

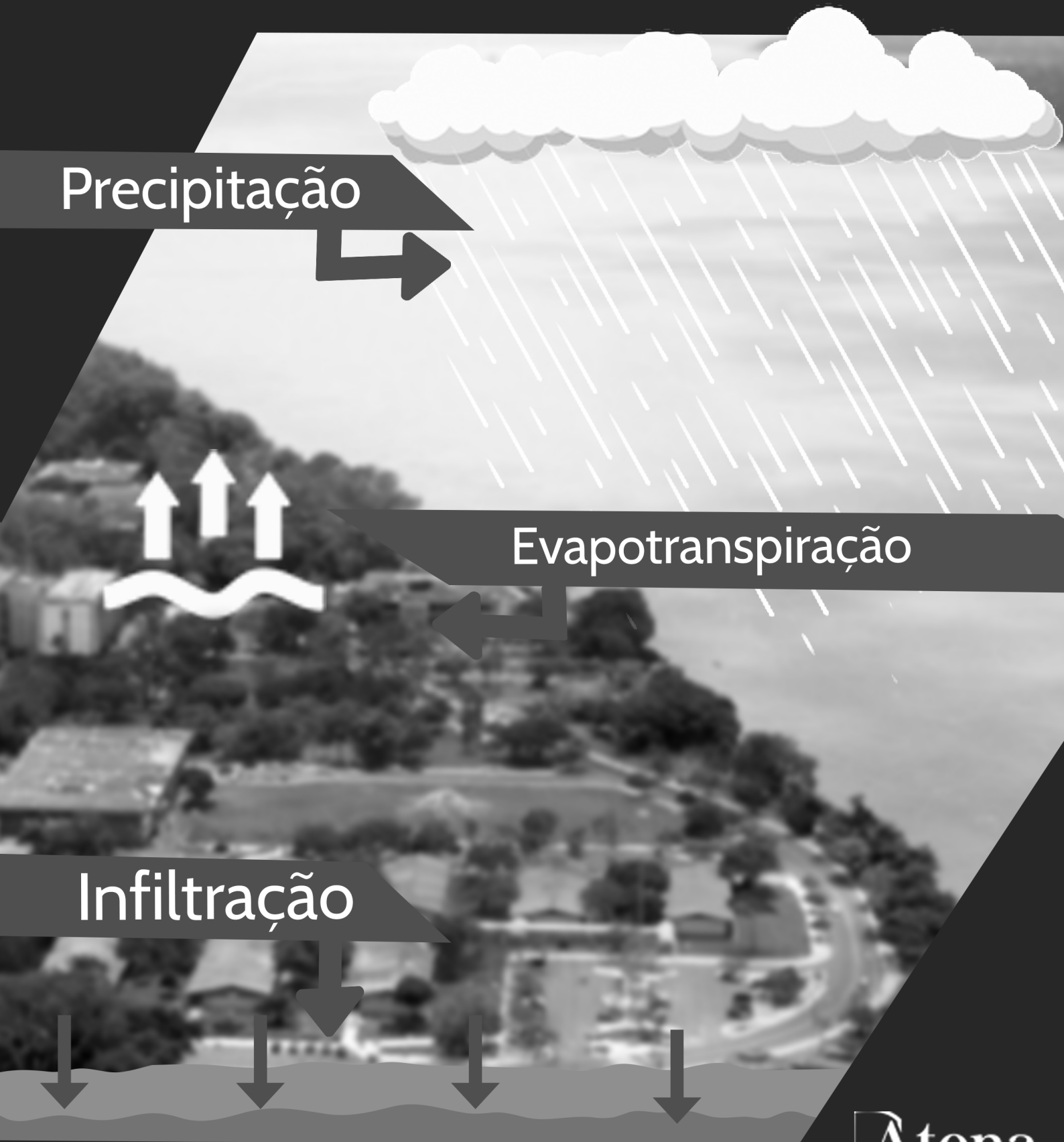
Demandas Essenciais para o Avanço da Engenharia Sanitária e Ambiental

Giovanni Chaves Penner



Demandas Essenciais para o Avanço da Engenharia Sanitária e Ambiental

Giovanni Chaves Penner



2019 by Atena Editora
Copyright © Atena Editora
Copyright do Texto © 2019 Os Autores
Copyright da Edição © 2019 Atena Editora
Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira
Diagramação: Karine de Lima
Edição de Arte: Lorena Prestes
Revisão: Os Autores



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição Creative Commons. Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores. Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Conselho Editorial

Ciências Humanas e Sociais Aplicadas

Profª Drª Adriana Demite Stephani – Universidade Federal do Tocantins
Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Alexandre Jose Schumacher – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Antonio Gasparetto Júnior – Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa
Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia
Prof. Dr. Edvaldo Antunes de Faria – Universidade Estácio de Sá
Prof. Dr. Eloi Martins Senhora – Universidade Federal de Roraima
Prof. Dr. Fabiano Tadeu Grazioli – Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
Profª Drª Keyla Christina Almeida Portela – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Pereira da Silva – Universidade Federal do Maranhão
Profª Drª Miranilde Oliveira Neves – Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Rita de Cássia da Silva Oliveira – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Sandra Regina Gardacho Pietrobom – Universidade Estadual do Centro-Oeste
Profª Drª Sheila Marta Carregosa Rocha – Universidade do Estado da Bahia
Prof. Dr. Rui Maia Diamantino – Universidade Salvador
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

Ciências Agrárias e Multidisciplinar

Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano
Prof. Dr. Antonio Pasqualetto – Pontifícia Universidade Católica de Goiás
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná
Profª Drª Diocléa Almeida Seabra Silva – Universidade Federal Rural da Amazônia
Prof. Dr. Écio Souza Diniz – Universidade Federal de Viçosa
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Júlio César Ribeiro – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

Ciências Biológicas e da Saúde

Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás
Prof. Dr. Edson da Silva – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri
Profª Drª Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Profª Drª Magnólia de Araújo Campos – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto
Prof. Dr. Alexandre Leite dos Santos Silva – Universidade Federal do Piauí
Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)	
P413d	Penner, Giovanni Chaves. Demandas essenciais para o avanço da engenharia sanitária e ambiental [recurso eletrônico] / Giovanni Chaves Penner. – Ponta Grossa, PR: Atena Editora, 2019. – (Demandas Essenciais para o Avanço da Engenharia Sanitária e Ambiental) Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web Inclui bibliografia ISBN 978-85-7247-833-5 DOI 10.22533/at.ed.335192012 1. Engenharia ambiental. 2. Engenharia sanitária. I. Título. II.Série. CDD 628.362
Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422	

Atena Editora
Ponta Grossa – Paraná - Brasil
www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br

Atena
Editora

Ano 2019

APRESENTAÇÃO

A coleção “Demandas Essenciais para o Avanço da Engenharia Sanitária e Ambiental” aborda uma série de livros de publicação da Atena Editora, em seu volume 1, apresentando, em métodos, diretrizes, resultados, discussões de diversas abordagens acerca da importância da engenharia ambiental e sanitária associada aos recursos hídricos, tendo como base suas diversas interfaces do conhecimento.

O objetivo central deste livro foi apresentar a aplicação de diversos aspectos metodológicos para obtenção de dados primários de campo na área de recursos hídricos, os quais são úteis para subsidiar acadêmicos, pesquisadores, engenheiros e técnicos da Região Amazônica quanto aos resultados práticos levantados para as condições climáticas e regionais do ciclo hidrológico que acontece nessa região.

Assim, em razão da escassez de informações que se tem em recursos hídricos nessa região e sabendo o quão importante é a divulgação científica, evidenciamos a necessidade de promover na forma de coletânea técnica a elaboração de sete capítulos, os quais são descritos a seguir:

Capítulo 1. Utilização de método de diluição química para monitoramento de vazão: estudo de caso na bacia do igarapé Uriboquinha em Marituba-PA;

Capítulo 2. Elaboração do balanço hídrico climatológico para a microbacia hidrográfica do igarapé Uriboquinha no município de Marituba-PA;

Capítulo 3. Metodologias de determinação da condutividade hidráulica na zona não saturada: um estudo sobre aplicações de métodos de campo;

Capítulo 4. Determinação da taxa média de infiltração para a microbacia do igarapé Uriboquinha na região do aterro sanitário de Marituba-PA;

Capítulo 5. Regionalização de vazão como ferramenta para a determinação da vazão de referência do igarapé Uriboquinha no município de Marituba-PA;

Capítulo 6. Estimativa da recarga natural do aquífero livre na microbacia hidrográfica do entorno do aterro sanitário de Marituba-PA;

Capítulo 7. Proposta de alternativa para estimar o tempo de remediação de águas subterrâneas contaminadas por BTEX.

A disseminação dessa coletânea técnica, realizada arduamente com planejamento dos trabalhos aqui mencionados foi desenvolvida de maneira detalhada e didática, para que se possa replicar e outros locais da região Amazônica as técnicas e ferramentas para obtenção de mais dados de campo na área de recursos hídricos, propiciando assim à transferência dos conhecimentos e resultados na Região Norte do Brasil.

