

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Ensaaios e Trabalhos de Campo

Apresenta-se nos itens a seguir os resultados obtidos nos trabalhos de campo, de acordo com a metodologia descrita no Capítulo 4, item 4.2.

5.1.1. Levantamento topográfico

Através do *software Surfer 7.0* foi desenvolvido o mapa topográfico local, na qual foram determinadas cotas dos poços de monitoramento, sondagens e pontos aleatórios (vide Tabela 9) cuja máxima altitude do terreno é 11,27 metros e a mínima 10,8 metros, configurando um terreno de relevo suave (plano), com declividade em torno de 3% (Figura 35).

POÇO	LESTE	NORTE	COTA (m)
FJ01	634918,948	7477264,085	10,969
FJ02	634879,565	7477254,383	11,008
FJ03	634882,460	7477289,541	11,100
FJ04	634894,066	7477283,214	11,196
FJ05	634903,740	7477309,151	11,140
SP01	634918,416	7477263,408	10,955
SP02	634880,169	7477253,699	10,988
SP03	634881,601	7477288,644	11,050
SP04	634893,494	7477282,034	11,176
PT01	634871,135	7477260,566	10,877
PT02	634879,565	7477254,383	11,279
PT03	634883,358	7477239,916	10,845
PT04	634875,294	7477234,085	10,821
PT05	634859,927	7477233,979	10,821
PT06	634853,242	7477251,934	10,852
PT07	634843,040	7477265,225	11,252
PT08	634847,534	7477287,107	11,266
PT09	634850,167	7477308,864	11,019
PT10	634855,812	7477325,828	10,829
PT11	634870,575	7477331,815	11,070

PT12	634886,340	7477309,745	10,916
PT13	634868,874	7477283,371	11,076
PT14	634861,700	7477264,117	11,048

Tabela 9 – Pontos cotados na área de estudo.

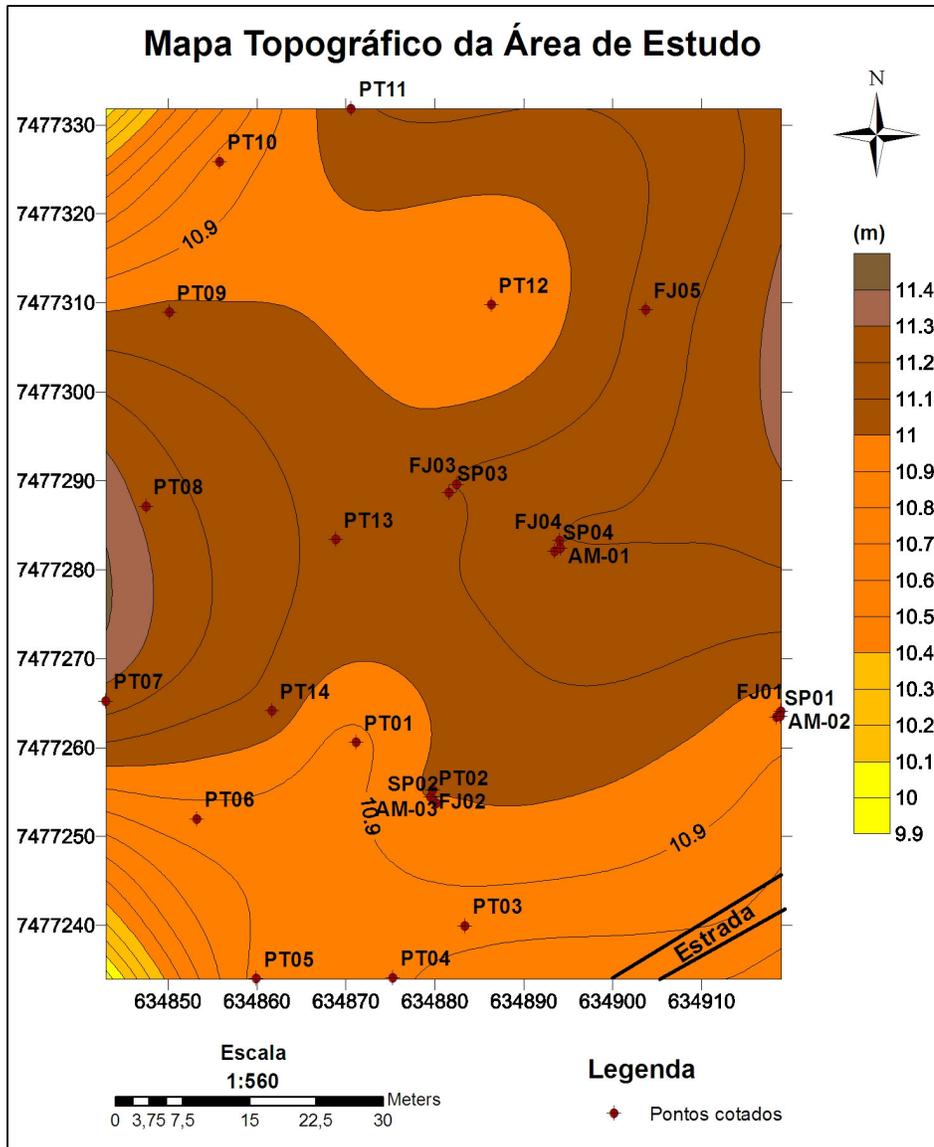


Figura 35 - Topografia da área experimental.

Devido ao relevo ser plano e a área ser usada com pastagem, o solo torna-se compactado dificultando a infiltração da água no subsolo, deixando o terreno mal drenado principalmente em estações chuvosas.

5.1.2. Mapa de fluxo da água subterrânea e gradiente hidráulico

O monitoramento do nível d'água foi desenvolvido durante treze meses, no período julho de 2007 a julho de 2008, através de um medidor de nível d'água. Foi possível observar somente uma vez o nível d'água nas sondagens SP01, SP02, SP03 e SP04 devido ao fechamento dos furos. Assim, os mapas de fluxo da água subterrânea tomaram como base os dados obtidos nos poços de monitoramento. O mapa de localização destes poços está representado na imagem do satélite QuickBird na Figura 36.

Mapa de Localização dos Poços de Monitoramento



Figura 36 – Localização em imagem de satélite dos poços de monitoramento.

Foi possível observar as variações da carga hidráulica e do nível freático nas épocas secas e chuvosas (Tabela 10 e 11) correlacionando à precipitação no mesmo período.

POÇO	N.A.(m) 18/07/2007	N.A. (m) 19/09/2007	N.A. (m) 24/11/2007	N.A. (m) 18/02/2008	N.A. (m) 09/05/2008	N.A. (m) 05/06/2008	N.A. (m) 10/07/2008	N.A. (m) 01/08/2008
FJ01		2,380	2,000	0,490	0,580	1,165	1,760	1,960
FJ02		2,370	1,880	0,575	0,650	1,190	1,795	1,990
FJ03		2,520	2,080	0,735	0,797	1,375	1,962	2,165
FJ04		2,520	2,190	0,795	0,870	1,435	2,025	2,230
FJ05			2,050	0,800	0,900	1,460	2,047	2,250
SP01	2,200							
SP02	2,440							
SP03	2,410							
SP04	2,360							
P (mm)	269,20	128,80	116,60	259,20	39,00	33,40	33,40	

Tabela 10 – Níveis d'água da área de estudo.

POÇO	H (m) 18/07/2007	H (m) 19/09/2007	H (m) 24/11/2007	H (m) 18/02/2008	H (m) 09/05/2008	H (m) 05/06/2008	H (m) 10/07/2008	H (m) 01/08/2008
FJ01		8,899	9,279	10,789	10,699	10,114	9,519	9,319
FJ02		8,928	9,418	10,723	10,648	10,108	9,503	9,308
FJ03		8,950	9,390	10,735	10,673	10,095	9,508	9,305
FJ04		9,016	9,346	10,741	10,666	10,101	9,511	9,306
FJ05			9,515	10,765	10,665	10,105	9,518	9,315
SP01	8,755							
SP02	8,548							
SP03	8,640							
SP04	8,816							

Tabela 11 – Carga hidráulica da área de estudo.

Utilizando os dados da Tabela 11 foi possível confeccionar os mapas de fluxo da água subterrânea nas diversas estações climáticas do ano. Os mapas apresentados (Figuras 37 a 40) são os que melhor representam o fluxo na área de estudo nas estações seca e chuvosa.

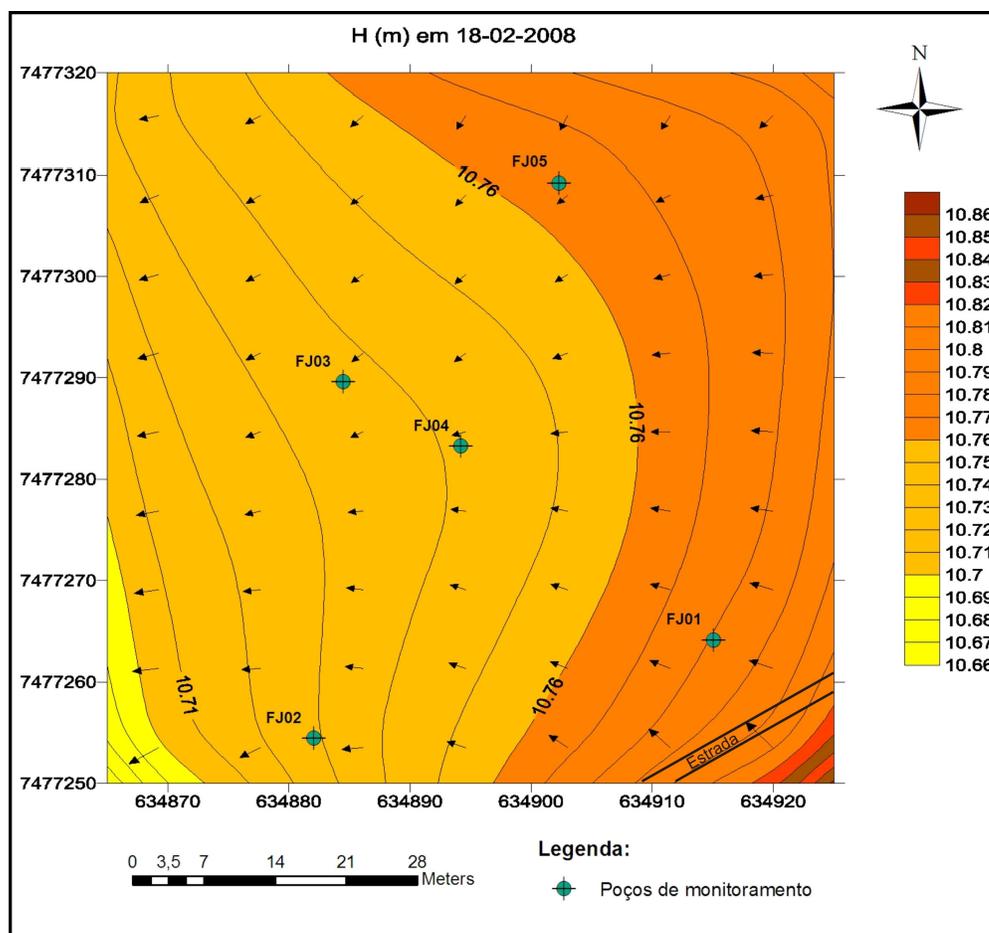


Figura 37 - Mapa de fluxo da água subterrânea obtida através dos valores de carga hidráulica total (m) na área de estudo em 18/02/2008.

