

TIAGO LEMOS GUEDES

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM SISTEMA DE
FILTRAÇÃO EM MARGEM DE RIO COM BOMBEAMENTO
FOTOVOLTAICO**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, como parte dos quesitos para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Maurício Luiz Sens

Co-orientador: Prof. Dr. Ramon Lucas Dalsasso

Florianópolis

2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Guedes, Tiago Lemos
AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM SISTEMA DE
FILTRAÇÃO EM MARGEM DE RIO COM BOMBEAMENTO
FOTOVOLTAICO / Tiago Lemos Guedes ; orientador,
Maurício Luiz Sens, coorientador, Ramon Lucas
Dalsasso, 2018.
207 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós
Graduação em Engenharia Ambiental, Florianópolis,
2018.

Inclui referências.

1. Engenharia Ambiental. 2. Tratamento de água.
3. Filtração em margem. 4. Bombeamento fotovoltaico.
I. Sens, Maurício Luiz . II. Dalsasso, Ramon Lucas .
III. Universidade Federal de Santa Catarina.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental.
IV. Título.



TERMO DE APROVAÇÃO

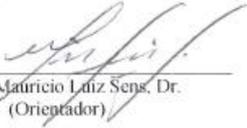
“AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM SISTEMA DE FILTRAÇÃO EM MARGEM DE RIO COM BOMBEAMENTO FOTOVOLTAICO”

Tiago Lemos Guedes

A Tese foi julgada e aprovada pela banca examinadora no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de

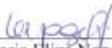
DOUTOR EM ENGENHARIA AMBIENTAL

Aprovado por:

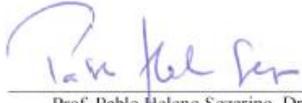


Prof. Mauricio Luiz Sens, Dr.
(Orientador)

Prof. Ramon Lucas Dalsasso, Dr.
(Coorientador)



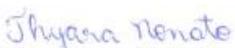
Prof.ª Maria Eliza Nagel Hassemer, Dr.ª



Prof. Pablo Heleno Sezerino, Dr.



Prof. Jaime Joaquim da S. P. Cabral, Dr.



Prof.ª Thyara Campos Martins Nonato, Dr.ª



Prof.ª Maria Eliza Nagel Hassemer, Dr.ª
(Coordenadora)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, força infinita, pela benção de estar vivo, com saúde, para poder realizar as coisas que almejo.

Agradeço ao Professor Dr. Maurício Sens, pela confiança em abrir as “portas” do Laboratório de Potabilização das Águas (Lapoá), para a realização deste doutorado, pela orientação e suporte durante este período.

Agradeço ao Professor Dr. Ramon Dalsasso, coorientador nesta pesquisa, por todo o acompanhamento na realização deste trabalho, pelo suporte na concepção, montagem e monitoramento do sistema piloto.

Agradeço à Fundação Nacional de Saúde (FUNASA) pelo financiamento do projeto de pesquisa, no qual meu doutorado foi realizado. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos. Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental (PPGEA) e Departamento de Engenharia Sanitária (ENS) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) pela estrutura oferecida para realização desta pesquisa. Ao Laboratório Integrado de Meio Ambiente (LIMA/ENS) e seus funcionários, especialmente à Elaine, pela estrutura e equipamentos utilizados nas análises de água. Ao Projeto Tecnologias Sociais para a gestão da Águas (TSGA) pelo apoio logístico e contatos em Orleans.

Agradeço ao Seu Zé e família, por ceder espaço em sua propriedade para instalação do sistema piloto, pela generosidade dos melados e farinha de aipim e pela cordialidade de sempre.

Agradeço ao Professor Dr. Cledimar Lourenzi, do Laboratório de Química do Solo do Centro de Ciências Agrárias (CCA/UFSC), pela ajuda na definição de metodologias de análise de solo e por abrir as “portas” do laboratório e ainda ceder estagiários para auxílio nas análises.

Agradeço ao doutorando Vilmar Muller pela ajuda na classificação dos solos em Orleans, além do auxílio nas coletas de solo com trado e também com a análise estatísticas dos dados de solo.

Agradeço ao Dr. José Barrios pelo auxílio na utilização do espectrofotômetro de absorção atômica para análise de metais nas amostras de solo.

Agradeço ao Professor Dr. Davide Franco, coordenador do Laboratório de Hidráulica Marítima (LAHIMAR), e ao Doutorando Vítor Eduardo Cury, pela ajuda com as análises estatísticas dos dados.

Agradeço aos meus colegas de Laboratório: Bruno, Márcio, Juliana, Alcione, Fernando, Thyara, Tiago Burgardt, Carolina, Diego e Sérgio pela companhia diária, pelos conhecimentos compartilhados, apoio e pelos momentos de descontração. Aos bolsistas e estagiários: Joana, Viviane, Marcela, Guilherme, Arthur, Karolina, Gisele, Wiliam e Pedro pela ajuda imprescindível com as análises de água, solo e compilação de dados.

Agradeço à minha mãe, pelo amor e acolhimento de sempre, ao meu pai, pelo incentivo e força constante. Aos meus irmãos, Vinícius, Gabriel e Mikael pela fraternidade e pelos momentos de descontração. À todos meus familiares pelo carinho e vibrações positivas emanadas nessa fase da minha vida.

Agradeço à Carol, minha companheira, pelo amor, pela compreensão da ausência em muitos momentos e pelo cuidado com nossa filha Maêva, à qual eu agradeço por me ensinar a ser pai e sobre o amor incondicional.

Agradeço à família que escolhi: Fabrício Ahau, Marina, Mainá, Rodrigueira, Gus Benke, Shinna, Pedro Hilgert, Raphael Autran, Tiago Chaves e tantos outros pela oportunidade de cultivar o elo da amizade.

São tantas pessoas que de alguma forma eu sinto que devo agradecer, que possivelmente posso ter esquecido de mencionar o nome algum, mas sou profundamente grato a todos.

Minha gratidão é o reconhecimento do bem que de alguma forma chegou até mim, por meio de alguém.

GRATIDÃO!

RESUMO

Populações que vivem isoladamente, geralmente enfrentam a realidade da falta de um sistema adequado de abastecimento de água, justamente por apresentarem dispersão populacional e estarem localizadas distante da zona urbana. A filtração em margem (FM) pode ser indicada como uma alternativa de tratamento de água para tais populações, com o propósito de prover água de qualidade de forma simplificada. Dessa forma, a presente pesquisa teve como objetivos propor diretrizes para a escolha de um local adequado à aplicação da FM, desenvolver, avaliar e monitorar um sistema de tratamento de água por FM, utilizando bombeamento fotovoltaico, direcionado para o abastecimento de água em comunidades isoladas. As diretrizes para escolha de locais indicados à aplicação da FM consistem em uma sequência de etapas, iniciadas com uma análise visual prévia e seguida de coletas de dados e informações importantes para um bom funcionamento da técnica. Após análise visual prévia, o local foi escolhido para aplicação do projeto no município de Orleans (SC). Posteriormente, para caracterização do solo local, foram realizadas sondagens no solo/subsolo, coleta e análises granulométricas e químicas do solo, além de ensaios para determinação da condutividade hidráulica e porosidade efetiva do solo. O manancial foi caracterizado em termos de vazão e velocidade de escoamento, além de coleta e análises granulométricas dos sedimentos do leito do rio. A qualidade da água bruta, assim como da água proveniente do poço de produção foi monitorada com o intuito de avaliar a eficiência da técnica no tratamento de água. O solo do local, assim como o leito do rio apresentaram granulometria média a grossa, com valores de condutividade hidráulica de $5,2 \cdot 10^{-3}$ e $1,5 \cdot 10^{-3}$ cm/s, respectivamente. O manancial apresentou vazão e velocidade de escoamento de $630 \text{ m}^3/\text{h}$ e $0,19 \text{ m/s}$, respectivamente, além de apresentar comportamento alternado de transporte, erosão e deposição de sedimentos em seu leito. A partir das análises realizadas, pôde-se observar que o local escolhido apresentou características favoráveis à aplicação da técnica de FM. Apesar do manancial utilizado como fonte de água ter apresentado diversos eventos de turbidez elevada, a água proveniente do poço de FM apresentou qualidade estável e satisfatória, durante todo o período de estudo (Maio/2016 a Setembro/2017). Foram

obtidas reduções de cor aparente (95%), cor verdadeira (98%), turbidez (96%), COD (68%), ferro total (88%), coliformes totais (99,98%) e *Escherichia Coli* (100%) da água do manancial. A FM com bombeamento fotovoltaico mostrou ser uma alternativa viável para o abastecimento de água de comunidades isoladas, proporcionando água de qualidade de forma simplificada e contínua, mesmo em Orleans (SC) que está localizada em uma das regiões menos favorecidas do Brasil em termos de radiação solar.

Palavras-chave: tratamento de água, filtração em margem, bombeamento fotovoltaico, comunidades isoladas.

ABSTRACT

Populations that live in isolated areas usually have difficulties regarding an adequate water supply system, precisely due to population dispersion and great distance from urban area. Bank filtration (BF) can be indicated as a water treatment alternative for these populations, in order to provide quality water in a simplified way. Thus, the present research had as objectives to propose guidelines for choosing a suitable site for the BF application, to develop, evaluate and monitor a water treatment system by bank filtration, using solar energy in the pumping, directed to the water supply in communities. The guidelines for choosing suitable sites for the BF application consist of a sequence of steps, initiated with a prior visual analysis and followed by data and information collections, important for a good operation of the BF technique. After previous visual analysis, the site was chosen for the application of the project in the municipality of Orleans (SC). Subsequently, soil and subsoil sampling and soil chemistry analyzes, as well as hydraulic conductivity and porosity tests were performed for local soil characterization. The river was characterized in terms of flow rate and flow velocity, as well as sampling and particle size analysis of the river bed. The quality of the raw water and the water from the production well was monitored in order to evaluate the technique for water treatment. The local soil, as well as the river bed presented medium to coarse granulometry, with hydraulic conductivity values of $5.2 \cdot 10^{-3}$ and $1.5 \cdot 10^{-3}$ cm / s, respectively. The river presented flow rate and flow velocity of 630 m³/h and 0.19 m/s, respectively, besides presenting alternating behavior of transport, erosion and deposition of sediments in its bed. From the analyzes performed, it was observed that the chosen site presented favorable characteristics to the application of the bank filtration technique. The surface water used as water source presented several high turbidity results. Water from the bank filtration well was satisfactory for human consumption throughout the study period (May/2016 to September/2017). It was obtained a reduction of 95%, true color (98%), turbidity (96%), COD (68%), total iron (88%), total coliforms (99.98%) and *Escherichia coli* (100%) of the raw water. Bank filtration with photovoltaic pumping proved to be a viable alternative for the water supply for isolated

communities, providing quality water in a simplified and continuous way, even in Orleans (SC), which is located in one of the least favored regions of Brazil in terms of solar radiation.

Keywords: water treatment, bank filtration, photovoltaic solar pumping, isolated communities.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ilustração esquemática do funcionamento da filtração em margem.	45
Figura 2: Ilustração esquemática da localização poço de filtração em margem de rio.	52
Figura 3: Diagrama de Hjülstrom.	53
Figura 4: Produção mundial de células fotovoltaicas de 1985 a 2012.	58
Figura 5: Principais tecnologias de células fotovoltaicas: (a) silício monocristalino (m-Si); (b) silício policristalino (p-Si).	60
Figura 6: Categorias de sistemas fotovoltaicos.	61
Figura 7: Representação de um sistema de bombeamento fotovoltaico.	64
Figura 8: Diagrama para seleção de bombas.	65
Figura 9: Localização da área de estudo.	68
Figura 10: Imagem do micromolinete usado na medição de velocidade do rio Belo.	71
Figura 11: Esquema ilustrativo de aplicação do método da meia-seção.	72
Figura 12: Detalhes da perfuratriz hidráulica acoplada ao trator Valmet 1979.	74
Figura 13: Coleta de amostras de solo durante o procedimento de sondagem do solo.	75
Figura 14: Instrumentos utilizados nas análises granulométricas de solo: a) Almofariz e mão de gral. b) Sequência de peneiras sobre o agitador mecânico.	76

Figura 15: Esquema de piloto de FM proposto para a pesquisa.	77
Figura 16: Instalações do sistema piloto de filtração em margem.	78
Figura 17: (a) Detalhe do medidor eletromagnético de vazão seguido do dosador automático de cloro. b) Pastilhas de cloro para água de consumo humano.	79
Figura 18: Módulo solar Kyocera utilizado para alimentar os dispositivos de monitoramento do piloto de FM	79
Figura 19: Abrigo dos equipamentos e dispositivos de operação e monitoramento do piloto de FM	80
Figura 20: Localização dos furos de sondagem e do poço de produção em relação ao Rio Belo.....	80
Figura 21: Detalhe do piezômetro, durante o procedimento de limpeza.	81
Figura 22: Imagem do poço existente no local de estudo.	82
Figura 23: (a) Procedimento de perfuração do poço tubular. (b) Poço de FM finalizado.....	83
Figura 24: Detalhe da bomba utilizada no bombeamento do poço de FM na segunda etapa do estudo.	84
Figura 25: Imagem do Leve Logger utilizado para medições de nível de água.....	84
Figura 26: Imagem ilustrativa do kit de bombeamento solar Anauger®.	85
Figura 27: Projeto do esquema de montagem das bombas em paralelo.....	87
Figura 28: Esquema de instalação das bombas em paralelo. ...	87

Figura 29: Piranômetro e datalogger utilizados no monitoramento da irradiação solar.	88
Figura 30: Padrões de radiação solar.	89
Figura 31: (a) Detalhe da bomba utilizada no teste de bombeamento. (b) Medição de vazão pelo método volumétrico, durante o teste de bombeamento.	91
Figura 32: Ensaio de infiltração para determinação da condutividade hidráulica do solo em campo.	92
Figura 33: Imagem do medidor e sonda autônoma Hanna utilizados no monitoramento da turbidez da água do rio e do poço de FM.	96
Figura 34: Primeira (a) e segunda (b) configuração de instalação da sonda de turbidez no rio Belo.	97
Figura 35: (a) Terceira configuração de instalação da sonda de turbidez no rio Belo. (b) Detalhe do compartimento de instalação da sonda do poço de FM.	97
Figura 36: Localização do poço de FM dentro da bacia hidrográfica do rio Belo.	99
Figura 37: Seção transversal do Rio Belo utilizada para medição da vazão.	100
Figura 38: Resultado do diagrama de Hjulstrom.	103
Figura 39: Piezômetro removido após evento de cheia no rio Belo.	104
Figura 40: (a) Erosão causada por um evento de cheia. (b) Piezômetro com vestígios de um evento de cheia do rio Belo.	104
Figura 41: Monitoramento da turbidez da água do rio por meio de coletas manuais de água.	105

Figura 42: Monitoramento diário da turbidez da água do rio por meio de sonda autônoma.....	106
Figura 43: Detalhe do rio Belo em um dia com elevada turbidez na água.....	108
Figura 44: Perfil geológico do subsolo do local de implantação do poço de FM.	109
Figura 45: Frações de partículas retidas nas peneiras das camadas B e D.....	111
Figura 46: Box Plot da variação do pH ao longo do perfil do solo.	114
Figura 47: Box Plot da variação do ferro ao longo do perfil do solo.....	115
Figura 48: Box Plot da variação da argila e silte ao longo do perfil do solo.....	116
Figura 49: Box Plot da variação do COT ao longo do perfil do solo.....	117
Figura 50: Box Plot da variação do manganês ao longo do perfil do solo.....	118
Figura 51: Análise de agrupamento dos horizontes do solo. ...	119
Figura 52: Gráfico de relação entre porosidade e granulometria dos constituintes do solo.....	122
Figura 53: Monitoramento dos níveis de água (poço e rio) utilizando bombas solares (300 W) no bombeamento.	124
Figura 54: Monitoramento dos níveis de água (poço e rio) utilizando bomba elétrica (3/4 cv) no bombeamento.....	125
Figura 55: Relação entre radiação solar e vazão bombeada...	126

Figura 56: Cenário 1(Nov/16): a) relação entre radiação solar e vazão; b) Rebaixamento do nível da água do poço em função da vazão de bombeamento.....	127
Figura 57: Cenário 2 (Nov/16): a) relação entre radiação solar e vazão; b) Rebaixamento do nível da água do poço em função da vazão de bombeamento.....	128
Figura 58: Comportamento da turbidez do rio e do poço de FM, em relação ao aumento do RT.....	130
Figura 59: Classificação dos dias em termos de radiação solar.	131
Figura 60: Comportamento do pH durante o período de estudo.	135
Figura 61:Gráfico Box Plot do pH durante o período de estudo.	136
Figura 62: Comportamento do COD durante o período de estudo.	137
Figura 63: Box Plot do COD durante o período de estudo.	137
Figura 64: Comportamento do OD durante o período de estudo.	138
Figura 65: Box Plot do OD durante o período de estudo.....	139
Figura 66: Comportamento da turbidez durante o período de estudo.....	140
Figura 67: Box Plot da turbidez durante o período de estudo..	140
Figura 68: Monitoramento horário da turbidez durante três dias.	141
Figura 69: Comportamento da CE durante o período de estudo.	142

Figura 70: Box Plot da CE durante o período de estudo.....	143
Figura 71: Comportamento da cor aparente durante o período de estudo.....	144
Figura 72: Comportamento da cor verdadeira durante o período de estudo.....	144
Figura 73: Box Plot da cor aparente e verdadeira durante o período de estudo	145
Figura 74: Comportamento do ferro total durante o período de estudo.....	146
Figura 75: Box Plot do ferro total durante o período de estudo.	146
Figura 76: Box Plot dos coliformes totais durante o período de estudo.....	149
Figura 77: Box Plot do parâmetro <i>Escherichia Coli</i> durante o período de estudo.	150
Figura 78: Perfil do terreno em uma seção transversal de rio .	153
Figura 79: Trecho de rio com margem plana (lado esquerdo) formada por depósitos de areia e seixos rolados.....	153
Figura 80: Trecho de rio com meandro.....	154
Figura 81: Exemplo de local promissor para implantação da FM, com depósito de areia.....	155
Figura 82: Diagrama de Hjulström	156
Figura 83: Posição dos furos de sondagem em relação ao curso d'água	158
Figura 84: Esquema, em planta, para medir a velocidade da água do rio.....	164

Figura 85: Perfil de velocidade com os respectivos pontos de medição recomendados	167
Figura 86: Arranjo do experimento para determinação da condutividade hidráulica do solo por ensaio de infiltração em campo	168
Figura 87: Valores de qualidade dos parâmetros: coliformes fecais (q1) e pH (q2).....	171
Figura 88: Valores de qualidade dos parâmetros: DBO (q3) e Nitrogênio total (q4)	171
Figura 89: Valores de qualidade dos parâmetros: Fósforo Total (q5) e Temperatura (q6)	172
Figura 90: Valores de qualidade dos parâmetros: Turbidez (q7) e Sólidos Totais (q8)	172
Figura 91: Valores de qualidade do parâmetro: Oxigênio Dissolvido (q9).....	173
Figura 92: Perfil de CAMBISSOLO FLÚVICO.	195
Figura 93: Vista geral da paisagem de ocorrência do CAMBISSOLO FLÚVICO.....	196
Figura 94: Paisagem de ocorrência do CAMBISSOLO FLÚVICO. Vista do curso de água existente no local.	197

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros químicos de solo e as respectivas metodologias.	77
Tabela 2: Especificações técnicas da bomba Anauger P100. ...	85
Tabela 3: Especificações técnicas do módulo fotovoltaico fornecido no kit de bombeamento solar Anauger®.	86
Tabela 4: Parâmetros físico-químicos e bacteriológicos monitorados.	95
Tabela 5: Composição granulométrica do leito do rio Belo.	101
Tabela 6: Resultados da análise granulométrica do leito do rio.	102
Tabela 7: Relação de datas de coletas de água quinzenais. ...	105
Tabela 8: Relação de datas de coletas diárias com sonda autônoma.	106
Tabela 9: Diferença entre os dados de turbidez de coletas diárias e quinzenais.	107
Tabela 10: Composição granulométrica de cada ponto de sondagem do solo/subsolo do local de implantação do poço de FM.	110
Tabela 11: Resultado das análises físico-químicas do solo/subsolo da área de estudo.	113
Tabela 12: Resultados da Análise de Variância (ANOVA).	120
Tabela 13: Resultados dos ensaios de permeabilidade em campo.	120
Tabela 14: Dados do parâmetro RT em relação à turbidez da água do manancial e poço de FM.	129

Tabela 15: Classificação dos dias em termos de radiação solar e estação do ano.....	131
Tabela 16: Classificação da radiação em Orleans ao longo do ano.....	132
Tabela 17: Resultados das análises físico-químicas e bacteriológicas da água bruta e tratada.	134
Tabela 18: Indicadores para avaliação da viabilidade de implantação da FM.....	159
Tabela 19: Critério de pontuação para a condutividade hidráulica	160
Tabela 20: Critério de pontuação para a espessura do aquífero	160
Tabela 21: Valores de IQA e classificação da qualidade da água	161
Tabela 22: Critério de pontuação para a qualidade da água superficial	161
Tabela 23: Critério de pontuação para o gradiente hidráulico (I)	162
Tabela 24: Critério de pontuação para a condutividade hidráulica do leito do rio (R).....	162
Tabela 25: Critério de pontuação para a profundidade da água subterrânea (D)	162
Tabela 26: Classificação de áreas considerando a aptidão para implantação da FM.....	163
Tabela 27: Distribuição dos pontos transversal ao canal para medição da velocidade do fluxo de água entre as seções verticais	165

Tabela 28: Distribuição dos pontos para medição da velocidade do fluxo de água em diferentes verticais	166
Tabela 29: Parâmetros de qualidade da água do IQA e respectivo peso	170

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CASAN	Companhia Catarinense de Águas e Saneamento
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
COD	Carbono Orgânico Dissolvido
COT	Carbono Orgânico Total
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ENS	Departamento de Engenharia Sanitária da Universidade Federal de Santa Catarina
ETA	Estação de Tratamento de Água
FUNASA	Fundação Nacional de Saúde
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDH	Irradiação Direta Horizontal
IDN	Irradiação Direta Normal
IGH	Irradiação Global Horizontal
NBR	Norma Brasileira
NMP	Número Mais Provável
PEAD	Poli Etileno de Alta Densidade
PR	Estado do Paraná
SAMAE	Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto
SC	Estado de Santa Catarina
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SFCR	Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede
SFI	Sistemas Fotovoltaicos Isolados
STC	<i>Standard Test Conditions</i>
TSGA	Tecnologias Sociais para Gestão da Água
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
USEPA	United States Environmental Protection Agency

LISTA DE SÍMBOLOS

°C	Grau(s) Célsius
A	Área
c.a.	Corrente Alternada
c.c.	Corrente Contínua
cm	Centímetro(s)
cv	Cavalo Vapor de Potência
d	Dia(s)
d ₁₀	Diâmetro Efetivo
d ₆₀	Diâmetro cujo 60% das partículas são menores
d ₉₀	Diâmetro cujo 90% das partículas são menores
d _{mp}	Diâmetro médio da partícula
h	Altura, Hora(s)
k	Coeficiente de permeabilidade
kg	Kilograma
km	Kilômetro
L	Comprimento (equações); Litro(s) (unidade)
m	Metro(s)
ml	Mililitro(s)
mm	Milímetro(s)
nm	Nanômetro(s)
NMP	Número mais provável
Q	Vazão
r	Raio
s	Segundo(s)
t	Tempo
t ₅₀	Tempo de concentração média

uT	Unidades de turbidez
V	Volume; Volt
μm	Micrômetro(s)
η_{ef}	Porosidade efetiva
W	Watts

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	33
2	HIPÓTESES.....	37
3	OBJETIVOS.....	39
3.1	Objetivo Geral.....	39
3.2	Objetivos Específicos.....	39
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	41
4.1	Histórico da filtração em margem.....	41
4.2	Caracterização da Filtração em Margem.....	45
4.3	Fatores determinantes para aplicação da filtração em margem.....	49
4.3.1	Hidrogeologia.....	49
4.3.2	Hidrologia.....	50
4.3.3	Morfologia e composição do leito do manancial.....	50
4.3.4	Qualidade da água do manancial.....	53
4.3.5	Composição química do solo.....	54
4.4	Energia Solar Fotovoltaica.....	56
4.4.1	Princípio de funcionamento.....	58

4.4.2	Aplicação de sistemas fotovoltaicos.....	61
4.4.3	Irradiação Solar.....	62
4.5	Bombeamento solar fotovoltaico.....	63
5	MATERIAIS E MÉTODOS.....	68
5.1	Área de estudo.....	68
5.2	Escolha do local para implantação do piloto.....	69
5.3	Caracterização do Manancial.....	71
5.3.1	Medição de velocidade de fluxo e vazão....	71
5.3.2	Análises granulométricas e condutividade hidráulica do leito do rio.....	72
5.4	Caracterização do solo e subsolo.....	73
5.4.1	Sondagem do solo/subsolo.....	73
5.4.2	Análises granulométricas do solo.....	75
5.4.3	Análises químicas do solo.....	76
5.5	Sistema piloto de filtração em margem.....	77
5.5.1	Piezômetros.....	80
5.5.2	Poço de Produção.....	82
5.5.3	Bombeamento Solar Fotovoltaico.....	84
5.5.4	Monitoramento da irradiação solar.....	88

5.5.5	Relação entre o índice RT e a turbidez da água do poço de FM.....	89
5.5.6	Teste de bombeamento e capacidade de produção do poço de FM.....	90
5.5.7	Condutividade hidráulica.....	91
5.5.8	Porosidade efetiva.....	93
5.5.9	Tempo de percurso da água.....	94
5.6	Monitoramento da qualidade da água.....	94
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	99
6.1	Locação do experimento dentro da bacia hidrográfica.....	99
6.2	Caracterização do Manancial.....	100
6.2.1	Velocidade de fluxo e vazão do manancial.....	100
6.2.2	Granulometria dos sedimentos do leito do rio.....	101
6.2.3	Condutividade hidráulica do leito do rio...	101
6.2.4	Diagrama de Hjulstrom.....	102
6.2.5	Monitoramento da turbidez da água do manancial.....	105

6.3	Caracterização do solo e subsolo.....	108
6.3.1	Perfis Geológicos.....	108
6.3.2	Análises Granulométricas.....	109
6.3.3	Análises Químicas do Solo.....	112
6.3.4	Análises estatísticas.....	118
6.3.5	Condutividade hidráulica.....	120
6.3.6	Porosidade efetiva.....	121
6.4	Avaliação do tempo de percurso da água.....	122
6.5	Teste de bombeamento e capacidade de produção do poço de FM.....	123
6.6	Avaliação do rebaixamento do nível de água no poço de FM.....	124
6.7	Avaliação do bombeamento solar aplicado à FM.....	125
6.8	Monitoramento da irradiação solar.....	131
6.9	Caracterização da água do manancial e do poço de FM.....	133
6.10	Diretrizes para escolha de locais para implantação da Filtração em Margem.....	151

6.10.1	Aspectos a serem considerados na escolha do local para aplicação da FM.....	151
6.10.2	Escolha do local para implantação de um sistema de FM.....	151
6.10.3	Fases da escolha do local para implantação da FM.....	152
6.10.4	Metodologias.....	163
7	CONCLUSÕES.....	175
8	RECOMENDAÇÕES.....	177
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	179
10	APÊNDICES.....	193
10.1	APÊNDICE A – Caracterização e classificação do solo do local do experimento.....	193
10.2	APÊNDICE B – Gráfico do ensaio de determinação da porosidadeefetiva.....	199
11	ANEXOS.....	201
11.1	ANEXO 1: Laudos das sondagens na área de implantação do poço de FM.....	201

1 INTRODUÇÃO

A água é um elemento fundamental para a conservação e manutenção da vida, porém desde sempre foi usada sem a preocupação de que este recurso pudesse se tornar escasso, devido à grande disponibilidade hídrica do país e/ou falta de conscientização por parte da sociedade. O elemento água não está se extinguindo, mas a água de qualidade está se tornando cada vez mais escassa.

O crescimento populacional e a poluição de recursos hídricos podem ser indicados como os principais fatores agravantes na escassez da água de qualidade. As atividades antrópicas, tanto no meio rural como no meio urbano, têm contribuído significativamente para a degradação da qualidade das águas superficiais e subterrâneas. Desmatamentos, processos de erosão/assoreamento dos mananciais superficiais e os lançamentos de efluentes domésticos e industriais representam algumas das atividades impactantes na qualidade dos corpos d'água. A degradação da qualidade dos corpos d'água representa um problema maior quando os mesmos são utilizados como mananciais para abastecimento da população.

As águas superficiais geralmente necessitam passar por algum tipo de tratamento para serem consideradas potáveis, ou seja, seguras para consumo humano (DASH, 2010). A água para ser considerada potável, ou seja, apta para ser ingerida ou utilizada para fins higiênicos, deve atender as condições mínimas estipuladas através dos órgãos reguladores. No Brasil a Portaria de Consolidação nº 5 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2017) estabelece padrões de potabilidade que visam assegurar a qualidade da água a ser utilizada para o consumo humano. Quanto melhor a qualidade da água do manancial, mais simples e mais barato deve ser o tratamento da água para torná-la potável, por outro lado quanto mais degradada a qualidade da água a ser tratada, mais complexo e oneroso se torna o tratamento.

O tratamento convencional de água para consumo, muito utilizado no Brasil, consiste em uma sequência de etapas (coagulação, floculação, sedimentação, filtração e cloração) para tornar a água potável. Quando operado corretamente, geralmente apresenta eficiência satisfatória, porém apresenta

elevado custo de implantação e operação, pois demanda grandes áreas para construção, elevado consumo energético e de produtos químicos. Logo, a implantação de estações de tratamento de água (ETA) é mais indicada para o meio urbano, onde existe adensamento populacional, elevada demanda por água e a população arca com os custos de operação, viabilizando o tratamento.

O índice de cobertura dos serviços de abastecimento de água no Brasil é da ordem de 93% nos centros urbanos (SNIS, 2015), contudo nas áreas rurais, a proporção de domicílios ligados às redes de abastecimento é da ordem de 33,2% (BRASIL, 2014). Assim como populações rurais, pequenas comunidades ribeirinhas e outros núcleos de populações isoladas, enfrentam em certas regiões do Brasil a dura realidade da falta de um sistema adequado de suprimento de água para suas necessidades básicas de higiene e alimentação (FEDRIZZI, 2003). As populações que vivem em locais isolados, geralmente são carentes de serviços de saneamento básico, como abastecimento de água, pelo fato de estarem distantes da zona urbana e por apresentarem dispersão populacional. Para as operadoras de saneamento torna-se inviável abranger estes locais com seus serviços, visto que a baixa demanda tende a não suprir os custos envolvidos. Dessa forma, tais populações buscam meios próprios de garantir o acesso à água, geralmente coletando água diretamente no rio. Levantamentos de campo realizados em 2006 junto a diversas comunidades pequenas às margens do rio Solimões, revelaram que de 70 a 100% dos domicílios usam basicamente água dos rios e igarapés, sem nenhum tratamento, para suprir suas necessidades (OLIVEIRA, 2008).

Em 2007 foi promulgada a lei 11.445 que estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico, tendo como um de seus princípios fundamentais a universalização desses serviços, incluindo evidentemente, o abastecimento de água.

Nesse sentido a filtração em margem (FM) surge como uma alternativa promissora de captação e tratamento de água para mananciais, com o propósito de prover água de qualidade de forma simplificada (JHA e DALAI, 2014). A FM é uma técnica de tratamento de água utilizada em muitos países, que consiste na perfuração de poços próximos às margens de mananciais, localizados em aquíferos aluvionais ou formações geológicas não

consolidadas, e no bombeamento dos mesmos. Ao realizar o bombeamento da água dos poços, o rebaixamento no nível freático é induzido, fazendo com que a água do manancial migre até o poço, sofrendo um processo de filtração pelo solo durante o percurso (GRISCHEK e RAY, 2009).

A FM tem se mostrado capaz de remover e reduzir significativamente partículas causadoras de turbidez, bactérias, matéria orgânica natural e micropoluentes (SCHUBERT, 2002). Durante o percurso da água pelo solo, além da filtração física, ocorrem outros processos como sorção, troca iônica e degradação microbiana (RAY et. al, 2003). A eficiência do tratamento depende principalmente da geologia do aquífero, composição do fundo do manancial e tempo de percurso até o poço. A operação e manutenção se restringem ao sistema de bombeamento e o consumo energético é menor, quando comparado a outros sistemas de captação com poços, devido à menor profundidade do nível dinâmico.

A FM tem apresentado resultados positivos quanto ao tratamento de água, sendo que em alguns lugares a técnica é utilizada como tratamento preliminar da água de captação e em outros lugares como único tratamento, acrescido apenas de cloração. Porém, a escolha do local para a implantação de um sistema de tratamento por FM deve ser realizada de forma criteriosa para garantir que a água filtrada pelo solo apresente qualidade satisfatória.

Outro serviço que, em muitos casos, não está disponível para populações que vivem em locais isolados é a distribuição de energia elétrica, o qual é deficitário pelos mesmos motivos supracitados do saneamento básico.

Visando avaliar a aplicabilidade da FM como técnica de tratamento de água para o abastecimento em locais desprovidos de serviços de saneamento e energia elétrica, foi considerada como fonte energética para alimentação do sistema de bombeamento a energia solar fotovoltaica.

Nos últimos anos, a utilização da energia solar vem crescendo no Brasil, especialmente o sistema de micro geração distribuída para usos residencial e comercial. Tal cenário tem atraído os interesses de diversas empresas multinacionais, influenciados pelo grande potencial de insolação e a regulamentação do setor (CEPEL, 2014).

A FM, em termos de pesquisa, no Brasil vem sendo estudada pioneiramente pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), com projetos sob a orientação do Professor Dr. Maurício Luiz Sens. De 2006 A 2012 foram realizadas diversas pesquisas com FM aplicada à lagos e rios (RABELO, 2006; SOARES, 2009; MONDARDO, 2009; MICHELAN, 2009; ESQUIVEL, 2012).

Dessa forma, a presente pesquisa propôs desenvolver, avaliar e monitorar um sistema de FM, alimentado por energia solar fotovoltaica, em escala real, para o abastecimento de água de comunidades isoladas. Esta pesquisa é integrante de um projeto de pesquisa mais amplo intitulado “Tratamento de água por filtração em margem para o abastecimento de populações dispersas e pequenas comunidades”, financiado pela Fundação Nacional de Saúde, através do convênio nº 349/2011, no âmbito do edital de convocação nº 01/2011 do Programa de Pesquisa em Saúde e Saneamento.

2 HIPÓTESES

- A filtração em margem de rio representa uma técnica alternativa de tratamento de água que pode ser utilizada para prover água de qualidade para pequenas comunidades e populações isoladas.
- O bombeamento solar intermitente pode apresentar um desempenho satisfatório no processo de filtração em margem, sendo que a utilização da energia fotovoltaica pode ser considerada uma solução para a aplicação desta técnica em locais isolados e/ou não providos de energia elétrica.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

Avaliar, em escala real, a aplicação da técnica de filtração em margem, com bombeamento fotovoltaico, como tratamento simplificado de águas, visando o abastecimento de comunidades isoladas e contribuindo com a universalização do abastecimento de água.

3.2 Objetivos Específicos

- Avaliar as características do solo, da água e topográficas do entorno do manancial (rio);
- Propor diretrizes para subsidiar a escolha de locais indicados à implantação de poços destinados à filtração em margem;
- Avaliar o funcionamento do bombeamento fotovoltaico aplicado à filtração em margem de rio na região de Orleans (SC);
- Avaliar o desempenho da filtração em margem de rio como tecnologia de tratamento de água, quanto à remoção dos parâmetros de interesse.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Histórico da filtração em margem

A filtração em margem (FM) tem sido usada durante muitas décadas em várias partes do mundo, principalmente na Europa para prover água para comunidades localizadas próximas a estes recursos hídricos, sendo reconhecida como um processo natural e eficiente na atenuação da poluição. Esta técnica vem sendo aplicada há mais de 100 anos, mais notavelmente nos rios Reno, Elba e Danúbio (KIM et al., 2003; SANDHU et al., 2011).

A primeira utilização da FM para água de abastecimento foi pela Companhia de Água do Reino Unido (Glasgow Waterworks) em 1810, que fez extração de água filtrada, através da construção de uma tubulação drenante paralela à margem do rio Clyde. Após essa iniciativa outros sistemas foram implantados e em meados do século XIX a FM foi adotada oficialmente na Europa para produção de água para abastecimento (RAY et al., 2002).

Na Europa Ocidental, a primeira Estação de Tratamento de Água (ETA) com o uso da FM foi no vale do Rio Reno, na região de Düsseldorf (Alemanha) para abastecer uma população de cerca de 600.000 habitantes. Esta ETA operou entre 1870 e 1950, produzindo água potável sem necessidade de tratamento adicional, somente FM e desinfecção. Porém a partir de 1950, após 80 anos a ETA incluiu outro tratamento à água bruta além da FM, devido à deterioração crescente da qualidade da água do rio Reno. Contudo em outros lugares do mundo, onde os rios estão menos poluídos, a FM continuou a ser utilizada como único tratamento (RAY et al., 2003; SCHUBERT, 2002).

Na Alemanha existem outras instalações de grande porte de FM situadas ao longo do Rio Elba próximas às cidades de Dresden, Meissen e Torgau. Outros projetos importantes de FM são operados às margens do Rio Danúbio, com instalações em Viena (Áustria), Bratislava (Eslováquia), Budapeste (Hungria) e Belgrado (Iugoslávia) (RAY et al., 2002).

Tradicionalmente a FM é aplicada nas margens de rios, porém em regiões de planície vem sendo aplicada também nas margens de lagos. Como exemplos têm os lagos Müggelsee, Tegel e Wannsee, em Berlim e o reservatório Radeburg, em Dresden, na Alemanha, onde foram implantadas grandes

instalações de FM. Na Finlândia, a técnica de FM foi utilizada no lago Kallavesi através de cinco poços de produção e a água produzida é fornecida para a cidade de Kuopio (DASH et al., 2008).

A FM era responsável pela produção de 16% da água de abastecimento da Alemanha na década de 1990. Em Berlim, devido à degradação dos mananciais ao longo dos anos a FM passou a fornecer aproximadamente 75% da água para abastecimento público (SCHMIDT et al., 2003; DASH et al., 2008).

Na Holanda, a filtração em margem, era responsável pelo fornecimento de 7% da água de abastecimento no país, o que corresponde a 80 milhões de m³/ano, provenientes de 26 poços de produção (STUYFZAND et al., 2004). No lago profundo de Lange Vlieter, foram instalados sistemas de FM com o intuito de remover microrganismos patogênicos (JUHASZ-HOLTERMAN et al., 1998 apud DASH et al., 2008).

Nos Estados Unidos, apesar da técnica de FM não ser comumente utilizada, o interesse por estes sistemas de tratamento natural da água tem aumentado, em virtude de seu baixo custo e por sua eficiência no processo de atenuação da poluição e remoção de patógenos. Poços com coletores horizontais foram utilizados nos sistemas de FM com a finalidade de captar grandes quantidades de água de uma área geográfica relativamente pequena nas regiões de Nebraska, Kentucky e Kansas (RAY et al., 2002). Em Ohio, a técnica de FM foi utilizada no rio Miami, através de 10 poços de produção com o intuito de fornecer água para a cidade de Cincinnati (SHEETS et al., 2002).

A Índia, um dos países mais densamente povoados do mundo, possui como fonte de abastecimento de água os mananciais superficiais, os quais se encontram cada vez mais comprometidos em termos de qualidade de água. Assim, algumas cidades da Índia começaram a utilizar a técnica de FM para tratamento da água de abastecimento. Como exemplo, as cidades de Hardwar, no estado de Uttaranchal, e Gurgaon, no estado de Haryana, utilizam poços para extrair água para abastecimento (RAY, 2008).

Na República da Coreia os rios não apresentam condições ideais para a implantação de sistemas de filtração em margem, pois são curtos, possuem declives acentuados e muitas

vezes as camadas dos aquíferos aluviais são finas. Contudo, esforços têm sido feitos para utilizar a FM para tratamento de água para abastecimento público. Na década de 1990, o governo da Coréia do Sul realizou um levantamento de locais com viabilidade para a implantação de sistemas de FM. No início do ano 2000 foi construído o primeiro sistema de FM do país na cidade de Changwon. A utilização da FM surgiu como um sistema complementar de fornecimento de água, pois a qualidade da água superficial, principal fonte de abastecimento, estava diminuindo gradativamente (RAY, 2008; LEE et al., 2009).