Giovanni Chaves Penner

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	7
UTILIZAÇÃO DE MÉTODO DE DILUIÇÃO QUÍMICA PARA MONITORAMENTO DE VAZÃO: ESTUDO DE CASO NA BACIA DO IGARAPÉ URIBOQUINHA EM MARITUBA-PA	
Moisés Marçal Gonçalves Giovanni Chaves Penner Rubens Takeji Aoki Araujo Martins	
DOI 10.22533/at.ed.3351920121	
CAPÍTULO 2	14
ELABORAÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO PARA A MICROBACIA HÍDROGRÁFICA DO IGARAPÉ URIBOQUINHA NO MUNICÍPIO DE MARITUBA-PA	
Moisés Marçal Gonçalves Giovanni Chaves Penner Rubens Takeji Aoki Araujo Martins	
DOI 10.22533/at.ed.3351920122	
CAPÍTULO 3	24
METODOLOGIAS DE DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA NA ZONA NÃO SATURADA: UM ESTUDO SOBRE APLICAÇÕES DE MÉTODOS DE CAMPO	
Giovanni Chaves Penner Moisés Marçal Gonçalves Rubens Takeji Aoki Araujo Martins Brenna Souto Mota	
DOI 10.22533/at.ed.3351920123	
CAPÍTULO 4	38
DETERMINAÇÃO DA TAXA MÉDIA DE INFILTRAÇÃO PARA A MICROBACIA DO IGARAPÉ URIBOQUINHA NA REGIÃO DO ATERRO SANITÁRIO DE MARITUBA-PA	
Giovanni Chaves Penner Moisés Marçal Gonçalves Rubens Takeji Aoki Araujo Martins	
DOI 10.22533/at.ed.3351920124	
CAPÍTULO 5	44
REGIONALIZAÇÃO DE VAZÃO COMO FERRAMENTA PARA A DETERMINAÇÃO DA VAZÃO DE REFERÊNCIA DO IGARAPÉ URIBOQUINHA NO MUNICÍPIO DE MARITUBA/PA	
Rubens Takeji Aoki Araujo Martins Giovanni Chaves Penner Moisés Marçal Gonçalves	
DOI 10.22533/at.ed.3351920125	
CAPÍTULO 6	51
ESTIMATIVA DA RECARGA NATURAL DO AQUÍFERO LIVRE NA MICROBACIA HÍDROGRÁFICA DO ENTORNO DO ATERRO SANITÁRIO DE MARITUBA/PA	
Rubens Takeji Aoki Araujo Martins Giovanni Chaves Penner Moisés Marçal Gonçalves	
DOI 10.22533/at.ed.3351920126	

CAPÍTULO 7 65

PROPOSTA DE ALTERNATIVA PARA ESTIMAR O TEMPO DE REMEDIAÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS CONTAMINADAS POR BTEX

Giovanni Chaves Penner

Daniel Locoselli Garcez

Hélio da Silva Almeida

André Luiz da Silva Salgado Coelho

Neyson Martins Mendonça

DOI 10.22533/at.ed.3351920127

SOBRE O ORGANIZADOR..... 77

UTILIZAÇÃO DE MÉTODO DE DILUIÇÃO QUÍMICA PARA MONITORAMENTO DE VAZÃO: ESTUDO DE CASO NA BACIA DO IGARAPÉ URIBOQUINHA EM MARITUBA-PA

Moisés Marçal Gonçalves

Universidade Federal do Pará, curso de Engenharia Sanitária e Ambiental

Belém – Pará

Giovanni Chaves Penner

Universidade Federal do Pará, curso de Engenharia Sanitária e Ambiental

Belém - Pará

Rubens Takeji Aoki Araujo Martins

Universidade Federal do Pará, curso de Engenharia Sanitária e Ambiental

Belém - Pará

RESUMO: A presente pesquisa teve por finalidade a geração de dados para a bacia hidrográfica do Igarapé Uriboquinha situado na região do aterro sanitário localizado no município de Marituba no Estado do Pará. Efetuou-se o monitoramento da vazão do curso d'água ao longo de um ano hidrológico, o método utilizado para o levantamento de dados em campo foi o método da diluição química, com auxílio da calculadora Vernier Model: LQ2-LE com sensor de condutividade elétrica, medida em $\mu\text{S}/\text{cm}$. Realizou-se o comparativo entre as vazões aferidas e os índices pluviométricos, as maiores vazões calculadas ocorreram em meses de alta pluviosidade. As vazões variam de 6,1 a 56,7 l/s, notou-se que os índices pluviométricos contribuem significativamente para as vazões no curso d'água principalmente por se tratar de uma bacia de pequeno porte.

PALAVRAS-CHAVE: Método de diluição salina; medição de vazão; traçador salino.

ABSTRACT: The present study had the purpose to generate data for the Uriboquinha Creek, located in the landfill region the city of Marituba, State of Pará. The flow of the watercourse was monitored over a hydrological year, the method used for field data collection was the chemical dilution method, with the aid of the Vernier Model: LQ2-LE calculator with electrical conductivity sensor, measured in $\mu\text{S} / \text{cm}$. The comparison between the measured flow rates and the rainfall indices was performed, the highest calculated flows occurred in months of high rainfall. The flow rates range from 6.1 to 56.7 L/s, it was noted that the rainfall indices contribute significantly to the flows in the watercourse mainly because it is a microbasin.

KEYWORDS: Chemical dilution method, flow measured, saline tracer

1 | INTRODUÇÃO

A gestão de recurso hídricos objetiva equacionar as diversas variáveis e problemáticas relacionadas aos usos múltiplos da água. No ano de 1997 foi criada a Lei Federal 9433/97 que apresenta as prioridades e os principais instrumentos para auxiliar no planejamento e gestão de recursos hídricos e que define a bacia hidrográfica como unidade territorial onde se aplica a Política Nacional de Recursos Hídricos. Segundo Grison (2008), o

conhecimento do regime fluvial é fundamental em virtude de os recursos hídricos serem compreendidos como uma fonte de valor econômico e para a sobrevivência dos seres vivos, devido a isso é importante que haja um gerenciamento adequado desses recursos.

Os dados de vazão são indispensáveis para planejamento de gestão de recursos hídricos, através de uma série histórica fluviométrica e o conhecimento do regime hidrológico de determinada região pode-se promover o gerenciamento de uma bacia hidrográfica, algumas ações podem ser promovidas através dessas informações tais como: previsões de cheias, disponibilidade de água para irrigação e abastecimento de água, condições de navegabilidade e para auxiliar nas tomadas de decisão para ações que envolvam o saneamento básico.

Para Clack (2002), a importância dos dados de vazão é para estimar a ocorrência de eventos hidrológicos que possam dificultar o gerenciamento de recursos hídricos, assim como, prever vazões futuras que podem influenciar diretamente no planejamento e gestão de recursos hídricos. Para Silva (2013), a vazão é um parâmetro hidráulico que pode ser determinado pelo uso de traçadores em experimento de campo, mas para isso é necessário a mistura completa do traçador com o corpo hídrico, pois caso não seja atendida, torna-se imprópria para a estimativa da mesma.

Diante disso, a presente pesquisa desenvolveu-se com a finalidade de geração de dados para a bacia do Igarapé Uriboquinha. Monitorou-se a vazão ao longo de um ano hidrológico utilizando-se como ferramenta o método de diluição química, avaliou-se a relação do regime pluviométrico na região com o incremento de vazão no curso d'água tendo em vista o período de estiagem e o período de abundantes chuvas na região.

1.1 MATERIAL E MÉTODOS

1.1.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A microbacia do Igarapé Uriboquinha é uma bacia de pequeno porte com área de aproximadamente 5 km² (cinco quilômetros quadrados) situada no município de Marituba no Estado do Pará. Esta encontra-se ainda pouco urbanizada mantendo boa parte de sua vegetação natural, o aterro sanitário localizado em Marituba-PA encontra-se quase que a totalidade de sua área dentro desta microbacia e parte do traçado do Igarapé Uriboquinha passa por dentro dos limites do empreendimento.

O município de Marituba está locado na Região Metropolitana de Belém (RMB) no Estado do Pará, situado na região norte do país, ver **Figura 1**, distante 11 km (quilômetros) da capital (Belém). Possui extensão territorial de 103 km² (cento e três quilômetros quadrados), segundo os dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), em 2017, a população estimada foi de 127 mil habitantes, sendo o nono maior município do estado (MARITUBA, 2019).

O empreendimento, aterro sanitário, atende os municípios constituintes da Região Metropolitana de Belém (RMB) e está situado na porção oeste do Município de Marituba. O acesso à área do empreendimento, a partir de Belém, é feito pela Rodovia BR 316, seguindo pela Alça Viária por uma distância aproximada de 4 km assim, finalmente com uma via de acesso asfaltada de aproximadamente 600 metros até o limite da propriedade do empreendimento. Apenas para referência, um ponto central aproximado da área do empreendimento é definido pelas seguintes coordenadas 796.356 mE e 9.845.426 mS, Datum WGS 1984.