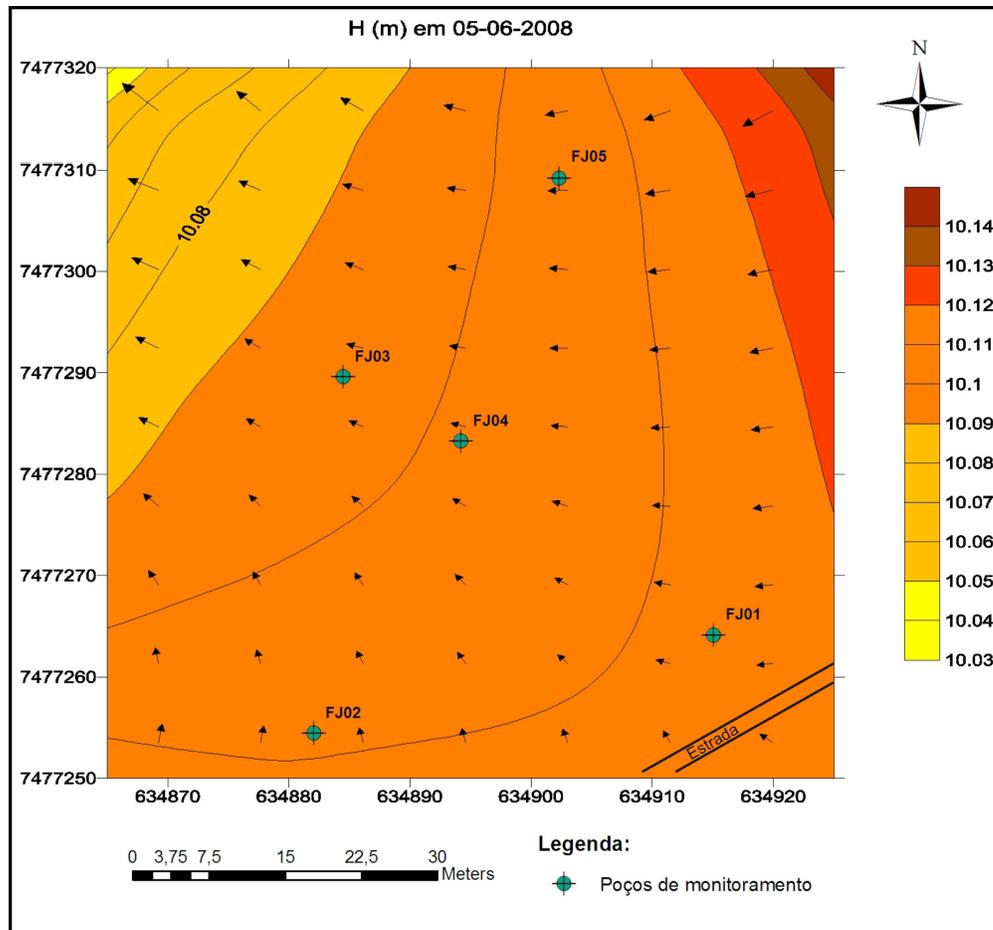


Figura 38 - Mapa de fluxo da água subterrânea obtida através dos valores de carga hidráulica total (m) na área de estudo em 05/06/2008.

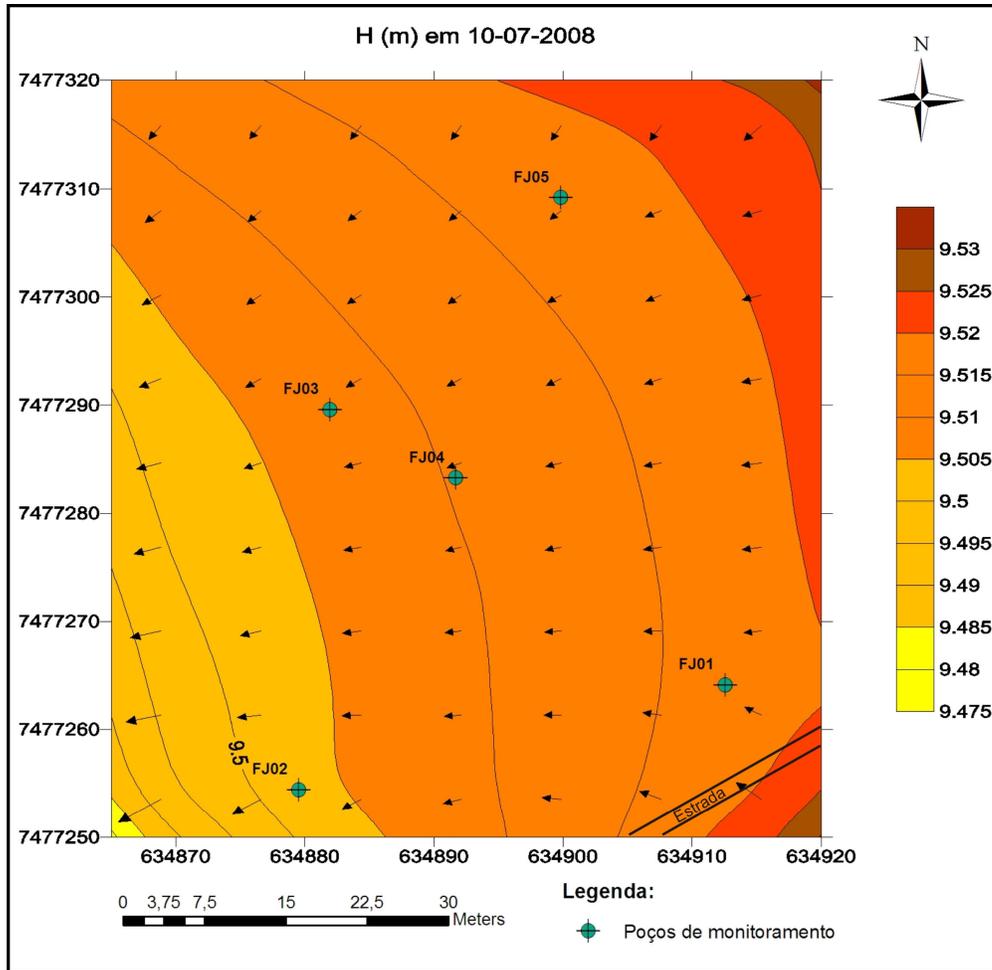


Figura 39 - Mapa de fluxo da água subterrânea obtida através dos valores de carga hidráulica total (m) na área de estudo em 10/07/2008.

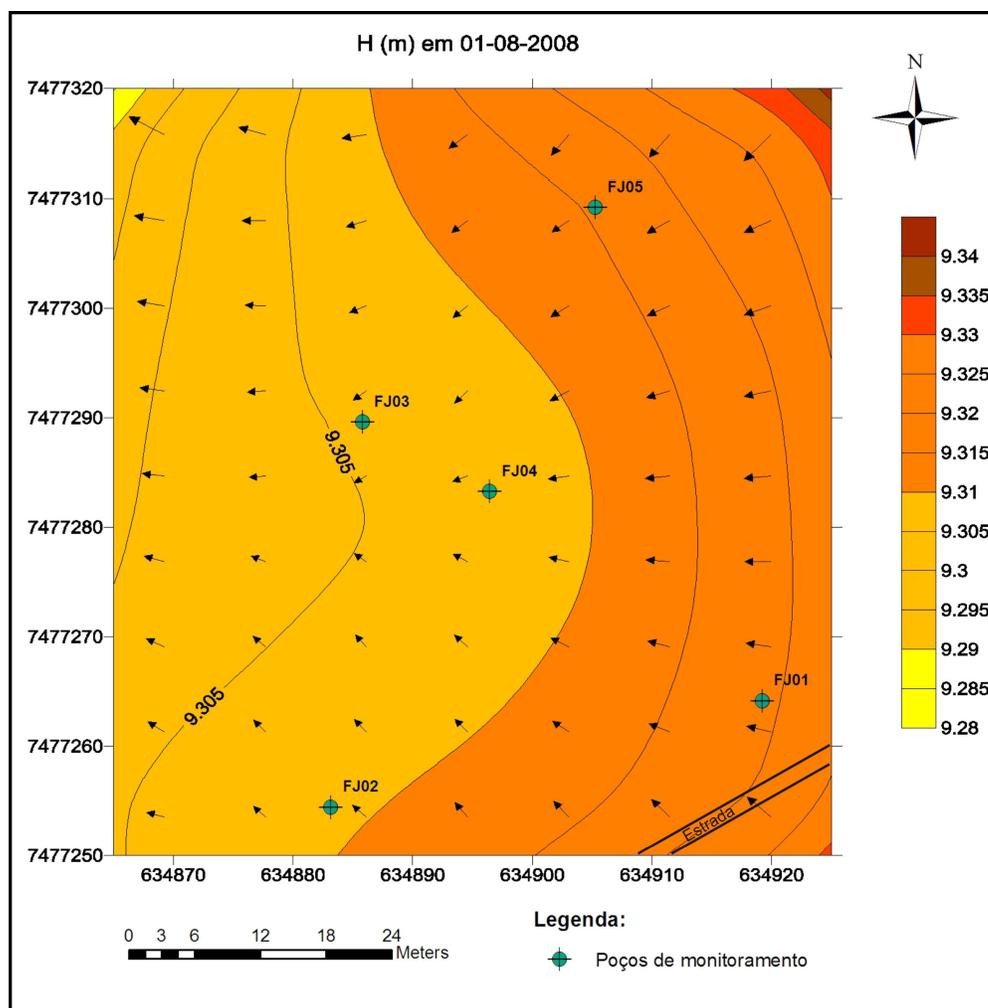


Figura 40 - Mapa de fluxo da água subterrânea obtido através dos valores de carga hidráulica total (m) na área de estudo em 01/08/2008.

