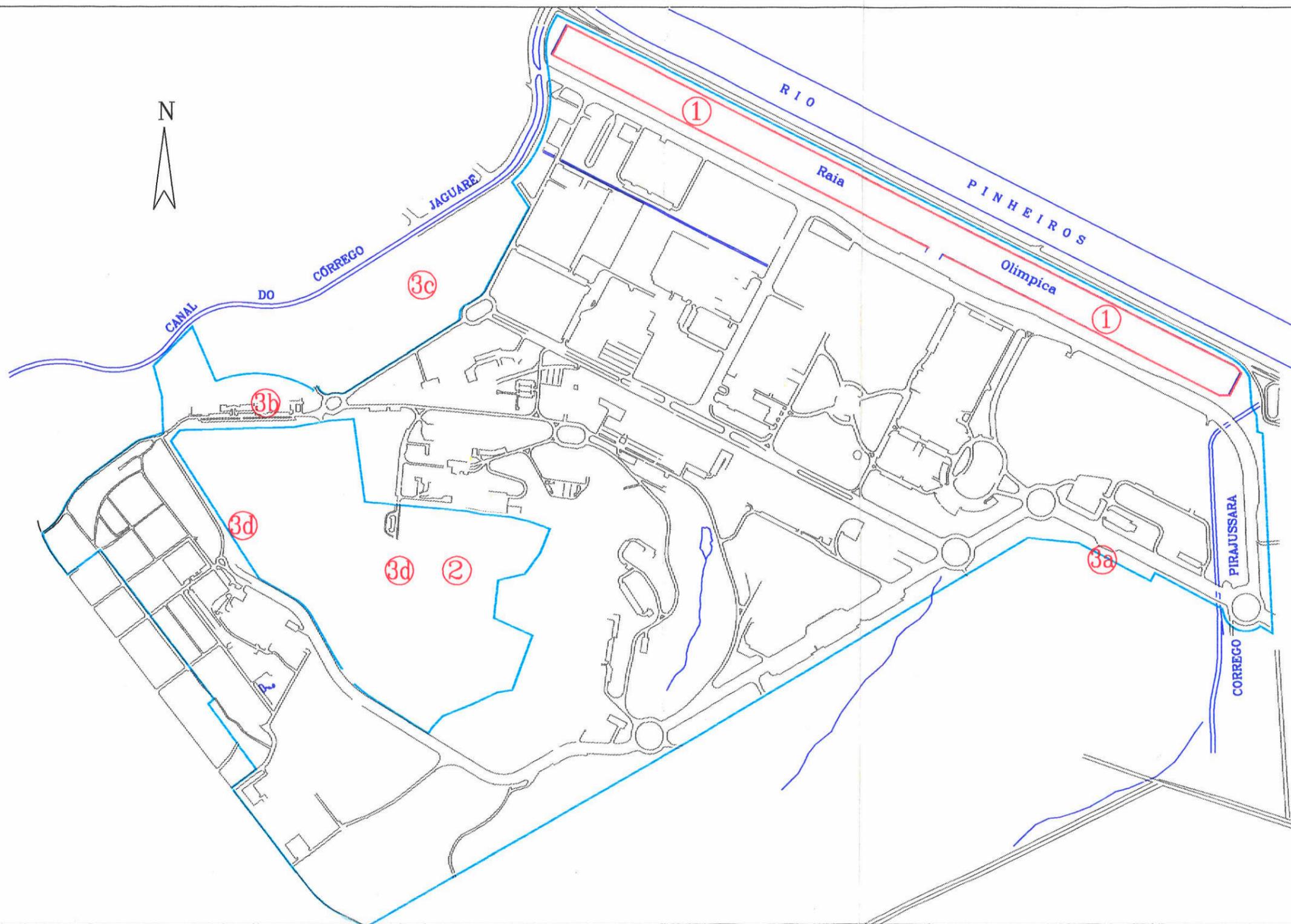
Como a maioria dos Institutos do Campus possuem local para manutenção de veículos, esta fonte potencial de poluição das águas subterrâneas foi classificada como difusa, uma vez que ocorre em toda a área sem um controle definido

### **2.2.2.3. Rios e córregos**

O Campus "Armando Salles de Oliveira" situa-se na bacia do Rio Pinheiros, sendo limitada a norte pelo rio homônimo, a leste pelo córrego Pirajussara e a oeste pelo Córrego da Paz . Estes corpos d'água possuem alta carga poluente advinda de áreas a montante da Região Metropolitana de São Paulo em relação ao Campus.

Em época das chuvas, onde é comum ocorrer enchentes escalas variáveis na área de estudo, estes drenos naturais podem extravasar de seus leitos, passando a ser influentes nos sistemas aquíferos, favorecendo a infiltração de poluentes.

A exploração não controlada do poços tubulares de produção existentes dentro da área da Cidade Universitária podem, local e ocasionalmente, inverter os fluxos subterrâneos, induzindo a infiltração de uma carga poluente advinda destes corpos d'águas.



LEGENDA :

-  Limite do Campus
-  Raia Olímpica
-  Resíduo Radioativo
-  Tanque Combustível
  -  - Auto Posto Cidade Universitária
  -  - Prefeitura USP
  -  - IPT
  -  - IPEN

Fontes Potenciais Pontuais de Poluição das Águas Subterrâneas



Título: <b>Delimitação de Perímetros de Proteção dos Pocos Tubulares (PPP) Empregando a Técnica de Modelagem Numérica</b>	
Universidade de São Paulo Instituto de Geociências	Dissertação de Mestrado - 1999
Autor: Mário de Brito Marcelino	Figura 02

### **3. DELIMITAÇÃO DE PERÍMETROS DE PROTEÇÃO DOS POÇOS TUBULARES (PPP)**

#### **3.1. SUBSÍDIO LEGAL**

Este trabalho não pretende promover uma discussão sobre as legislações (federal, estaduais e municipais) existentes no Brasil, mas sim oferecer um panorama das legislações existentes, fornecendo subsídios para a implantação de perímetros de proteção de poços tubulares (PPP) como programa de proteção de qualidade dos recursos hídricos subterrâneos no Campus da Cidade Universitária da USP em São Paulo/SP.

##### **3.1.1. Nacional**

A Constituição Federal Brasileira promulgada em 1988 contemplou a instituição pela União de um Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, bem como uma primeira forma de agregar-se à água um atributo econômico: os *royalties* e a compensação financeira pela utilização de recursos hídricos para a geração hidrelétrica.

A atribuição de cotas (outorga) ou cobrança (tarifas) sobre o direito de uso da água e de poluição hídrica objetiva o ordenamento do uso pelo poder público (LANNA et al., 1991). Neste caso, a outorga estabeleceria mecanismos extra-mercado para impor um perfil ideal do uso do recurso e a tarifa seria uma intervenção no mercado.

Com o objetivo de propor as bases para uma política nacional sobre recursos hídricos e os fundamentos para o gerenciamento, foi criado em 1991, por iniciativa do Executivo, um grupo de trabalho interministerial, resultando no Projeto de Lei nº2.249/91 (SÁ E BENEVIDES et al., 1995).

No que se concerne às águas subterrâneas, a legislação brasileira tem sua legislação baseada no Código das Águas de 1934 (Título IV), criado pelo Decreto 24.643, posteriormente alterado por leis subsequentes.

Em capítulo único, o Artigo 96 dispõe: "O dono de qualquer terreno poderá apropriar-se por meio de poços, galerias, etc., das águas que existam debaixo da superfície de seu prédio, contanto que não prejudique aproveitamentos existentes nem derive ou desvie de seu curso natural águas dominicais, públicas de uso comum ou particulare". Nos artigos 97 ao 101 dispõe sobre possíveis interferências entre poços, poluição induzida pelo poço, concessões administrativas e punições.

Em 07/08/98 a Portaria DNPM n. 231 estabeleceu que as captações destinadas a comercialização e uso público da água deverão ser protegidas através da implantação de perímetros de proteção.

O aproveitamento e preservação das águas subterrâneas no Estado de São Paulo é regido pela Lei nº6.134, de 2 de junho de 1988, que dispõe sobre a preservação dos depósitos naturais de águas subterrâneas e outras providências, regulamentado pelo Decreto nº32.955, de 7 de fevereiro de 1991.

Especificamente para os poços tubulares de produção, a Portaria do Departamento de Águas e Energia Elétrica - DAEE nº12, de 14 de março de 1991, fixa as normas para emissão da licença de execução e da licença de operação de poços tubulares profundos e da outorga final para a exploração das águas subterrâneas, objetivando, também, os respectivos cadastramentos no DAEE.

O Decreto Estadual 32.955 inclui no gerenciamento das águas subterrâneas as seguintes ações correspondentes:

- I - à avaliação dos recursos hídricos subterrâneos e ao planejamento do seu aproveitamento racional;
- II - à outorga e fiscalização dos direitos de uso dessas águas e
- III - à aplicação de medidas relativas à conservação dos recursos hídricos subterrâneos.

Em parágrafo único, estabelece que na administração das águas subterrâneas sempre serão levadas em conta sua interconexão com as águas superficiais e as interações observadas no ciclo hidrológico.

A Legislação dispõe sobre a preservação e outras providências das águas subterrâneas, estabelecendo em seu Capítulo III - Seção I, as Áreas de Proteção de Poços, objetivando conservar, proteger e manter o equilíbrio natural. No parágrafo 2º, estabelece ainda que as áreas deverão ser estabelecidas com base em estudos hidrogeológicos pertinentes, ouvidos os municípios e demais organismos interessados.

Este Decreto apresenta as seguintes classificações (Seção II, Artigo 20):

**Área de Proteção:** zonas de recarga de aquíferos essenciais para abastecimento público;

**Área de Restrição e Controle:** áreas de controle e restrições à fontes poluidoras;

**Área de Proteção de Poços e outras Captações:** inclui distância mínima entre poços e o respectivo perímetro de proteção.

Estabelece ainda, que deverá ser instituído Perímetro Imediato de Proteção Sanitária (PIPS), com dez metros de raio a partir do ponto de captação, cercado e protegido com telas. Os poços deverão possuir laje de proteção sanitária de concreto armado, com, no mínimo, três metros quadrados para evitar a penetração de poluentes.

Estabelece ainda, o Perímetro de Alerta contra Poluição (PAP), com uma distância equivalente ao tempo de trânsito de cinquenta dias coaxialmente ao sentido de fluxo das águas subterrâneas no aquífero, no caso de poluentes não conservativos.

Assim, a legislação estadual não define claramente os perímetros de proteção dos poços, ou os PPP, apenas estabelecendo critérios para o estabelecimento dos PIPS e o PAP.

### 3.1.2. Internacional

PACHECO (1984) examinando as legislações de alguns países europeus e a dos Estados Unidos da América do Norte, observa que estas são apoiadas por fortes dispositivos institucionais que garantem uma efetiva aplicação, adotando ou recomendando:

- a) perímetros de proteção variados em torno dos pontos de captação;
- b) criação de organismos financeiros especiais que garantam os recursos necessários às obras de saneamento; e

c) instituição de órgãos em nível nacional para a fixação das diretrizes a serem seguidas.

Restringir o uso do terreno que circunda uma fonte de captação de água subterrânea é uma das formas mais antigas de proteção ao manancial contra contaminantes, sendo feitas as primeiras experiências já no império Romano.

O primeiro país americano a aplicar este dispositivo de proteção, foi Barbados, que em 1963 estabeleceu uma divisão territorial baseado em PPP e áreas de recarga/descarga do aquífero. Nos EUA, sua aplicação iniciou-se apenas em 1986.

Segundo VAN WAEGENING (1985, *in* CLEARY 1992), na aplicação de PPP na Europa, são definidas até 4 (quatro) zonas de proteção de variáveis tamanhos (de alguns metros até alguns quilômetros) e variável graus de restrições ao uso do solo.

Na **Tabela 1** é apresentado um resumo dos PPP em alguns países europeus.

**Tabela 1 - Resumo dos PPP em vários países europeus (VAN WAEGENING 1985, *in* CLEARY 1992)**

Ex República Federal da Alemanha	Austria	Bélgica	Finlândia	Holanda	França	Ex Tchecoslováquia	Suíça	Hungria	Suécia	Ex-República Democrática da Alemanha
Zona I Bateria de poços 10-100m	Área de proteção de 50 dias	Zona Intermediária de proteção 100m/2 4h	Área Imediata	Área de recolhimento (>30m) 50-60 dias	Proteção imediata (10-20)m	Proteção sanitária primária zona 10-50m	Zona I 10-20m	Zona de Proteção	Área de poço	Zona I 5-100m
		Área de proteção interna (300-100m) 50 dias			Zona de proteção interna 60 dias	Área de proteção interna				Zona secundária interna de proteção sanitária
Zona II 50 dias	Área de proteção parcial	Área de proteção remota	Zona de proteção externa	Área de proteção. TT de 10 anos	Área de proteção remota	Zona secundária externa de proteção sanitária	Zona IIIA 200m	Área de proteção hidrogeológica. TT de 25-100 anos de proteção regional	Área de proteção externa	Zona III A 10 anos
Zona III A 2 km				Área de Proteção. TT de 25 anos			Zona IIIB			Zona III B 25 anos
Zona III B				Área distante de recarga						

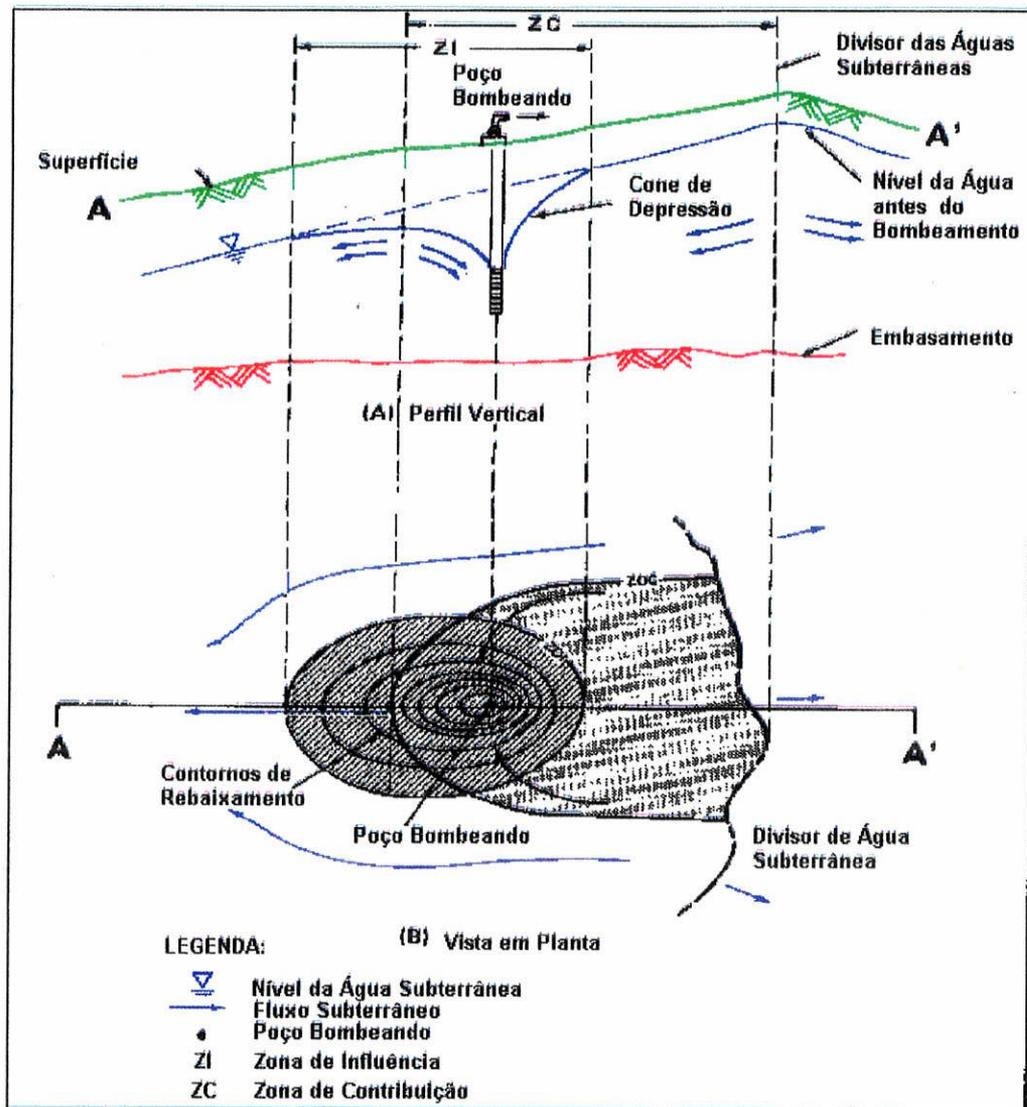
O programa de delimitação de perímetro de Proteção de Poços dos Estados Unidos define 3 (três) zonas de proteção (U.S.EPA, 1984) (**Figura 3**):

- a) Zona de Influência (ZI) ou Remediação - visa estabelecer um perímetro que possibilite a detecção e remediação e controle de contaminantes antes que atinjam o poço;
- b) Zona de Transporte (ZT) ou de atenuação - define uma área que permite a degradação natural de contaminantes, em especial aqueles microbianos;
- c) Zona de Contribuição (ZC) ou de gerenciamento - visa regular o uso do solo, evitando a infiltração de contaminantes persistentes e móveis.

Para a definição destas zonas, a U.S.EPA (1994) define 5 (cinco) critérios para o traçado das PPP, que podem ser utilizados unicamente, ou em combinação, a saber:

- Distância – critério que fixa um raio em relação ao poço ou outra dimensão para delimitar o PPP. Esta área é fixa, e independe das características intrínsecas e/ou extrínsecas do aquífero e/ou do poço.
- Rebaixamento – área compreendida pelo cone de rebaixamento induzido pelo bombeamento do poço, denominada pela U.S.EPA como Zona de Influência (**ZI**, **Figura 3**) do bombeamento do poço, desaparecendo após cessar o mesmo. Seu tamanho e forma depende das características do aquífero, da recarga e do regime de bombeamento do poço.
- Tempo de Trânsito - estabelece uma distância em relação ao poço a ser protegido, equivalente ao tempo máximo que um contaminante leva para percorrer. Assim, quanto maior a velocidade de fluxo, maior será a distância percorrida pelo contaminante e, conseqüentemente, maior será a área a ser protegida.
- Fronteiras de Fluxo - critério que utiliza as características hidrogeológicas regionais, identificando as feições que limitam e controlam os fluxos subterrâneos, delimitando a área na qual as águas subterrâneas possuem uma dinâmica que possibilite atingir o poço quando ativo e/ou desativado.

Os fatores limitantes de fluxos podem ser superficiais (rios, geomorfologia da área, lagoas, canais, etc.) ou subterrâneos (mudança de litotipos, divisor das águas subterrâneas, etc.) ou antrópicos (poços de injeção, bombeamento, etc.).



**Figura 3 - Relação entre as zonas de proteção em aquífero não - confinado em meio poroso (traduzido de U.S.EPA, 1987 e 1994)**

Segundo CLEARY (1992), por tender a delimitar grandes áreas (parte ou a totalidade da Zona de Contribuição, ZC) este critério é mais adequado a aquíferos pequenos, ou quando, em grandes aquíferos, o poço situa-se próximo dos contornos.

- Capacidade de Assimilação - é baseada na velocidade de atenuação do contaminante até atingir a captação. Estabelece um perímetro no qual possibilita a diminuição da concentração do contaminante após infiltração no subsolo, até níveis toleráveis, determinados pelas legislações locais.

Deve-se salientar que a distância e o tempo de trânsito também são adotados para o estabelecimento do Perímetro Imediato de Proteção Sanitária (PIPS) e do Perímetro de Alerta contra Poluição (PAP).

### **3.2. MÉTODOS EXISTENTES DE DELIMITAÇÃO DOS PPP**

A U.S.EPA (1987, 1988 e 1994) classifica os métodos de delimitação dos PPP em quatro grandes grupos, enumerados a seguir e descritos resumidamente na **Tabela 2**.

- I. Métodos Geométricos (G):**
  - Raio Fixo Arbitrário (G-RFA)
  - Raio Fixo Calculado ou Método Cilíndrico (G-RFC)
  - Forma Variável Simplificada (G-FVS)
- II. Métodos Baseado no Mapeamento Físico (MF)**
  - Mapeamento Hidrogeológico (MF-H)
  - Mapeamento de Vulnerabilidade (MF-V)
- III. Métodos Analíticos Simples Baseados no Tempo de Trânsito (ATT):**
  - Usando Lei de Darcy e Rede de Fluxo (ATT-LDRF)
  - Cone de Depressão e Tempo de Trânsito sem Gradiente da Superfície Potenciométrica (ATT-CD)
  - Cone de Depressão e Tempo de Trânsito com Gradiente da Superfície Potenciométrica (ATT-CDG)
  - Interação de Fluxo entre Aqüíferos e Tempo de Trânsito (ATT-FA)
  - Aproximação do Tempo de Trânsito (ATT-A)
- IV. Métodos Analíticos Baseados no Rebaixamento (AR):**
  - Equação de Fluxo Uniforme (AR-FU)
  - Equação de Equilíbrio de Theim (AR-ET)
  - Equação de Não Equilíbrio (AR-NE)
  - Recarga de Aqüífero Fissural Proveniente de Manto de Alteração (AR-AF)
  - Equações para Situações Especiais (AR-SE)
- V. Métodos baseados em Modelagem Numérico (MN):**
  - Modelos Numéricos de Fluxo e Transporte (MN-FT)

Na **Tabela 2** é apresentado uma descrição sucinta de cada método, com as vantagens e desvantagens (Modificado de U.S.EPA 1987, 1988 e 1994).

**Tabela 2 - Vantagens e desvantagens dos métodos de delimitação de PPP (Modificado de U.S.EPA 1987, 1988 e 1994)**

MÉTODO	DESCRIÇÃO	VANTAGEM	DESvantAGEM
G_RFA	Delimitação de áreas circulares em torno do poço	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ De rápido, simples e baixo custo de aplicação;</li> <li>✓ Necessita apenas um hidrogeólogo pouco experiente</li> <li>✓ Fácil convencimento ao público leigo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>x Baixa precisão hidrogeológica;</li> <li>x Não incorpora considerações hidrogeológicas ou de transporte de contaminantes;</li> <li>x Pode gerar PPP sub ou super estimadas</li> <li>x Facilmente questionável;</li> </ul>
G RFC	Delimitação de área em torno do poço calculado com base de uma equação analítica: $Qt=n\pi Hr_c^2$	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ De rápido, simples e baixo custo de aplicação;</li> <li>✓ requer uma limitada experiência técnica</li> <li>✓ Incorpora os princípios básicos da hidráulica do poço e do aquífero;</li> <li>✓ Apenas necessita da porosidade, como dado de campo</li> <li>✓ Mais confiável que o MG_RFA</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>x Acuidade baixa, principalmente em função das heterogeneidades e anisotropias do aquífero;</li> <li>x Não considera os fluxos das águas subterrâneas, tendendo a superestimar os PPP</li> <li>x Não é apropriado para aquíferos com gradiente hidráulico significativo ou não confinados.</li> </ul>
G_FVS	Combinação do método analítico que utiliza uma equação de fluxo uniforme, do tempo de trânsito e de contornos de fluxos para gerar os PPP	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ De fácil aplicação e baixo custo;</li> <li>✓ Requer poucos dados adicionais além de um mapeamento hidrogeológico;</li> <li>✓ Apresenta bons resultados, próximo à realidade</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>x Necessita bons conhecimentos do aquífero para padronizar sua forma</li> <li>x Não funciona em aquíferos heterogêneos;</li> <li>x Método pouco flexível.</li> </ul>

Tabela 2 - Continuação

MÉTODO	DESCRIÇÃO	VANTAGEM	DESvantAGEM
MF_H	Identificação das feições físicas que controlam o fluxo das águas subterrâneas	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Método flexível e baixo custo de aplicação;</li> <li>✓ Requer técnicos medianamente treinados;</li> <li>✓ Considera as características hidrogeológicas da área;</li> <li>✓ Pode ser utilizado em conjunto com outros métodos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>× Assume fluxo uniforme e bidimensional em meio porosos;</li> <li>× Tende a gerar zonas de contribuição muito grandes, quando utilizados sozinhos;</li> <li>× Considera fluxos isotrópicos em situação estacionária;</li> </ul>
MF_V	Identificação de áreas de maior fragilidade do aquífero frente a contaminantes	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Não precisa assumir que o aquífero é um meio poroso, sendo recomendado para aquíferos fraturados;</li> <li>✓ Pode ser utilizado em conjunto com outros métodos;</li> <li>✓ É flexível para cada contexto no qual a área está inserida;</li> <li>✓ Não requer dados detalhados de parâmetros hidrogeológicos;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>× Não delimita uma zona de contribuição fixa;</li> <li>× Apresenta resultados subjetivos e de difícil reprodução;</li> <li>× Demorado e de difícil aplicação.</li> </ul>
ATT_LDRF;	Cálculos de tempo de trânsito baseado na equação de Darcy: $V=K_i/n$ :	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Considera os valores médios de porosidade efetiva, condutividade hidráulica dos litotipos, gradiente hidráulico e velocidade média dos fluxos existentes na área;</li> <li>✓ Facilmente aplicado, de baixo custo;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>× Tende a subestimar o tempo de trânsito próximo a zonas de rebaixamento;</li> <li>× Não aceita gradiente hidráulico 0,001.</li> </ul>
ATT_CD	O tempo de trânsito é estimado graficamente, através da plotagem em gráfico log TT x Distância	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Aceita gradientes hidráulicos maior que 0,001</li> <li>✓ Considera variações da velocidade de fluxo e do gradiente hidráulico;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>× Requer medição acurada da geometria do cone de rebaixamento</li> </ul>

Tabela 2 - Continuação

MÉTODO	DESCRIÇÃO	VANTAGEM	DESVANTAGEM
ATT_CDG	O tempo de trânsito é calculado, considerando-se o gradiente hidráulico e os rebaixamentos induzido pelos bombeamentos, pela equação (KREITLER & SENGER 1991, in USEPA 1994): $T_x = n/Ki[r_x - (Q/2\pi kbi) \ln\{2\pi kbi/Q\}r_x]$	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Pode ser aplicado combinado com equações de fluxos uniformes;</li> <li>✓ Boa acuidade na determinação do tempo de trânsito</li> <li>✓ É o melhor método para calcular tempo de trânsito em aquíferos confinados com gradiente de fluxo regional;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>× Somente calcula o tempo de trânsito ao longo da direção de fluxo principal do aquífero;</li> <li>× Não considera a recarga de aquíferos não confinados ou condutância entre aquíferos, quando confinados.</li> </ul>
ATT_FA	São aplicadas equações para determinar a condutância vertical de aquíferos verticais, sob influência de bombeamentos. O fluxo vertical é dado pela equação modificada de Darcy: $Q_v = (K_v/m)AH_r$	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Considera a recarga de aquífero confinados por aquífero sotopostos;</li> <li>✓ Avalia o confinamento do aquífero</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>× Requer informações de ensaios de bombeamento e os perfis técnico-construtivos dos poços</li> <li>× Resultados em função de seções bidimensionais.</li> </ul>
ATT_A	utiliza os dados hidrogeoquímicos e dos isótopos par identificar as direções e taxas de fluxo	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Auxilia na delimitação da áreas de recarga;</li> <li>✓ Possibilita aferir os tempos de transito estabelecidos por outros métodos analíticos ou numéricos;</li> <li>✓ Pode ser utilizado em aquíferos de porosidade primária e secundária;</li> <li>✓ Possibilita datar a idade das águas;</li> <li>✓ Não requer dados de parâmetros hidrogeológico.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>× Requer interpretação geoquímica apurada;</li> <li>× pode apresentar resultados contraditórios;</li> <li>× Análises químicas caras;</li> <li>× Não delimita as zonas de contribuição, de transitos e de influência.</li> </ul>

Tabela 2 - Continuação

MÉTODO	DESCRIÇÃO	VANTAGEM	DESvantAGEM
AR_FU	<p>Aplicação de equações de fluxo uniforme baseada em mapas potenciométricos previamente confeccionados. A equação de fluxo é dada por (FORCHHEIMER 1930, in TODD 1980):</p> $-y/x = \tan[(2\pi Kbi/Q)y]$ <p>A zona de contribuição é definida por:</p> $x = -Q/2\pi Kbi \text{ e } y = \pm Q/2\pi Kbi$	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Permite definir a ZC sem, contudo, definir o cone de depressão (ZI);</li> <li>✓ Considera o gradiente regional do aquífero e o cone de depressão;</li> <li>✓ É simples, requerendo poucas informações técnicas e pessoal medianamente treinado;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>× Admite aquíferos homogêneos e isotrópico;</li> <li>× Somente define os limites a jusante do poço e a largura da ZC;</li> <li>× Necessário a aplicação de equações de tempo de trânsito para a delimitação dos limites a montante da ZC, ou utilizando-se os limites naturais mapeados;</li> <li>× Erros nos contornos dos mapas potenciométricos e na estimativa da condutividade hidráulica e porosidade induzem distorções no PPP</li> </ul>
AR_ET	<p>É aplicada a equação de Theim para determinar o cone de rebaixamento induzido pelo bombeamento. A distância e o rebaixamento é calculado pela equação (KREITLER &amp; SENGER 1991, in USEPA 1994):</p> $s = [Q/2\pi Kb] \log_e r_e/r$	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Boa acuidade da delimitação da zona de influência (ZI);</li> <li>✓ Rápido e de fácil aplicação.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>× Assume aquífero homogêneo e isotrópico de área infinita;</li> <li>× Assume um equilíbrio entre o bombeamento e a recarga;</li> <li>× Poço tem que ser totalmente penetrante;</li> <li>× Fluxos e superfície potenciométrica horizontais.</li> </ul>

**Tabela 2 - Continuação**

MÉTODO	DESCRIÇÃO	VANTAGEM	DESVANTAGEM
AR_NE	<p>São aplicadas equações de não equilíbrio para a determinação do cone de rebaixamento. Usualmente é aplicada a equação de Theis (1935) modificada (U.S.EPA, 1994):</p> $r = \sqrt{u4Tt/S}$ <p>u é um parâmetro adimensional em função do poço, dado por:</p> $W(u) = 4\pi Ts/Q$	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Não assume um equilíbrio entre a recarga e o bombeamento</li> <li>✓ Boa acuidade da delimitação da zona de influência (ZI);</li> <li>✓ Rápido e de fácil aplicação</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>× Assume um aquífero homogêneo e isotrópico de área infinita;</li> <li>× Assume poço de diâmetro infinitesimal e totalmente penetrante no aquífero;</li> <li>× Assume superfície potenciométrica horizontal;</li> <li>× Assume um bombeamento instantâneo;</li> <li>× Desenvolvido para aquífero confinado.</li> </ul>
AR_AF	<p>Aplicação de simples equações para dimensionamento de ZI em aquífero cristalino com recarga proveniente de manto de alteração. As equações são derivadas da Lei de Darcy, através da drenança: <math>r = \sqrt{[(Q/K)\pi]}</math>, ou da infiltração: <math>r = \sqrt{[(Q/I)\pi]}</math></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Aplicável em aquíferos fissurais;</li> <li>✓ Pode avaliar a taxa de infiltração;</li> <li>✓ Método demorado e de difícil aplicação.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>× Deve ser aplicado em conjunto com uma análise estrutural, pois não considera as heterogeneidades e isotropias</li> </ul>
AR_SE	<p>Aplicação de equações de regime de não equilíbrio em aquíferos não confinados, semiconfinados, e em poços parcialmente penetrantes</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Minimiza as limitações dos demais métodos analíticos baseados no rebaixamento;</li> <li>✓ É flexível;</li> <li>✓ Pode ser combinado com outros métodos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>× Requer técnicos mais experientes;</li> <li>× Requer modelagem matemática simplificada;</li> <li>× Necessita de bons conhecimentos do aquífero</li> </ul>

Tabela 2 - Continuação

MÉTODO	DESCRIÇÃO	VANTAGEM	DESVANTAGEM
MN_FT	Os PPP são traçados em prognósticos resultantes de modelos numéricos, baseados em equações de fluxo e transporte,	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Considera as heterogeneidades e anisotropia tridimensional do meio;</li> <li>✓ Pode ser aplicado em meios fraturados;</li> <li>✓ Delimita as zonas de capturas através da técnica do <i>traçado de partícula</i>;</li> <li>✓ Altamente flexíveis;</li> <li>✓ Considera os fatores de degradação do contaminante;</li> <li>✓ Método de maior acuidade e precisão dos resultados.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>× Requer uma grande quantidade de dados hidrogeológicos;</li> <li>× Altos custos de aplicação;</li> <li>× Necessidade de técnico especializados;</li> <li>× Processo demorado.</li> </ul>

Parâmetros das equações citadas:

n= porosidade

i= gradiente hidráulico

t= tempo

b= espessura do aquífero

m= espessura do confinante;

x, y = coordenada

s= rebaixamento induzido pelo poço

r= distância do poço de observação

Q= vazão

K= condutividade hidráulica

V= velocidade média de fluxo

H= diferença de carga entre os aquíferos

A= área da seção considerada;

T= transmissividade

S= coeficiente de armazenamento ou porosidade efetiva

I= infiltração

$r_c$  = raio do cilindro

$Q_i$ = condutância entre aquíferos;

$H_f$ = seção filtrante do poço

$K_v$ = condutividade hidráulica vertical;

$T_x$ = tempo de trânsito ao longo de x

$r_x$ = distância em  $T_x$

$r_e$ = limite do cone de rebaixamento

### 3.3. INCERTEZAS NA DELIMITAÇÃO DOS PPP

O comportamento hidrogeológico de uma área é resultado das características intrínsecas e extrínsecas do meio físico que é estudado para a delimitação de um PPP, sendo estas fixas ou variáveis ao longo do tempo, conforme apresentado no **Quadro 2**.