No Egito, a FM tem sido usada como tratamento da água para abastecimento da cidade de Sidfa, que possui aproximadamente 30.000 habitantes, através de 6 poços verticais de 60 m de profundidade cada. A água proveniente dos poços é distribuída para a população sem desinfecção ou qualquer tratamento adicional (SHAMRUKH e ABDEL-WAHAB, 2008).

O crescente interesse por sistemas de FM se dá particularmente por três razões. Primeiramente pelo fato do abastecimento de águas subterrâneas apresenta limitações em muitas regiões; a relação custo-eficiência dos processos de atenuação natural está cada vez mais reconhecida; e também pelo fato da FM poder fornecer solução para alguns problemas de qualidade da água, como a remoção de organismos patogênicos, como *Cryptosporidium*. Devido a estas razões, a FM pode resolver problemas comuns tanto a países desenvolvidos como a países em desenvolvimento (FREITAS, 2010).

No Brasil a tecnologia da FM foi aplicada por algum tempo de forma intuitiva, ou seja, sem se basear em um estudo teórico da técnica. No Nordeste Brasileiro é comum a existência de poços tubulares, provenientes de ações governamentais para o fornecimento de água para a população rural, próximos de rios ou córregos. Esta região brasileira possui características peculiares que dificulta o acesso à água como baixa pluviosidade, irregularidade de chuvas e a formação geológica cristalina. Esse conjunto de fatores resulta em um baixo acúmulo de água no subsolo, necessitando de artifícios para obtenção de água. Outro exemplo ocorre no Alto Vale do Itajaí, na região sul do Brasil, onde a população costuma captar água de melhor qualidade que o manancial através de poços instalados ao longo

dos afluentes do rio Itajaí. Os poços normalmente possuem de 1,0 a 1,5 m de diâmetro e distam de 15 a 50 m das margens do rio (SENS et al., 2006).

Como citado anteriormente, em termos de pesquisa no Brasil, a FM vem sendo estudada pioneiramente pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), por meio de projetos sob a orientação do Professor Dr. Maurício Luiz Sens. Rabelo (2006) realizou estudos preliminares, em colunas com sedimentos, para implantação da FM na Lagoa do Peri (Florianópolis) como pré-tratamento de água para remoção de fitoplânctons. Soares (2009) estudou a FM em lagos de piscicultura extensiva para atender a dessedentação de animais no período de estiagem do oeste catarinense. Mondardo (2009) realizou experimentos utilizando a FM como pré-tratamento à filtração direta descendente para remoção de cianobactérias e saxitoxinas na Lagoa do Peri. Michelin (2010) realizou experimentos com FM de rio, precedendo a filtração lenta, para a remoção de carbofurano da água de abastecimento no rio Itajaí do Sul (Ituporanga). Esquivel (2012) estudou a remoção de matéria orgânica natural e precursores de trihalometanos por filtração em margem na Lagoa do Peri.

A Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) também realizou nos últimos anos pesquisas sobre a FM, nas margens do rio Beberibe, na divisa entre as cidades de Olinda e Recife. Paiva (2009) buscou em sua pesquisa uma forma de avaliar a adequação da técnica às condições locais, e também avaliar a qualidade da água advinda do poço de produção submetido a FM com fins de produção de água potável. Freitas (2010) avaliou a eficiência da FM como sistema de tratamento de água no rio Beberibe, em termos de remoção de poluentes e produção de água dentro dos padrões de potabilidade. Santos (2012) avaliou a remoção de contaminantes por meio da FM aplicada à jusante de uma barragem de terra no semiárido Pernambucano. E mais recentemente, Albuquerque (2015) realizou a caracterização da zona hiporréica no Rio Beberibe.

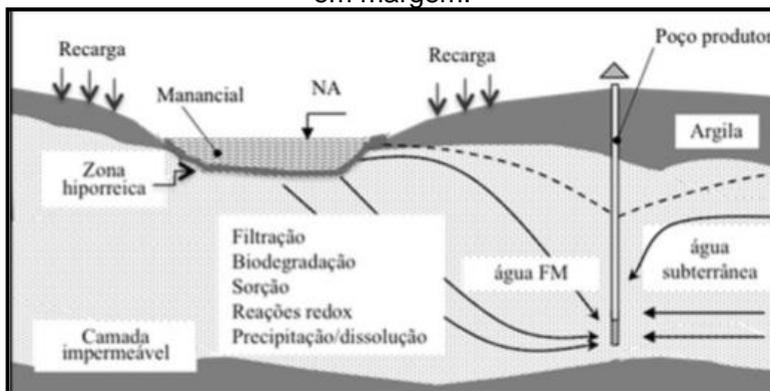
A FM surge como uma opção tecnológica de tratamento de água, baseado em processos naturais de atenuação da poluição, para locais com qualidade da água degradada ou com floração de algas. Percebe-se através do histórico, o grande potencial da técnica que há muito tempo é utilizada em escala real em outros países. No Brasil, as pesquisas vêm sendo desenvolvidas no

intuito de aprimorar a técnica, buscando avaliar sua aplicabilidade em diferentes contextos.

4.2 Caracterização da Filtração em Margem

A filtração em margem (FM), em inglês *bank filtration* (BF), consiste na retirada de água subterrânea em um local próximo às margens de um corpo de água (rio ou lago), de modo que o rebaixamento do nível da água subterrânea induza a água da fonte superficial a escoar pelo solo. Para realizar tal rebaixamento constroem-se poços de captação nas margens do manancial e através do bombeamento destes poços é criada artificialmente uma diferença de nível entre o manancial e o lençol freático, favorecendo o sentido do escoamento em direção ao poço (Figura 1). Os possíveis contaminantes presentes na água superficial serão removidos no percurso entre o manancial e o poço, e ficarão retidos nos sedimentos do solo (SENS et al., 2006).

Figura 1: Ilustração esquemática do funcionamento da filtração em margem.



Fonte: Esquivel (2012).

A FM, geralmente é induzida pelo bombeamento de água através de poços alocados às margens do manancial, criando uma diferença de carga hidráulica que faz com que a água do manancial se direcione aos poços ou também pode ocorrer

naturalmente quando o nível do lençol freático for inferior ao nível de água do manancial (TUFENKJI et al., 2002).

A FM pode ser aplicada tanto em rio, denominada assim filtração em margem de rio (FMR), em inglês *river bank filtration* (RBF), como em lagos e reservatórios, denominada filtração em margem de lago (FML), em inglês *lake bank filtration* (LBF). Em ambas as situações o propósito é captar água através de poços de produção, com a qualidade melhor que do manancial, para abastecimento público.

No processo de FM, o meio filtrante é o próprio material sedimentar das margens do manancial superficial e do aquífero. Ambos os materiais devem ser formados por aluviões, ou por outra formação geológica não consolidada que permita a conexão hidráulica entre a água superficial e a água subterrânea local. A água que chega ao poço, geralmente é uma mistura da água subterrânea originalmente presente no aquífero e da água superficial infiltrada. A proporção de tal mistura depende principalmente das condições hidrogeológicas locais, da distância entre o poço e a margem do rio e da vazão bombeada. Dependendo do uso previsto, do grau de filtração e da atenuação do contaminante, a FM pode representar o tratamento principal e a água bombeada pode ser diretamente distribuída, necessitando apenas de desinfecção, ou no mínimo atua como um pré-tratamento na produção de água potável (RAY et al., 2002; HISCOCK e GRISCHEK, 2002; MONDARDO, 2009).

A qualidade da água proveniente dos poços de FM depende do nível de poluição em que se encontra o manancial superficial e o aquífero de água subterrânea (KIM et al., 2003). É importante ressaltar ainda que os aquíferos são menos vulneráveis à poluição/contaminação do que os corpos d'água superficiais, porém a recuperação de um aquífero contaminado é mais complicada e pode levar muito tempo.

Os poços de produção da FM geralmente são construídos a uma distância de 15 a 50 m da margem do corpo d'água, mas podem-se encontrar poços localizados a mais de 100 m da margem do rio e a profundidade dos poços varia de acordo com as características hidrogeológicas do aquífero e morfológicas do manancial (HUNT et al., 2003; SENS et al., 2006).

Na FM a água é filtrada através dos sedimentos e depende de ações de purificação natural. A intensidade do processo de purificação da água depende das características do

material granular que compõe o aquífero arenoso e das interações biogeoquímicas e físico-químicas que ocorrem no meio filtrante. Logo, o estudo da percolação da água pelo meio poroso é fundamental para a compreensão do processo de purificação natural (KÜEHN e MÜELLER, 2000; HISCOCK e GRISCHEK, 2002).

Segundo Sens et al. (2006), o movimento que a água realiza através do solo depende de três forças que agem sobre a água:

- Adsorção – por atração molecular, que retém uma fina película de água em volta das partículas do solo;
- Capilaridade – como resultado da tensão superficial, que retém ou move a água em pequenas aberturas;
- Força de pressão – que move a água através dos poros maiores, por diferença de carga ou quando existe gradiente hidráulico. A resultante dessas forças depende, em parte, da quantidade de umidade presente em relação ao espaço livre do material poroso.

Sabe-se que o processo de percolação da água pelo solo remove muitos contaminantes e/ou poluentes e evita que os mesmos alcancem o poço de filtração em margem ou reservatório de água subterrânea. Não são conhecidos completamente todos os processos e fenômenos envolvidos na filtração da água pelo solo durante seu movimento de percolação. Os principais processos podem ser subdivididos em algumas categorias (DONALD e GRYGASKI, 2002; SENS et al., 2006):

- hidrodinâmicos: advecção, dispersão, diluição e difusão;
- mecânicos: filtração e arraste de partículas nos espaços porosos;
- biológicos: degradação da matéria orgânica pelos microrganismos e mineralização de substâncias secundárias;
- físico-químicos: adsorção, absorção, precipitação, complexação, oxirredução e troca iônica.

Os processos de biodegradação e sorção (absorção e adsorção concomitantemente) foram identificados como os principais responsáveis pela mudança das características da água filtrada em margem. Outros processos também importantes são a dispersão e diluição (mistura com água subterrânea local), que diminuem e equilibram as concentrações dos constituintes da água do manancial. Esses processos acontecem em duas zonas principais: uma biologicamente ativa, nos primeiros centímetros de infiltração, no fundo e margens do manancial de água (zona hiporréica) onde os processos de degradação intensiva e adsorção ocorrem em curto período de tempo, e a outra que abrange a passagem no aquífero até o poço de produção, onde as taxas de degradação e sorção são menores e o processo de mistura são maiores. (HISCOCK e GRISCHEK, 2002; KUEHN e MUELLER, 2000).

Com o passar do tempo, as margens e a base dos mananciais tendem a ficar obstruídas, pois os vazios do solo por onde a água percola ficam acumulados com impurezas, que podem ser provenientes dos processos físicos, microbianos ou químicos (KUEHN e MUELLER, 2000). Gunkel e Hoffman (2009) relatam que o processo de colmatação pode ser devido à deposição de materiais finos, como argila, silte e material orgânico particulado (processo físico), desenvolvimento de biomassa, como algas, bactérias e substâncias poliméricas extracelulares (processo biológico) e devido à precipitação de carbonatos de cálcio ou fosfatos (processo químico). Geralmente, a colmatação ocorre como combinação destes processos e quanto maior for a concentração de sólidos suspensos, sais solúveis ou microrganismos na água bruta mais acelerado poderá ser o processo de colmatação do meio filtrante.

O processo de colmatação nos mananciais pode ser atenuado de forma natural através da regeneração da área de infiltração. Nos rios, o próprio fluxo da água no leito e o aumento da vazão durante épocas de cheia ajudam a diminuir a colmatação, devido à força de arraste. Em lagos ou lagoas, as ondas e o movimento gerado pelo vento auxiliam na ressuspensão de materiais finos depositados no fundo. Além disso, a presença de organismos bentônicos que habitam os sedimentos revolvem as margens e o fundo auxiliando na desobstrução e na recuperação da capacidade hidráulica do sistema (DASH et al., 2008).

4.3 Fatores determinantes para aplicação da filtração em margem

Os fatores que influenciam os processos na filtração em margem, dependem e variam com as condições específicas locais. As propriedades dos sedimentos tais como distribuição no tamanho dos grãos, permeabilidade e porosidade, assim como o regime de bombeamento, influenciam a velocidade de infiltração, a qualidade e volume de água produzido.

Para a operação de um sistema de FM deve-se considerar a hidrogeologia do aquífero, hidrologia do corpo de água, morfologia do rio, composição do fundo do rio e a qualidade da água superficial (GRISCHEK et al., 2007; HULSHOFF et al., 2009).

4.3.1 Hidrogeologia

As águas superficiais e subterrâneas, normalmente são estudadas separadamente na maior parte das pesquisas científicas. Fato que se deve à diferença de acessibilidade e natureza dos corpos d'água. Os rios possuem suas características peculiares como fluxos turbulentos, transporte unidirecional de material, transporte de fundo e dinâmica morfológica de canal. Por outro lado, o ecossistema subterrâneo apresenta condições mais estáveis, fluxo laminar longo, estrutura sedimentar mais constante e escuridão permanente (BRUNKE e GONSER, 1997).

O fluxo da água subterrânea depende da topografia do terreno, da geologia e do clima, ou seja, está estritamente ligado à hidrogeologia (SOPHOCLEOUS, 2002). A interação entre a água superficial e subterrânea é governada pela posição da água superficial em relação ao fluxo da água subterrânea, pelas características geológicas das margens e pelo clima regional. Essa interação também é influenciada pela geomorfologia, através da declividade da margem, sinuosidade, largura e profundidade do rio. A interação das águas subterrâneas e superficiais pode ocorrer de duas formas: quando há conexão direta entre os meios, ou seja, quando estão conectados hidráulicamente, podendo o fluxo ser do manancial superficial para o aquífero ou do aquífero para o manancial; e quando não

há conexão direta entre os meios (SOPHOCLEUS, 2002; BOUWER, 2002; USGS, 2005).

A FM está associada à interação entre a água do manancial (rio ou lago) e a água subterrânea, assim tanto a qualidade e a produção da água são determinadas pelas dimensões do rio e do aquífero, composição do material do aquífero e características da zona hiporréica.

Normalmente a FM é aplicada em aquíferos de aluviões, formados por areia e cascalho, com espessura superior a 10 m e condutividade hidráulica de 10^{-4} e 10^{-2} cm/s. Contudo em aquíferos com espessura e condutividade hidráulica inferiores também é possível aplicar a FM, nesses casos necessitando uma avaliação de outros parâmetros. (GRISCHEK, et al. 2007).

Quando ocorre a infiltração natural (sem bombeamento) da água superficial ao aquífero, as condições estáveis de qualidade de água e a remoção de compostos orgânicos são alcançadas em menor intervalo de tempo, a partir do início da operação do sistema, devido à presença de microrganismos habituados aos sedimentos do leito do rio que contribuem no tratamento da água infiltrada.

4.3.2 Hidrologia

A dinâmica e o volume de escoamento devem ser considerados ao estudar a morfologia, o canal do rio, o transporte de sólidos e a interação entre o rio e a água subterrânea local. Eventos de cheia, com vazões superiores à média podem trazer benefícios, pois podem promover o arraste dos materiais depositados no fundo do rio que causam a colmatação, permitindo reestabelecer uma nova condição de filtragem. Contrariamente, intervenções antrópicas como a construção de barragens, podem mudar as características dos rios, afetando o transporte e deposição de sólidos, a erosão no leito do rio e, conseqüentemente, as interações com a água subterrânea (GRISCHEK et al. 2007).

4.3.3 Morfologia e composição do leito do manancial

Em termos de locais indicados para implantação de sistemas de FM, os rios devem apresentar margens estáveis e

um leito arenoso. Margens instáveis podem acarretar na migração do canal.

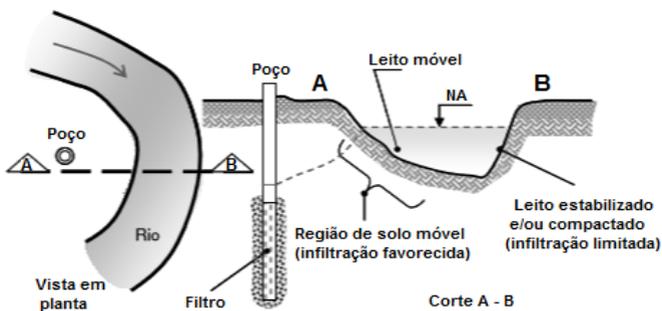
Para minimizar a colmatação da margem do rio alguns fatores devem ser considerados, são eles: declividade do rio, velocidade de fluxo da água e composição do fundo do rio. O perfil do rio é continuamente exposto a processos de fluxo. Em regiões de cabeceira de rios (maior altitude), a erosão predomina como processo de fluxo, onde os sedimentos são transportados rio abaixo e depositados quando a velocidade diminui. Na seção mediana de um rio, os processos de erosão e deposição se alternam de acordo com as dinâmicas de escoamento. E onde o rio se aproxima da foz, a velocidade de fluxo diminui e o processo de deposição de sedimentos prevalece. A declividade local é uma informação importante na seleção de locais para aplicação de FM. A declividade do rio não está relacionada somente com a tensão de cisalhamento e profundidade do rio, mas também com o tamanho médio dos grãos carregados através do leito do rio. Sendo que a granulometria dos grãos carregados pelo rio pode ser considerado como um indicativo do tamanho médio dos grãos do leito do rio, que permitem uma avaliação inicial da condutividade hidráulica entre o aquífero adjacente e o manancial (GRISCHEK et al. 2007).

Caldwell (2006) documentou, em termos de valores, os parâmetros morfológicos determinantes em filtração em margem de diversos locais nos Estados Unidos e Europa. Para declividade foram encontrados, em sua maioria, valores na faixa de 0,2 – 0,8 m/km. Porém, na região do baixo Rio Reno, onde se encontram a maioria dos sistemas de filtração em margem da Alemanha, os valores variaram de 0,17 – 0,23 m/km para o gradiente hidráulico e 8 -13 mm para a granulometria média do material do leito do rio. O autor ressalta que muitos locais com instalações de filtração em margem na Europa apresentam velocidade do rio maior que 1 m/s.

A ocorrência de meandros ou curvas nos rios é um processo natural em regiões planas, devido à baixa velocidade da água. As regiões de curva de rio são locais preferenciais para aplicação da FM, pois nestes locais a infiltração da água é favorecida (Figura 2). Na parte externa da curva do rio a velocidade do fluxo da água é mais alta, favorecendo a erosão. Consequentemente, neste local a profundidade do rio é maior e há deposição de materiais grosseiros, resistentes à erosão, como

seixos e pedras formando um leito eventualmente compactado, pois com o passar do tempo o espaço entre os materiais grosseiros é preenchido com materiais finos, carreados pelo rio, colmatando esta parte da curva. Tais materiais finos não são removidos mesmo durante eventos de cheias, o que torna estes locais não indicados para aplicação da FM. Na parte interna das curvas a velocidade da água é mais baixa, permitindo a formação de um leito móvel, onde ocorrem processos alternados de erosão e deposição, de acordo com o regime de escoamento do rio, favorecendo a infiltração da água (GRISCHEK, et al. 2007).

Figura 2: Ilustração esquemática da localização poço de filtração em margem de rio.



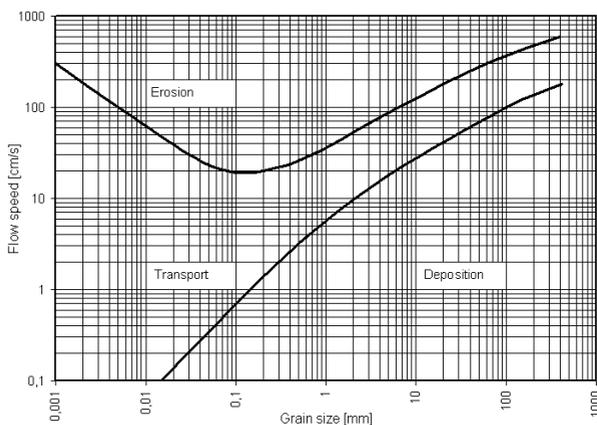
Fonte: Adaptado de Grischek et al. (2007).

A composição do leito do rio é o fator determinante para a permeabilidade, sendo que materiais de granulometria mais grossa favorecem mais a infiltração que materiais finos. Se o leito do rio é formado por um material de granulometria uniforme não é indicado para FM, visto que um leito de rio com uma mistura de materiais com granulometrias diferentes aumenta a mobilidade dos grãos e dessa forma reduz a colmatação. Porém somente a análise granulométrica do material do leito do rio não é suficiente para a escolha de local para a aplicação de FM. A granulometria do material do leito do rio deve ser avaliada em conjunto com outros dados de hidrologia, como a velocidade de fluxo da água do rio (GRISCHEK, et al. 2007). Uma ferramenta utilizada para avaliar as condições de erosão, transporte e deposição que ocorrem em um rio é o diagrama de Hjulstrom, que relaciona a

velocidade de fluxo da água com a granulometria dos sedimentos do leito do rio, apresentado na Figura 3.

Outros fatores importantes devem ser considerados para prevenir a colmatação das margens do rio, como a taxa de infiltração, determinada pela taxa de bombeamento e localização do poço em relação à margem, assim como a turbidez e matéria orgânica particulada da água do rio. Taxas de infiltração menores que $0,2 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$ (GRISCHEK, et al. 2007) tem garantido condições adequadas de funcionamento de sistemas de FM.

Figura 3: Diagrama de Hjulstrom.



Fonte: Adaptado de Hjulstrom (1935) apud Graf (1998).

4.3.4 Qualidade da água do manancial

A qualidade da água do manancial influencia diretamente o processo da FM, tanto quantitativamente quanto qualitativamente.

A temperatura da água do rio influencia as taxas de infiltração, assim como a velocidade do fluxo no aquífero, pois a temperatura determina a viscosidade dos líquidos. Rios que apresentam uma variação sazonal moderada de temperatura são mais indicados para FM do que os rios com uma elevada variação ao longo do ano, pois variações da ordem 20° C podem favorecer efeitos negativos como precipitação de compostos (que

podem ocasionar colmatação do leito do rio) e mudanças nas condições de óxido-redução (GRISCHEK, et al. 2007).

Um dos processos que ocorrem durante o fluxo da água pelas margens do rio é a remoção de compostos orgânicos por adsorção e biodegradação. Para que esses processos sejam efetivos recomenda-se que a água do rio apresente concentrações de carbono orgânico total (COT) e carbono orgânico dissolvido (COD) menores que 8 mg/L e 6 mg/L respectivamente. Se a porção biodegradável do COT é relativamente alta, o processo de biodegradação pode consumir todo o oxigênio disponível tornando o ambiente anóxico. Logo, é necessário que o manancial apresente concentrações de oxigênio dissolvido suficientes para evitar condições anóxicas, pois podem acarretar na dissolução de íons como ferro e manganês e demandar tratamentos adicionais na água (GRISCHEK, et al. 2007).

A matéria orgânica particulada (microalgas, flocos de efluentes domésticos) em altas concentrações pode causar biocolmatação no leito do rio. Rios com estas condições requerem uma elevada velocidade de escoamento para reduzir os efeitos da colmatação (GRISCHEK, et al. 2007).

4.3.5 Composição química do solo

O solo é composto por uma fase sólida (mineral) e uma fase porosa (que pode ser preenchida por ar ou água). A fase sólida é formada por partículas minerais de diferentes granulometrias (areia, silte e argila) e por material orgânico.

A fase mineral do solo é resultado dos processos de alteração física, química e biológica (intemperismo) sofridos pela rocha. A composição mineral e a proporção das partículas minerais no solo dependem do tipo de rocha (material de origem) e do grau de intemperismo (idade) que as partículas foram submetidas. Os minerais presentes no solo que possuem as mesmas características do material de origem, ou seja, que não sofreram alteração estrutural são denominados minerais primários e estão associados às frações de granulometria mais grosseira, acima de 2 mm. Os principais minerais primários encontrados no solo são o quartzo e feldspato. Os minerais secundários são aqueles originados a partir da alteração dos

minerais primários e predominam na fração argila do solo (<0,002 mm). Os principais minerais secundários encontrados no solo são os aluminossilicatos, como a caulinita, vermiculita, óxidos, hidróxidos e oxihidróxidos. Quanto menor a partícula do solo, maior sua área superficial específica (ASE) e consequentemente maior sua reatividade. Dessa forma a fração argila, com as menores partículas do solo, apresentam maior ASE e reatividade que a fração silte e areia do solo (MEURER, 2012).

Em alguns estudos de FM (SOARES, 2009, MICHELAN, 2010; SANTOS, 2012; HENZLER, GRESKOWIAK e MASSMAN, 2014; BARTAK et al., 2015), a concentração de determinados elementos, como ferro e manganês, foi superior na água extraída no poço de produção às concentrações encontradas água bruta. Sugerindo que durante o percurso da água pelo solo (entre o manancial e o poço de produção) estes elementos foram adquiridos, provenientes possivelmente da própria composição mineral do solo, que em determinadas condições foram dissolvidos e liberados para a água.

A composição química das águas subterrâneas é influenciada pela composição da rocha ou substrato que as mesmas atravessam e tendência é que as substâncias químicas dissolvidas aumentem de acordo com o aumento do tempo de percurso. A água filtrada em margem se comporta como água subterrânea, durante seu percurso entre o manancial e o rio, podendo portanto receber contribuição química do subsolo pelo qual percolou.

Michelan (2010) realizou uma pesquisa com FMR, em Ituporanga (SC), rio e as concentrações de ferro total na água filtrada em margem foram superiores às concentrações encontradas na água bruta durante todo o período do estudo. Soares (2009) verificou em sua pesquisa com FML, no mesmo município supracitado, que a água bruta, após ser percolada e extraída no poço de produção apresentou concentrações superiores para os parâmetros de turbidez, cor aparente e verdadeira, nitrito, nitrato e manganês. Santos (2012) utilizou a FM como tratamento de água, em um reservatório no semiárido do Pernambuco, e a água tratada apresentou concentrações de ferro superiores às da água bruta.

Durante a passagem da água do manancial pelo solo, há mudanças nas condições redox no solo. Ambientes com baixas

concentrações de oxigênio dissolvido (ambientes redutores) propiciam reações de redução, onde determinados elementos como o ferro e o manganês se tornam solúveis e são liberados na água e uma vez em contato com o oxigênio os mesmos podem oxidar e precipitar (KUEHN e MUELLER, 2000; HISCOCK e GRISCHEK, 2002; SCHMIDT et al, 2003; IBRAHIM, AZIZ e YUSOFF, 2015).

As reações de oxido-redução podem ser consideradas uma das principais responsáveis pela alteração da qualidade da água ao ser filtrada em margem. Na zona saturada, por onde a água percola, a concentração de oxigênio é baixa, pois os poros do solo estão ocupados por água, se tornando um ambiente redutor. Os microrganismos utilizam o oxigênio para oxidação da matéria orgânica, porém como nestes ambientes a concentração de oxigênio é baixa, os mesmos utilizam os compostos oxidados como receptores de elétrons para realização do processo metabólico. Segundo Meurer (2012), os compostos são reduzidos obedecendo a uma regra de afinidade em receber elétrons, primeiramente são oxidados os nitratos, seguidos dos óxidos de manganês, óxidos de ferro, e por último os sulfatos.

Uma das limitações da FM é o aumento de alguns íons na água filtrada em margem (STUYZAND et al., 2004). Compreender os processos de transferência de elementos químicos do subsolo para água durante a FM auxilia no aprimoramento da técnica, no sentido de evitar perfuração de poços em locais onde a composição do solo pode vir a acarretar problemas na qualidade da água extraída.

4.4 Energia Solar Fotovoltaica

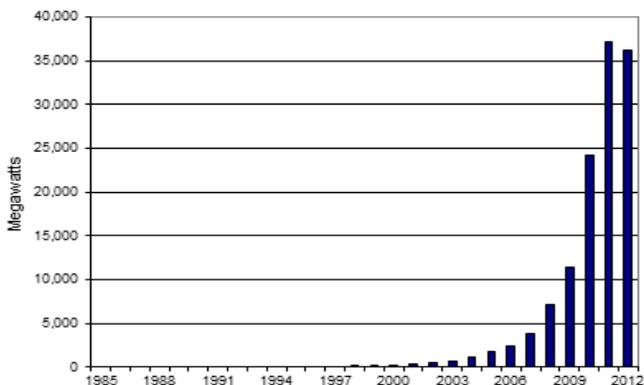
O Sol pode ser considerado uma fonte inesgotável de energia e uma das alternativas energéticas mais promissoras da atualidade. As principais fontes de energia (hidráulica, eólica, combustíveis fósseis e biomassa) são formas indiretas de energia solar. É a partir da energia do sol que acontece a evaporação da água, que possibilita a manutenção do ciclo hidrológico, necessário para geração de energia por hidroelétricas. Os ventos, fonte da energia eólica, se formam por conversão de energia solar em energia cinética, a partir do balanço, nas diferentes latitudes, entre irradiação solar incidente

e irradiação terrestre refletida. O petróleo, carvão e gás natural foram formados a partir de resíduos de plantas e animais, que obtiveram energia para o seu desenvolvimento a partir do Sol. As plantas utilizadas como biomassa também realizaram fotossíntese através da luz solar para obter energia para seu crescimento e desenvolvimento. (ANEEL, 2005; CEPEL, 2014).

O aproveitamento da energia solar é realizado principalmente por duas formas: o aproveitamento térmico e o fotovoltaico. O aproveitamento térmico pode ser utilizado para tanto para aquecimento de ambientes (arquitetura bioclimática) ou de água (coletores solares), como para geração de energia elétrica, por exemplo, nos concentradores solares onde a água é transformada em vapor para acionar turbinas. O aproveitamento fotovoltaico da energia solar se destina somente à geração de energia elétrica (CEPEL, 2014).

Inicialmente a tecnologia de geração de energia através de células fotovoltaicas teve o seu desenvolvimento impulsionado pelo setor de telecomunicações e pela chamada corrida espacial, onde a célula fotovoltaica foi e continua sendo usada para alimentar equipamentos eletrônicos no espaço. Com a crise do Petróleo em 1973 o interesse na geração de eletricidade a partir do sol foi ampliado, no entanto o custo ainda inviabilizava a produção em larga escala. Com o passar do tempo alguns países passaram a investir na tecnologia fotovoltaica, com destaque para os Estados Unidos que durante a década de 1990 foram líderes na produção de módulos fotovoltaicos e para a Alemanha e Japão que no final dessa década investiram no desenvolvimento deste mercado. Em 2003 a Ásia não tinha representantes entre os dez maiores fabricantes do mundo, no entanto em 2008, três dos dez maiores fabricantes eram da China e um de Taiwan e em 2009 a China assumiu a liderança na fabricação de módulos fotovoltaicos. A China foi responsável pelo grande salto na produção de células e módulos fotovoltaicos, sendo que em 2012 o país asiático foi responsável por 64% da produção mundial de células e módulos fotovoltaicos. O crescimento da produção mundial anual de células fotovoltaicas nos últimos anos foi de 54,2%, conforme pode ser observado na Figura 4 (CEPEL, 2014).

Figura 4: Produção mundial de células fotovoltaicas de 1985 a 2012.



Fonte: Roney (2013).

Em termos de produção de energia solar fotovoltaica, a Europa tem sido a maior produtora da atualidade, onde se encontram instalados 74% da produção de energia solar mundial, com destaque para a Alemanha e Itália. Depois da Europa os maiores mercados para sistemas fotovoltaicos estão no Japão e Estados Unidos. Até 2012 a potência instalada acumulada global superou 100 GWp, sendo 32,3 GWp produzidos na Alemanha e 16 GWp na Itália (CEPEL, 2014).

O Brasil pode ser considerado um país privilegiado em relação à irradiação solar que incide sobre o mesmo, quando comparado com os países europeus em que a tecnologia fotovoltaica está consolidada para a produção de energia elétrica. Segundo o Atlas de Irradiação Solar no Brasil, o lugar mais ensolarado da Alemanha recebe 40% menos irradiação solar que o lugar menos ensolarado do Brasil, demonstrando o enorme potencial do país na produção de energia elétrica através da tecnologia fotovoltaica (CEPEL, 2014; TIBA, 2000).

4.4.1 Princípio de funcionamento

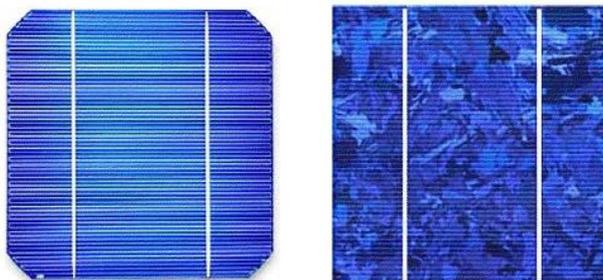
A geração de energia elétrica em painéis fotovoltaicos ocorre pelo efeito fotovoltaico, que é a conversão da luz solar em eletricidade. A conversão de radiação solar em energia elétrica é consequência da excitação dos elétrons de determinados

materiais, denominados semicondutores, devido à incidência dos raios solares sobre os mesmos. O efeito fotovoltaico, descoberto em 1839 por Edmond Becquerel, é definido como o aparecimento de uma diferença de potencial nos terminais de uma célula eletroquímica em consequência da absorção de luz (CEPEL, 2014, ANEEL, 2005).

Os principais materiais e tecnologias utilizadas na produção de células e módulos fotovoltaicos são divididos em três gerações. A primeira geração representada pelo silício monocristalino (m-Si) e silício policristalino (p-Si), corresponde a mais de 85% do mercado, pois é considerada uma tecnologia consolidada e apresenta a melhor eficiência entre as tecnologias disponíveis comercialmente. A segunda geração, denominada de tecnologia de filmes finos, tem como representantes o silício amorfo (m-Si), disseleneto de cobre e índio (CIS) e telureto de cádmio (CdTe). Apresentam uma modesta participação no mercado, porém apresentam uma menor eficiência que a tecnologia do silício e dificuldades quanto à disponibilidade de materiais e vida útil. A terceira geração encontra-se em fase de pesquisa e desenvolvimento, e tem como representantes as tecnologias de células de multijunção, células sensibilizadas por corante e células orgânicas ou poliméricas (CEPEL, 2014, EPE, 2012).

O silício é historicamente utilizado na fabricação de células e módulos fotovoltaicos e se consolidou como matéria prima neste segmento de mercado. As principais tecnologias de células fotovoltaicas de silício se dividem em monocristalinos e policristalinos (Figura 5). As células de silício monocristalino, possuem uma estrutura homogênea, por isso recebem esse nome. A obtenção desse tipo de silício é mais caro que a do policristalino, pois é necessário um elevado grau de pureza do silício (da ordem de 99,99999%), no entanto possui maior eficiência na conversão de irradiação solar em energia elétrica. As células de silício policristalino são semelhantes às de silício monocristalino, em termos de fabricação, sendo que é requerido um menor gasto energético e rigor no processo de fabricação (EPE, 2012).

Figura 5: Principais tecnologias de células fotovoltaicas: (a) silício monocristalino (m-Si); (b) silício policristalino (p-Si).



Fonte: sunflower-solar.com.

A eficiência de conversão de células ou módulos fotovoltaicos refere-se à proporção de irradiação solar incidente sobre os mesmos que é convertida em energia elétrica. A eficiência da célula é definida em condições padrões de referência (“*Standard Test Conditions – STC*”), e é dada pela relação entre a potência de saída da célula pela área da mesma, sob condição padrão de 1000 W/m^2 de irradiação solar e temperatura da célula de 25°C . Atualmente as células, disponíveis comercialmente, que apresentam as melhores eficiências (de 15 a 25%) são as de silício monocristalino (CEPEL, 2014; EPE, 2012, ANEEL, 2005).

O módulo fotovoltaico é um painel onde as células ficam encapsuladas, pois as mesmas são frágeis, o que confere proteção mecânica e contra intempéries. No módulo fotovoltaico as células fotovoltaicas são conectadas em arranjos para produzirem níveis de tensão e corrente suficientes para utilização da energia gerada. O módulo é um dos componentes do gerador fotovoltaico, e de acordo com os arranjos e características das células pode apresentar valores de tensão e correntes nominais diferentes.

Geralmente o módulo é identificado por sua potência de pico (Wp) e tensão nominal (V), ambas definidas em condições padrão de ensaio (STC). Quando se deseja elevar a potência total do sistema, diferentes arranjos com os módulos fotovoltaicos (em série ou paralelo) são possíveis de serem realizados dependendo da tensão e corrente requeridas. Em módulos conectados em série as tensões são somadas e as

correntes permanecem inalteradas, e em módulos conectados em paralelo as tensões se mantêm e as correntes são somadas (CEPEL, 2014).

4.4.2 Aplicação de sistemas fotovoltaicos

Os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados em três categorias: isolados, híbridos ou conectados à rede elétrica (Figura 6). A escolha do tipo de sistema depende da aplicação e disponibilidade de recursos energéticos, sendo que cada opção apresenta sua complexidade e restrições específicas. Independentemente do tipo do sistema, os módulos fotovoltaicos geram energia em corrente contínua (c.c.), dessa forma podem alimentar diretamente alguns equipamentos que funcionam com tal corrente, porém para alimentar equipamentos que funcionam com corrente alternada (c.a.) é necessário realizar a conversão da corrente através dos chamados inversores de frequência (CEPEL, 2014; EPE, 2012).

Figura 6: Categorias de sistemas fotovoltaicos.



Fonte: Modificado de Urbanetz (2010)

Os sistemas fotovoltaicos isolados (SFI), indicados para locais onde não há distribuição de energia elétrica ou para moradias itinerantes, como trailers e barcos, tem o gerador solar como única e exclusiva fonte energética, e em geral necessitam de algum tipo de armazenamento de energia. O armazenamento pode ser através de banco de baterias, para alimentar aparelhos elétricos nos períodos em que não há irradiação solar, ou pode

ser através de água em forma de energia potencial em sistemas de bombeamento de água. Quando o armazenamento é realizado por baterias é necessária a utilização de um controlador de carga, instrumento responsável pelo controle do condicionamento da carga nas baterias. E ainda quando o sistema alimentar equipamentos que funcionam com corrente alternada, além das baterias, torna-se necessária a utilização de um inversor de frequência (CEPEL, 2014; EPE, 2012).

Os sistemas híbridos são aqueles, que quando desconectados da rede elétrica, faz uso de mais de uma forma de geração de energia, como energia eólica, diesel e energia fotovoltaica. Tais características levam CEPEL (2014) a apontar que esses sistemas são mais complexos e necessitam de algum tipo de controle capaz de integrar os vários geradores, de forma a otimizar a operação para o usuário.

Os sistemas fotovoltaicos conectados (SFCR) à rede são indicados para locais onde há rede de distribuição de energia elétrica. Esse tipo de sistema não necessita de acumuladores (baterias), onde a energia produzida é utilizada imediatamente no ponto gerador e o excedente é disponibilizado na rede elétrica, no entanto exige um inversor que garanta o funcionamento adequado do sistema. Os SFCR foram regulamentados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), através da Resolução 482 de Abril de 2012, que estabeleceu condições gerais para o acesso à micro e minigeração distribuída aos sistemas de energia elétrica (CEPEL, 2014; EPE, 2012).

4.4.3 Irradiação Solar

O índice de irradiação solar, ou a energia total incidente sobre a superfície terrestre, depende além das condições atmosféricas locais (nebulosidade, umidade relativa do ar, etc.), da latitude local e localização temporal (hora do dia e dia do ano). Isso se deve ao fato da Terra realizar diariamente o giro em torno do próprio eixo imaginário inclinado (rotação) e anualmente o a trajetória elíptica em torno do Sol (translação), gerando dessa forma o dia e a noite e as estações do ano. Dessa forma, a posição do módulo solar deve ser ajustada de modo a maximizar o aproveitamento da irradiação solar sobre o mesmo. No

hemisfério Sul o módulo deve ser orientado para o Norte e com um ângulo de inclinação igual ao da latitude local (ANEEL, 2005).

O termo radiação solar é usado de forma genérica e pode ser referenciado em termos de fluxo de potência, em termos de energia por unidade de área é especificamente denominado de irradiação solar. A irradiação solar que atinge a atmosfera da Terra pode ser dividida em diferentes frações: Irradiação Global Horizontal (IGH), Irradiação Difusa Horizontal (IDH) e Irradiação Direta Normal (IDN). A IGH é a de maior interesse para o aproveitamento fotovoltaico, corresponde à irradiação recebida por uma superfície plana horizontal e é composta pela IDH e IDN. A IDH é a parcela dispersa e atenuada por reflexões em nuvens, vapor d'água, poeira e outros elementos em dispersão na atmosfera. Já a IDN é a parcela que atinge a superfície da terra diretamente, sem reflexões. Em dias ensolarados prevalece a IDN e em dias nublados a principal parcela de irradiação é a IDH (EPE, 2012).