Comparando os meses de maior precipitação (junho e julho/2007 - anômalos) e o nível d'água no mesmo período observa-se que não há aumento relevante do nível freático, indicando que a recarga não é imediata, sendo necessário um período relativamente longo de chuva (dezembro a fevereiro) para aumento do nível freático. Esse fato indica que o aquífero pode não ser livre como se imaginava.

O nível d'água oscila aproximadamente dois metros ao longo do ano, permitindo que a argila e a areia fiquem expostas às condições saturada e não saturada, implicando na alternância entre ambiente aeróbio e anaeróbio. Em alguns locais é possível perceber o processo redutor quando está saturado e oxidante quando está não saturado devido à coloração da argila: quando se

apresenta avermelhada, o ambiente está oxidante e quando se apresenta acinzentada o ambiente está redutor.

O gradiente hidráulico da área muda sazonalmente, na qual a média foi determinada na Tabela 12:

ESTAÇÃO SECA		
DATA	i	DIREÇÃO REF. N(°)
05/06/08	0,000374	302,5
10/07/08	0,000394	254,4
01/08/08	0,000345	275,1
MÉDIA	0,000371	277,3333333
ESTAÇÃO CHUVOSA		
DATA	i	DIREÇÃO REF N(°)
18/02/08	0,0016	268
09/05/08	0,0009324	275,4
MÉDIA	0,0012662	241,8875

Tabela 12 – Gradiente hidráulico e direção de fluxo referente às estações secas e chuvosas.

O gradiente hidráulico da área muda sazonalmente e confirmou ser baixo para ambas as estações do ano. Entretanto as estações secas e chuvosas estão bem definidas com o gradiente variando uma ordem de grandeza. Observa-se também que quanto mais profundo o nível d'água, menor é o gradiente hidráulico. A direção do fluxo da água subterrânea varia razoavelmente durante o ano, sendo predominante à direção W/SW, mas em alguns momentos sua direção muda levemente para NW. Suspeita-se que a direção do fluxo seja influenciada pelo Pólo Areeiro de Seropédica-Itaguaí, pois caracteriza um local de constante extração de água, seja pela evaporação ou pela ação exploratória das dragas retirando água e areia nas cavas. É necessário que haja continuação no monitoramento do nível d'água para confirmação da variação dos gradientes hidráulicos.

5.1.3. Parâmetros físico-químicos

Parâmetros como oxigênio dissolvido, temperatura, pH, potencial de oxidação e condutividade foram observados através da sonda multiparâmetro Troll 9500. A medição dos parâmetros ocorreu no dia 24/11/2007 de acordo com a Tabela 13.

POÇO	Condutividade em 24/11/2007 (mS/cm)	PH em 24/11/2007	Eh em 24/11/2007 (mV)	O ₂ dissolv. em 24/11/2007 (mg/L)	Temp. em 24/11/2007 (°C)
FJ01	0,075	5,000	356,000	2,100	25,500
FJ02	0,141	5,900	283,000	2,500	25,300
FJ03	0,251	6,200	285,000	5,200	25,300
FJ04	0,077	5,600	322,000	5,600	25,400
FJ05	0,048	5,000	350,000	5,300	25,500

Tabela 13 – Parâmetros físico-químicos.

Através dos dados obtidos e da variação espacial dos parâmetros confeccionou-se mapas para visualizar estas variações (Figuras 41 a 45):

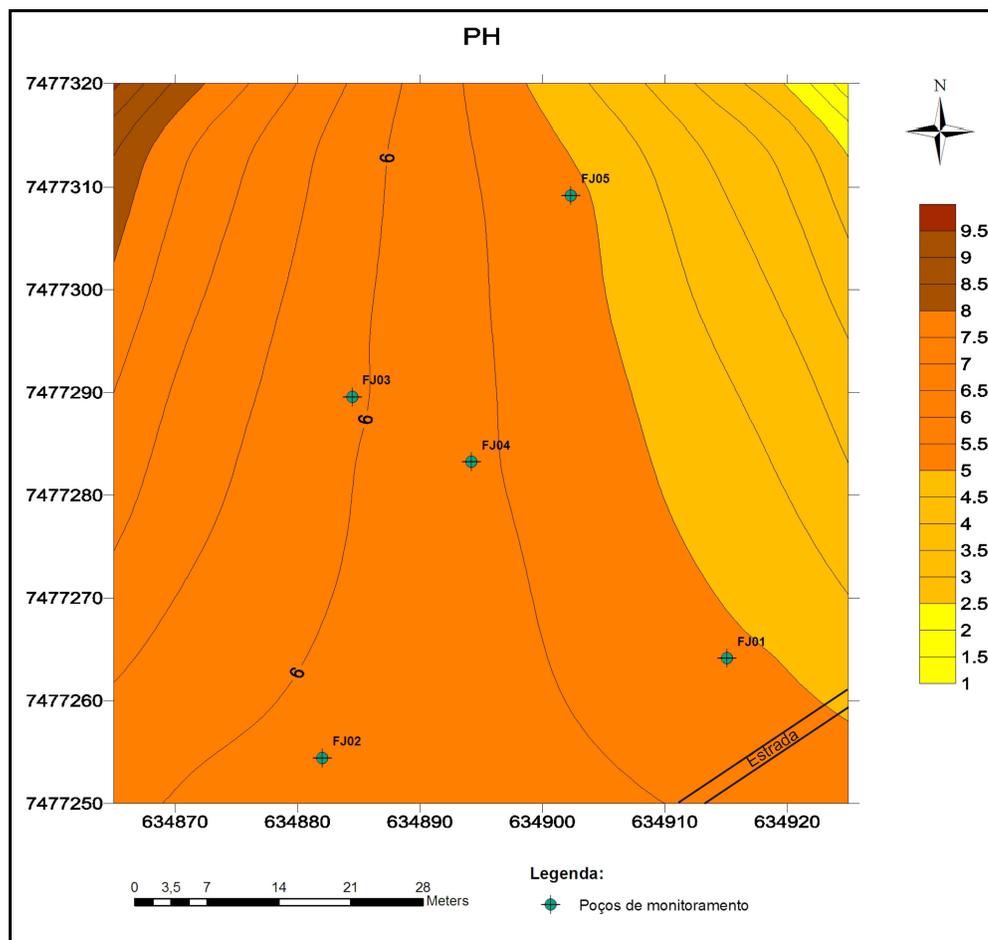


Figura 41 – Mapa de isolinhas com valores obtidos de pH.

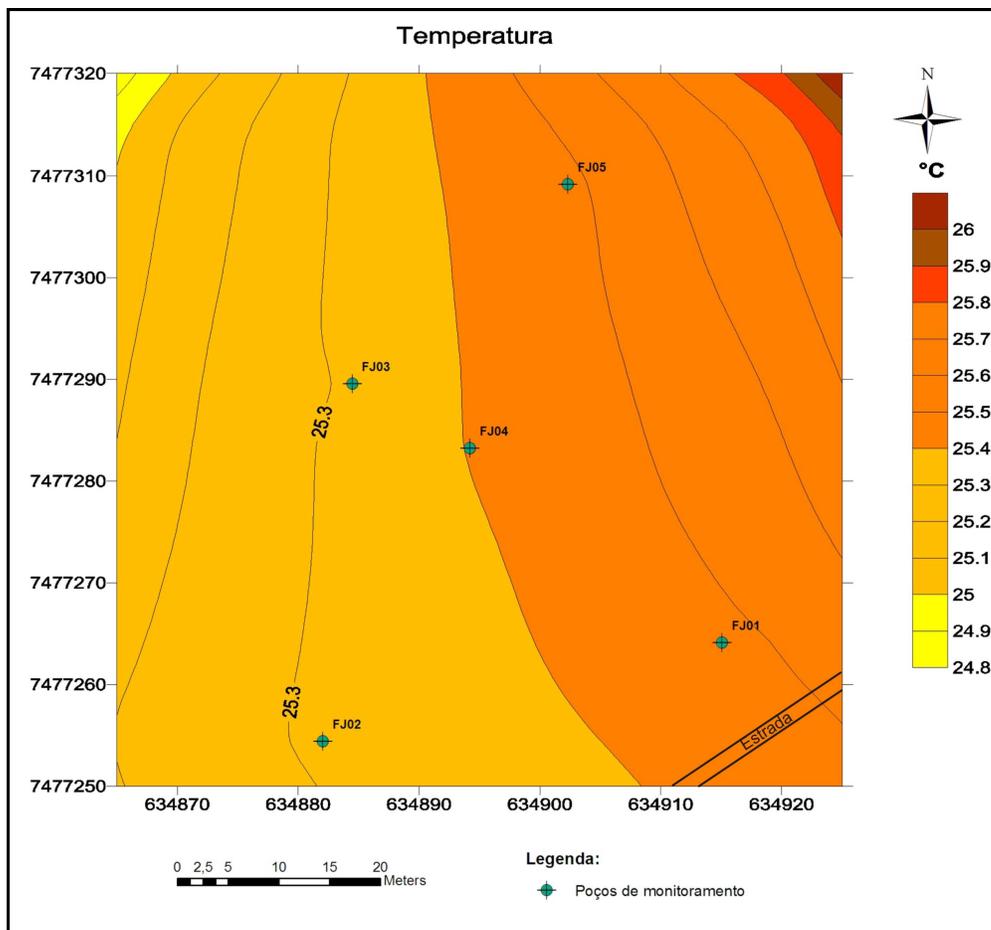


Figura 42 - Mapa de isolinhas com valores obtidos de temperatura em °C.