Assim, o traçado final do PPP é resultado dos diferentes métodos de definição, e estes apresentam incertezas de traçado baseadas nos diferentes níveis de conhecimento das características da área e de representatividade futura em função da variação dos dados considerados ao longo do tempo.

Alguns trabalhos discutem a confiabilidade e sensibilidade dos métodos de delimitação dos PPP, principalmente em relação às limitações das informações disponíveis e/ou das características heterogêneas e anisotrópicas dos sistemas aquíferos, sendo apresentado um resumo na **Tabela 3**.

Para efeito de comparação, são apresentadas nas **Figuras 4 e 5** a delimitação de um PPP através do método geométrico do raio fixo calculado (G\_RFA), analítico simples baseado no tempo de trânsito (ATT) e numérico (MN) para os tempos de trânsitos de 10 e 25 anos, respectivamente.

As figuras ressaltam as diferenças dos resultados obtidos para os 3 métodos. Genericamente, observa-se que o método geométrico resulta em um círculo de raio variando em função do tempo considerado, uma vez que não considera a direção de fluxo, bem como as heterogeneidades do aquífero. Já o método analítico, por considerar a direção de fluxo, aproxima-se mais do zona de proteção obtida através do método numérico, porém, apresentando uma área elipsóide uniforme, uma vez que não considera as heterogeneidades e anisotropias do sistema aquífero considerado.

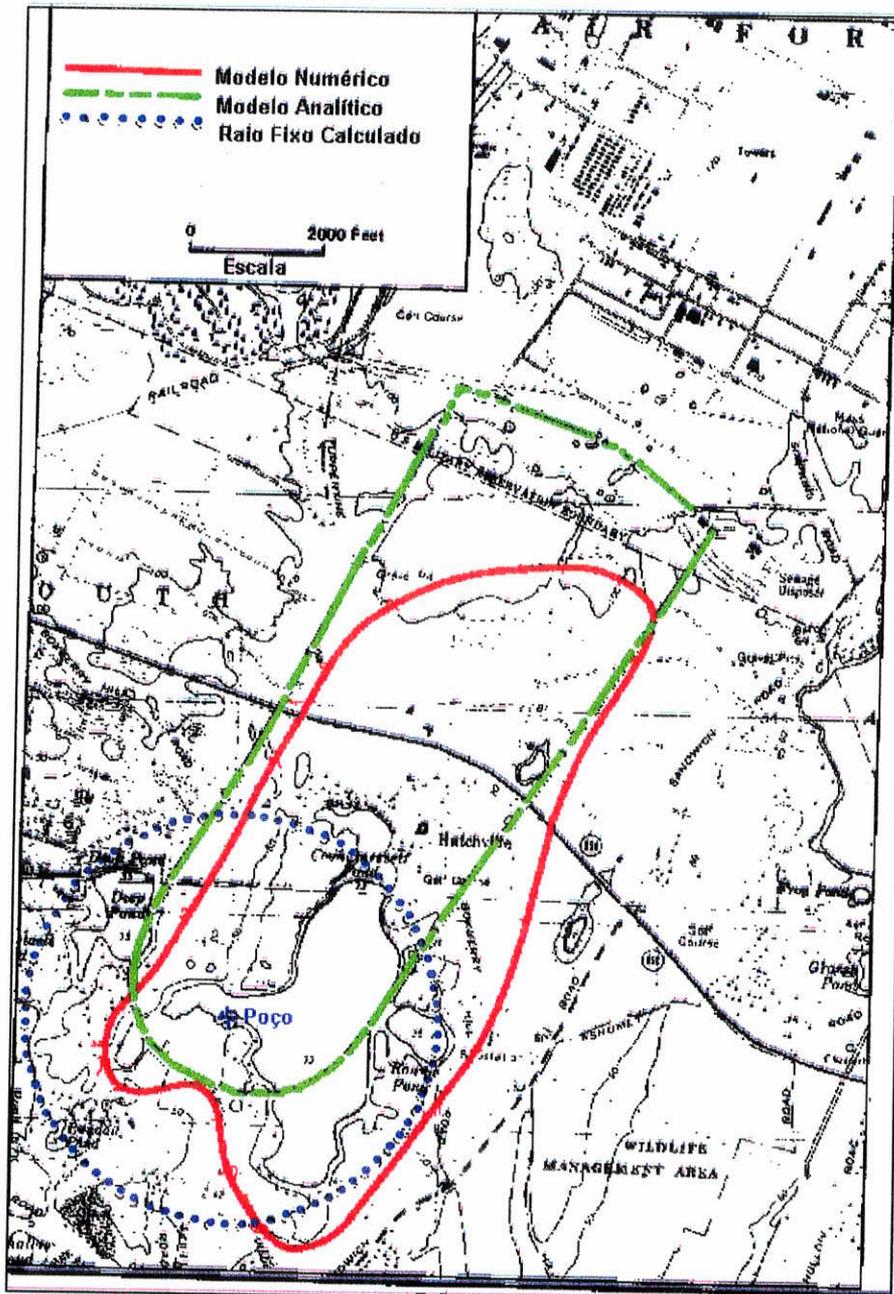
**Quadro 2 - Características do comportamento hidrogeológico**

	Fator	Tipo	Ocorrência na área	Tipo de controle	Fator de Controle
Intrínseca	• Ocorrência espacial dos litotipos	Fixo	Homogênea e heterogênea	Mapeamento geológico	Varia com a escala do trabalho
	• Permeabilidade e porosidade	Fixo	Heterogênea e anisotrópica	Ensaio hidrodinâmico e de laboratório	Varia com a escala do trabalho
	• Condições de contorno	Fixo	Heterogênea e anisotrópica	Mapeamento hidrogeológico e ensaios	Varia com a escala do trabalho e com o tempo
	• Capacidade assimilativa de contaminantes	Fixo	Heterogênea e anisotrópica	Mapeamento hidrogeológico, ensaios de laboratório e monitoramento	Varia com a escala do trabalho e com o tempo
Extrínseca	Potencial de recarga associado ao Clima	Variável	Heterogênea e anisotrópica	Monitoramento e projeções matemáticas	Baseado em prognósticos estatísticos
	Poços bombeamento/ infiltração	Fixo	Heterogênea e anisotrópica	Cadastramento	Proibição legal de novos poços
	Regime de exploração dos poços	Variável	anisotrópico	Monitoramento	Normatização de regime de exploração
	Recarga direta na área	Variável	Heterogênea e isotrópica	Monitoramento hidrogeológico	Planejamento do uso e ocupação do solo
	Recarga indireta (vazamentos e irrigação)	Variável	Heterogênea e isotrópica	Monitoramento das perdas	Variável com a escala de trabalho

**Tabela 3 - Alguns fatores que influenciam na sensibilidade e confiabilidade dos métodos de delimitação dos PPP**

FATOR	EFEITOS	BIBLIOGRAFIA
Gradiente regional e transmissividade	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Largura da PPP é inversamente proporcional ao gradiente e a transmissividade</li> <li>* Gradientes regionais &gt; 0,0005 afetam o formato do PPP;</li> <li>* A influência é dada (HANTUSH, 1994):  <math>XL = \pm Q/2Kbi</math> e <math>YL = \pm Q/2Kbi</math>, onde:            XL = metade da largura da zona de contribuição;            YL = distância do poço ao ponto nulo;            Q = vazão;            K = condutividade hidráulica;            b = espessura saturada;            i = gradiente do aquífero.</li> </ul>	CLEARY, 1992; HANTUSH, 1994; U.S.EPA, 1987
Anisotropia da condutividade hidráulica	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Fluxos são perpendiculares às linha isopotenciométricas em aquíferos isotrópicos;</li> <li>* Fluxos apresentam inclinação em favor da direção da &gt; condutividade;</li> <li>* O ângulo de inclinação é dado (CLEARY, 1992):  <math>\theta_{\text{aniso}} = \text{artg}(Kr\theta_{\text{iso}})</math>, onde:  <math>\theta_{\text{aniso}}</math> = ângulo entre o eixo x da condutividade hidráulica e o fluxo anisotrópico;  <math>\theta_{\text{iso}}</math> = ângulo entre o eixo x da condutividade hidráulica e o fluxo isotrópico;            Kr = relação entre as condutividades hidráulicas nas direções "x" e "y".</li> </ul>	CLEARY, 1992; CUSTÓDIO & LLAMAS, 1983;
Heterogeneidade do meio	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Linhas de fluxos se deslocam mais acentuadas ao longo do meio de maior condutividade hidráulica;</li> <li>* Heterogeneidades podem estar associadas à K, <math>\theta</math> e continuidade das cargas hidráulicas;</li> <li>* Maiores influências verificadas em aquíferos fraturados;</li> <li>* Heterogeneidades acentuadas (fraturas) podem ocasionar fluxos mais velozes e turbulentos, inviabilizando a aplicação da Lei de Darcy;</li> <li>* Forma irregular da PPP</li> </ul>	CLEARY, 1992; U.S.EPA, 1988, 1994
Recarga induzida	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Recargas pontuais ou lineares (lagoas, rios, etc.) limitam e/ou deformam o tamanho do PPP, caracterizando-se como barreiras positivas;</li> <li>* Pode originar um fator de heterogeneidade na qualidade das águas;</li> <li>* A influência da recarga nas velocidades de fluxo é dado pela equação (LERNER, 1992 in HIRATA, 1994):  <math>V_{xr} = (Rx/bn) + T\Delta H/2abn</math>, onde:            R = recarga;            b = espessura saturada;            T = transmissividade;            2a = espessura do aquífero;            n = porosidade efetiva</li> </ul>	CLEARY, 1992; LERNER, 1992
Porosidade efetiva	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Quanto menor a porosidade efetiva, maior será a PPP;</li> <li>* Atua diretamente na velocidade das águas subterrâneas, assim: i) &gt; <math>n_{\text{ef}}</math> &lt; tempo de trânsito (ZT) e ii) &gt; <math>n_{\text{ef}}</math> &lt; zona de influência(ZI);</li> </ul>	CLEARY, 1992;
Capacidade assimilativa do aquífero	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Quanto &gt; capacidade assimilativa, &lt; o PPP;</li> <li>* Quanto &gt; o PPP, &lt; as concentrações do contaminante no poço.</li> </ul>	CLEARY, 1992; HIRATA, 1994





**Figura 5 - Zonas de proteção de poços determinadas para tempo de trânsito de 25 anos (U.S.EPA, 1987)**

### **3.4. ESCOLHA DO MÉTODO DE DELIMITAÇÃO DOS PPP**

A escolha do método de Delimitação dos PPP está associada a:

- a) importância do recurso a ser protegido;
- b) objetivos;
- c) escala de trabalho e conseqüente grau de acuidade desejada;
- d) recursos disponíveis (financeiros, técnicos e humanos);
- e) conhecimento técnico da área;
- f) questões políticas e sociais;
- g) características hidrogeológicas da área;
- h) situação de uso e ocupação da área no qual a futura PPP está inserida.

Para a escolha do método de delimitação de Perímetro de Proteção de Poços (PPP) aplicado neste trabalho, foram consideradas as seguintes questões:

- I. Estudos anteriores indicam uma disponibilidade dos recursos hídricos subterrâneos com potencial para atender cerca de 30% do Campus USP;
- II. O gerenciamento da aplicação deverá ser efetuada pela Prefeitura da Cidade Universitária do Campus USP Armando Salles de Oliveira;
- III. A delimitação do PPP objetiva:
  - determinar as Zonas de Influência (ZI), de Transporte (ZT) e de Controle (ZC) limitadas ao Campus USP,
  - verificar uma possível inversão dos fluxos subterrâneos, induzindo recarga do Rio Pinheiros ou dos Córregos Jaguaré ou Pirajussara, degradando a qualidade das águas subterrâneas,
  - implantar um monitoramento dos recursos hídricos subterrâneos da área;
- IV. O método a ser aplicado deve considerar:
  - heterogeneidades e anisotropia do meio,
  - gradiente hidráulico e recarga heterogênea,
  - tempo de trânsito e transporte,
  - transporte de contaminantes,
  - cone de rebaixamento dos poços;

**V. Características do aquífero:**

- sedimentar poroso,
- tipo confinado a semi-confinado,
- recarga heterogênea e possivelmente induzida,
- gradiente hidráulico de 0,0107,
- condições de contorno bem definidas,
- explorado por mais de um poço;

**VI. Disponibilidade de recursos técnicos, financeiro e humanos;****VII. O Campus é uma área controlada de médio adensamento urbano.**

Assim, tendo em vista que o método da modelagem matemática numérica é aquele que melhor atende aos requisitos supracitados, este foi adotado para a delimitação do Perímetro de Proteção dos Poços que exploram o aquífero sedimentar na área da Campus USP "Armando Salles de Oliveira".

## **4. ASPECTOS FÍSICOS DO CAMPUS USP “ARMANDO SALLES DE OLIVEIRA”**

### **4.1. CONTEXTO FISIAGRÁFICO**

O Campus USP “Armando Salles de Oliveira” possui uma área de 3,59km<sup>2</sup> e situa-se na margem esquerda do Rio Pinheiros, zona oeste da Cidade de São Paulo.

Geomorfologicamente a área do Campus pode ser dividida em duas áreas distintas: uma a norte, correspondente a planície de inundação do Rio Pinheiros, caracteristicamente plana; e outra a sul, topograficamente mais irregular e elevada.

Atualmente a área correspondente a planície de inundação possui vegetação predominantemente do tipo gramínia e umas poucas árvores cultivadas pela administração do Campus. Uma vegetação exuberante, remanescente da Mata Atlântica, ainda se faz presente na porção sul, intercalada com pequenas áreas de reflorestamento com eucalipto.

Hidrograficamente a área de estudo situa-se na bacia do Rio Pinheiros, sendo limitada ao norte pelo Rio Pinheiros, a leste pelo córrego Pirajussara, a oeste pelo Córrego da Paz e a sul pelo divisor de água.

### **4.2. CONTEXTO GEOLÓGICO**

A área de estudo está situada na Borda da Bacia Sedimentar de São Paulo, no Planalto Paulista (ALMEIDA, 1958 e 1983), integrante de uma das porções do denominado *Rift* continental do sudeste do Brasil, da idade cenozóica.

A Bacia de São Paulo compreende uma área de aproximadamente 5.000km<sup>2</sup>, com altitudes médias entre 715 a 900m, relevo suave de espigões relativamente baixos e alguns morros. Seu contexto geotectônico é considerado como sendo um *hemi-graben* basculado de NNW, com espessura máxima de sedimentos estimada em aproximadamente 256m (TAKIYA, 1991).

A Bacia de São Paulo é formada pelos sedimentos Terciários do Grupo Taubaté e Formação Itaquaquetuba, superpostos pelos sedimentos Quaternários da Formação Pindamonhangaba e pelos depósitos colúvio-aluviais e terraços baixos (RICCOMINI, 1989; MELO et al., 1989; RICCOMINI et al., 1992).

O substrato cristalino é formado por migmatitos, gnaisses, xistos, metassedimentos e, subordinadamente, quartzitos e anfibolitos além de granitos sin e pós-tectônicos.

Na porção sul-sudeste da Cidade Universitária, com relevo mais elevado e acidentado, o embasamento cristalino é representado por gnaisses graníticos e migmatitos.

Dos litotipos pertencentes à Bacia de São Paulo, ocorrem na área do Campus as Formações São Paulo e Itaquaquetuba.

RICCOMINI et al. (1992) resume os litotipos como:

A Formação São Paulo, aflorante na porção centro-sul da área de estudo, é constituída por duas litofácies principais:

- a) uma primeira litofácie aflorante próximo a área da Prefeitura da Cidade Universitária, representada por sedimentos areníticos grossos, conglomeráticos, com granodecrescência ascendente para siltitos e argilitos; e
- b) uma segunda litofácie, aflorante próxima ao Instituto de Química, composta por arenitos médios a grossos, com granodecrescência ascendente para siltitos e argilitos.

A Formação Itaquaquetuba, com afloramento próximo à raia olímpica, norte da área, é constituída por cinco litofácies principais:

- a) arenitos médios a grossos, mal selecionados;
- b) conglomerados sustentados por clastos, com seixos de quartzo e quartzito;
- c) arenitos maciços de granulação média a fina;
- d) lamitos maciços, siltico-arenosos de coloração esverdeada; e
- e) blocos sub-angulosos de rochas do embasamento.

A ocorrência de concreções limoníticas de espessuras variadas é freqüente entre sedimentos argilosos e arenosos, sendo comum as surgências de águas que percolam os pacotes arenosos neste contato (RICCOMINI et al., 1992).

Representando depósitos Quaternários na região, são encontrados sedimentos colúvio-aluviais e baixos terraços compostos por intercalações variadas de areias, siltes e argilas.

Na **Figura 6** é apresentado um mapa geológico do Campus.

### **4.3. CONTEXTO HIDROGEOLÓGICO**

Em relação à litologia da região, distinguem-se dois tipos de aquíferos: o Aquífero Cristalino, caracteristicamente fissural heterogêneo e anisotrópico e o Aquífero Sedimentar, do tipo granular, regionalmente homogêneo e isotrópico, ambos descritos a seguir:

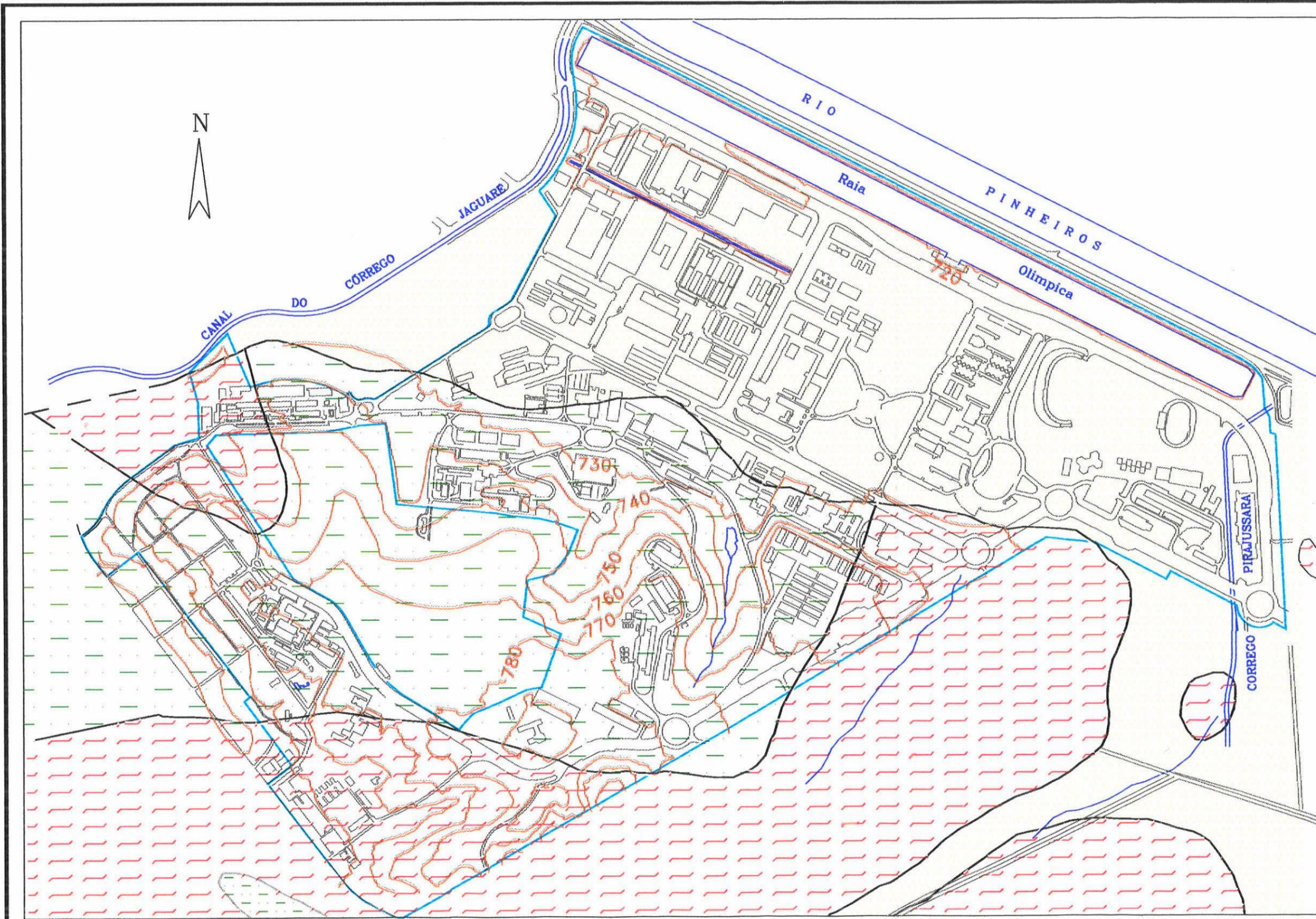
#### **4.3.1. Aquífero cristalino**

Esse aquífero é formado pela água acumulada em duas unidades de características diferentes:

- a) a rocha cristalina alterada (manto de intemperismo), onde a água percola nos interstícios da rocha decomposta;
- b) a rocha cristalina fresca, onde a água flui pelas falhas e/ou fraturas.

Regionalmente o Aquífero Cristalino na área da cidade de São Paulo possui valores de transmissividade média de  $3,5 \text{ m}^2/\text{dia}$  e capacidade específica média de  $8,16 \text{ m}^3/\text{dia.m}$ . Esta transmissividade média, em função das características dos poços tubulares produtores do aquífero cristalino existentes na área, sugere uma permeabilidade média de  $1,85 \times 10^{-2} \text{ m/d}$  (DAEE - 1975, CEPAS, 1994).

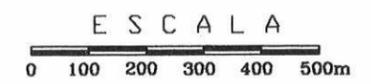
Vale salientar que a forte heterogeneidade e anisotropia características deste aquífero faz com que mais de 75% dos poços cadastrados possuam valores abaixo da média.



LEGENDA :

-  Limite do Campus
-  Curva de Nível (m)
-  Contato geológico
-  Quaternario  
Aluvios fluviais: argila, areia e cascalho
-  Fm São Paulo  
Argilas, areias e cascalhos
-  Embasamento cristalino  
Migmatitas e gnaisses graníticos

Mapa Geológico da  
Região da  
Cid. Universitaria



Base Cartográfica: CEPAS (1988)

Titulo: <b>Delimitação de Perímetros de Proteção dos Poços Tubulares (PPP) Empregando a Técnica de Modelagem Numérica</b>	
Universidade de Sao Paulo Instituto de Geociencias	Dissertação de Mestrado - 1999
Autor: Mário de Brito Marcelino	Figura <b>06</b>

O manto de alteração na RMSF possui espessura média de 50m, podendo atingir até 150m (MENEGASSE VELÁSQUEZ, 1996), com porosidade efetiva da ordem de 3% (CEPAS, 1994). Apresentando um perfil essencialmente argiloso na parte superior e gradando para arenoso no contato rocha sã/alterada, o manto possui condutividade hidráulica variável, da ordem de  $10^{-6}$  a  $10^{-7}$  cm/s no terço superior, a  $10^{-3}$  -  $10^{-4}$  cm/s na base (CAVALCANTE, 1990).

Localmente, dentro da área de estudo, o manto de alteração possui uma profundidade média de 15m e capacidade específica de  $88,2\text{m}^3/\text{dia.m}$  e  $1,08\text{m}^3/\text{dia.m}$  (IRATANI, 1993).

### 4.3.2. Aquífero sedimentar

Aquífero composto pela água armazenada nos interstícios granulares dos sedimentos Terciários e Quaternários da Bacia de São Paulo, com valores regionais médios de capacidade específica de  $1,6\text{m}^3/\text{dia.m}$  e transmissividade de  $50,0\text{m}^2/\text{dia}$  (DAEE, 1975)

IRATANI (1993) em teste hidrodinâmico realizado no PP-1 caracterizou o aquífero sedimentar na área do Campus como semi-confinado a livre, com valores de condutividade hidráulica de  $4,32\text{ m}/\text{dia}$  e transmissividade de  $8,64\text{m}^2/\text{dia}$  e coeficiente de armazenamento variando de  $10^{-4}$  a  $10^{-1}$ , com os maiores valores nas porções mais superficiais.

Diversos trabalhos citam valores de porosidade específica para o aquífero sedimentar, conforme apresentado na Tabela 4.

**Tabela 4 - Valores de Porosidade Específica para o Aquífero Sedimentar**

Autores	Método	Porosidade
CEPAS (1994)	Caráter Faciológico	0,7
DAEE (1975)	Caráter Faciológico	0,02 a 0,1
IRITANI (1993)	Teste Hidrodinâmico	0,2 e 0,12
VELÁSQUEZ (1996)	Ensaio de Laboratório	0,13

O aquífero sedimentar possui fluxos subterrâneos com sentido predominante para nordeste, em direção ao Rio Pinheiros. Possui reserva permanente calculada da ordem de 11 milhões de m<sup>3</sup> de água e reserva reguladora somando um total de 900 mil m<sup>3</sup>/ano (IRATANI, 1993).

#### **4.3.3. Geometria do pacote sedimentar**

Diversos métodos de investigação direta (poços perfurados) e indiretas (geofísica) da espessura dos sedimentos foram executados em estudos anteriores na região da Cidade Universitária.

O CEPAS (1988a) realizou uma ampla investigação indireta da espessura do pacote sedimentar pelo método geofísico da eletrorresistividade através da execução de 45 sondagens elétricas verticais (S), com 20 delas identificando o topo do embasamento (**Tabela 5**).

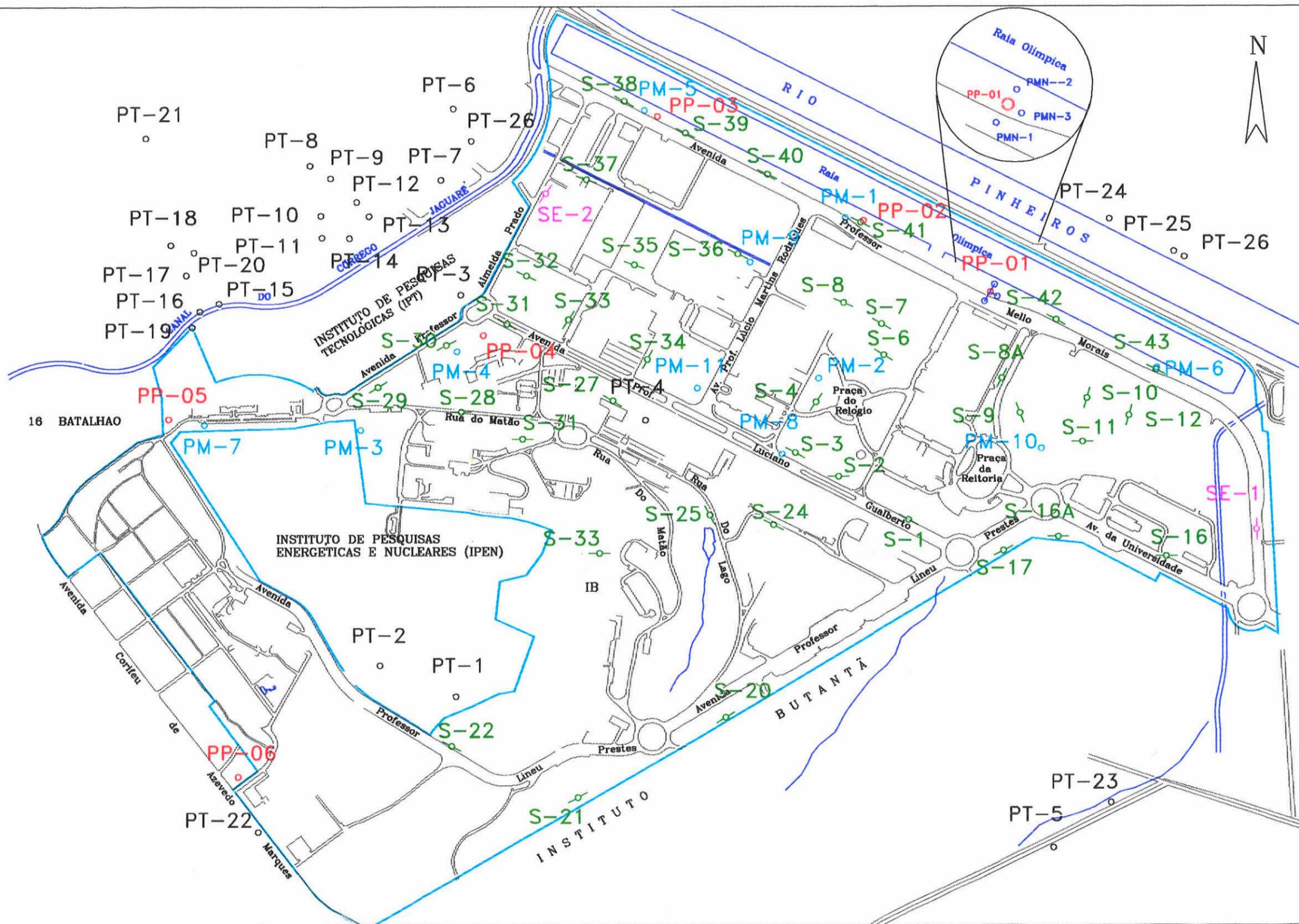
Objetivando complementar a investigação indireta, foram realizadas mais duas sondagens elétricas dentro da área do Campus, denominadas de SE-1 e 2.

Na **Figura 7** é apresentado um mapa de localização das sondagens elétricas supracitadas, e na **Figura 8**, um blocodiagrama da distribuição espacial dos principais litotipos observados na área.

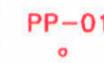
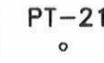
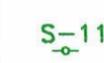
**Tabela 5 - Sondagens elétricas verticais executadas na área**

S-6	30,0	S-33	24,5
S-8	40,0	S-33A	36,3
S-8A	70,0	S-34	38,8
S-9	20,4	S-38	24,6
S-11	86,4	S-39	46,7
S-16	48,	S-40	50,1
S-22	46,0	S-41	41
S-28	68,0	S-42	79,0
S-29	101,8	S-43	58,6
S-30	70,0	SE-1	35,6
S-31	19,2	SE-2	49,9

Como forma de dados de investigação direta, existem cadastrados na região 32 poços tubulares (PT). Na **Tabela 6** são apresentados as principais características dos poços tubulares. Além dos poços tubulares supracitados, na área são cadastrados ainda 11 poços de monitoramento e 3 poços multiníveis. As localizações destes poços são apresentadas na **Figura 7**.