A medição da irradiação solar é de grande importância para o desenvolvimento de projetos de aproveitamento da energia solar, assim como para avaliar a influência das condições climáticas e atmosféricas sobre os níveis de irradiação. Através de uma série histórica de dados de irradiação é possível que se tenha uma noção real do comportamento da irradiação solar em determinado local, permitindo que se otimize o aproveitamento do recurso solar ao longo do ano frente às variações sazonais. Comumente são utilizados dois tipos de instrumentos para medição da irradiação solar: o piranômetro, que mede irradiação global (difusa + direta) e o pireliômetro, que mede irradiação direta (CEPEL, 2014).

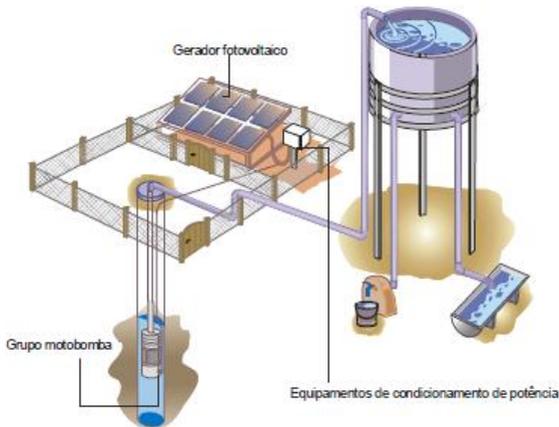
4.5 Bombeamento solar fotovoltaico

Esta seção foi escrita com referência em uma publicação da CEPEL (2014): Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos.

O sistema fotovoltaico de bombeamento de água geralmente é constituído pelo gerador fotovoltaico e conjunto motobomba. Em algumas situações se utilizam também um dispositivo de armazenamento de energia, inversor e/ou controlador da bomba (Figura 7).

Quando se necessita de um bombeamento contínuo, inclusive no período da noite onde não há insolação, utiliza-se um banco de baterias para suprir esta demanda. Em caso contrário, geralmente armazena-se energia em forma de água (energia potencial), ou seja, bombeia-se o máximo de água para um reservatório superior durante o dia e a água fica armazenada para uso nos períodos em que não há geração de energia para acionamento da bomba. O reservatório é dimensionado em termos de dias de autonomia, de forma similar a um banco de baterias.

Figura 7: Representação de um sistema de bombeamento fotovoltaico.



Fonte: Fedrizzi, Ribeiro e Zilles (2009)

Existem atualmente no mercado, principalmente dois tipos de bombas que podem ser utilizadas em sistemas de bombeamento com energia fotovoltaica: bombas de deslocamento positivo e centrífugas. Ambas podem ser acionadas por motores c.c. ou c.a.

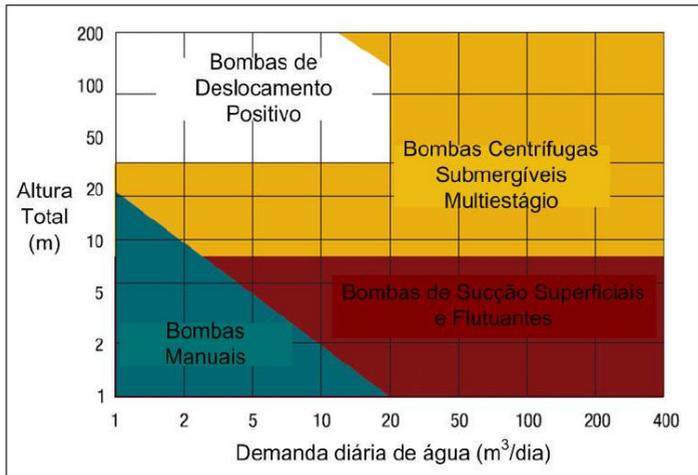
Para escolher o tipo de bomba a ser utilizada é indicado avaliar alguns parâmetros:

- Volume de água a ser bombeado;
- Altura manométrica e potência requerida;

- Eficiência (geralmente mais elevada para motores c.c.);
- Custo (geralmente menor para motores c.a.);
- Necessidade de submersão da bomba;
- Diâmetro do poço;
- Confiabilidade;
- Disponibilidade e facilidade de manutenção.

Com os dados de altura manométrica total e a vazão requerida do projeto é possível escolher o tipo de bomba ideal para o sistema. Na Figura 8 pode ser observado um diagrama que facilita a escolha entre os tipos de bombas relacionadas.

Figura 8: Diagrama para seleção de bombas.



Fonte: Melendez (2009).

Os motores c.c. são muito utilizados em sistemas de bombeamento com energia solar fotovoltaica, pois são compatíveis com a fonte energética. Possuem uma eficiência mais elevada, no entanto o custo tende a ser mais elevado, além disso, motores com escovas necessitam de manutenção periódicas. Geralmente os motores c.c. são de menor potência (abaixo de 10 cv ou 7.350 W).

Os motores c.a. apesar de ter um custo menor e serem encontrados com mais facilidade no mercado, adicionam

complexidade ao sistema, visto que exigem a inclusão de um inversor para converter a c.c. produzida pelo gerador fotovoltaico em c.a., o que acarreta em perda de energia. São mais indicados quando há necessidade de potências mais elevadas no sistema (acima de 10 cv ou 7.350 W). Atualmente no mercado é possível encontrar sistemas de bombeamento solar que utilizam um inversor especial, acoplado ao gerador, para acionar motores c.a. trifásicos, sendo que alguns inversores possuem um seguidor do ponto de máxima potência para otimização do funcionamento.

As bombas centrífugas são indicadas para bombeamento de grandes vazões (até 1000 m³/h) e pequenas alturas manométricas. Possuem pás ou rotores que giram em alta velocidade, criando pressão e forçando o fluxo de água. Este tipo de bomba pode operar submersa ou em superfície. Geralmente são projetadas para alturas manométricas fixas e a vazão aumenta com o aumento da velocidade de rotação das pás. Bombas centrífugas com motor c.c. podem ser conectadas diretamente ao gerador fotovoltaico e seu desempenho está relacionado com os níveis de irradiação solar. Quando os níveis de irradiação se reduzem a corrente do gerador cai, acarretando uma redução na velocidade de rotação das pás do motor e conseqüentemente redução na vazão bombeada. Reduções pequenas na irradiação provocam grandes reduções na vazão, sendo que em alguns casos a bomba não consegue vencer a altura manométrica ou para de funcionar até que se reestabeleça níveis de irradiação adequados para o funcionamento da bomba.

As bombas de deslocamento positivo ou volumétricas são indicadas para aplicações com elevadas alturas manométricas e pequenas vazões de bombeamento, geralmente vazões na faixa de 0,3 a 40 m³/d e alturas manométricas de 10 a 500 m. Neste tipo de bomba há um mecanismo, geralmente um êmbolo ou diafragma, que através de movimentos consecutivos e sucessivos força o deslocamento do fluido. Os tipos de bombas de deslocamento positivo mais utilizados em sistemas de bombeamento com energia fotovoltaica são as bombas vibratórias de diafragma (indicada para pequenas alturas manométricas) e as bombas de pistão (para grandes alturas manométricas). As bombas de deslocamento positivo demandam um pico de potência na sua partida (corrente de surto) o que torna necessária a utilização de controladores eletrônicos para ajustar o ponto de operação do gerador fotovoltaico e fornecer a

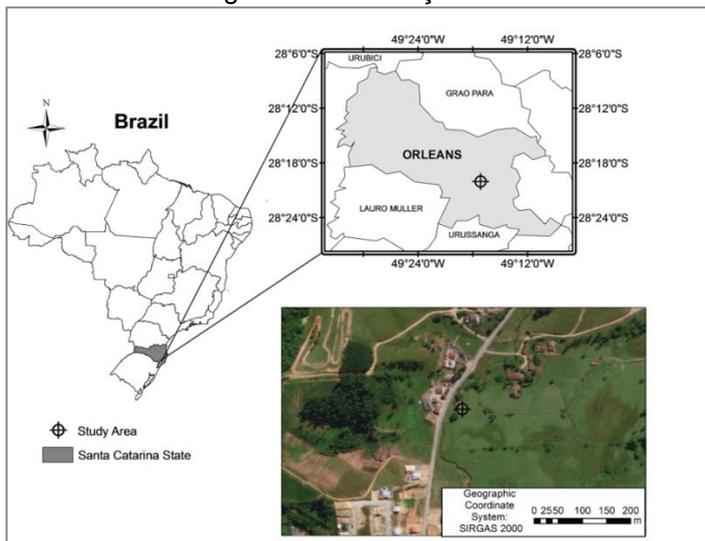
corrente necessária para a partida do motor da bomba. No entanto pequenas quedas nos níveis de irradiação solar diminuem a velocidade do motor e a vazão, mas não reduz a capacidade da bomba em atingir a altura manométrica, como acontecem com as bombas centrífugas, permitindo que o bombeamento prossiga, mesmo com vazão mais baixa, ao longo de um dia com pouca irradiação solar.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Área de estudo

A presente pesquisa foi realizada no município de Orleans, localizado no Sul do estado de Santa Catarina (Figura 9).

Figura 9: Localização da área de estudo



Orleans possui uma área de aproximadamente 550 km², com uma população de 22.311 habitantes distribuídos 75% na zona urbana e 25% na zona rural. A economia local é baseada principalmente na agricultura familiar (culturas de fumo, milho, feijão e cana de açúcar), pecuária (criação de bovinos, suínos e aves) e indústria (embalagens plásticas, molduras e carrocerias). Aproximadamente 74% das famílias são abastecidas com água da rede pública e 26% são abastecidas com poços ou nascentes (IBGE, 2014).

O município de Orleans encontra-se a uma altitude de 132 m acima do nível do mar, posicionada entre o litoral e a serra do Rio do Rastro, o que contribui para o clima ser classificado como Mesotérmico úmido, com temperatura média de 18°C (EMBRAPA, 2004).

Orleans é componente do domínio de Bacias e Coberturas Sedimentares do estado e está inserida na região da Depressão do Sudeste Catarinense, mais especificamente na unidade geomorfológica Depressão da Zona Carbonífera Catarinense. Em relação ao relevo, o município apresenta colinas com vales encaixados e vertentes íngremes. Há também ocorrência de relevos residuais de topo plano, oriundos de rochas mais resistentes e remanescentes de antigas superfícies de aplanamento. Dentre os solos mais significativos da região, encontram-se o Podzólico Vermelho-Amarelo, também chamado de Argissolo, o Podzólico Vermelho-Amarelo Latossólico e o Cambissolo (EMBRAPA, 1998; 2004).

O solo do local do experimento foi classificado e caracterizado por um Engenheiro Agrônomo (especialista em solos), por meio de um corte na margem do rio. A caracterização completa é apresentada no APÊNDICE A. Algumas características seguem descritas a seguir:

- Classificação: Cambissolo Flúvico;
- Litologia: Sedimentos alóctones recentes de consistência semibranda e origem aluvionar/ coluvionar;
- Relevo local: Planície fluvial, com relevo plano (0 – 3% de declividade);
- Vegetação Primária: Floresta Ombrófila Densa. Bioma Mata Atlântica;
- Uso da área: Pastagem,
- Altitude: 140 m.

5.2 Escolha do local para implantação do piloto

A escolha do local de implantação de um sistema de tratamento de água por FM é uma etapa importante do processo, pois a perfuração de um poço em um local inadequado pode gerar situações desagradáveis como baixa produção do poço, assim como produção de água de qualidade insatisfatória.

Foi produzido um documento com diretrizes para orientar sobre a escolha de locais para a implantação de sistemas de FM, o qual se encontra na seção 6.10. Este documento foi produzido baseado em pesquisas bibliográficas e na experiência do grupo de pesquisa na temática de FM.

As instalações do projeto piloto foram implantadas em uma propriedade rural, localizada no bairro Rio Belo, no município de Orleans/SC, a qual não é atendida por serviço de abastecimento de água. Dentro da propriedade rural percorre o Rio Belo, corpo d'água que nomeia o bairro, manancial escolhido para utilizar a técnica de filtração em margem da presente pesquisa.

Inicialmente o local foi escolhido por apresentar algumas características favoráveis para aplicação da filtração em margem, conforme recomendado por Grischek et al. (2007) e também por oferecer segurança patrimonial à implantação dos experimentos. As características seguem descritas abaixo:

a) Por meio de uma análise visual foi observado que o leito do rio é composto por areia grossa e cascalho fino, o que facilita a interação da água do rio com o aquífero;

b) Segundo o proprietário, o rio apresenta variações consideráveis de nível e que normalmente em eventos de chuvas intensas o rio apresenta elevação de nível da ordem de 1 m, as quais foram constatadas no local. Tais variações atuam no revolvimento do leito do rio, o que favorece a minimização da colmatação.

Após a etapa inicial de escolha do local, foram realizadas as etapas seguintes, dos critérios de escolha, descritas no documento da seção 6.10.

Acrescente-se aos aspectos descritos, o fato de que foi desenvolvido na propriedade rural citada, um projeto de extensão intitulado “Tecnologias Sociais para Gestão da Água” (TSGA), vinculado ao departamento de Engenharia Sanitária da Universidade Federal de Santa Catarina (ENS/UFSC). Por meio desse projeto foi implantado na propriedade em foco um poço escavado de FM, o qual é utilizado basicamente para dessedentação de animais e lavagem de veículos na propriedade. O aproveitamento do poço citado e a implantação de um outro poço tubular mais profundo por meio dessa pesquisa, compõem um excelente campo experimental para consolidação da técnica de FM. Além disso, pelos interesses comuns, essa pesquisa teve o apoio do projeto TSGA, incluindo contatos, informações técnicas e apoio logístico para desenvolver o trabalho no local citado.

5.3 Caracterização do Manancial

Grischek et al. (2007) ressaltam que alguns aspectos hidrológicos dos mananciais, como vazão, velocidade e nível de água, e morfológicos, como declividade e posição dentro da bacia hidrográfica são importantes de serem levantados, pois influenciam diretamente nos processos da FM.

O Rio Belo, manancial escolhido para a aplicação da técnica de filtração em margem, foi caracterizado segundo os critérios acima. A localização do experimento dentro da bacia hidrográfica do Rio Belo, assim como o cálculo da declividade do manancial foi realizada por meio do uso de mapas. A vazão e velocidade de fluxo do rio foram medidas através de um medidor de velocidade. A qualidade da água do manancial foi monitorada através de coletas de água quinzenais, cujos parâmetros e metodologias de análise seguem descritos na seção 5.5.

5.3.1 Medição de velocidade de fluxo e vazão

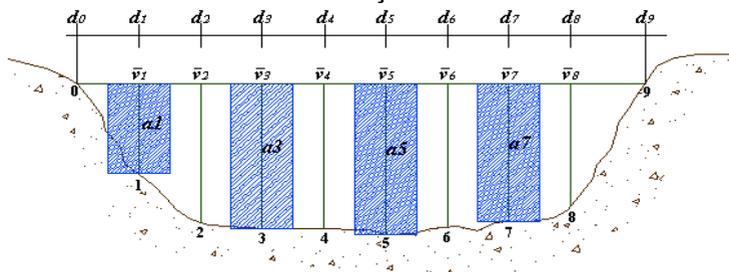
A velocidade de fluxo do manancial foi medida através de um micromolinete marca OTT, modelo C2 (Figura 10) e a vazão foi determinada através do método da meia seção. O método da meia seção consiste em dividir uma seção transversal do rio em diversas áreas retangulares, definidas por uma vertical central e pelas metades dos setores adjacentes, conforme pode ser observado na Figura 11.

Figura 10: Imagem do micromolinete usado na medição de velocidade do rio Belo.



Fonte: tecnologiayambiente.com

Figura 11: Esquema ilustrativo de aplicação do método da meia-seção.



Fonte: Santos et al. (2001).

Para o cálculo da vazão é necessário determinar a área de cada retângulo (largura x altura) multiplicada pela velocidade na vertical correspondente. Para obter as áreas foram medidas a profundidade em cada vertical e as distâncias de cada vertical em relação à margem esquerda (ponto de referência).

O método da meia seção determina em quantos pontos é necessário medir a velocidade em cada vertical com o molinete, de acordo com a profundidade do rio. No caso do Rio Belo a profundidade média na seção escolhida estava entre 0,15 a 0,6 m, então foi necessária somente uma medição de velocidade a 60% de profundidade de cada vertical. Com os dados de velocidade e área de cada retângulo foi possível calcular a vazão de cada retângulo e depois com a soma das vazões se obteve a vazão total na seção escolhida.

5.3.2 Análises granulométricas e condutividade hidráulica do leito do rio

Foram coletadas amostras de sedimento do leito do rio com a finalidade de realizar as análises granulométricas. A metodologia utilizada nas análises está descrita na seção 5.4.2 – Análises granulométricas do solo.

O ensaio para a determinação da condutividade hidráulica do leito do rio consiste em cravar um tubo de PVC de 100 mm no leito do rio e injetar água no tubo até a borda e monitorar, por meio de medições do nível e tempo, o rebaixamento da água no interior do piezômetro até o nível inicial. O tubo foi cravado cerca de 10 cm de profundidade no leito do rio e a extremidade

superior ficou cerca de 30 cm acima da superfície da água. Na extremidade inferior do tubo que foi cravada no leito do rio, foram feitos cortes em “V” (tipo dente de serra) em todo o perímetro da circunferência, para facilitar a penetração e não provocar muita deformação nos sedimentos.

O cálculo da condutividade hidráulica do leito do rio é detalhado na seção 5.5.7 – Condutividade hidráulica.

5.4 Caracterização do solo e subsolo

Foi realizada uma caracterização do solo e subsolo do local escolhido para a implantação do sistema de tratamento de água por filtração em margem com a finalidade de confirmar se o local escolhido apresentava características favoráveis para a aplicação da técnica de FM. O solo e subsolo do local foram caracterizados em termos de granulometria e parâmetros químicos.

A partir dos resultados das análises químicas e granulométricas foram realizadas análises estatísticas dos dados com a finalidade de compreender a variação das características do solo ao longo de seu perfil. Os dados foram submetidos à análise de agrupamento (*Cluster Analysis*) e de variância (ANOVA), realizados no *software* STATISTICA®.

5.4.1 Sondagem do solo/subsolo

Antes de realizar a perfuração do poço de produção, destinado à FM, foram realizados sete furos de sondagem no solo no entorno da área prevista para o poço de produção. Foi realizado um levantamento topográfico dos pontos destinados às sondagens. Os furos foram alocados na margem esquerda do Rio Belo, conforme planta de situação (Figura 20) demonstrada na seção 5.5.1 – Piezômetros.

As sondagens foram realizadas através de perfuratriz hidráulica rotativa, acoplada a um trator Valmet 1979 (Figura 12).

Figura 12: Detalhes da perfuratriz hidráulica acoplada ao trator Valmet 1979.



As sondagens foram realizadas com o intuito de identificar o nível do lençol freático no subsolo e conhecer o perfil litológico do solo, ou seja, a composição das camadas do solo em termos granulométricos e os atributos químicos do solo. Os furos de sondagem foram realizados com 10 m de profundidade e foram coletadas amostras de solo, em cada furo de sondagem, para cada mudança da camada de solo. As camadas do subsolo foram divididas nas seguintes profundidades: 0,0-0,30 m; 0,30-1,50 m; 1,5-2,0 m e 5,0-10,0 m, de acordo com a mudança nas características de cada camada. Na camada de 2,0 a 5,0 m foi encontrada uma camada de seixo de rio (pedras de basalto) e não foi possível coletar amostras de solo nesta profundidade.

A Figura 13 mostra a broca utilizada na perfuração das primeiras camadas de solo e como eram realizadas as coletas das amostras de solo. As amostras de solo foram condicionadas em sacos plásticos reforçados e encaminhados ao laboratório para armazenamento e análises.

Além de subsidiarem a determinação da profundidade do poço de produção, posicionamento do filtro para entrada de água, cada furo de sondagem foi revestido e transformado em piezômetro (poço de monitoramento) cujos procedimentos estão descritos na seção 5.5.1 – Piezômetros.

Figura 13: Coleta de amostras de solo durante o procedimento de sondagem do solo.



5.4.2 Análises granulométricas do solo

O solo é composto por partículas de diferentes dimensões ou granulometrias. A análise granulométrica visa caracterizar o solo em termos da dimensão das partículas sólidas (areia, silte e argila principalmente) que compõem o mesmo. A caracterização do solo é feita através da distribuição das partículas do solo em frações, expressas em porcentagem de peso em relação ao peso total da amostra.

As análises granulométricas foram realizadas por peneiramento, de acordo com as normas NBR 7181/84 e NBR 6457/86 (ABNT). Basicamente a análise granulométrica se divide na preparação das amostras e no ensaio de peneiramento. A preparação da amostra consiste na secagem da mesma, primeiramente ao ar livre e depois em estufa, e desmanchamento dos torrões, em um almofariz (recipiente em porcelana) com o auxílio da mão de gral (espécie de pilão). Após a preparação, a amostra passa por uma sequência de peneiras, sobrepostas no

sentido da malha mais grossa para a malha mais fina, sob influência de um agitador mecânico (Figura 14).

Figura 14: Instrumentos utilizados nas análises granulométricas de solo: a) Almofariz e mão de gal. b) Sequência de peneiras sobre o agitador mecânico.



5.4.3 Análises químicas do solo

As análises químicas do solo foram realizadas com o intuito de conhecer a composição química do solo.

Para avaliar a composição química do solo e subsolo do aquífero do local onde será implantado o piloto de filtração em margem, foram realizadas análises químicas das amostras, de cada horizonte, coletadas durante a sondagem no local.

Os parâmetros químicos analisados e suas respectivas metodologias utilizadas seguem descritos na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros químicos de solo e as respectivas metodologias.

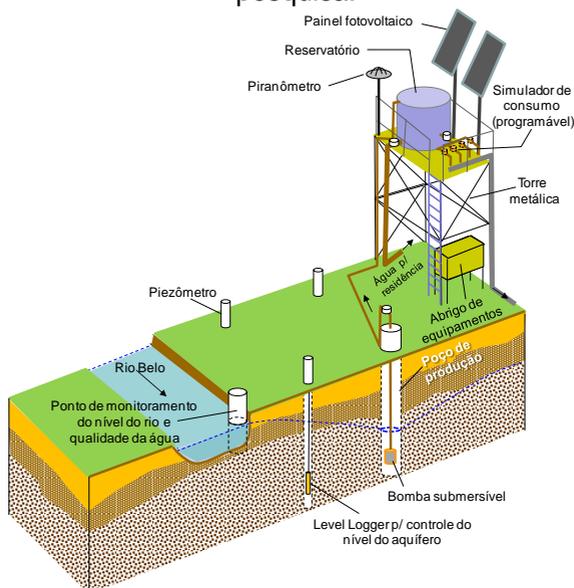
Parâmetros	Extração/ Método Analítico/Referência	Unidade
pH	Extração em água / Potenciométrico (pHmetro)/ Tedesco (1995)	-
COT*	Extração com dicromato de potássio/ Titulométrico / Embrapa (1997)	g/kg
Ferro Total	Extração com oxalato de amônia/Espectrofotometria de Absorção Atômica / Tedesco (1995)	g/kg
Manganês	Extração com cloreto de potássio/ Espectrofotometria de Absorção Atômica/ Tedesco (1995)	mg/dm ³

*Carbono Orgânico Total

5.5 Sistema piloto de filtração em margem

O sistema piloto de tratamento de água por FM utilizado nesta pesquisa é ilustrado pela Figura 15.

Figura 15: Esquema de piloto de FM proposto para a pesquisa.



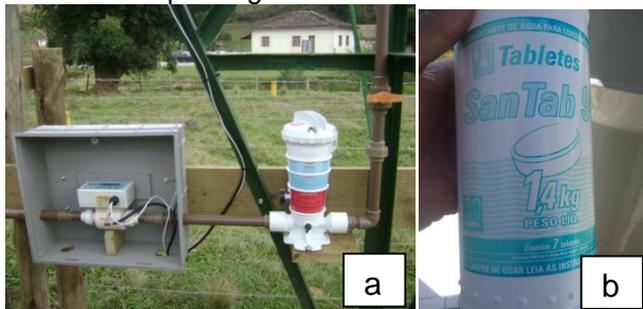
A água era bombeada do poço de produção, por meio das bombas solares, resultando em um rebaixamento no nível do lençol freático, induzindo que a água do rio fosse infiltrando pelo solo até alcançar o poço de produção. A água bombeada passava por um medidor de vazão, em seguida por um clorador e então era direcionada até o reservatório superior de 5.000 L, localizado no alto da torre metálica. A partir do reservatório superior parte da água era direcionada para a residência da propriedade rural, para uso na dessedentação de animais e lavagem de carros e pisos e parte da passava por simulador de consumo, composto por quatro válvulas solenoides que abriam (em distintas combinações), em horários pré-estabelecidos simulando o consumo diário de duas residências (10 pessoas). A água que passava pelas válvulas solenoides era descarregada em um tubo de 75 mm e direcionada de volta ao rio.

Na Figura 16 podem ser observadas as instalações do sistema piloto depois de concluído. O medidor de vazão utilizado é da marca Incontrol modelo VMS Pro 1000. O dispositivo dosador de cloro é da marca Sodramar e as pastilhas de cloro utilizadas são específicas para água de consumo humano, marca Santab (Figura 17).

Figura 16: Instalações do sistema piloto de filtração em margem.



Figura 17: (a) Detalhe do medidor eletromagnético de vazão seguido do dosador automático de cloro. b) Pastilhas de cloro para água de consumo humano.



O medidor de vazão e o piranômetro eram alimentados por um módulo solar policristalino Kyocera de 250 W (Figura 18). Como estes dispositivos são alimentados por corrente alternada, foram utilizados um inversor de frequência, que converte a energia produzida em corrente contínua pelo módulo solar, em corrente alternada, duas baterias para armazenar energia e um controlador de carga para gerenciar o carregamento e descarregamento da bateria. Todos estes dispositivos ficavam armazenados no abrigo de equipamentos (Figura 19), embaixo da torre metálica.

Figura 18: Módulo solar Kyocera utilizado para alimentar os dispositivos de monitoramento do piloto de FM



Fonte: kyocera.com.br

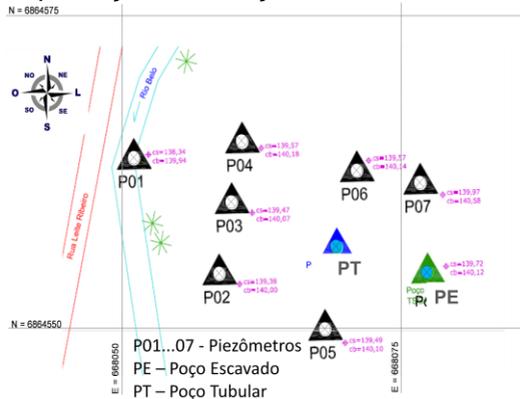
Figura 19: Abrigo dos equipamentos e dispositivos de operação e monitoramento do piloto de FM



5.5.1 Piezômetros

Como mencionado anteriormente, cada furo de sondagem do solo foi transformado em um piezômetro (Figura 20), com a finalidade de monitorar o nível da água no subsolo, assim como estimar a direção do fluxo da água.

Figura 20: Localização dos furos de sondagem e do poço de produção em relação ao Rio Belo.



Os piezômetros foram construídos de acordo com a NBR 15495-1 (2007) – Poços de monitoramento de águas subterrâneas em aquíferos granulares. O acabamento dos piezômetros inclui revestimento e filtro geomecânico em PEAD (polietileno de alta densidade), cap de pressão, pré-filtro com areia, selagem superficial com bentonita, laje de proteção superficial, com pintura e identificação (Figura 21).

Ao término da sondagem foram inseridos os tubos geomecânicos de revestimento em PEAD e o filtro. O filtro do piezômetro é também construído em PEAD, sendo que a única diferença é que possui ranhuras que permitem o fluxo da água para o interior do piezômetro e impedem a entrada de impurezas. O filtro foi colocado no último metro de profundidade do piezômetro (9,0 a 10,0m). Em volta do filtro e do revestimento geomecânico (em toda sua extensão) foi colocado o pré-filtro, composto por areia grossa e pedriscos. Acima do pré-filtro foi colocado uma camada de aproximadamente 50 cm de bentonita, com o intuito de selar o espaço anelar entre o tubo e o solo. O acabamento final do piezômetro foi realizado com a colocação da proteção sanitária, que consiste em uma camada de argamassa de cimento de 0,30 m de profundidade, para evitar que a água superficial de chuva infiltre pelo espaço anular e contamine o poço de monitoramento. No ANEXO 1 se encontra os perfis de cada piezômetro, fornecido pela empresa executora.

Figura 21: Detalhe do piezômetro, durante o procedimento de limpeza.



5.5.2 Poço de Produção

Na propriedade rural onde foi realizada a pesquisa já havia um poço escavado, tipo amazonas, de 1 m de diâmetro, próximo às margens do Rio Belo, o qual foi executado por meio do Projeto Tecnologias Sociais para a Gestão das Águas (TSGA), anteriormente desenvolvido no local (Figura 22). No entanto, o poço foi escavado através de uma retroescavadeira e a profundidade máxima do mesmo foi proporcional ao alcance da máquina, ficando com 5 m de profundidade. Como o nível da água se encontra a 2 m abaixo da superfície do solo, o poço existente apresentava limitação quanto ao rebaixamento do nível de água. Dessa forma foram realizados alguns testes no poço existente enquanto ainda não havia sido perfurado o poço tubular de produção.

Figura 22: Imagem do poço existente no local de estudo.



O poço tubular foi perfurado com bitola de 10 polegadas e revestimento de 8 polegadas, com 15 m de profundidade e a aproximadamente 17 m de distância do manancial. A técnica perfuração do poço foi similar à perfuração dos piezômetros, ou seja, hidráulica rotativa. O acabamento foi feito com revestimento e filtro geomecânico nervurado em PVC, incluindo pré-filtro, selo e proteção sanitária (NBR 12212; NBR 12244, 1992) (Figura 23).

As obras de perfuração do poço tubular iniciaram somente em 11/04/2016, devido à problemas na contratação de empresa para perfurar. Um dos empecilhos foi o fato de existir uma camada de seixo rolado (pedras redondas) no subsolo e este tipo de material ser mais difícil de perfurar além de necessitar de equipamentos específicos. A dificuldade de perfurar a a camada

de seixo rolado, segundo os perfuradores é que o material é “solto” e no momento da perfuração as pedras ficam “pulando” e dificultam o avanço da broca perfuratriz. Outro fato é que as empresas que possuíam os equipamentos necessários, geralmente especializadas em perfurar poços tubulares profundos não tinham interesse em realizar o serviço proposto, pois devido à “pequena” profundidade do poço, não era atrativo para a empresa. Logo, as empresas que se dispuseram a perfurar o poço cobraram um valor elevado pelo serviço para que se tornasse atrativo para elas e conseqüentemente o custo do metro perfurado ficou mais elevado do que um poço profundo, comparando proporcionalmente as profundidades.

Figura 23: (a) Procedimento de perfuração do poço tubular. (b) Poço de FM finalizado.



A avaliação do sistema de FM foi realizada em duas etapas, em função do bombeamento. Na primeira etapa foram utilizadas 3 bombas vibratórias alimentadas por energia solar fotovoltaica (seção 5.5.3) e na segunda etapa foi utilizada uma bomba centrífuga submersível Schneider (Franklin Electric) de 6 estágios e 550 W ($\frac{3}{4}$ cv) de potência (Figura 24).

A segunda etapa do bombeamento foi realizada com uma bomba de maior potência para verificar se com uma maior vazão de bombeamento e, conseqüentemente, um maior rebaixamento haveria maior contribuição do rio e com isso alteração na qualidade da água proveniente do poço de FM.

Figura 24: Detalhe da bomba utilizada no bombeamento do poço de FM na segunda etapa do estudo.



Em ambas as etapas o bombeamento foi intermitente e a variação do nível de água no interior do poço foi monitorada constantemente através de um medidor de nível eletrônico (levelogger) da marca Solinst modelo 3001-LT F65/M20 (Figura 25). No caso do bombeamento solar as bombas funcionavam durante o dia, enquanto havia luz do sol e na etapa em que foi utilizada a bomba elétrica a mesma era acionada por um *timer* digital para que fosse ligada às 8h00min e desligada às 17h00min, simulando um bombeamento solar intermitente.

Figura 25: Imagem do Leve Logger utilizado para medições de nível de água.



Fonte: solinst.com

5.5.3 Bombeamento Solar Fotovoltaico

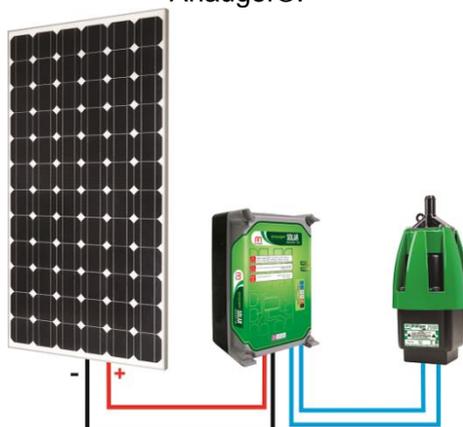
As bombas instaladas no poço de FM da marca Anauger®, modelo P100 (100 W de potência), do tipo vibratória de

diafragma, com deslocamento positivo e eram alimentadas por energia solar fotovoltaica. As especificações técnicas das bombas seguem descritas na Tabela 2. O kit de bombeamento solar da Anauger® é composto pela bomba, um driver e um painel fotovoltaico (Figura 26).

Tabela 2: Especificações técnicas da bomba Anauger P100.

Vazão	1200 a 8600 L/d
Elevação máxima	40 m
Distância máxima de bombeamento	500 m a uma altura de 5 m
Submersão máxima	10 m
Temperatura máxima da água	35 °C
Resistência à umidade	IP 58 (submersão contínua)

Figura 26: Imagem ilustrativa do kit de bombeamento solar Anauger®.



Fonte: anauger.com

O driver é responsável por gerenciar a energia fornecida pelo painel fotovoltaico e direcionar para a bomba. A energia gerada no painel fotovoltaico é direcionada para o driver, armazenada em capacitores e convertida em impulsos de energia para a bomba, em função do nível de irradiação solar. A vazão da bomba varia de acordo com a irradiação solar de forma proporcional, ou seja, quanto maior a irradiação incidente sobre o módulo fotovoltaico maior a vazão da bomba. O driver

proporciona também proteção ao sistema desligando a alimentação da bomba em caso de níveis extremos de tensão e corrente. O driver possui tensão de entrada de 36 Vcc. O módulo solar fotovoltaico apresenta potência máxima de 175 W, é composto por 72 células de silício monocristalino, é encapsulado em camadas de vidro, estruturado em alumínio anodizado, possui 16 kg de peso e dimensões de 1580 x 808 x 35 mm. As especificações técnicas do módulo fotovoltaico seguem descritas na Tabela 3.

Tabela 3: Especificações técnicas do módulo fotovoltaico fornecido no kit de bombeamento solar Anauger®.

Modelo	SF 125X125-72-M(L)
Potência máxima	175 W
Corrente máxima de potência	4,9 A
Tensão máxima de potência	35,7 V
Corrente de curto-circuito	5,2 A
Tensão circuito aberto	44,6 V
Temperatura das células operação normal	50 °C
Tolerância potência	± 3,0%
Condição de teste	1000 W/m ² ; AM 1,5; 25 °C
Tensão máxima do sistema	1000 V
Eficiência energética (PROCEL – INMETRO)	13,6% - Classe A
Geração com 12 anos	90% da potência
Geração com 25 anos	80% da potência

Foram instaladas 3 bombas no poço, pois a vazão individual de cada bomba (100W) não seria suficiente para realizar o rebaixamento do nível da água desejado no interior do poço. Dessa forma, as bombas foram instaladas em paralelo, resultando em um conjunto de 300 W de potência. O esquema de montagem das bombas e as bombas montadas em paralelo podem ser observados nas Figuras 27 e 28, respectivamente.

Existem, no mercado, outras marcas de bombas que funcionam com energia solar fotovoltaica e operam com vazões maiores, porém a maioria delas tem de ser importadas. Sendo assim, foi escolhido realizar a aquisição das bombas Anauger® que operam com menores vazões, mas são fabricadas no Brasil, facilitando no caso de uma possível necessidade de assistência técnica ou manutenção.

Figura 27: Projeto do esquema de montagem das bombas em paralelo.

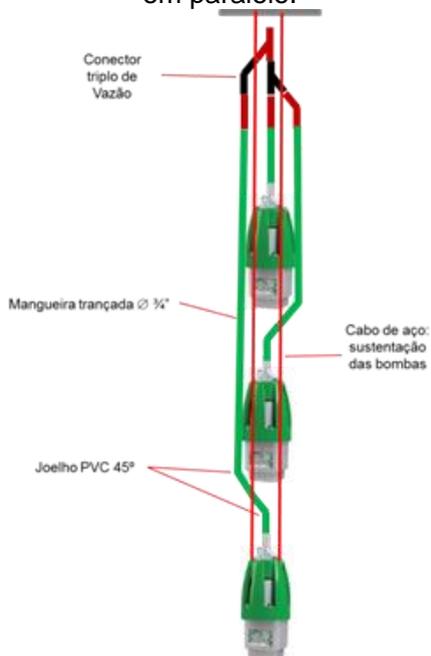


Figura 28: Esquema de instalação das bombas em paralelo.



Não foram utilizadas baterias para armazenar a energia excedente gerada pelos painéis fotovoltaicos para que a bomba funcione durante a noite ou em períodos de baixa insolação. As bombas funcionavam durante todo o dia, bombeando o máximo de água para o reservatório superior e armazenando energia em forma de água (energia potencial). Quando o volume bombeado

era maior que o consumo de água, o volume excedente era extravasado pelo “ladrão” do reservatório e a água retornava ao rio.

5.5.4 Monitoramento da irradiação solar

A irradiação solar foi monitorada no período de Maio de 2015 a Agosto de 2017 por meio de um piranômetro Apogee SP-110 e um *datalogger* Campbell Scientific CR 200X (Figura 29).

Figura 29: Piranômetro e datalogger utilizados no monitoramento da irradiação solar.

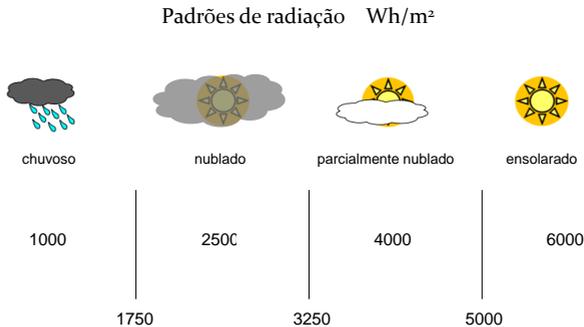


Fonte: apogee.com; campbellsci.com.br

O piranômetro foi instalado ao lado dos painéis solares e programado para aquisição horária de dados de radiação. Os dados eram armazenados no datalogger, instalado dentro do abrigo de equipamentos.

A partir das coletas diárias de irradiação solar foram obtidas a irradiação total diária. Com os valores de irradiação diária foi realizada uma classificação dos dias monitorados em chuvoso, nublado, parcialmente nublado e ensolarado (Figura 30) com base em Pinho e Galdino (2014).

Figura 30: Padrões de radiação solar.



Fonte: Adaptado de Pinho e Galdino (2014).

5.5.5 Relação entre o índice RT e a turbidez da água do poço de FM

Através dos dados dos medidores de nível foi possível monitorar o comportamento do nível de água no poço de produção em relação ao nível de água do rio.

Considerando que o período (T) em que o nível de água do poço de FM se mantém abaixo do nível do manancial e a intensidade desse rebaixamento (R) são dois fatores determinantes sobre a contribuição quantitativa do manancial para a água produzida no poço de FM, foi estipulado o índice RT (m.h) para avaliar a influência do rebaixamento do nível de água no poço sobre a qualidade da água produzida na FM. O parâmetro de controle escolhido para a qualidade da água foi a turbidez, visto que é um indicador que tem grande variação ao longo do tempo.