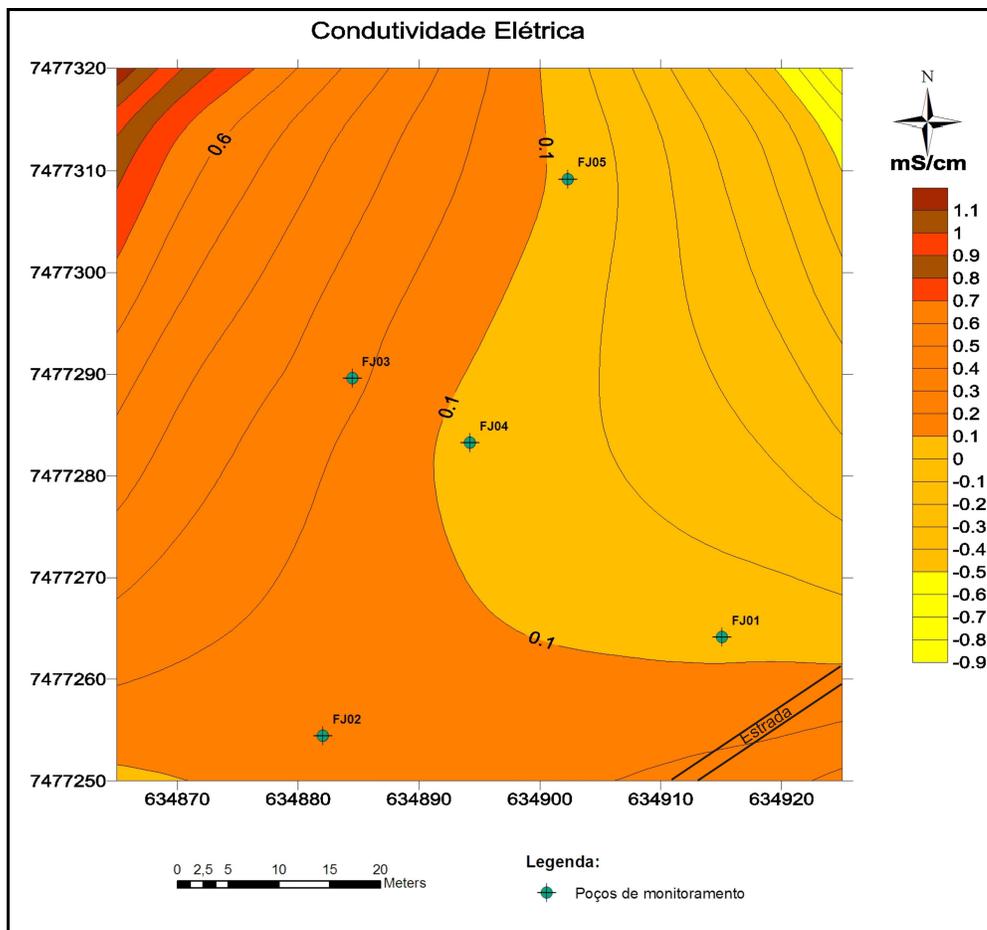


Figura 43 - Mapa de isolinhas com valores obtidos de condutividade em mS/cm.

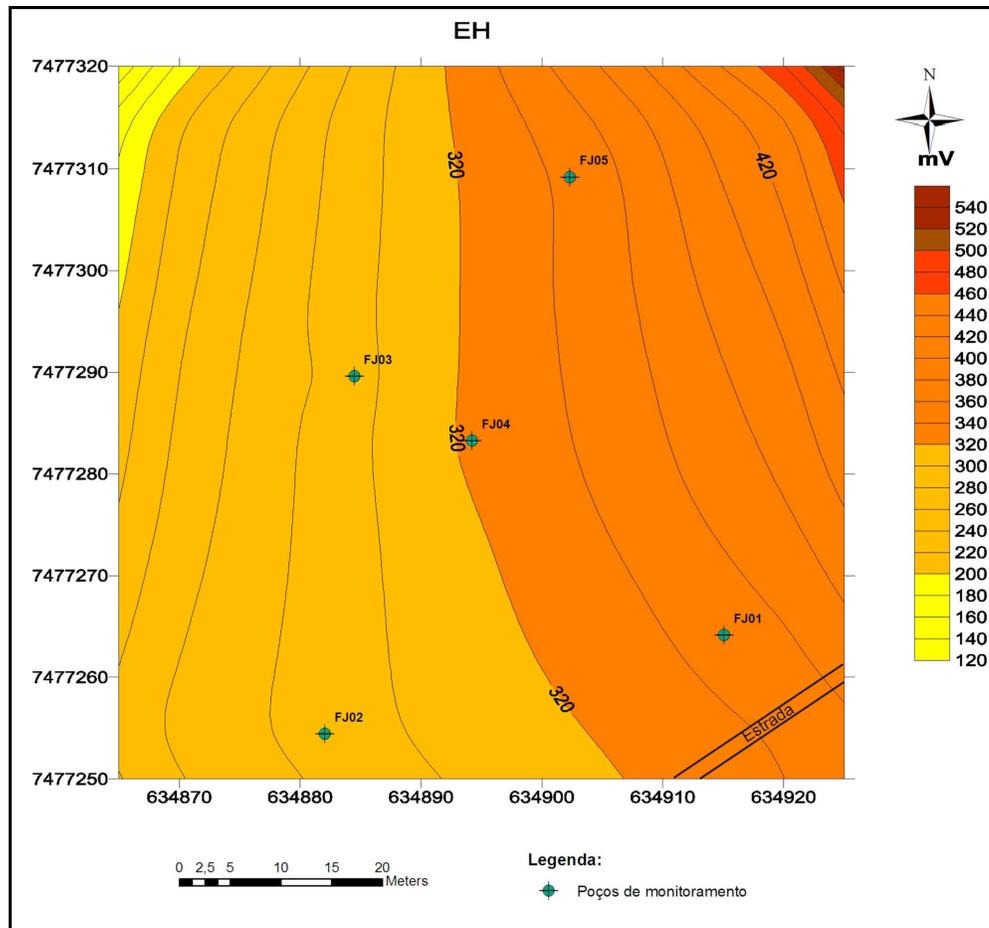


Figura 44 – Mapa de isolinhas com valores obtidos de potencial de oxi-redução em mV.

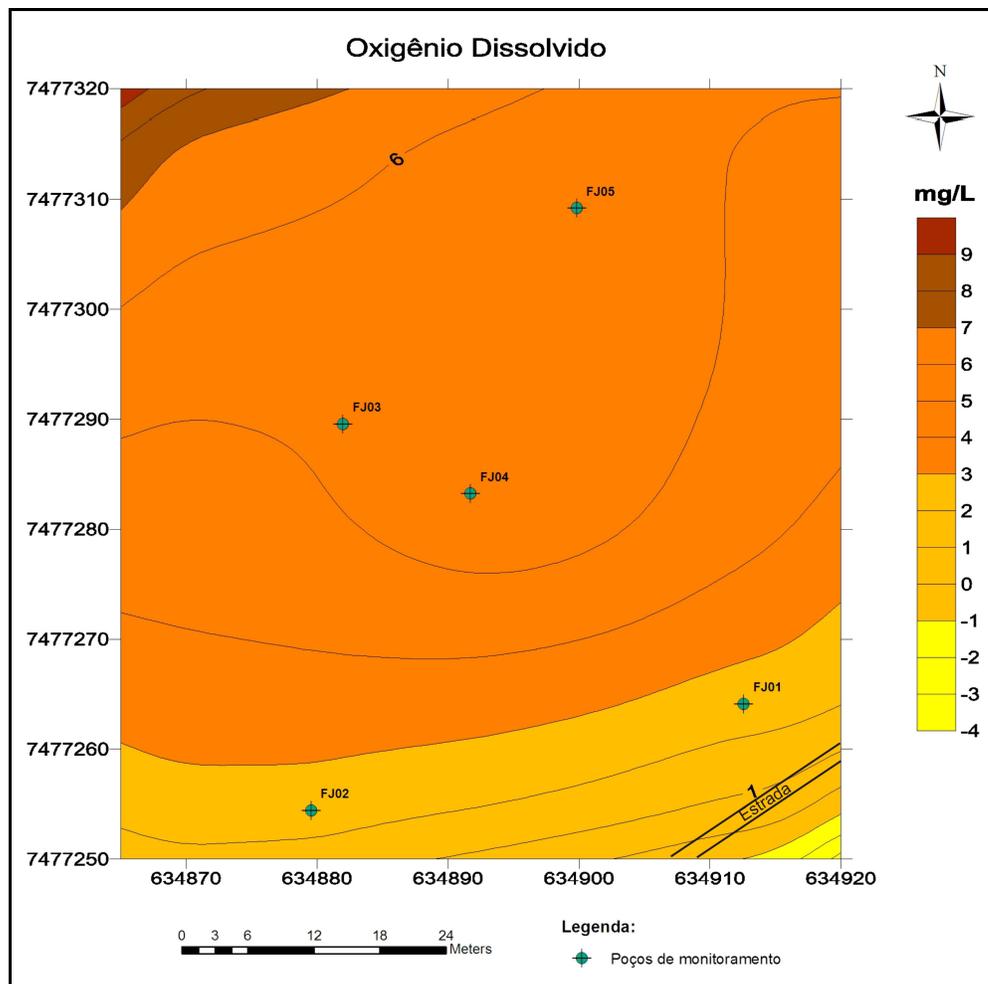


Figura 45 – Mapa de isolinhas com valores obtidos de oxigênio dissolvido em mg/L.

O pH entre 5,0 e 5,9 demonstra que a água subterrânea possui um caráter ácido, condutividade elétrica entre 0,048 e 0,251mS/cm indica poucos sais dissolvidos na água. A variabilidade espacial demonstra que quanto mais próximo ao Rio Piloto (oeste), maior é o valor de pH.

A condutividade hidráulica possui valores baixos, nos quais demonstra que a água subterrânea possui poucos sais dissolvidos. Sua variabilidade espacial indica que quanto mais próximo ao Rio Piloto, maior é seu valor.

O potencial oxi-redutor diminui conforme se aproxima do Rio Piloto. Seus valores entre 283 a 356 mV mostram-se típicos de ambiente oxidante. Observando o oxigênio dissolvido, os valores de 2 a 5 mg/L caracterizam que a água possui característica intermediária e aeróbica segundo Schreider e Bahr (1999). E a variabilidade espacial mostra que quanto mais próximo ao Rio Piloto (oeste), maior é o oxigênio dissolvido na água. Assim, os parâmetros indicam que a área tende a ser oxidante e aeróbia. Porém, como o ambiente possui

relativamente pouco oxigênio dissolvido, um processo de contaminação pode levar o ambiente a ficar anaeróbio em pouco tempo.