**LEGENDA :**

-  Limite do Campus
-  **PP-01** Poço Tubular Produtor USP
-  **PM-10** Poço de Monitoramento
-  **PMN-1** Poço de Monitoramento Multinível
-  **PT-21** Poço Tubular Cadastrado
-  **S-11** Sondagem Elétrica (CEPAS 1988)
-  **SE-1** Sondagem Elétrica Executada

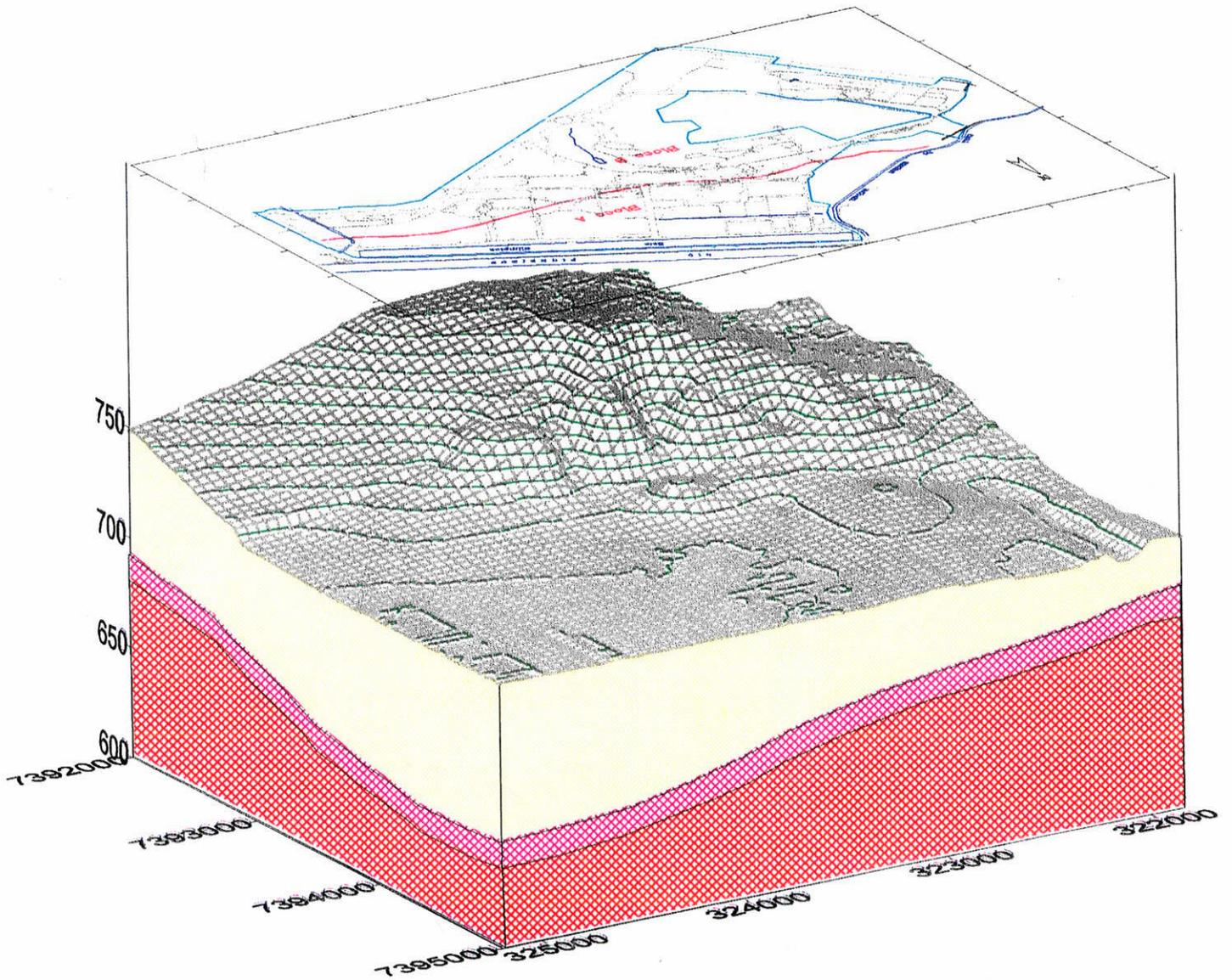
**Mapa de Localização dos Poços Cadastrados e Sondagens Elétricas**



Base Cartográfica: CEPAS (1988), Iratani (1993)

Título:  
**Delimitação de Perímetros de Proteção dos Poços Tubulares (PPP) Empregando a Técnica de Modelagem Numérica**

Universidade de São Paulo Instituto de Geociências	Dissertação de Mestrado - 1999
Autor: Mário de Brito Marcelino	Figura <b>07</b>



**LEGENDA:**

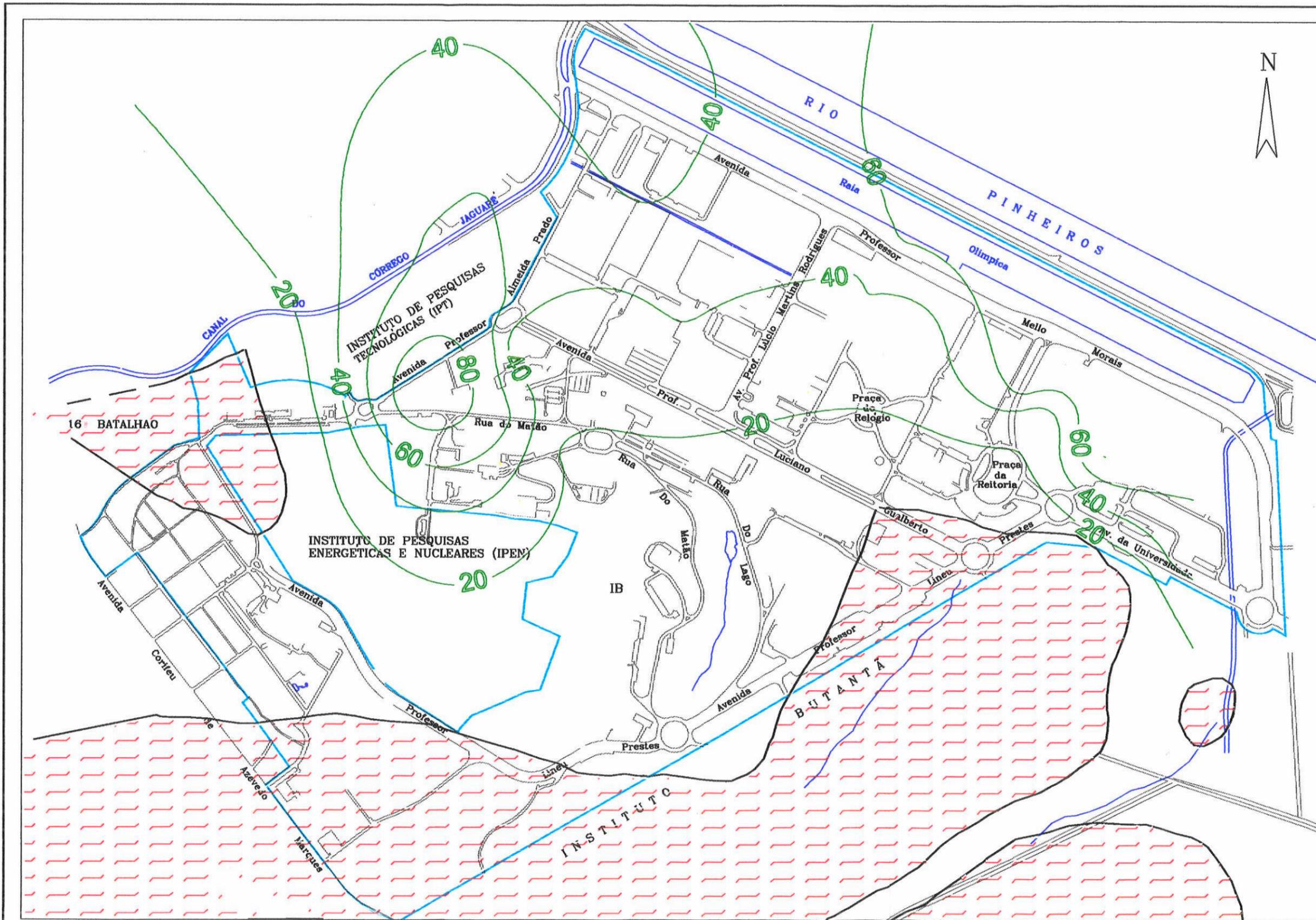
- |  |  |
|--|--|
|  Sedimento      |  Rocha cristalina |
|  Rocha alterada |  |

**Figura 8 - Blocodiagrama da Distribuição Espacial dos Litotipos**

Tabela 6 - Principais características dos poços cadastrados

PT-1	IPEN	8,0	82,0	2,5	200,0	10,0
PT-2	IPEN	36,0	90,0	0,6	199,0	10,0
PT-3	IPT	0,0	8,0	26,6	63,0	63,0
PT-4	USP - FAU	2,0	9,0	56,0	60,0	60,0
PT-5	CORNER SA	2,0	76,0	8,5	150,0	38,0
PT-6	USINA COLOMBINA	13,0	49,0	6,5	81,0	45,0
PT-7	CONCRETEX SA	15,0	28,5	30,0	68,0	61,0
PT-8	SOBRAF SA	5,5	14,0	14,5	57,0	56,0
PT-9	SOBRAF SA	15,0	36,0	6,8	56,5	55,0
PT-10	CIA ANTARCTICA	15,0	23,5	25,0	56,3	53,0
PT-11	CIA ANTARCTICA	15,0	23,7	25,0	52,9	52,0
PT-12	CIA ANTARCTICA	3,0	19,0	28,0	58,7	58,0
PT-13	CIA ANTARCTICA	6,5	27,5	28,0	66,5	58,0
PT-14	CIA ANTARCTICA	15,5	28,0	24,0	53,0	53,0
PT-15	COLGATE PALMOLIVE	-	-	-	13,8	10,0
PT-16	COLGATE PALMOLIVE	0,0	85,0	0,8	135,0	16,0
PT-17	COLGATE PALMOLIVE	0,5	13,0	40,0	44,0	42,0
PT-18	COLGATE PALMOLIVE	4,0	35,0	6,0	57,0	54,0
PT-19	COLGATE PALMOLIVE	-	-	-	13,0	10,0
PT-20	COLGATE PALMOLIVE	12,0	29,0	7,2	45,5	44,0
PT-21	FLICK	13,0	39,0	17,6	73,0	68,0
PT-22	DROGASIL	5,0	99,0	3,1	155,0	29,0
PT-23	V. SANTA MADALENA	6,0	10,0	6,0	65,0	-
PT-24	TELEMECANICA	17,0	85,0	15,0	150,0	9,0
PT-25	FIBRAS SINTETICAS	54,0	95,0	36,0	255,0	14,0
PT-26	ABCP				300	
PP-01	USP - RAIA CRUSP	4,3	46,5	36,6	72,0	71,0
PP-02	USP - RAIA PSICOLOGIA	4,6	28,6	20,0	66,0	64,0
PP-03	USP - RAIA POLI	3,8	21,0	6,0	36,0	36,0
PP-04	USP - Pça R. AZEVEDO	7,25	29,0	20,0	50,0	48,0
PP-05	USP - HOSPITAL	2,6	67,2	6,5	152,0	10,0
PP-06	USP - PREFEITURA	8,7	125,8	9,0	200,0	10,0

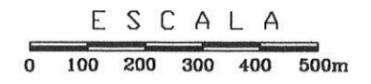
Devido a necessidade de se trabalhar com a geometria do terreno em cota absoluta, foi feita a integração dos dados de profundidades da base do pacote sedimentar (topo do embasamento) e gerado mapas de espessura de sedimentos, **Figura 9**, através do método de krigagem linear com todos os dados existentes.



LEGENDA :

-  Limite do Campus
-  Contato Geológico
-  Embasamento Cristalino Aflorante
-  Curva de Isopropfundidade (m)

Mapa de Isolinhas de Espessura de Sedimentos



Título: <b>Delimitação de Perímetros de Proteção dos Poços Tubulares (PPP) Empregando da Técnica de Modelagem Numérica</b>	
Universidade de São Paulo Instituto de Geociências	Dissertação de Mestrado - 1999
Autor: Mário de Brito Marcelino	Figura <b>09</b>

De uma maneira geral, os sedimentos apresentam progressivo aumento da espessura em direção nordeste, à calha do Rio Pinheiros, com espessuras máximas em torno dos 70 metros, na área do CEPUSP.

O mapa de isolinhas de espessura indica uma grande depressão do topo do embasamento, onde os sedimentos possuem espessuras superiores a 70m, localizada no extremo noroeste da área de estudo, com centro próximo à entrada do IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas.

#### **4.3.4. Hidrogeoquímica**

Genericamente a qualidade da água subterrânea depende das características primárias da rocha armazenadora (litologia), tempo de residência (velocidade de circulação), da qualidade da água de recarga e da interação com outras águas ou aquíferos. A degradação da qualidade pelas características da água infiltrada e/ou interação com demais corpos d'água está intimamente ligada com a vulnerabilidade do aquífero.

O aquífero sedimentar da Bacia de São Paulo, no Município de São Paulo, possui características químicas gerais satisfatórias para o consumo humano (PARISOT, 1983), sendo a principal causa de não potabilidade destas águas o excessivo teor de ferro e, em segundo plano, altas concentrações de nitratos ou coliformes (PACHECO, 1984).

De uma maneira geral, IRATANI (1993) classifica as águas subterrâneas na região de estudo como quimicamente potáveis, possuindo, no entanto, altas concentrações de ferro e manganês. No seu estudo, as águas do Aquífero Cristalino apresentam-se mais mineralizadas do que as do Aquífero Sedimentar, e classificam-se como bicarbonatadas cálcicas (PM-7). As águas do Aquífero Sedimentar classificam-se predominantemente como bicarbonatadas cálcicas a sódicas, com ocorrência de águas sulfatadas no norte do Campus.

Os valores calculados de potencial de corrosão ou incrustação utilizando-se o índice de Rysnar mostram um índice de estabilidade maior que 9, indicando caráter muito corrosivo das águas subterrâneas do local. Este fator deve ser considerado quando da escolha dos materiais e/ou equipamentos a serem utilizados na construção dos poços tubulares de produção e rede de adução.

#### 4.3.5. Recarga e Evapotranspiração

IRATANI (1993) estimou a reserva reguladora por dois métodos distintos, de fluxo e volumétrico, obtendo valores similares representativos da recarga da área da Cidade Universitária.

Para o cálculo da reserva reguladora pelo método de fluxo foi considerado um fluxo das águas subterrâneas horizontal em direção ao Rio Pinheiros, obtendo um valor de 879.694 m<sup>3</sup>/ano, equivalendo a uma recarga de 0,245 Mm<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>/ano, ou 245 mm/ano.

A reserva reguladora obtida pelo método volumétrico foi estimada em 913.063 m<sup>3</sup>/ano, equivalendo a uma recarga de 0,254 Mm<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>/ano, ou 254 mm/ano. Na estimativa desta recarga, IRATANI (1993) compartimentou a área em apreço em dois blocos, conforme apresentado na **Figura 10**, devido as áreas apresentarem variações do nível estático distintos. Assim, para o bloco A foi calculada uma reserva reguladora de 221.853 m<sup>3</sup>/ano e o bloco B 691.063 m<sup>3</sup>/ano, representando uma recarga específica de 0,18 e 0,29 Mm<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>/ano, ou 180 e 290 mm/ano.

Partindo de uma precipitação plurianual média de 1.485mm (FCTH, 1996) na área da Cidade Universitária (**Gráfico 1**), obtem-se uma taxa de recarga de 12,1% para o bloco A e 19,5% para o bloco B.

Esta diferença foi justificada pela autora como decorrente de uma menor infiltração em função de possuir uma área impermeabilizada relativa maior e da existência de um nível argiloso mais espesso (aterro) no bloco A, apesar de possuir uma menor inclinação do terreno. Deve-se acrescentar ainda, que o bloco A constitui uma área de descarga natural dos fluxos subterrâneos, e não uma área de infiltração.

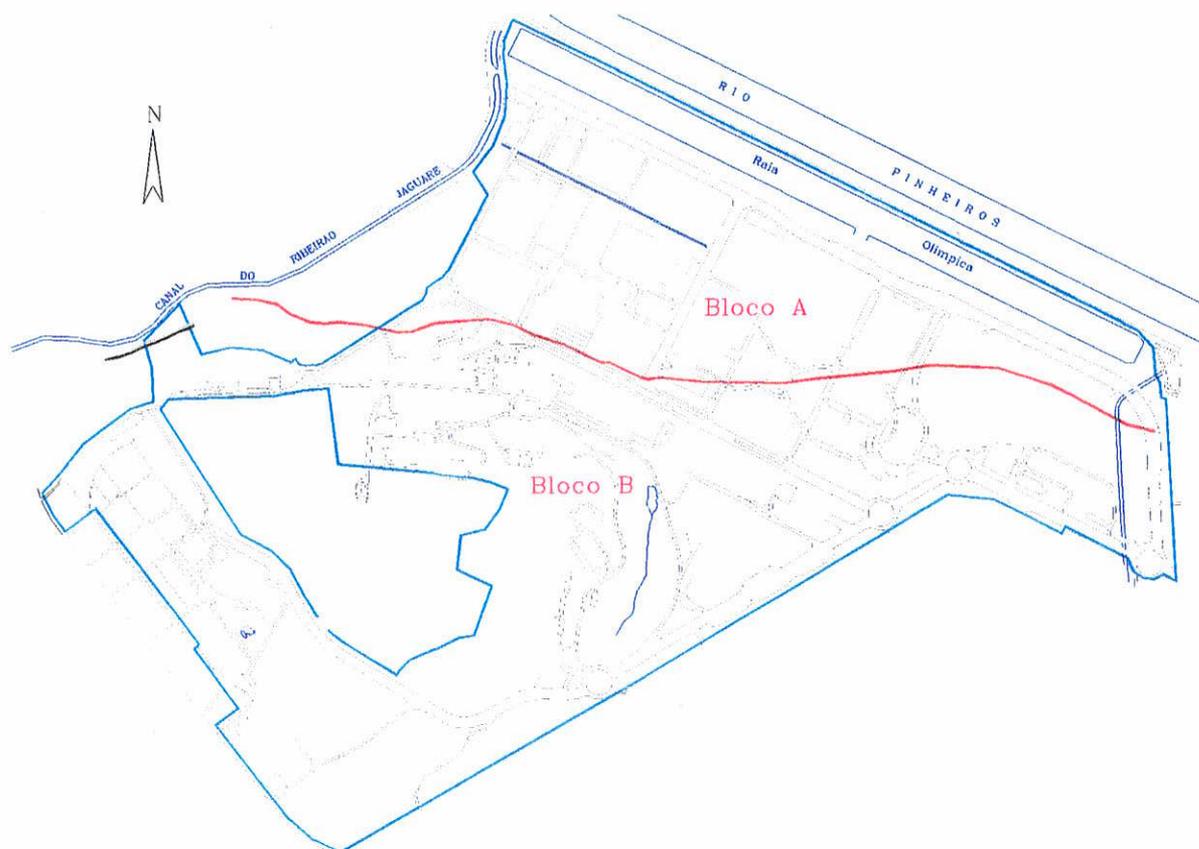
MENEGASSE VELÁSQUEZ (1996) em estudo hidrológico nas Sub-Bacias de Sumaré e Pompéia, com contexto hidrogeológico semelhante à área da Cidade Universitária, considerando as impermeabilizações provenientes da urbanização, bem como a situação de pré-ocupação (sem a impermeabilização), obteve valores de balanço hídrico conforme apresentado na **Tabela 7**.

**Tabela 7 - Balanço hídrico anual (mm/ano) da região das Sub-Bacias de Sumaré e Pompéia, Município de São Paulo/SP (modificado de MENEGASSE VELÁSQUEZ, 1996)**

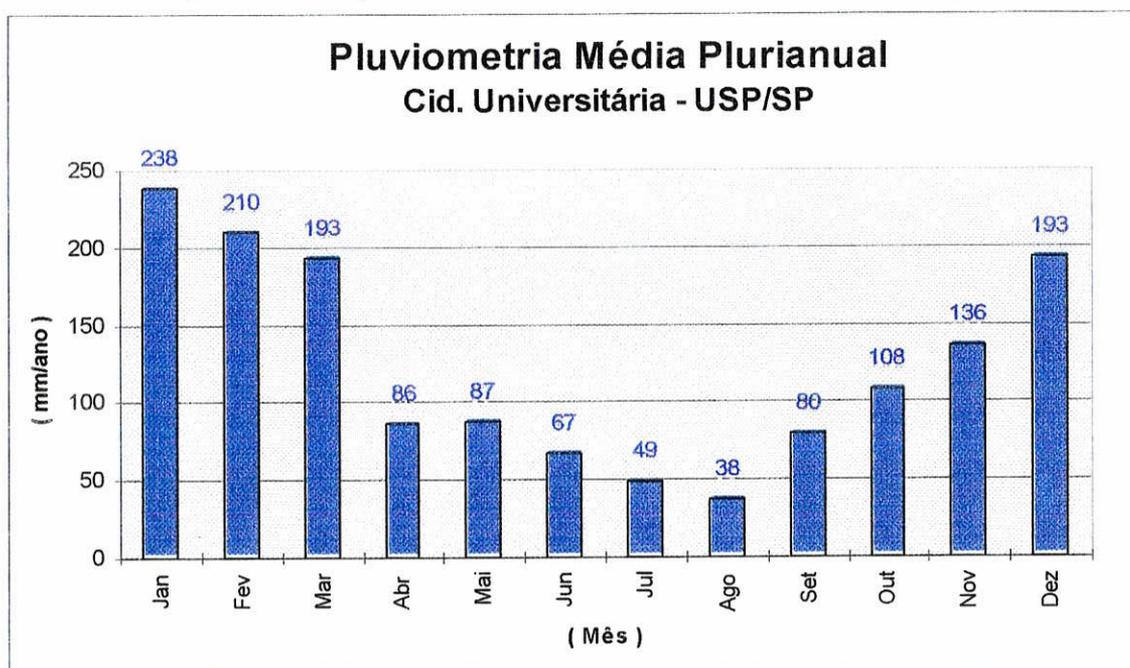
<b>Componente</b>	<b>Situação pré ocupação</b>	<b>Situação pós ocupação</b>
Precipitação	1818,0mm	1818,0mm
Runoff	581,8mm (32%)	1290,8mm (71%)
Recarga	254,5mm (14%)	72,7mm (4%)
Evapotranspiração	981,7mm (54%)	454,5mm (25%)

Em estudo da zona vadosa efetuada por SURITA (informações verbais) nos sedimentos da Fm Adamantina (Grupo Bauru, Cretáceo Superior) na região de Bauru/SP, indica-se uma influência da evapotranspiração de até 3,5m, ou seja, uma *profundidade de extinção* (McDONALD & HARBOUGH, 1988. Ver item 5.4.3.5, pg. 87) da evapotranspiração a 3,5m de profundidade.

Pode-se estimar a profundidade de extinção mais rasa na área da Cidade Universitária, devido a área estar exposta a uma menor ensolação e possuir predominância de um solo mais argiloso.



**Figura 10 - Compartimentação hidráulica da Cidade Universitária (IRATANI, 1993)**



**Gráfico 1 - Média pluri-anual das precipitações na Cidade Universitária no período de Set/73 a Fev/93, Estação E3-251**

## **5. MODELAGEM MATEMÁTICA**

### **5.1. INTRODUÇÃO À MODELAGEM MATEMÁTICA**

A caracterização dos aquíferos, a quantificação dos fenômenos de fluxo e de transporte, é fator fundamental no planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos. Esta quantificação pode ser executada de diversas maneiras, desde medidas de campo a modelagem matemática.

Medidas de campo normalmente são pontuais (nível d'água em um poço, permeabilidades em um ponto ou litotipo, etc.), e como as águas subterrâneas movem-se, em média, alguns centímetros por ano, muitas vezes são necessários alguns anos de estudo para a caracterização do comportamento do aquífero.

Assim, apesar das medições diretas de campo serem a mais acuradas, raramente podem ser utilizadas sozinhas, devido seus altos custos e longos prazos de execução, além da impossibilidade de serem aplicadas em prognósticos (impacto de lixão, mineração, etc.).

Atualmente, o mais freqüente é a representação artificial dos sistemas aquíferos através da utilização de modelos matemáticos utilizando equações de conservação de massa para simulação de fluxo e transporte de contaminantes, baseados nas propriedades físico-químicas medidas e inferidas do local. O desenvolvimento dos computadores pessoais com elevada capacidade de memória e velocidade de cálculo fez com que esta ferramenta seja amplamente utilizada, não sendo necessário o conhecimento de programação e domínio dos cálculos matemáticos envolvidos na modelagem. Não obstante, é vital a compreensão do modelo conceitual do cenário hidrogeológico a ser modelado.

A aplicação de modelos matemáticos objetiva representar o cenário hidrogeológico em questão, geralmente de maneira simplista, visando fornecer subsídios quantitativos em conjunto com os dados de campo e a experiência do profissional que o aplica para a tomada de decisões técnicas.

A utilização de modelos matemáticos tem que ser vista apenas como mais uma ferramenta para o estudo hidrogeológico. A sua aplicação ainda hoje origina algumas controvérsias, prevalecendo duas opiniões distintas acerca de sua utilização (ANDERSON & WOESSNER, 1994):

- ✓ modelos são desprezíveis porque eles requerem muitos dados e são caros para se coletar e executar. Além disso, nunca pode ser demonstrado que eles estão corretos, não possuindo uma certeza científica;
- ✓ modelos são essenciais na análise de situações complexas e na elaboração de prognósticos.

Estas opiniões contraditórias são conseqüência da divulgação dos modelos matemáticos como a solução para todos os problemas hidrogeológicos, e não apenas como mais uma, apesar de poderosa, ferramenta para os hidrogeólogos. Os modelos apresentam resultados conseqüentes de uma visão simplificada da hidrogeologia em função dos dados coletados. Mas estes resultados serão ponderados em função de todos os dados considerados. Assim, os modelos possibilitam a análise de uma gama muito grande de informações em um tempo curto, possibilitando a tomada de decisões com melhor embasamento técnico-científico, apesar de , ainda, imperfeito.

Os modelos matemáticos podem ser aplicados a (CLEARY, 1989 e 1991, ANDERSON & WOESSNER 1994, WHB 1998):

- entendimento do comportamento hidrogeológico regional;
- gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos:
  - \* locação de poços tubulares;
  - \* determinação do melhor regime de bombeamento;
  - \* delimitação de zonas de proteção e interferência entre poços;
- prognósticos:
  - \* rebaixamento;
  - \* transporte de contaminante e respectiva concentração no tempo e espaço.
- avaliação de projetos de remediação:
  - \* avaliação de risco;
  - \* comparação e otimização de sistemas de remediação;
  - \* determinação do projeto técnico básico de remediação.

Para a elaboração de um modelo matemático, usualmente seguem-se as etapas apresentadas no fluxograma apresentado na **Figura 11** (MARCELINO 1998, modificado de CLEARY, 1991, ANDERSON & WOESSNER, 1994, WHB, 1998), descritas a seguir.

### **5.1.1. Conhecimento do problema**

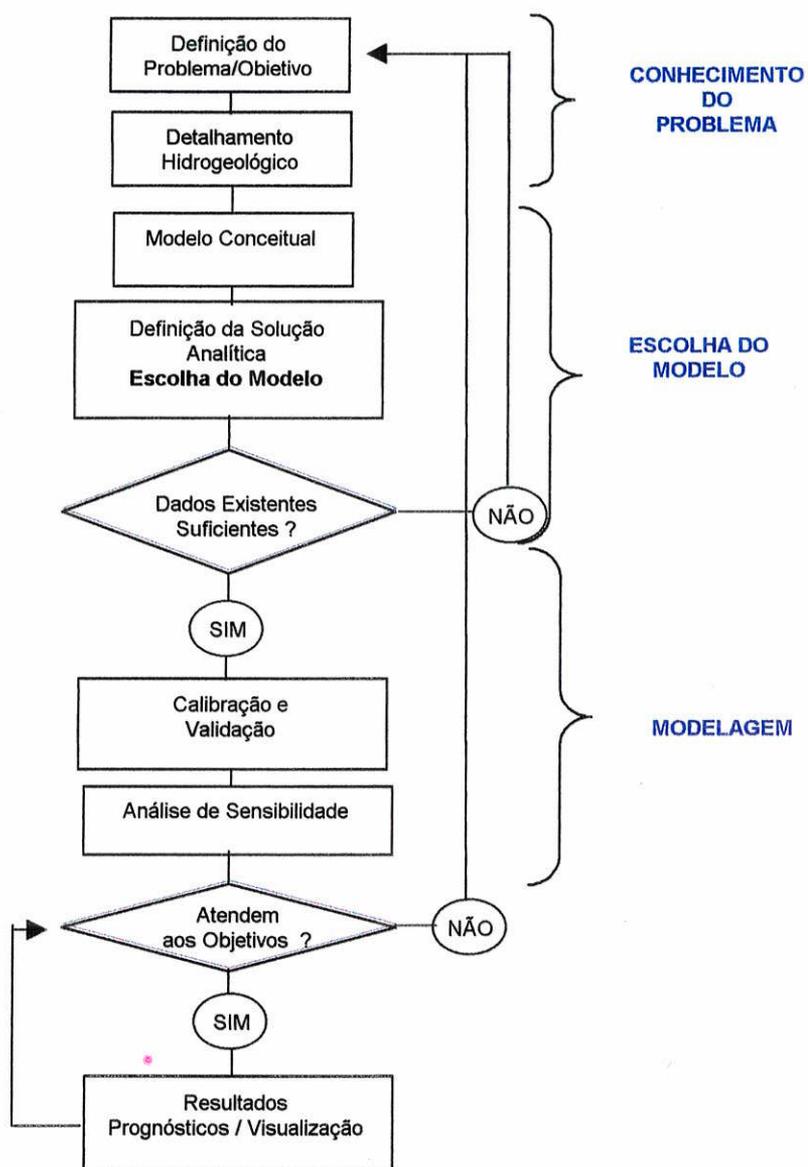
#### **5.1.1.1. Definição do problema/objetivo**

Para a aplicação de qualquer metodologia científica, é necessário conhecer com clareza o problema a ser resolvido, os objetivos a serem alcançados. Com os objetivos definidos, podem-se visualizar as dificuldades a serem enfrentadas para se atingir estes objetivos, e então, ser definida a metodologia a ser aplicada, desde a coleta até a análise dos dados, objetivando a solução do problema.

#### **5.1.1.2. Detalhamento hidrogeológico**

Os modelos matemáticos são uma excelente ferramenta de consolidação da visão do cenário hidrogeológico, produzindo resultados só, e somente só, em função das informações nele inseridas. Assim, para sua aplicação, é mister o conhecimento hidrogeológico básico da área, o entendimento da região.

Os principais parâmetros investigados em um estudo hidrogeológico são: a transmissividade "T" e o coeficiente de armazenamento "S", caracterizando assim, capacidades de fluxo e de armazenamento dos aquíferos e das camadas confinantes. Para estudos de poluição em aquíferos são consideradas, principalmente, as velocidades e direções de fluxos, que são obtidos resolvendo-se equações de fluxos.



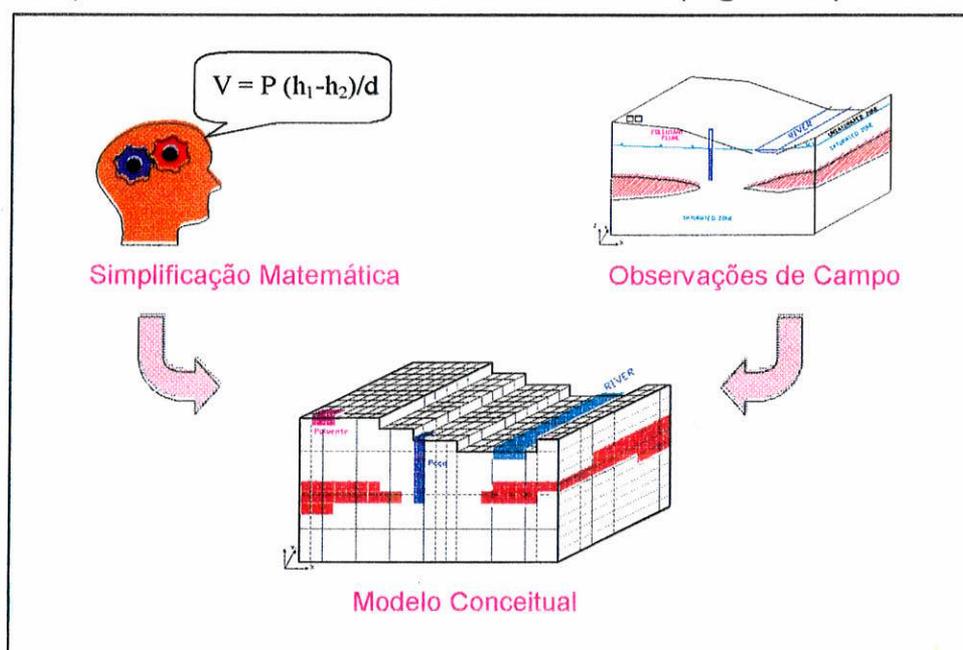
**Figura 11 - Sugestão de etapas a serem seguidas para a elaboração de um modelo hidrogeológico matemático (MARCELINO 1998, modificado de CLEARY, 1991, ANDERSON & WOESSNER, 1994, WHB, 1998)**

## 5.1.2. Escolha do modelo matemático

### 5.1.2.1. Modelo conceitual

Com os objetivos definidos, o conhecimento do problema a ser resolvido, deve-se formular o modelo conceitual do sistema hidrogeológico em questão, freqüentemente expresso na forma de uma seção e/ou blocodiagrama.

Segundo ANDERSON & WOESSNER (1994), a proposta de se criar um modelo conceitual é simplificar o problema de campo e organizar os dados de campo para que o sistema possa ser analisado mais realisticamente (**Figura 12**).



**Figura 12 - Processo de elaboração de um modelo hidrogeológico conceitual**

Basicamente os modelos numéricos irão calcular, de uma maneira geral, a carga hidráulica a cada intervalo de tempo em todos os nós, isto é, a variável dependente. A partir da carga hidráulica, são calculadas as velocidades de percolação, através da lei de Darcy. A apresentação normalmente é feita na forma gráfica de contorno, produzindo o mapa potenciométrico.

Diversos outros resultados podem ser conseguidos através do cruzamento dos dados, como por exemplo, na delimitação de áreas de proteção de poços, onde o contorno é estabelecido em função do tempo de trânsito usando a distribuição de cargas, da condutividade hidráulica, porosidade efetiva e a lei de Darcy. No caso de estudos de transporte de partículas, as velocidades são calculadas em cada nó através da diferenciação numérica das cargas.

Assim, para a formulação do modelo conceitual deve-se definir a área de interesse e as condições iniciais e de contorno do modelo.

Para a resolução da equação numérica faz-se necessário a definição de uma condição inicial para o tempo igual a zero ( $h = h_{x,y,z,0}$ ). Segundo CLEARY (1989) esta informação normalmente é desconhecida, e muitos modeladores utilizam uma carga constante média. A fim de minimizar interferências de possíveis definições de carga constante errônea, é recomendável que a definição desta no modelo seja o mais distante possível da área de interesse (MARCELINO, 1997).

As condições de contorno devem, quando possível, coincidir com os limites hidrogeológicos naturais (rios, lagos, divisor de águas, etc.). Em algumas situações não é possível utilizar os limites hidrogeológicos naturais no modelo matemático, principalmente quando os limites se encontram muito distantes da área de interesse. Entretanto, tais limites naturais tem que ser identificados quando da concepção do modelo conceitual.