Foi avaliado se o aumento do valor RT, que significa, aumento do rebaixamento do nível da água do poço de FM e da permanência deste nível abaixo do nível do manancial, influenciaria na qualidade da água extraída do poço de produção. Essa avaliação foi realizada em um período com bombeamento solar (300 W de potência) e também em um período com a bomba elétrica (550 W de potência), para ter distintos cenários de rebaixamento de nível de água.

5.5.6 Teste de bombeamento e capacidade de produção do poço de FM

O teste de bombeamento tem como objetivo determinar os parâmetros hidrodinâmicos do aquífero e determinar a vazão de exploração do poço de produção, ou seja, a vazão que o mesmo pode fornecer.

O teste de bombeamento é uma operação que consiste no bombeamento de um poço, durante certo intervalo de tempo com o registro da evolução do rebaixamento e da recuperação do nível da água em função do tempo. O teste é dividido em duas partes. A primeira etapa consiste no bombeamento para induzir o rebaixamento do nível da água no interior do poço e a segunda etapa consiste na recuperação do nível de água do poço até o nível estático. Tanto durante o rebaixamento quanto durante a recuperação devem ser registrados os dados de nível de água (metros) em função do tempo (minutos). A vazão de bombeamento deve ser maior que a capacidade de produção pré-estimada do poço para que ocorra o rebaixamento (FEITOSA, 2000; NBR 12244, 1992).

Em rochas sedimentares, os testes de bombeamento devem ser realizados com bombeamento contínuo, por um período mínimo de 24 horas ou até a estabilização completa do nível dinâmico. Após o término do bombeamento recomenda-se o registro da recuperação do nível por um período de 12 h. Para vazões de até 3,6 m³/h pode ser utilizado o método volumétrico para a medição da vazão, que consiste no enchimento de um balde de volume mínimo de 20 L e no registro do respectivo tempo necessário para enchê-lo (CPRM, 1998).

O teste de bombeamento foi realizado após o desenvolvimento e limpeza do poço de produção, utilizando uma bomba submersívelVBU-41 de 10 estágios e 1,5cv de potência, um balde de 20 L para medição da vazão (Figura 31), um cronômetro para acompanhamento do tempo e um medidor de nível eletrônico (leve logger) Solinst, modelo 3001-LT F65/M20.

Figura 31: (a) Detalhe da bomba utilizada no teste de bombeamento. (b) Medição de vazão pelo método volumétrico, durante o teste de bombeamento.



Ao final do teste obtiveram-se os dados da relação: nível de água no interior do poço pelo tempo, durante o rebaixamento e recuperação do nível de água. Com estes dados foi possível gerar um gráfico e determinar a vazão de exploração do poço.

5.5.7 Condutividade hidráulica

A condutividade hidráulica é a capacidade do solo em permitir a movimentação da água em seu interior.

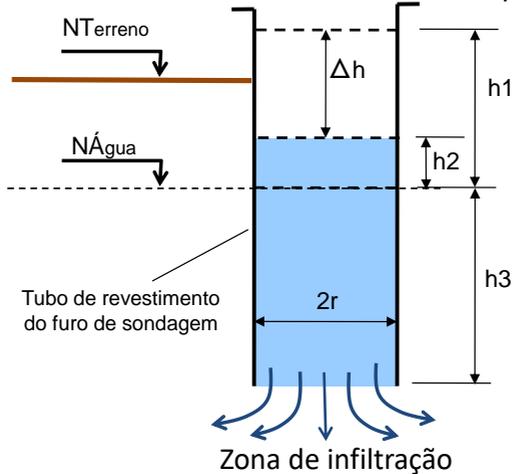
Foram realizados ensaios de infiltração em alguns piezômetros para determinar a condutividade hidráulica (k) em campo. O ensaio consiste em injetar água no piezômetro até a borda e monitorar, por meio de medições do nível e tempo, o rebaixamento da água no interior do piezômetro até o nível inicial.

Como a condutividade hidráulica varia tanto horizontalmente quanto verticalmente, o ensaio foi realizado em 3 piezômetros (P3, P6 e P7), e o coeficiente adotado foi uma média dos 3 pontos ensaiados. A variação espacial da condutividade hidráulica é denominada heterogeneidade e a variação vertical em um mesmo ponto é denominada anisotropia.

O procedimento do ensaio de infiltração para determinação da condutividade hidráulica, também conhecido como ensaio de

“tubo aberto”, segundo Caputo (1996), está ilustrado na Figura 32 e segue descrito a seguir.

Figura 32: Ensaio de infiltração para determinação da condutividade hidráulica do solo em campo.



- preenche-se o tubo com água até a altura desejada, anota-se a medida “ h_1 ”;
- para ensaios acima no NA deve-se saturar o poço por dez minutos;
- interrompe-se o fornecimento de água, tomando-se esse instante como tempo zero, e acompanha-se o rebaixamento do nível de água em intervalos curtos no começo e mais longos em seguida: Ex: 5s, 15s, 30s, 1min, 2min, 3min, 4min, 5min, etc.;
- recomenda-se que o ensaio seja dado por concluído quando o rebaixamento atingir 20% da carga inicial aplicada ou 30 min de ensaio.

O cálculo da condutividade hidráulica é realizado com base na Equação 1.

$$k = \frac{r_1}{4 \cdot h} \cdot \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (1)$$

Onde,

k : condutividade hidráulica (cm/s);

r_1 : raio do piezômetro (cm);

h : altura de água acima do nível estático do piezômetro (cm);

Δh : diferença entre a altura máxima (h_1) e o nível estático (h_2) da água;

Δt : diferença de tempo, relativo ao Δh .

5.5.8 Porosidade efetiva

A porosidade efetiva foi determinada através de um ensaio que se baseia no tempo de percurso de um traçador conservativo, ou seja, que não sofre degradação, através de uma amostra de sedimento em uma coluna (ESQUIVEL, 2012; SOARES, 2015).

O ensaio foi realizado com amostra da camada saturada inferior (5,0 a 10,0 m) pois representa a camada por onde a água percola. A amostra do sedimento foi colocada em uma coluna acrílica de 6 cm de diâmetro e 1 m de comprimento. A altura total do sedimento no interior da coluna foi de 42 cm. A amostra do sedimento foi saturada com água destilada e por meio de uma bomba dosadora, foi bombeada a uma vazão constante a solução com o traçador, nesse caso cloreto de sódio. Na parte inferior da coluna a condutividade elétrica da solução foi monitorada a cada minuto até apresentar valores constantes.

Este experimento fornece um gráfico de condutividade versus tempo, onde é possível observar o avanço do traçador ao longo da coluna. O tempo utilizado na determinação da porosidade efetiva é o tempo t_{50} , que indica o tempo em que 50% da concentração do traçador deixou a coluna ($C/C_{\text{máx}}$).

Com base nos parâmetros geométricos da coluna, da vazão bombeada e do tempo t_{50} é possível determinar a porosidade efetiva por meio da Equação 2.

$$\eta_{ef} = \frac{Q \cdot t_{50}}{L \cdot A} \quad (2)$$

Onde,

η_{ef} : porosidade efetiva (%);

Q : vazão (m³/s);

t_{50} : tempo (s);

L : altura do sedimento na coluna (m);

A : área da coluna (m²).

5.5.9 Tempo de percurso da água

O tempo de percurso da água no subsolo entre o manancial e o poço de produção durante o processo de FM em margem é importante para avaliar os compostos que poderão ser removidos durante o percurso da água.

O tempo de percurso da água foi determinado pela Equação 3, proveniente da lei de Darcy, considerando a velocidade intersticial no meio poroso.

$$t_{min} = \frac{L^2 \cdot \eta_{ef}}{k \cdot s} \quad (3)$$

Onde,

t_{min} : tempo mínimo de percurso (d);

L : distância entre o manancial e o poço de FM (m);

η_{ef} : porosidade efetiva;

k : condutividade hidráulica (m/d);

s : abaixamento do nível freático medido dentro do poço de extração, após estabilização (m);

5.6 Monitoramento da qualidade da água

A qualidade da água do sistema piloto foi monitorada por meio de coletas realizadas em 2 pontos: Rio Belo e Poço de FM. As amostras da água do rio representam a água bruta (AB) e as amostras do poço representam a água tratada pela técnica da filtração em margem (FM).

O monitoramento global da qualidade da água do sistema foi realizado por meio de coletas quinzenais nos 2 pontos

supracitados pelo período de 16 meses, de Maio de 2016 a Setembro de 2017. As metodologias utilizadas para análise das amostras de água seguiram os procedimentos descritos no *Standard Methods for Examination of Water & Wastewater* (APHA 2012). Os parâmetros analisados para caracterização da água bruta e tratada podem ser observados na Tabela 4.

Tabela 4: Parâmetros físico-químicos e bacteriológicos monitorados.

Parâmetros	Método Analítico/Equipamento	Unidade
pH	Sonda multiparâmetros Hach	-
Condutividade Elétrica	Sonda multiparâmetros Hach	µS/cm
Oxigênio Dissolvido	Sonda multiparâmetros Hach	mg/L
Turbidez	Turbidímetro Hach/Sonda multiparâmetros Hanna 9829	uT
Cor aparente	Espectrofotometria/Hach DR2800	uH
Cor verdadeira	Espectrofotometria com filtragem prévia em membrana 0,45 µm	uH
Carbono Orgânico Dissolvido	Shimadzu COT	mg/L
Coliformes Totais e Termotolerantes	Colilert®	NMP/100mL
Ferro Total	Espectrofotometria/Hach DR2800	mg/L

Além das coletas quinzenais, a turbidez do rio e do poço de FM foram monitoradas por meio de sondas autônomas Hanna 9821 (Figura 33). Esse monitoramento teve o intuito de acompanhar de forma mais realista a variação deste parâmetro no manancial e verificar a influência na água do poço. Dessa forma, foi instalada uma sonda no rio Belo e outra na linha de recalque entre o poço e o reservatório elevado. O monitoramento da turbidez pelas sondas foi realizado por meio de coletas horárias, pelo período de 14 meses, de Julho de 2016 a Agosto de 2017.

Figura 33: Imagem do medidor e sonda autônoma Hanna utilizados no monitoramento da turbidez da água do rio e do poço de FM.



Fonte: hannainst.com

A sonda utilizada é autônoma, ou seja, permite a programação para coleta e armazenamento de dados sem a necessidade de estar conectada ao medidor. Então a cada visita ao sistema piloto, os dados eram descarregados no medidor e depois transferidos para o computador para posterior análises e compilações.

Durante o período de monitoramento do parâmetro turbidez, a sonda do rio foi instalada de três formas diferentes. As duas primeiras configurações, com a sonda na horizontal (Figura 34), apresentaram problemas. Na primeira configuração a sonda ficava dentro de um tubo fixado próximo à margem do rio e com a movimentação do fundo do rio o compartimento da sonda acumulava sedimentos no sensor da sonda, prejudicando as leituras. A segunda configuração de instalação foi através de um dispositivo flutuador, mas ainda assim em momentos de baixa vazão do rio, continuava ocorrendo o acúmulo de sedimentos e lodo no interior do compartimento que a sonda estava instalada.

Figura 34: Primeira (a) e segunda (b) configuração de instalação da sonda de turbidez no rio Belo.



Na terceira configuração a sonda foi instalada na vertical em uma porção mais profunda do rio. A sonda ficava flutuando (por meio de uma boia) no interior de um tubo de 100 mm (Figura 35). Essa foi a melhor opção e mantida até o fim dos experimentos.

A sonda do poço ficou em um compartimento (tubo PVC de 60mm) na vertical (Figura 35), na linha de recalque, antes do medidor de vazão e clorador.

Figura 35: (a) Terceira configuração de instalação da sonda de turbidez no rio Belo. (b) Detalhe do compartimento de instalação da sonda do poço de FM.

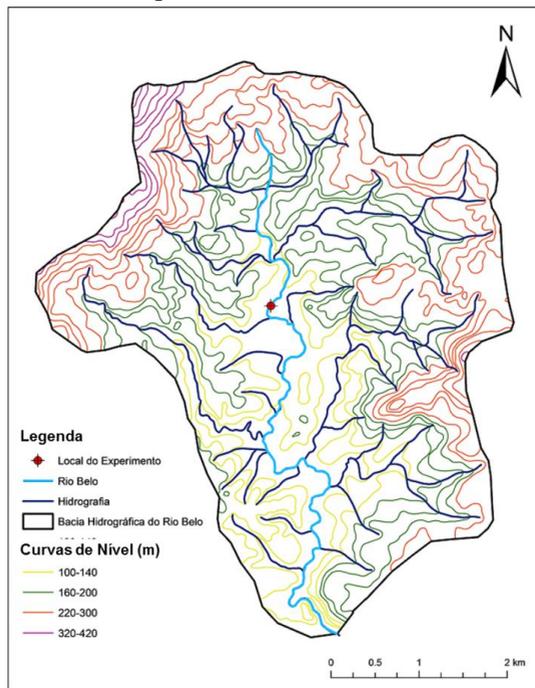


6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Locação do experimento dentro da bacia hidrográfica

A bacia hidrográfica do Rio Belo apresenta uma área de 16,46 km² e o Rio Belo, principal curso d'água da bacia, apresenta comprimento de 7,5 km. O local do experimento está localizado dentro da bacia hidrográfica do rio Belo, a uma distância de aproximadamente 2,16 km da nascente (Figura 36).

Figura 36: Localização do poço de FM dentro da bacia hidrográfica do rio Belo.



O trecho do manancial nas proximidades do local de implantação do poço de produção apresentou declividade de aproximadamente 2% (0,02 m/m). Apesar de o local estar mais próximo da nascente do que da foz do Rio Belo, não apresentou declividade acentuada.

O manancial escolhido é um rio perene e nesta seção da bacia os processos de erosão e deposição se alternam de acordo com a dinâmica de escoamento, comportamento típico das seções medianas das bacias hidrográficas. Tais características são reportadas por Grischek et al. (2007) como positivas em um sistema de FM. Foi observado também que em eventos de precipitação intensa, o rio apresenta um rápido aumento do nível da água, da ordem de 1,0 m, e após o evento a redução do nível também acontece de forma rápida. O comportamento observado na seção do manancial é típico de rios de cabeceira, onde o tempo de concentração na seção é pequeno. O tempo de concentração é inversamente proporcional à declividade (SILVEIRA, 2005). Apesar da declividade no local do experimento não ser elevada, pode ser observada por meio da Figura 36, altitudes elevadas e declividades acentuadas a montante da seção estudada.

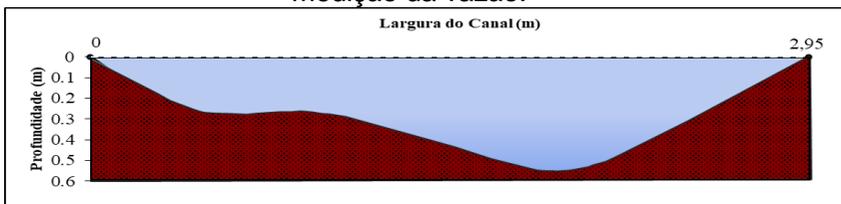
O poço foi locado na parte interna da curva do rio, pois segundo Grischek et al. (2007) na parte interna das curvas a velocidade de fluxo é mais baixa e propicia a formação de um leito móvel, onde se alternam os processos de erosão e deposição, de acordo com o regime de escoamento do rio, favorecendo assim a infiltração.

6.2 Caracterização do Manancial

6.2.1 Velocidade de fluxo e vazão do manancial

A seção escolhida para medição da velocidade e vazão do manancial Rio Belo apresentava largura de 2,95 m e profundidade variando entre 0,26 e 0,55 m, conforme Figura 37.

Figura 37: Seção transversal do Rio Belo utilizada para medição da vazão.



O Rio Belo apresentou uma velocidade média de fluxo de 0,19 m/s e uma vazão de 0,175 m³/s ou 630 m³/h.

6.2.2 Granulometria dos sedimentos do leito do rio

A composição granulométrica do leito do rio, resultante dos ensaios granulométricos, segue descrita na Tabela 5. Os constituintes mais expressivos foram destacados.

Tabela 5: Composição granulométrica do leito do rio Belo.

Materiais	Argila e Silte	Areia Fina	Areia Média	Areia Grossa	Pedregulho Fino	Pedregulho Médio
Composição (%)	0,89	19,7	22,4	34,5	21,6	1,4

A partir da Tabela 5 é possível observar a pequena presença de materiais finos (argila, silte e areia fina) e a predominância de materiais grossos (areia média, grossa e pedregulho fino).

A composição do leito do rio é um dos fatores determinantes para a permeabilidade e conseqüentemente para a infiltração da água do manancial. É preferível materiais de granulometria mais grossa, pois são mais propícios à infiltração que materiais finos (GRISCHEK et al., 2007).

A composição do leito do rio é favorável à aplicação da técnica de FM, de acordo com a recomendação de Grischek et al. (2007).

6.2.3 Condutividade hidráulica do leito do rio

Foram realizados 3 ensaios de infiltração para determinação da condutividade hidráulica do leito do rio. A condutividade hidráulica resultou em $1,5 \cdot 10^{-3}$ cm/s e é uma média dos 3 ensaios realizados.

O valor da condutividade hidráulica encontrado é típico de areia média a grossa, o que está de acordo com os resultados dos ensaios granulométricos que demonstraram uma predominância de areia média e grossa no leito do rio. O valor da condutividade hidráulica também está de acordo com as recomendações de Grischek et al. (2007) sobre locais propícios à

implantação de sistemas de FM, que indicam coeficientes da ordem de 10^{-4} a 10^{-2} cm/s.

6.2.4 Diagrama de Hjulstrom

Com os resultados da análise granulométrica do leito do rio (Tabela 6) foi possível calcular o diâmetro médio das partículas (Equação 4), em mm, que é um dos dados de entrada do diagrama de Hjulstrom (Figura 38), juntamente com a velocidade de escoamento do manancial, em cm/s.

Tabela 6: Resultados da análise granulométrica do leito do rio.

Peneira (mm)	Material Retido (g)	Xi	dmpi	xi/dmpi
4,80	36,00	0,06	5,54	0,01
2,00	109,79	0,17	2,19	0,08
1,19	81,71	0,13	1,54	0,08
0,59	88,82	0,14	0,84	0,17
0,42	54,12	0,09	0,50	0,17
0,21	130,28	0,21	0,30	0,69
0,15	120,01	0,19	0,18	1,07
0,074	41,82	0,07	0,11	0,63
Σ	662,55	1,05		2,90

$$d_{mp} = \frac{1}{\sum \frac{x_i}{d_{mpi}}} \quad (4)$$

$$d_{mp} = \frac{1}{\sum \frac{x_i}{d_{mpi}}} = \frac{1}{2,9} = 0,34 \text{ mm}$$

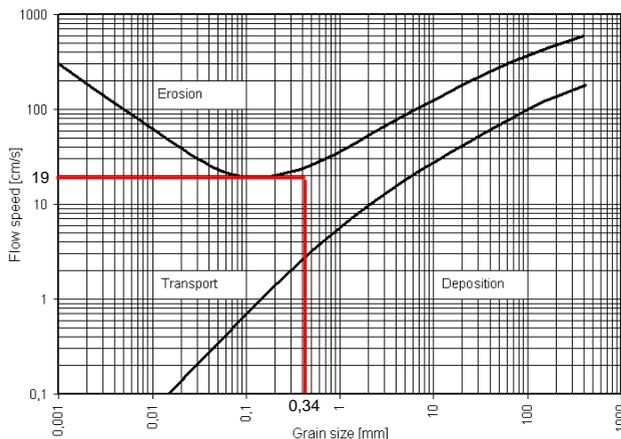
Onde:

d_{mp} : diâmetro médio das partículas (mm);

x_i : fração mássica retida em cada peneira;

d_{mpi} : diâmetro médio das partículas em cada peneira (mm).

Figura 38: Resultado do diagrama de Hjulstrom.



O diagrama de Hjulstrom demonstrou que a condição de fluxo do Rio Belo é de transporte de sedimentos, para o diâmetro médio encontrado, bem próximo de um comportamento de erosão. É importante salientar que a medição de velocidade foi realizada em um dia com fluxo médio, ou seja, um fluxo intermediário entre um nível baixo e elevado. Foi observado que em dias de chuva intensa o nível do manancial se eleva de 0,7 a 1,0 m em um curto intervalo de tempo. Nestas variações a vazão aumenta consideravelmente e a condição do corpo d'água possivelmente passa a ser de erosão. Foi observado também que durante períodos de estiagem o rio apresentava menor vazão e nível de água mais baixo. Possivelmente o Rio Belo alterna entre condições de deposição (períodos de estiagem e nível de água baixo), transporte (nível médio) e erosão (períodos de chuva e nível de água elevado), as quais favorecem a redução do processo de colmatação da margem, conforme reportado por Grischek et al. (2007).

Dessa forma, em termos de fluxo de escoamento e granulometria do leito do rio o manancial também apresentou condição favorável à aplicação da técnica de FM.

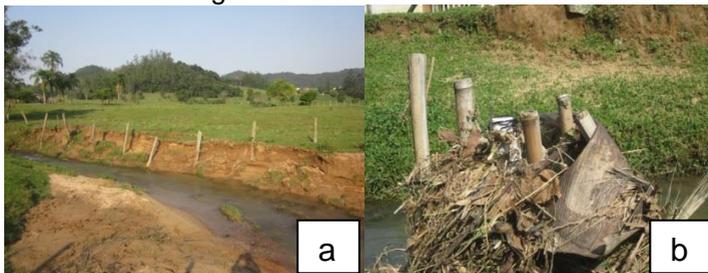
Durante o período de estudos foi possível observar alguns eventos de elevação de nível do Rio Belo. Nas Figuras 39 e 40 podem ser observados episódios de cheia que ocorreram no manancial.

Figura 39: Piezômetro removido após evento de cheia no rio Belo.



Observa-se na Figura 39, o primeiro episódio de cheia após a instalação dos piezômetros. É possível notar que o piezômetro foi removido de seu lugar de instalação devido à grande força de arraste da água do rio.

Figura 40: (a) Erosão causada por um evento de cheia. (b) Piezômetro com vestígios de um evento de cheia do rio Belo.



Na Figura 40 é possível observar outro episódio de cheia de grande magnitude que ocasionou erosão nas margens do rio, mas que não arrancou o piezômetro reconstruído na margem do rio.

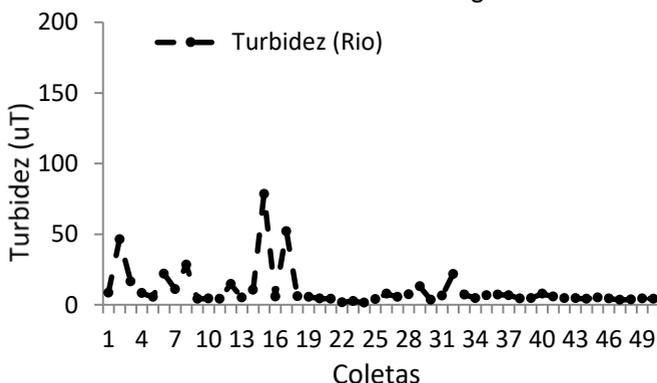
6.2.5 Monitoramento da turbidez da água do manancial

Os resultados das coletas manuais de água para caracterização da turbidez do manancial, realizadas quinzenalmente no período de Maio de 2016 a Setembro de 2017 (Tabela 7), podem ser observados na Figura 41.

Tabela 7: Relação de datas de coletas de água quinzenais.

Coletas	Mês/Ano	Estação
1	Maio/2016	Outono
2, 3	Junho/2016	Outono
4, 5	Julho/2016	Inverno
6, 7	Agosto/2016	Inverno
8, 9	Setembro/2016	Inverno
10, 11	Outubro/2016	Primavera
12, 13	Novembro/2016	Primavera
14, 15	Dezembro/2016	Primavera
16	Janeiro/2017	Verão
17, 18	Fevereiro/2017	Verão
19, 20	Março/2017	Verão
21, 22	Abril/2017	Outono
23, 24	Maio/2017	Outono
25	Junho/2017	Inverno
26, 27	Julho/2017	Inverno
28	Agosto/2017	Inverno
29	Setembro 2017	Inverno

Figura 41: Monitoramento da turbidez da água do rio por meio de coletas manuais de água

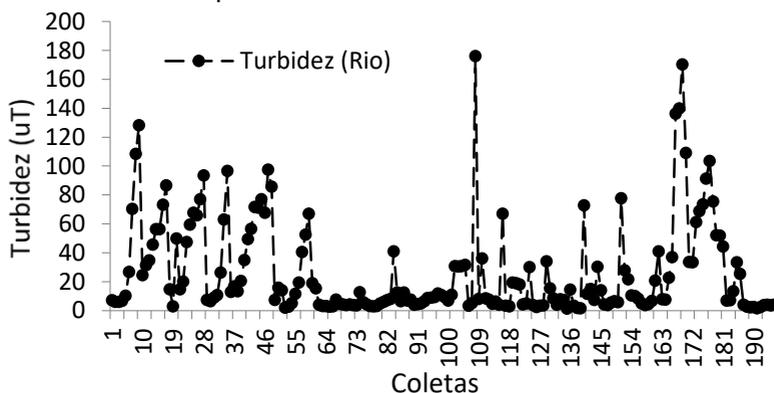


Os dados de turbidez coletados pela sonda autônoma, programada para coletas horárias, no período de Julho de 2016 a Agosto de 2017 (Tabela 8) podem ser observados na Figura 42. É importante destacar que os dados apresentados na Figura 42, representam uma média diária das coletas horárias e que as coletas não foram ininterruptas, ou seja, houve algumas falhas na coleta de dados em alguns dias devido à falta de bateria na sonda ou manutenção da mesma.

Tabela 8: Relação de datas de coletas diárias com sonda autônoma.

Coletas	Mês/Ano	Estação
1 - 14	Julho/2016	Outono
15 - 35	Agosto/2016	Inverno
36 - 61	Setembro/2016	Inverno
62 - 85	Outubro/2016	Primavera
86 - 108	Novembro/2016	Primavera
109 - 123	Dezembro/2016	Primavera
124 - 138	Janeiro/2017	Verão
139 - 143	Fevereiro/2017	Verão
144 - 148	Março/2017	Verão
149 - 155	Abril/2017	Outono
156 - 166	Mai/2017	Outono
167 - 185	Junho/2017	Inverno
186 - 196	Julho/2017	Inverno

Figura 42: Monitoramento diário da turbidez da água do rio por meio de sonda autônoma



A partir das Figuras 41 e 42 é possível observar que as coletas manuais apesar de terem sido realizadas de forma contínua e apresentar alguns picos de turbidez não caracterizaram o comportamento deste parâmetro, o que de certa forma era de se esperar, pois as visitas de campo eram preferencialmente em dias sem chuva, devido à logística de viagem. Apesar de algumas falhas nas coletas de dados pela sonda autônoma, o comportamento da turbidez no manancial foi retratado de forma mais realista, apresentando picos de turbidez mais frequentes. A Tabela 9 apresenta a diferença entre as coletas manuais e da sonda autônoma.

Tabela 9: Diferença entre os dados de turbidez de coletas diárias e quinzenais.

Turbidez (uT)	Coletas Quinzenais (N=50)	Coletas Diárias (N=196)
Média (N)	10,3	24,0
Mediana	5,6	10,4
Intervalo (mín-máx)	1,4 – 78,5	1,3 – 176,0
Desvio-Padrão	13,9	22,2

A partir da Tabela 9 é possível notar que o valor da média (24,0 uT) das coletas diárias foi mais que o dobro da média das coletas quinzenais (10,3 uT), assim como a mediana. Nas coletas diárias houve mais eventos de turbidez elevada e isso fez com que os valores da média e mediana dessas coletas fossem maiores quando comparados às coletas quinzenais. O valor máximo de turbidez (176 uT) encontrado nas coletas diárias também foi maior do que nas coletas quinzenais (78,5 uT). Nas coletas diárias foi possível coletar dados de turbidez elevada em diversos eventos, visto que o número de coletas foi superior (N=196) ao de coletas quinzenais (N=50). Na Figura 43 é possível notar a aparência da água do rio Belo em um dia de elevada turbidez.

Figura 43: Detalhe do rio Belo em um dia com elevada turbidez na água.



6.3 Caracterização do solo e subsolo

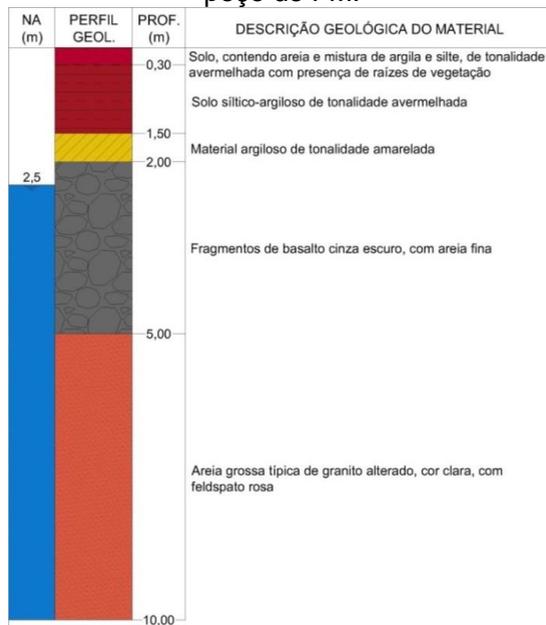
6.3.1 Perfis Geológicos

A empresa que realizou a sondagem do solo e subsolo em campo forneceu os perfis geológicos de cada ponto (ANEXO 1). Os perfis geológicos dos pontos da sondagem foram similares entre si e na Figura 44 pode ser observado o perfil geológico geral encontrado na área de implantação do poço de FM.

O perfil do terreno apresentado na Figura 44, demonstra a existência de um solo com argila e silte em sua composição (até 2,0 m de profundidade), seguido de uma camada de rochas de basalto (seixo de rio) e areia (2,0 a 5,0 m de profundidade) e mais profundamente uma camada de areia grossa (5,0 a 10 m de profundidade). O nível da água do aquífero apresentou uma profundidade média de 2,5 m, o que indica que a mesma percola a partir da camada de rochas e areia.

Segundo Grischek et al. (2007) aquíferos compostos por materiais de granulometria mais grossa são preferíveis para aplicação da FM, pois são mais propícios à infiltração que materiais finos. Dessa forma, os resultados da sondagem em campo demonstraram que o solo/subsolo do local escolhido apresenta características favoráveis, com base no perfil geológico, para implantação do sistema de FM.

Figura 44: Perfil geológico do subsolo do local de implantação do poço de FM.



6.3.2 Análises Granulométricas

A composição granulométrica das camadas do solo/subsolo, coletadas durante a sondagem, resultantes dos ensaios granulométricos, segue descrita na Tabela 10. Os constituintes mais expressivos de cada camada foram destacados.

Os resultados apresentados na Tabela 10 são médias dos 7 pontos amostrados para cada camada (profundidade). No APÊNCICE C encontram-se os resultados das análises granulométricas dos 7 pontos com suas respectivas profundidades.

Tabela 10: Composição granulométrica de cada ponto de sondagem do solo/subsolo do local de implantação do poço de FM.

Composição (%)	Camadas (Profundidades)									
	A (0,0 – 0,3m)		B (0,3 – 1,5m)		C (1,5 – 2,0m)		D (5,0 – 10,0m)			
	Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.
Argila + Silte	9,36	8,60	19,08	9,14	15,16	6,59	2,36	2,07		
Areia Fina	31,77	13,40	45,19	9,55	46,36	9,16	9,17	3,54		
Areia Média	29,19	6,95	20,50	6,51	24,62	6,53	22,51	10,40		
Areia Grossa	20,82	15,26	9,75	6,47	11,26	6,47	52,67	5,86		
Pedregulho Fino	8,62	7,57	5,49	3,19	2,61	3,75	13,30	12,09		

Na camada de 2,0 a 5,0 m, composto por basalto (seixo rolado) e areia, não foi possível realizar coleta de amostra de solo, pois durante a sondagem as rochas foram quebradas alterando a composição original do material. Dessa forma não foram realizadas análises granulométricas e químicas do solo nesta camada.

A partir da análise da Tabela 10 é possível observar a grande porcentagem de materiais finos (argila, silte e areia fina) nas camadas superiores A, B e C (0,0 – 2,0m), mas também a presença de areia média e grossa. Já na camada mais inferior, por onde a água percola houve a predominância de materiais grossos (areia média, grossa e pedregulho fino).

As frações de amostra de solo das camadas B e D retidas em cada peneira durante as análises granulométricas podem ser observadas na Figura 45.

Figura 45: Frações de partículas retidas nas peneiras das camadas B e D.



Analisando a Figura 45 foi possível confirmar os resultados encontrados nas análises granulométricas, onde na camada B a quantidade de materiais finos é muito maior que de materiais grossos e na camada D a relação contrária é encontrada, maior quantidade de materiais grossos e menor quantidade de materiais finos.

A composição do material do aquífero é um fator determinante na escolha de um local para implantação da técnica de FM. São preferíveis locais, onde o aquífero seja composto por sedimentos grossos, como areia grossa e pedregulho, pois proporcionam coeficientes de permeabilidades mais propícios e favorecem a infiltração da água do manancial (GRISCHEK et al., 2007).

O perfil geológico do terreno em conjunto com as análises granulométricas do solo/subsolo e do leito do rio

confirmam as características favoráveis do local para implantação de um sistema de tratamento de água por FM.

6.3.3 Análises Químicas do Solo

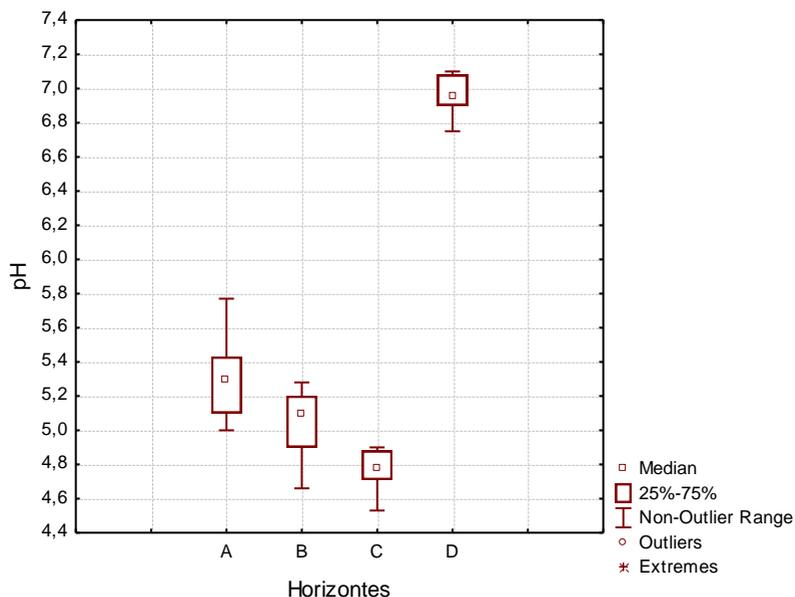
Os resultados das análises químicas do solo seguem descritos na Tabela 11.

Tabela 11: Resultado das análises físico-químicas do solo/subsolo da área de estudo.

Parâmetros	Camadas (Profundidades)							
	A (0,0 – 0,3m)		B (0,3 – 1,5m)		C (1,5 – 2,0m)		D (5,0 – 10,0m)	
	Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.
pH	5,30	0,25	5,05	0,21	4,76	0,17	6,96	0,13
COT (g/kg)	10,95	5,69	6,87	2,96	8,97	4,85	2,42	2,21
Fe (g/kg)	5,12	2,88	4,07	2,73	3,46	1,61	0,99	0,62
Al (cmol/dm³)	1,52	1,07	2,15	1,11	2,56	1,07	0,18	0,15
Mn (mg/dm³)	37,07	32,31	35,43	40,62	57,80	39,63	19,37	20,97

Observa-se na Tabela 11 que o pH do solo na maior parte dos pontos analisados apresentou a tendência de ser mais baixo (ácido) nas camadas superficiais e mais elevado na camada mais inferior, conforme pode ser observado na Figura 46. Segundo Sposito (1989), o solo pode ser naturalmente ácido devido ao constante suprimento de H^+ , proveniente da dissociação do CO_2 do ar no solo e também devido à percolação da água da chuva (naturalmente ácida). Em ambas as situações, a acidificação do solo é proveniente de fatores de superfície, o que explica o pH mais ácido nas camadas superficiais do solo. Além destes fatores pode-se adicionar a liberação de gás carbônico resultante da decomposição de material orgânico, também proveniente da superfície do solo. Borba et al. (2005) avaliaram a variação dos parâmetros químicos de um solo ao longo do perfil de 5,0 m de profundidade e encontraram pH de 5,5 e 6,4 a 1 m e 5 m de profundidade, respectivamente.

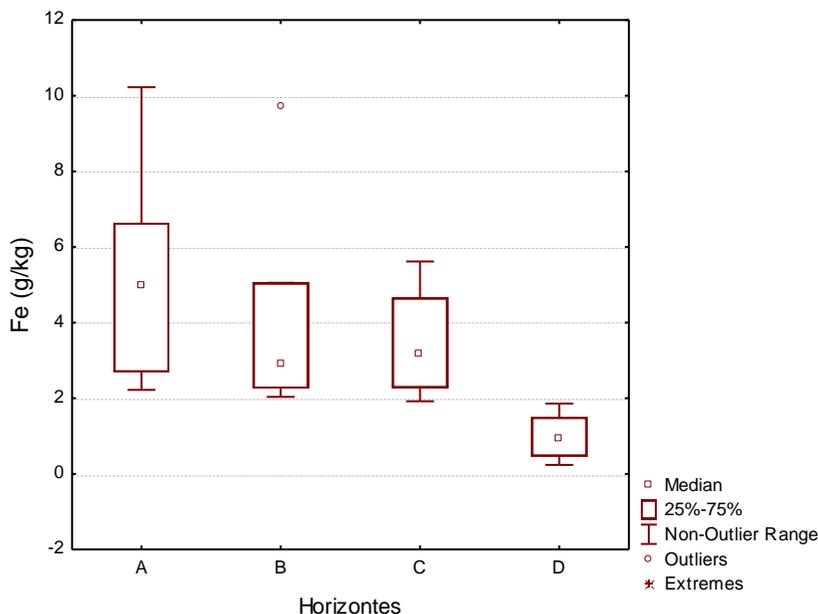
Figura 46: Box Plot da variação do pH ao longo do perfil do solo.



Com relação às análises de ferro, este parâmetro apresentou valores mais elevados nas camadas superficiais (A,

B e C) e valores mais baixos na camada mais inferior (D), conforme apresentado na Figura 47.

Figura 47: Box Plot da variação do ferro ao longo do perfil do solo.

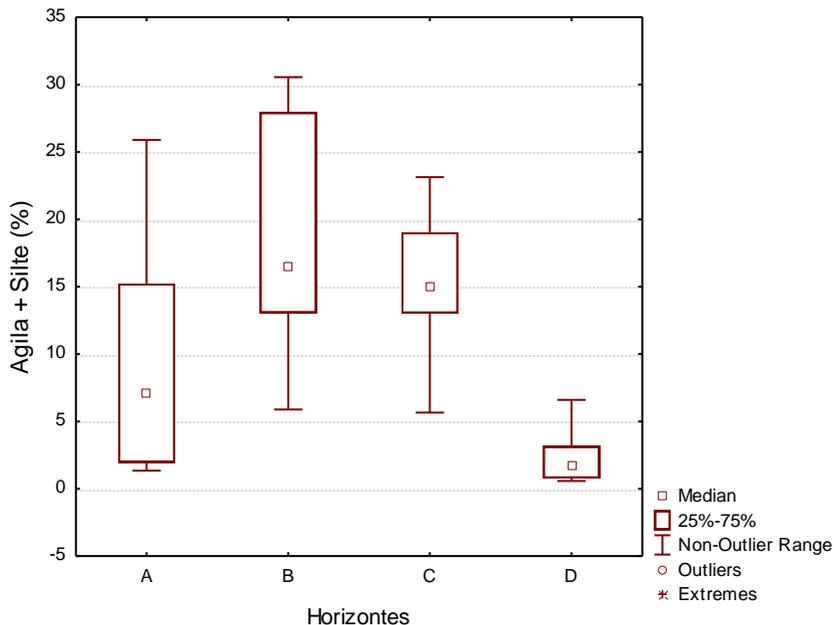


Na camada A este elemento foi mais abundante, apresentou média de 5,18 g/kg e variou de 2,2 a 10,2 g/kg. Nas camadas B e C as médias foram similares, 4,07 e 3,46 g/kg respectivamente. Na camada D a média foi de 0,99 mg/kg.