5.1.4. Permeabilidade

O ensaio *slug test* do tipo aumento de carga desenvolvido na área de estudo teve duração de poucos minutos em cada poço (5 a 10 minutos), pois a recuperação do nível d'água foi rápida.

O método de Hazen é baseado na análise granulométrica dos sedimentos. Os resultados do tratamento dos dados estão dispostos na tabela 14:

POÇO	HVORSLEV (cm/s)	BOUWER & RICE (cm/s)	HÁZEN (cm/s)
FJ-01	0,06867	0,05288	
FJ-02	0,00503	0,003924	
FJ-03	0,004361	0,003425	PUC-01
FJ-04	0,01985	0,01558	
FJ-05	0,02154	0,01692	
MÉDIA	0,0238902	0,0185458	0,02778889

Tabela 14 – Média da condutividade hidráulica da área pesquisada.

A permeabilidade demonstrou ser compatível com os sedimentos encontrados, da ordem de 2×10^{-2} cm/s. O método de Hazen coincidiu com os valores encontrados através dos métodos de Hvorslev e Bouwer and Rice.

Os valores de condutividade demo, através do ensaio *slug test* demonstraram possuir variabilidade espacial indicando que este parâmetro deve ser tratado de forma cuidadosa e detalhada.

5.1.5. Levantamento geofísico

O levantamento eletroresistivimétrico foi realizado investigando a profundidade máxima de 10 metros, como demonstra a Figura 46, na qual a interpolação dos dados geofísicos gerou um modelo em forma de diagrama:

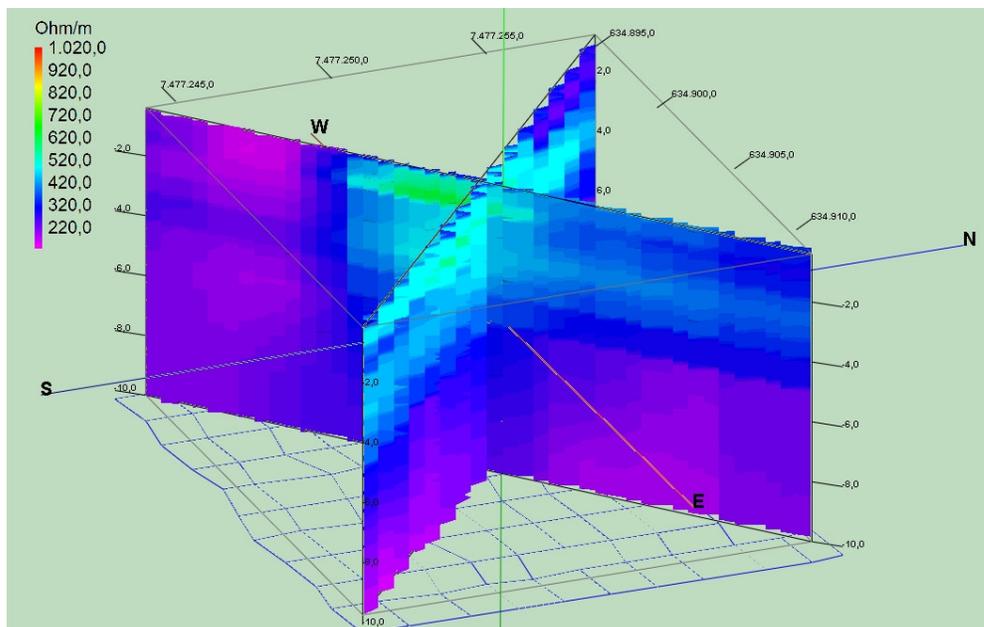


Figura 46 – Diagrama com valores interpolados de eletroresistividade.

A interpolação dos dados geofísicos indica duas regiões principais: a primeira possui coloração azulada com resistividades acima de 300 ohm/m, localizada aproximadamente entre 1,0 m a 6,0 metros de profundidade; a segunda possui coloração lilás, localizada a profundidades superiores a 6,0 m e resistividades inferiores a 250 ohm/h. Este modelo é compatível com o apresentado na Figura 16 (Diagrama da estratigrafia local), na qual a região azulada equivale a areia saturada (Aqüífero Piranema) e a região lilás corresponde à argila cinza situada na porção inferior da camada de areia.

5.2. Ensaio de Laboratório

Apresenta-se nos itens a seguir os resultados obtidos nos ensaios de laboratório, de acordo com a metodologia descrita no Capítulo 4, item 4.3.

5.2.1. Caracterização geotécnica

Os ensaios para caracterização geotécnica foram desenvolvidos em uma amostra de material argiloso a 1,5 metros de profundidade (PUC-01) e uma amostra em material arenoso a 2,5 metros de profundidade (PUC-02).

O resumo dos resultados está disposto na Tabela 15:

Amostra	L.L. (%)	L. P. (%)	I.P. (%)	Gs	Pedregulho (%)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)
PUC-01	63,56	29,30	34,25	2,67	1,38	20,63	22,77	55,21
PUC-02	ND	ND	ND	2,61	5,24	87,39	1,72	5,66

Tabela 15 – Resumo da caracterização geotécnica.

Devido à amostra PUC-02 ser extremamente arenosa, não foi possível determinar os limites de consistência.

A caracterização geotécnica demonstrou que a camada argiloarenosa superior possui somente 5% de areia enquanto a camada arenosa (efetivamente o aquífero) possui 87% de areia. Essa quantidade de argila pode sugerir que o aquífero pode ser considerado semi-confinado. As curvas granulométricas resultantes da análise granulométrica estão mostradas nas Figuras 47 e 48.

Figura 47 - Curva granulométrica PUC-01.

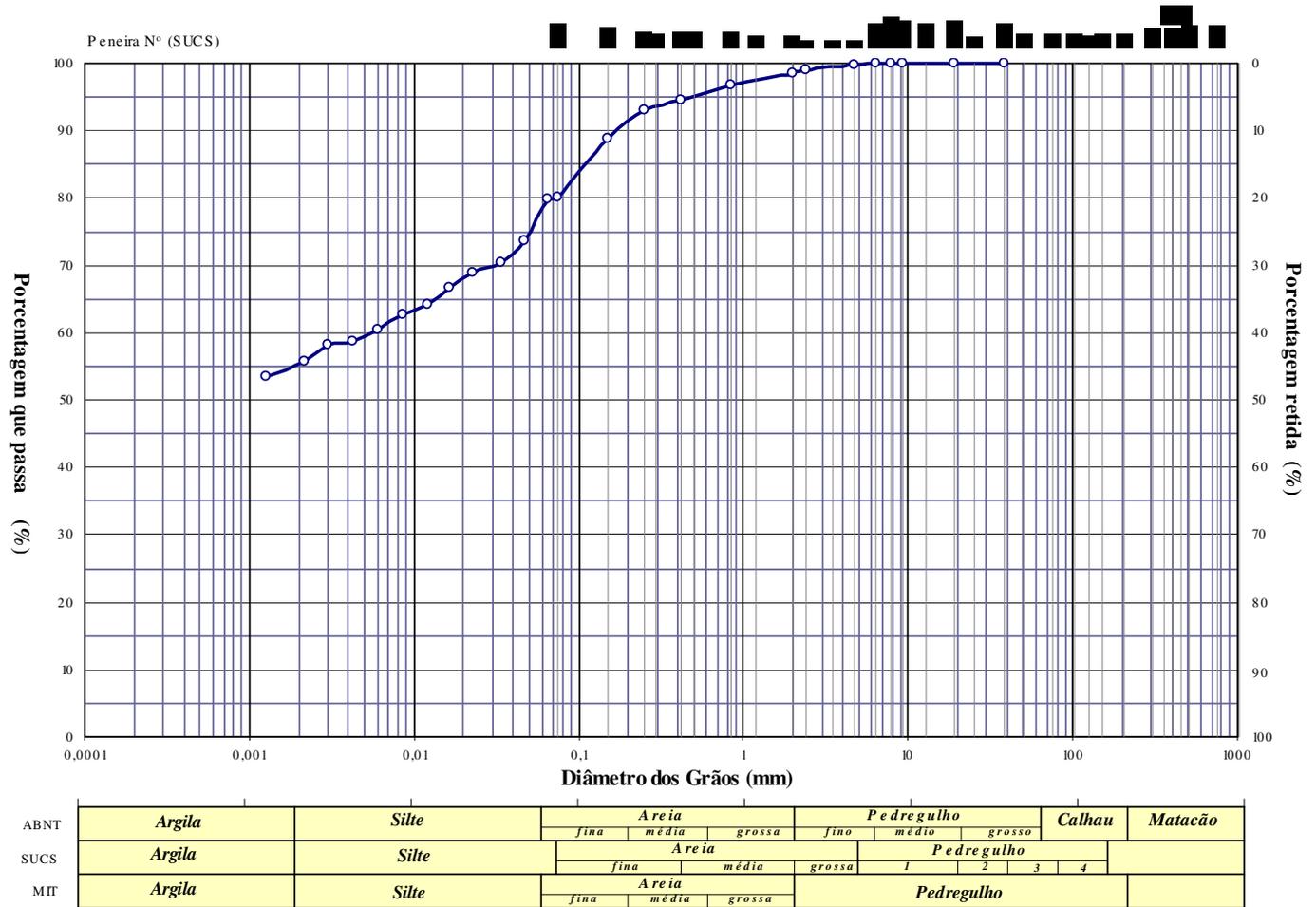
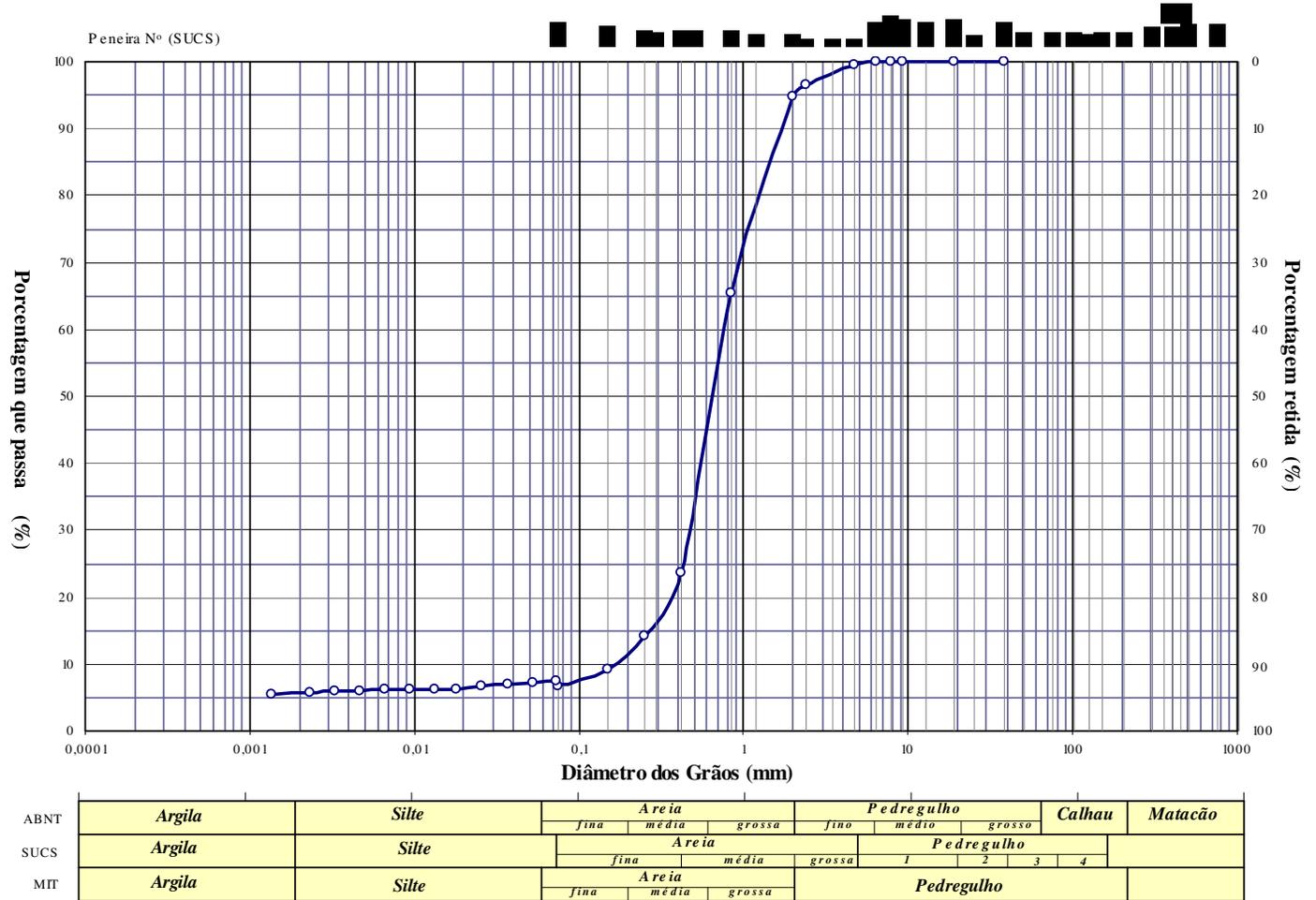