As condições de contorno podem ser classificadas em (CLEARY, 1989):

**a) Carga ou de Dirichlet**

$$h = h(x,y,z,0) \text{ para } t = 0$$

**b) Fluxo ou de Neumann**

$$-k_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} = f(y,z,t) \text{ para } t = 0$$

c) Misto

Uma combinação dos tipos anteriores, como por exemplo (CLEARY, 1988)

$$-K_z \frac{\partial H}{\partial Z} = \frac{K'}{b'} (H_o - H)$$

$$-K_z \frac{\partial H}{\partial Z} + \frac{K'}{b'} H = \frac{K'}{b'} H_o$$

Em  $Z = 0$

Na **Figura 13** são apresentados as condições de contorno dos três tipos, usualmente observadas em campo.

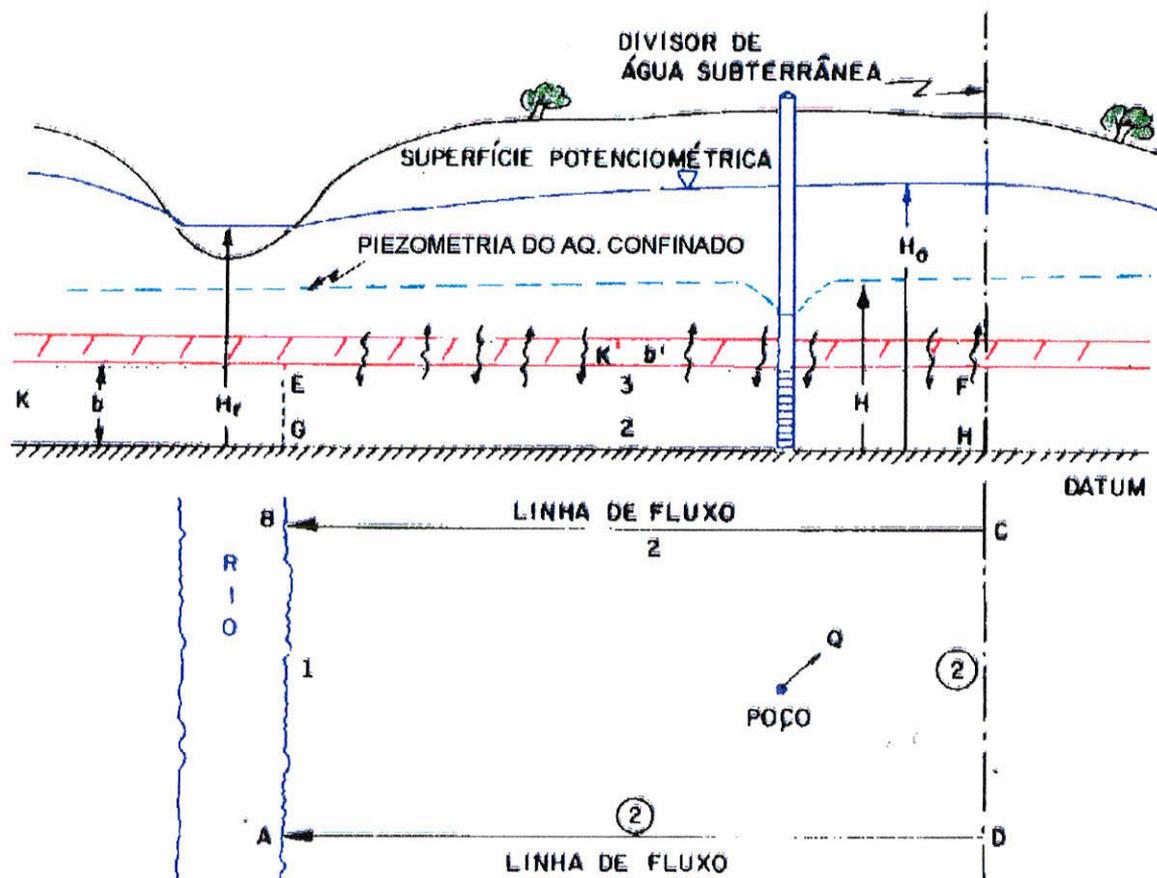
Três passos são, necessariamente, seguidos na elaboração do modelo conceitual (ANDERSON & WOESSNER, 1994):

- I. definição das unidades hidrogeológicas;
- II. preparação do balanço hídrico;
- III. definição do sistema de fluxo.

### 5.1.2.2. Escolha do modelo

Existem vários modelos hidrogeológicos matemáticos disponíveis atualmente no mercado, podendo ser para estado estacionário ou transitório, aquífero confinado ou não confinado, em uma, duas ou três dimensões. Para a escolha do modelo, deverão ser avaliadas as seguintes questões antes de sua adoção (CLEARY 1989, MARCELINO 1997 e 1998, WHB 1998):

- a) que atenda os objetivos pré-definidos;
- b) que utilize os dados existentes ou possíveis de serem coletados;
- c) que considere os dados existentes (anisotropias e/ou heterogeneidades);
- d) se caso judicial, que o mesmo seja reconhecido pela justiça;
- e) que possua histórico conhecido pela comunidade científica, para avaliação de suas limitações;
- f) ser acessível, técnica e economicamente.



**Figura 13 – Exemplos de condições de contorno.**

- 1° Tipo: AB – carga constante para o aquífero freático;
  - 2° Tipo: BC, CD, AD – fluxo nulo para ambos os aquíferos;
  - 2° Tipo: GH – fluxo nulo para o aquífero confinado;
  - 3° Tipo: EF – drenança entre os aquíferos.
- (CLEARY, 1989)

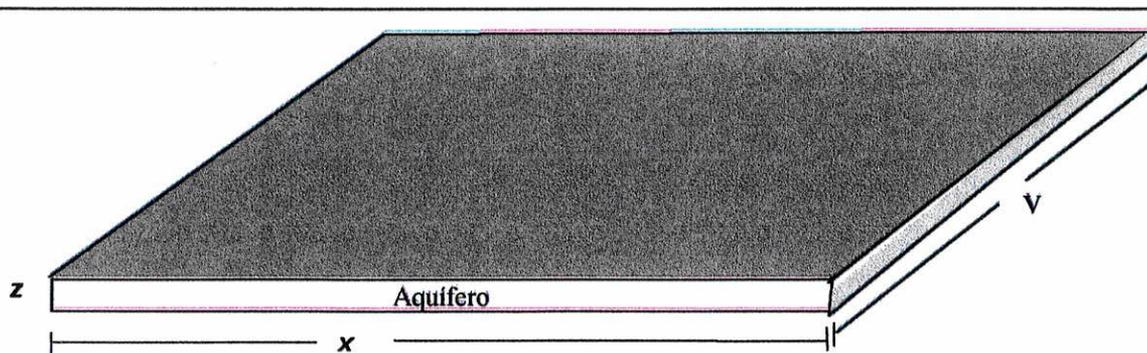
Usualmente são aplicados modelos determinísticos em sua estrutura, relacionando causa e efeito, sem elementos de incerteza. Modelos estocásticos, onde são mensuradas as incertezas dos cálculos, podem ser aplicados, em um futuro próximo, a transporte de contaminantes, em que as heterogeneidades geológicas naturais ocasionam efeitos não possíveis de serem controlados.

Nos modelos determinísticos atualmente utilizados, a sua grande maioria utiliza uma abordagem numérica por diferenças finitas, em função de algumas vantagens em relação a abordagem por elementos finitos, conforme apresentado na **Tabela 8**.

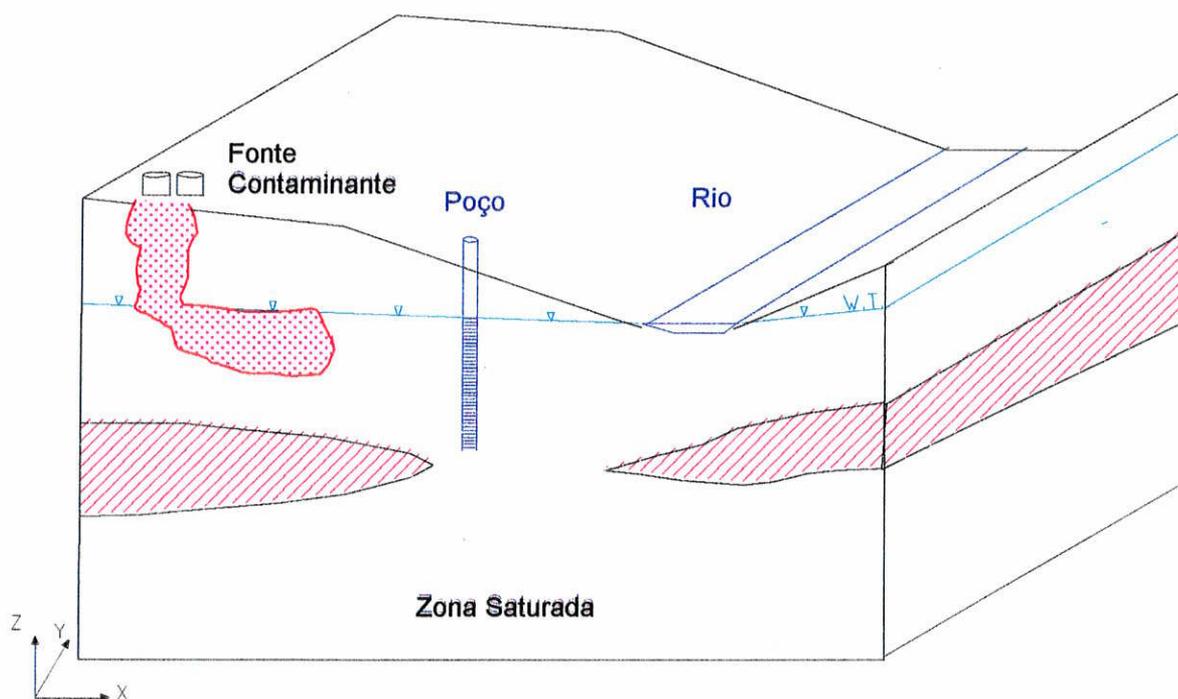
**Tabela 8 - Comparação da abordagem numérica por diferenças finitas e por elementos finitos (MARCELINO, 1997)**

DIFERENÇAS FINITAS	ELEMENTOS FINITOS
<b>Vantagens:</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• aceita anisotropias e heterogeneidades;</li> <li>• discretiza variáveis (x, y, e z) no espaço;</li> <li>• mais fácil de trabalhar;</li> <li>• maioria dos modelos atuais a utilizam.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• aceita anisotropias e heterogeneidades;</li> <li>• discretiza variáveis (x, y, e z) no espaço;</li> <li>• entrada de valores sobre uma área e de forma mais acurada;</li> <li>• apresenta resultados sobre uma área;</li> <li>• possibilidade de trabalhar com meios totalmente anisotrópicos (3D)</li> </ul>
<b>Desvantagens:</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• entrada de valores em nós;</li> <li>• apresenta resultados pontuais;</li> <li>• obrigatoriedade das heterogeneidades coincidirem com os eixos x, y</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• mais complicado de trabalhar</li> <li>• poucos modelos a utilizam. (1)</li> </ul>

Para modelos de análise de fluxo, onde é considerado o aquífero integralmente, usualmente são aplicados modelos bidimensionais, pois os aquíferos de uma maneira geral, possuem dimensões horizontais (x, y) centenas de vezes superiores a dimensão vertical (z). Assim sendo, conceitualmente, os aquíferos na maior parte de sua extensão, possuem fluxos predominantes bidimensionais. Em estudos de transporte de poluentes (avaliações pontuais em relação ao aquífero), deverão ser aplicados modelos tridimensionais uma vez que as dimensões envolvidas (x, y, z) são equivalentes, possuindo fluxos verticais importantes (**Figura 14**).



**Dimensões genéricas de um aquífero  
( Modelo Bidimensional )**



**Dimensões genéricas de aquífero contaminado  
Modelo Tridimensional**

**Figura 14 - Considerações das dimensões do aquífero a ser modelado na escolha do modelo matemático (MARCELINO, 1998)**

### **5.1.3. Calibração e Validação**

#### **5.1.3.1. Calibração**

A calibração objetiva reproduzir as condições existentes no campo, detectando e eliminando possíveis erros do modelo, fornecendo subsídios a prognósticos confiáveis. Deve-se salientar, que mesmo os dados de calibração devem ser avaliados quanto a sua representatividade. Estes, devem possuir quantidade e qualidade suficientes para o escopo do trabalho.

A calibração objetiva checar a representatividade do modelo em relação ao sistema hidrogeológico natural, detectando e eliminando erros, verificando assim, a confiabilidade dos resultados (prognósticos) por ele apresentado.

Deve-se salientar que, um modelo calibrado não significa, necessariamente dizer, que o modelo é representativo do sistema natural, pois a solução não é única. Assim, devem ser utilizados critérios qualitativos e quantitativos de calibração e que estes critérios (ou parâmetros) estão sujeitos a incertezas e interpretações.

Os critérios de calibração, qualitativos e quantitativos, podem ser divididos em: de fluxo ou de transporte (WHB, 1998), conforme apresentado na **Tabela 9**.

#### **5.1.3.2. Validação**

O modelo bem calibrado é aquele que é verificado, isto é, os prognósticos são verificados em campo.

A validade do modelo é usualmente verificada quando os prognósticos do modelo são comparados com os dados de campo, como por exemplo, a previsão da distribuição da carga hidráulica em um tempo futuro sem ajustar os parâmetros do aquífero (CLEARY, 1989). Esta ainda pode ser verificada através da comparação da simulação de um ensaio de vazão com os resultados obtidos em campo, ou qualquer outra forma de checagem dos prognósticos.

**Tabela 9 - Exemplos de critérios de calibração**

<b>Critério</b>	<b>Qualitativo</b>	<b>Quantitativo</b>
Fluxo	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ forma da superfície potenciométrica;</li> <li>✓ direções de fluxo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ resíduos de carga;</li> <li>✓ recarga;</li> <li>✓ balanço hidrológico.</li> </ul>
Transporte	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ localização das fontes;</li> <li>✓ histórico das fontes;</li> <li>✓ distribuição da pluma contaminante.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ coeficientes de dispersão e/ou adsorção;</li> <li>✓ taxa de degradação;</li> <li>✓ concentrações.</li> </ul>

#### **5.1.4. Análise de Sensibilidade**

Os resultados apresentados por um modelo matemático contém incertezas de distribuição espacial e temporal dos valores dos parâmetros considerados, como por exemplo uma possível variação da condutibilidade hidráulica entre os pontos ensaiados ou a variação da recarga ao longo do tempo modelado.

A análise da sensibilidade é uma maneira de avaliar as incertezas do modelo (ANDERSON & WOESSNER, 1994).

#### **5.2. MODELO CONCEITUAL DA ÁREA**

A área de interesse é limitada a norte e nordeste pelo Rio Pinheiros, a noroeste pelo Córrego Jaguaré e a sudeste pelo Córrego Pirajussara. A sul, seus limites são caracterizados por um alto topográfico, coincidente com um divisor dos fluxos subterrâneos. Foram diferenciadas 4 (quatro) unidades hidrogeológicas, a saber.

a) Aqüífero Sedimentar Superior – do tipo livre, composto pela água armazenada nos interstícios granulares dos sedimentos da Bacia de São Paulo na porção superficial, com até 10 metros de profundidade e característica homogênea e isotrópica;

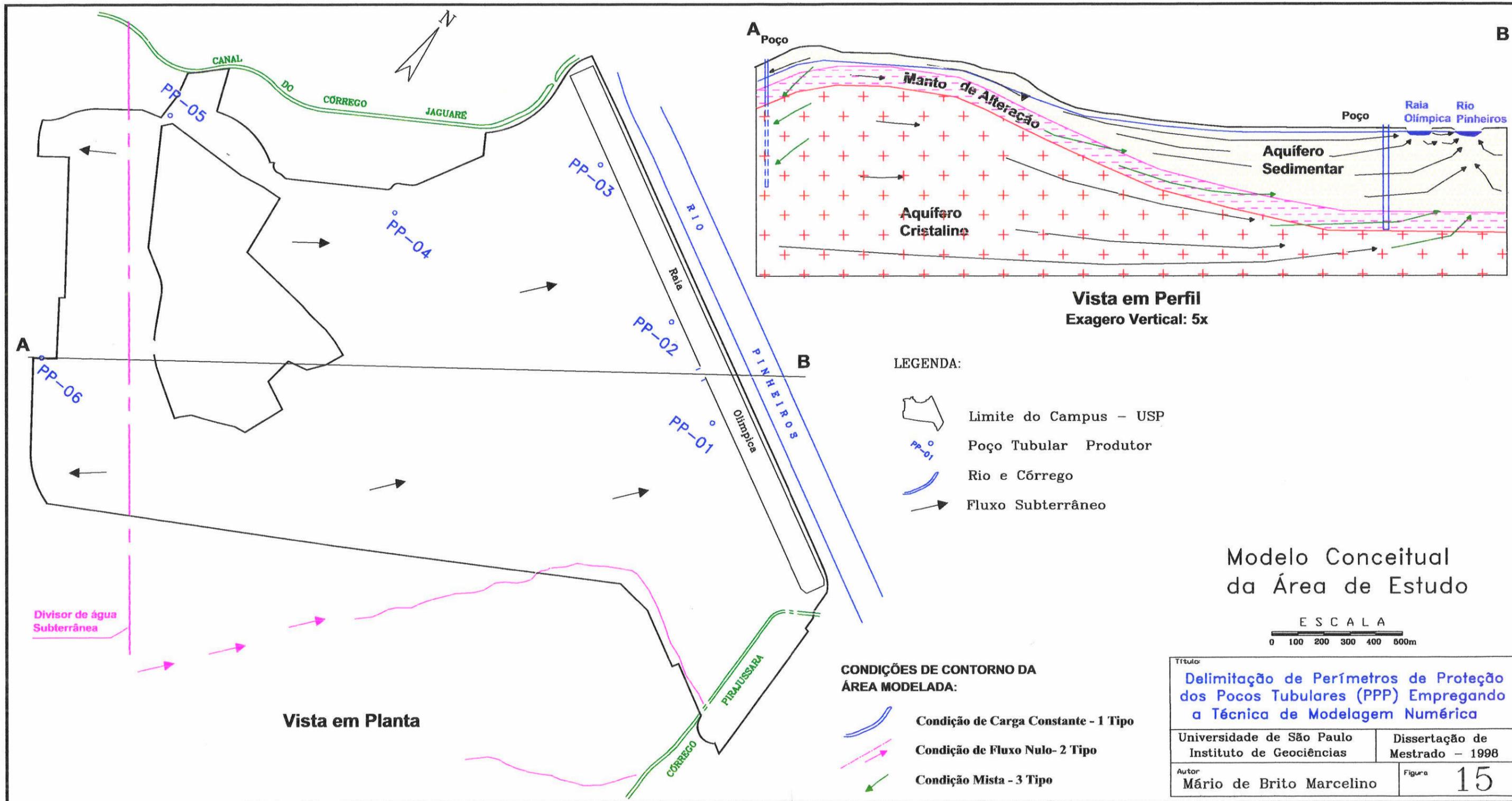
- b) Aqüífero Sedimentar Inferior – do tipo semi-confinado, composto pela água armazenada nos interstícios granulares dos sedimentos da Bacia de São Paulo na porção mais profunda, com até 60 metros de espessura e com características homogêneas e isotrópicas;
- c) Aqüífero Cristalino Alterado – do tipo livre a semi-confinado, composto pela água armazenada nos interstícios granulares do manto de alteração do embasamento cristalino, com 15 metros de espessura média e características homogêneas e isotrópicas;
- d) Aqüífero Cristalino – do tipo semi-confinado a confinado, composto pela água armazenada na porosidade secundária da rocha (falhas e/ou fraturas), com profundidade de até 300 metros e característica homogênea e anisotrópica.

As unidades hidrogeológicas sedimentares apresentam um progressivo aumento das espessuras para nordeste, em direção à calha do Rio Pinheiros, com profundidade máxima em torno dos 70 metros.

O sistema aqüífero sedimentar apresenta fluxos subterrâneos predominantes de sudoeste para nordeste, do divisor de águas para o Rio Pinheiros, exutório natural da região. Admite-se algum fluxo profundo, de sudeste a noroeste, paralelo ao Rio Pinheiros, condicionado pelo setor mais a montante da área modelada, representativo dos fluxos regionais da Bacia de São Paulo.

Existem instalados 4 (quatro) poços tubulares para exploração do sistema aqüífero sedimentar dentro da área de interesse, sendo que, até o momento, inativos e 2 (dois) poços que exploram o sistema aqüífero cristalino, situado fora da área interesse, mas dentro da área do Campus USP, área modelada.

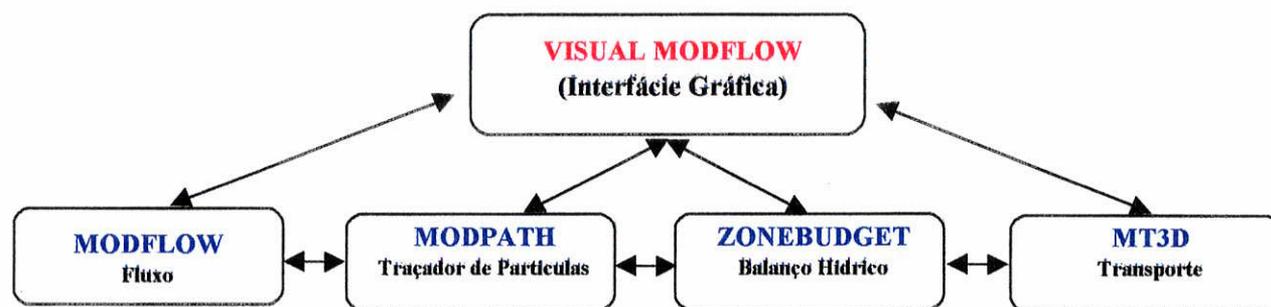
Na **Figura 15** é apresentado de maneira gráfica, o modelo conceitual supracitado.



### 5.3. MODELO ADOTADO – VISUAL MODFLOW®

Em função dos objetivos deste trabalho, e em função dos requisitos considerados na escolha do método de delimitação do PPP (item 4.4), foi utilizado o aplicativo VISUAL MODFLOW®, software desenvolvido pela Waterloo Hydrogeologic Software do Canadá, composto por um pacote integrado que combina as mais recentes versões do USGS MODFLOW® (MCDONALD & HARBAUGH, 1988) para cálculo do fluxo e balanço hídrico geral das águas subterrâneas, o USGS ZONEBUDGET® (HARBAUGH, 1990) para balanço hídrico individual das células do modelo, USGS MODPATH® (POLLOCK, 1989) para definição das linhas de trajetórias de partículas e *Modular Three-Dimensional Transport Model - MT3D®* para transporte de contaminantes (SS PAPADOPULOS 1996, *in* WHB, 1998) (Figura 16).

O aplicativo constitui em uma poderosa interface gráfica para modelagem tridimensional de fluxo subterrâneo e transporte de poluente, possibilitando trabalhar com propriedades heterogêneas, múltiplos bombeamentos de poços em condições de contorno definidas e tempo variado, propiciando uma visão no plano e corte transversal (3D).



**Figura 16 – Representação dos componentes do VISUAL MODFLOW®**

Neste trabalho não foi utilizado o módulo MT3D® do VISUAL MODFLOW®, uma vez que ultrapassa os objetivos propostos, contudo, a existência deste módulo, contribuiu para a escolha do aplicativo, uma vez que possibilitará o desenvolvimento de estudos futuros envolvendo transporte de contaminantes na área.

### 5.3.1 Base Teórica

#### 5.3.1.1. MODFLOW®

O aplicativo MODFLOW baseia-se na equação transiente tridimensional de fluxo, obtida através da derivação da aplicação do princípio de conservação de massa e da lei de Darcy a um elemento representativo do aquífero (célula), obtendo-se a equação parcial tridimensional em meio poroso saturado heterogêneo, anisotrópico, de estado não estacionário para distribuição de cargas (CLEARY 1989 e 1991, ANDERSON & WOESSNER 1994, WHB 1998):

$$\frac{\partial}{\partial X} [k_{xx} \partial H / \partial X] + \frac{\partial}{\partial Y} [k_{yy} \partial H / \partial Y] + \frac{\partial}{\partial Z} [k_{zz} \partial H / \partial Z] \pm W(X, Y, Z, t) = S_s \frac{\partial H}{\partial t}$$

Onde:

**h** = carga hidráulica (L);

**x, y, z** = coordenada cartesianas (L, L, L);

**Kxx, Kyy e Kzz** = componentes principais do tensor da transmissividade hidráulica (L<sup>2</sup>T<sup>-1</sup>);

**Ss** = coeficiente de armazenamento específico (L<sup>2</sup>T<sup>-1</sup>);

**W (x, y, z, t)** = volume de fluxo introduzido ou extraído por unidade de área do aquífero, podendo representar poço de bombeamento ou infiltração, sumidouros (LT<sup>-1</sup>).

Para tanto, assume fluxo em meio poroso saturado, com temperatura e densidade uniforme, não considerando fluxos dependentes da densidade, fases imiscíveis e anisotropia variando ao longo da direção.

Em três dimensões, os poços são fontes pontuais, descritas pelas funções de Dirac (CLEARY 1989 e 1991), podendo eqüivaler a:

$$W = \sum_{i=1}^N Q_i \delta(X - X_i) \delta(Y - Y_i) \delta(Z - Z_i)$$

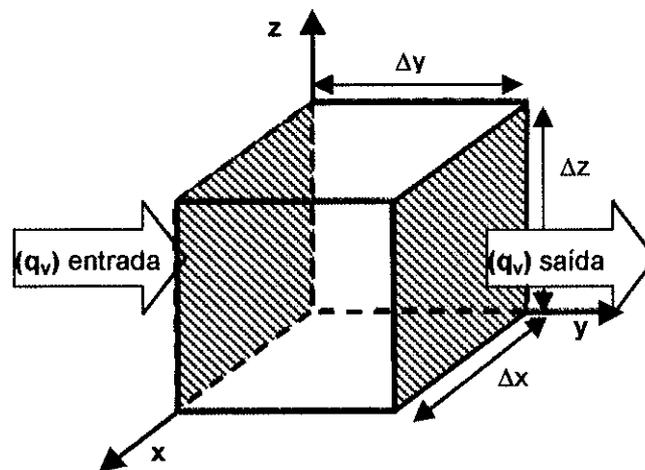
Onde:

**Q** = taxa de bombeamento (entrada +, saída -) ( $L^3/T$ );

**X, Y, Z** = coordenada cartesianas (L, L, L).

**N** = número de poços.

A equação transiente de fluxo é usualmente obtida pelo balanço dos fluxos nos três eixos de um cubo representativo do aquífero, com volume igual  $\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$ , denominado de Volume Elementar Representativo (VER). Admite-se que o VER possua um tamanho suficiente apenas para representar as propriedades do meio poroso, sem, contudo, ser grande suficiente para ocorrer significativas mudanças da carga hidráulica (**Figura 17**).



**Figura 17 – Volume elementar representativo (VER) utilizado para obtenção da equação transiente de fluxo com o componente Y representado (traduzido de ANDERSON & WOESSNER, 1994)**

A equação admite um paralelismo entre os tensores de condutividade hidráulica com os eixos cartesianos considerados, pois se o tensor principal da condutividade hidráulica não for coincidente com os eixos cartesianos, é necessário a utilização de uma condutividade média, dada por uma matriz de 9 elementos. Assim, nas equações, os eixos são descritos  $X_x$ ,  $Y_y$  e  $Z_z$ .

Como não é possível obter diretamente o fluxo através da equação transiente de fluxo, utiliza-se a Lei de Darcy para definir a relação “q” e “h”, sendo assim descrita (CLEARY 1989 e 1991, ANDERSON & WOESSNER 1994, WHB 1998):

$$q_x = -k_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \quad q_{yy} = -k_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \quad q_{zz} = -k_{zz} \frac{\partial h}{\partial z}$$

onde:

$q_x$  ,  $q_y$  ,  $q_z$  = componentes de fluxo de Darcy em x, y e z ( $LT^{-1}$ ).

O modelo matemático, baseado nas diferenças finitas, calcula as cargas em cada nó da malha 3D composta por colunas, linhas e camadas representativa do volume modelado, conforme apresentado na **Figura 18**.

O modelo permite definir uma malha de espaçamento irregular nas três direções, x, y e z, podendo haver o adensamento da malha (refinamento) nas áreas de maior interesse ou maior concentração de dados. Sempre que possível, a grade deve obedecer uma proporção menor que o fator 1,5, evitando-se células longas e/ou estreitas (WHB 1998).

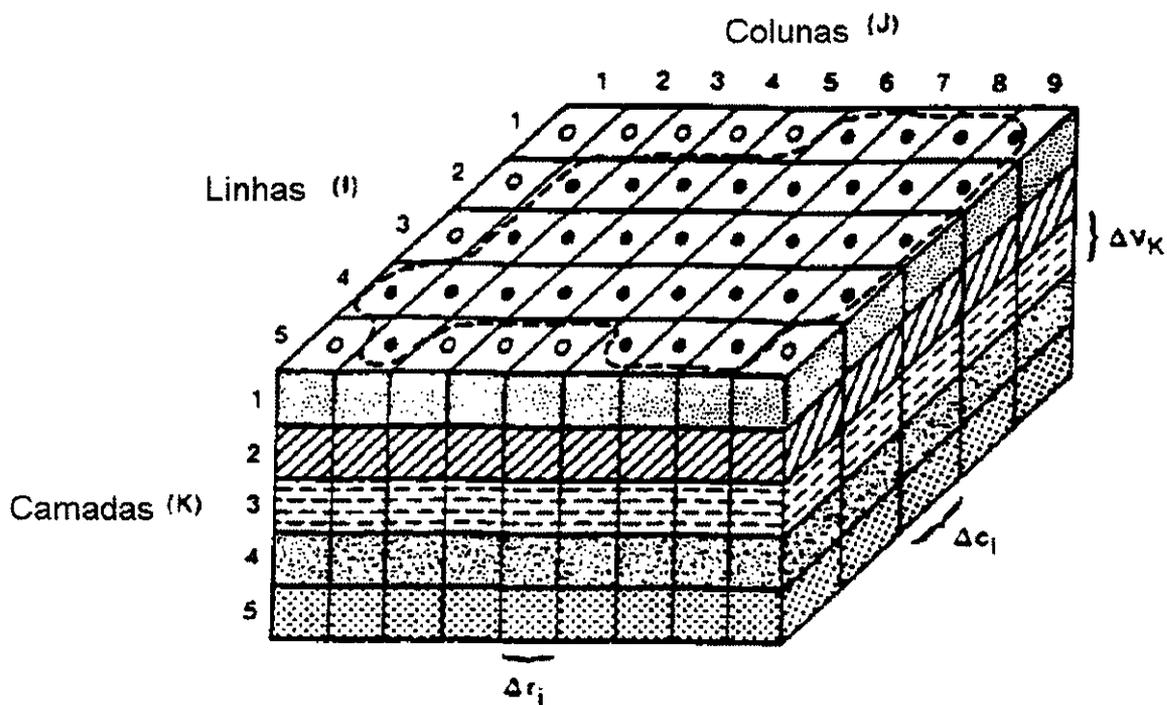
Com a malha definida, esta deve ser associada as propriedades hidráulicas das unidades hidrogeológicas discretizadas, através da introdução das condutividades e dos parâmetros de armazenamento.

### 5.3.1.2. **MODPATH**<sup>®</sup>

O aplicativo MODPATH assume que as direções dos componentes da velocidade variam independentemente e linearmente na malha da célula em sua própria direção de coordenada (POLLOCK, 1989), conforme apresentado na **Figura 19**.

A localização da partícula é efetuada através da interpolação dos componentes da velocidade, calculados a partir das cargas numéricas obtidas no modelo numérico, neste caso o MODFLOW, com base nas taxas de fluxo entre as células (POLLOCK 1989 e ANDERSON & WOESSNER 1994).

Segundo ANDERSON & WOESSNER (1994), usualmente se utiliza a interpolação linear ou bilinear, podendo ainda ser utilizada a distância reversa ou bicúbica.