Os altos índices pluviométricos na região, aliados as temperaturas elevadas, juntamente com a volumosa quantidade de resíduos orgânicos favorecem a produção de lixiviado no local, resultando num grande volume de lixiviado que precisa ser tratado. Os índices pluviométricos na região, tem em média valores superiores a 3000 mm anuais, em conformidade com os dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2019), acessado em <http://www.inmet.gov.br>. Na **Figura 1** apresenta-se um mapa de localização da bacia do Igarapé Uriboquinha.

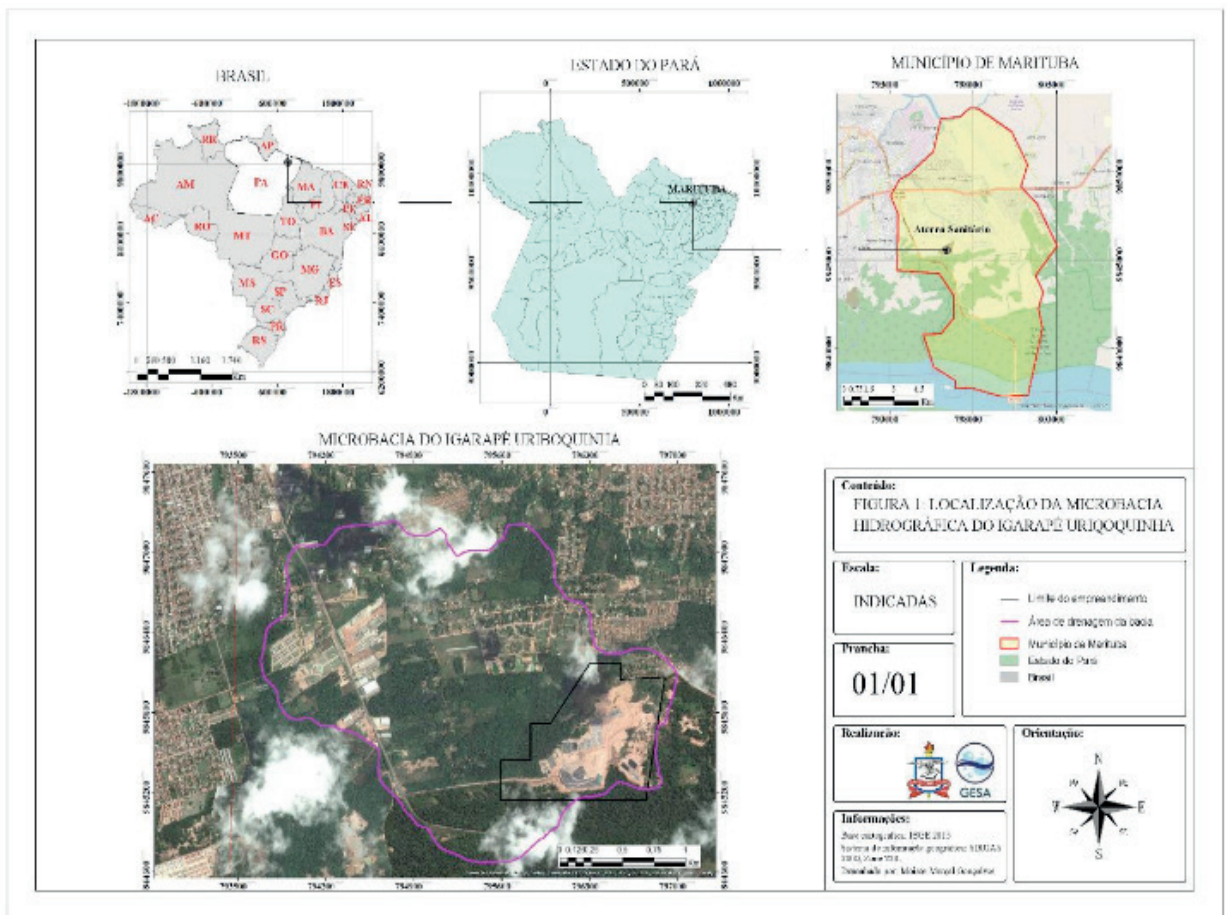


Figura 1. Localização da microbacia hidrográfica do Igarapé Uriboquinha

Fonte: os autores, 2019.

1.1.2 MÉTODO DA DILUIÇÃO QUÍMICA

Monitorou-se a vazão mensalmente efetuando-se medições em campo. Para a determinação de vazão utilizou-se o método da diluição química também chamado de traçador salino, este método consiste na aferição da condutividade elétrica no meio, onde primeiramente prepara-se a solução salina em um reservatório de volume conhecido. A solução é lançada em um ponto a montante e os registros de condutividade elétrica são coletados e armazenado com auxílio da calculadora **Vernier Model: LQ2-LE** a jusante do trecho considerado. Observadas as leituras determinou-se as vazões com auxílio dos softwares **Logger Lite 1.9.4** e **Excel 2016** (software de planilhas eletrônicas), a condutividade elétrica é medida em $\mu\text{S/cm}$ (microsiemens por centímetro).

Esse método do traçador salino exige que a solução esteja misturada completamente no corpo d'água. Para que isto ocorra é necessária que o ponto de mistura seja bom para que a solução esteja completamente diluída no corpo hídrico. A seção do curso d'água selecionada para se fazer as medições é uma seção canalizadas onde a seção é estrangulada, logo, neste ponto aumenta-se a velocidade no canal e isto favorece para que a solução salina seja completamente diluída. A **Figura 2** ilustra como é determinado o lançamento da solução salina e coleta de dados de condutividade elétrica.

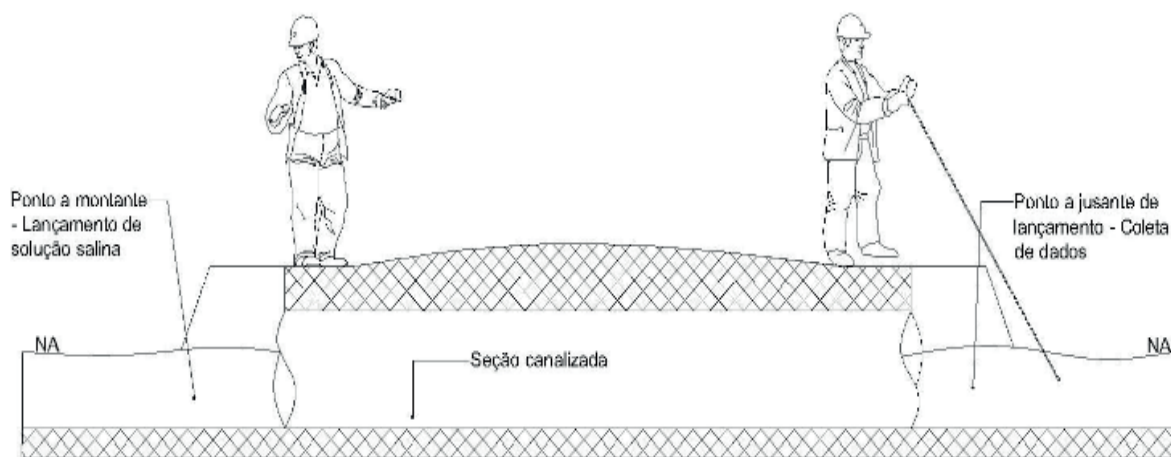


Figura 2. Ilustração de lançamento de solução salina e coleta de dados.

Fonte: os autores, 2019.

Para a determinação da vazão pelo método de traçadores temos as seguintes variáveis: C_{balde} que é a concentração da solução salina em mg/L, C_{rio} é a concentração salina no corpo hídrico em mg/L, V_{reserv} é o volume do reservatório conhecido em litros, C_t é a concentração medida observada na leitura em mg/L e dt é o intervalo de leitura em segundos. O cálculo para a determinação de vazão foi realizado a partir da **Equação 1**.

$$Q = \frac{(C_{balde} - C_{rio}) \cdot V_{balde}}{\int_0^{\infty} (Ct - C_{rio}) \cdot dt} \quad (\text{Equação 1})$$

A vazão é calculada em L/s (litros por segundo), coletou-se dados de vazão uma vez por mês assumindo-se que esta vazão medida é a representativa do mês. Para efeitos comparativos avaliou-se o aumento das vazões no Igarapé Uriboquinha relacionando-as com o aumento dos índices pluviométricos na região. Desta forma, possibilitou-se avaliar a representatividade do método para as condições desta microbacia.