O motivo da maior predominância de ferro nas camadas superficiais possivelmente se deve ao fato deste elemento se associar com partículas de argila, formando os óxidos e hidróxidos de ferro (MELFI, PEDRO e VOLKOFF, 1979; HYPOLITO, ANDRADE e EZAKI, 2011; MORUZZI e REALI, 2012). Como a camada D foi a camada com menos argila em sua composição, faz sentido que haja menor quantidade de ferro também.

A distribuição das partículas de argila e silte ao longo do perfil do solo pode ser observada na Figura 48.

Figura 48: Box Plot da variação da argila e silte ao longo do perfil do solo.

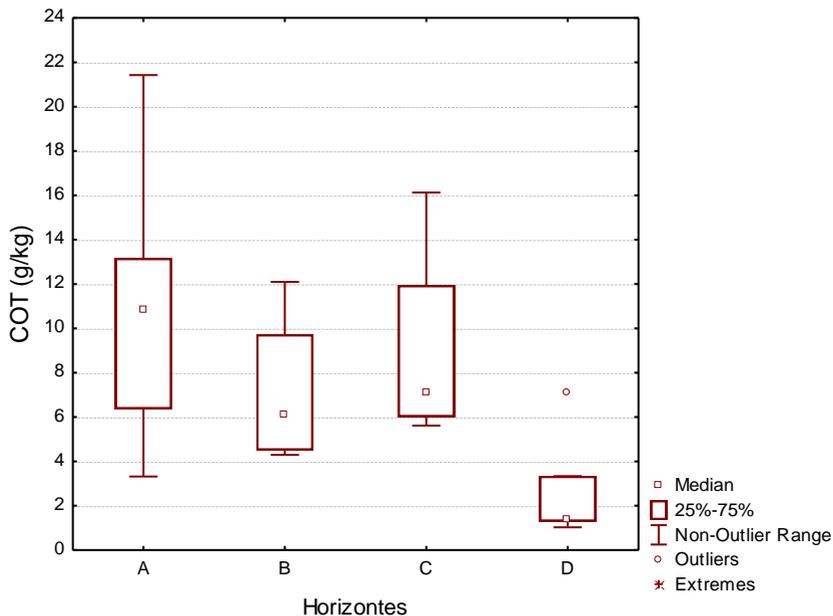


O perfil do solo geralmente é dividido em horizontes, por apresentar camadas de diferente composição, textura e estrutura. As camadas mais superficiais apresentam um material mais intemperizado e com resíduos orgânicos, já as mais profundas são constituídas de um material pouco modificado pelo intemperismo. Entre estes horizontes, em uma camada intermediária, ocorre o acúmulo de materiais oriundos do horizonte acima como argilas, óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio (HYPOLITO, ANDRADE e EZAKI, 2011; HEINECK, 2012).

Os óxidos de ferro são responsáveis pela pigmentação avermelhada, amarronzada ou mesmo amarelada do solo. Os principais fatores que favorecem a formação dos óxidos de ferro são baixas temperaturas, elevado grau de umidade, elevado teor de matéria orgânica e valores mais baixos de pH (SCHWERTMANN e TAYLOR, 1989; MELO, 2001).

O comportamento do Carbono Orgânico Total (COT) ao longo do perfil do solo pode ser observado na Figura 49.

Figura 49: Box Plot da variação do COT ao longo do perfil do solo.

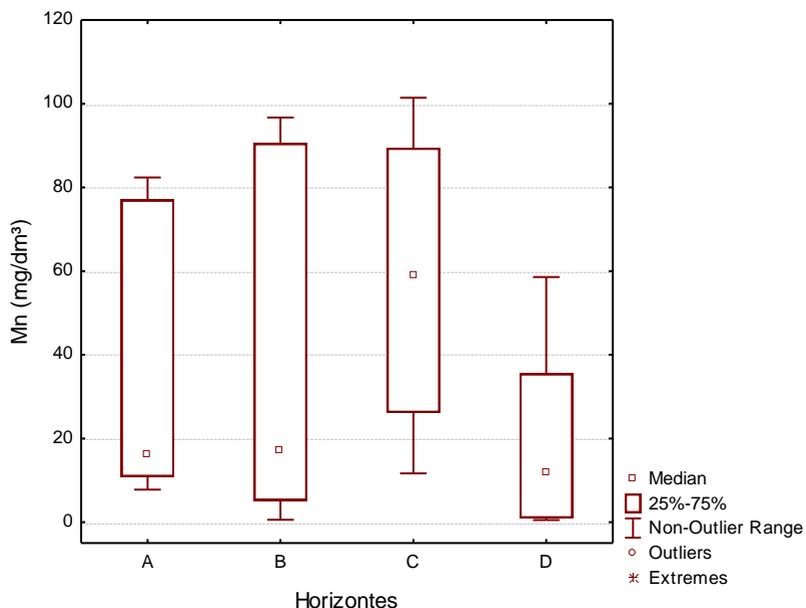


Observa-se a partir da Figura 49 que a camada mais superficial (A) apresentou maiores concentrações de COT, com valor médio de 10,95 g/kg e variando de 3,3 a 22,3 g/kg. As camadas B e C apresentaram valores médios de 6,87 e 8,97 g/kg respectivamente. As menores concentrações de COT foram encontradas na camada mais inferior (D), com média de 2,4 g/kg. Os resultados para este parâmetro são relevantes, visto que a matéria orgânica é incorporada ao solo a partir da superfície para então chegar às camadas intermediárias e inferiores.

Os resultados encontrados neste estudo sobre a variação do ferro amorfo e da matéria orgânica (COT) ao longo do perfil do solo estão de acordo com a pesquisa de Borba et al. (2005), onde tais parâmetros tendem a reduzir sua concentração ao longo da profundidade do solo, ou seja, maiores concentrações nas camadas mais superficiais e menores concentrações nas camadas mais profundas.

O manganês apresentou variação ao longo do perfil do solo em todas as camadas, porém não apresentou uma tendência como os outros parâmetros conforme pode ser observado na Figura 50.

Figura 50: Box Plot da variação do manganês ao longo do perfil do solo.



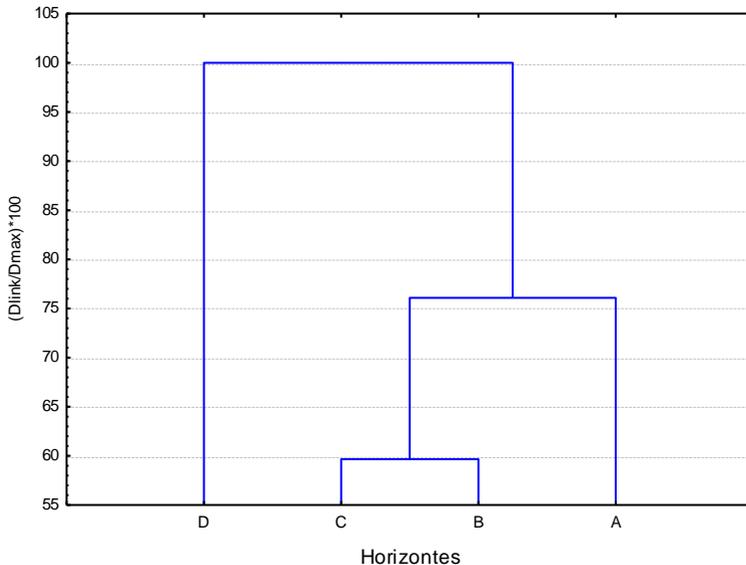
6.3.4 Análises estatísticas

A partir dos resultados das análises granulométricas (composição física) e análises químicas (composição química) dos horizontes do perfil do solo foram realizadas as análises estatísticas dos dados.

6.3.4.1 Cluster Analysis

A análise de agrupamento (*Cluster Analysis*) realizou o agrupamento dos horizontes mais similares entre si e gerou o gráfico da Figura 51.

Figura 51: Análise de agrupamento dos horizontes do solo.



Esta análise formou três grupos, onde os horizontes B e C foram agrupados em um único grupo, demonstrando serem similares entre si, e logo após esse agrupamento o horizonte que se mostrou mais similar ao primeiro grupo foi o horizonte A. O horizonte D foi o menos similar ou mais diferente dos demais horizontes.

Os resultados da análise de agrupamento estão em consonância com os resultados das análises químicas e granulométricas do solo, onde o horizonte A apresenta similaridade com os horizontes B e C, mas também apresenta diferenças, possivelmente pelo fato de ser a camada mais superficial e estar mais exposto às intempéries. O horizonte D demonstrou em todas as análises ser totalmente diferente dos demais horizontes.

6.3.4.2 Análise de Variância (ANOVA)

A análise de variância considerou duas hipóteses sobre os dados:

- H_0 (Hipótese nula): não há diferença estatística significativa entre os dados das camadas de solo;

- H_1 : (Hipótese alternativa): há diferença estatística significativa entre os dados das camadas de solo.

A ANOVA foi aplicada a alguns parâmetros químicos (ferro e COT) e físicos (argila+silte e areia grossa). Estes parâmetros foram escolhidos, pois apresentaram variações definidas ao longo do perfil do solo. Foi considerado um nível de significância de 95% ($\alpha=0,05$) na presente análise e os resultados seguem descritos na Tabela 12.

Tabela 12: Resultados da Análise de Variância (ANOVA).

	Ferro	COT	Argila+ Silte	Areia grossa
p-valor	0,002	0,004	0,0002	0,00001

Para todos os parâmetros a ANOVA resultou em um $p < 0,05$, conforme pode ser observado na Tabela 12. Nesse caso deve-se descartar a hipótese nula de que não há diferença significativa entre os dados. Este resultado mostra que a hipótese alternativa deve ser aceita e há diferença significativa entre as camadas de solo, com ao menos dois grupos distintos.

6.3.5 Condutividade hidráulica

O ensaio para a determinação da condutividade hidráulica em campo foi realizado em 3 piezômetros (P3, P6 e P7) e os valores encontrados, assim como a média, são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13: Resultados dos ensaios de permeabilidade em campo.

Condutividade hidráulica	Piezômetros			Média
	P3	P6	P7	
k (cm/s)	$7,6 \cdot 10^{-3}$	$3,7 \cdot 10^{-3}$	$4,2 \cdot 10^{-3}$	$5,2 \cdot 10^{-3}$

Conforme pode ser observado na Tabela 13, os valores de condutividade hidráulica apresentaram média de $5,2 \cdot 10^{-3}$ cm/s. Os coeficientes encontrados são típicos de areia média (BOUWER, 1999), o que está em consonância com os resultados da sondagem e dos ensaios granulométricos que demonstraram uma variação de constituintes ao longo do perfil do solo, mas

com predominância de areia média e grossa na camada D (5,0 a 10,0 m de profundidade).

Paiva (2009) e Esquivel (2012) realizaram a estimativa da condutividade hidráulica por meio do *software Aquifer Test 3.5* e encontraram valores da ordem de 10^{-4} cm/s para mistura de areia+silte e areia fina, respectivamente. Soares (2009) realizou a estimativa de condutividade hidráulica por meio de permeâmetro de nível e encontrou valores da ordem de 10^{-2} cm/s para mistura de areia fina+areia grossa.

Fox (2004) analisou alguns testes utilizados para estimar a condutividade hidráulica (análises granulométricas, *slugtest*, teste de permeâmetro *in situ*, medidas de fluxo de infiltração) e verificou que a variabilidade espacial entre os pontos é maior que a variabilidade entre as diferentes técnicas.

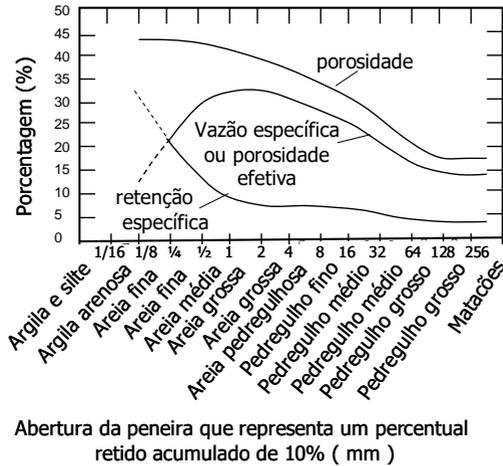
O valor da condutividade hidráulica encontrado nesta pesquisa está de acordo com os valores encontrados na bibliografia e também com as recomendações de Grischek et al. (2007) sobre locais propícios à implantação de sistemas de FM, que indicam coeficientes da ordem de 10^{-4} a 10^{-2} .

6.3.6 Porosidade efetiva

A porosidade efetiva estimada por meio de ensaio de coluna com um traçador conservativo resultou em 29%. O gráfico resultante do ensaio de porosidade pode ser visualizado no APÊNDICE D.

Outra forma de estimar a porosidade efetiva é a partir da granulometria do material (D90), por meio do gráfico da Figura 52. O diâmetro D90 encontrado na amostra de solo foi de 1,9 mm (areia grossa) que corresponde a uma porosidade efetiva de aproximadamente 32,5%.

Figura 52: Gráfico de relação entre porosidade e granulometria dos constituintes do solo.



Sendo assim, as porosidades efetivas encontradas nos dois ensaios são similares e estão em consonância com os resultados da sondagem em campo, ensaios granulométricos e coeficiente de permeabilidade.

6.4 Avaliação do tempo de percurso da água

O tempo de percurso da água foi diferente para cada etapa do bombeamento, pois os rebaixamentos de nível de água no interior do poço de FM foram diferentes, em função da vazão de bombeamento.

Na primeira etapa de bombeamento, utilizando as bombas solares, foi alcançado um rebaixamento máximo de 2 m, e com isso o tempo de percurso entre o manancial e o poço de FM foi de 32 dias. Na segunda etapa, utilizando a bomba elétrica, o rebaixamento foi de 4 m e o tempo de percurso correspondente foi de 16 dias. No entanto, como o bombeamento foi intermitente em ambas as etapas de bombeamento, o tempo de percurso possivelmente foi menor.

Dash et al. (2008), recomendam um tempo de residência da água, em sistemas de FM, de 60 dias para inativação de bactérias patogênicas. Schoenheinz et al. (2002) ressaltam que

tempos de residências maiores permitem uma melhor remoção de matéria orgânica. Porém, segundo Ray et al. (2002) o tipo de solo e as condições de operação influenciam na qualidade da água filtrada em margem.

Apesar do tempo de residência, encontrado nesta pesquisa, ter sido menor que o recomendado pela literatura, a qualidade da água filtrada em margem foi satisfatória, reforçando que as condições de operação e características locais são determinantes sobre a qualidade da água.

6.5 Teste de bombeamento e capacidade de produção do poço de FM

O teste de bombeamento realizado pela empresa que perfurou o poço tubular de FM resultou em uma vazão de exploração de 1,1 m³/h associado a um rebaixamento de 7 mm no nível estático do poço.

As 3 bombas solares em série produziam uma vazão de aproximadamente 1,5 m³/h em condições de céu claro, sem nuvens. Logo, uma vazão compatível para realizar um rebaixamento do nível da água dentro do poço semelhante ao encontrado no teste de bombeamento. Inicialmente foi conseguido um rebaixamento de aproximadamente 3 m, porém com o passar do tempo o rebaixamento foi reduzindo, com a mesma vazão de exploração, chegando no máximo 2,5 m no final da primeira etapa do bombeamento. Acredita-se que ao final da perfuração do poço, mesmo após a limpeza do mesmo com injeção de ar, os poros do subsolo do entorno ficaram preenchidos com um material fino (mistura de silte e argila) e com o passar do tempo com bombeamento diário esse material foi sendo 'lavado' e assim a capacidade de produção do poço foi aumentando. No fundo do reservatório superior foi observado a presença deste material fino durante os primeiros meses de bombeamento.

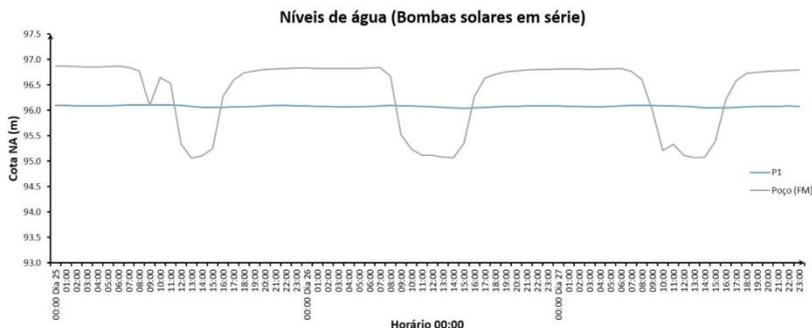
Devido a este fato foi utilizada, em outra etapa do estudo, uma bomba elétrica submersível de maior potência ($\frac{3}{4}$ cv), no intuito de realizar um maior rebaixamento do nível freático do poço, induzir maior contribuição do manancial superficial e verificar se com o aumento dessa contribuição há diferença na qualidade da água filtrada em margem.

6.6 Avaliação do rebaixamento do nível de água no poço de FM

Durante os experimentos de avaliação do rebaixamento do nível de água no poço de FM, foi observado que a vazão de bombeamento das bombas solares é diretamente proporcional à radiação solar, ou seja, quanto maior a radiação solar no momento maior a vazão. Durante um dia a vazão de bombeamento variava bastante, pois mesmo em um dia de sol com vazão máxima de bombeamento, quando uma nuvem encobria o sol a vazão diminuía drasticamente. O acompanhamento do nível de água no poço de FM, em 3 dias de sol (25 – 27 de Outubro de 2016) utilizando as bombas solares, em relação ao nível do manancial (P1), pode ser observado na Figura 53.

O rebaixamento máximo durante o bombeamento solar ocorre por volta das 12h00min. É possível perceber pela Figura 53 que o rebaixamento máximo foi de 2 m abaixo do nível estático e aproximadamente 1 m abaixo do nível do manancial.

Figura 53: Monitoramento dos níveis de água (poço e rio) utilizando bombas solares (300 W) no bombeamento.



Foi possível observar ainda o comportamento do nível da água no poço de FM, sob condições de bombeamento intermitente, onde a cada final de ciclo o nível se reestabelece. No caso da FM, esse aspecto pode ser positivo em termos de qualidade de água, visto que a cada final de ciclo de bombeamento, a água no entorno do poço recebe uma diluição da água presente no aquífero.

A bomba elétrica foi programada por meio de um *timer* para que fosse ligada às 8h00min e desligada às 17h00min, mantendo o mesmo padrão de bombeamento intermitente e simulando uma bomba solar de maior potência. O acompanhamento do nível de água no poço de FM, utilizando a bomba elétrica, em relação ao nível do manancial pode ser observado na Figura 54, durante 3 dias de bombeamento (07 – 09 de Junho de 2017).

Figura 54: Monitoramento dos níveis de água (poço e rio) utilizando bomba elétrica (3/4 cv) no bombeamento.

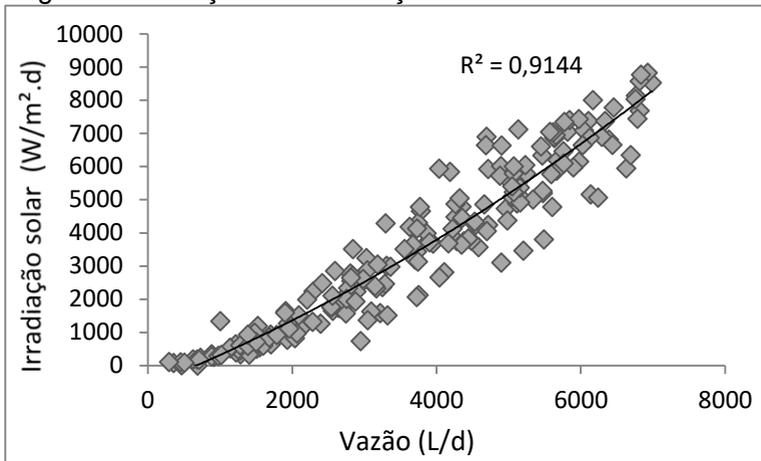


A bomba elétrica causou um maior rebaixamento no nível estático do poço de FM, como era esperado, pois a potência era maior que das bombas solares em série (Figura 54). A vazão da bomba elétrica era de aproximadamente 3,4 m³/h, que causou um rebaixamento de 4 m abaixo do nível estático do poço e de aproximadamente 2,5 m abaixo do nível de água do manancial.

6.7 Avaliação do bombeamento solar aplicado à FM

A vazão de água bombeada do poço de FM apresentou relação direta com a irradiação solar, conforme pode ser observado na Figura 55, e também com o rebaixamento do nível de água dentro do poço.

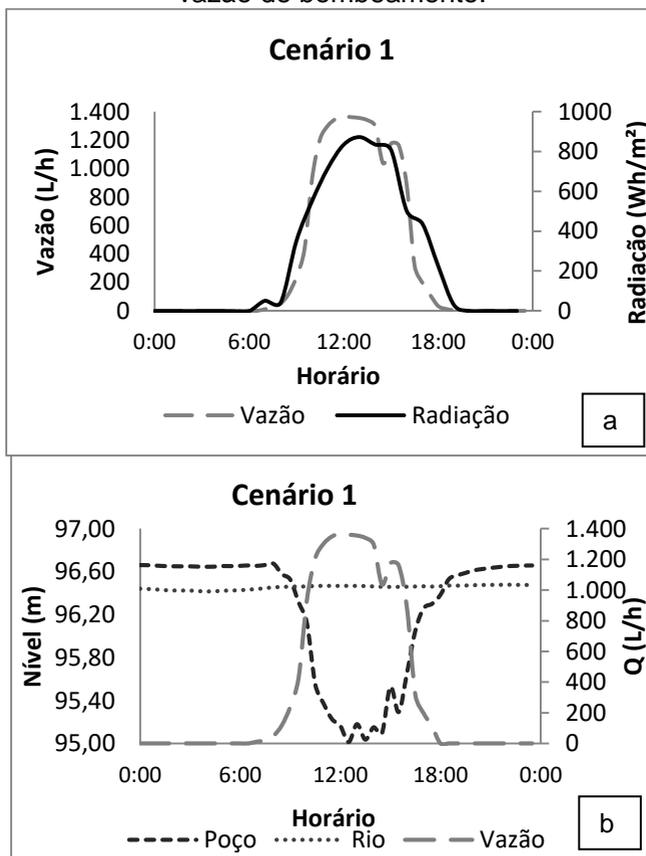
Figura 55: Relação entre radiação solar e vazão bombeada.



Foi possível observar uma correlação significativa entre a irradiação solar e a vazão bombeada, com $R^2 = 0,91$. A correlação encontrada apresentou ajuste à uma linha de tendência polinomial. Quanto maior a irradiação solar, maior a vazão bombeada, conseqüentemente maior o rebaixamento induzido e possivelmente maior a contribuição da água do manancial no poço de produção. Niedzialkoski et al. (2012) avaliaram um sistema de bombeamento fotovoltaico em Cascavel (PR) e encontraram correlação crescente ($R^2 = 0,98$) entre irradiação solar e volume bombeado. Fraidenraich e Vilela (1999) avaliaram um sistema de abastecimento de água, utilizando bombeamento fotovoltaico, em Inajá (PE) e também encontraram uma correlação positiva, ajustada a uma equação polinomial.

Nas Figuras 56 e 57 são apresentados dois cenários diferentes de irradiação solar, vazão de bombeamento e rebaixamento do nível de água no poço de FM. O cenário 1 (Figura 56) representa um dia de céu sem nuvens e radiação solar elevada, ou seja, um cenário favorável à FM com bombeamento solar. O cenário 2 (Figura 57) representa um dia de céu com nuvens e conseqüentemente menor radiação solar, ou seja, um cenário menos favorável à geração de energia solar para o bombeamento.

Figura 56: Cenário 1(Nov/16): a) relação entre radiação solar e vazão; b) Rebaixamento do nível da água do poço em função da vazão de bombeamento.



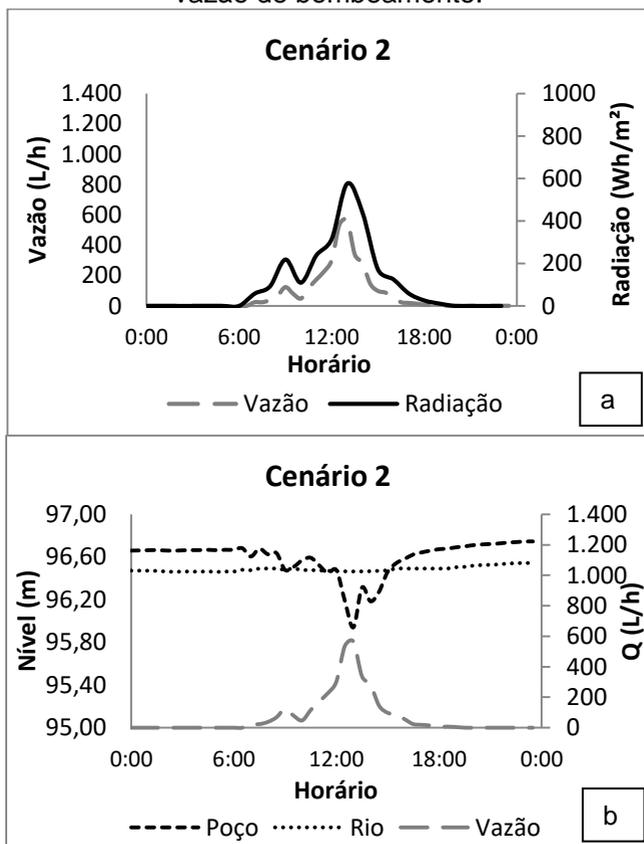
Por meio da análise da Figura 56a, é possível observar o comportamento do bombeamento em função da radiação solar. Os valores de radiação solar deste cenário são considerados satisfatórios, pois apresentam picos próximos de 1000 W/m² (radiação de referência), o que possibilitou picos de vazão de bombeamento de aproximadamente 1300 L/h.

A Figura 56b demonstra o efeito do bombeamento, apresentado na Figura 56a, sobre o rebaixamento do nível da água no poço de produção. O rebaixamento observado foi de

aproximadamente 1,70 m abaixo do nível estático da água do poço de FM.

A Figura 57, representa o cenário 2 e apresenta um dia com baixa radiação (pico próximo de 600 W/m².dia), conseqüentemente valores baixos de vazão de bombeamento (pico próximo de 600 L/h) e de rebaixamento do nível da água no poço de produção (aproximadamente 0,6 m).

Figura 57: Cenário 2 (Nov/16): a) relação entre radiação solar e vazão; b) Rebaixamento do nível da água do poço em função da vazão de bombeamento.



No cenário menos favorável (cenário 2), foi possível observar que além dos valores dos picos de radiação, bombeamento e rebaixamento serem menores que os

apresentados no cenário mais favorável, o tempo de permanência próximo dos valores de pico também foi menor.

O parâmetro RT é um produto do rebaixamento do nível da água no poço de FM e o período de permanência deste rebaixamento. Este parâmetro foi criado com o intuito de avaliar a relação entre o rebaixamento com a qualidade da água proveniente da FM.

Os valores do parâmetro RT foram organizados em ordem crescente (do cenário menos favorável ao mais favorável à FM) no sentido de avaliar o comportamento da turbidez na água do poço de FM frente ao aumento do rebaixamento do nível da água dentro do poço. A Tabela 14 demonstra, através de alguns exemplos, como os dados foram organizados. A Figura 58 mostra o comportamento da turbidez do rio e do poço de FM em relação ao aumento do parâmetro RT.

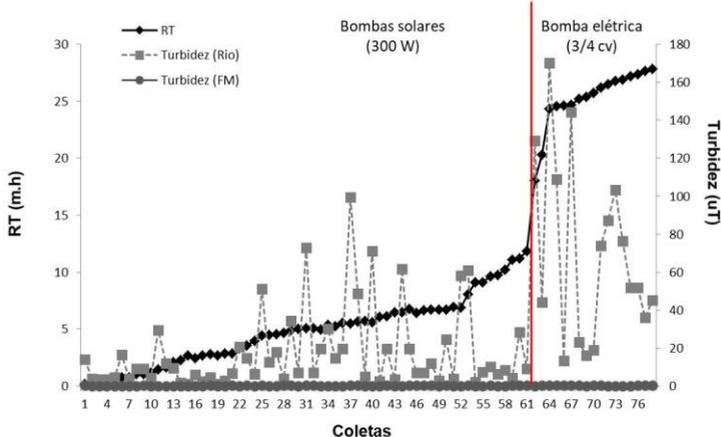
Pressupõe-se que quanto maior o valor do parâmetro RT, maior a contribuição do manancial para a água do poço de FM. Pois, quanto maior o rebaixamento do nível da água no poço de FM, maior o gradiente hidráulico em relação ao manancial e conseqüentemente maior a contribuição do manancial para a FM. Além disso, quanto maior período de permanência deste nível abaixo do nível do manancial, favorece também uma maior contribuição do manancial na FM.

Tabela 14: Dados do parâmetro RT em relação à turbidez da água do manancial e poço de FM.

Datas	R*(m)	T**(h)	RT	Turbidez	
				AB	FM
19/9/2016	0,74	1	0,74	16,4	0,2
17/11/2016	0,37	4	1,47	29,3	0,2
12/9/2016	0,84	6	5,06	72,9	0,3
16/9/2016	0,91	6	5,46	99,4	0,2
14/9/2016	1,01	8	8,05	61	0,4
10/11/2016	1,18	10	11,84	82	0,3
07/06/2017	2,73	9	24,55	108,0	0,3
19/06/2017	3,09	9	27,85	45,1	0,4

* Rebaixamento do nível da água do poço de FM em relação ao nível de água no rio; **Período em que o nível do poço de FM esteve abaixo do nível do rio.

Figura 58: Comportamento da turbidez do rio e do poço de FM, em relação ao aumento do RT.



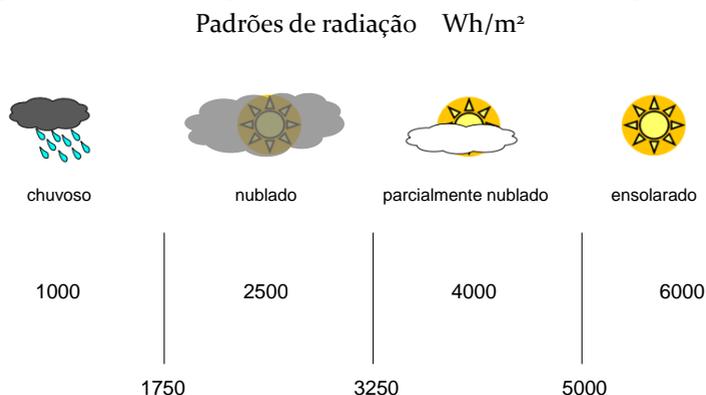
Por meio da análise da Figura 58 foi possível observar que a turbidez da água do rio sofre grande variação ao longo do tempo, apresentando valores elevados em diversas coletas (acima de 50 uT), devido principalmente às precipitações que propiciam aumento de vazão do corpo d'água e com isso um maior arraste de partículas. Analisando a turbidez da água do poço de FM, observou-se que esse parâmetro se manteve estável durante todo o período de estudo, com variação de 0,1 a 0,5 uT.

No período em que foi utilizada a bomba elétrica, que propicia maior vazão, resultou em um maior rebaixamento do nível de água no poço de FM e também um maior valor do índice RT, no entanto a turbidez não sofreu aumento. Isso demonstra que mesmo nos momentos em que houve maior contribuição do manancial (maiores valores de R.T) a turbidez da água do poço de FM não sofreu alterações. A FM se mostrou capaz de amortizar picos de turbidez do manancial, não transferindo para a água do poço.

6.8 Monitoramento da irradiação solar

A partir dos dados horários de irradiação solar foi possível realizar a classificação dos dias, em função da estação do ano, de acordo com a Figura 59.

Figura 59: Classificação dos dias em termos de radiação solar.



Fonte: Adaptado de Pinho e Galdino (2014).

A Figura 59 classifica os dias em chuvoso, nublado, parcialmente nublado e ensolarado em função da irradiação total diária observada e foi utilizada como referência para classificação dos dias.

A Tabela 15 mostra a distribuição de frequência dos dias de cada padrão de acordo com as estações do ano.

Tabela 15: Classificação dos dias em termos de radiação solar e estação do ano.

Classificação	Número de dias			
	Verão	Outono	Inverno	Primavera
Chuvoso	4	14	14	11
Nublado	30	32	23	25
Parc. Nublado	46	37	46	36
Ensolarado	11	8	11	18

A partir da análise da Tabela 15 é possível notar que o número de dias chuvosos no verão são pequenos, de acordo

com a classificação pela radiação solar, quando comparado à outras estações, mesmo sendo o verão a estação que apresenta o maior volume acumulado de chuvas do ano. Isso pode ser explicado pelo fato de que um comportamento típico de verão são dias de sol, com chuva no final da tarde. Logo, mesmo em um dia que ocorre uma precipitação de volume considerável é possível ter um período de radiação suficiente para classificar tal dia como nublado ou parcialmente nublado e não chuvoso.

No inverno, apesar de ser a estação com menos precipitação, de acordo com a classificação foi a estação mais chuvosa juntamente com o outono. Isso pode ser explicado pelo fato de no inverno os dias serem mais curtos e com isso dias nublados podem ser classificados como chuvosos, em função da irradiação solar. O inverno teve o mesmo número de dias ensolarados que o verão, o que pode ser explicado que nos dias mais frios do inverno são dias de céu aberto (sem nuvens) e por isso a classificação dos dias em ensolarados. No verão apesar das temperaturas mais elevadas, a maioria dos dias apresentam nuvens no céu.

A Tabela 16 apresenta a distribuição de frequência geral ao longo do ano em Orleans.

Tabela 16: Classificação da radiação em Orleans ao longo do ano.

Classificação	Chuvoso	Nublado	Parcialmente Nublado	Ensolarado
Número de dias	43	110	165	48
Porcentagem (%)	11,75%	30,05%	45,08%	13,11%

A partir da análise da Tabela 16 foi possível verificar que aproximadamente 45% dos dias em Orleans são considerados parcialmente nublados, 30% nublados, 13% ensolarados e 11% chuvosos.

Tendo em vista que a melhor condição para o bombeamento fotovoltaico é a predominância de dias ensolarados, Orleans não apresenta condições ideais para aplicação desta tecnologia.

Carvalho (2016) avaliou o comportamento do reservatório superior desta pesquisa, simulando uma demanda de água para 10 pessoas. O consumo foi simulado por meio de quatro válvulas

solenoides que eram abertas em períodos pré-definidos, comandadas por *timers*. O autor verificou que na maior parte do período o volume bombeado foi suficiente para suprir a demanda estipulada e poucos dias durante o ano o reservatório alcançou o volume morto, mesmo frente à essa adversidade climática da região. Dessa forma, é possível afirmar que o bombeamento fotovoltaico é passível de ser utilizado mesmo em locais que não apresentem condições ideais de irradiação solar, e ainda que a aplicabilidade do bombeamento fotovoltaico em locais com melhores condições de irradiação solar é ainda mais promissora.

6.9 Caracterização da água do manancial e do poço de FM

A água proveniente do poço de FM apresentou qualidade superior à água do manancial como é possível observar na Tabela 17.

Tabela 17: Resultados das análises físico-químicas e bacteriológicas da água bruta e tratada.

Parâmetros	Água Bruta (AB)			Água Tratada (FM)			Portaria 2914 MS
	Média (N=29)	Intervalo (min-max)	D.P.	Média (N=29)	Intervalo (min-max)	D.P.	
pH	6,8	6,1–7,6	0,4	6,3	5,7–6,6	0,22	6,0 – 9,0
COD (mg/L)	2,8	1,0 – 10,5	2,0	0,9	0,06 – 3,94	1,0	-
Oxigênio Dissolvido (mg/L)	7,8	7,1 – 9,0	0,45	5,1	4,2 – 5,8	0,44	-
Conductividade (μ S/cm)	72,3	57,1 – 92,2	7,7	95,7	73,7 – 153,6	16,8	-
Turbidez (uT)*	23,4	1,3 – 176,0	22,8	0,3	0,1 – 1,0	0,2	1,0*
Cor Aparente (uH)	94,5	30,0 – 468,0	89,3	4,9	0,0 – 44,0	9,5	15
Cor Verdadeira (uH)	22,7	3,0 – 105,0	21,6	0,4	0,0 – 6,0	1,4	-
Ferro Total (mg/L)	0,9	0,2 – 3,69	0,7	0,1	0,01 – 0,7	0,1	0,3
Coliformes Totais (NMP/100ml)	$1,1 \cdot 10^5$	$2,4 \cdot 10^3$ - $2,4 \cdot 10^5$	$8,4 \cdot 10^4$	15,3	0 – 90,7	27,9	ausência
<i>Escherichia Coli</i> (NMP/100ml)	$6,8 \cdot 10^3$	$6,9 \cdot 10^2$ - $3,1 \cdot 10^4$	$7,1 \cdot 10^3$	0	0	0	ausência

*Valor de turbidez recomendado pela Portaria nº 5/17, após filtração lenta.

O pH da água filtrada em margem foi menor que o da água bruta em todas as coletas. A água ao percolar no subsolo tende a ter seu pH reduzido, comportamento reportado também por outros autores (MONDARDO, 2009; MICHELAN, 2009; DASH et al, 2010; TYAGI et al, 2013; HAMDAM, SENSOY e MANSOUR, 2013; BLAVIER et al. 2014). As Figuras 60 e 61 apresentam o comportamento do parâmetro pH durante o período de estudo.

Figura 60: Comportamento do pH durante o período de estudo.

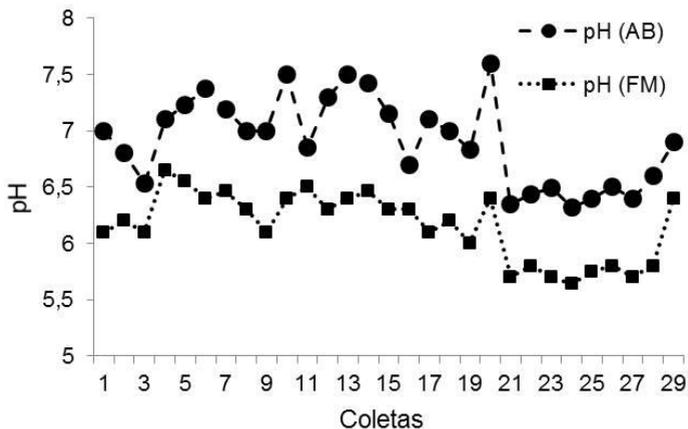
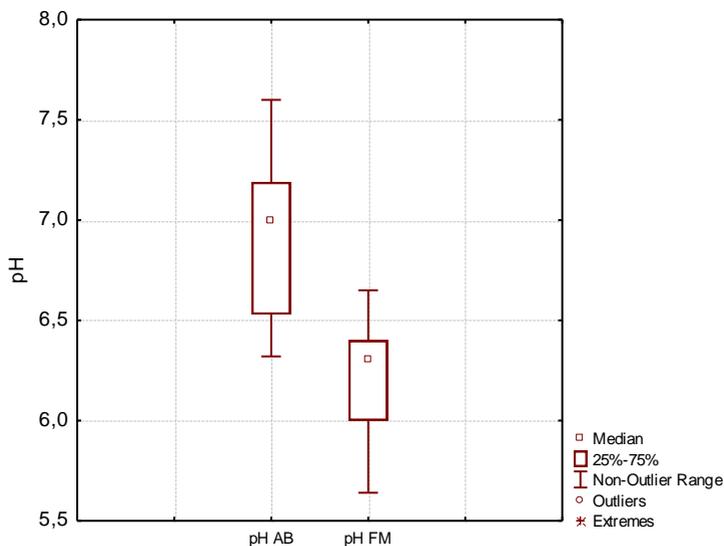


Figura 61: Gráfico Box Plot do pH durante o período de estudo.



Por meio da análise da Figura 60 é possível observar uma correlação entre o pH da AB e da FM, ou seja quando há um aumento ou redução no pH da AB, um comportamento semelhante pode ser observado nos valores de pH da FM, demonstrando a conexão hidráulica existente entre o manancial e o poço de FM. Aplicando a correlação não-paramétrica de Spearman foi encontrado um coeficiente de correlação significativa ($p < 0,05$) de 0,746 entre o pH da AB e FM. A Figura 61 demonstra que não houve grande variação nos valores do pH, tanto da água bruta quanto da água filtrada em margem.