Legenda:

- Limite do Aquífero
- Célula Ativa
- Célula Inativa
- $\Delta r_j$  Dimensão da Célula

Figura 18 – Diagrama esquemático de malha de um modelo tridimensional (traduzido de McDONALD & HARBAUGH, 1988)

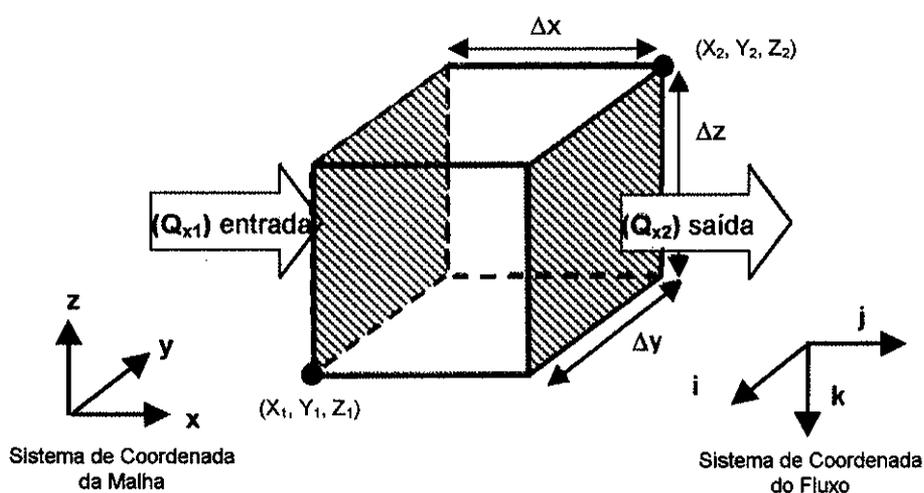


Figura 19 – Relação entre os sistemas de coordenadas da diferenças finitas e do sistema de fluxo (traduzido de POLLOCK, 1989)

O MODPATH utilizada a interpolação linear dos vetores da velocidade, através das seguintes equações (POLLOCK 1989):

- ◆ Cálculo das velocidades para cada eixo:

$$v_x = A_x (x-x_1) + v_{x1}$$

$$v_y = A_y (y-y_1) + v_{y1}$$

$$v_z = A_z (z-z_1) + v_{z1}$$

Onde:

$$A_x = (v_{x2} - v_{x1}) / \Delta x$$

$$A_y = (v_{y2} - v_{y1}) / \Delta y$$

$$A_z = (v_{z2} - v_{z1}) / \Delta z$$

- ◆ Cálculo do tempo entre  $t_1$ - $t_2$

$$\Delta t_x = \ln(v_{xp}^{t1} / v_{xp}^{t2}) / A_x$$

$$\Delta t_y = \ln(v_{yp}^{t1} / v_{yp}^{t2}) / A_y$$

$$\Delta t_z = \ln(v_{zp}^{t1} / v_{zp}^{t2}) / A_z$$

- ◆ Cálculo das linhas de velocidades para cada eixo:

$$x_p^{t2} = x_1 + (1/A_x) [ v_{xp}^{t1} \exp(A_x \Delta t) - v_{x1} ]$$

$$y_p^{t2} = y_1 + (1/A_y) [ v_{yp}^{t1} \exp(A_y \Delta t) - v_{y1} ]$$

$$z_p^{t2} = z_1 + (1/A_z) [ v_{zp}^{t1} \exp(A_z \Delta t) - v_{z1} ]$$

Onde:

$V_{xp}^{t1}$ ,  $V_{yp}^{t1}$  e  $V_{zp}^{t1}$  são em função das coordenadas no tempo  $t_1$

Um fator de retardação ( $F_R$ ) de um contaminante devido sua adsorção, pode ser incluído dividindo-se sua velocidade pelo  $F_R$ , conforme a equação:  $v_c = v / F_R$  (ANDERSON & WOESSNER 1994). Algumas bibliografias, como FETTER (1988), apresentam os fatores de retardação para alguns compostos.

## 5.4. ENTRADA DE DADOS

Para a entrada dos dados no modelo se faz necessário a fusão dos dados de campo com o modelo conceitual elaborado e posterior conversão para a linguagem do modelo. O VISUAL MODFLOW<sup>®</sup> funciona como pré e pós processador, traduzindo os dados para o formato do MODFLOW<sup>®</sup> e posteriormente lendo os resultados e traduzindo para o formato gráfico.

### 5.4.1 Malha ou grid

O grid inicial do modelo representativo do Campus USP compreende uma área de 9,36 km<sup>2</sup>, com uma malha de 50 x 50m, com 115 colunas, 78 linhas e 4 camadas. A superfície do terreno, bem como do topo do manto de alteração e do embasamento, foram elaboradas por interpolação pelo método da krigagem linear com todos os dados existentes, através do aplicativo *Surfer 6.01* da *Golden Software*, e posteriormente importada para o modelo. Os pontos (cotas e coordenadas) utilizados na elaboração das superfícies supracitadas, foram obtidos através da plotagem das sondagens conhecidas (poços, SEV's e marcos geográficos) em um mapa topográfico 1:5.000, com curvas de níveis com intervalo a cada metro.

Posteriormente, visando detalhar a área nas proximidades da Raia Olímpica e do Rio Pinheiros, a malha foi adensada neste setor para 25 x 25m, e, objetivando minimizar a memória de computação utilizada, acelerando a velocidade dos cálculos, as células situadas fora da área de interesse foram desativadas.

### 5.4.2. Unidades hidrogeológicas

Segundo o modelo conceitual da área, foram diferenciadas 3 (três) unidades hidrogeológicas, através da introdução no modelo dos parâmetros de armazenamento e condutividade hidráulica apresentados na **Tabela 10**, discriminando três unidades hidráulicas distintas: sedimentar, manto de alteração e rocha cristalina.

Os sedimentos foram compartimentados em duas sub-unidades: uma formada pelos primeiros 10 metros de profundidade, com características de aquífero livre, e uma segunda, representando os sedimentos em maior profundidade (> 10m), a qual apresenta um coeficiente de armazenamento menor, decorrente do semi-confinamento ocasionado pelos sedimentos sotopostos.

Assim como os sedimentos, o manto de alteração também foi subdividido em duas sub-unidades: uma representativa do manto aflorante (<10m de profundidade), e outra representando a situação em profundidade, diferenciando-se entre si pelo coeficiente de armazenamento.

O aquífero cristalino foi considerado homogêneo e anisotrópico, visando simular um substrato à bacia sedimentar não impermeável, como ocorre na situação de campo.

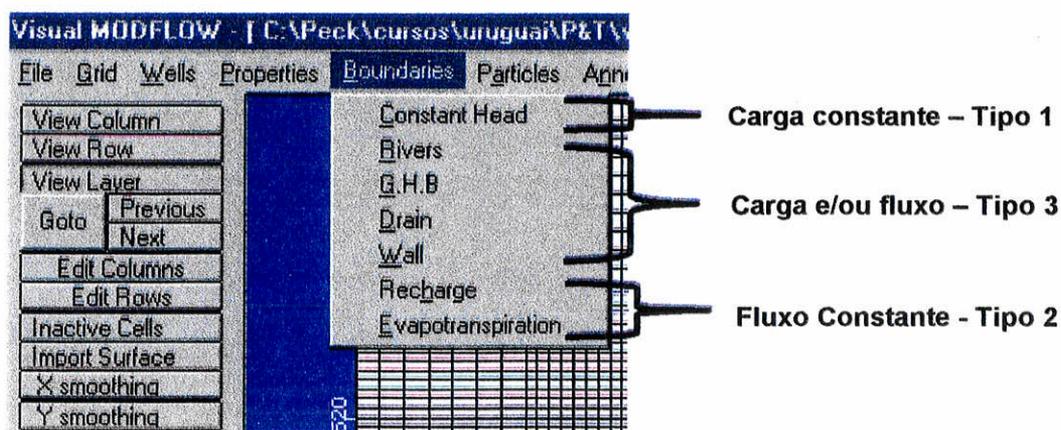
**Tabela 10 – Unidades hidrogeológicas consideradas – Parâmetros hidráulicos adotados**

UNIDADE	CONDUTIVIDADE	ARMAZENAMENTO
<b>Unidade 1a (Sedimentar Superior)</b>	$K_x = K_y = K_z = 4,32\text{m/d}$	$S_s = 1,0 \times 10^{-2}$ $S_y = 1,0 \times 10^{-1}$ $\phi_{ef} = 13\%$ $\phi_{total} = 25\%$
<b>Unidade 1b (Sedimentar Inferior)</b>	$K_x = K_y = K_z = 4,32\text{m/d}$	$S_s = 6,0 \times 10^{-5}$ $S_y = 3,0 \times 10^{-3}$ $\phi_{ef} = 13\%$ $\phi_{total} = 25\%$
<b>Unidade 2a (Manto de Alteração)</b>	$K_x = K_y = K_z = 8,64 \times 10^{-2}\text{m/d}$	Aflorante (<10m prof.) $S_s = 2,0 \times 10^{-3}$ $S_y = 3,0 \times 10^{-2}$ $\phi_{ef} = 10\%$ $\phi_{total} = 15\%$
<b>Unidade 2b (Manto de Alteração)</b>	$K_x = K_y = K_z = 8,64 \times 10^{-2}\text{m/d}$	$S_s = 2,0 \times 10^{-4}$ $S_y = 3,0 \times 10^{-3}$ $\phi_{ef} = 10\%$ $\phi_{total} = 15\%$
<b>Unidade 3 (Embasamento Cristalino)</b>	$K_x = K_y = 1,85 \times 10^{-2}\text{m/d}$ $K_z = 8,64 \times 10^{-3}\text{m/d}$	$S_s = 3,0 \times 10^{-6}$ $S_y = 1,0 \times 10^{-3}$ $\phi_{ef} = 5\%$ $\phi_{total} = 5\%$

$K_x, K_y, K_z$  = condutividade hidráulica nos tensores x, y, z;  
 $S_s$  = coeficiente de armazenamento pela espessura aquífera;  
 $S_y$  = coeficiente de armazenamento;  
 $\phi_{ef}$  = porosidade efetiva  
 $\phi_{total}$  = porosidade total

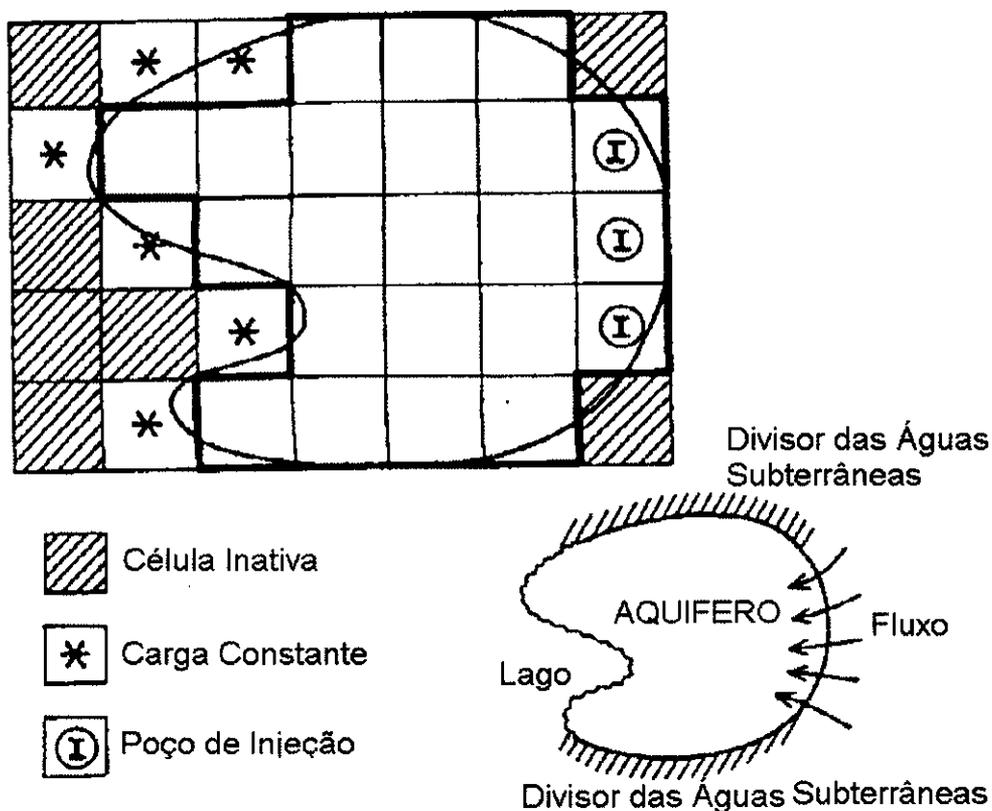
### 5.4.3. Condições de contorno

O modelo considera os três tipos de condições de contornos definidas no item 5.1.2.1, conforme apresentado na **Figura 20**. As condições de contorno são inseridas diretamente na malha, conforme apresentado na **Figura 21**. Deve-se acrescentar, que células inativas ou desativadas no modelo, bem como os limites da malha do modelo, apresentam condições de fluxo nulo, ou seja, condição de contorno do Tipo 2.



**Figura 20 – Condições de contorno admitidas pelo VISUAL MODFLOW®**

a



**Figura 21 – Representação das condições de contorno na malha (traduzido de ANDERSON & WOESSNER, 1994)**

Assim, foram introduzidas no modelo as seguintes condições de contorno abaixo discriminadas:

#### **5.4.3.1. Carga constante**

Uma carga constante representa uma condição de contorno Tipo 1. Esta pode ser inferida no modelo individualmente ou em grupo, em quaisquer dos níveis da malha.

Esta carga é definida por sua cota, nos diversos tempos considerados, representando uma entrada de água, quando sua cota estiver acima das cargas calculadas em torno da mesma, ou como saída de água, quando da situação inversa. Para os fluxos considerados, não é considerada nenhuma resistência entre a célula da carga especificada e a vizinha.

O estabelecimento de carga constante é usualmente utilizada para representar corpos d'água que sofrem pequena e insignificante variação da carga ao longo do tempo. Estas podem ser usadas para simular rios e lagos.

No modelo em apreço, o Rio Pinheiros foi inserido como uma carga constante, uma vez que seu nível não apresenta variações significativas ao longo do tempo. A especificação das cargas inseridas são apresentadas na **Tabela 11**.

### 5.4.3.2. *Rios e lagos*

A interação do sistema aquífero com os corpos de água superficiais (rios e lagos) é simulado pelo modelo através de uma célula de rio, definida por McDONALD & HARBAUGH (1988), conforme apresentada na **Figura 22**.

O fluxo de água entre o rio e o aquífero no modelo será positivo, quando o rio for influente, isto é, quando o nível d'água do rio estiver em uma cota superior a cota da superfície freática do aquífero nas proximidades do rio; ou negativo, quando o rio é um afluyente, com cota do nível d'água abaixo da cota freática do aquífero.

Assim as equações para definir o fluxo entre o rio e o aquífero são:

$$Q_{\text{rio}} = C_{\text{rio}} (H_{\text{rio}} - H_{\text{aq}}), \text{ para } H_{\text{aq}} > H_{\text{Brio}}, \text{ e}$$

$$Q_{\text{rio}} = C_{\text{rio}} (H_{\text{rio}} - H_{\text{aq}}), \text{ para } H_{\text{aq}} \leq H_{\text{Brio}}$$

Esta célula define o fluxo de água entre o rio e o aquífero, sendo a resistência dos fluxos no meio dado pela condutância, dada pela equação:

$$C_{\text{rio}} = K_s L W / M$$

Onde:

$C_{\text{rio}}$  = condutância ( $L^2/T$ );

$H_{\text{rio}}$  = cota da água no rio;

$H_{\text{aq}}$  = cota da água na célula;

$H_{\text{Brio}}$  = cota da base do rio

$K_s$  = permeabilidade do sedimento de fundo do rio ( $L/T$ );

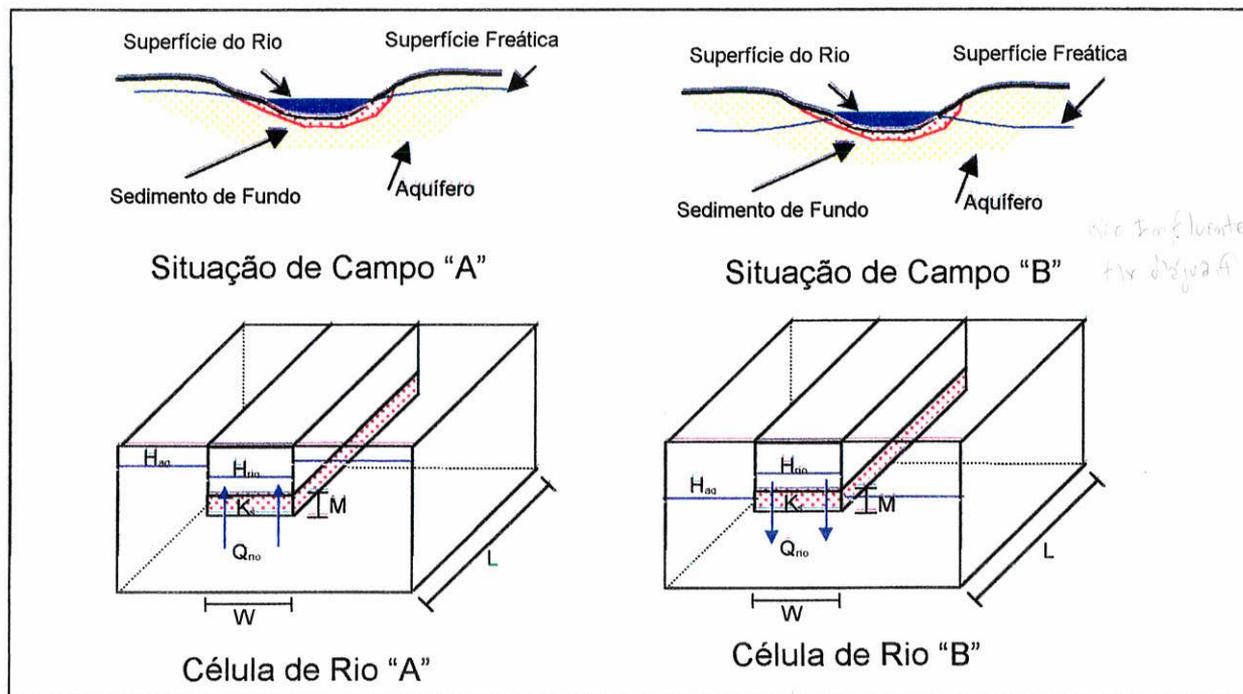
$L$  = comprimento da célula ( $L$ );

$W$  = largura do rio ( $L$ );

$M$  = espessura média do sedimento de fundo do rio ( $L$ ).

Tabela 11 – Parâmetros de carga constante, rios e drenos adotados no modelo

<b>CARGA</b>	<b>VALOR</b>
<b>Carga Constante</b>	<b>Rio Pinheiros</b> Cota: variando de 714.20 a 714.15m Tempo: 3650 dias
<b>Rios</b>	<b>Raia Olímpica:</b> Cota NA: cota 716,00m Profundidade: 4,00m Condutância: 8,64 m <sup>2</sup> /d Tempo: 3650 dias <b>Córrego Pirajussara:</b> Cota NA: variando da cota 733,50 a 714,20m Profundidade: 0,50m Condutância: 2,50 e 10,0m <sup>2</sup> /d Tempo: 3650 dias <b>Córrego Jaguaré:</b> Cota NA: variando da cota 722,10 a 714,15m Profundidade: 0,30 a 0,35m Condutância: 1,40 e 2,40m <sup>2</sup> /d Tempo: 3650 dias
<b>Drenos</b>	<b>Córrego da Politécnica:</b> Cota de Base: variando da cota 752,30 a 715,80m Condutância: 5,00 e 2,20 m <sup>2</sup> /d Tempo: 3650 dias <b>Córrego da Av. da Universidade:</b> Cota de Base: variando da cota 757,60 a 723,18m Condutância: 2,20 m <sup>2</sup> /d Tempo: 3650 dias <b>Córrego da Corifeu:</b> Cota de Base: variando da cota 741,40 a 727,18m Condutância: 2,20 m <sup>2</sup> /d Tempo: 3650 dias



**Figura 22 – Representação esquemática da célula de rio segundo McDONALD & HARBOUGH (1988)**

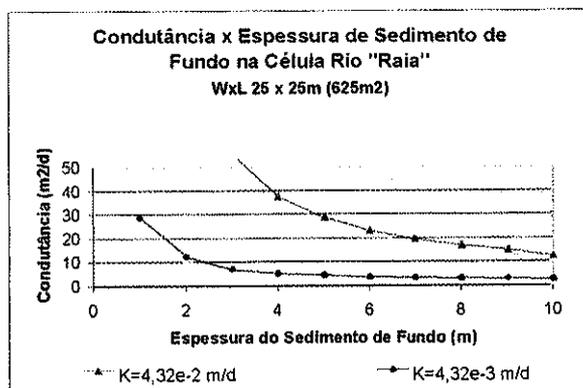
Foram introduzidas como células de rio, os Córregos Pirajussara e Jaguaré e da Raia Olímpica.

A condutância adotada foi definida através de tentativa e erro, até obtenção da calibração do modelo. Porém, a ordem de grandeza dos valores de condutância foram estimadas através da elaboração de gráficos de condutância pela espessura do sedimento de fundo em função da permeabilidade, para os tamanhos de células admitidas no modelo, conforme apresentado nos **Gráficos 2, 3 e 4**.

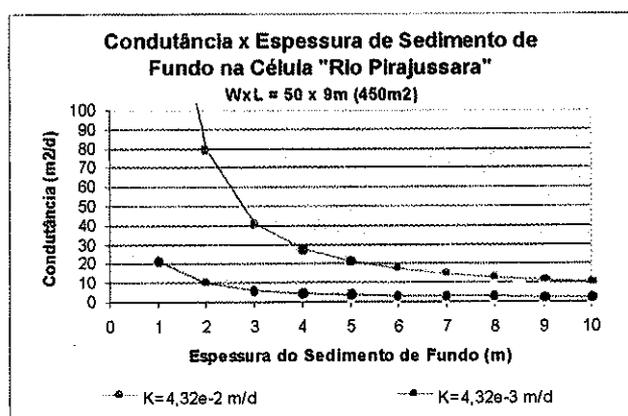
A espessura de sedimento de fundo das células rios em apreço, foi admitida como sendo sempre inferior a 30% da largura do corpo d'água em questão, assim, para a Raia Olímpica foi admitida uma espessura máxima dos sedimentos de 3 metros, e 2 e 1,3 m para os Córregos Pirajussara e Jaguaré respectivamente.

Segundo a GUIGUER (informações verbais), a permeabilidade dos sedimentos de fundo é usualmente 10 vezes menor que o valor da permeabilidade dos sedimentos no qual a drenagem está inserida, ou seja, inferior 0,432m/d.

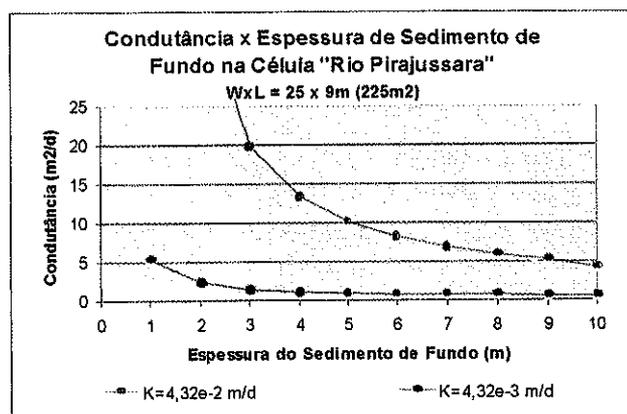
Na **Tabela 11** foram apresentados os valores utilizados nas células de rio no modelo.



**Gráfico 2 - Variação da condutância em função da espessura do sedimento de fundo nas células rio representativas da Raia Olímpica**

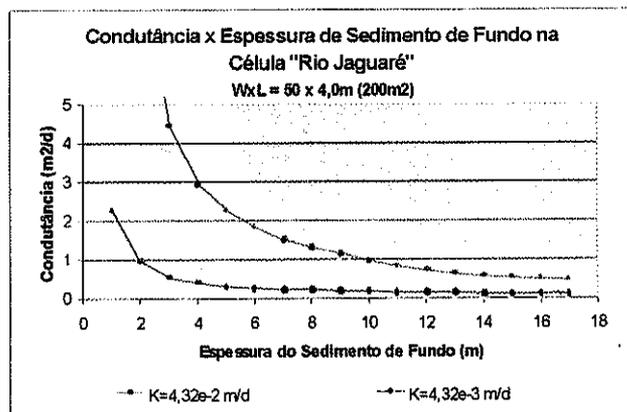


**Gráfico 3a**

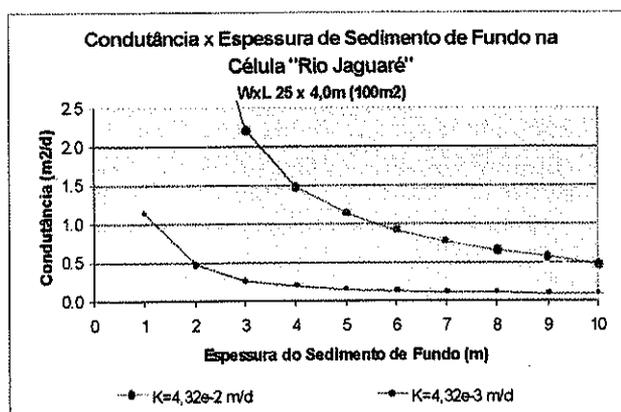


**Gráfico 3b**

**Gráfico 3 - Variação da condutância em função da espessura do sedimento de fundo nas células rio representativas do Rio Pirajussara**



**Gráfico 4a**



**Gráfico 4b**

**Gráfico 4 - Variação da condutância em função da espessura do sedimento de fundo nas células rio representativas do Rio Jaguaré**

### 5.4.3.3. Dreno

Os córregos que apresentam sua nascente dentro da área modelada, foram introduzidos como drenos (**Tabela 12**), pois o dreno apresenta comportamento semelhante ao rio, porém, na única condição de saída de água. Assim, quando o nível freático estiver abaixo da base do dreno, este passa a ser considerado seco, não contribuindo com carga para o sistema aquífero.

Os drenos podem ser abertos ou fechados (**Figura 23**), sendo a facilidade do fluxo de água do aquífero para o dreno (saída do modelo), determinada pela condutância do dreno, a semelhança da célula de rio, conforme as equações:

$$Q_{\text{dreno}} = C_{\text{dreno}} (H_{\text{Bdreno}} - H_{\text{aq}}), \text{ para } H_{\text{aq}} > H_{\text{Bdreno}}, \text{ e}$$

$$Q_{\text{rio}} = 0, \text{ para } H_{\text{aq}} \leq H_{\text{Brio}}$$

Onde:

$$C_{\text{dreno}} = \text{condutância do dreno (L}^2\text{/T)};$$

$$H_{\text{Bdreno}} = \text{cota de base do dreno};$$

$$H_{\text{aq}} = \text{cota da água na célula.}$$

Para fins deste trabalho, foram definidas as seguintes nomenclaturas para os drenos considerados no modelo: dreno da Politécnica; dreno da Av. da Universidade e dreno da Av. Corifeu de Azevedo Marques; conforme apresentado na **Figura 24**.

Assim como para os rios e lagos, foram elaborados gráficos de condutância pela espessura do sedimento de fundo em função da permeabilidade, para os tamanhos de células admitidas no modelo (**Gráficos 5 e 6**), visando a obtenção da ordem de grandeza dos valores de condutância a serem adotados para os drenos. A espessura de sedimento de fundo das células drenos em apreço (inferior a 30% da largura do dreno), foi admitida como não maior que 1,3 metro para o dreno da Politécnica no seu trecho de maior largura, e 0,3m nos trechos enterrados.

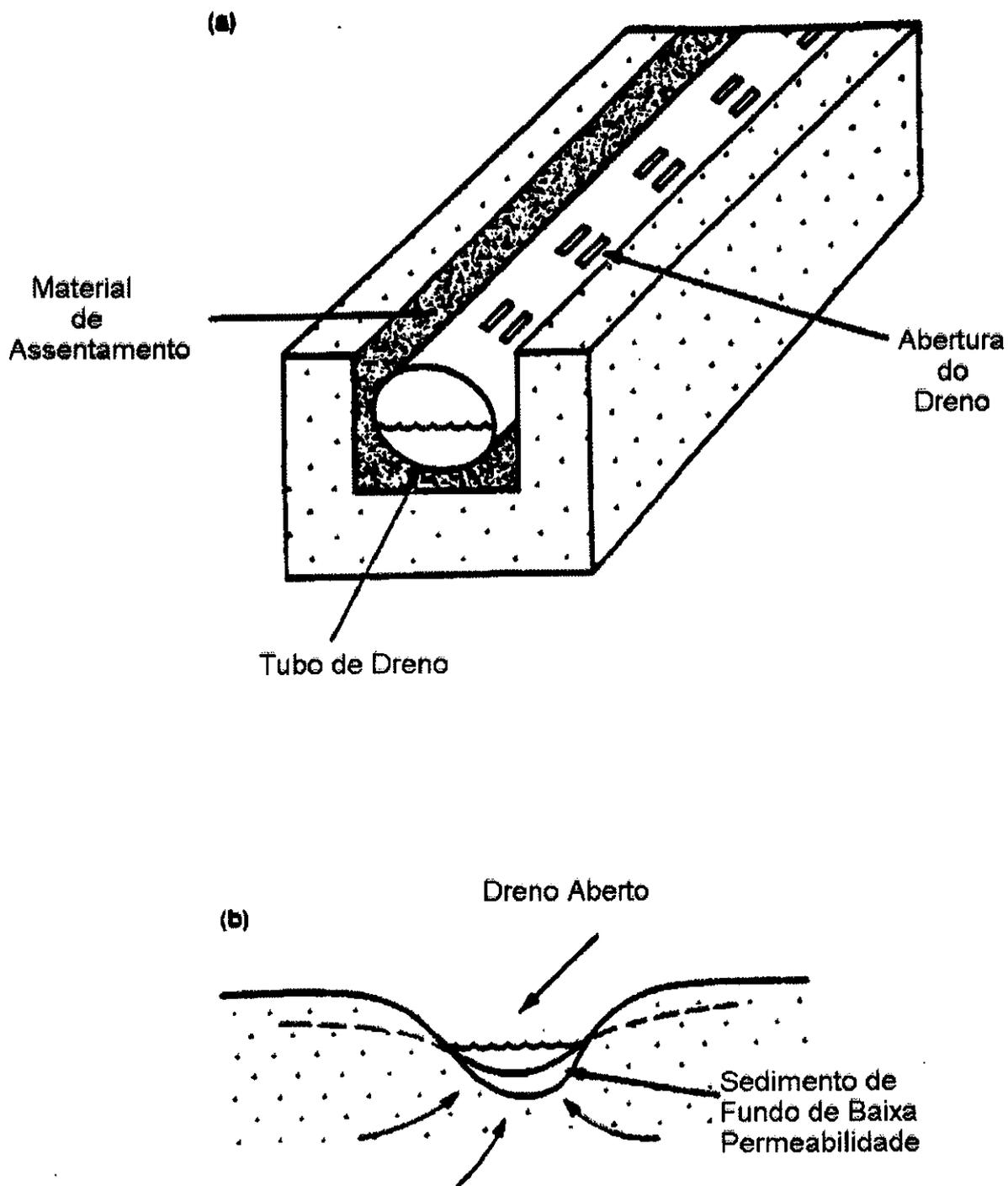
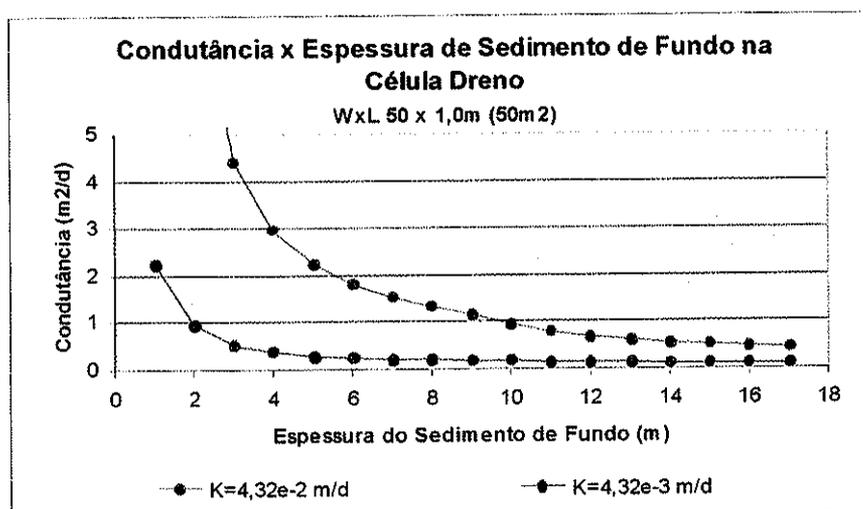


Figura 23 – Ilustração de dreno fechado (a) e aberto (b) (traduzido de McDONALD & HARBOUGH 1988)





**Gráfico 6 - Variação da condutância em função da espessura do sedimento de fundo nas células drenos representativas dos drenos da Politécnica, Av. da Universidade e da Av. Corifeu de Azevedo Marques**

#### 5.4.3.4. Carga hidráulica genérica "GHB"

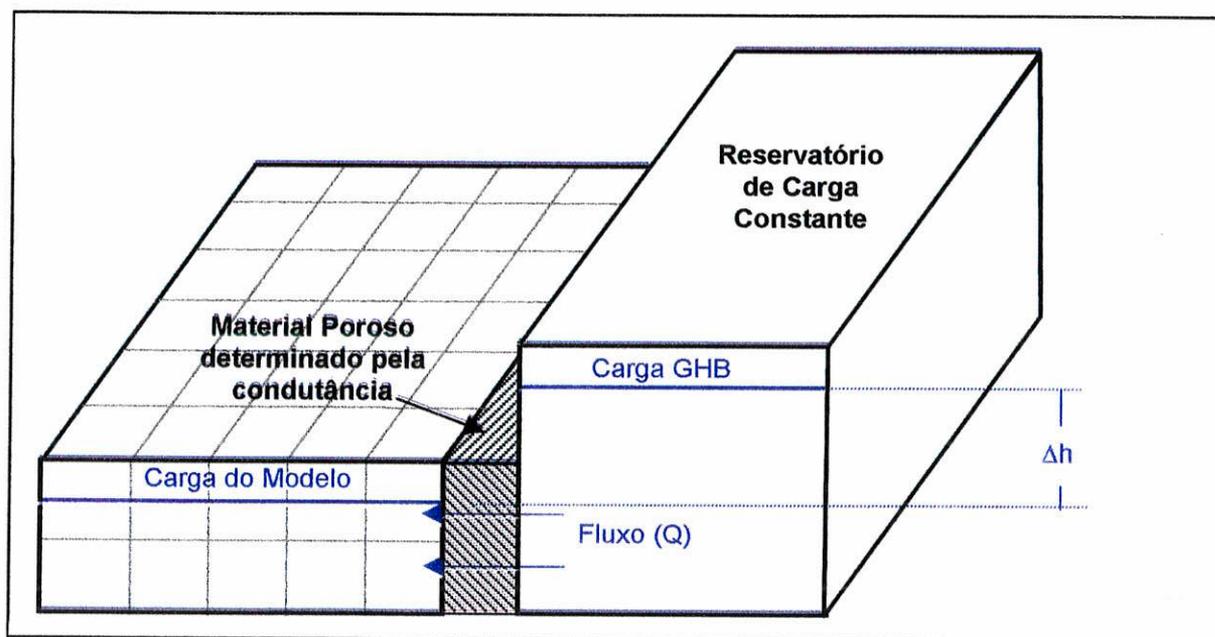
A carga hidráulica genérica é utilizada para simular uma fronteira de fluxo (Tipo 2). Esta simula um fluxo (positivo ou negativo) constante dependente das diferenças de cargas hidráulicas estabelecidas pela GHB e a calculada pelo modelo ao longo do tempo especificado.