Figura 48 - Curva granulométrica PUC-02.



5.2.2. Porosidade

A porosidade do material arenoso foi determinada a partir da coleta de amostras deformadas saturadas do sedimento arenoso pertencente ao Aquífero Piranema, nos quais se pode perceber pouca variação espacial (Tabela 16).

AMOSTRA	SOLO(g)	ÁGUA(g)	V(cm ³)	n(%)
PUC-02	24,00	7,66	13,61	33,20
PUC-02	29,35	9,35	15,87	29,95
PUC-02	24,53	8,14	13,61	31,73
PUC-03	18,44	6,68	11,34	38,41
PUC-03	19,41	6,70	11,34	35,17
PUC-03	25,39	8,87	15,01	35,93
PUC-04	19,99	7,14	12,46	39,23
PUC-04	17,51	6,63	11,08	40,14
PUC-04	20,50	7,73	12,47	37,73
MÉDIA DA POROSIDADE (%)	35,72			

Tabela 16 – Média da porosidade local.

A porosidade demonstra ser boa e compatível com o tipo de sedimento arenoso da área de estudo, com pouca argila de acordo com a sua gênese (depósito de sedimentos do Rio Guandu devido a sua subatual e atual drenagem).

5.2.3. Análise geoquímica de amostras de sedimento e água

As análises geoquímicas foram desenvolvidas pelo laboratório Analytical Solutions (Tabela 17).

Nas Tabelas 18 e 19 estão dispostos os resultado dos parâmetros geoquímicos realizados no laboratório Analytical Solutions nas amostras PUC-01, PUC-02 e FJ-03.

Referência A.S.	IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA	
	Referência do Projeto	
07445CS001	PUC – 01	
07445CS002	PUC – 02	
07445CS003	FJ – 03	

Tabela 17 – Referência do laboratório.

Na Tabela 18 estão descritos os valores obtidos nas amostras argilosa (PUC-01 / 07445CS001) e arenosa (PUC-02 / 07445CS002).

Parâmetros	Unidades	L.D.	L.Q.	BRANCO	07445CS001	07445CS002
COT	(%)	N.A.	0,05	N.D.	0,47	0,14
Cloretos	(mg/kg)	0,4	5,0	N.D.	58,4	2,9
Sulfatos	(mg/kg)	0,3	5,0	N.D.	33,5	12,9
Silício	(%)	N.A.	0,01	N.D.	7,46	23,59
Parâmetros	Unidades	L.D.	L.Q.	BRANCO	07445CS001	07445CS002
Alumínio	(mg/kg)	0,25	0,50	N.D.	25880,93	3999,58
Antimônio	(mg/kg)	0,10	0,25	N.D.	N.D.	N.D.
Arsênio	(mg/kg)	0,10	0,25	N.D.	0,64	N.D.
Berílio	(mg/kg)	0,10	0,50	N.D.	N.D.	N.D.
Cádmio	(mg/kg)	0,02	0,05	N.D.	N.D.	N.D.
Cálcio	(mg/kg)	5,00	10,00	N.D.	N.D.	N.D.
Chumbo	(mg/kg)	0,10	0,50	N.D.	14,96	2,86
Cobre	(mg/kg)	0,05	0,25	N.D.	2,62	0,99
Cromo Total	(mg/kg)	0,25	0,50	N.D.	33,36	2,55
Ferro Total	(mg/kg)	0,50	2,50	N.D.	35613,21	1332,51
Magnésio	(mg/kg)	12,50	25,00	N.D.	292,54	34,06
Manganês	(mg/kg)	0,25	0,50	N.D.	17,18	2,85
Mercúrio	(mg/kg)	0,02	0,10	N.D.	N.D.	N.D.
Níquel	(mg/kg)	0,25	0,50	N.D.	7,48	0,83
Potássio	(mg/kg)	5,00	10,00	N.D.	2268,17	91,95
Prata	(mg/kg)	0,25	0,50	N.D.	N.D.	N.D.
Selênio	(mg/kg)	0,05	0,25	N.D.	0,37	0,27
Sódio	(mg/kg)	12,50	25,00	N.D.	149,42	42,80
Titânio	(mg/kg)	0,25	0,50	N.D.	443,85	41,16
Zinco	(mg/kg)	0,25	0,50	N.D.	30,62	5,13

Tabela 18 – Resultados dos parâmetros geoquímicos das amostras dos sedimentos.

As amostras de sedimento demonstram estar em conformidade com os padrões de referência para contaminação, não apresentando perigo para o meio ambiente.

A amostra argilosa (PUC-01) demonstrou ter mais rica quimicamente que a amostra arenosa (PUC-02).

Na Tabela 19 estão descritos os valores obtidos na amostra de água (FJ-03 / 07445CS003).

Parâmetros	Unidades	L.D.	L.Q.	BRANCO	07445CS003
Alcalinidade Total	(mg CaCO ₃ /L)	N.A.	1,0	N.D.	77,0
Bicarbonatos	(mg/L)	N.A.	0,5	N.D.	77,0
Carbonatos	(mg/L)	N.A.	0,5	N.D.	N.D.
Sílica	(mg/L)	0,1	0,5	N.D.	21,1
COT	(mg/L)	0,1	2,0	N.D.	N.D.
Fósforo Total	(mg/L)	0,02	0,06	N.D.	0,07
Fluoretos	(mg/L)	0,004	0,020	N.D.	0,079
Cloretos	(mg/L)	0,04	0,50	N.D.	8,61
Nitritos	(mg/L)	0,002	0,020	N.D.	N.D.
Nitratos	(mg/L)	0,1	0,5	N.D.	2,0
Sulfatos	(mg/L)	0,03	0,50	N.D.	13,30

Parâmetros	Unidades	L.D.	L.Q.	BRANCO	07445CS003
Alumínio	(mg/L)	0,005	0,010	N.D.	1,495
Arsênio	(mg/L)	0,002	0,005	N.D.	N.D.
Bário	(mg/L)	0,002	0,010	N.D.	0,204
Boro	(mg/L)	0,005	0,010	N.D.	N.D.
Cádmio	(mg/L)	0,0003	0,0010	N.D.	N.D.
Cálcio	(mg/L)	0,100	0,200	N.D.	1,041
Chumbo	(mg/L)	0,002	0,010	N.D.	N.D.
Cobre	(mg/L)	0,001	0,005	N.D.	N.D.
Cromo Total	(mg/L)	0,005	0,010	N.D.	N.D.
Ferro Total	(mg/L)	0,010	0,050	N.D.	0,568
Magnésio	(mg/L)	0,250	0,500	N.D.	1,764
Manganês	(mg/L)	0,005	0,010	N.D.	0,022
Mercurio	(mg/L)	0,0002	0,0010	N.D.	N.D.
Molibdênio	(mg/L)	0,002	0,010	N.D.	N.D.
Potássio	(mg/L)	0,100	0,200	N.D.	2,945
Selênio	(mg/L)	0,001	0,005	N.D.	N.D.
Sódio	(mg/L)	0,250	0,500	N.D.	16,563
Vanádio	(mg/L)	0,002	0,010	N.D.	N.D.
Zinco	(mg/L)	0,005	0,010	N.D.	0,102
Dureza Total	(mg CaCO ₃ /L)	1,00	2,50	N.D.	9,48

Tabela 19 – Resultados dos parâmetros geoquímicos das amostras de água.