A concentração de matéria orgânica dissolvida na água foi mensurada por meio do parâmetro Carbono Orgânico Dissolvido (COD). A concentração média de COD na água do manancial foi de 2,8 mg/L enquanto na água do poço de FM foi de 0,9 mg/L, o que corresponde a uma redução de 68%. A redução de COD por meio de FM também foi reportada por outros autores com eficiência satisfatória (DASH et al., 2008; MONDARDO, 2009; MICHELAN, 2009; SANDHU et al., 2011; ESQUIVEL, 2012; ROMERO et al., 2014; GHODEIF et al., 2016; ROMERO-ESQUIVEL et al., 2017). As Figuras 62 e 63

apresentam o comportamento do COD durante o período de estudo.

Figura 62: Comportamento do COD durante o período de estudo.

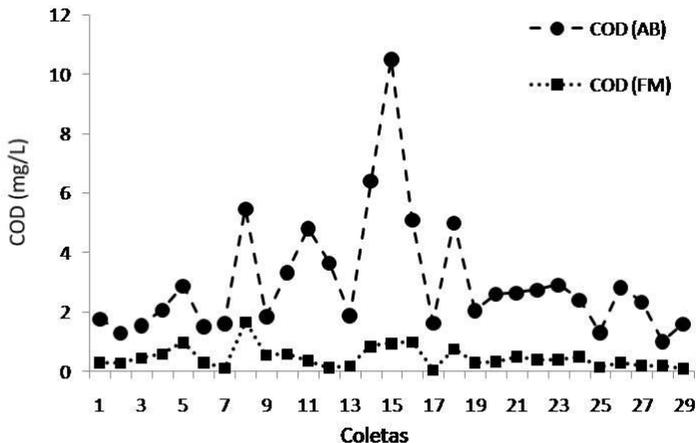
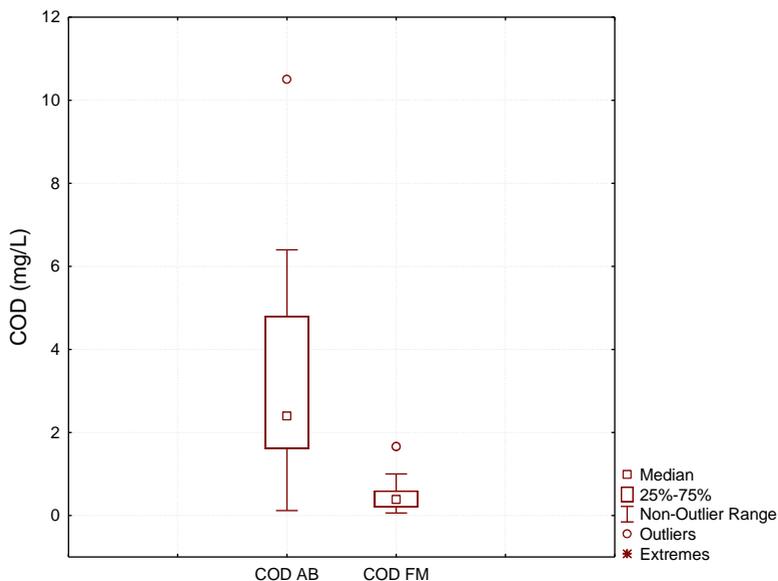


Figura 63: Box Plot do COD durante o período de estudo.



Durante a percolação da água do manancial pelo aquífero há uma tendência de queda na concentração de matéria orgânica, tanto a matéria particulada, que fica retida nos sedimentos, como a matéria orgânica dissolvida, que é degradada pelos microrganismos (BOURG e BERTIN, 1993; STUYFZAND et al., 2004).

O oxigênio dissolvido (OD) na água do manancial Rio Belo variou entre 7,1 e 9,0 mg/L e apresentou média de 7,8 mg/L. Já o OD da água proveniente do poço de FM apresentou valores mais baixos, variando entre 4,2 e 5,8 mg/L, com média de 5,1 mg/L (Figuras 64 e 65). Durante o percurso da água do manancial até o poço de FM, a concentração de OD tende a sofrer uma queda, pois o mesmo é consumido por bactérias aeróbias para degradação de matéria orgânica presente na água (BOURG e BERTIN, 1993; STUYFZAND et al., 2004).

Figura 64: Comportamento do OD durante o período de estudo.

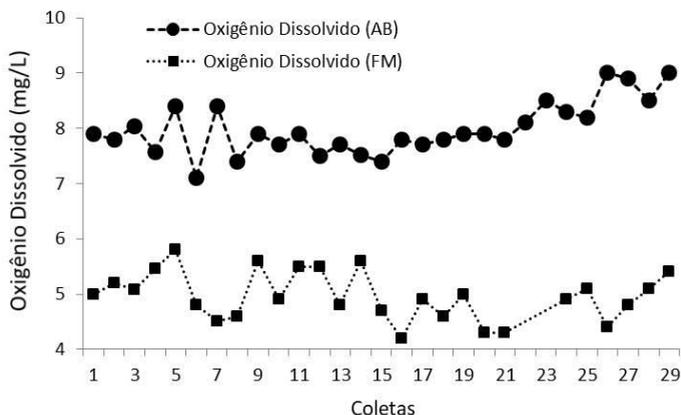
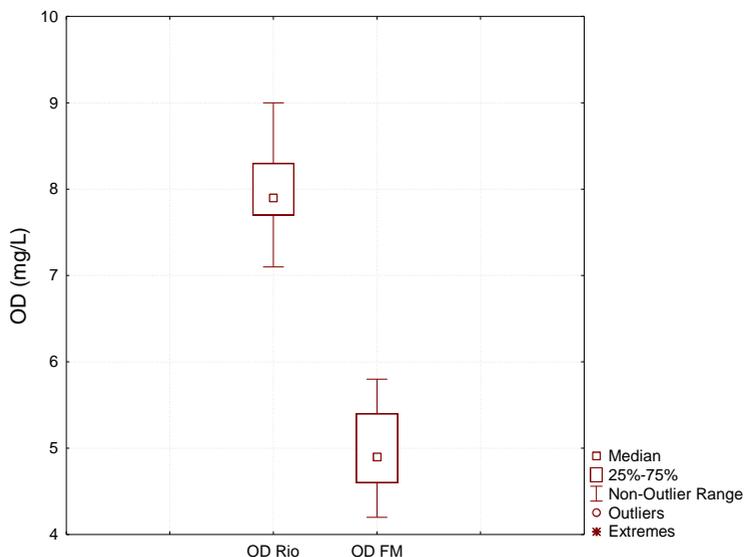


Figura 65: Box Plot do OD durante o período de estudo.



A concentração de OD na água de poço de FM é considerada um fator importante na qualidade da água, pois está diretamente relacionada com os processos de oxido-redução de metais (como ferro e manganês) e com a oxidação da matéria orgânica (KOHFAHL, MASSMANN e PEKDEGER, 2009).

Estudos realizados em diferentes locais demonstraram que a percolação da água pelo subsolo durante o processo de FM provoca uma diminuição no OD (DASH et al., 2008; MICHELAN, 2009; MONDARDO, 2009; SANDHU et al., 2011; ESQUIVEL, 2012; HAMDAN, SENSOY e MANSOUR, 2013; BLAVIER et al., 2014; ROMERO et al., 2014; ROMERO-ESQUIVEL et al., 2017).

A turbidez na água do rio apresentou uma média de 23,4 uT e o valor máximo de 176,0 uT, durante o período de estudo. A turbidez da água do poço de FM se manteve baixa durante todo o período do estudo, com média de 0,3 e valor máximo de 1,0 uT, demonstrando que a FM tem a capacidade de absorver picos de turbidez do manancial. A redução de turbidez da água do manancial por FM foi de 96%. A Figura 66 apresenta o comportamento da turbidez do rio e do poço de FM, monitorado por meio da sonda autônoma. A Figura 67 apresenta o Box Plot da variação da turbidez ao longo do período de estudo.

Figura 66: Comportamento da turbidez durante o período de estudo.

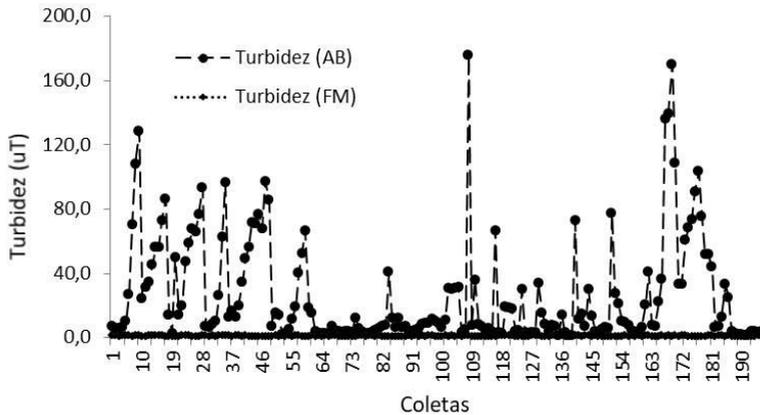
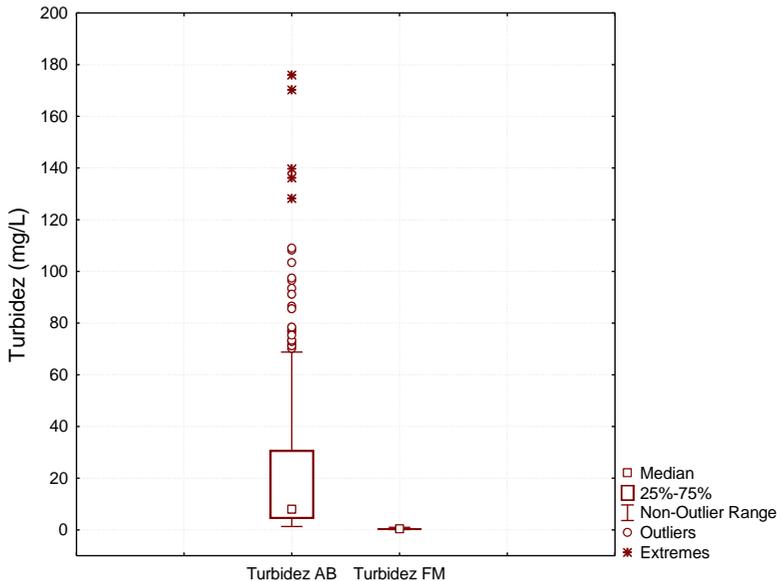


Figura 67: Box Plot da turbidez durante o período de estudo.

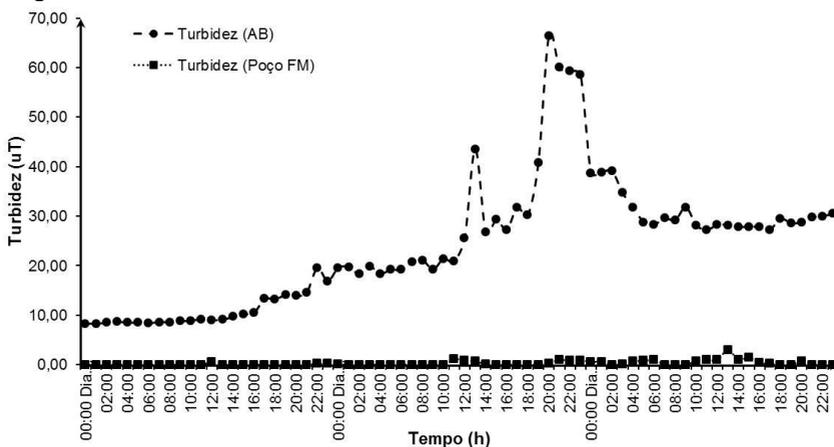


A redução de turbidez através da técnica de FM alcançada neste trabalho está em consonância com diversos estudos que reportam a FM como uma técnica eficiente na remoção de turbidez da água de mananciais (DILLON et al., 2002; DASH et al., 2008; 2010; GRISCHEK et al., 2009; MICHELAN, 2009;

MONDARDO, 2009; DASH, 2015; PAIVA, 2009; SANDHU et al., 2011; ESQUIVEL, 2012; HAMDAN, SENSOY e MANSOUR, 2013; BLAVIER et al., 2014; IBRAHIM; AZIZ e YUSOFF, 2015; ABDALLA e SHAMRUKH, 2016).

Durante eventos chuvosos intensos a água do Rio Belo rapidamente sofre uma elevação de nível e turbidez e ao final do evento o nível volta ao normal e a turbidez vai sendo reduzida gradativamente. A variação da turbidez da água do rio está relacionada às precipitações. A Figura 68 mostra um evento de elevação e redução de turbidez no rio Belo, possivelmente relacionado à um evento de precipitação, através do monitoramento horário de turbidez durante três dias (16 – 18 de setembro/2016).

Figura 68: Monitoramento horário da turbidez durante três dias.



Os valores médios de condutividade elétrica (CE) na água do manancial e no poço de FM foram 72,3 e 95,7 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectivamente. Houve um aumento na CE durante o percurso da água do manancial até o poço de FM, fato também reportado por outros autores (DASH et al., 2008; SANDHU et al., 2011; STAUDER et al., 2012; BARTAK et al., 2015).

As Figuras 69 e 70 apresentam o comportamento da CE da água do rio e do poço de FM ao longo do período de estudo. Foi possível observar que a CE da água do poço é sempre maior que a do rio e que houve uma correspondência de valores, ou

seja, quando há um aumento ou redução da condutividade no manancial foi observado esse comportamento no poço também. Este fato, assim como verificado no parâmetro pH, demonstra a conexão hidráulica entre o rio e o poço de FM. Aplicando a correlação não-paramétrica de Spearman foi encontrado um coeficiente de correlação significativa ($p < 0,05$) de 0,674 entre o CE da AB e FM.

Figura 69: Comportamento da CE durante o período de estudo.

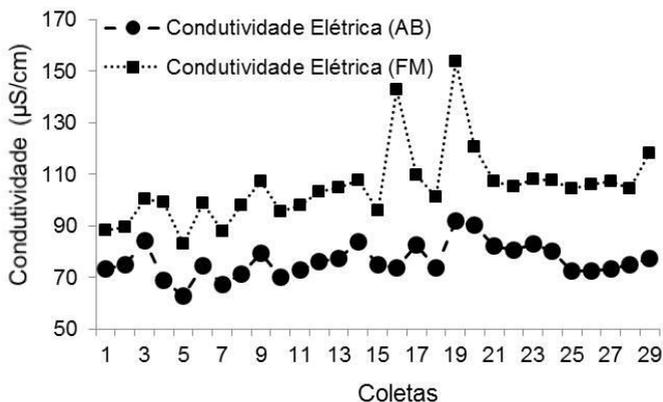
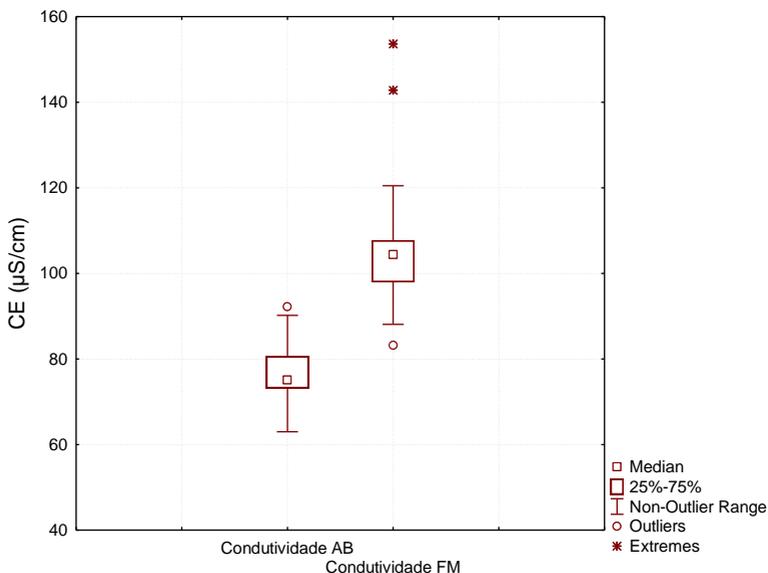


Figura 70: Box Plot da CE durante o período de estudo.



A cor aparente da água do manancial, apresentou uma média de 94,5uH, variando de 30,0 a 468,0 uH. No poço de FM a cor aparente foi mais baixa, variou de 0 a 44,0 uH, com média de 4,9 uH (Figura 71). A cor verdadeira do rio variou entre 3,0 e 105,0 uH e apresentou média de 22,7 uH. No poço de FM esse parâmetro teve média de 0,4 uH e variou de 0 a 6,0 uH (Figura 72). Os resultados mostram que a FM alcançou reduções de 95% e 98% de cor aparente e cor verdadeira na água do manancial, respectivamente.

A Portaria nº 5/17 estipula o limite de 15 uH em água de consumo humano para o parâmetro cor aparente, porém não estipula limite para cor verdadeira. Dessa forma, a água do poço de FM foi enquadrada como potável durante a maior parte do período de monitoramento, de acordo com a cor aparente.

Figura 71: Comportamento da cor aparente durante o período de estudo.

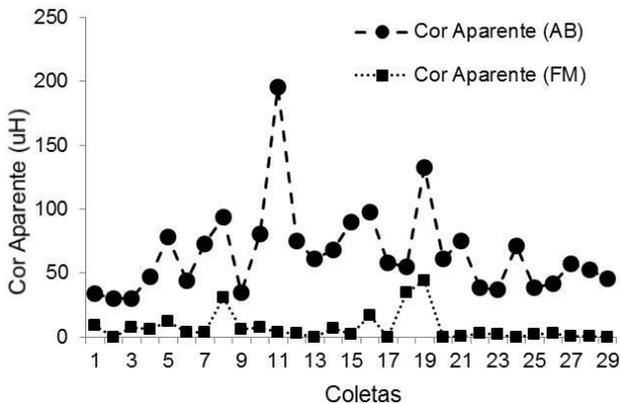
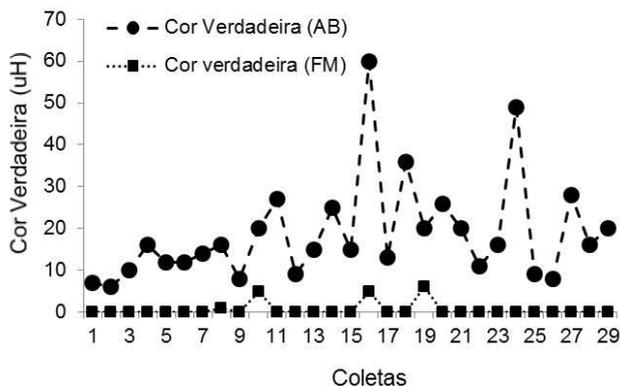


Figura 72: Comportamento da cor verdadeira durante o período de estudo.

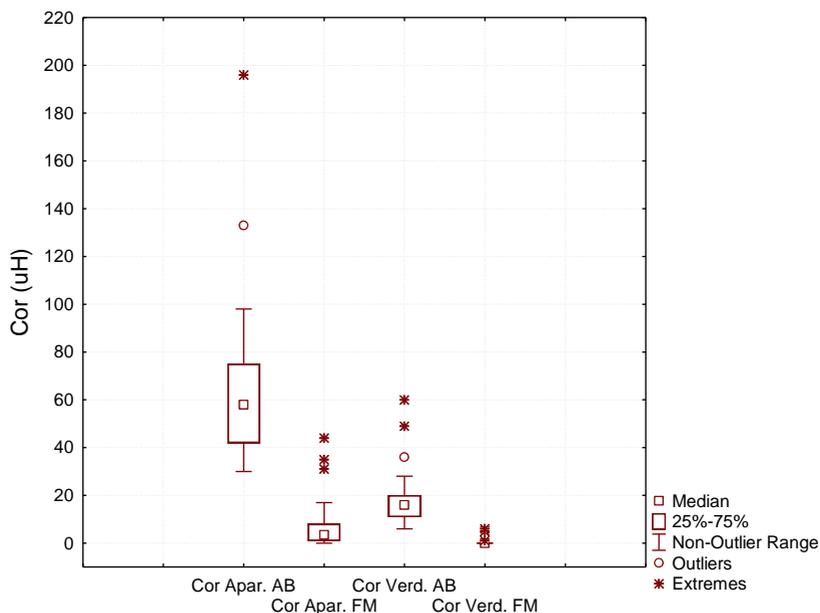


A cor aparente da água do rio (AB) apresentou grande variação quando comparada à cor aparente do poço de FM, conforme pode ser observado na Figura 73. Este parâmetro representa a cor ocasionada tanto por substâncias suspensas quanto dissolvidas. Os valores elevados observados no parâmetro cor aparente, possivelmente estão relacionados com a elevação da turbidez observada em dias de chuva.

A cor verdadeira da água do rio apresentou variação quando comparada com a cor verdadeira da água do poço de

FM, que se manteve estável. A cor verdadeira pode ser um indicativo de substâncias orgânicas dissolvidas na água.

Figura 73: Box Plot da cor aparente e verdadeira durante o período de estudo



A concentração de ferro total no rio Belo foi superior à concentração deste parâmetro no poço de FM durante todo o período de estudo, conforme pode ser observado na Figura 74.

O ferro total na água do rio se manteve acima de 0,3mg/L em todo o período de estudo, com média de 0,9 mg/L e valor máximo de 3,7 mg/L. No poço de FM a concentração deste metal apresentou média de 0,1 mg/L e valor máximo de 0,7 mg/L. A técnica de FM resultou em uma redução de 88% do ferro total da água do manancial. Na Figura 75 é possível observar a variação do ferro total nos dois pontos amostrados.

Figura 74: Comportamento do ferro total durante o período de estudo.

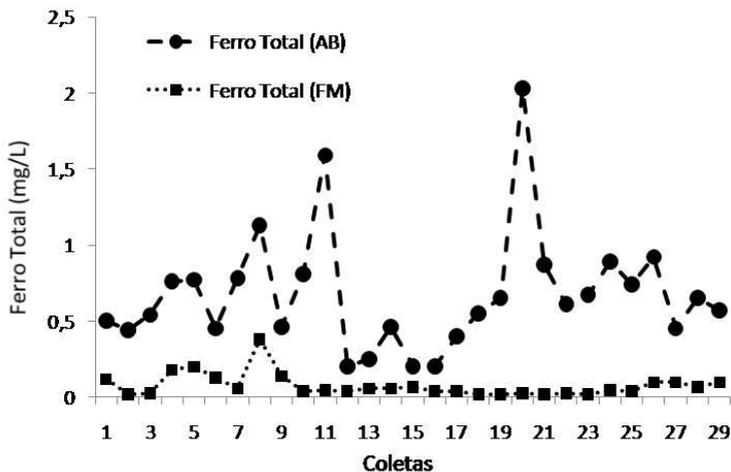
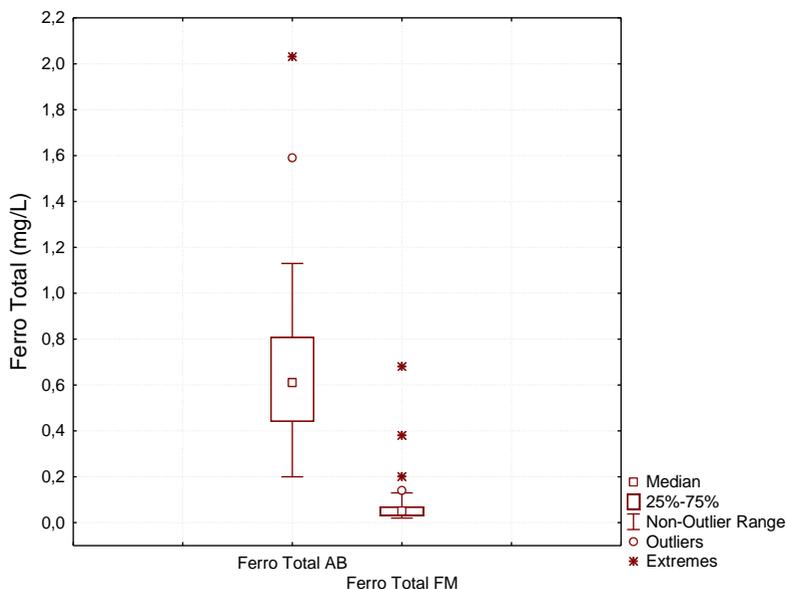


Figura 75: Box Plot do ferro total durante o período de estudo.



Uma das limitações da FM, segundo Stuyzand et al. (2004), é o aumento de alguns íons na água filtrada em margem, como é o caso do ferro, não enquadrando a água dentro dos

padrões de potabilidade. O limite de concentração de ferro na água de abastecimento no Brasil estipulado pela Portaria nº 5/17 é de 0,3 mg/L (BRASIL, 2017). Em relação à este parâmetro a água tratada por FM, esteve dentro do padrão de potabilidade estipulado pela Portaria nº 5/17 durante a maior parte do período de estudo.

O aparecimento do ferro na água de poços de FM, decorrente da solubilização deste elemento presente nos sedimentos do aquífero, é uma situação indesejável que vem sendo reportada em pesquisas há alguns anos (BOURG e BERTIN, 1993; BOURG et al. 2002; HISCOCK e GRISHEK, 2002; SOARES, 2009; MICHELAN, 2010, SANTOS, 2012; HENZLER, GRESKOWIAK e MASSMAN, 2014; BARTAK et al., 2015, GUEDES et al., 2018).

A presença de ferro nos solos depende principalmente da pedogênese (processo de formação do solo), material de origem e idade do solo. O ferro geralmente está presente no solo na forma insolúvel como óxido férrico, hidróxido de ferro ou carbonato de ferro. Alguns fatores contribuem para que a solubilização do ferro ocorra, ou seja, que passe da forma insolúvel (Fe^{+3}) para a forma solúvel (Fe^{+2}), tais como baixa concentração de oxigênio dissolvido, alta concentração de gás carbônico ou baixo pH no meio. A solubilização do ferro proporciona mobilidade ao mesmo ao longo do perfil do solo, sendo que esse elemento tende a acompanhar as argilas em sua migração (MELFI, PEDRO e VOLKOFF, 1979; BOYD, 1990; KUEHN e MUELLER, 2000; RICHTER e AZEVEDO NETTO, 2007; MORUZZI e REALI, 2012).

No subsolo, por onde percola a água filtrada em margem, predominam as condições de redução citadas no parágrafo anterior, que favorecem a solubilização do ferro e conseqüentemente a transferência do metal do solo para a água. A baixa concentração de oxigênio dissolvido ocorre no subsolo, pois o OD é consumido nas reações de degradação de matéria orgânica e também porque o subsolo pode ficar saturado de água o que impede a troca gasosa com a atmosfera. Após o oxigênio dissolvido ser consumido, o ambiente se torna redutor e os microrganismos passam a utilizar como receptor de elétrons os compostos disponíveis (nitratos, óxidos e hidróxidos de manganês e ferro) reduzindo-os (BOURG e BERTIN, 1993;

BOURG et al., 2002; HISCOCK e GRISCHEK, 2002; SCHMIDT et al., 2003; IBRAHIM, AZIS e YUSOFF, 2015).

Melfi, Pedro e Volkoff (1979) verificaram que o ferro está presente em grande parte dos solos do território brasileiro. Os autores realizaram um estudo sobre a distribuição deste elemento nos solos do Brasil e dividiram a cobertura pedológica em três grandes áreas: áreas com teor de ferro inferior a 5%, (36,2% do território), áreas com teor de ferro entre 5% e 25% (58,8% do território) e áreas com teor de ferro acima de 25% (5% do território).

Apesar do poço de FM ter sido perfurado em uma região, onde há rochas com minerais de ferro em sua composição (MELFI, PEDRO e VOLKOFF, 1979), a água do poço de FM não apresentou elevadas concentrações de ferro.

O perfil do solo geralmente é dividido em horizontes, por apresentar camadas de diferente composição, textura e estrutura. As camadas mais superficiais apresentam um material mais intemperizado e com resíduos orgânicos, já as mais profundas são constituídas de um material pouco modificado pelo intemperismo. Entre estes horizontes encontra-se um horizonte intermediário, onde ocorre o acúmulo de materiais oriundos do horizonte acima como argilas, óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio (HYPOLITO, ANDRADE e EZAKI, 2011; HEINECK, 2012)

O resultado da análise do ferro no solo confirmou a presença deste elemento e verificou-se que nas camadas subsuperficial e intermediária, que continham maiores quantidade de argila em sua composição, a concentração do ferro também foi maior. A argila é carregada negativamente, logo o ferro tende a se ligar a estas partículas.

O nível estático da água do aquífero era de aproximadamente 2 m de profundidade e durante o bombeamento a água escoava pela camada de seixo e pela camada mais inferior de areia grossa. O fato de tais camadas apresentarem pequena quantidade de argila e conseqüentemente de ferro em sua composição, possivelmente contribuiu para que a água do poço de FM apresentasse também pequenas concentrações de ferro.

Os parâmetros coliformes totais e *Escherichia coli* na água bruta apresentaram valores médios da ordem de 10^5 e 10^3 NMP/100 ml, respectivamente. Os valores elevados de

coliformes totais e *Escherichia coli* na água do rio podem ser explicados por possíveis lançamentos clandestinos de esgoto e pela presença constante de bovinos próximo às margens do rio. A água do poço de FM apresentou média de 15,3 NMP/100ml para coliformes totais e ausência para *Escherichia coli*. As Figuras 76 e 77 apresentam o Box Plot para estes parâmetros.

Figura 76: Box Plot dos coliformes totais durante o período de estudo.

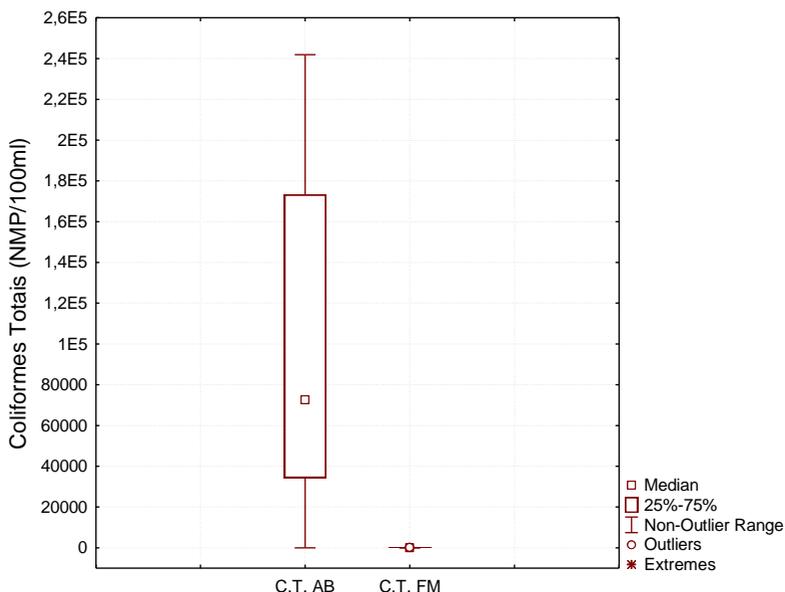
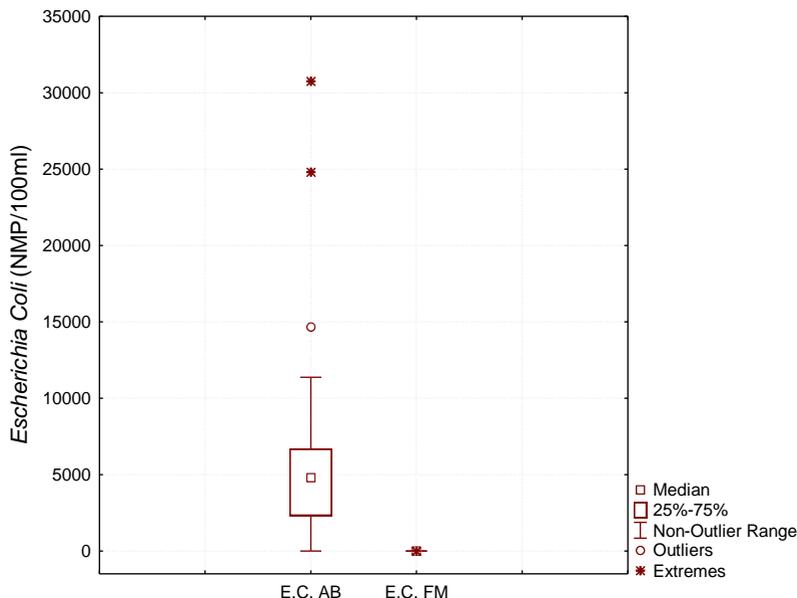


Figura 77: Box Plot do parâmetro *Escherichia Coli* durante o período de estudo.



A Portaria nº 5/17 estipula que a água potável deve ser isenta de bactérias do grupo coliformes (BRASIL, 2011). O parâmetro *Escherichia Coli* da água do poço de FM ficou dentro do recomendado pela portaria. O parâmetro coliformes totais, apesar de ter sido reduzido significativamente, não isentou a água do poço de FM da presença de bactérias deste grupo. No entanto um simples procedimento de cloração é suficiente para tornar a água potável, de acordo com este parâmetro.

A FM proporcionou excelentes remoções de coliformes totais (99,99%) e *Escherichia coli* (100%) da água bruta, demonstrando o potencial desta técnica de tratamento de água na redução de parâmetros microbiológico sem águas de abastecimento. Outras pesquisas apresentam remoções eficientes de coliformes totais e *Escherichia Coli* em consonância com o presente estudo (DASH et al., 2008; 2015; MICHELAN, 2009; SANDHU et al., 2011; FREITAS et al., 2012; THAKUR et al., 2013; HAMDAN, SENSOY e MANSOUR, 2013; BLAVIER et al., 2014 ABDALLA; SHAMRUKH, 2016), sendo que em alguns

casos a remoção total foi alcançada (GRISCHEK et al., 2010; FREITAS et al., 2012).

6.10 Diretrizes para escolha de locais para implantação da Filtração em Margem

A escolha do local é uma etapa fundamental na implantação de um sistema de tratamento de água por Filtração em Margem (FM), e deve ser realizada de forma criteriosa para garantir que em termos quantitativos e qualitativos, a água obtida seja adequada às necessidades do projeto. Este documento tem como objetivo propor diretrizes para auxiliar na escolha de locais para aplicação da técnica de FM e foi desenvolvido com base em bibliografias e experiências em campo.

6.10.1 Aspectos a serem considerados na escolha do local para aplicação da FM

Durante a escolha do local para implantação de sistemas de FM, é necessário considerar os aspectos QUANTITATIVOS e QUALITATIVOS.

Os aspectos QUANTITATIVOS estão relacionados com as características hidrogeológicas do aquífero (formação geológica; granulometria; coeficiente de permeabilidade), ou seja, são aspectos que determinam o potencial produtivo do aquífero.

Os aspectos QUALITATIVOS estão relacionados aos fatores que influenciam a qualidade da água durante o processo de tratamento por FM.

O processo de escolha de um local tem como objetivo avaliar as características hidráulicas do manancial e do lençol freático, e avaliar a formação geológica do leito do corpo d'água assim como dos arredores.

6.10.2 Escolha do local para implantação de um sistema de FM

O processo de escolha do local para implantação de um sistema de FM pode ser dividido em 4 (quatro fases) conforme mostrado a seguir:

FASE 1 - Análise Visual: Visitas em campo com coleta de informações preliminares sobre localização, relevo e composição do leito do rio, além de documentação fográfica e pré-seleção de possíveis locais para sondagem;

FASE 2 – Coleta de dados e informações: Coleta de dados topográficos (declividade do manancial), hidrogrólógicos (informações sobre perenidade, variação do nível do rio e medição de velocidade de escoamento e vazão) e levantamento de acessos para os locais pré-selecionados;

FASE 3 – Sondagem do solo, coleta e análise de dados: Coleta de amostras de solo e água, levantamento do nível da água subterrânea, espessura do aquífero e condutividade hidráulica.

FASE 4 – Avaliação final do local: Classificação do local quanto à adequabilidade para implantação de um poço de FM.

6.10.3 Fases da escolha do local para implantação da FM

FASE 1 - Análise visual

Relevo: Na busca por locais para implantação da filtração em margem, o relevo é um aspecto muito importante a ser considerado. Os locais mais promissores são aqueles situados na seção mediana, entre a cabeceira e a foz do rio. Nesses locais, frequentemente são encontradas trechos de rio com declividade não muito acentuada e depósitos de sedimentos aluvionares compondo o seu entorno, cenário com grande potencial para obtenção de água utilizando a técnica em foco.

Deve-se buscar por regiões de terreno plano ao lado do rio, conforme ilustrado nas Figuras 78 e 79, pois apresentam menor inclinação da superfície freática, favorecendo o rebaixamento do nível da água dentro do poço durante o bombeamento, induzindo com mais facilidade a FM.

Escolher, preferencialmente, margens de rio com altura “H” indicada na Figura 78, de no máximo 5 m. Alturas menores permitem poços menos profundos, reduzindo custos e facilitando a implantação (WANG; YE; DU, 2016).

A distância entre o rio e o poço de FM é um parâmetro a ser considerado na escolha do local. Distâncias menores resultam em uma alta taxa de infiltração, devido ao aumento da recarga. Porém, como desvantagens dessa proximidade podem

ser citadas o aumento da colmatação por causa da alta velocidade de entrada e menor eficiência no tratamento da água devido ao pequeno trecho percorrido e tempo de percurso (SCHÖN, 2006). A distância usual situa-se na faixa de 10 a 50 m (UMAR *et al.*, 2017).

Figura 78: Perfil do terreno em uma seção transversal de rio

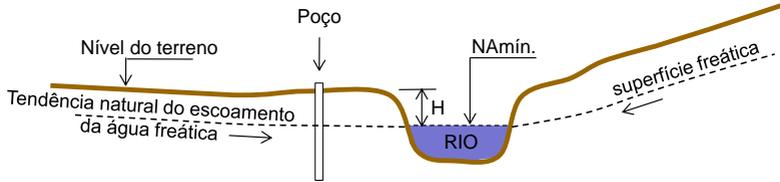
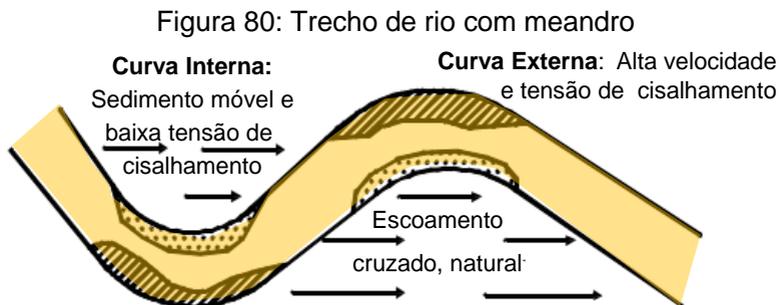


Figura 79: Trecho de rio com margem plana (lado esquerdo) formada por depósitos de areia e seixos rolados.



Regiões que possuem meandros de canais de rio são os lugares preferenciais para a instalação do sistema de filtração em margem, pois proporcionam alta taxa de filtração. A região mais indicada é aquela localizada dentro das curvas do meandro, já que há influência do fluxo de filtração do rio a montante e à jusante (GRISCHEK *et al.*, 2007). Nos locais no interior da seção da curva, a velocidade de escoamento é baixa e possibilita a alternância entre deposição e erosão.

Outro fator que proporciona uma elevada produção de água filtrada na curva de dentro do meandro é o fluxo cruzado da água subterrânea natural. Isso faz com que tenha uma recarga adicional de água do aquífero, e o poço não é alimentado apenas pela água filtrada do rio. A Figura 80 ilustra o comportamento do escoamento em meandros.



Fonte: Adaptado de SCHÖN, 2006

O comprimento da margem de rio afetada pelo sistema de filtração em margem aumenta com o número de poços instalados e espera-se uma influência significativa no rendimento. Quanto maior o número de poços ao longo das margens do rio, maior o alcance do rio e das recargas ganhas no aquífero (SCHÖN, 2006). Quanto mais largo e profundo o rio, maior a área de infiltração, melhorando a produção do poço e reduzindo o risco de colmatção (UMAR *et al.*, 2017).

Propriedades do leito do rio: De modo geral, escolhem-se locais em que o rio apresenta areia (preferencialmente média ou grossa) ou seixo rolado no fundo. Margens de rio arenosas também são favoráveis, pois sofrem erosão mais facilmente, favorecendo também a autolimpeza das margens e infiltração da água.

Ao analisar a composição dos sedimentos do leito do rio, é preferível uma região que possua materiais grosseiros, pois são mais propícios à infiltração de água superficial do que os materiais finos depositados em regiões de baixa velocidade (GRISCHEK *et al.*, 2007). A Figura 81 ilustra um local com característica favorável de leito de rio.