1.2 RESULTADOS

Para o monitoramento da vazão utilizou-se a metodologia do traçador salino de acordo com a **Equação 1**. Acompanhou-se a vazão durante 12 (doze) meses consecutivos com o intuito de obter a variabilidade em função do tempo e avaliar quais fatores influenciam no escoamento do curso d'água. Apresentam-se na **Tabela 1** os valores de vazão calculados para cada mês e também os índices pluviométricos para o período proposto obtidos através da estação meteorológica monitorada pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

DADOS DE PRECIPITAÇÃO E VAZÃO												
Período	2018								2019			
	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	jan	fev.	março	abril
P (mm)	438,2	132,8	135	192,5	170,9	134,7	246,1	432,8	413	453	626	494,5
Vazão (l/s)	19,0	11,9	6,1	10,8	13,7	6,4	11,3	10,6	15,6	24,0	50,8	56,7

Tabela 1. Dados de precipitação e vazão

Fonte: os autores, 2019

Na **Tabela 1** nota-se que o curso d'água possui valores pequenos de vazão variando de 6,1 l/s a 56,7 l/s. Esses valores indicam baixa capacidade de drenagem deste igarapé em virtude de se tratar de uma microbacia hidrográfica. Por outro lado, nota-se elevados índices pluviométricos isto pode implicar em uma bacia hidrográfica que retém boa parte da água precipitada indicando que pode haver disponibilidade hídrica na região. A microbacia do Igarapé Uriboquinha ainda se encontra mantendo boa parte da sua vegetação natural, com isto, entende-se que a bacia pode ter um elevado tempo de concentração em função de fatores, por exemplo, a interceptação da água precipitada pela vegetação.

O período chuvoso na região está compreendido entre os meses de dezembro a maio e observa-se que neste período é que ocorrem as maiores vazões no curso d'água. O período de estiagem ocorre entre os meses de junho a novembro e é o intervalo de tempo que se apresentaram as menores vazões. Na **Figura 3** descreve-

se a variabilidade da vazão em função do tempo e da precipitação.

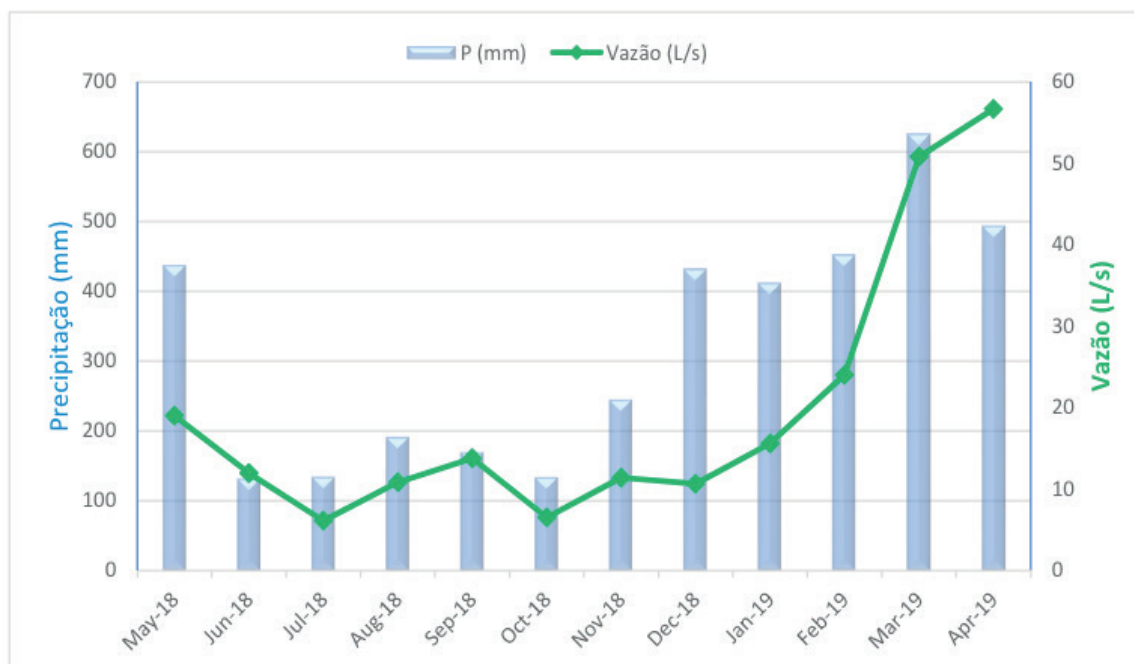


Figura 3. Comportamento dos dados de vazão ao longo do ano hidrológico

Fonte: os autores, 2019

Observa-se que a vazão tende a aumentar conforme aumenta os índices de pluviometria. Os obtidos demonstram que as vazões obtidas mesmo nas máximas vazões são muito pequenas e representam uma saída de água pequena na bacia. Com a elevação dos índices pluviométricos foram quando ocorreram as maiores vazões. Esse resultado demonstra que o método da diluição química representa bem as alterações de vazão em uma bacia de pequeno porte como é o caso da bacia do Igarapé Uriboquinha que tem uma área de drenagem de aproximadamente 5 km².

O método da diluição química é um método de baixo custo e pode ser feito com equipamentos com um custo menor em relação ao equipamento da *Vernier*. A solução salina preparada foi utilizando sal de cozinha e água do próprio curso d'água. A seção do curso d'água escolhida para se fazer as medições não possui uma seção bem definida dificultando por exemplo a utilização do método de velocidade (molinete) para a determinação de vazão, outro método dispensado foi o de flutuadores em virtude de parte da seção ser canalizada, sendo assim, as paredes das tubulações podem interferir na aplicação deste método, também houveram outros métodos avaliados, no entanto, o método do traçador foi o que melhor se adequou para o curso d'água.

1.3 CONCLUSÕES

Com as baixas vazões, a capacidade de diluição do curso d'água é pequena, logo, é baixa capacidade de autodepuração do corpo hídrico, isso pode implicar

que poluentes mesmo em pequenas concentrações podem provocar alterações na biota. Com a influência do aterro sanitário na bacia têm-se que nos meses de menor pluviosidade o curso natural é mais passivo a alterações no meio. Devido as baixas vazões, por exemplo, sedimentos oriundos do empreendimento podem promover o assoreamento de seções do curso d'água.

O método da diluição química pode ser aplicado em situações parecidas, no entanto, podem ser realizados estudos posteriores para a comparação de métodos a baixo custo para determinar a vazão de pequenos cursos d'água, com isso discutir em quais condições cada método pode ser melhor aplicado.

REFERÊNCIAS

BORTOLUZZI, L. N.; FERNANDEZ, O. V. Q. **Medição de vazão em pequenos cursos d'água de Marechal Cândido Rondon (PR)**. Rondon, 2008.

CLARK, R.T.; SILVA DIAS, P.L.da; **As necessidades de observação e monitoramento dos ambientes brasileiros quanto aos recursos hídricos**. CT Hidro – Secretaria técnica do fundo setorial de recursos hídricos, 13 de novembro de 2002.

GRISON, F. **Uso do ADCP como ferramenta de apoio do traçado e extrapolação de curva-chave na Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Norte**. [S.l.], 2008. Citado na página 3.

IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades e Estados: Marituba**. Disponível em:< <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pa/marituba.html>>. Acesso em: 07 jun. 2019.

INMET: Instituto Nacional de Meteorologia. **Estações de Dados**. Disponível em:< <http://www.inmet.gov.br/portal/>>. Acesso em: 1 abril. 2019.

MARITUBA. **Sobre o Município**. Disponível em:< <http://www.marituba.pa.gov.br/site/>>. Acesso em: 10 jun. 2019.

SILVA, P. v. R. M. **Uso de traçadores fluorescentes para determinar características de transporte e dispersão do Rio Piabanha/RJ**. 2013. 173 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, 2013.

SILVA, P. V. R. M.; PECLY, J. O. G.; AZEVEDO, J. P. S. **Uso de traçadores fluorescentes para determinar características de transporte e dispersão no Rio Piabanha (RJ) para a modelagem quali-quantitativa pelo HEC-RAS**. Eng. Sanit. Ambient. Rio de Janeiro, v. 22, n. 3, p. 463-472, 2017.

ELABORAÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO PARA A MICROBACIA HÍDROGRÁFICA DO IGARAPÉ URIBOQUINHA NO MUNICÍPIO DE MARITUBA-PA

Moisés Marçal Gonçalves

Universidade Federal do Pará, curso de Engenharia Sanitária e Ambiental
Belém – Pará

Giovanni Chaves Penner

Universidade Federal do Pará, curso de Engenharia Sanitária e Ambiental
Belém - Pará

Rubens Takeji Aoki Araujo Martins

Universidade Federal do Pará, curso de Engenharia Sanitária e Ambiental
Belém - Pará

RESUMO: O presente trabalho consistiu na elaboração do balanço hídrico climatológico pela metodologia de Thornthwaite & Mather na bacia do Igarapé Uriboquinha. A pesquisa desenvolveu-se no município de Marituba do estado do Pará nas proximidades do aterro sanitário situado no município. Foram consideradas duas variáveis para a determinação do balanço hídrico, uma de saída de água na bacia, evapotranspiração real (ETR), que foi estimada pelo método de Thornthwaite & Mather, e também foi considerada uma variável de entrada de água no sistema, precipitação mensal, que foi fornecida pela estação meteorológica mais próxima do município de Marituba já que não há dados hidrológicos disponíveis no local. Com os dados de precipitação mensal e os dados estimados de evapotranspiração real determinou-se em quais períodos ocorreram

deficiência ou excedência hídrica na região ao longo do tempo. Com isso, concluiu-se que na maior parte do ano hidrológico ocorreu excedência hídrica na região, muito em função da abundância de chuva no período chuvoso com índices pluviométricos bastante elevados.