O processo de fluxo, corresponde ao esvaziamento de um reservatório (de carga constante) através de um material poroso (**Figura 25**) (ROCHE, 1963). As características do material poroso são determinadas pela condutância.

O fluxo dado por uma fronteira especificada ( $Q_b$ ) é calculado pelo produto da condutância pela diferença das cargas (da GHB e do modelo), conforme equação abaixo (McDONALD & HARBOUGH, 1988):

$$Q_b = C_{GHB} (H_{GHB} - H_{modelo})$$

Esta foi aplicada nos limites norte e sul da área, bem como no limite nordeste, a montante do Rio Pinheiros, objetivando simular a integração dos fluxos subterrâneos correspondentes às áreas adjacentes do modelo. Estas foram aplicadas somente nos aquíferos sedimentares superior e inferior.



**Figura 25 – Representação de uma carga hidráulica genérica "GHB"**

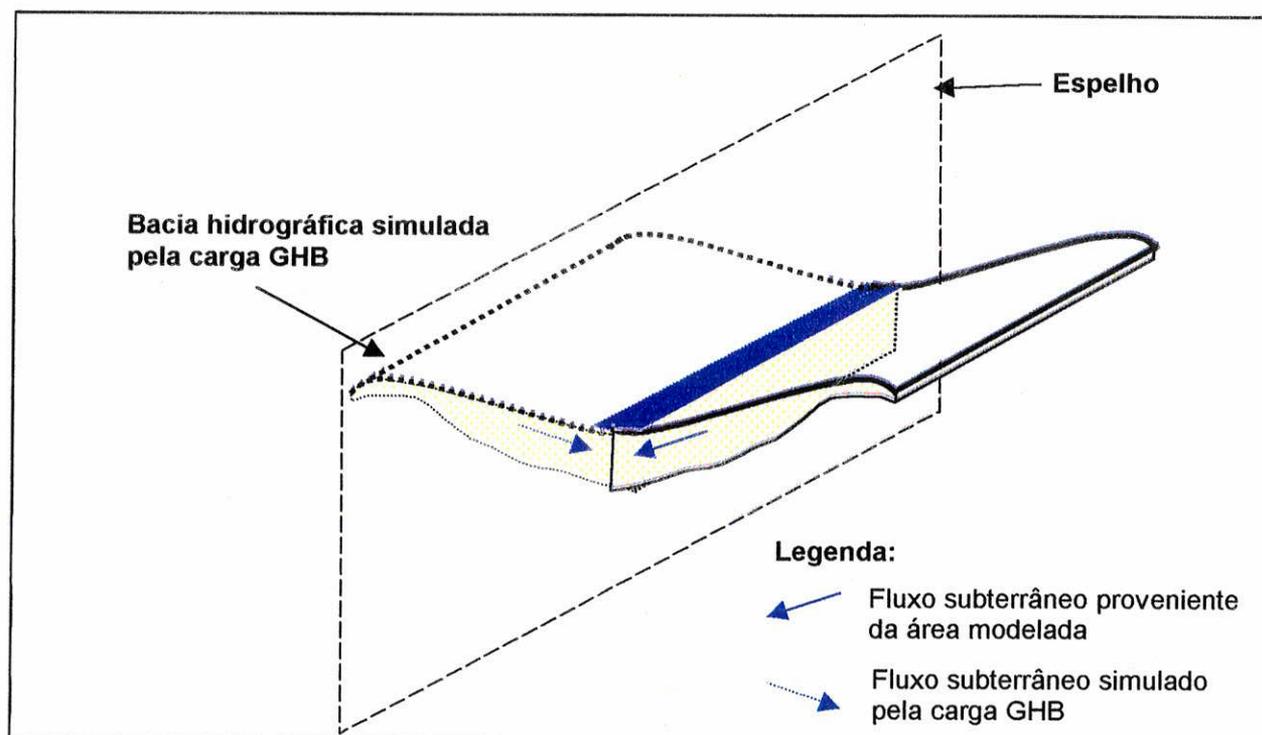
As cargas GHB dos limites norte e sul da área, foram definidas pela projeção da superfície potenciométrica no setor, elaborada por interpolação das cargas medidas na área pelo método da krigagem linear com todos os dados existentes, através do aplicativo *Surfer 6.01* da *Golden Software*. Esta foi posteriormente "calibrada" em função da superfície potenciométrica projetada pelo modelo.

A carga GHB aplicada no limite nordeste, foi inferida com uma carga similar a carga medida a uma medida equidistante em relação ao Rio Pinheiros, simulando assim, um fluxo proveniente de uma bacia hidrográfica "espelho" à área modelada, conforme apresentado na **Figura 26**.

A condutância inferida foi similar a transmissividade média dos aquíferos sedimentares da área, de  $8,64 \text{ m}^2/\text{d}$ , conforme apresentado na **Tabela 12**.

**Tabela 12 – Parâmetros de carga genérica, recarga e evapotranspiração adotados no modelo**

<b>CARGA</b>	<b>VALOR</b>
<b>Carga Genérica - GHB</b>	Extremo Nordeste Cota: 714,35 a 714,30m Condutância: 8,64 m <sup>2</sup> /d
	Extremo Norte Cota: 729,90 a 714,00m Condutância: 8,64 m <sup>2</sup> /d
	Extremo Sul Cota: 739,70 a 714,50m Condutância: 8,64 m <sup>2</sup> /d
<b>Recarga e Evapotranspiração</b>	Recarga Bloco A = 179,69mm/ano Bloco B = 289,58mm/ano
	Evapotranspiração Evapotranspiração = 106,15mm/ano Prof. de extinção = 2,50m



**Figura 26 – Representação de uma bacia hidrográfica "espelho" simulada pela carga GHB na área de estudo.**

### 5.4.3.5. Recarga e evapotranspiração

A recarga é dada por um fluxo aplicado na área do mapa, expressa pela equação (McDONALD & HARBOUGH, 1988):

$$Q_{Ri,j} = I_{i,j} * A_{i,j}$$

Onde:

$$Q_{Ri,j} = \text{volume (L}^3/\text{T)}$$

$$I_{i,j} = \text{fluxo (L/T)}$$

$$A_{i,j} = \text{área da célula (L}^2\text{)}$$

Usualmente a recarga é resultado da infiltração de água no subsolo decorrente das precipitações que ocorrem na área. Assim, esta ocorre na célula onde se verifica a superfície freática, porém esta superfície é móvel, apresentando uma variação vertical temporal.

O MODFLOW® pode simular então, duas condições distintas, ilustradas na **Figura 27**:

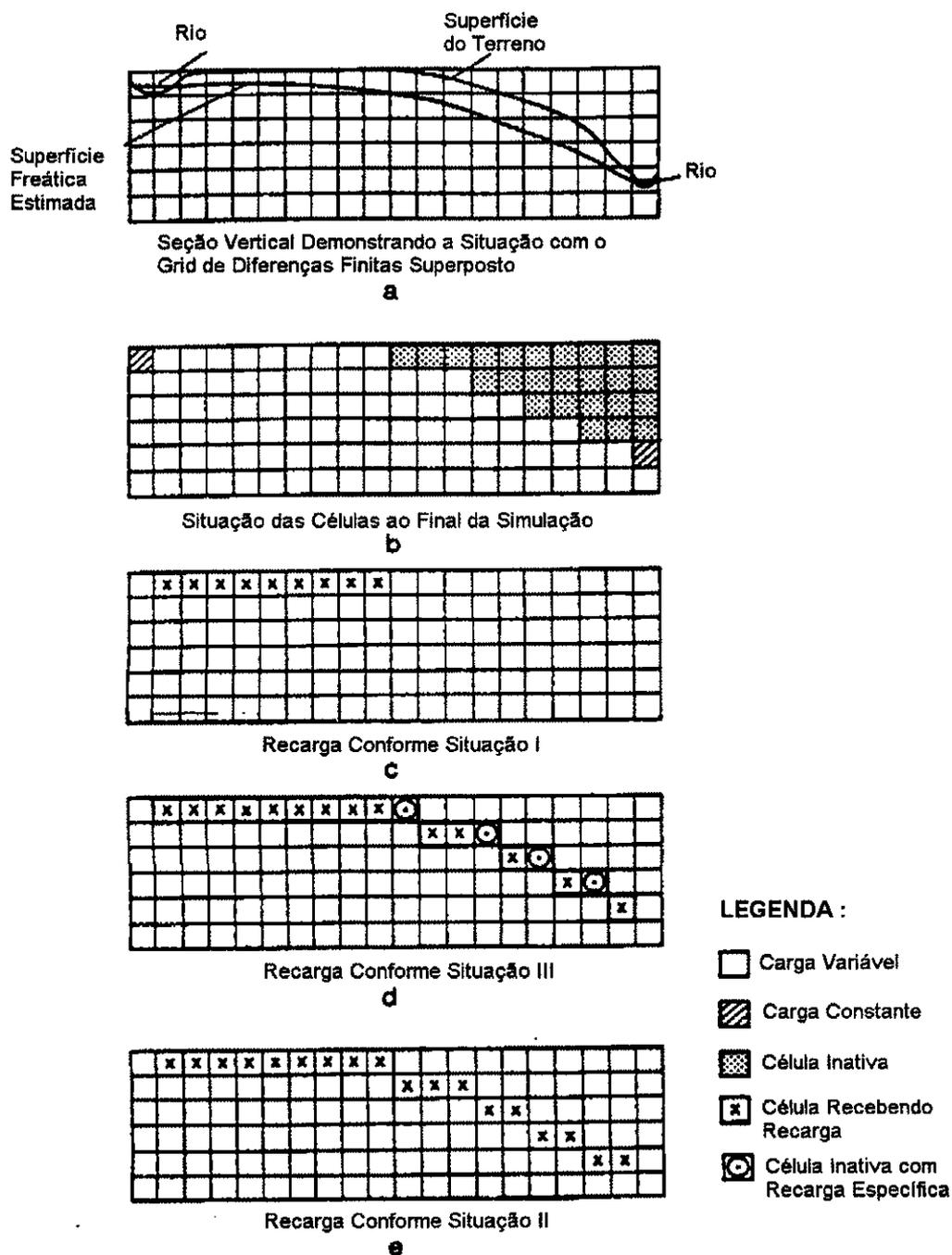
- I. recarga ocorrendo só na célula superficial que contenha o nível freático;
- II. recarga ocorrendo em toda a superfície freática, na profundidade de acordo com a variação do nível freático.

Porém, na prática a recarga pode ser induzida artificialmente, em células pré-determinadas fixas. Assim, obtem-se uma terceira condição de recarga possível de ser introduzida no modelo:

- III. Recarga específica em célula pré-determinada.

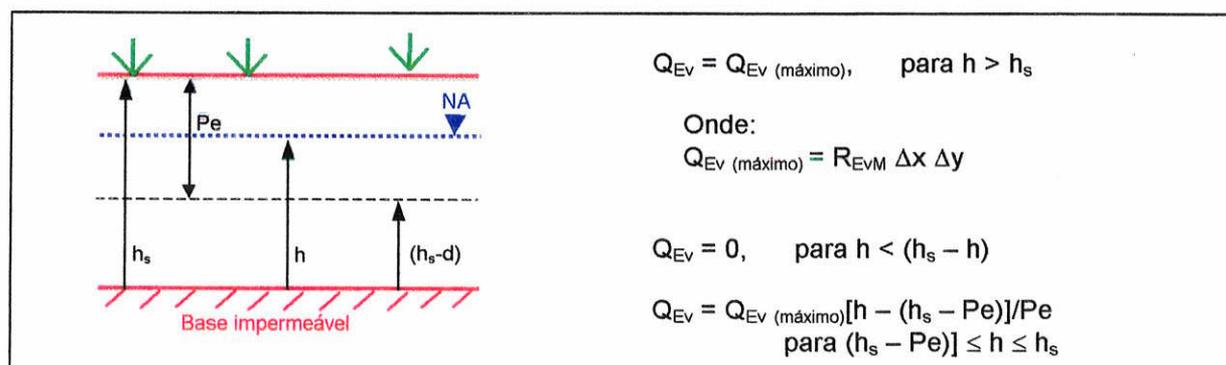
De acordo com os resultados de IRATANI (1993), a área foi dividida em dois blocos "A" e "B", com taxas de infiltração de 12,1% e 19,5% da precipitação. A precipitação adotada foi a média mensal plurianual de um período de 20 anos (set/73 a fev/93), conforme apresentado no **Gráfico 1**.

Após a infiltração da água no terreno, pode ocorrer a remoção de parte desta água do sistema pela evaporação natural e/ou atividade biológica. Para esta situação, é denominada de evapotranspiração ( $Q_{EV}$ ).



**Figura 27 – Representação das condições das recargas admitidas pelo MODFLOW (traduzido e modificado de McDONALD & HARBOUGH, 1988)**

A evapotranspiração é observada até uma certa profundidade, em função das características do local. A profundidade, a partir do qual não esta sob influência da evapotranspiração, é denominada de *profundidade de extinção* ( $Pe$ ) (McDONALD & HARBOUGH, 1988). Assim, na superfície do terreno teremos a taxa de evapotranspiração máxima ( $R_{EVM}$ ), que diminui a zero linearmente até a profundidade de extinção, conforme apresentado na **Figura 28**.



**Figura 28 – Representação da evapotranspiração no MODFLOW (traduzido de ANDERSON & WOESSNER, 1994)**

A taxa de evapotranspiração para o modelo calibrado, foi obtido através de tentativa e erro, variando-a dentro do intervalo de 25 a 54% do total infiltrado (situação pré e pós urbanização, segundo MENEGASSE VELÁSQUEZ, 1996), com profundidade de extinção variando entre 2,0 e 3,5m (SURITA, informações verbais).

#### 5.4.4. Poços de bombeamento

Para o programa MODFLOW os poços são considerados como fontes pontuais em três dimensões (centrados na célula no qual está inserido), descritas pelas funções de Dirac (item 5.3.1.1), não sendo aceitos poços com filtros em mais de uma camada. A vazão deste poço, é proporcional à transmissividade da camada, dada pela equação (McDONALD & HARBOUGH, 1988):

$Q_1/Q_w = T_1/\Sigma T$ , onde:

$Q_1$  = descarga da camada;

$Q_w$  = descarga do poço;

$T_1$  = transmissividade da camada;

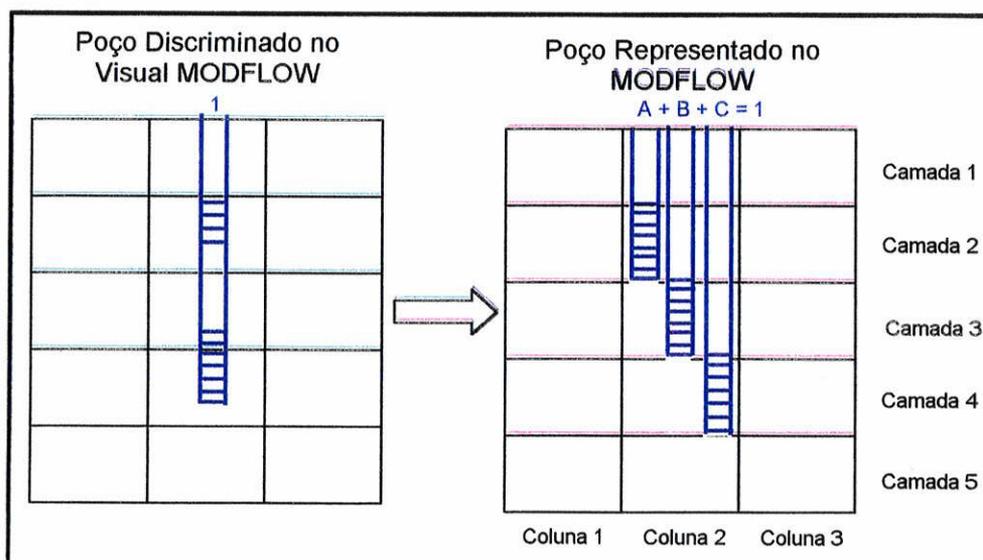
$\Sigma T$  = somatória das transmissividades das camadas atravessadas pelos filtros.

Bombeamentos, ou saída de água, são representados com valores negativos (-), enquanto que injeções, entradas d'águas, são representadas com valores positivos (+).

A interface do Visual ModFlow possibilita inserir poços com mais de uma seção filtrante, bem como, filtros que atravessem mais de uma camada e/ou detalhar filtros intra-camadas, isto é, inserido dentro dos limites de uma camada.

Poços com mais de uma seção filtrante e/ou filtros que atravessam mais de uma camada, são na verdade, codificados para o MODFLOW (que executa os cálculos) como uma somatória de poços no mesmo ponto bidimensional.

Assim, deve-se tomar especial atenção para a posição do filtro detalhado no Visual MODFLOW, pois apesar de uma seção filtrante poder ser detalhada como menor que uma camada, esta será considerada totalmente penetrante na camada pelo MODFLOW. Um artifício para evitar este erro é detalhar as camadas de modo que cada seção filtrante inicie e termine no topo e base dos filtros respectivamente.



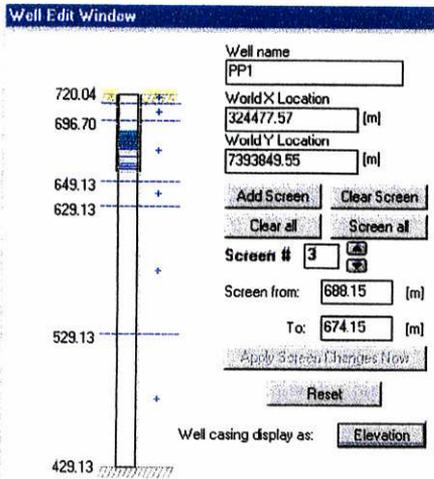
**Figura 29 – Representação de um poço codificado pelo Visual MODFLOW**

Os poços foram introduzidos no modelo conforme os perfis técnico-construtivos, com vazão de exploração definida pelo ensaio de bombeamento efetuado na época da construção dos mesmos. A **Figura 30** apresenta as características básicas dos poços supracitados.

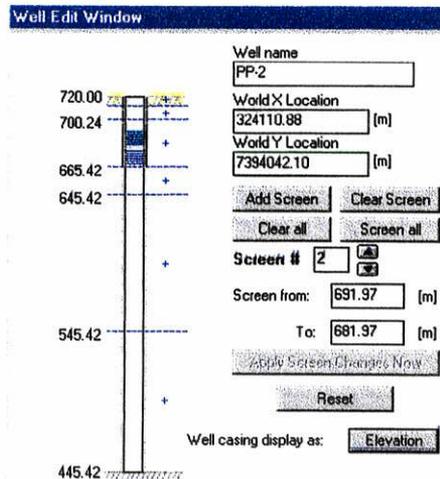
As vazões de operação dos poços (quando ativos) foram inseridas conforme apresentado na **Tabela 13**.

**Tabela 13 – Vazões dos poços tubulares considerados no modelo**

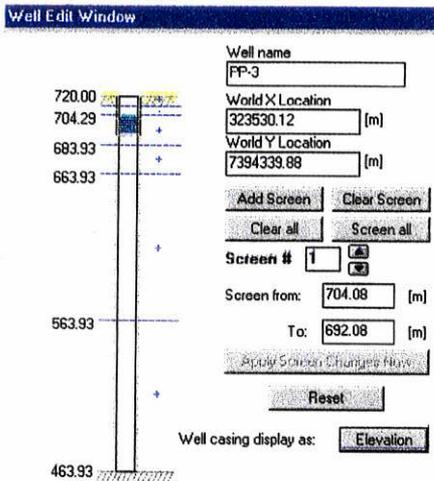
<b>POÇO</b>	<b>VAZÃO</b>	<b>REGIME DE OPERAÇÃO</b>	<b>VAZÃO DO MODELO</b>
<b>PP-1</b>	39,6 m <sup>3</sup> /h	16 horas por dia	633,6 m <sup>3</sup> /d
<b>PP-2</b>	20,0 m <sup>3</sup> /h	16 horas por dia	320,0 m <sup>3</sup> /d
<b>PP-3</b>	6,0 m <sup>3</sup> /h	16 horas por dia	96,0 m <sup>3</sup> /d
<b>PP-4</b>	20,0 m <sup>3</sup> /h	16 horas por dia	320,0 m <sup>3</sup> /d
<b>PP-5</b>	6,5 m <sup>3</sup> /h	16 horas por dia	104,0 m <sup>3</sup> /d
<b>PP-6</b>	9,0 m <sup>3</sup> /h	16 horas por dia	144,0 m <sup>3</sup> /d



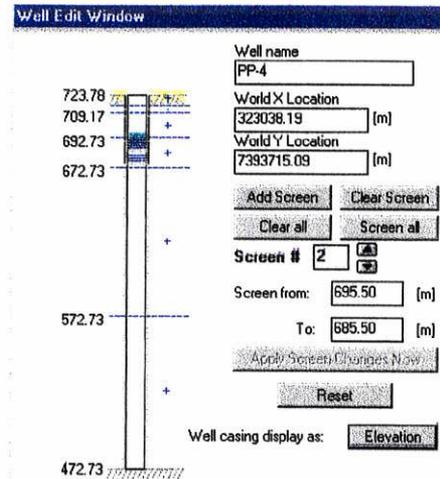
PP1 - Raia Olímpica



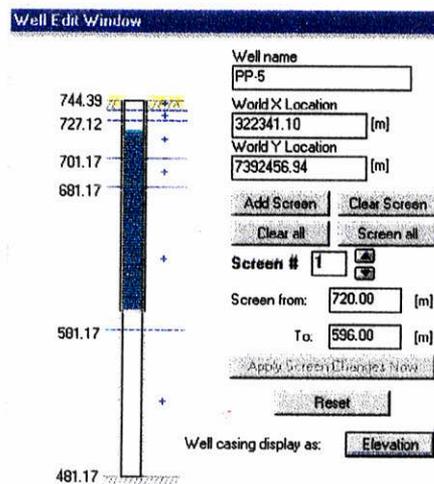
PP2 - Raia Olímpica



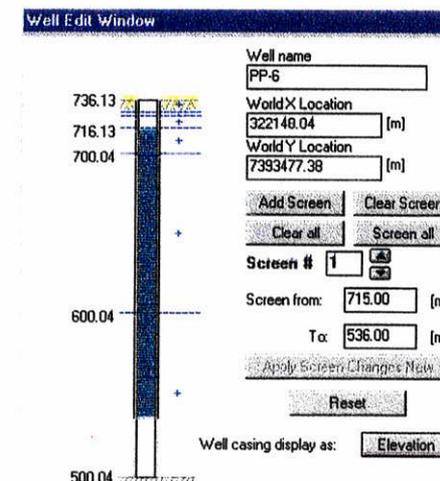
PP3 - Raia Olímpica



PP4 - Praça Ramos de Azevedo



PP5 - Hospital Universitário



PP6 - Prefeitura USP

Figura 30 - Perfil construtivo dos poços tubulares inseridos no modelo

### 5.4.5. Traçado de partículas

As linhas de trajetórias de partículas foram utilizadas para definir as zonas de contribuição dos poços (zonas de captura) e para obter o prognóstico do “traço” de um possível poluente/contaminante infiltrado no aquífero.

O modelo pode calcular as linhas de trajetórias em tempo progressivo (para onde vai a partícula) ou regressivo (de onde veio a partícula), e inseridas em qualquer ponto da área modelada, independente da malha do modelo.

Para a definição da zona de captura de um poço, foram inseridas um círculo de partículas para tempo regresso em torno dos mesmos, com raio de 30m para que envolva a célula representativa do poço em questão, nas camadas nas quais a seção filtrante está representada. Como procedimento de obtenção de uma melhor visualização da zona de captura, o número de partículas utilizadas para a definição da zona de captura foi sempre um divisor do círculo (360°).

Visando definir a trajetória de possíveis contaminantes infiltrados nas áreas de ocorrência das fontes pontuais potenciais de poluição das águas subterrâneas no Campus USP, foram definidas partículas para tempo progressivo nestes locais, na primeira camada saturada do modelo. Este procedimento também foi adotado para visualizar uma possível infiltração de contaminantes difusos representados pelos Córregos Jaguaré e Pirajussara e pelo Rio Pinheiros.

### 5.4.6. Condição inicial e solução numérica

Com todas as informações hidrogeológicas traduzidas e inseridas no modelo matemático, é necessário que seja especificado uma condição inicial para que a equação possa ser resolvida. Como condição inicial, o MODFLOW pode utilizar uma carga média distribuída para todo o modelo ou as cargas calculadas anteriormente.

Visando agilizar o tempo de processamento, foi utilizado como condição inicial, as cargas calculadas na simulação anterior.

O aplicativo Visual MODFLOW apresenta 4 (quatro) pacotes diferentes para soluções numéricas analíticas, sendo, contudo, recomendável a utilização do WHS Solver (GUIGER, comunicação verbal). Na **Tabela 13** são apresentados as principais características das soluções numéricas existentes no aplicativo

**Tabela 14 – Principais características das soluções numéricas contidas no aplicativo Visual MODFLOW (WHB, 1998)**

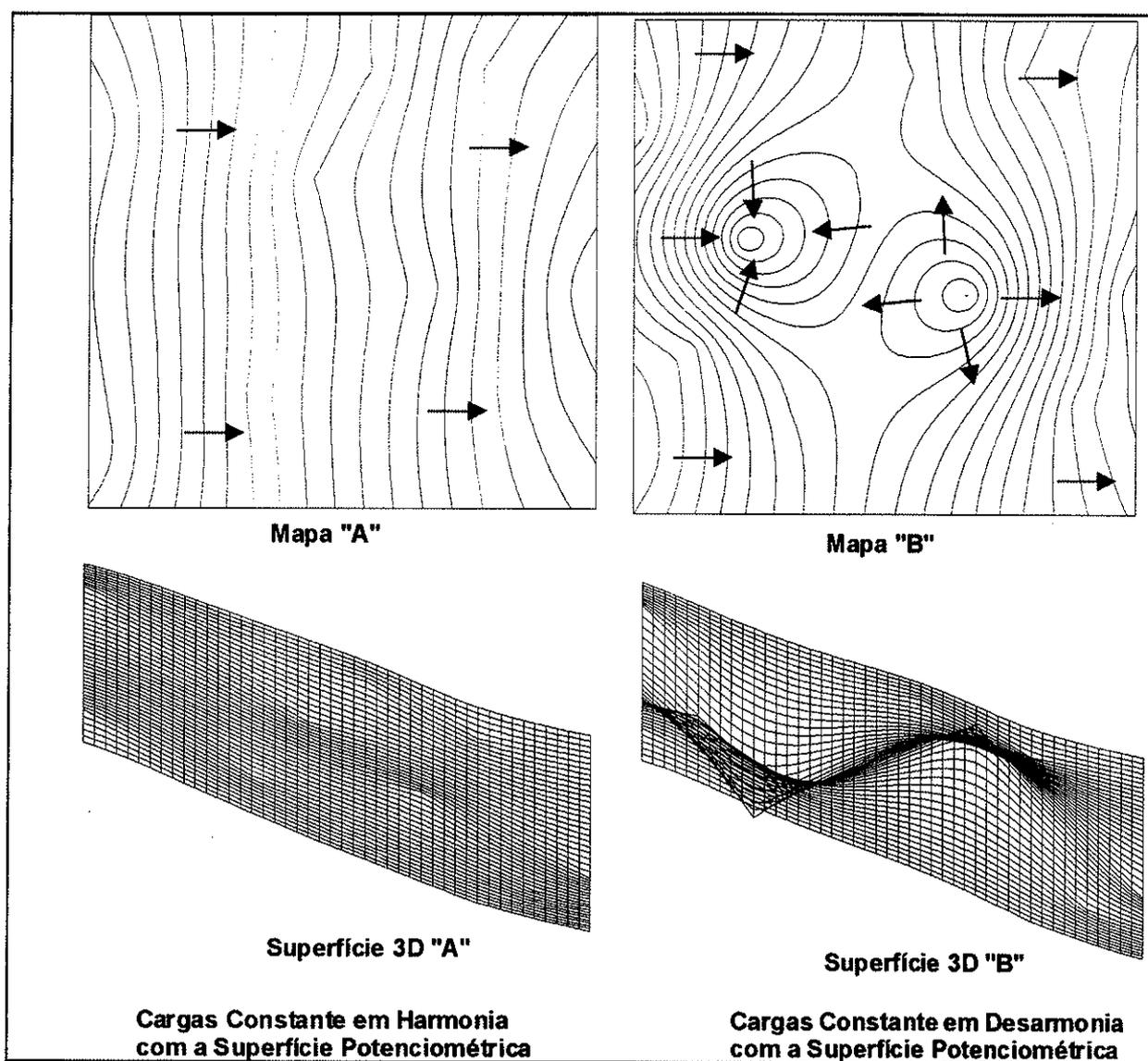
<b>Solução</b>	<b>Características</b>
<b>SSOR</b> Sucessive Slice Overrelation	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ solução demorada</li> <li>▪ demanda muita memória</li> <li>▪ grandes vantagens para cálculos de seções</li> </ul>
<b>SIP</b> Strongly Implicit Method	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ solução demorada</li> <li>▪ demanda baixa memória</li> <li>▪ robusto e converge qualquer coisa, devendo ser sempre checado o balanço das massas.</li> </ul>
<b>PCG2</b> Preconditioned-Conjugate Gradiente	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ requer um pouco mais de memória que SIP</li> <li>▪ mais rápido que SIP e SSOR</li> <li>▪ robusto, mas ocasiona algumas falhas em sistema complexos</li> </ul>
<b>WHS Solver</b> Preconditioned-Conjugate Gradiente Stabilized Method – PCGStab	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ extremamente robusto</li> <li>▪ requer mais memória que o PCG</li> <li>▪ mais rápido</li> </ul>

## 5.5. CALIBRAÇÃO

A calibração do modelo foi efetuada para situação existente na época da coleta dos dados básicos, com apenas os poços PP-5 e PP6 operando.

### 5.5.1. Critério de calibração qualitativo

Como avaliação inicial de calibração qualitativa, foram observadas as cotas das cargas constantes inseridas no modelo em relação a potenciometria, visando identificar a influência destas na geometria da superfície potenciométrica. A ocorrência de elevações e/ou depressões pontuais é um fator de calibração do modelo, pois o mesmo calibrado não deve apresentar tais irregularidades, uma vez que as cargas estabelecidas devem estar em harmonia com as demais cargas calculadas com o modelo (**Figura 31**).



**Figura 31 – Influência da cargas constantes na superfície potenciométrica – critério de calibração qualitativo**

A superfície potenciométrica gerada pelo modelo indica fluxos predominante para norte-nordeste, em direção ao Rio Pinheiros, com gradiente hidráulico no aquífero sedimentar de 0,0104, uma diferença de 2,8% ao gradiente verificado pela IRATANI (1993), de 0,0107.

O dreno da Politécnica também foi considerado um indicativo da calibração do modelo, uma vez que o mesmo sempre se apresenta com água na situação de campo. O modelo apresentou uma vazão de 900 m<sup>3</sup>/d.

Como o aquífero cristalino foi considerado homogêneo e anisotrópico, o bombeamento dos poços produtores PP-5 PP-6 foi considerado como um critério de calibração qualitativa, uma vez que o meio homogêneo representativo do aquífero cristalino comporta as vazões exploradas pelos poços supracitados.

A profundidade de extinção, uma vez que não foi quantificado através de estudo específico, e sim estimado em função das características fisiográficas da área, variando entre 2 a 3,5m, também foi considerado um fator de calibração qualitativo do modelo. Esta, apresentou valor final calibrado de 2,5m.

### **5.5.2. Critério de calibração quantitativo**

Um dos principais critérios de calibração do modelo foi a verificação dos resíduos das cargas calculadas em relação as cargas medidas no campo. Para tanto, utilizou-se a média ponderada das cargas medidas por IRATANI (1993) nos poços de monitoramento no período entre os meses de JAN89 a JAN91, com a topografia corrigida para o mapa inserido no modelo, conforme apresentado na **Tabela 14**.