Locais que apresentam lama ou lodo no fundo do rio não são recomendáveis. Os sedimentos não devem apresentar mau cheiro (cheiro de podre ou de ferrugem) e devem aparentar a cor natural do solo de que são compostos.

Durante essa fase de escolha do local, registrar com fotografias todos os locais visitados, e as coordenadas de localização utilizando recursos de GPS.

Figura 81: Exemplo de local promissor para implantação da FM, com depósito de areia.



FASE 2 - Coleta de dados e informações

Dados topográficos: Devem ser obtidas informações sobre a topografia do local de interesse por meio imagens de satélite ou mapas, com o objetivo de avaliar as declividades do trecho do rio e da região próxima da margem, rede hidrográfica da bacia, cotas altimétricas, além de outras informações como uso e ocupação do solo, e acessos (malha viária).

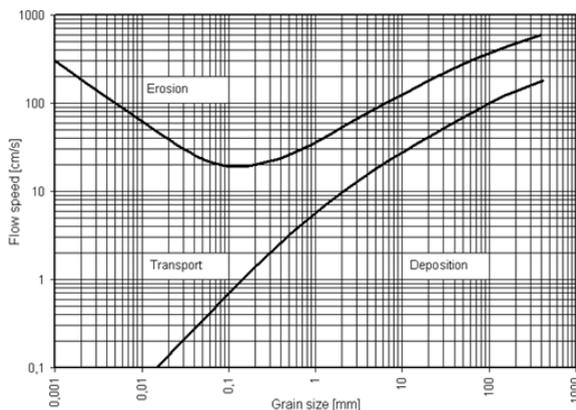
Dados hidrológicos: De uma forma geral, rios localizados na cabeceira de uma bacia hidrográfica apresentam elevada declividade, com diminuição gradual na seção média e pequena

declividade na foz. Os poços de filtração em margem devem ser instalados, preferencialmente, na porção média do rio, que corresponde a uma declividade mediana (GRISCHEK et al., 2007).

É necessário verificar a perenidade do rio. Procura-se saber se o rio tem água fluindo em seu leito durante todo o ano ou, às vezes, possui um período de seca. É recomendado que o sistema de filtração em margem de rio seja implantando em um rio perene. Outro aspecto importante é obter informações a respeito da variação de nível do rio ao longo do ano. Rios que apresentam variação de nível com frequência são preferíveis, pois esse aspecto favorece a autolimpeza da área de infiltração da água, reduzindo a colmatção.

Velocidade de escoamento: A velocidade de escoamento é um parâmetro importante de ser avaliado, pois em conjunto com a granulometria do leito do rio é possível determinar o comportamento do fluxo em relação aos sedimentos por meio do Diagrama de Hjulström (Figura 82).

Figura 82: Diagrama de Hjulström



Fonte: Adaptado de Hjulstrom (1935) apud Graf (1998).

O diagrama de Hjulström relaciona a velocidade crítica do rio com o diâmetro característico do sedimento (SÃO PAULO, 2012). De acordo com Bongio (2010), o eixo das abcissas corresponde ao tamanho do grão característico (ou a presença

de uma de mistura de granulometria variável, a D50), e a ordenada corresponde à velocidade do rio. A partir destes dados é possível classificar se o regime de escoamento do rio favorece a sedimentação/deposição, transporte ou erosão e transporte. É interessante que no local da FM haja alternância entre transporte e deposição de sedimentos.

A determinação da velocidade de escoamento da água do rio pode ser feita por meio expedito, método do flutuador, ou por método de maior precisão, como por exemplo utilizando um molinete. Ambos os métodos seguem descritos na seção 6.10.4 - Metodologias. Valores interessantes de velocidade situam-se na faixa de 0,2 a 2,5 m/s, dependendo da carga de sedimentos e composição do leito do rio.

A coleta de sedimentos do fundo e margem do rio permitirá realizar ensaios granulométricos para determinar o diâmetro médio de Sauter (seção 6.10.4.2), utilizado no diagrama supracitado.

Acessos: A implantação da FM exige obras de abertura de poços, instalação de equipamentos, e estruturas de adução e reservação de água. É importante conhecer os acessos aos locais de interesse dessa implantação, pois isso irá influenciar nos custos do sistema, em função da maior ou menor dificuldade de acesso.

FASE 3 - Sondagem do solo, coleta e análise de dados

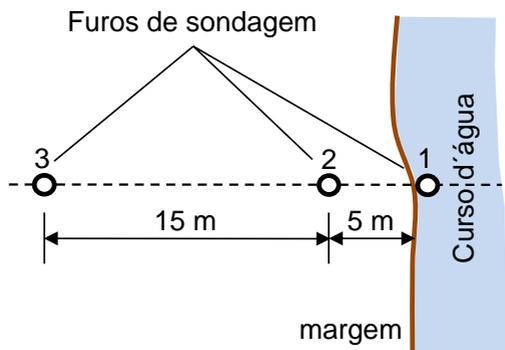
Após a escolha de possíveis locais para a FM, definidos nas fases 1 e 2, é necessário obter informações sobre a hidrogeologia do local.

Recomenda-se a realização de sondagem rotativa, em função da expectativa de camadas de sedimentos como pedregulhos e seixos que dificilmente serão atravessadas por sondagem percussiva. A critério do sondador, pode-se combinar técnicas para melhor realização do serviço.

A sondagem deve ser realizada até atingir uma camada impermeável, rocha ou argila, ou 30 m de profundidade. Isso permitirá determinar a espessura do aquífero e dada camada saturada. Recomenda-se coletar amostras de solo a cada mudança de horizonte do solo, para posteriores análise granulométricas.

Recomenda-se a execução de pelo menos 3 furos de sondagem em cada local selecionado para implantação da FM, conforme esquematizado na Figura 83. O primeiro furo deve ser realizado dentro do rio ou muito próximo da margem e os demais a 5 e 15 m da margem.

Figura 83: Posição dos furos de sondagem em relação ao curso d'água



Além da determinação do perfil geológico, é recomendável realizar testes de infiltração em cada furo, para estimativa do coeficiente de permeabilidade. A descrição do procedimento é apresentada na seção 6.10.4.3.

Recomenda-se também no ato da sondagem, coletar amostras de água subterrânea para análise dos parâmetros ferro e manganês.

As condições ideais são os aquíferos permeáveis, de material graúdo, que estejam conectados hidráulicamente com o leito do rio.

Segundo Donald et al. (2006), é recomendável que o coeficiente de permeabilidade (k) seja pelo menos 2 m/d. Segundo UMAR et al. (2017), bons resultados com filtração em margem foram obtidos para valores de $k > 8$ m/d e camada da espessura saturada de pelo menos 5 m. Wang, Ye e Du (2016) consideram favoráveis camadas saturadas com espessura entre 10 e 30 m.

FASE 4 - Escolha final do local para implantação do(s) poço(s).

Após analisar todas as informações coletadas nas fases anteriores, recomenda-se realizar uma classificação dos locais pesquisados, ponderando os diversos aspectos observados, com a intenção de confirmar as etapas anteriores para a escolha de um ou mais locais para implantação de poços de FM.

A metodologia para avaliar e classificar a aptidão de um local para aplicação da FM, apresentada nesse trabalho, é uma adaptação a partir de Wang; Ye; Du (2016), com o intuito de facilitar a execução.

A classificação é baseada em conjunto de informações geomorfológicas, hidrológicas, hidrogeológicas e topográficas, além de informações sobre a qualidade das águas superficiais. Tais aspectos também são destacados por UMAR et al. (2017).

Os critérios utilizados para a classificação do potencial do local destinado a FM, assim como os pesos atribuídos para cada critério e os cálculos necessários são apresentados na sequência. Na Tabela 18 são apresentados os parâmetros indicadores dessa avaliação.

Tabela 18: Indicadores para avaliação da viabilidade de implantação da FM

Item de avaliação	Indicador	Peso do indicador (W)	Peso do item
Quantidade de água subterrânea	Condutividade Hidráulica [K (m/d)]	0,15	0,3
	Espessura do aquífero [M (m)]	0,15	
Qualidade da água superficial	Características da qualidade da água superficial [S]	0,3	0,3
Interação da água superficial com a água subterrânea	Gradiente Hidráulico [I (m/m)]	0,15	0,3
	Permeabilidade do leito do rio [R]	0,15	
Condições de exploração	Profundidade da água subterrânea [D (m)]	0,10	0,10

Fonte: adaptado de WANG; YE; DU (2016)

A condutividade hidráulica (k) reflete a litologia e permeabilidade do aquífero. Sua determinação pode ser feita no momento da realização da sondagem. A pontuação desse indicador é apresentada na Tabela 19.

Tabela 19: Critério de pontuação para a condutividade hidráulica

K (m/d)	>100	100-50	50-20	20-5	5-1	1-0,1	<0,1
Pontuação X	100	90	80	70	60	30	0

Fonte: WANG; YE; DU (2016)

A espessura do aquífero é obtida também a partir dos resultados da sondagem. O local para implantação da filtração em margem requer uma certa espessura de aquífero para produção de água, conforme indicado na Tabela 20.

Tabela 20: Critério de pontuação para a espessura do aquífero

M (m)	>50	30-50	10-30	5-10	3-5	1-3	<1
Pontuação X	100	90	80	70	60	30	0

Fonte: WANG; YE; DU (2016)

A qualidade da água superficial apresenta relação direta com a qualidade da água que será captada pela FM, mesmo considerando o potencial de tratabilidade dessa técnica. A avaliação desse aspecto deve ser com base no Índice de Qualidade da Água (IQA), utilizado no Brasil em diversos estudos envolvendo a utilização de mananciais superficiais (ANA, 2017). Na Tabela 21 é apresentada a classificação do manancial de acordo como IQA. Na Tabela 22 pode ser observada a pontuação em função da classificação da qualidade da água. O cálculo do IQA é apresentado na seção 6.10.4.4. Os dados de qualidade da água utilizados nesse cálculo são obtidos a partir de amostras coletadas na fase 3, ou obtidas anteriormente.

Tabela 21: Valores de IQA e classificação da qualidade da água

Faixa de IQA	Classificação
91 a 100	Ótima
71 a 90	Boa
51 a 70	Razoável
26 a 50	Ruim
0 a 25	Péssima

Fonte: ANA (2017)

Tabela 22: Critério de pontuação para a qualidade da água superficial

S (IQA)	91 a 100	71 a 90	51 a 70	26 a 50	0-25
Pontuação X	100	95	90	60	-275

Fonte: adaptado de WANG; YE; DU (2016)

O gradiente hidráulico reflete diretamente a relação de recarga e descarga entre a água superficial e a água subterrânea. Um gradiente positivo indica que o rio recarrega a água subterrânea, e negativo, o rio é recarregado. Um valor positivo de gradiente hidráulico é benéfico para a FM na maioria das situações. Valores positivos muito altos podem indicar baixa permeabilidade do leito do rio. Valores negativos podem dificultar ou inviabilizar a indução da filtração em margem, exigindo muita energia de bombeamento. A determinação desse gradiente é feita a partir dos resultados da sondagem, utilizando a Equação 5, tomando por base a Figura 83. A Tabela 23 apresenta a pontuação desse critério.

$$I = \left(\frac{NA_{rio} - NA_{f2}}{L} \right) \cdot 1000 \quad (5)$$

Onde:

- I: gradiente hidráulico entre o rio e o aquífero adjacente (‰);
- NA_{rio} : nível da água no rio (referência pelo furo 1 de sondagem) (m);
- NA_{f2} : nível da água no furo 2 de sondagem (m);
- L: distância entre os furos 1 e 2 de sondagem (m).

Tabela 23: Critério de pontuação para o gradiente hidráulico (I)

I (%)	>10	10-5	0-5	0 a -5	-10 a -5	< -10
Pontuação X	40	80	100	90	80	60

Fonte: WANG; YE; DU (2016)

A condutividade hidráulica do leito do rio indica a capacidade de troca entre a água superficial e a água subterrânea. O ensaio para a determinação da condutividade hidráulica do leito do rio é realizado de maneira similar ao ensaio para determinação deste parâmetro no aquífero e está descrito na seção 6.10.4.3. A pontuação deste critério é apresentada na Tabela 24.

Tabela 24: Critério de pontuação para a condutividade hidráulica do leito do rio (R)

R (m/d)	>5	1-5	0,5-1	0,1-0,5	0,05-0,1	0,01-0,05	<0,01
Pontuação X	100	90	80	70	60	30	0

Fonte: WANG; YE; DU (2016)

A profundidade da água subterrânea influencia diretamente nos gastos com energia para extração. Esse valor pode ser obtido a partir dos resultados da sondagem, e representa a profundidade que se encontra o topo da camada saturada em relação ao nível do terreno no provável local de perfuração do poço, ou seja, a profundidade do nível da água em relação ao terreno. A pontuação para a profundidade da água subterrânea é apresentada na Tabela 25.

Tabela 25: Critério de pontuação para a profundidade da água subterrânea (D)

R (m/d)	< 5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	>30
Pontuação X	100	90	80	70	60	30	0

Fonte: WANG; YE; DU (2016)

O índice de aptidão do local para a implantação da FM é dado pela Equação 6, e a classificação do local quanto à aptidão é indicado na Tabela 26.

$$A = (X_K.W_K) + (X_M.K_M) + (X_S.W_S) + (X_I.W_I) + (X_R.W_R) + (X_D.W_D) \quad (6)$$

Tabela 26: Classificação de áreas considerando a aptidão para implantação da FM.

Índice de viabilidade (A)	Grau	Aptidão do local
90- 100	I	Áreas de excelente aptidão
80 - 89	II	Áreas de boa aptidão
70 - 79	III	Áreas de aptidão moderada
60 - 69	IV	Áreas de aptidão pobre
< 60	V	Áreas não indicadas

Fonte: WANG; YE; DU (2016)

6.10.4 Metodologias

6.10.4.1 Determinação da velocidade média do rio

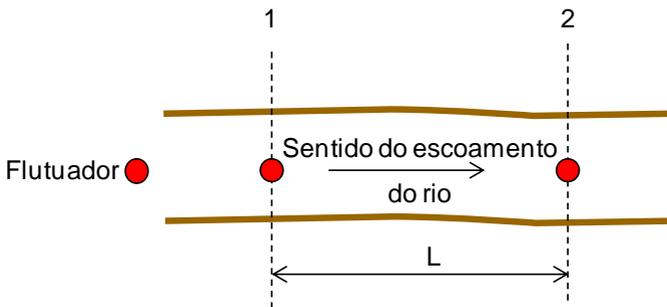
A velocidade média do rio pode ser determinada, entre outros, pelos seguintes métodos: Método do Flutuador e o Método do Molinete.

- Método do flutuador: É um método expedito, de fácil execução e fornece uma estimativa da velocidade de escoamento das águas do rio. Neste método é utilizado um flutuador, que pode ser um limão, uma laranja, ou uma garrafa PET 500 mL com água até a metade, para estimar a velocidade citada.

O procedimento, esquematicamente representado pela Figura 84, consiste em fazer duas marcações em um trecho reto de rio, que pode ser uma corda esticada entre as margens; soltar o flutuador 2 ou 3 metros antes do ponto 1 para ganhar velocidade; medir, usando um cronômetro, o tempo “t” (em segundos) que o flutuador demora para ir do ponto 1 até o ponto 2, ou seja, percorrer a distância $L = 6$ m (valor recomendado). O teste deve ser feito em dias sem vento para não influenciar na velocidade do flutuador. Em cada teste fazer três repetições para tirar um valor médio. É interessante, se possível, fazer medições

contemplando dias de maior e menor vazão no rio, para ter ideia da amplitude de variação da velocidade. Como a água se desloca mais rápido na superfície que na porção do fundo do rio, faz-se necessário uma correção da velocidade em função das características do fundo do rio, conforme está apresentado na Equação 7 (PALHARES *et al.*, 2007).

Figura 84: Esquema, em planta, para medir a velocidade da água do rio



$$v = \frac{C.L}{t} \quad (7)$$

Onde:

v: velocidade do escoamento superficial da água (m/s);

L: comprimento do trecho considerado (m);

C: fator de correção da velocidade (0,8 para rios com fundo pedregoso e 0,9 para rios com o fundo barrento);

t: tempo de percurso do flutuador (s).

- Método do molinete: Os molinetes são instrumentos projetados para girar as hélices em diferentes velocidades, de acordo com a velocidade da água. A velocidade da água é maior no centro de um rio do que junto às margens, assim como a velocidade é menor no fundo do rio do que na superfície. Por esse motivo, para uma boa estimativa da velocidade média é preciso medir a velocidade em diferentes alturas e em várias verticais ao longo da largura do rio. É um método muito utilizado em medição de velocidade e vazão de rios e possui maior precisão quando comparado ao método do flutuador.

As Tabelas 27 e 28 orientam a distribuição dos pontos de medição de velocidade em função das dimensões da seção de rio ou canal considerado.

Tabela 27: Distribuição dos pontos transversal ao canal para medição da velocidade do fluxo de água entre as seções verticais

Largura do rio (m)	Distância entre as seções verticais (m)	Largura do rio (m)	Distância entre as seções verticais (m)
< 3	0,3	50 a 80	4,0
3 a 6	0,5	80 a 150	6,0
6 a 15	1,0	150 a 250	8,0
15 a 30	2,0	>250	12
30 a 50	3,0		

Fonte: adaptado de Carvalho, 2008.

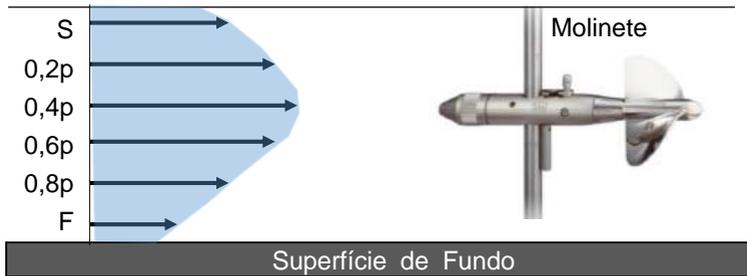
Tabela 28: Distribuição dos pontos para medição da velocidade do fluxo de água em diferentes verticais

Profundidade do rio (m)	Nº de pontos	Profundidade dos pontos (m)	Velocidade média (m/s)
0,15 a 0,60	1	0,6p	$V_m = V(0,6)$
0,61 a 1,20	2	0,2p e 0,8p	$V_m = [V(0,2) + V(0,8)] / 2$
1,21 a 2,00	3	0,2p; 0,6p e 0,8p	$V_m = [V(0,2) + 2 \cdot V(0,6) + V(0,8)] / 4$
2,01 a 4,00	4	0,2p; 0,4p; 0,6p e 0,8p	$V_m = [V(0,2) + 2 \cdot V(0,4) + 2 \cdot V(0,6) + V(0,8)] / 6$
> 4,00	6	S; 0,2p; 0,4p; 0,6p; 0,8p e F	$V_m = [V_S + 2 \cdot V(0,2) + V(0,4) + V(0,6) + V(0,8) + V_F] / 10$

Fonte: adaptado de Carvalho, 2008.

A Figura 85 permite visualizar o posicionamento do molinete em relação ao fundo e superfície do curso d'água numa seção vertical. A letra "p" que acompanha os números representa a profundidade do curso d'água no ponto considerado, assim 0,2p representa 20% da profundidade, e assim por diante.

Figura 85: Perfil de velocidade com os respectivos pontos de medição recomendados



Fonte: adaptado de Carvalho, 2008.

A NBR 13403 (ABNT, 1995) recomenda que para uso do molinete, a velocidade de escoamento do rio deve estar sempre superior a 0,2 m/s, sendo comum a utilização desses aparelhos com velocidades na faixa de 0,5 – 2,5 m/s, dependendo da carga de sedimentos e composição do leito do rio.

6.10.4.2 Determinação do diâmetro médio de Sauter

O diâmetro médio de Sauter é utilizado para avaliar a movimentação de sedimentos no leito do rio por meio do diagrama de Hjulström. A determinação é realizada utilizando os resultados do ensaio granulométrico.

O diâmetro característico relaciona o diâmetro da partícula, cuja relação superfície/volume é a mesma para todas as partículas. A Equação 8 é utilizada para esse cálculo (PORTELA; LACERDA; LOURENÇO, 2013).

$$d_p = \frac{1}{\sum_i \frac{\Delta x_i}{\frac{(d_i + d_{i-1})}{2}}} \quad (8)$$

Onde:

d_p : é o diâmetro médio de Sauter;

Δx_i : é a fração mássica retida na peneira i ;

d_i : é o diâmetro de abertura da peneira i ;

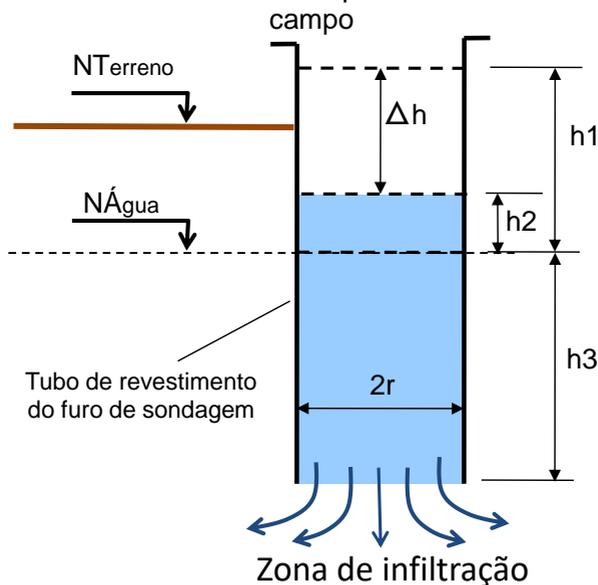
d_{i-1} : diâmetro da abertura da peneira $i-1$

6.10.4.3 Determinação da condutividade hidráulica por ensaios de infiltração

A condutividade hidráulica pode ser determinada em campo por ensaios de infiltração. A determinação pode ser feita utilizando o tubo de revestimento do furo de sondagem, antes da sua extração, que funciona como um piezômetro.

A Figura 86 permite visualizar as variáveis envolvidas nessa determinação, segundo Caputo (1996).

Figura 86: Arranjo do experimento para determinação da condutividade hidráulica do solo por ensaio de infiltração em campo



O ensaio consiste em colocar água no piezômetro até uma altura acima da linha do terreno, que permita o fácil controle e manutenção desse nível. A seguir são apresentados os procedimentos necessários para realização do teste de infiltração.

(1) preenche-se o tubo com água até a altura desejada, anota-se a medida “ h_1 ”

(2) para ensaios acima no NA deve-se saturar o poço por dez minutos;

(3) interrompe-se o fornecimento de água, tomando-se esse instante como tempo zero, e acompanha-se o rebaixamento do nível de água em intervalos curtos no começo e mais longos em seguida: Ex: 15s, 30s, 1min, 2min, 3min, 4min, 5min, etc.;

(4) Recomenda-se que o ensaio seja dado por concluído quando o rebaixamento atingir 20% da carga inicial aplicada ou 30 minutos de ensaio.

O cálculo da condutividade hidráulica é realizado a partir da Equação 9.

$$k = \frac{r_1}{4 \cdot h} \cdot \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (9)$$

Onde,

k : condutividade hidráulica (cm/s);

r : raio interno do piezômetro (cm);

h_1 : altura da coluna d'água sobre o nível inicial de água dentro piezômetro (cm);

Δh : diferença entre as alturas h_1 e h_2 , de água, dentro do piezômetro (cm);

Δt : diferença de tempo relativo a Δh .

Para a determinação da condutividade hidráulica do leito do rio, o procedimento é similar, com a diferença que o nível do terreno (fundo do leito do rio) estará abaixo do nível da água. O tubo utilizado será mais curto, o suficiente para passar cerca de 20 cm acima da superfície da água, e ser cravado no leito do rio, cerca de 10 cm. Normalmente se utiliza tubo de PVC com diâmetro de 100 mm, linha predial de esgoto sanitário, que possui a menor espessura de parede. Na extremidade que vai ser cravada no leito do rio, é recomendável fazer cortes em "V" (tipo dente de serra) em todo o perímetro da circunferência, para facilitar a penetração e não provocar deformação nos sedimentos. Para fazer esse ensaio não é necessário ter furo de sondagem.

6.10.4.4 Determinação do IQA

O IQA é composto por nove parâmetros, com seus respectivos pesos (w), que foram fixados em função da sua

importância para a conformação global da qualidade da água, conforme Tabela 29.

Tabela 29: Parâmetros de qualidade da água do IQA e respectivo peso

Parâmetro de qualidade da água	Unidades	Peso (w)
Oxigênio Dissolvido (OD)	% de saturação	0,17
Coliformes termotolerantes	NMP/100 mL	0,15
Potencial Hidrogeniônico (pH)	-	0,12
Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO _{5,20})	mgO ₂ /L	0,10
Temperatura da água (desvio)	°C	0,10
Nitrogênio Total	mg N/L	0,10
Fósforo Total	mgP/L	0,10
Turbidez	uT	0,08
Sólidos Totais	mg/L	0,08

Fonte: ANA (2017)

Além de seu peso (w), cada parâmetro possui um valor de qualidade (q), obtido do respectivo gráfico de qualidade em função de sua concentração ou medida, conforme Figuras 87, 88, 89, 90 e 91. O valor do IQA é calculado pelo produto ponderado entre os pesos e os valores dos parâmetros de qualidade, utilizando a Equação 10. Cabe ressaltar que o somatório dos valores w_i é um.

$$IQA = \prod_{i=1}^n q_i^{w_i} \quad (10)$$

Onde:

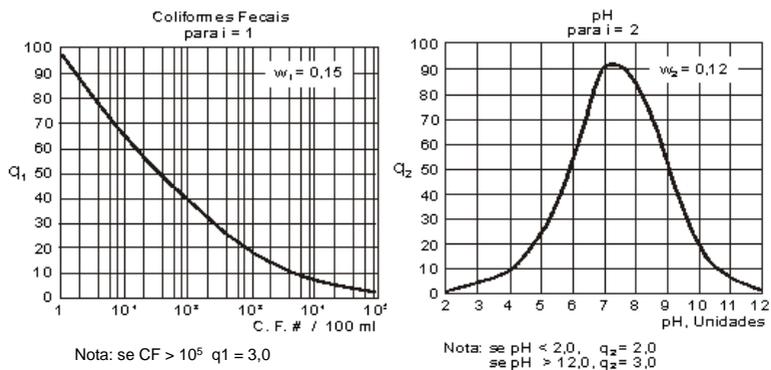
IQA: Índice de Qualidade das Águas (número entre 0 e 100);

q_i : qualidade do i -ésimo parâmetro. Um número entre 0 e 100, obtido do respectivo gráfico de qualidade, em função de sua concentração ou medida (resultado da análise);

w_i : peso correspondente ao i -ésimo parâmetro fixado em função da sua importância para a conformação global da qualidade (número entre 0 e 1);

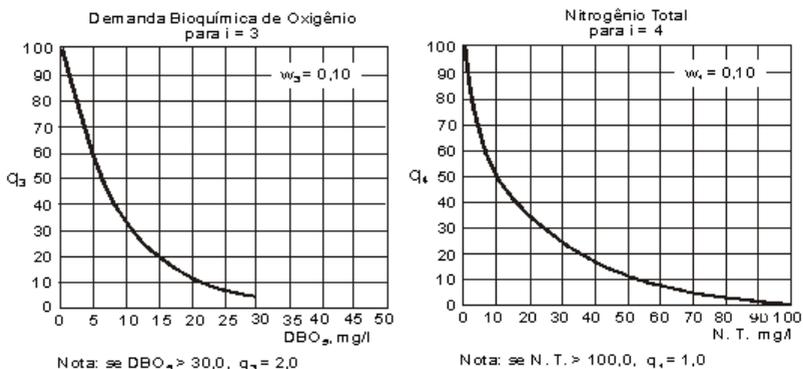
n : número de parâmetros que entram no cálculo do IQA.

Figura 87: Valores de qualidade dos parâmetros: coliformes fecais (q_1) e pH (q_2)



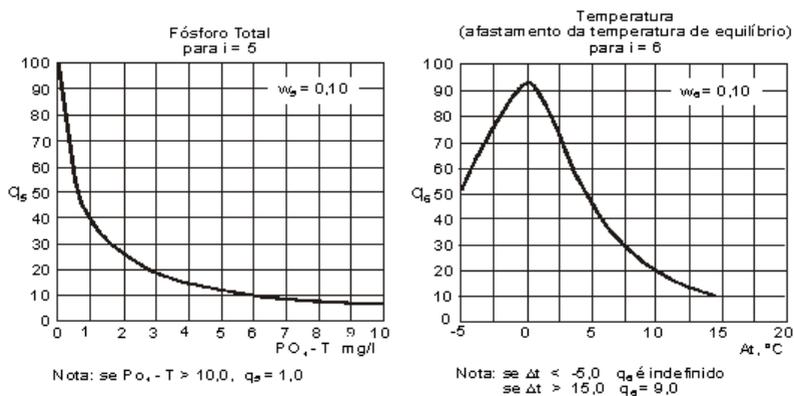
Fonte: ANA (2017)

Figura 88: Valores de qualidade dos parâmetros: DBO (q_3) e Nitrogênio total (q_4)



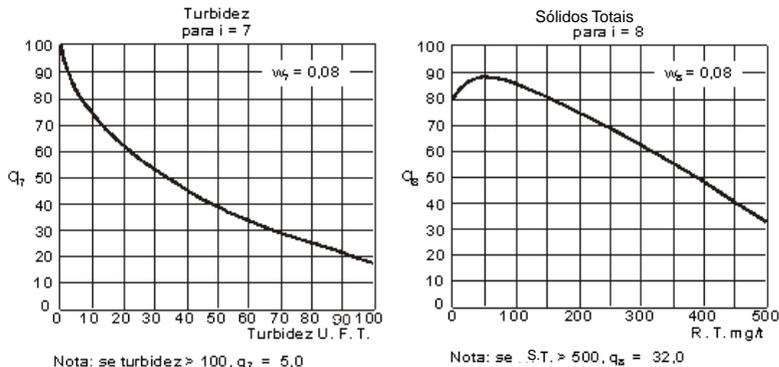
Fonte: ANA (2017)

Figura 89: Valores de qualidade dos parâmetros: Fósforo Total (q5) e Temperatura (q6)



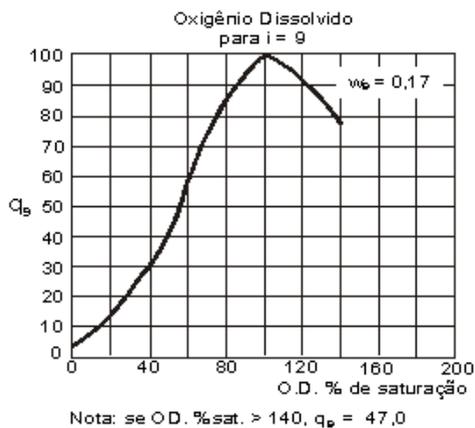
Fonte: ANA (2017)

Figura 90: Valores de qualidade dos parâmetros: Turbidez (q7) e Sólidos Totais (q8)



Fonte: ANA (2017)

Figura 91: Valores de qualidade do parâmetro: Oxigênio Dissolvido (q9)



Fonte: ANA (2017)

7 CONCLUSÕES

Considerando o local onde foi implantado o sistema de tratamento de filtração em margem, com relação à geologia do aquífero, condições de radiação e ao manancial utilizado, chegou-se às seguintes conclusões com os resultados obtidos:

- O local escolhido para implantação do sistema de FM apresentou características favoráveis para aplicação da técnica em termos de: localização dentro da bacia hidrográfica, perfil geológico do solo (sondagem), condutividade hidráulica e porosidade efetiva;
- As análises granulométricas confirmaram as informações da sondagem, com materiais mais finos (silte e argila) nas camadas superiores e mais grossos (areia média e grossa) nas camadas inferiores do solo, por onde a água percolava, o que é favorável à FM;
- A composição química do solo mostrou que o ferro e a matéria orgânica no solo tendem a ter maior concentração nas camadas superiores e menor concentração nas camadas inferiores;
- As análises estatísticas dos dados de composição química e granulométrica do solo demonstraram existir diferenças entre as camadas de solo, sendo que a camada mais profunda (por onde percola a água) é a mais distinta;
- O manancial escolhido apresentou características favoráveis à aplicação da FM, como: perenidade, leito do rio formado por areia grossa e pedregulho fino, permeabilidade hidráulica, dentro do recomendado, e variação de vazão e nível de água (favorece a auto limpeza do leito do rio e redução da colmatação);
- O monitoramento da turbidez do rio demonstrou diversos picos de turbidez, porém a turbidez da água do poço de FM se manteve estável;
- A perfuração do poço de produção pode representar um empecilho na implantação de um sistema de FM, se houver seixo de rio no perfil geológico do local, devido à dificuldade de perfuração neste tipo de material;
- A vazão das bombas, acionadas por energia solar fotovoltaica, demonstrou estar diretamente relacionada à

irradiação solar, ou seja, quanto maior a irradiação, maior a vazão bombeada;

- Apesar de o município de Orleans (SC) estar localizada em uma região não favorável, em termos de irradiação solar, para aplicação do bombeamento fotovoltaico, foi possível manter o reservatório com água suficiente para suprir a demanda de 10 pessoas por praticamente o ano inteiro. Dessa forma o bombeamento fotovoltaico se mostra viável para aplicação em grande parte do Brasil;
- O bombeamento fotovoltaico, realizado por 3 bombas de 100W em série, não causou o rebaixamento esperado no nível estático do poço de FM apesar da vazão ser superior à especificada no teste de bombeamento;
- A bomba elétrica usada na segunda etapa de monitoramento causou um maior rebaixamento no nível estático do poço de FM, induzindo maior contribuição do manancial;
- O índice RT demonstrou que mesmo com o aumento do rebaixamento do nível da água e o possível aumento da contribuição do manancial, a turbidez da água extraída no poço de FM se manteve estável;
- A FM se confirmou como uma técnica eficaz na remoção de cor e turbidez da água de mananciais;
- A qualidade da água extraída do poço de FM apresentou melhora significativa, quando comparada à água do manancial, com redução de cor aparente (95%), cor verdadeira (98%), turbidez (96%), COD (68%), ferro total(88%), coliformes totais (99,98%), *escherichia coli* (100%);
- A água produzida pela técnica de FM se enquadrou dentro dos padrões de potabilidade estipulados pela Portaria de Consolidação nº 5/17 do Ministério da Saúde, com exceção do parâmetro coliformes totais, o qual foi enquadrado após a cloração.
- A utilização das diretrizes para a escolha de local para implantação da FM foi importante para o bom funcionamento do sistema piloto implantado em Orleans (SC).

8 RECOMENDAÇÕES

A partir da experiência em campo desta pesquisa e dos resultados obtidos recomenda-se para estudos futuros:

- Realização de modelagens hidráulicas, para avaliação do escoamento da água subterrânea;
- Coleta de amostras de solo/subsolo de locais onde a FM foi aplicada e água extraída do poço apresentou elevadas concentrações de ferro, para buscar relacionar a qualidade da água com a composição química do solo;
- Avaliação do bombeamento fotovoltaico, aplicado à FM, com bomba de maior vazão e conseqüentemente maior rebaixamento do nível de água no poço;
- Avaliação dos custos envolvidos em um sistema de FM com bombeamento fotovoltaico em comparação a outros sistemas de tratamento de água aplicáveis a pequenas comunidades isoladas, em termos de R\$/m³.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. **NBR 6457 – Amostras de Solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 1986.

ABNT. **NBR 12244 – Construção de poço para captação de água subterrânea.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 1992.

ABNT. **NBR 13403 - Medição de vazão em efluentes líquidos e corpos receptores - Escoamento líquido.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 1995.

ABNT. **NBR 15495-1 – Poços de monitoramento de águas subterrâneas em aquíferos granulares.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2007.

ABNT. **NBR 12212 – Projeto de poço para captação de água subterrânea.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 1992.

ABNT. **NBR 7181 – Solo – Análise Granulométrica.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 1984.

ABDALLA, F.; SHAMRUKH, M. Quantification of River Nile/Quaternary aquifer exchanges via riverbank filtration by hydrochemical and biological indicators, Assiut, Egypt. **Journal of Earth System Science**, v. 125, n. 8, p. 1697–1711, 2016.

ALBUQUERQUE, T. B. V. **Caracterização física e biológica da zona hiporreica na interação rio-aquífero no rio Beberibe - Pernanbuco.** 2015. 166 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Pós Graduação em Engenharia Civil, Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

ANEEL. **Atlas de energia elétrica do Brasil.** Agência Nacional de Energia Elétrica. 2ª ed. 243p. Brasília. 2005.

APHA. **Standard Methods for the examination of water and**

wastewater.21^a ed. Washington: American Public Health Association, 2005.

BARTAK, R.; GRISCHEK, T.; GHODEIF, K. O.; WAHAAB, R. A. Shortcomings of the RBF Pilot Site in Dishna, Egypt. **Journal of Hydrologic Engineering.** v.20, p. 8. 2015.

BLAVIER, J., VERBANCJ, M. A. CRADDOCK, F., LOÉGEOIS, S., LATINIS, D., GARGOURI, L., FLORES RUA, G., DEBASTE, F., HAUT, B., Investigation of riverbed filtration systems on the Parapeti river, Bolívia. **Journal of Water Process Engineering.**v.1, p.27-36, 2014.

BONGIO, P. **Difese Spondali in Materiale Lapideo.** San Polo D'enza (re): 2010.

BORBA, R. P.; CAMARGO, O. A.; BETTIOL, W.; COSTA, V. L. Variação do balanço de cargas superficiais ao longo do perfil do solo e sua influência na mobilidade de ânions (NO₃, SO₄, Cl) na zona não saturada. In: X Congresso Brasileiro de Geoquímica. Porto de Galinhas, Pernambuco, 2005.

BOURG, A. C. M.; BERTIN, C. Biogeochemical processes during the infiltration of river water into an alluvial aquifer. **Environmental Science Technology.** n. 27, p. 661-666. 1993.

BOURG, A. C. M.; KEDZIOREK, M. A. M.; DARMENDRAIL, D. Organic Matter as the driving force in the solubilization of Fe and Mn during river water infiltration. In: RAY, C. (Ed.). Understanding Contaminant Biogeochemistry and Pathogen Removal. Kluwer, p. 43-54, 2002.

BOUWER, H. Artificial Recharge of groundwater: hydrology and engineering. **Journal of Hidrogeology.** v.10, p. 121-142. 2002.

BOYD, C. **Water Quality in Ponds Aquaculture.**Alabama: Alabama Agricultural Experimental Station. Auburn University. 482p, 1990.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria de Consolidação nº 5: Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde

do Sistema Único de Saúde. Anexo XX: Do Controle e da vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial da União nº 190, Seção 1. 2017.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (SNSA). Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento: Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2012. Brasília: SNSA/MCIDADES, 2014. 164 p.

BRUNKE, M.; GONSER, T. The ecological significance of exchange processes between rivers and groundwater, **Freshwater Biology**, v.37 n.1, p.1-33. 1997.

CALDWELL, T. G. Presentation of data for factors significant to yield from several riverbank filtration systems in the U.S. and Europe. In: HUBBS, S. A. **Riverbank Filtration Hydrology: Impacts on Systems Capacity and Water Quality**. Springer. Louisville. 2006.

CAPUTO, H. M. **Mecânica dos Solos e suas aplicações**. Livros Técnicos e Científicos Editora. vol. 1, ed. 6. Rio de Janeiro, 1996.

CARVALHO, R. D. Aspectos Econômicos e Ambientais em sistemas de abastecimento de água usando energia solar fotovoltaica e captação subterrânea. 2016, 105 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. Florianópolis, 2016.

CARVALHO, T. M. Técnicas de medição de vazão por métodos convencionais e não convencionais. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v. 1, n. 1, p.73-85. 2008.

CELLIGOI, A. Considerações sobre análises químicas de águas subterrâneas. **Geografia**. v. 8, n. 1, p.91-97. 1999.

CEPEL; CRESESB. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. Centro

de Referência para Energia Solar e Eólica de Salvo Brito. Rio de Janeiro. 2014.

CPRM. **Execução de Testes de Bombeamento em Poços Tubulares**. Programa de Ações Emergenciais de Combate aos Efeitos das Secas. Companhia de Pesquisa em Recursos Minerais. Serviço Geológico do Brasil. 1998.

DASH, R. R., MEHROTRA, I., KUMAR, P., GRISCHEK, T. Lake bank filtration at Nainital, India: water-quality evaluation. **Hydrogeology Journal**, v.16, n.6, p.1089-1099, 2008.