PALAVRAS-CHAVE: Balanço hídrico climatológico, Thornthwaite & Mather, demandas hídricas

ABSTRACT: The present work consisted in the elaboration of the climatological water balance by the Thornthwaite & Mather methodology in the Uriboquinha creek basin. The research was made in the city of Marituba, state of Pará, near the landfill located in the city. Two variables were considered for the determination of water balance, one of water output in the basin, real evapotranspiration (ETR), which was estimated by the Thornthwaite & Mather method, and also was considered a system water entry variable, monthly precipitation, which was provided by the nearest weather station in the city of Marituba as no hydrological data is available on site. With the monthly precipitation data and the estimated actual evapotranspiration data it was determined in which periods water deficiency or exceedance occurred in the region over time. Thus, it was concluded that for most of the hydrological year there was a water surplus in the region, due to the abundance of rain in the rainy season with very high rainfall.

KEYWORDS: climatological water balance, Thornthwaite & Mather, hydraulic demands

1 | INTRODUÇÃO

A presente pesquisa visou a realização do Balanço Hídrico Climatológico (BHC) mensal na microbacia do Igarapé Uriboquinha, entre os meses de agosto de 2017 e julho de 2018. Para a determinação do balanço hídrico foram considerados duas variáveis, uma de saída de água no sistema (evapotranspiração mensal) e outra entrada (precipitação mensal). O objetivo deste projeto é a geração de dados para a região e a discussão no entorno do aterro sanitário implantado no município de Marituba-PA uma vez que o Igarapé Uriboquinha passa por dentro do empreendimento, e assim contribuir para o desenvolvimento de estratégias para a mitigação dos impactos potenciais ou danos gerados pelo empreendimento na região.

Segundo Jesus et al (2017), com a crescente demanda acerca recursos hídricos, é imprescindível o conhecimento do ciclo da água dentro de uma bacia hidrográfica, compreendendo-se sobretudo o desempenho das variáveis precipitação e evapotranspiração. Isto aplicável principalmente para pequenas bacias onde a vazão de drenagem seja pouco representativa quando comparada com outras variáveis. Consoante Camargo (1971) contraponto esses dois elementos do balanço hídrico, consegue-se averiguar se certa região apresenta excesso ou deficiência hídrica dentro de um período estimado a ser avaliado. Conforme Pereira et al. (2002), a partir do balanço hídrico climatológico (BHC) pode-se quantificar a disponibilidade hídrica de uma região, esta disponibilidade pode ser influenciada pelo tipo de cobertura vegetal da mesma.

O balanço hídrico consiste no somatório de todas as variáveis de entradas e saídas de água no sistema. Para a variável de entrada, precipitação mensal, foi observada regularmente da estação pluviométrica mais próxima de Marituba-PA. Para a variável de saída, a evapotranspiração real foi estimada pelo método de Thornthwaite e Mather. Com a determinação do balanço hídrico pode-se verificar o comportamento do regime hidrológico na região no período estimado.

De acordo com Neto M. S. A. (1989), balanço hídrico é definido como a contabilidade hídrica de entrada e saída de água no solo, a entrada de água é traduzida pela precipitação e a saída pela evapotranspiração potencial. Muitas bacias não possuem informações suficientes para a realização da elaboração de um balanço hídrico, a falta dessas informações dificulta a gestão de recursos hídricos. Este trabalho consistiu na elaboração de balanço hídrico para microbacia hidrográfica do Igarapé Uriboquinha na região de Marituba-PA (na Figura 1 do Capítulo 1 foi apresentado o mapa de localização desta microbacia) que não possui informações hidrológicas na região a partir da abordagem proposta por Thornthwaite & Mather.

2 | MATERIAL E MÉTODOS

Utilizou-se para estimativa de evapotranspiração a metodologia desenvolvida por Thornthwaite & Mather (1957). Em 1948, C.W. Thornthwaite desenvolveu um método empírico para a estimativa de evapotranspiração potencial (SELLERS, 1965), a partir de dados de temperatura média do ar e do fotoperíodo, consistido em investigações realizadas em áreas secas nos Estados Unidos.

De posse de dados, de acordo com Thornthwaite, para um dado mês em questão J ($J=1, 2, 3, \dots, 12$) a evapotranspiração potencial ou de referência (EPo_J), pode ser estimada a partir da Equação 3, onde as variáveis são: E_J que configura a evapotranspiração não ajustada (ao foto período e ao n [úmero de dias do mês) e C_J é um fator de ajuste que é determinado a partir do fotoperíodo médio e o número de dias do mês (VAREJÃO-SILVA, 2006).

$$EPo_J = C_J * E_J \text{ (mm * mês}^{-1}\text{)} \quad \text{(Equação 1)}$$

Em 1948, C. W. Thornthwaite desenvolveu um método simples para estimar o balanço hídrico em base mensais, utilizando bases mensais de temperatura média do ar e do total pluviométrico, bem como a capacidade de armazenamento hídrico do solo (VAREJÃO-SILVA, 2006). Thornthwaite, assumiu que:

- O solo é como um reservatório, cuja capacidade de armazenamento (**CA**) é de 100mm;
- Toda a água à disposição do solo atende primeiramente a demanda de evapotranspiração, sendo a restante incorporada ao solo, até completar a capacidade de armazenamento, de modo que as perdas por escoamento e infiltração só ocorrem se a capacidade de armazenamento for ultrapassada;
- Sempre que a água, posta à disposição do solo for igual ou superior à evapotranspiração de referência, aceita-se haver perda evapotranspiratória máxima (evapotranspiração real é igual a de referência); caso contrário o solo contribui com parte de suas reservas, se estas existirem, de acordo com uma lei exponencial;
- Que a perda de água pelo solo, para atender à demanda evapotranspiratória é linear, ou seja: tendo muita ou pouca água armazenada, o solo sempre cede toda a água requerida pela evaporação e pela transpiração das plantas presentes, até atingir o ponto de murcha permanente.

Em 1957, C. W. Thornthwaite e J. C. Mather publicaram uma versão mais avançada do balanço hídrico climático na qual a primeira e a última das hipóteses anteriormente assinaladas, foram aperfeiçoadas. Nessa nova versão, a capacidade de armazenamento do solo torna-se variável e estabelecida em função de suas propriedades (capacidade de campo e ponto de murcha permanente) na camada

explorada pelas raízes das plantas nele presentes (VAREJÃO-SILVA, 2006).

Pode-se adotar a capacidade de armazenamento no solo (**CA**), independentemente do tipo de solo, com base apenas na cultura predominante na região, para isto assumisse que **CA** entre 25 e 50 mm para hortaliças, entre 75 e 100 mm para culturas anuais, entre 100 e 125 mm para culturas perenes e entre 150 e 300 mm para espécies florestais (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2007). Para o presente projeto considerou-se a capacidade de armazenamento de 150 mm considerando a cobertura vegetal da microbacia do Igarapé Uriboquinha que ainda mantém considerável parte da vegetação natural.

A estimativa de evapotranspiração é efetuada conforme o preenchimento da **Tabela 1**, obedecendo os critérios estabelecidos por Thornthwaite e Mather. Deve-se primeiramente preencher as colunas **T (°C)** é a temperatura média mensal do ar referente ao mês **J** ($J=1, 2, 3, \dots, 12$) e **i** que representa o índice mensal de calor, **E** é a evapotranspiração não ajustada, **C** é o fator de correção, **EP_o** é a evapotranspiração de referência estimada, **P** é o total pluviométrico referente ao mês designado (Mês $J=1, 2, 3, \dots, 12$), **P – EP_o** é a diferença entre a precipitação mensal e a evapotranspiração de referência.

As colunas **NEG ACM** e **ARM** devem ser preenchidas simultaneamente. O **NEG ACM** (Negativo acumulado) configura a soma de todas as parcelas mensais de água para a evapotranspiração que foram solicitadas ao solo. A variável **ARM** (Armazenamento de água) configura a quantidade de água ainda presente no solo. Para o início do preenchimento dessas variáveis deve-se identificar o último mês do período maior pluviosidade.

As demais variáveis representam: **ALT** é a alteração da quantidade de água existente no solo para cada mês, **ER** é a evapotranspiração real estimada, **EXC** e **DEF** representam o excedente e a deficiência hídrica, respectivamente.

A bacia hidrográfica estudada fica localizada no Município de Marituba no Estado do Pará e foi apresentada no capítulo anterior (ver item 1.2.1).

Desenvolveu-se o balanço hídrico conforme o preenchimento da **Tabela 1**. Os dados de temperatura média mensal e precipitação mensal total foram fornecidos pela estação meteorológica Instituto Nacional de Meteorologia, INMET.