O modelo apresenta uma correlação automática dos resíduos na forma gráfica (**Figura 32**), indicando os seguintes parâmetros:

a) Média dos resíduos, dada pela equação:

$$R = \frac{\sum r}{n}$$

b) Média absoluta dos resíduos, dada pela equação:

$$RA = \frac{\sum |r|}{n}$$

Raiz do resíduo, dada pela equação:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum r^2}{n}}$$

c) Média normalizada, dada pela equação:

$$RN = \frac{RMS}{H_{max} - H_{min}}$$

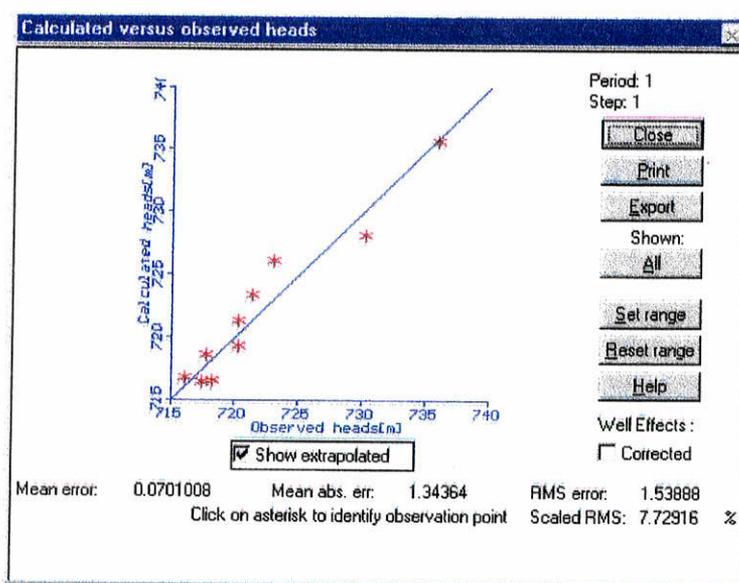
**Tabela 15 – Cargas utilizadas na calibração e os resíduos verificados no modelo**

PONTO	Cota do terreno ( m )	Prof. Média do N.A. ( m )	Cota do N.A. ( m )
PM-1	720,03	2,62	717,47
PM-2	722,80	2,53	720,27
PM-3	736,16	5,92	730,24
PM-4	727,03	3,91	723,12
PM-5	720,00	1,76	718,24
PM-6	720,10	3,98	716,12
PM-7	738,63	2,60	736,03
PM-9	720,20	2,39	717,81
PM-10	724,81	4,52	729,29
PM-11	724,53	3,10	721,43

Em função dos resíduos verificados, o modelo é considerado como calibrado após obtenção de uma média normalizada inferior a 10% (GUIGUER, informação verbal). Assim, o modelo foi considerado calibrado com os seguintes resíduos apresentados na **Tabela 15**.

Tabela 16 – Correlação de resíduos obtidos com o modelo calibrado

R	RA	RMS	RN
( m )	( m )	( m )	( % )
0,07	1,34	1,54	7,73



**Figura 32 – Gráfico de correlação das cargas calculadas e as observadas – Calibração quantitativa**

O modelo foi calibrado com uma recarga compartimentada em dois blocos, A e B, com taxas de recarga de 12,1 e 19,5% da precipitação média anual de 1485mm/ano, conforme definição por IRATANI (1993), representando um fator de calibração do modelo.

Assim como a recarga, o modelo apresentou uma taxa de evapotranspiração coerente com as taxas calculadas para a área, de 45,2% em relação à recarga, número condizente com a faixa de variação definida por MENEGASSE VELÁSQUEZ (1996), de 25% para a área com alto índice de impermeabilização e 54%, para a área sem superfície impermeabilizada.

O modelo calibrado apresentou um balanço hídrico conforme apresentado na **Tabela 16**, com 0% de erro final, indicando que as equações parciais de fluxo foram solucionadas corretamente (ADERSON & WOESSNER, 1994).

**Tabela 17 – Balanço hídrico final apresentado pelo modelo**

ITEM	ENTRADAS ( m <sup>3</sup> /d )	SAÍDA ( m <sup>3</sup> /d )
Armazenamento	0,00	0,00
Carga constante	0,00	6.344,38
Poços	0,00	248,00
Drenos	0,00	1158,10
Recarga	10.635,00	0,00
Evapotranspiração	0,00	1.366,70
Rios	888,96	945,02
GHB	663,27	2125,50
<b>TOTAL</b>	<b>12.188,00</b>	<b>12.188,00</b>
Diferença		- 0,03
%		0,00%

## 5.6. VALIDAÇÃO

Como processo de validação ou verificação do modelo em apreço, foram medidas em campo, as cargas nos poços de monitoramento existentes na área, e ainda operantes, e efetuado uma checagem dos resíduos. As cargas medidas nos poços são apresentados na **Tabela 17**. O modelo apresentou um resíduo médio (R) de -0,15m, resíduo médio absoluto (RA) de 1,13m, uma raiz do resíduo (RMS) de 1,33m e uma média normalizada (RN) de 9,72%, sendo assim o modelo considerado representativo após um período de 8 (oito) anos, foi considerado assim, validado.

**Tabela 18 – Cargas utilizadas na validação do modelo**

<b>PONTO</b>	<b>Prof. do N.A. ( m )</b>	<b>Cota do N.A. ( m )</b>
<b>PM-1</b>	3,07	716,97
<b>PM-3</b>	5,87	730,29
<b>PM-4</b>	2,86	724,18
<b>PM-6</b>	4,50	716,60
<b>PM-9</b>	2,64	717,56
<b>PM-10</b>	4,44	720,37

## 5.7. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Visando checar a sensibilidade de alguns dos parâmetros hidrogeológicos inseridos no modelo, foi efetuada uma variação destes parâmetros e uma verificação dos resíduos. O parâmetros verificados foram: permeabilidade, coeficiente de armazenamento, porosidade efetiva, recarga e evapotranspiração.

Conforme apresentado na **Tabela 18**, os resultados indicam uma maior sensibilidade do modelo para a condutividade hidráulica nos sedimentos e a evapotranspiração, no qual o modelo não chega a convergir os cálculos, apresentando terminação anormal. Secundariamente, apresenta uma maior sensibilidade à recarga.

De uma maneira geral, pode-se concluir que o modelo é mais sensível aos fatores controladores de entradas e saídas de água no sistema, e não aos de armazenamento. Isto se deve ao fato do modelo executar os cálculos em regime de equilíbrio.

Quanto a influência da permeabilidade nos resíduos, verifica-se que ela é maior nos sedimentos do que no manto de alteração, por possuir uma maior área superficial e assim um maior contato direto com os principais condicionantes de entradas e saídas de água no sistema, a saber: recarga, evapotranspiração, carga constante, rios, drenos e cargas hidráulicas genéricas.

**Tabela 19 – Análise de sensibilidade. Influência do aumento em 50% de alguns parâmetros do modelo no resíduo final normalizado das cargas**

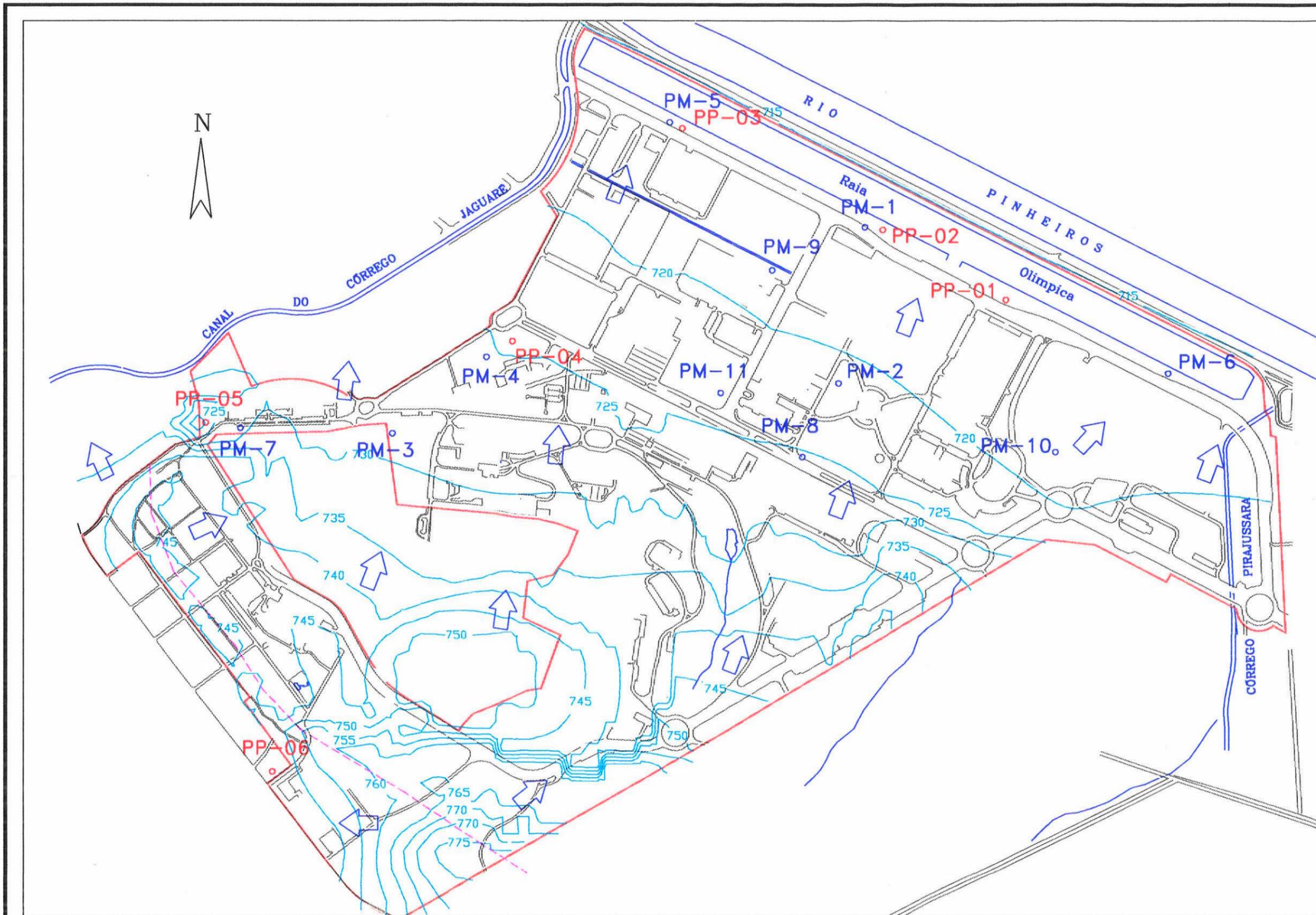
<b>PARÂMETRO</b>	<b>RMS ( m )</b>	<b>Diferença ( % )</b>
<b>Condutividade</b>		
Embasamento	1,55	0,65
Manto de alteração	1,60	3,90
Sedimento	Não converge	-
<b>Porosidade efetiva</b>		
Embasamento	1,54	0,00
Manto de alteração	1,54	0,00
Sedimento	1,54	0,00
<b>Coefficiente de armazenamento</b>		
Embasamento	1,54	0,00
Manto de alteração (<10m)	1,54	0,00
(>10m)	1,54	0,00
Sedimento (<10m)	1,54	0,00
(>10m)	1,54	0,00
<b>Condutância no Raia Olímpica</b>		
	1,58	2,53
<b>Recarga</b>		
	3,95	156,49
<b>Evapotranspiração</b>		
Evapotranspiração	Não converge	0,00
Profundidade de extinção	1,59	3,25

## 5.8. RESULTADOS

O modelo hidrogeológico numérico simulado da área do Campus "Armando Salles de Oliveira" sem o bombeamento dos poços tubulares existentes no aquífero sedimentar indica uma superfície potenciométrica com cargas equipotenciais variando da cota 750m a 715m, com fluxo predominante das águas subterrâneas para norte/nordeste, em direção ao Rio Pinheiros, conforme apresentado na **Figura 33**.

A superfície potenciométrica apresentada indica uma não concordância entre o divisor de águas situado a sudoeste da área com a topografia do terreno, estando o divisor já próximo ao vale da Av. Corifeu de A. Marques e localizadas alterações das direções de fluxo das águas subterrâneas, nos setores de topografia mais acidentada e devido a influência do Córrego Jaguaré localizado no limite norte da área.

A avaliação do balanço hídrico individualizado, indica as contribuições de água dos diversos itens ao sistema hídrico subterrâneo local, conforme apresentado na **Tabela 19**.



LEGENDA :

-  Limite do Campus
-  PP-02 Poço Produtor USP
-  PM-10 Poço de Monitoramento
-  725 Curva Equipotencial
-  Sentido do Fluxo Subterrâneo
-  Divisor dos Fluxos Subterrâneos

Mapa Potenciométrico sem o bombeamento dos Poços no Aquífero Sedimentar

ESCALA  
0 100 200 300 400 500m

Título: <b>Delimitação de Perímetros de Proteção dos Poços Tubulares (PPP) Empregando a Técnica de Modelagem Numérica</b>	
Universidade de São Paulo Instituto de Geociências	Dissertação de Mestrado - 1999
Autor: Mário de Brito Marcelino	Figura: <b>33</b>

**Tabela 20 – Contribuição dos parâmetros de contorno ao sistema hídrico subterrâneo modelado**

<b>ITEM</b>	<b>ENTRADAS ( m<sup>3</sup>/d )</b>	<b>SAÍDA ( m<sup>3</sup>/d )</b>
<b>Célula "Rio Pinheiros"</b>	0,00	6.344,38
<b>Célula Raia Olímpica</b>	1.533,60	509,15
<b>Célula do Córrego Pirajussara</b>	153,95	381,27
<b>Célula do Córrego Jaguaré</b>	425,23	977,35
<b>Célula Dreno da Politécnica</b>	424,38	1.280,80
<b>Célula Dreno da Av. Universidade</b>	362,19	412,36
<b>Célula Dreno da Av. Corifeu de A. Marques</b>	93,91	161,05
<b>Recarga</b>	10.635,35	0,00
<b>Evapotranspiração</b>	0,00	1.366,71
<b>Recarga Subterrânea Externa</b>	663,27	2125,44
<b>Poço Produtor 5</b>	0,00	104,00
<b>Poço Produtor 6</b>	0,00	144,00
<b>TOTAL</b>	<b>12.178,58</b>	<b>12.187,61</b>
<b>Diferença</b>	<b>- 0,04</b>	
<b>%</b>	<b>0,00%</b>	

Deve-se salientar que na região mais acidentadas da área modelada (setores sul e oeste), as curvas equipotenciais apresentaram uma tendência retangular, decorrente da influência da malha do modelo, pouco densa para o setor.

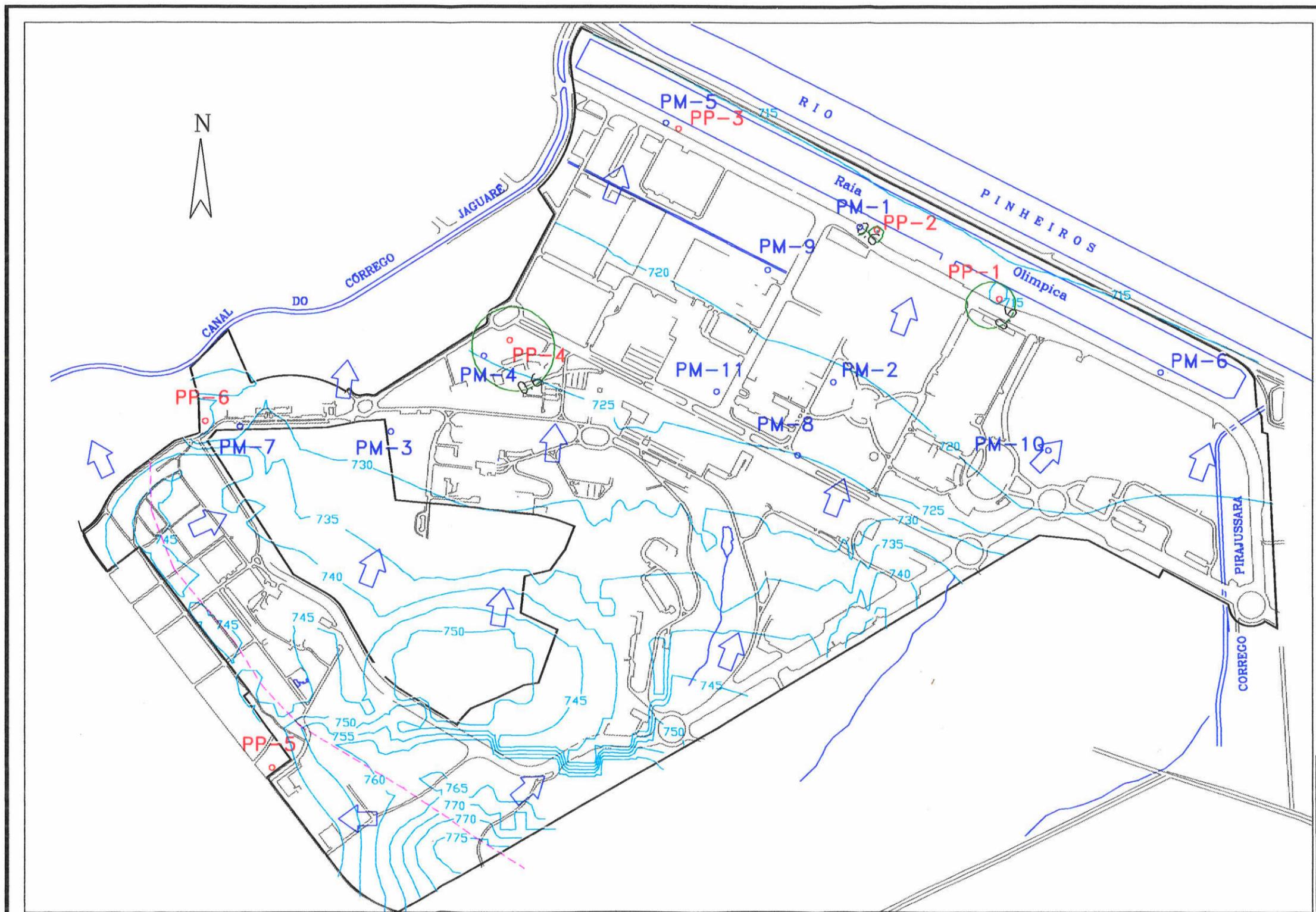
### 5.8.1. Perímetros de Proteção dos Poços – PPP

Visando delimitar os perímetros de proteção dos poços tubulares perfurados no aquífero sedimentar, o modelo numérico foi simulado com estes poços operantes, com um vazão de acordo com o estabelecido pelo ensaios de produção executado pela empresa de perfuração, a um regime de 16 horas/dia, conforme apresentado anteriormente na **Tabela 13** (capítulo 5.4.4.).

O balanço hídrico final da área modelo para a situação dos poços no aquífero sedimentar operantes indica uma diminuição das saídas dos fluxos subterrâneos pelo Rio Pinheiros (cerca de 9%) e pelas cargas hidráulicas genéricas, consequência de uma menor oferta de água no sistema hídrico subterrâneo (**Tabela 20**). O balanço hídrico indica ainda, que 40% (396 m<sup>3</sup>/d) do volume total de água bombeada pelos poços PP-1, 2 e 3, situados próximos da Raia Olímpica, é proveniente da própria ~~da~~ Raia.

A influência dos bombeamentos na distribuição das cargas potenciométricas na área é desprezível para a escala do trabalho, sendo apenas de caráter localizado nos entornos dos poços, pouco influenciando nos resíduos das cargas medidas nos poços de monitoramento, alterando o resíduo normalizado em 0,03 pontos percentuais, passando de 7,73 para 7,76%. Esta pouca influência nos resíduos verificadas nas cargas potenciométricas, é decorrente da distância entre os poços de monitoramento e os poços de bombeio, conforme apresentado na **Figura 34**.

Objetivando a visualização da área de influência dos bombeamentos dos poços, foi ilustrado na figura supracitada as respectivas áreas dos cones de rebaixamento, considerando como início da área em apreço um rebaixamento superior a 0,65m da superfície potenciométrica local, valor correspondente a 50% do resíduo médio absoluto verificado na calibração do modelo



LEGENDA :

- Limite do Campus
- PP-1 Poço Produtor USP
- PM-10 Poço de Monitoramento
- 725 Curva Equipotencial
- Divisor dos Fluxos subterrâneos
- Sentido do Fluxo Subterrâneo
- Área com Rebaixamento Induzido pelos Bombeamentos (> 0,6m)

Mapa Pontenciométrico com o bombeamento dos Poços no Aquífero Sedimentar

ESCALA  
 0 100 200 300 400 500m

Título: Delimitação de Perímetros de Proteção dos Poços Tubulares (PPP) Empregando a Técnica de Modelagem Numérica	
Universidade de São Paulo Instituto de Geociências	Dissertação de Mestrado - 1999
Autor: Mário de Brito Marcelino	Figura 34

**Tabela 21 – Balanço hídrico final apresentado pelo modelo com influência dos bombeamentos dos poços (BH2) e a diferença em relação à área sem os poços operando (BH1)**

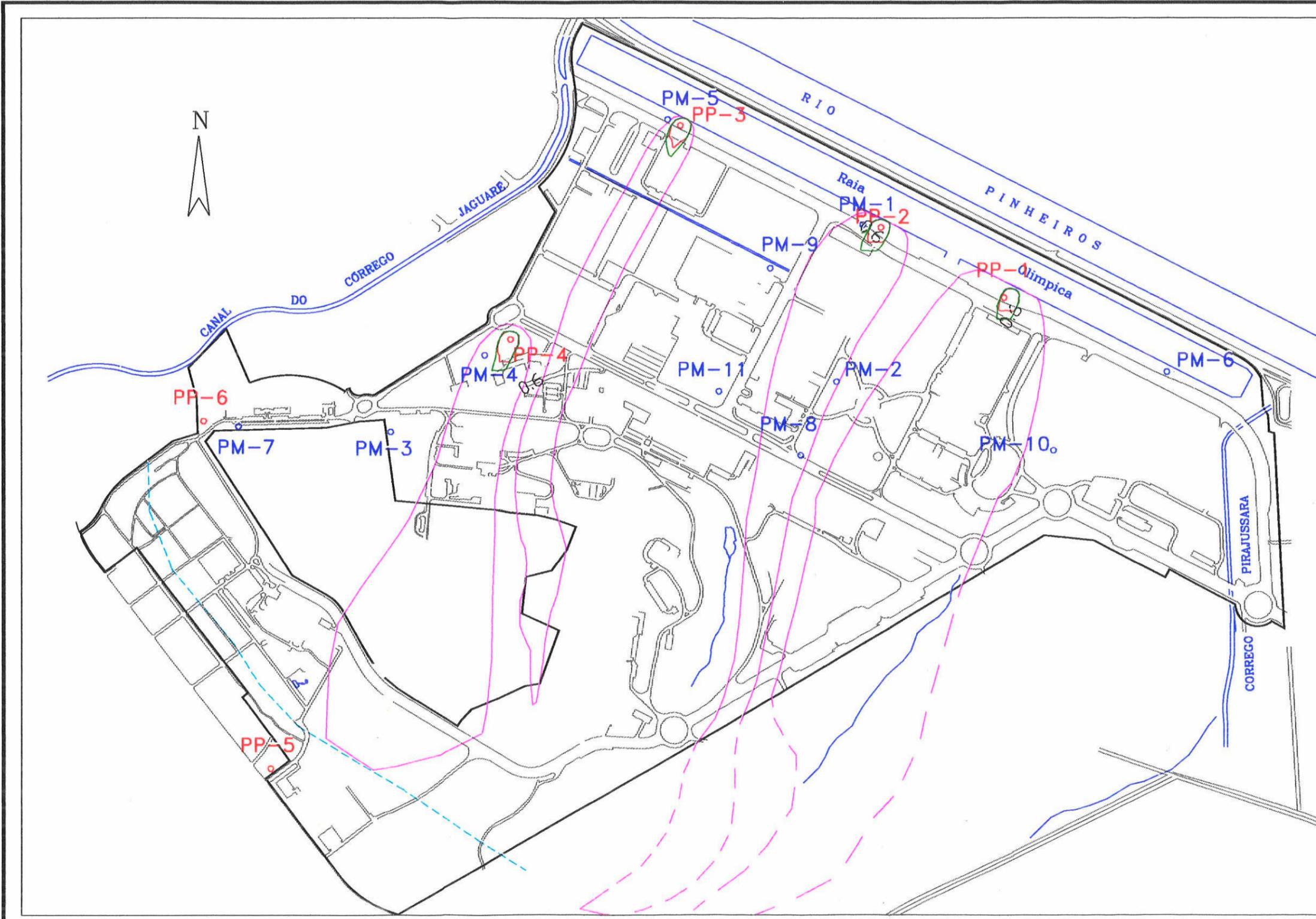
ITEM	ENTRADAS		SAÍDA	
	BH2 ( m <sup>3</sup> /d )	sobre BH1	BH2 ( m <sup>3</sup> /d )	% sobre BH1
Armazenamento	0,00	100,0%	0,00	100,0%
Carga constante	0,00	100,0%	5.767,40	90,91%
Poços	0,00	100,0%	1.617,60	652,26%
Drenos	0,00	100,0%	1.086,20	93,8%
Recarga	10.635,00	100,0%	0,00	100,0%
Evapotranspiração	0,00	100,0%	1.311,70	96,0%
Rios	1.286,50	144,7%	897,88	95,0%
GHB	680,68	102,6%	1.921,80	90,4%
<b>TOTAL</b>	<b>12.603,00</b>	<b>103,4%</b>	<b>12.603,00</b>	<b>103,4%</b>
Diferença			- 0,03	
%			0,00%	

Através da técnica de traçado de partículas, foram delimitados 3 (três) perímetros de proteção distintos para os poços produtores 1, 2, 3 e 4, em função: das vazões projetadas, dos perímetros de alerta contra poluição (PAP), de influência (PI) e de contribuição (PC), conforme apresentado na **Figura 35**.

Obedecendo a legislação estadual vigente, foi determinado a delimitação do Perímetro Imediato de Proteção Sanitária.

#### **5.8.1.1. Perímetro Imediato de Proteção Sanitária (PIPS)**

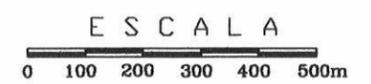
Perímetro fixo estabelecido pelo Decreto Estadual 32.955 visando estabelecer uma proteção sanitária imediata, no qual estabelece que em raio de 10 metros a partir do poço (ponto de captação), deve ser cercado e protegido com telas, e possuir, uma laje de proteção com, no mínimo, 3m<sup>2</sup>.



LEGENDA :

-  Limite do Campus
-  PP-1 Poço Produtor USP
-  PM-10 Poço de Monitoramento
-  Divisor dos Fluxos Subterrâneos
-  Perímetro de Alerta contra Poluição ( PAP )
-  Perímetro de Prevenção ( PP )
-  Perímetro de Contribuição ( PC )

Perímetros de Proteção dos Poços Tubulares que Exploram o Aquífero Sedimentar



Título: <b>Delimitação de Perímetros de Proteção dos Poços Tubulares (PPP) Empregando a Técnica de Modelagem Numérica</b>	
Universidade de São Paulo Instituto de Geociências	Dissertação de Mestrado - 1999
Autor: Mário de Brito Marcelino	Figura <b>35</b>

Dos quatro poços em apreço, apenas o poço 1 e 4 possuem uma área cercada menor que a estabelecida pelo decreto. Os poços 2 e 3, apesar de situarem-se dentro da área da Raia Olímpica, área de circulação restrita, situam-se muito próximo da cerca (< 2,0m) que limita a área da Raia Olímpica. Conclui-se assim, que os poços não estão em conformidade com a legislação vigente.

Deve-se salientar ainda, que os poços PP-1, PP-2, e PP-3 apresentam-se em evidente estado de abandono, com o mato cobrindo os mesmos. Destaca-se ainda, que foram plantado árvores em frente ao acesso do portão da cerca do PP-4, estas quando crescerem, impedirão o acesso aos equipamentos de manutenção do mesmo.

#### **5.8.1.2. Perímetro de Alerta Contra Poluição (PAP)**

O Perímetro de Alerta Contra Poluição (PAP) foi estabelecido conforme determinação do Decreto Estadual 32.955, através da simulação de uma zona de captura de partículas com até 50 dias de trânsito.

Neste perímetro deve ser impedido o aparecimento de fontes potenciais poluentes e controlado ou até eliminadas as fontes potenciais já existentes.

A detecção de contaminantes nas águas subterrâneas em uma das PAP's significará a suspensão imediata da exploração do poço em questão, seguida de uma análise do problema detectado, visando avaliar os riscos do poluente à saúde humana e decisão de atitude a ser tomada, seja ela a remediação do aquífero ou até o reinício da exploração do poço.

De uma maneira geral, as PAP's apresentaram um raio menor que 150m em seu maior comprimento, abrangendo áreas de 3.108m<sup>2</sup>, 3.348m<sup>2</sup>, 3.583m<sup>2</sup> e 4.118m<sup>2</sup>, respectivamente os poços PP-1, PP2, PP-3 e PP-4.

#### **5.8.1.3. Perímetro de Prevenção (PP)**

Foi definido, através do tempo de trânsito de partículas de 150 dias, um perímetro de prevenção (PP) no qual possibilite a coleta e análise química das águas subterrâneas e uma posterior avaliação e tomada de atitudes de controle frente aos resultados obtidos, pelas autoridade competentes.

Este tempo de trânsito foi definido ponderando-se os seguintes aspectos:

- a) usualmente são necessários 30 dias entre a coleta da amostra a apresentação do laudo técnico contendo os resultados, conclusões e recomendações para o problema reportado;
- b) haverá um período de 60 dias para a tomada de uma atitude frente os resultados apresentado pelo laudo técnico, antes que o poluente atinja o PAP;
- c) possibilita a implantação de um monitoramento trimestral da qualidade das águas subterrâneas, minimizando os custos de uma periodicidade menor do monitoramento.

Estes perímetros, apresentam forma semelhante ao PAP, porém, um pouco mais comprido em seu maior eixo.

#### **5.8.1.4. Perímetro de Contribuição (PC)**

O Perímetro de Contribuição (PC) foi delimitado através da verificação do traçado de partículas capturadas pelos poços para um tempo infinito (em equilíbrio). Este perímetro indica a área de contribuição de água do sistema hídrico subterrâneo no qual deve haver um controle seletivo do uso do solo, tendo em vista o surgimento de fontes potenciais de poluentes persistentes ou não.

A avaliação destas áreas indica o PP-4 como o poço mais vulnerável no aspecto de possuir fontes pontuais potenciais poluentes dos recursos hídricos, representado por um posto de serviço e um depósito de rejeitos radioativos dentro da área do Instituto de Pesquisa de Energia Nuclear – IPEN.

Secundariamente, os PP-1 e 2 possuem perímetros de contribuição que se estende para fora da área do Campus Universitário, dificultando um possível gerenciamento do uso do solo em toda a sua extensão.

### 5.8.2. Traçado de partículas provenientes das fontes potenciais de poluição

Este item objetiva a caracterização da dinâmica de possíveis poluentes infiltrados nas fontes potenciais poluidoras das águas subterrâneas caracterizadas neste trabalho. Nestes locais, foram inseridas partículas na primeira camada saturada e determinada sua trajetória ao longo do tempo. Deve-se salientar que, estas simulações não consideram quaisquer um dos fatores que condicionam o transporte de um poluente além da direção e velocidade de fluxo, tais como: dispersão, advecção, reações químicas diversas, degradação natural, etc..

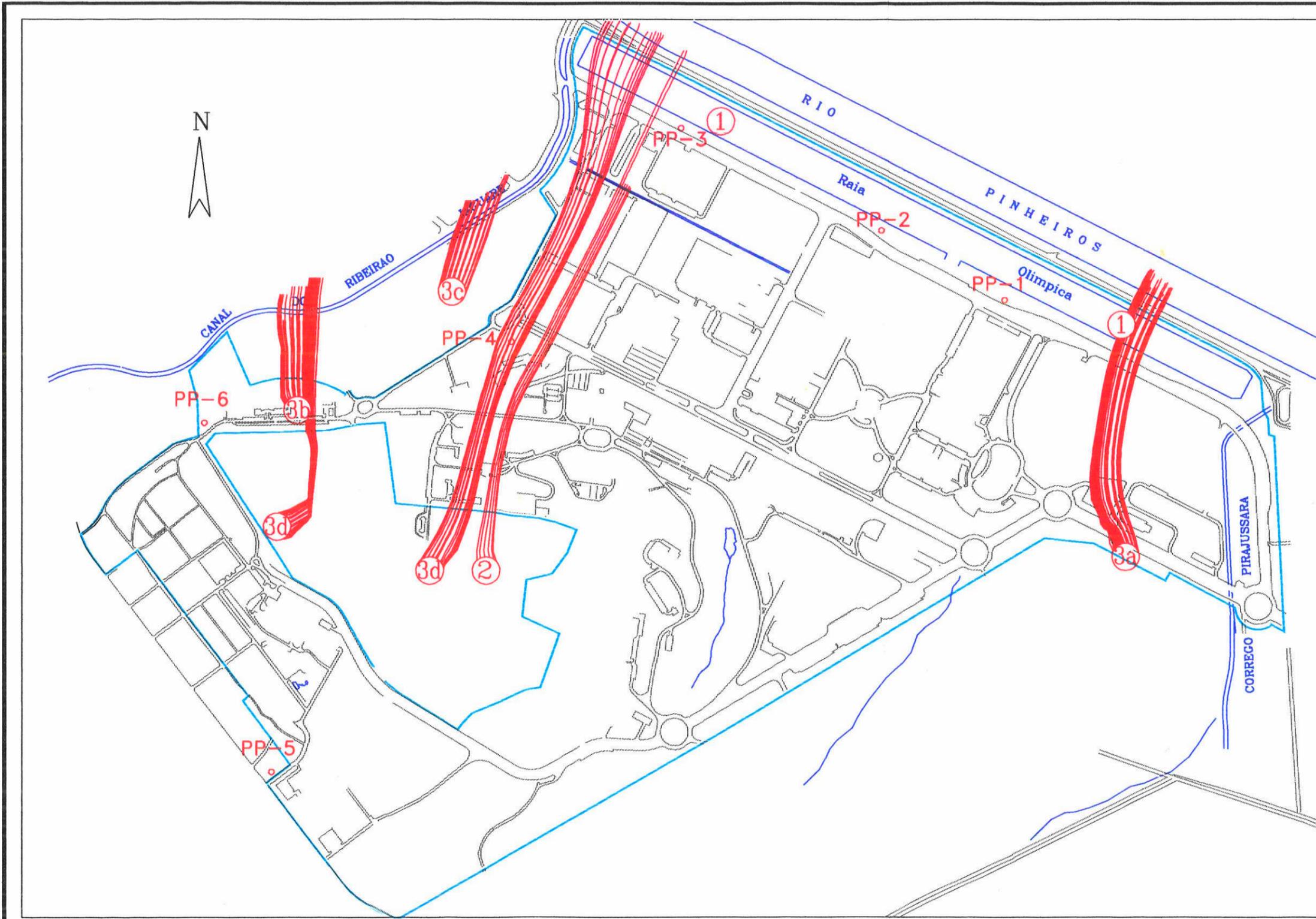
Foram então simuladas as situações da área sem e com o bombeamento dos poços do aquífero sedimentar, representativas da situação atual e futura. O prognóstico de trajetórias de possíveis contaminantes infiltrados nas áreas das fontes pontuais de poluição indica:

- a) situação sem bombeamento (atual) - A simulação indica que contaminantes infiltrados na área do posto de serviços e/ou depósito de resíduos radioativos do Instituto de Pesquisa de Energia Nuclear – IPEN fluem em direção ao Rio Pinheiros, atingindo o Córrego da Politécnica após um período de 9 anos, sendo parcialmente capturados pelo córrego, e após 11 anos, atingem a Raia Olímpica e posteriormente a Rio Pinheiros, após 13 anos.