DASH, R. R., PRAKASH, E. V. P. B., KUMAR, P., MEHROTRA, I., SANDHU, C., GRISCHEK, T. River bankfiltration in Haridwar, India: removal of turbidity, organics and bactéria. **Hydrogeology Journal**, v.18, p.973-983, 2010.

DASH, R. R. et al. Study of water quality improvements at a riverbank filtration site along the upper course of the River Ganga, India. **Desalination and Water Treatment**, v. 54, n. 9, p. 2422–2431, 2015.

DILLON, P. J.; MILLER, M.; FALLOWFIELD, H.; HUTSON, J. The potential of riverbank filtration for drinking water supplies in relation to microcystin removal in brackish aquifers. **Journal of Hydrology**.v.266, n.3-4, p.209-221, 2002.

DONALD, D.; GRYGASKI, T. **Development of a Sustainable Potable Water Supply for Rural Villages in The Coastal Region of Tanzania, Africa**. Ontario: WW Engineering, 2002. 36 p.

EMBRAPA. **Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Estado de Santa Catarina**. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 1998.

EMBRAPA. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 2 ed. Rio de Janeiro. 1997.

EMBRAPA. **Solos do Estado de Santa Catarina**. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 2004.

EPE. **Análise da inserção da geração solar na matriz elétrica brasileira**. Nota Técnica da Empresa de Pesquisa Energética. Ministério de Minas e Energia. Rio de Janeiro. 2012.

ESQUIVEL, L. G. R. Remoção de matéria orgânica natural e precursores de trialomitanos por filtração em margem na Lagoa do Peri, Santa Catarina, Brasil. 2012, 246 p. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. Florianópolis, 2012.

FEDRIZZI, M. C.; RIBEIRO, F. S.; ZILLES, R. Bombeamento de água no meio rural, análise econômica de duas configurações fotovoltaicas e uma elétrica convencional. **Avances Em Energías Renovables y Medio Ambiente**, v. 13, n. 4, p.117-123, 2009.

FEDRIZZI, M. C. **Sistemas fotovoltaicos de abastecimento de água para uso comunitário: lições aprendidas e procedimentos para potencializar sua difusão**. 2003. 174 p. Tese (Doutorado) - Programa Interunidades de Pós-graduação em Energia, Instituto de Física, Usp, São Paulo, 2003

FEITOSA, A. C. F. Hidráulica de Poços. In: FEITOSA, A. C. F.; FILHO, J. M. **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações**. 2 ed. CPRM - Serviço Geológico do Brasil. Laboratório de Hidrogeologia da Universidade Federal de Pernambuco. Fortaleza. 2000.

FOX, G. Evaluation of a stream aquifer analysis test using analytical solutions and field data. **Journal of the American Water Resources Association**, AWRA. p 755-763. 2004.

FRAIDENRAICH, N.; VILELA, O. C. Avanços em sistemas de abastecimento de água com bombeamento fotovoltaico para comunidades rurais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 4, n. 3, p.69-81. 1999.

FREITAS, D. A. **O emprego da técnica de filtração em margem para tratamento de água no rio Beberibe, região metropolitana do Recife.** 2010, 148p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Pernambuco. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Recife, 2010.

FREITAS, D. A.; CABRAL, J. J. S. P.; PAIVA, A.; MOLICA, R. Application of bank filtration technology for water quality improvement in a warm climate: A case study at Beberibe River in Brazil. **Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA**, v. 61, n. 5, p. 319–330, 2012.

GHODEIF, K.; GRISCHEK, T.; BARTAK, R.; WAHAAB, R.; HERLITZIUS, J. Potential of river bank filtration (RBF) in Egypt. *Environmental Earth Science*, v.75, n. 671, p. 1-13. 2016.

GRAF, W. H. **Hydraulics of sediment transport.** 3 ed. Water Resources Publications. Colorado, USA. 1998.

GRISCHEK, T.; SCHUBERT, J.; JASPERSE, J. L.; STOWE, S. M.; COLLINS, M. R. What is the appropriate site for RBF? Chapter: Bank Filtration/Recharge in Fractured Rock. In: Fox, P. **Management of Aquifer Recharge for Sustainability.** Acacia Publishing Incorporated. Phoenix, Arizona. 2007.

GRISCHEK, T.; RAY, C. Bank filtration as managed surface groundwater interaction. **International Journal of Water**, v. 5, n. 2, p.125–139. 2009.

GUNKEL, G.; HOFFMANN, A. Bank filtration of rivers and lakes to improve the raw water quality for drinking water supply. In: GERTSEN, N.; SONDERBY, L. (Eds.). **Water Purification.** New York: Nova Science Publishers, Inc., p. 137-169. 2009.

HAMDAM, A. M., SENSOY, M. M., MANSOUR, M. S. Evaluating the effectiveness of bank infiltration process in New Aswan, Egypt. **Arabian Journal of Geosciences.** v.6, p.4155-4165, 2013.

HEINECK, K. S. Química do Solo. Geotecnologia Ambiental. Notas de Aula. Programa de Pós-graduação em Engenharia

Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2012.

HENZLER, A. F.; GRESKOWIAK, J.; MASSMAN, G. Modeling the fate of organic micropollutants during river bankfiltration (Berlin, Germany). **Journal of Contaminant Hydrology**. v.156, p. 78-92, 2014

HISCOCK, K. M.; GRISCHEK, T. Attenuation of GroundwaterPollution by Bank Filtration. **Journal of Hydrology**, v. 266, p. 139–144. 2002.

HJULSTRÖM, F. Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the River Fyris. Geological Institute: Universitet Upsala, 1935.

HULSHOFF, I.; GRESKOWIAK, J.; GRUTZMACHER, G. Relevance and Opportunities of BF to provide safe water for developing and newly-industrialized countries. 2009.

HUNT, H. American experience in installing horizontal collector wells. In: **Riverbank Filtration – Improving source-water quality**, v.43, cap 2, p.29–34, 2003.

HUNT, H.; SCHUBERT, J.; RAY, C. Conceptual Design of Riverbank Filtration Systems. In: **Riverbank Filtration – Improving source-water quality**, v.43, cap 1, p.19–27, 2003.

HYPOLITO, R.; ANDRADE, S.; EZAKI, S. Solo. IN: **Geoquímica da Interação Água/Rocha/Solo: Estudos Preliminares**. São Paulo: All Print Editora. 450p. 2011.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Demográfico – Santa Catarina, 2014**. Rio de Janeiro, 2014.

IBRAHIM, N.; AZIZ, H. A.; YUSOFF, M. S. Heavy metals concentration in river and pumping well for river bank filtration (RBF) system: case study in Sungai Kerian. **Jurnal Teknologi: Sciences & Engineering**. v.74, n.11, p. 59-67. 2015.

JHA, R., DALAI, C. Review on Water Treatment Techniques Used for Riverbank Filtration. **International Journal of Civil Engineering Research**. v. 5, n. 3, p. 221-226, 2014. Research India Publications;

KIM, S. B.; CORAPCIOGLU, M. Y., KIM D. J. Effect of dissolved organic matter and bacteria on contaminant transport in riverbank filtration. **Journal of Contaminant Hydrology**. Vol 66, p.1– 23, 2003.

KOHFAHL, C.; MASSMANN, G.; PEKDEGER, A. Sources of oxygen flux in groundwater during induced bankfiltration at a site in Berlim, Germany. **Hydrogeology Journal**, v.17, p. 571-578, 2009.

KUEHN, W.; MUELLER, U. Riverbank filtration an overview. **Journal AWWA**, v. 92, n. 12, p. 60-69, 2000.

LEE, J.; HAMM, S.; CHEONG, J.; KIM, H.; KO, E.; LEE, K.; LEE, S. Characterizing riverbank-filtered water and river water qualities at a site in the lower Nakdong River basin, Republic of Korea. **Journal of Hydrology**. n. 376. p.209–220, 2009.

MASSMANN, G.; SÜLTENFUB, J.; DÜNNBIER, U.; KNAPPE, A.; TAUTE, T.; PEKDEGER, A. Investigation of groundwater residence times during bank filtration in Berlim: a multi-tracer approach. **Hydrological Processes**. n. 22, p. 788-801. 2008.

MELFI, A.J.; PEDRO, G.; VOLKOFF, B. Natureza e distribuição dos compostos ferríferos nos solos do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.3, p. 47-54. 1979.

MELÉNDEZ, T. A. F. **Avaliação de Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento**. Dissertação (Mestrado do programa de pós Graduação em Energia. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2009.

MELO, V. F.; FONTES, M. P. F.; NOVAIS, R. F.; SINGH, B.; SCHAEFER, C. E. G. R. Caracterização dos óxidos de ferro e de

alumínio de diferentes classes de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p.19-32, 2001.

MEURER, E. J. **Fundamentos da Química do Solo**. Porto Alegre: Evangraf, 5ª ed. 280p. 2012.

MICHELAN, D. C. G. DOS S. **Filtração Em Margem De Rio Precedendo A Filtração Lenta, Para Remoção De Carbofurano, Em Tratamento De Água Para Consumo Humano**. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2010.

MONDARDO, R. I. **Avaliação da filtração em margem como pré tratamento à filtração direta descendente na remoção de células de cianobactérias e saxitoxinas**. 201p. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2009.

MORUZZI, R. B., REALI, M. A. P. Oxidação e remoção de ferro e manganês em águas para fins de abastecimento público ou industrial – uma abordagem geral. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v.4, n.1, p.29-43, 2012.

NIEDZIALKOSKI, R. K.; NOGUEIRA, C. E. C.; AVACI, A. B.; SIQUEIRA, J. A. C., MENEZES, M. J. S., OLIVEIRA, N. N. P. Avaliação de um sistema fotovoltaico utilizado para o bombeamento de água em Cascavel/PR. **Acta Iguazu**, Cascavel, v. 1, n. 3, p.44-49, 2012.

OLIVEIRA, T. C. S.; RODRIGUES, B. F.; CARNEIRO, E. F. Qualidade de vida de ribeirinhos na Amazônia em função do consumo de água. In: IV Encontro Nacional da Anppas. Brasília, 2008.

PAIVA, A. L. R. **O processo de filtração em margem e um estudo de caso no rio Beberibe**. 2009. 171p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2009.

PALHARES, J. C. P. et al. **Medição da vazão em rios pelo método do flutuador**: Comunicado Técnico 455. Concórdia SC 9999. 4p. Embrapa, 2007.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A.; **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Grupo de Trabalho de Energia Solar - GTES, CEPEL - CRESESB, Rio de Janeiro, 2014, 530p.

RABELO, L. **Estudos preliminares para implantação da filtração em margem na lagoa do Peri como pré-tratamento de água para remoção de fitoplâncton**. 2006, 151p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. Florianópolis, 2006.

RAY, C. World wide potential of river bank filtration. **Clean Technologies and Environmental Policy**, 10.1007/s10098-008-0164-5, 2008.

RAY, C.; SOONG, T. W.; LIAN, Y. Q.; ROADCAP, G. S. Effect of flood-induced chemical load on filtrate quality at bank filtration sites. **Journal of Hydrology**, v.266, n.3-4, p.235-258, 2002.

RAY, C.; SCHUBERT, J.; LINSKY, R. B.; MELIN, G. Introduction. In RAY, C; MELIN, G.; LINSKY, R. B. **Riverbank Filtration – improving source-water quality**. Dordrecht: Kluwer Academic Publisher, 1-15p. 2003.

RICHTER, C. A.; AZEVEDO NETO, J. M. **Tratamento de Água: Tecnologia atualizada**. 7 ed. São Paulo: Ed. Edgard Blücher Ltda, 332 p. 2007.

ROMERO-ESQUIVEL, L. G.; GRISCHEK, T., PIZZOLATTI, B. S., MONDARDO, R. I., SENS, M. L. Bank filtration in a coastal lake in South Brazil: water quality, natural organic matter (NOM) and redox conditions study. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 19, n. 8, p. 2007–2020. 2017.

ROMERO, L. G.; MONDARDO, R. I.; SENS, M. L.; GRISCHEK, T. Removal of cyanobacteria and cyanotoxins during lake bank filtration at Lagoa do Peri, Brazil. **Clean Technologies and**

Environmental Policy, v. 16, n. 6, p. 1133–1143, 2014.

RONEY, J. M. **World Solar Power Topped 100,000 Megawatts in 2012**. Earth Policy Institute, 2013.

SÃO PAULO. Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica. Secretaria Municipal de Desenvolvimento Urbano. **Manual de drenagem e manejo de águas pluviais**: Aspectos tecnológicos: diretrizes para projetos. São Paulo: Miolo, p. 130. 2012.

SANDHU, C.; GRISCHEK, T.; SCHOENHEINZ, D.; PRASAD, T; THAKUR, A. K. Evaluation of Bank Filtration for Drinking Water Supply in Patna by the Ganga River, India. In: RAY, C. and SHAMRUKH, M. (eds.). **Riverbank Filtration for Water Security in Desert Countries**. Springer Science, p. 203-222. 2011.

SANTOS, L. L. Filtração em margem para remoção de contaminantes físico-químicos em um reservatório de abastecimento público no Semiárido Pernambucano. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2012.

SCHMIDT C. K.; LANGE F. T.; SACHER F.; BAUS C.; BRAUCH H-J.; Assessing the fate of organic micro pollutants during Riverbank filtration utilizing field studies and laboratory test systems, **Geophysical Research Abstracts**, v.5, p.85-95, 2003.

SCHMIDT, C. K.; LANGE, F. T.; BRAUCH, HEINZ-JÜRGEN; KÜHN, W. Experiences with riverbank filtration and infiltration in Germany. **DVGW-Water Technology Center**, p.1-17, 2003.

SCHÖN, M. **Systematic comparison of riverbank filtration sites in Austria and India**. 2006. 63p. TCC (Graduação em Engenharia Civil). Universidade de Innsbruck. Innsbruck, 2006.

SCHUBERT, J. Hydraulic aspects of riverbank filtration - field studies. **Journal of Hydrology**, v.266, n.3-4, p.145-161, 2002.

SCHWERTMANN, U.; TAYLOR, R. M. Iron Oxides. In: DIXON, J. B. & WEED, S. B., eds. Minerals in soil environments. 2.ed. Madison, Soil Science Society of America, p.379-438. 1989.

SENS, M. L.; DALSSASSO, R. L.; MONDARDO, R. I.; MELO FILHO, L. C. Filtração em margem. In: Pádua, V. L. (coord). **Contribuição ao estudo da remoção de cianobactérias e microcontaminantes orgânicos por meio de técnicas de tratamento de água para consumo humano**. ABES- Prosab 4, 173-236p. Rio de Janeiro, 2006.

SILVEIRA, A. L. L. Desempenho de formulas de tempo de concentração em bacias urbanas e rurais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v.10, pp.5-23. 2005

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO - SNIS 2014. Publicações do PMSS. Disponível em <<http://www.snis.gov.br/diagnostico-agua-e-esgotos>>. Acesso em 19 de Agosto de 2015.

SHAMRUKH, M.; ABDEL-WAHAB A. Riverbank filtration for sustainable water supply: application to a large-scale facility on the Nile River. **Clean Technologies and Environmental Policy**. Springer-Verlag, v.10.351-358p. 2008.

SHARMA, B.; UNİYAL, D. P.; DOBHAL, R.; KIMOTHI, P. C.; GRISCHEK, T.A sustainable solution for safe drinking water through bank filtration technology in Uttarakhand, India. **Current Science**. v. 107, n.07. p.1118 -1124. 2014.

SHEETS, R.A.; DARNER, R.A.; WHITTEBERRY, B.L. Lag times of bank filtration at a well field, Cincinnati, Ohio, USA. **Journal of Hydrology**, v.266, p.162–174, 2002.

SOARES, M. B. D. **Estudo da implantação em escala real da filtração em margem em lago de piscicultura extensiva para dessedentação animal**. 134p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2009.

SOARES, M. B. D. **The influence of high infiltration rates, suspended sediment concentration and sediment grain size on river and lake bed clogging.** 143p. Thesis (Doctorate in Engineering) Technische Universität Berlin. Berlin, 2015.

SOPHOCLEOUS, M. Interactions between groundwater and surface water: the state of the science. **Hydrogeologic Journal**.v10, p52-67. 2002.

STAUDER, S.; STEVANOVIC, Z.; RICHTER, C.; MILANOVIC, S.; TUCOVIC, A.; PETROVIC, B. Evaluating Bank Filtration as an Alternative to the Current Water Supply from Deeper Aquifer: A Case Study from the Pannonian Basin, Serbia. **Water Resources Management**, v.26, p. 581-594, 2012.

STUYFZAD, P.; JUHÁSZ-HOLTERMAN, M.; LANGE, W. **Riverbank filtration in Netherlands: well fields, clogging and geochemical reactions.** NATO Advanced Research Workshop: Clogging in Riverbank Filtration. Bratislava. 2004.

TEDESCO, M. J. GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. J. **Análises de solo, plantas e outros materiais.**2 ed. Departamento de Solos. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 1995.

THAKUR, A. K.; OJHA, C. S.; SINGH, V. P.; GURJAR, B. R.; SANDHU, C. Removal of Pathogens by River Bank Filtration at Haridwar, India. **Hydrological Process**, v.27, p.1535-1542, 2013.

TIBA, Chigueru. Atlas Solarimétrico do Brasil: banco de dados solarimétricos. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2000.

TUFENKJI, N.; RYAN, J. N.; E ELIMELECH, M. Bank filtration: a simple technology may inexpensively clean up poor-quality raw surface water. **Environmental Science & Technology**. Colorado, USA, p. 423-428. 2002.

TYAGI, S., DOBHAL, R., KIMOTHI, P.C., ADLAKHA, L.K., SINGH, P., UNİYAL, D.P. Studies of River Water Quality Using River Bank Filtration in Uttarakhand, India. **Water Quality**,

Exposure and Health, v.5, p.139-148. 2013.

UMAR, D. A. et al. An overview assessment of the effectiveness and global popularity of some methods used in measuring riverbank filtration. **Journal Of Hydrology**, v. 550, p.497-515, 2017.

URBANETZ, J. J.; **Sistemas fotovoltaicos conectados a redes de distribuição urbana: sua influência na qualidade da energia elétrica e análise dos parâmetros que possam afetar a conectividade**; Tese de Doutorado; Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2010

USGS. United States Geological Survey. **Microbe concentrations, laser particle counts and stable hydrogen and oxygen isotope ratios in samples from a Riverbank filtration study**, Platte River. Nebraska.v.2. 2005.

VASIL'CHENKO, G. V..Scale effects in modeling hydraulic structures. **Hydrotechnical Construction**,[s.l.], v. 19, n. 7, p.374-378, 1985. Springer Nature.

WANG, L.; YE, X.; DU, X. Suitability Evaluation of River Bank Filtration along the Second Songhua River, China. **Water**, v. 8, n. 5, p.176-199. 2016.

10 APÊNDICES

10.1 APÊNDICE A –Caracterização e classificação do solo do local do experimento

DESCRIÇÃO GERAL

CLASSIFICAÇÃO: CAMBISSOLO FLUVICO Horizonte A moderado.

LOCALIZAÇÃO: coordenadas geográficas.

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL: Perfil localizado em corte à margem do Rio Belo, interior do município de Orleans, SC, sob cobertura de pastagem naturalizada com predomínio de gramíneas.

LITOLOGIA: Sedimentos alóctones recentes de consistência semibranda. Origem aluvionar-coluvionar.

PEDREGOSIDADE: Não pedregoso

ROCHOSIDADE: Não rochoso

RELEVO LOCAL: Planície fluvial, com relevo plano (0–3% de declividade).

RELEVO REGIONAL: Ondulado a forte ondulado (variando de 13 a 45% de declividade).

EROSÃO: Não aparente.

DRENAGEM: Bem drenado.

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA: Floresta Ombrófila Densa. Bioma Mata Atlântica.

USO DA ÁREA: Pastagem.

CLIMA: Cfa de Koppen.

ALTITUDE: 140 metros.

DESCRITO E COLETADO POR: Engenheiro Agrônomo
Msc. Vilmar Müller Júnior.

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

Ap 0-4 cm; (10YR 4/4, úmida) e (10YR 6/3 seca); franco argiloarenosa; fraca a moderada, muito pequena a pequena, granular; solta a macia, muito friável, não plástica a ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição plana e clara. Raízes muito finas a médias e comuns.

A2 4-29cm; (10YR 5/4 úmida) e (10YR 6/4 seca); argiloarenosa; fraca a moderada, média, blocos angulares e subangulares; macia, muito friável, ligeiramente plástica a plástica e ligeiramente pegajosa; transição plana e clara.

BA 29-55 cm; (10YR 5/6 úmida); franco argiloarenosa; moderada, média a grande, pequenos prismas que se desfazem em blocos angulares e subangulares; macia, friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição plana e gradual. Mosqueado de coloração avermelhada, pouco, pequeno e difuso.

B55-73 cm; (10YR 5/4 úmida); mosqueado comum, pequeno e distinto (5YR 4/6); argila a argiloarenosa; moderada, média a grande, blocos angulares a subangulares; macia a ligeiramente dura, friável, plástica e pegajosa; transição plana e gradual.

C1 73-95 cm; (10YR 5/4 úmida); mosqueado pouco, pequeno e distinto (5YR 5/6); argiloarenosa; moderada, média a grande; firme, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição plana e gradual.

C2 95-132 cm+; (10YR 4/6 úmida); mosqueado comum, médio e difuso (5YR 5/5); franco argiloarenosa; fraca, média, blocos angulares e subangulares; friável, não plástica e não pegajosa.

Figura 92: Perfil de CAMBISSOLO FLÚVICO.



Figura 93: Vista geral da paisagem de ocorrência do CAMBISSOLO FLÚVICO.

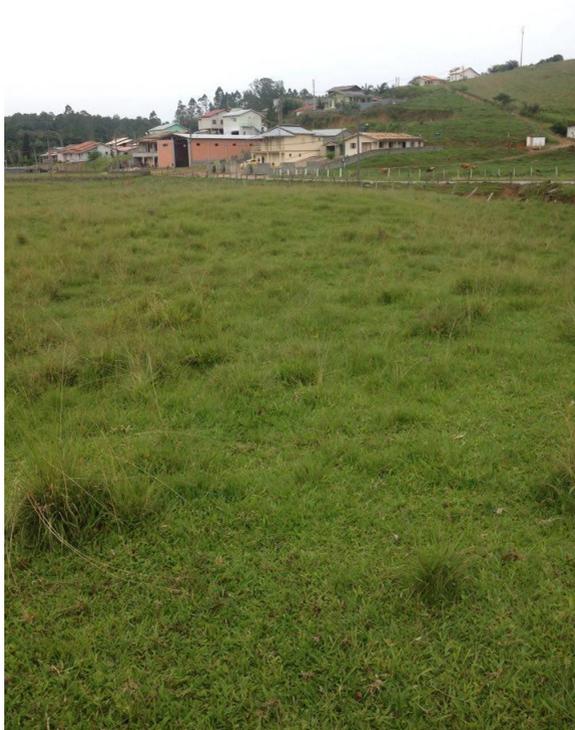
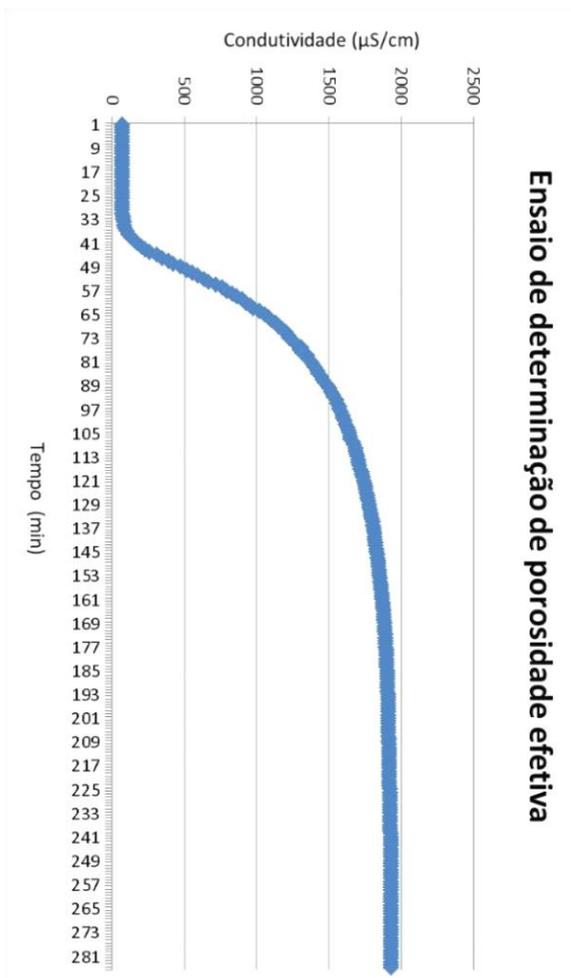


Figura 94: Paisagem de ocorrência do CAMBISSOLO FLÚVICO. Vista do curso de água existente no local.



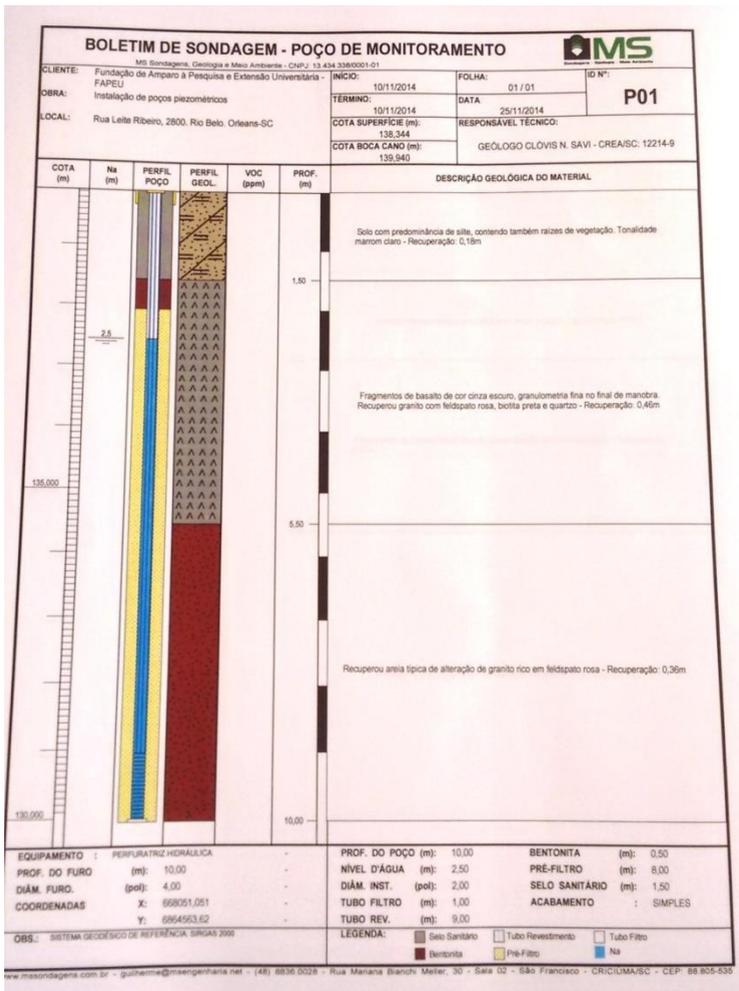
10.2 APÊNDICE B – Gráfico do ensaio de determinação da porosidade efetiva



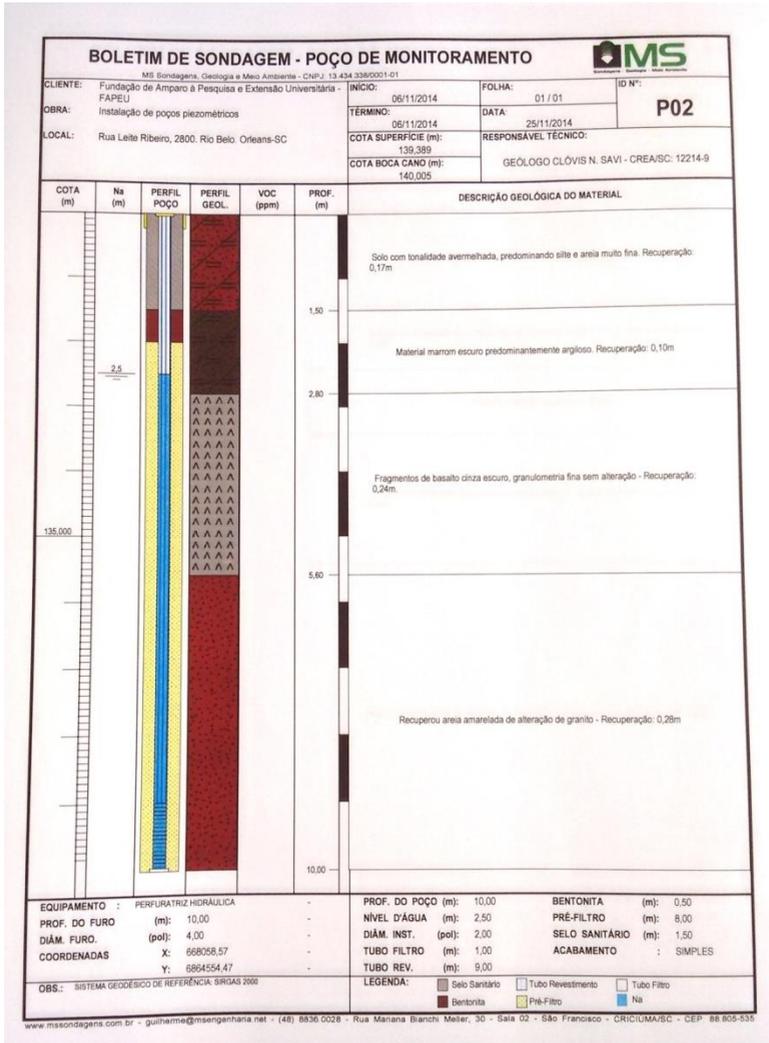
11 ANEXOS

11.1 ANEXO 1: Laudos das sondagens na área de implantação do poço de FM

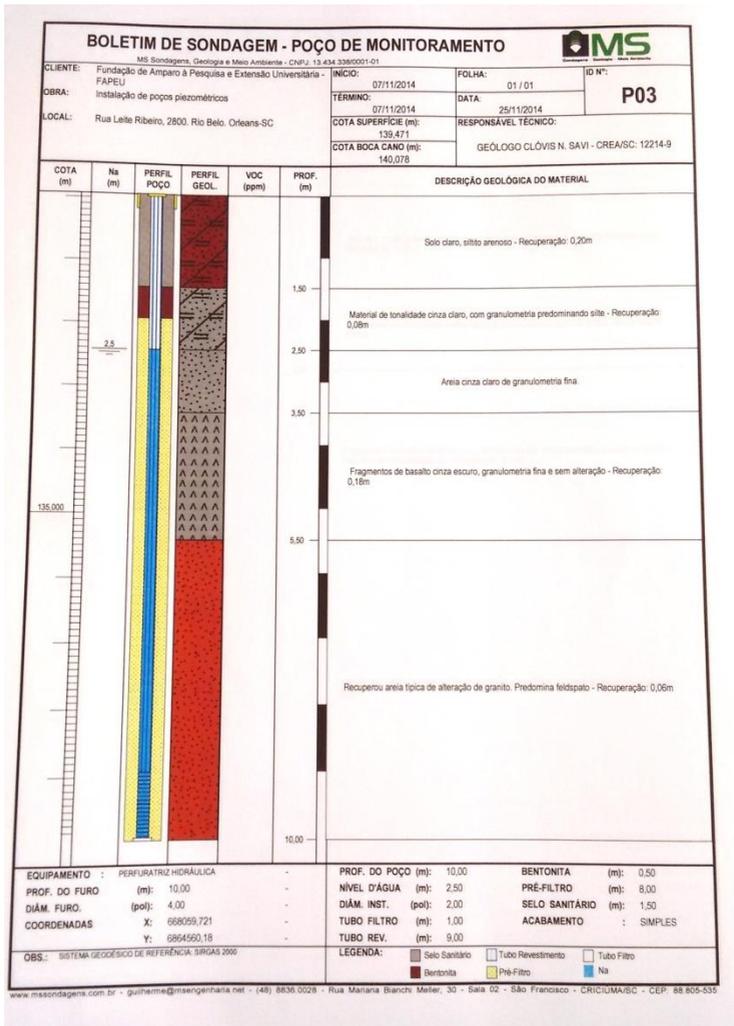
- Piezômetro P01



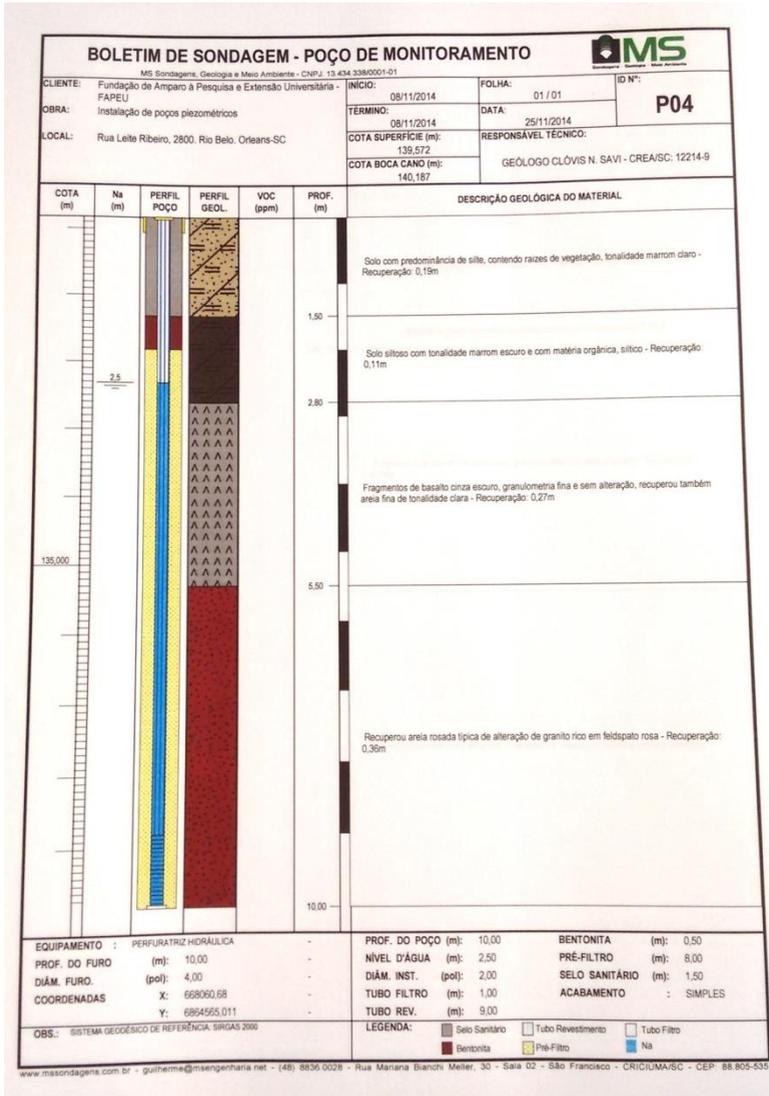
- Piezômetro P02



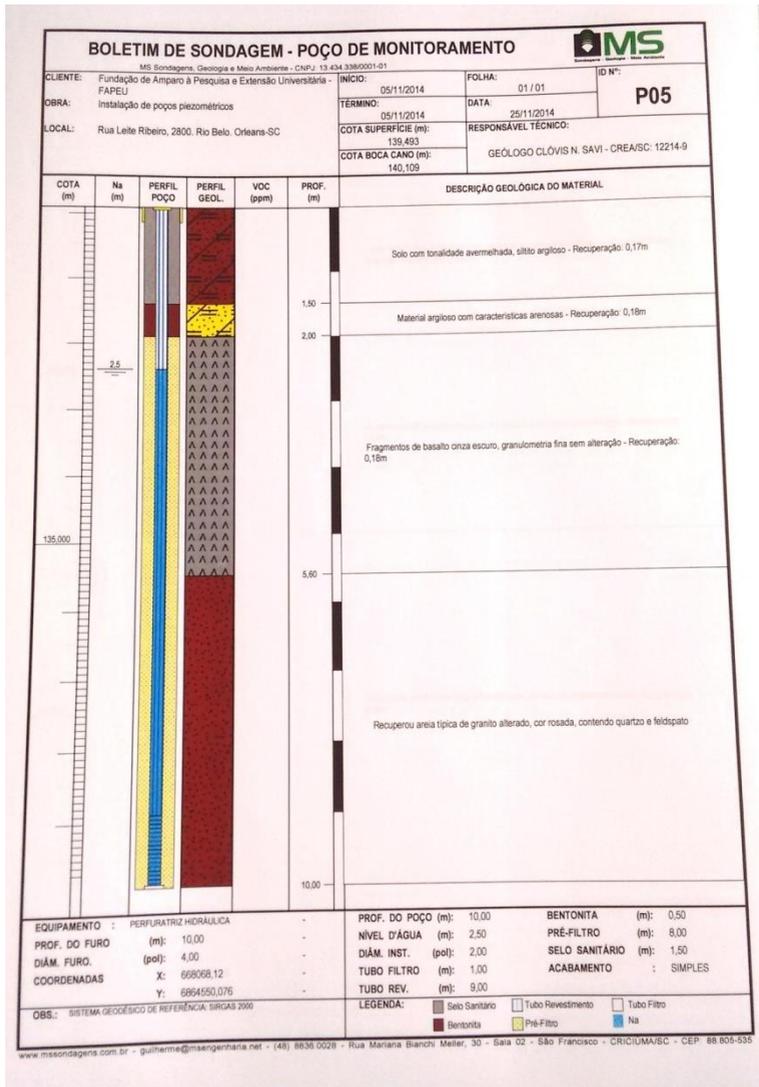
- Piezômetro P03



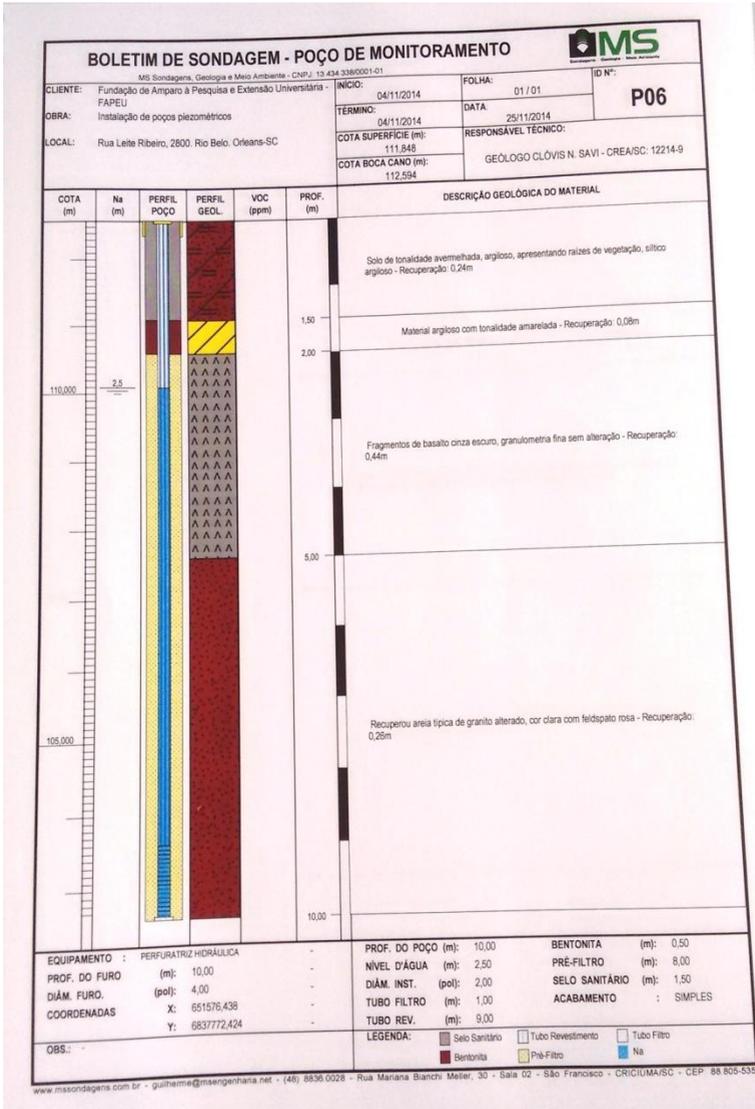
- Piezômetro P04



- Piezômetro P05



- Piezômetro P06



- Piezômetro P07