3 | RESULTADOS

O período chuvoso no intervalo de tempo avaliado (Período de vigência do projeto) foi bastante rigoroso, o que foi algo que gerou bastante discussão na temática envolvida pelo aterro sanitário em Marituba-PA, o balanço hídrico desenvolvido é uma ferramenta que permite avaliar os índices hídricos na bacia, tais como, excedência ou deficiência hídrica. Devido a região metropolitana de Belém-PA ter abundância hídrica, em sua pluviosidade e cursos d'água, em geral, têm-se índices baixos de deficiência hídrica. A **Tabela 1** apresenta o balanço hídrico climatológico utilizando a

Local: Bacia do Igarapé Uriboquinha/Pau Grande												
Lat.: -1,43°						Long.: -48,43°						
CA:	150	mm		Período: AGO/2017 a JUL/2018								
Mês	T °C	i	C	EPO mm	P mm	P - EPO mm	NEG ACM	ARM mm	ALT mm	ETR mm	EXC mm	DEF mm
AGO/17	27,5	13,2	31,1	152,5	102,6	-49,9	-73,1	92,2	-36,4	139,0	0,0	13,5
SET/17	27,9	13,5	30,0	147,1	51,9	-95,2	-168,3	48,8	-43,3	95,2	0,0	51,9
OUT/17	27,5	13,2	30,9	154,7	222,5	67,8	-37,7	116,7	67,8	154,7	0,0	0,0
NOV/17	27,8	13,4	29,9	137,3	103,3	-34,0	-71,7	93,0	-23,7	127,0	0,0	10,3
DEZ/17	27,2	13,0	30,8	149,5	243,4	93,9	0,0	150,0	57,0	149,5	36,9	0,0
JAN/18	26,4	12,4	30,8	134,4	362,8	228,4	0,0	150,0	0,0	134,4	228,4	0,0
FEV/18	26,1	12,2	27,9	115,8	671,6	555,8	0,0	150,0	0,0	115,8	555,8	0,0
MAR/18	26,8	12,7	31,0	142,5	506,7	364,2	0,0	150,0	0,0	142,5	364,2	0,0
ABR/18	26,5	12,5	30,1	135,4	406,3	270,9	0,0	150,0	0,0	135,4	270,9	0,0
MAI/18	26,6	12,6	31,2	146,4	438,2	291,8	0,0	150,0	0,0	146,4	291,8	0,0
JUN/18	27,4	13,1	30,2	144,9	132,8	-12,1	-12,1	138,4	-11,6	144,4	0,0	0,5
JUL/18	27,2	13,0	31,2	146,6	135,5	-11,1	-23,2	128,5	-9,8	145,3	0,0	1,2

Tabela 1. Balanço hídrico climatológico para a microbacia do Igarapé Uriboquinha

Fonte: os autores, 2019

Observando-se o balanço hídrico na **Tabela 1** nota-se que o mês de maior deficiência hídrica na Bacia do Igarapé Uriboquinha é o mês de setembro de 2017, este é o último mês do período menor pluviosidade (Período menos chuvosos). Entende-se como o período menos chuvoso, a maior sequência de meses onde a diferença entre a precipitação (P) e evapotranspiração potencial (ETO) for negativa. Compreende-se entre os meses de janeiro a maio de 2018 o período mais chuvoso com elevados índices pluviométricos, entre esses meses observou-se também um elevado excedente hídrico.

Para o período mais chuvoso o maior índice pluviométrico registrado foi de 671,6 mm de chuva o que reflete um volume precipitado dentro da bacia de 3,36.106 m³ para o mês de fevereiro de 2018. O mês que apresentou maior índice de evapotranspiração real estimada foi o mês de outubro de 2017 com valor de 154,7 mm o que representa um volume de perdas na bacia de 7,73.105 m³ e o mês que apresentou menores índices de precipitação foi setembro de 2017 com uma precipitação de 51,9 mm e representa um volume de 4,46.105 m³ de água dentro da bacia do Uriboquinha. A **Figura 1** apresenta o comportamento ao longo dos meses a precipitação total mensal (P), a evapotranspiração de referência (ETO) e a evapotranspiração real estimada (ETR).

A capacidade máxima de armazenamento de água no solo é de 150 mm, no entanto, essa capacidade varia de acordo com as demandas hídricas exercidas. Observou-se na **Tabela 1** que o armazenamento ao longo do tempo variou, isso

ocorre devido as demandas observadas. Nos períodos de maior pluviosidade a capacidade de armazenamento do solo permaneceu máxima e ocorreu o excedente hídrico, ou seja, não foram exigidas das demandas ao solo devido o próprio já estar saturado. Na **Figura 2** apresenta a variação da no armazenamento de água do solo.

Nota-se na **Figura 2** que o mês de setembro apresentou a menor quantidade de água disponível na bacia, ou seja, apresenta o menor valor armazenamento de água no solo, isso ocorre por ser o último mês do período menos chuvoso, portanto apresenta a maior demanda e/ou exigência hídrica.

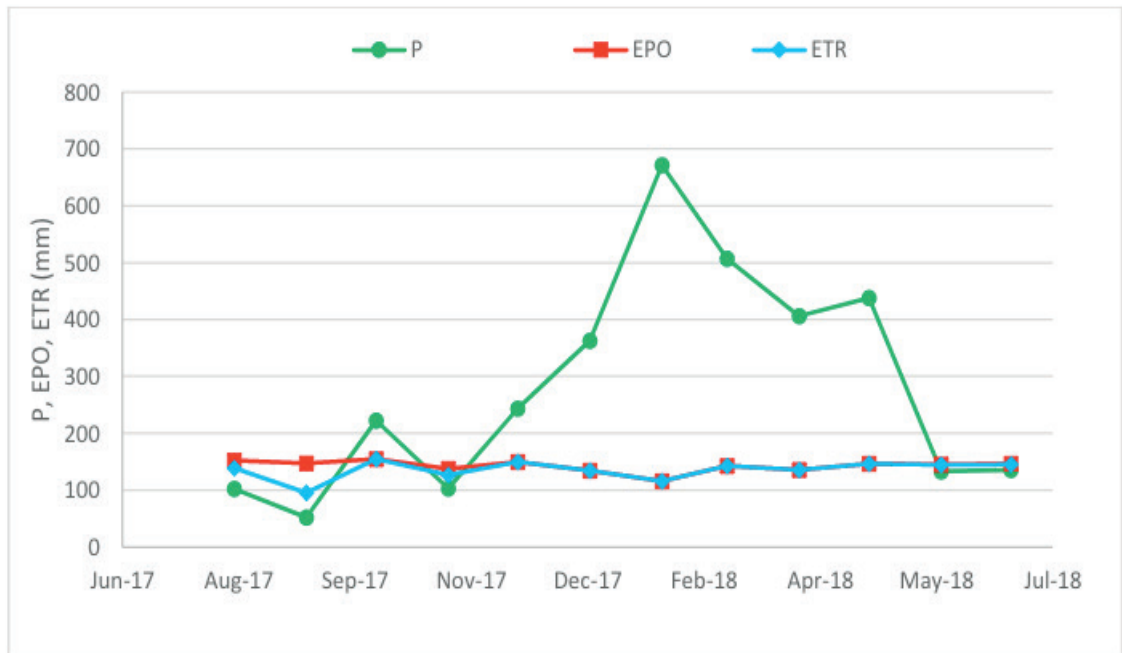


Figura 1. Comportamento das variáveis hidrológicas na microbacia do Igarapé Uriboquinha
Fonte: os Autores, 2019

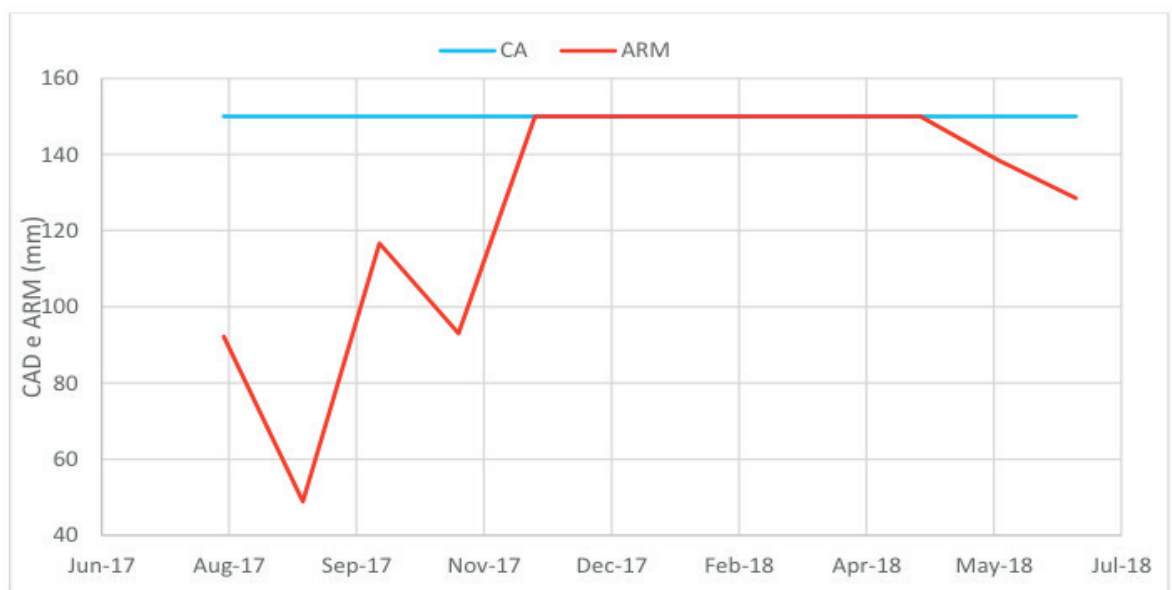


Figura 2. Variabilidade do armazenamento de água no solo na microbacia do Igarapé Uriboquinha.