Partículas infiltradas na área do posto de serviço situado na Av. da Universidade, fluem em direção a Raia Olímpica, no qual chegam após 5 anos. Partículas infiltradas na área do posto de serviço do Instituto de Pesquisa Tecnológicas, fluem em direção do Córrego Jaguaré, levando pouco mais de 2 anos para atingí-lo.

Na **Figura 36** são apresentadas as trajetórias das partículas descritas.

- b) situação com bombeamento (situação futura) – para estas condições, o modelo indica que as partículas infiltrados na área do posto de serviços e/ou depósito de resíduos radioativos do Instituto de Pesquisa de Energia Nuclear – IPEN são capturadas pelo poço PP-4 após um período de 5 anos, não alterando as condições de fluxo nos demais setores, conforme apresentado na **Figura 37**.



LEGENDA :

-  Limite do Campus
-  Prognóstico de Trajetória
-  Raia Olímpica
-  Resíduo Radioativo
-  Tanque Combustível
  -  - Auto Posto Cidade Universitária
  -  - Prefeitura USP
  -  - IPT
  -  - IPEN
-  PP-1  
Poço Produtor USP

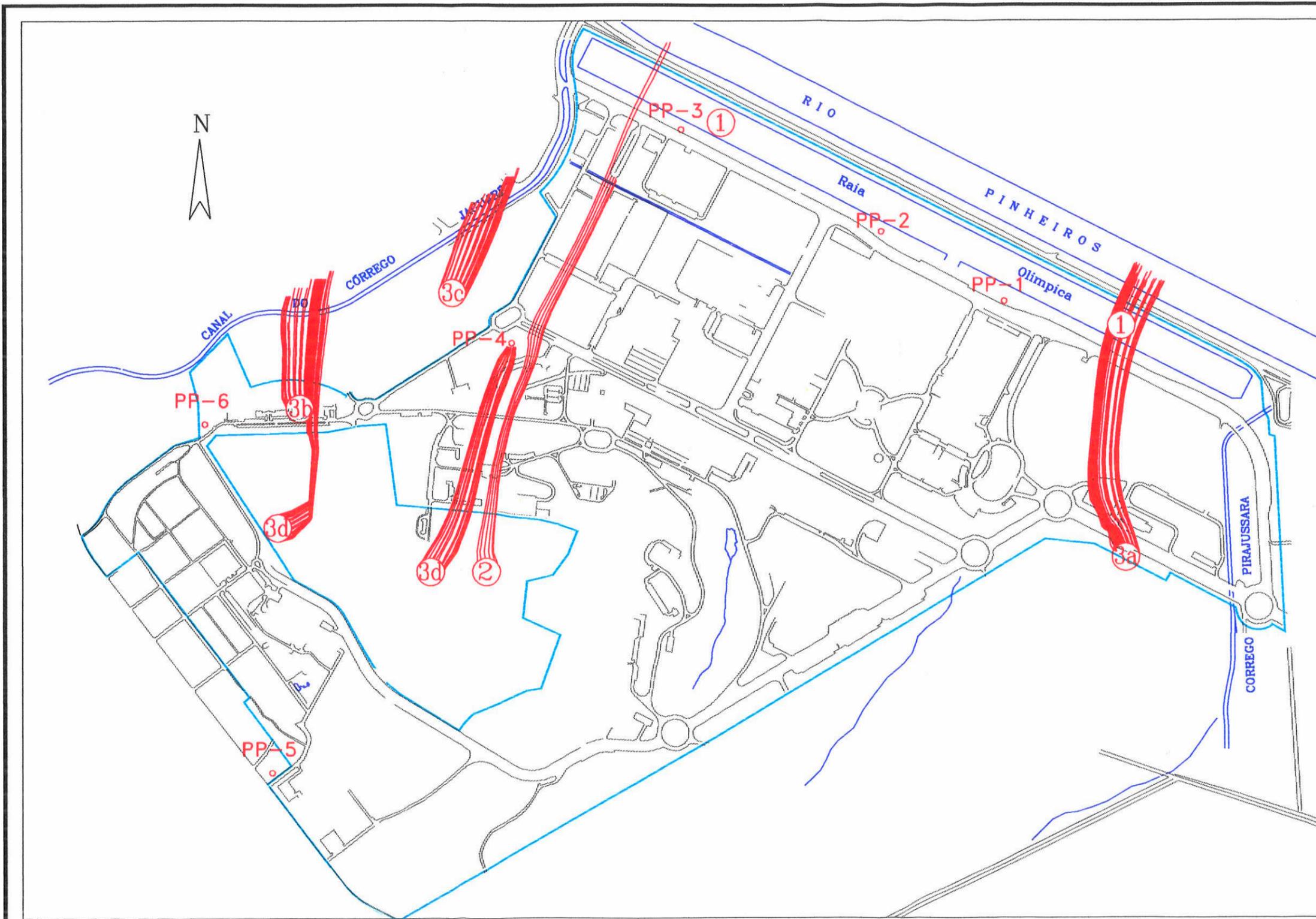
Prognóstico de Deslocamento de Contaminantes no Aquífero sem o Bombeamento dos Poços Tubulares



Título:  
**Delimitação de Perímetros de Proteção dos Poços Tubulares (PPP) Empregando a Técnica de Modelagem Numérica**

Universidade de São Paulo Instituto de Geociências      Dissertação de Mestrado - 1999

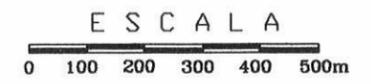
Autor: Mário de Brito Marcelino      Figura: 36



LEGENDA :

-  Limite do Campus
-  Prognóstico de Trajetória
-  Raia Olímpica
-  Resíduo Radioativo
-  Tanque Combustível
  - a** - Auto Posto Cidade Universitária
  - b** - Prefeitura USP
  - c** - IPT
  - d** - IPEN
-  PP-1 Poço Produtor USP

Prognóstico de Deslocamento de Contaminantes no Aquífero com o Bombeamento dos Poços Tubulares



Título:	
Delimitação de Perímetros de Proteção dos Poços Tubulares (PPP) Empregando a Técnica de Modelagem Numérica	
Universidade de São Paulo Instituto de Geociências	Dissertação de Mestrado - 1999
Autor: Mário de Brito Marcelino	Figura 37

Visando ainda avaliar uma possível degradação da qualidade das águas subterrâneas pelas águas contaminadas do Rio Pinheiros ou da Raia Olímpica (admitindo a hipótese de um acidente com um veículo de transporte de produtos perigosos na Marginal Pinheiros que venha a contaminar as águas da Raia) também foram inseridas partículas nas respectivas células representativas no modelo.

A simulação de bombeamento indica que não ocorrerá uma inversão de fluxos subterrâneos, não ocasionando uma infiltração de possíveis poluentes existentes no Rio Pinheiros, conforme apresentado na **Figura 38a**.

No intuito de obter uma maior segurança nos resultados de uma possível contaminação pelo Rio Pinheiros em função de uma inversão dos fluxos subterrâneos promovida pelos bombeamentos, foram simuladas condições de bombeamentos crescentes no PP-1, até ocorrer a inversão dos fluxos subterrâneos, favorecendo a captura de poluentes provenientes do Rio Pinheiros. Esta situação, só ocorre a vazões superiores de  $4.000\text{m}^3/\text{dia}$  ou  $167\text{ m}^3/\text{h}$  (**Figura 38b**).

### **5.8.3. Medidas de proteção e controle dos recursos hídricos subterrâneos**

Visando a proteção dos recursos hídricos subterrâneos do Campus USP "Armando Salles de Oliveira", recomenda-se que sejam adotadas as seguintes medidas de proteção e controle dos recursos hídricos subterrâneos:

- I. Adoção para a Cidade Universitária de uma política de preservação e controle dos recursos hídricos da Cidade Universitária, a ser definida entre a administração do Campus e Técnicos do Centro de Pesquisa de Águas Subterrâneas – CEPAS.
- II. Que sejam tomadas as seguintes medidas emergenciais de proteção sanitária imediata, visando contemplar a legislação estadual vigente:
  - a) instalação de uma laje de concreto para proteção sanitária com, no mínimo,  $3\text{m}^2$  em torno dos poços;

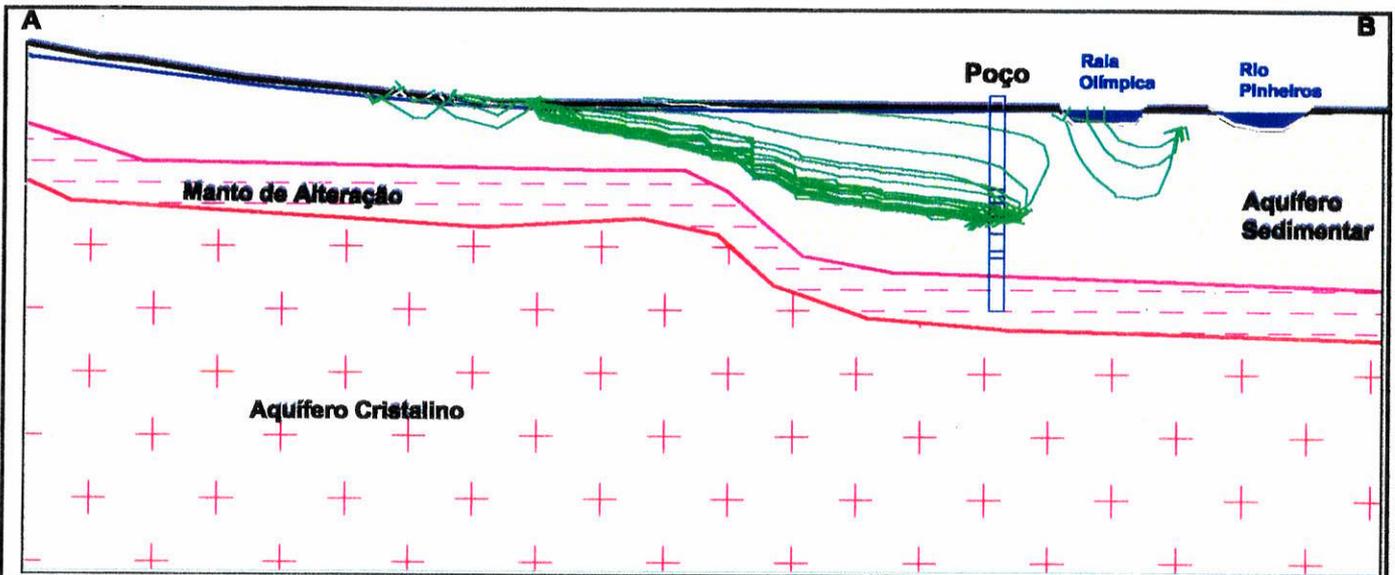


Figura 38 A (  $Q = 36,6\text{m}^3/\text{h}$  )

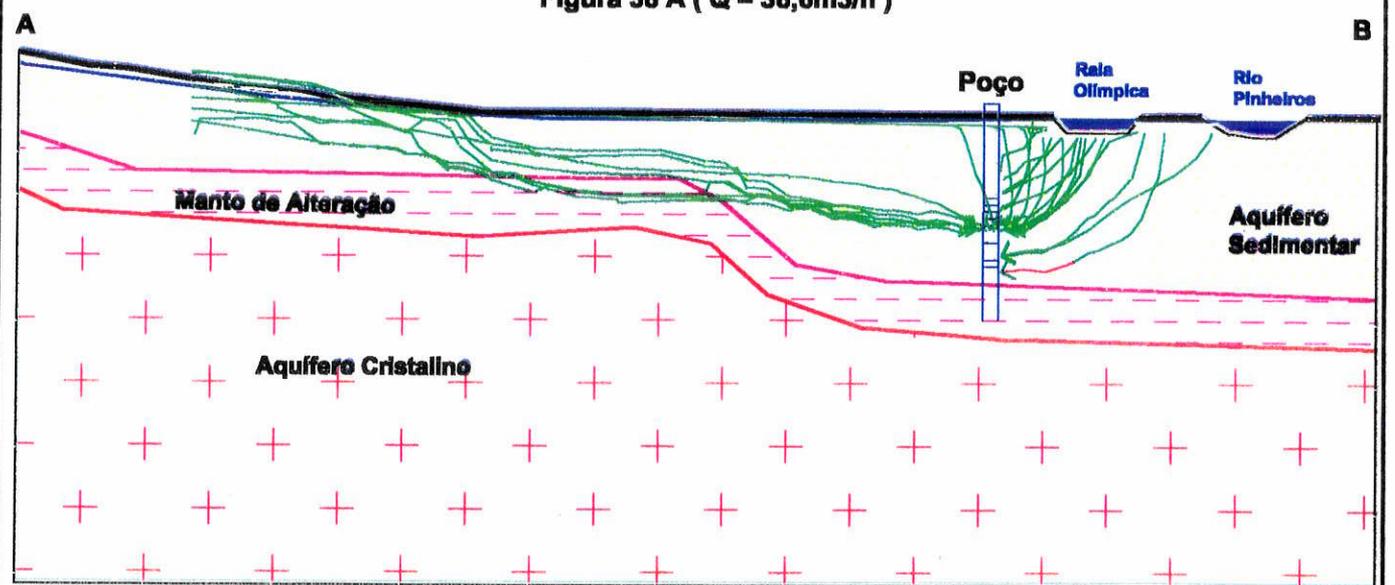
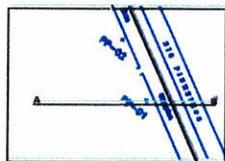


Figura 38 B (  $Q = 167,0\text{m}^3/\text{h}$  )

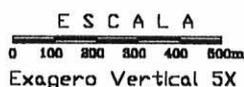
LEGENDA:



Trajatória de Partícula



Mapa de Localização



### Captura de Partículas pelo Poço Produtor PP-1

Título Delimitação de Perímetros de Proteção dos Poços Tubulares (PPP) Empregando a Técnica de Modelagem Numérica	
Universidade de São Paulo Instituto de Geociências	Dissertação de Mestrado - 1998
Autor Mário de Brito Marcelino	Figura 38

- b) instalação de uma cerca de proteção nos poços PP-2 e PP-3, impedindo o acesso de pessoas não autorizadas ao poço. Secundariamente, deve-se bem adequar as medidas das cercas já existentes nos poços PP-1 e PP-4;
- c) Remoção e plantio em um outro local das árvores situadas à frente do portão de acesso do PP-4;
- d) manutenção da área de PIPS dos poços.

III. Manutenção do sistema de controle de veículos dentro do Campus Universitário, objetivando impedir o trânsito de veículos de transporte de cargas perigosas.

IV. Informação ao Instituto de Engenharia Elétrica que o mesmo situa-se dentro da PAP do PP-4, uma vez que são utilizados pelo Instituto, diversos transformadores para estudo e pesquisa e os mesmos usualmente contém ascarel ( bifenila policlorado - PCB, altamente cancerígeno) como fluido isolante e de resfriamento.

Deve-se recomendar em especial a este Instituto, uma política de utilização de equipamentos que não possuam potencial poluidor.

V. Monitoramento da qualidade das águas subterrâneas, através das seguintes medidas:

a) implantação de uma rede de poços de monitoramento que possibilite a coleta periódica das águas subterrâneas, compreendido por:

- poços de monitoramento de alerta, situados no limite montante do PAP de cada poço produtor, em relação aos fluxos subterrâneos;
- poços de monitoramento de alerta antecipado; situados no limite montante do PM de cada poço produtor, em relação aos fluxos subterrâneos.

b) coleta e análise química de amostras de água nos poços de monitoramento supracitados, segundo o seguinte plano de monitoramento:

- poços de monitoramento de alerta  
periodicidade: semestral;

parâmetros investigados: cátions maiores, ânions, metais tóxicos, hidrocarbonetos totais de petróleo (TPH) e compostos orgânicos voláteis, além de pH, Eh, condutividade elétrica e temperatura determinados *in situ*.

- poços de monitoramento de alerta antecipado

periodicidade: bimestral;

parâmetros investigados: metais tóxicos, hidrocarbonetos totais de petróleo (TPH), além de pH, Eh, condutividade elétrica e temperatura determinados *in situ*.

## **6. CONCLUSÕES**

Na área do Campus da Cidade Universitária "Armando Salles de Oliveira" são identificados fontes potenciais pontuais e difusas de poluição das águas subterrâneas locais. O contínuo crescimento da urbanização da Região Metropolitana de São Paulo – RMSP, bem como do próprio Campus demanda um programa de proteção dos recursos hídricos subterrâneos, com potencial para suprir 30% da demanda de água local.

A legislação do Estado de São Paulo dispõe sobre a preservação dos recursos hídricos, estabelecendo áreas de proteção e controle das águas subterrâneas, estabelecendo, como medida de proteção à poços tubulares, a delimitação de perímetros de proteção, práticas amplamente utilizada no mundo.

Dentre as técnicas atualmente existentes para delimitação de perímetros de proteção de poços (PPP), em função da importância do recursos hídricos subterrâneas para a Cidade Universitária e objetivos deste trabalho, entre outros fatores, foi utilizada a modelagem matemática numérica tridimensional.

Baseado na legislação estadual vigente e utilizando a técnica do traçado de partículas, foram delimitados 4 (quatro) perímetros de proteção a saber: perímetros imediato de proteção sanitária (PIPS), de alerta contra poluição (PAP), de prevenção (PP) e de contribuição (PC).

Simulações efetuadas com bombeamentos crescentes no PP-1 indicam que a exploração dos poços tubulares situados na área da Raia Olímpica não induzirá a infiltração de águas contaminadas do Rio Pinheiros para o sistema aquífero, decorrente da inversão dos fluxos subterrâneos. O modelo indica, que tal situação só ocorrerá com vazões superiores de  $4.000\text{m}^3/\text{dia}$  ou  $167\text{ m}^3/\text{h}$ , vazões estas 7 vezes superior a maior vazão de exploração dos poços.

Em função dos resultados obtidos, foram definidas a seguintes medidas de proteção e controle dos recursos hídricos subterrâneos:

- a) adoção de uma política de preservação e controle das águas subterrâneas pela Prefeitura da Cidade Universitária, a ser definida em comum acordo entre a administração do Campus e técnicos do Centro de Pesquisa de Água Subterrânea – CEPAS;
- b) implantação e manutenção do PIPS;
- c) controle de trânsito de veículos com cargas perigosas dentro do Campus;
- d) utilização de equipamentos e materiais que possuam potencial poluidor dentro das áreas de PAP;
- e) monitoramento da qualidade das águas subterrâneas através de coleta e análises químicas de amostras em poços de monitoramentos.

## **7. BIBLIOGRAFIA**

- ANDERSON, M. P. & WOESSNER, W. W. (1994) - *Applied Groundwater Modeling - Simulation of Flow and Advective Transport*. Academic Press Inc., San Diego, California, 381p.
- ALMEIDA, F.F.M. (1958) - O Planalto Paulistano. In: A cidade de São Paulo. Associação dos Geógrafos Brasileiros. São Paulo/SP. pp113-167.
- ALMEIDA, F.F.M. (1983) - Relações Tectônicas das Rochas Alcalinas Mesozóicas da Região Meridional da Plataforma Sul Americana. *Revista Brasileira de Geociências*, 13 (3). pp139-158.
- AOKI, P.E. (1983) - Metodologia das Determinações da Velocidade, Direção e Sentido do Fluxo da Água Subterrânea, com Utilização de Traçadores Radioativos. Dissertação de Mestrado, Esc. Politécnica - USP. São Paulo/SP. 128p.
- CAVALCANTE, I.N. (1990) - Estudo Hidrogeológico de Terreno Cristalino com Manto de Intemperismo. Área piloto de Atibaia (SP). Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. São Paulo, 123p.
- CEPAS - CENTRO DE PESQUISAS DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS (1988a) - Estudo Hidrogeológico do Campus São Paulo - USP. Relatório Preliminar, CEPAS/IG-USP/Pref. da Cid. Universitária.
- CEPAS - CENTRO DE PESQUISAS DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS (1988b) - Estudo Hidrogeológico do Campus São Paulo - USP. Relatório Final, CEPAS/IG-USP/Pref. da Cid. Universitária. São Paulo/SP, 32p.
- CEPAS - CENTRO DE PESQUISAS DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS (1994) - Diagnóstico Hidrogeológico da Região Metropolitana de São Paulo - São Paulo. Convênio SABESP/CEPAS-IG-USP. Relatório Final. 75p.

- CLEARY, M. T. C. B. (1992) - *Investigação Através de Modelos Matemáticos em microcomputadores dos Efeitos dos Principais Parâmetros Hidrogeológicos e dos Processos Atenuantes de Transporte na Delineação de Áreas de Proteção de Poços (APPs) e na Remediação de Aquíferos Contaminados*. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. São Paulo, 169p.
- CLEARY, R. W. (1989) - *Engenharia Hidrogeológica - Águas Subterrâneas*. Coleção ABRH de Recursos Hídricos. Ed. UFRJ. Rio de Janeiro/RJ. pp 293-404.
- CLEARY, R. W. (1991) - *Hidrogeologia Ambiental - Qualidade da Água Subterrânea*. Coleção ABRH de Recursos Hídricos. Ed. EDUSP. São Paulo/SP. pp 211-296.
- CUSTÓDIO, E & LLAMAS, R (1983) - *Hidrologia Subterrânea*. Editora Omega, V2. Barcelona, Espanha.
- DAEE - *DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA* (1975) - *Estudo de Águas Subterrâneas. Região Administrativa 1. Grande São Paulo*. DAEE/Thaal Consulting Engineers Ltd., 3v.
- DAEE - *DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA* (1991) - *Normas para Exploração de Águas Subterrâneas*. Secretaria de Energia e Saneamento/DAEE, São Paulo/SP. 72p.
- FETTER, C.W. (1988) - *Applied Hydrogeology*. MPC, 2 Edição 592p.
- FOSTER, S.S.D.; HIRATA, R.C.A. (1988) - *Groundwater Pollution Risk Evaluation: The Methodology Using Available Data*. Lima: CEPIS/PAHO/WHO, 78p.
- FOSTER, S.S.D.; HIRATA, R.C.A.; ROCHA, G. A. (1988) - *Risco de Poluição das Águas Subterrâneas: Uma Proposta Metodológica de Avaliação Regional*. In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 6, São Paulo. Anais. São Paulo: ABAS, pp175-185.
- FCTH - *FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA* (1996) - *Laudo Hidrogeológico - Precipitações da Região da Cidade Universitária - SP*.

- HARBAUGH, A. W. (1990) *A Computer Program for Calculating Subregional Water Budgets using Results from the US Geological Survey Modular Three-dimensional Finite-difference Ground-water Flow Model*. U.S Geological Survey, Virginia, EUA. 23p.
- HANTUSH, M (1959) *Nonsteady Flow to Flowing Wells in Leaky Aquifers*. Jour. of Geophysical Res. 64(8) pp.1043-1052.
- HIRATA, RC.A. (1994) *Fundamentos e Estratégias de Proteção e Controle da Qualidade das Águas Subterrâneas. Estudo de Casos no Estado de São Paulo*. Dissertação de Doutorado, IG-USP, São Paulo/SP. 195 p.
- IRATANI, M. A.; REBOUÇAS, A.C.; HASSUDA, .; DUARTE, U.; ELLERT, N.; MENDES, J.M.B. ROSS, S.D.; MARCELINO, M.B. (1990) - Potencial hidrogeológico do Campus-USP São Paulo. In: Cong. Bras. Ág. Subt., 6, Porto Alegre, 1990. Anais. Porto Alegre/RS, ABAS. pp.15-20.
- IRATANI, M. A (1993) - Potencial Hidrogeológico da Cidade Universitária de São Paulo. Dissertação de Mestrado, IG-USP, São Paulo/SP. 97 p.
- LANNA, A. E.; DORFMAN, R.; BENETTI, A.D. (1991) - Sistemas de Gerenciamento de Recursos Hídricos: críticas a algumas propostas. In: IX Simp. Bras. de Rec. Hídricos, 2, Rio de Janeiro, 1991. Anais. Rio de Janeiro/RJ, ABRH. pp.531-540.
- LEINZ, V. (1955) - Água Subterrânea na Bacia de São Paulo. Bol. SBG, v. 4, nº 2, São Paulo/SP. pp. 5-22.
- MARCELINO, M. B. (1997) – Curso “Modelagem Matemática Aplicada à Hidrogeologia”. Santa Fé de Bogotá, Colômbia. Apostila de Curso.
- MARCELINO, M. B. (1998) – Curso “Modelos Matemáticos Aplicados à Hidrogeologia”. Montivideo - Uruguai. Apostila de Curso.
- McDONALD, M. G. & HARBAUGH, A. W. (1988) – *A Modular Three Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model. Techniques of Water-Resources Investigations of US Geological Survey*. USGS 06-A1, Washington, EUA, 576p.
- MELO, M.S.; COIMBRA, A.M.; RICCOMINI, C. (1989) - Evolução dos Conhecimentos sobre a Geologia da Bacia de São Paulo na Década de Oitenta. Geologia da bacia de São Paulo, 1989. Workshop. IG-USP/SBG, São Paulo, pp.1-11.

- MENEGASSE VELÁSQUEZ, L.N. (1996) - Efeitos da Urbanização Sobre o Sistema Hidrológico: Aspectos da Recarga no Aqüífero Freático e Escoamento Superficial - Área Piloto: Sub-Bacias Sumaré e Pompéia, Município de São Paulo. Dissertação de Doutorado, IG-USP, São Paulo/SP. 124 p.
- MESTRINHO, S.S.P (1995) - Fundamentos da Vulnerabilidade Ambiental de Aquíferos. Monografia não publicada. IG-USP. São Paulo/SP, 66p.
- PACHECO, A. (1984) - Análise das Características Técnicas e da Legislação para uso e Proteção das Águas Subterrâneas em Meio Urbano (Município de São Paulo). Dissertação de Doutorado. IG-USP, São Paulo/SP. 174 p.
- PARISOT, E.H. (1983) - As Águas Subterrâneas no Centro-oeste do Município de São Paulo. Características Hidrogeológicas e Químicas. Dissertação de Mestrado, IG-USP, São Paulo/SP. 93 p.
- POLLOCK, D.W. (1989) – Documentation of Computer Programs to Complete and Display Pathlines Using Results from the US Geological Survey *Modular Three Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model*. USGS, Open File Report. Reston, Virgínia, pp89-381.
- REBOUÇAS, A.C. (1994) In: Metodologia de Evaluacion de Sistemas Aquíferos. II Cong. Lat. Amer. de Hidrologia Subterrânea. Curso Pré-Congresso. Santiago - Chile.
- RICCOMINI, C. (1989) - O Rift Continental do Sudeste do Brasil. Tese de Doutorado, IG-USP. São Paulo/SP, 320p.
- RICCOMINI, C.; COIMBRA, A.M.; TAKIYA, H. (1992) - Tectônica e Sedimentação na Bacia de São Paulo. Seminário "Problemas Geológicos e Geotécnicos na Região Metropolitana de São Paulo". Anais. ABAS/ABGE/SG, São Paulo/SP, pp21-45.
- ROCHE, M. (1963) - *Hydrologie de Superface*. Gauthier - Villars Éditeur, Paris/França 430p.
- ROSS, J.L.S. (1981) - A qualidade da água subterrânea no espaço urbano da Grande São Paulo. Dissertação de Mestrado. FFCL da USP, São Paulo. 120 p.

- ROSS, S.D. (1991) - Hydrogeological study of the River Connected Aquifers in Greater São Paulo, Brazil. Waterloo, Canadá. Tese de Doutorado, Universidade de Waterloo, 187p.
- ROSS, S.D.; RUDOLPH, D.L.; ELLERT, N.; FARVOLDEN, R.N.; GREENHOUSE, J.P.; REBOUÇAS, A.C. (1990) - Hydrogeological study of the River Connected Aquifers in Greater São Paulo. In: Cong. Bras. Ág. Subt., 6, Porto Alegre, 1990. Anais. Porto Alegre/RS, ABAS. pp.38-49
- SÁ E BENEVIDES, V.F. COIMBRA, R.M. & ROCHA, C.L. (1995) - Gerenciamento de Recursos Hídricos - Uma Abordagem para o Mercosul. Ensaios e Dissertações, A Água em Revista, CORM, Ano III, nº5, pp 4-10.
- SEM/IG/CETSB/DAEE (1997) - Mapeamento da Vulnerabilidade e Risco de Poluição das Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo. São Paulo, 129p.
- SZK SZAY, M.; CONSONI, A.J.; GUIGER, N.; HASSUDA, S.; KIMMELMANN, A.A.; PARISOT, E.; SGAMBATO, F.; YOSHINAGA, S. (1986) - Instalação de uma Estação Experimental para Estudo da Dinâmica da Composição Química da Água na Zona não Saturada. Águas Subterrâneas. nº10, p5-20.
- SZK SZAY, M.; CONSONI, A.J.; YOKOTA, H.K.; N.; ARAÚJO, J.S.; DUARTE, U.; KANEHISA, M.S. (1987) - Estudo Preliminar da Hidrodinâmica na Zona não Saturada da Estação Experimental (Cidade Universitária, São Paulo). Águas Subterrâneas. nº10, p.5-20.
- SZK SZAY, M.; HYPÓLITO, R.; KIMMELMANN, A.A.; FIGUEIRA, R.M.; ORLANDO, R.; SAMESHIMA, R.H. (1988) - Estudo Hidrogeológico e Hidroquímico Zona não Saturada. In: Cong. Bras. de Ág. Subt., 5, São Paulo, 1988. Anais. São Paulo/SP, ABAS. pp.133-143.
- SZK SZAY, M.; KIMMELMANN, A.A.; HYPÓLITO, R.; FIGUEIRA, R.M.; SAMESHIMA, R.H (1990) - Evolution of the Composition of Water passing Through the Unsaturated Zone to Ground Water at an Experimental Site at the University of São Paulo, Brazil. Journal of Hydrology, 118:175-190.

- SZK SZAY, M.; TOLEDO-GROKE, M.C. (1989) - Correlation of the Composition of Water from unsaturated Zone with the Mineralogy of a Profile on the São Paulo Basin, Brazil. In: International Symposium on Water-Rock Interaction, 6, Malvern, 1989. Proceedings. Wallingford, British Geological Survey, pp.669-672.
- TAKIYA, H. (1991) - Aplicação de Métodos Quantitativos Espaciais à Dados Geológicos da Bacia de São Paulo. Tese de Mestrado, IG-SP, São Paulo/SP. 200p.
- TAOLI, F. (1992) - Desenvolvimento e Teste de Sistema Sismográfico de Alta Resolução. Tese de Doutorado, IG-SUP. São Paulo/SP, 119p.
- TODD, D. (1980) - *Groundwater Hydrology*. John Wiley & Sons, New York. 535p.
- U.S.EPA - UNITED STATE ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (1987) - Guidelines for Delineation of Wellhead Protection Areas. Office of Groundwater Protection. Washington, D.C. 185p.
- U.S.EPA - UNITED STATE ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (1988) - *Model Assessment for Delineating Wellhead Protection Areas*. Office of Groundwater Protection. Washington, D.C. 210p.
- U.S.EPA - UNITED STATE ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (1994) - *Handbook. Ground Water and Wellhead Protection*. Office of Groundwater Protection. Washington, D.C. 269p.
- USSAMI, N. & MOLINA, E.C. (1992) - Geofísica Aplicada II. Notas de Aula. IAG-USP, São Paulo/SP.
- WHB - WATERLOO HYDROGEOLOGIC BRASIL (1998) - Curso de "Modelagem Matemática de Fluxo e Transporte em Águas Subterrâneas". São Paulo/SP. Apostila.