A água foi classificada de acordo com o diagrama de Piper e Stiff (Figuras 49 e 50):

Diagrama de Piper

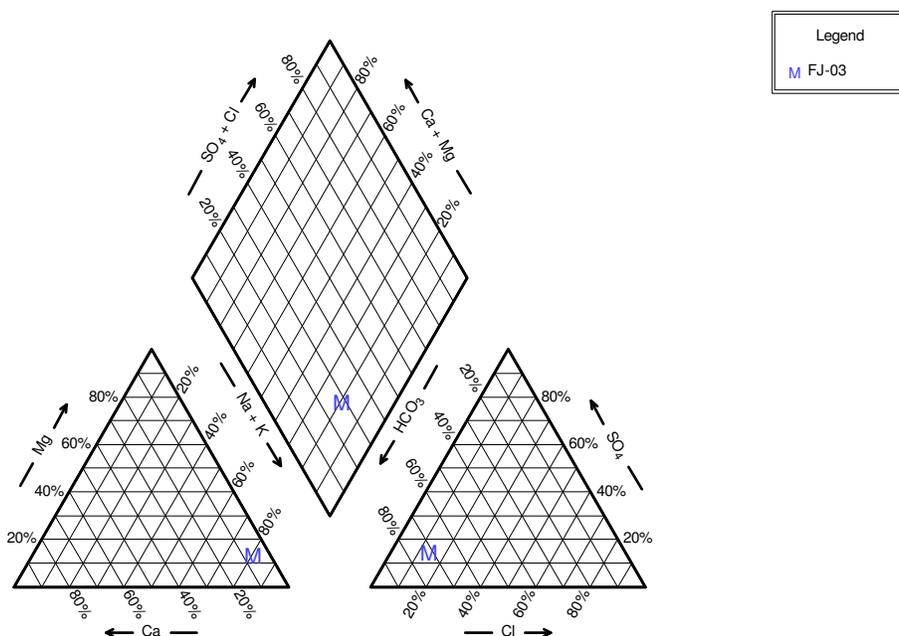


Figura 49 - Diagrama de Piper da amostra FJ-03.

Diagrama de Stiff

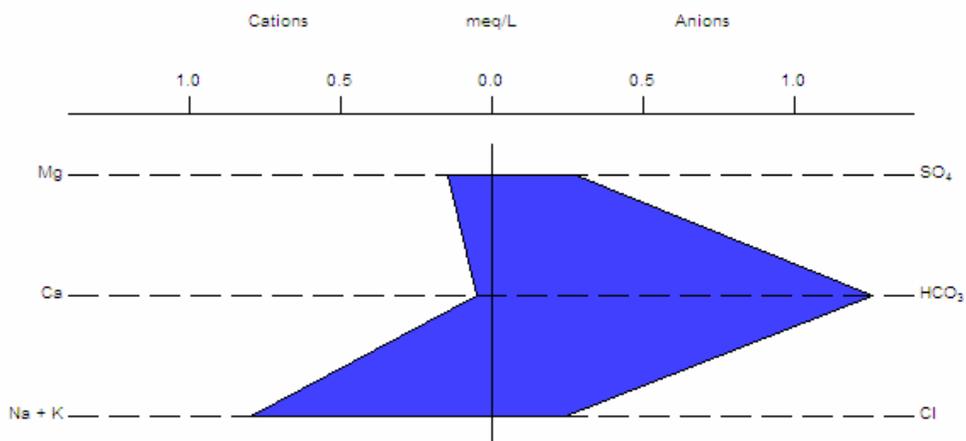


Figura 50 - Diagrama de Stiff da amostra FJ-03.

A água encontra-se fora da conformidade das normas de potabilidade. O alumínio (1,4 mg/L) e o ferro (0,5 mg/L) ocorrem em quantidades elevadas, prejudicando sua qualidade organoléptica.

É provável que as altas concentrações de alumínio, sódio e potássio sejam devido à grande quantidade de feldspatos nos sedimentos arenosos.

Os diagramas de Piper e Stiff classificaram a água como bicarbonatada sódica e é considerada uma água leve por ter valores de CaCO_3 inferiores a 50 mg/L.

É importante salientar que esta água subterrânea possui a tendência de formar bicarbonatos (de sódio e potássio principalmente).

5.2.4. Difração de raio-X

As amostras PUC-01 e PUC-02 foram submetidas à difração de raio-x para detecção dos tipos minerais de argila que compõem os sedimentos.

Os resultados obtidos pelo ensaio estão representados sob a forma de gráficos nas Figuras 51 e 52:

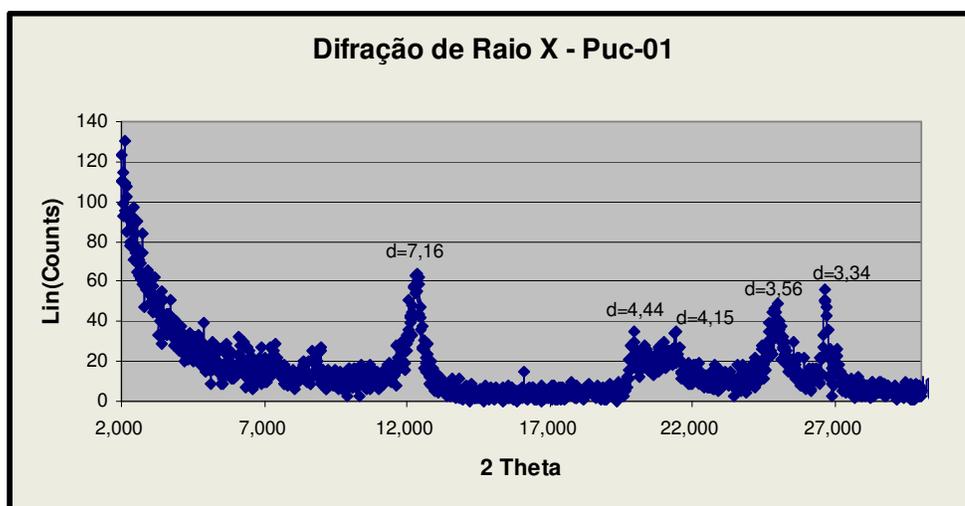


Figura 51 – Gráfico gerado pela difração de raio-x da amostra argilosa.

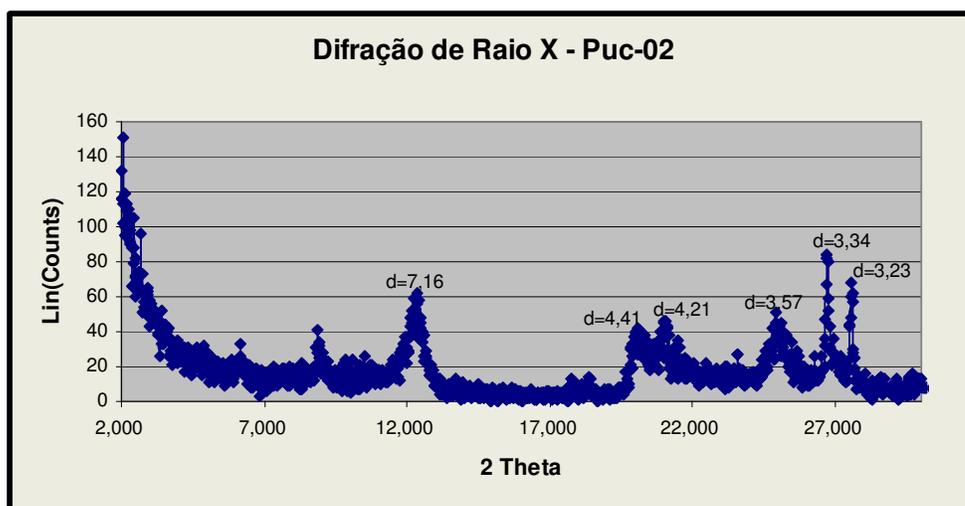


Figura 52 - Gráfico gerado pela difração de raio-x da amostra arenosa.

Na amostra argilosa, os picos difratados principais indicam a presença de caulinita e quartzo e na amostra arenosa, os picos difratados principais indicam a presença de caulinita, feldspato, quartzo e illita.

5.3. Velocidade da água subterrânea

A velocidade da água subterrânea na direção de fluxo foi determinada através da lei de Darcy como estabelecido na expressão (5.1):

$$v = \frac{ki}{n} \quad (5.1)$$

Para o uso de (1) foi considerado $k = 2,12 \times 10^{-2}$ cm/s, que constitui uma média da condutividade hidráulica estudada nos cinco poços de monitoramento. O gradiente hidráulico (i) foi obtido através do site da EPA, descrito no Capítulo 4, subitem 4.2.4. durante os meses de fevereiro a agosto de 2008. Os gradientes por se diferenciarem uma ordem de grandeza, foram separados em duas categorias: o que representa a estação seca e o que representa a estação chuvosa. Através das médias dos valores encontrados nas estações climáticas, foi considerado para a estação seca o valor de 0,00037 e para estação chuvosa 0,0013. Para uma avaliação mais precisa do gradiente será necessário um programa mais detalhado de monitoramento sazonal do mesmo através da instalação de um maior número de pontos de medida.

A porosidade foi obtida através de ensaio de laboratório como descrito no Capítulo 4, subitem 4.3.3., no qual o valor considerado foi de 0,36, indicando a média das porosidades locais. Dessa forma, a velocidade aproximada da água subterrânea da área de estudo para a época seca é 0,019 m/dia ou 6,88 m/ano. Para a época chuvosa a velocidade cresce para 0,067 m/dia ou 24,16 m/ano .

5.4. Análise comparativa entre as áreas experimentais

Muitos fatores são responsáveis pelo comportamento da pluma de um contaminante. Os microrganismos são os principais responsáveis pela degradação de contaminantes e os parâmetros geoquímicos como alcalinidade, pH, temperatura, potencial oxi-redução e receptores de elétrons são indicadores que fundamentam a atenuação natural (Wiedemeier *et al*, 1999), na qual é chamada de atenuação destrutiva. A atenuação não destrutiva é contemplada

principalmente pelo processo de advecção, no qual a migração do contaminante é consequência do movimento da água subterrânea, sendo dependente das propriedades do aquífero como porosidade, permeabilidade e gradiente hidráulico (Nunes, 2006).