Fonte: os Autores, 2019

Visualizando a **Figura 1** percebe-se que o índice pluviométrico é a variável predominante na bacia possuindo valores bem maiores no período chuvoso em relação as demais variável. Essa abundância de chuvas é característica da região em estudo, essa característica garante ao curso d'água perenidade, favorecendo a recarga do aquífero livre e assim formando-se o escoamento de base que alimenta a vazão no igarapé no período seco. Olhando para a **Figura 2** nota-se que o período onde há alterações no armazenamento de água no solo coincide com o período de estiagem, entende-se que parte dessa modificação no armazenado seja principalmente em função de parte desta água ser consumida grande parte pela demanda evapotranspiratória, outra parcela tornar-se escoamento de base convertendo-se em vazão para o Uriboquina.

Os elevados índices de excedente hídrico mostrados na **Figura 3**, a seguir, ocorrem em decorrência dos altos índices pluviométricos que houveram no período estimado. A deficiência hídrica é muito pequena em relação ao excedente hídrico. Na **Figura 3** apresentam-se os excedentes e as deficiências hídricas ao decorrer do ano hidrológico.

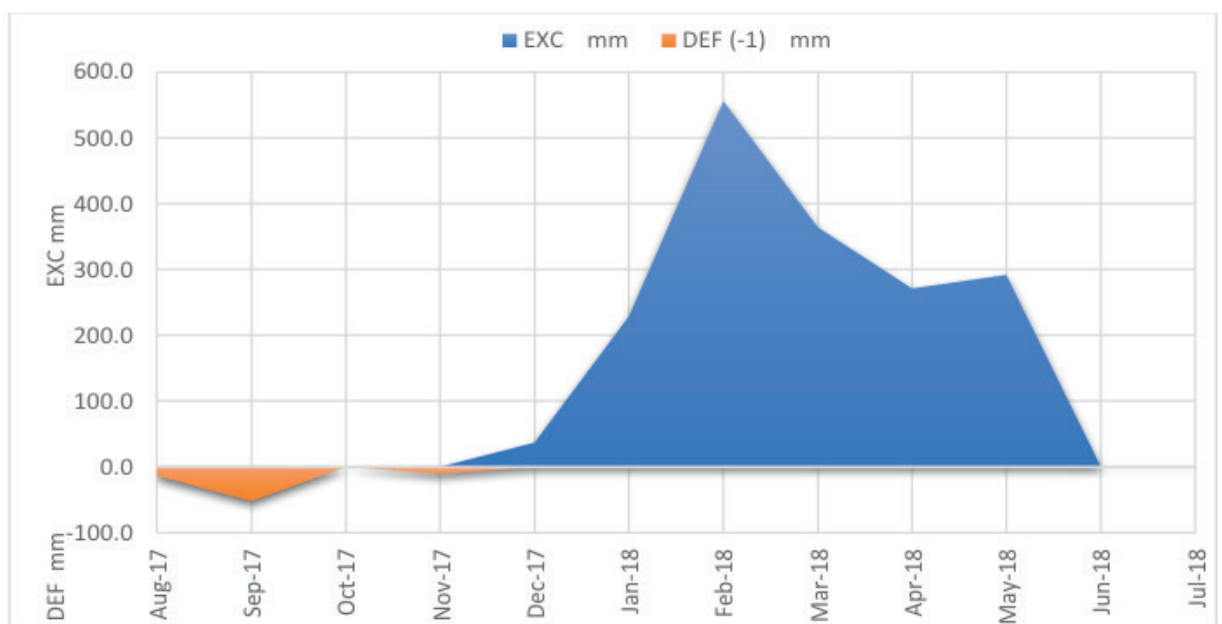


Figura 3. Comportamento dos índices de abundância hídrica.

Fonte: os Autores, 2019

A **Figura 3** mostra que entre os meses de agosto de 2017 a novembro de 2017 houve deficiência hídrica para a bacia do Uriboquina, entende-se deficiência hídrica quando a somatória entre as variáveis de entrada e saída de água for negativa, o mês de maior escassez de água foi setembro de 2017 onde esta grandeza assumiu valores próximos de 50 mm de lâmina de água. O comportamento das variáveis hidrológicas desta microbacia evidencia que dificilmente ocorre estresse hídrico, haja

vista a abundância de água na região, com isso conclui-se que a água disponível na bacia é suficiente para suprir as demandas na maior parte do tempo. A partir do balanço hídrico foi possível determinar em quais momentos houveram retiradas e reposições de massa de água na bacia. Essas demandas hídricas envolvem diretamente a capacidade de armazenamento de água no solo, assim como, o excedente e a deficiência hídrica. Na **Figura 4** apresenta-se todas as demandas hídricas exercidas ao solo durante o período estudado.

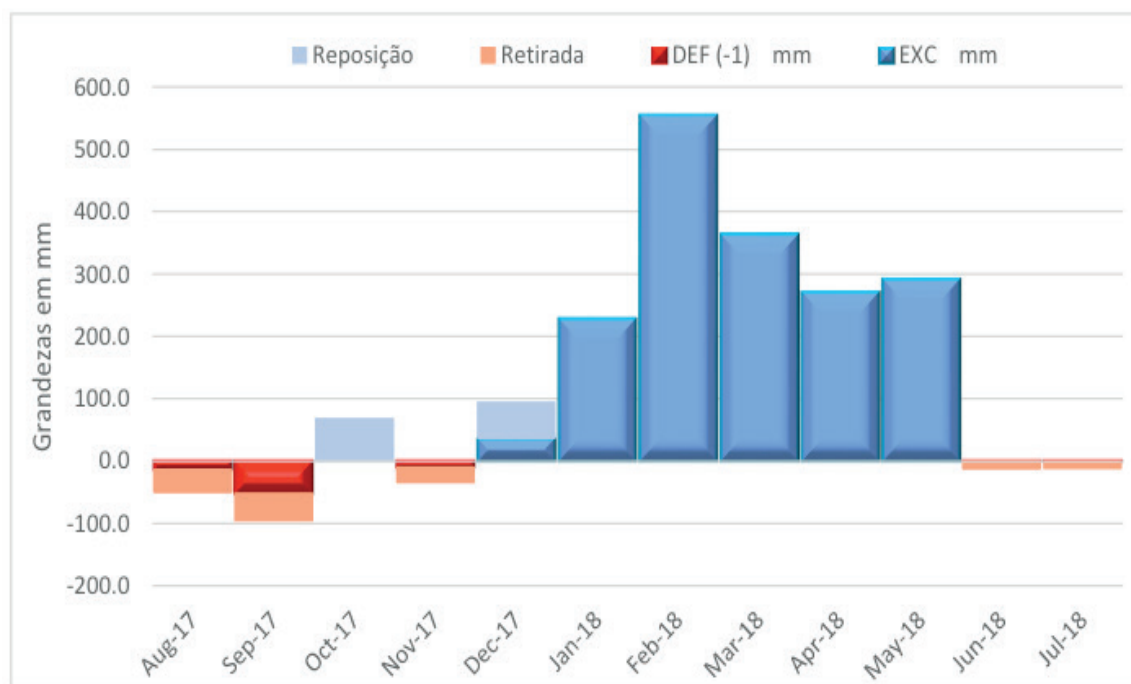


Figura 4. Demandas hídricas na microbacia do Igarapé Uriboquinha

Fonte: os Autores, 2019

Os resultados obtidos demonstram que durante o período avaliado na maioria dos meses houve abundância dos recursos hídricos, isso ocorre principalmente devidos aos elevados índices pluviométricos que foram inclusive acima da média para a região. A **Figura 1** evidencia a discrepância dos índices pluviométricos em relação as variáveis de evapotranspiração na grande maioria dos meses, devido à grande pluviosidade boa parte da água que cai na bacia se torna escoamento superficial. Os elevados índices de chuva também representam aumento na produção de chorume no aterro sanitário, ou seja, o volume de efluente no aterro aumenta e representa maior custo de tratamento do mesmo.