A velocidade é uma grandeza que possui duas vertentes: a primeira na qual a água subterrânea precisa ter velocidade não muito alta, pois embora tenha mais aporte de nutrientes e aceptores de elétrons, não ocorre tempo hábil para os microrganismos degradarem o contaminante, tornando a biodegradação pequena e causando aumento da pluma do contaminante; a segunda na qual a água subterrânea precisa ter velocidade não muito baixa, pois os microrganismos consomem os nutrientes, oxigênio e outros aceptores de elétrons, tendo pouco ou nenhum aporte destes elementos, causando baixa biodegradação. Logo, a velocidade ideal da água subterrânea é algo que não pode ser muito lento ou muito rápido, tornando-se dependente do meio ambiente. Porém, se as condições forem ótimas (ambiente aeróbio, calor, pH 7 por exemplo) a ponto da microbiota se desenvolver em excesso (aumentar a biomassa), os vazios do solos serão ocupados pelos microrganismos, acarretando a diminuição da porosidade. Deste modo, precisa existir algum fator de seleção no ambiente para que haja equilíbrio na população microbiana.

O oxigênio dissolvido baixo pode ser consumido rapidamente em um momento de alta atividade dos microrganismos, transformando o ambiente que era aeróbio em anaeróbio. O oxigênio dissolvido também é influenciado pela temperatura, na qual quanto maior a temperatura, menor é a quantidade de oxigênio dissolvido na água.

A temperatura da água subterrânea favorece a atividade dos microrganismos, ou seja, em locais de clima tropical (temperaturas mais altas) os microrganismos possuem a tendência de se desenvolverem mais do que em locais mais frios (climas temperados, por exemplo). As taxas de biodegradação de hidrocarbonetos dobram para cada 10° centígrados (°C) de aumento de temperatura no intervalo entre 5° e 25°C. Temperaturas menores que 5°C tendem a inibir a biodegradação, e geralmente são observadas taxas lentas de biodegradação nessas águas (Nunes, 2006).

Os microrganismos anaeróbios preferem geralmente um pH neutro ou levemente alcalino, com a variação entre 6 a 8 ideal para a maior parte da biota, embora muitos tolerem a variação entre 5 e 9. Segundo Wiedemeier *et al* (1999) ambientes com pH inferior a 5 não são propícios para a degradação microbiana.

Com relação aos elementos químicos que servem como nutrientes (Ca, Mg, Na, K, Mg) quantidade destes elementos é importante pois, em caso de contaminação por hidrocarbonetos, há aumento da quantidade de carbono no ambiente e os outros elementos químicos entram em desequilíbrio, diminuído sua disponibilidade, conseqüentemente diminuindo a degradação.

Os aceptores de elétrons NO_3^- , Fe e SO_4^- são necessários na falta do oxigênio, ou seja, ambientes anaeróbios. Sem eles, na falta de oxigênio, a biodegradação não progride (Nunes, 2006).

É importante salientar que a área de estudo terá comportamento diferenciado devido à argila, cujo tipo de granulometria e a variação do nível d'água influenciarão nos microrganismos, pois estes se desenvolvem com maior eficiência em materiais com granulometria fina.

Na tabela 20 encontra-se um resumo dos parâmetros hidrogeoquímicos de três áreas experimentais existentes no mundo e da área experimental da UFRRJ:

ÁGUA SUBTERRÂNEA NATURAL				
PARÂMETROS	BORDEN	CAPE COD	RESSACADA	UFRRJ
K (cm/s)	7×10^{-3}	$1,273 \times 10^{-1}$	$2,1 \times 10^{-3}$	$2,12 \times 10^{-2}$
K (m/dia)	6,048	109,99	1,81	18,33
i	$4,3 \times 10^{-3}$	$1,6 \times 10^{-3}$	4×10^{-3}	$3,7 \times 10^{-4}$ a $1,2 \times 10^{-3}$
n	0,33	0,39	0,4	0,36
V (m/s)	$9,12 \times 10^{-7}$	$5,22 \times 10^{-6}$	$2,1 \times 10^{-7}$	$2,18 \times 10^{-7}$ a $7,66 \times 10^{-7}$
V (m/dia)	0,079	0,45	0,018	0,02 a 0,07
V (m/ano)	28,76	164,69	6,62	6,88 a 24,16
EH (mV)	---	---	32-169	283-356
COT (%)	0,02	2,1	0,06	N.D.
Ox.dissolv.(mg/L)	0-8,5	N.D.	5,0-8,0	2,1-5,6
Ca ²⁺ (mg/L)	50-110	1,8	0,2	1,041
Mg ²⁺ (mg/L)	2,4-6,1	1,7	0,1	1,764
Na ⁺ (mg/L)	0,9-2,0	5,5	---	16,563
K ⁺ (mg/L)	0,1-1,2	0,1	5	2,945
Alcal.(CaCO ₃) (mg/L)	100-250	6	4,0-30	77
CL ⁻ (mg/L)	1,0-3,0	8,1	---	8,61
SO ₄ ⁻ (mg/L)	10,0-30,0	5,2	0,3-4,3	13,3
NO ₃ ⁻ (mg/L)	<0,6	0,42	0,05-0,137	2
TDS (mg/L)	380-500	39	---	121,2
pH	7,3-7,9	5,8	5,0-5,3	5,5

Tabela 20 – Resumo dos parâmetros hidrogeoquímicos de diversas áreas experimentais.

Considerando a condutividade hidráulica, os ensaios efetuados na área de estudo mostraram valores maiores do que aqueles encontrados tanto em Borden

quanto na Ressacada porém menores que aqueles encontrados em Cape Cod. Deve-se lembrar que os valores colocados na Tabela 20 são valores médios. Sabe-se que a condutividade hidráulica mostra eventualmente considerável variabilidade espacial como demonstrado por Sudicky (1986) a partir dos ensaios realizados no campo de Borden. Assim, será provavelmente necessária uma pesquisa detalhada para definir, assim como feito em Borden, de como é a variabilidade espacial da área da UFRRJ. O gradiente hidráulico pode ser considerado baixo, variando uma ordem de grandeza entre as estações seca e chuvosa, estando os valores entre os encontrados nas outras áreas. A porosidade possui valor que representa uma média entre todas as áreas, sendo maior que Borden e menor que na Ressacada e Cape Cod. Quanto maior a porosidade, mais oxigênio e nutrientes circulam no solo favorecendo os microrganismos. Porém a caracterização dos solos demonstrou que o aquífero é composto por areia média a grossa, o que prejudica os microrganismos já que eles se adaptam melhor a granulometrias mais finas por causa da maior superfície específica para se fixarem. A velocidade da água subterrânea na área de estudo na estação seca se assemelha a Ressacada e na estação chuvosa se assemelha a Borden. Cape Cod possui a velocidade bem maior que todas as áreas. Embora a Ressacada tenha a velocidade da água subterrânea baixa e Cape Cod tenha velocidade elevada, foi obtido sucesso nos experimentos, indicando que a velocidade, neste caso, não prejudicou as pesquisas.

O Eh da área de estudo mostra-se acima da área da Ressacada, indicando ambiente oxidante, na qual auxilia no aumento da atividade microbiana aeróbia, sendo interessante para a degradação de certos compostos como matéria orgânica natural e hidrocarbonetos derivados do petróleo. Segundo Stumm e Morgan (1981), encontra na faixa onde são favoráveis as reações com manganês e bicarbonato, na qual se encontra em quantidades razoáveis na água subterrânea da área de estudo.

O oxigênio dissolvido da área de estudo mostra-se menor que na Ressacada e próximo ao de Borden. Como as outras áreas experimentais estão localizadas em clima frio, espera-se que o oxigênio dissolvido nesses locais seja maior, já que a UFRRJ se localiza em clima tropical.

Globalmente, os elementos químicos principais para o desenvolvimentos de microrganismos estão presentes em quantidades significativas (Ca, Mg, Na, K, Mg) na área de estudo, em maior quantidade que em Cape Cod e Ressacada, porém em menor quantidade que em Borden.

O íon Cl^- possui valor alto na área de estudo, no qual não é aconselhável utilizar traçadores com esse tipo de ânion, pois pode causar problemas de detecção.

Os aceptores de elétrons após o oxigênio (NO_3^- , Fe e SO_4^-) estão em quantidades maiores que nas outras áreas, indicando que, na falta de oxigênio, existem outros aceptores que auxiliarão na degradação anaeróbia no contaminante.

O carbono orgânico total (COT) na área de estudo não foi detectado, enquanto as outras áreas experimentais apresentaram algum teor de COT. É necessário refazer esta análise através de outro método, para que haja certeza do teor desse parâmetro.

O pH encontra-se maior que na Ressacada e menor que em Cape Cod e Borden, distante do pH ideal de valor sete para os microrganismos. Neste caso, Borden tem a condição mais favorável, com pH próximo de sete.

A área possui 50 m de comprimento por 50 m de largura, na qual a velocidade entre 6 e 24 m/ano é favorável, sendo possível prosseguir a pesquisa sem utilizar métodos de contenção do contaminante, para que este não ultrapasse a área de estudo.

Levando em consideração todos os parâmetros analisados, a área experimental da UFRRJ demonstra ter parâmetros mais otimistas que a área da Ressacada, parâmetros físicos semelhantes com a área de Borden e parâmetros químicos semelhantes com a área de Cape Cod. A fazenda experimental da Ressacada, mesmo possuindo condições menos favoráveis, houve sucesso em pesquisas com biodegradação de contaminantes. Desse modo, a área experimental na UFRRJ demonstra estar apta a pesquisa com contaminação por substâncias derivadas de petróleo.

Esta análise comparativa é uma tentativa de prever o comportamento do contaminante que acordo com os parâmetros discutidos anteriormente. Porém, não é possível determinar quais parâmetros serão determinantes na eficiência da biodegradação e torna-se difícil estabelecer parâmetros que indiquem se a área será eficaz em degradar o contaminante, pois um parâmetro influencia no outro, modificando as condições ambientais. Somente na ocasião da contaminação serão desvendados os parâmetros que realmente influenciarão na biodegradação de hidrocarbonetos derivados de petróleo na área de estudo.