A **Figura 2** apresenta que na grande maioria dos meses o solo tem a sua capacidade de armazenamento preenchida, a abundância hídrica pode representar menor exigência de retirada de água no solo. A **Figura 3** demonstra que de fato na grande maioria dos meses têm-se abundância hídrica, uma vez que há na grande maioria do tempo excedência hídrica na bacia. A **Figura 4** apresenta exigências feitas no sobre o solo, observa-se que na grande maioria do tempo têm-se de fato

excedência hídrica, a retirada de água no solo ocorreu somente nos meses em que o solo não tem sua capacidade toda preenchida e representam um volume pequeno em relação aos índices pluviométricos.

4 | CONCLUSÕES

O trabalho desenvolvido é representativo para a gestão e tomada de decisões dos recursos hídricos pelos órgãos de gestão. As informações geradas foram significativas, determinando em quais momentos o solo tem sua capacidade de armazenamento completamente preenchida é possível verificar o quanto de chuva se tornou escoamento superficial, a partir dessas informações pode se discutir transporte de sedimentos na bacia.

Parte de sedimento transportados do aterro por escoamento superficial podem assorear em alguns trechos no Igarapé Uriboquinha, também pode provocar alteração na qualidade da água na bacia. Posteriormente podem ser desenvolvidos estudos complementares para se ter melhores informações acerca da discussão dos recursos hídricos na região.

O balanço hídrico desenvolvido apresentou bons resultados comparando com a realidade da região. Esta está localizada na região amazônica onde existe grande disponibilidade hídrica de águas superficiais e subterrâneas, elevadíssimos índices pluviométricos, diante disso, como mostrado para a microbacia do Igarapé Uriboquinha, há em geral, excedência hídrica isto demonstra que há disponibilidade de água para a bacia.

REFERÊNCIAS

CAMARGO, A. P. **Balanço hídrico no Estado de São Paulo (Boletim Técnico, 116)**. Campinas: IAC, 1971.

CAMARGO, A. P.; CAMARGO, M. B. P. **Uma revisão analítica sobre a evapotranspiração potencial**. Bragantina, 2000.

CORREA, W. S. C. **Comportamento dos elementos climáticos, temperatura, e precipitação, no município de Vitória (ES) no período de 1978 a 2007**. 2011. 83 f. Monografia (Bacharel em geografia) – Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, Vitória, 2011.

EMBRAPA. Malaquias da Silva Amorim Neto. **Comunicado técnico: balanço hídrico segundo Thornthwaite & Mather (1955)**. N. 34, junho de 1989.

JESUS et al. **Impacto do Aumento da Concentração Atmosférica de CO₂ no Balanço Hídrico Climatológico do Cerrado**. RESVISTA BRASILEIRA DE CLIMATOLOGIA, Pernambuco, 2017.

MARCUZZO, F. F. N.; SILVEIRA, A. **Balanço hídrico de Cuiabá utilizando métodos de estimativa de evapotranspiração por temperatura**. X Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, Fortaleza, 2010.

MEDEIROS, R. M.; FRANCISCO, P. R. M. **Estudo climatológico na bacia do Rio Oruçuí Preto**. Campina Grande: EDUFCG, p. 171-205, 2016.

MOURA et al. **Evapotranspiração de referência (ET_o) segundo Thornthwaite modificado, calibrado na bacia do riacho gameleira** – Estado de Pernambuco. RESVISTA DE GEOGRAFIA (UFPE), Pernambuco, V. 29, n. 2, 2012.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002.

ROSSATO, L. **Estimativa da capacidade de armazenamento de água no solo do Brasil**. 2002. 145 f. Dissertação (Mestra em meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos, 2002.

SOUZA et al. Balanço hídrico climatológico: precipitação e evapotranspiração de referência estimadas com metodologia alternativa. **Revista Brasileira de Climatologia**. Curitiba, v. 20, p. 284-298, 2017.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e climatologia**. 2. ed. Recife: Versão digital 2, 2006.

METODOLOGIAS DE DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA NA ZONA NÃO SATURADA: UM ESTUDO SOBRE APLICAÇÕES DE MÉTODOS DE CAMPO

Giovanni Chaves Penner

Universidade Federal do Pará, curso de Engenharia Sanitária e Ambiental
Belém – Pará

Moisés Marçal Gonçalves

Universidade Federal do Pará, curso de Engenharia Sanitária e Ambiental
Belém – Pará

Rubens Takeji Aoki Araujo Martins

Universidade Federal do Pará, curso de Engenharia Sanitária e Ambiental
Belém – Pará

Brenna Souto Mota

Universidade Federal do Pará, curso de Engenharia Sanitária e Ambiental
Belém – Pará

RESUMO: O trabalho consistiu na realização de avaliação de métodos de campo para a determinação da condutividade hidráulica no solo na zona não saturada. Sua finalidade foi apresentar uma análise comparativa entre os métodos com o intuito de definir qual a aplicabilidade de cada método. A pesquisa efetuada apoiou-se em aquilatar três metodologias de infiltração que foram: Ensaio da ABGE, *Open end Hole* e Infiltrômetro de Anel. Desta forma efetuou-se a relação de atividades com as metodologias de ensaio de infiltração, realizando uma classificação dos parâmetros de campo. Observou-se o tipo de rebaixamento, infiltração e carga hidráulica, bem como, custos, tipo de mão de

obra, deslocamento, operação e aplicação para cada método em suas particularidades. Portanto, com base na avaliação exposta no trabalho, a metodologia da ABGE possui maior aplicabilidade em sumidouros e trincheiras de infiltração, o infiltrômetro de anel em atividades ligadas a irrigação e construção de estradas e o método *Open end Hole* na determinação da condutividade hidráulica média em uma bacia.

PALAVRAS-CHAVE: Ensaio da ABGE; *Open end Hole*; Infiltrômetro de anel

ABSTRACT: The work consisted of the evaluation of field methods to determine the hydraulic conductivity in the soil in the unsaturated zone. The purpose was to present a comparative analysis between the methods in order to define the applicability of each method. The research was based on three infiltration methodologies: ABGE Test, *Open end Hole* and Ring Infiltrometer. Thus, the relationship between activities and infiltration test methodologies was performed, making a classification of field parameters. The type of drawdown, infiltration and hydraulic load were observed, as well as costs, type of labor, displacement, operation and application for each method in its particularities. Therefore, based on the assessment presented in the paper, ABGE methodology has greater applicability in sinks and trenches, the ring infiltrometer in activities related to irrigation and road construction and the *Open end hole* method in determining the average hydraulic conductivity in a basin.

1 | INTRODUÇÃO

A água precipitada, logo após um evento chuvoso, é capaz de ser encaminhada para várias direções, onde parte da chuva consegue ser retida pela vegetação e parte dela cai de forma direta sobre o solo (COELHO NETTO, 1994). Ao ser conduzida para a superfície do solo, a água poderá escoar superficialmente, evaporar ou infiltrar no solo. A infiltração é um procedimento que ocorre de maneira natural, tornando-se essencialmente significativa para o equilíbrio hídrico.

A condutividade hidráulica do solo é essencial para quaisquer estudos que compreendam o movimento da água no solo. Segundo FEITOSA et al. (2008), a condutividade hidráulica considera as particularidades do meio, que abrangem, por exemplo, as características do fluido, tamanho, porosidade e forma das partículas, necessitando assim das propriedades do meio poroso e também do meio fluido.

A condutividade hidráulica é uma importante variável para se entender o movimento das águas subterrâneas, o entendimento dessa variável possibilita retirar diversas observações acerca do solo. Entre essas informações têm a facilidade e/ou resistência do movimento de água no solo, compreender melhor o conceito de grau de compactação do solo, entender os diferentes tipos de solo e suas características em relação a percolação da água. Existem diversos métodos para se determinar a condutividade hidráulica, estes diferentes métodos possuem aplicações diferentes, por exemplo, o infiltrômetro de anel é um método para determinação da condutividade hidráulica largamente utilizado na agricultura, uma vez que, parte do sistema de irrigação é dimensionado utilizando-se deste método.

Os métodos para a determinação da condutividade hidráulica podem ser realizados em campo ou em laboratório; os métodos desenvolvidos em campo, em geral, possuem menores custos e demonstram resultados bastante representativos além de apresentar facilidade para realização dos ensaios. Em virtude disso, para o presente trabalho foram aplicados diversos ensaios de campo para a determinação da condutividade hidráulica para a zona não saturada do solo, a área onde foram desenvolvidos os ensaios de infiltração, pertence ao município de Belém – PA, na região norte do país e está localizada nas dependências da Universidade Federal do Pará, em frente ao Laboratório de Engenharia Sanitária e Ambiental (LAESA). Este trabalho consistiu na avaliação e comparação entre três métodos de ensaios de infiltração e a discussão de suas aplicabilidades.

2 | MATERIAL E MÉTODOS

2.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O Campus da Universidade Federal do Pará está localizado na cidade de Belém-PA, e recebe o nome de Cidade Universitária José da Silveira Netto. Apenas para referência tomou-se para orientação as coordenadas geográficas $1^{\circ}28'26''\text{S}$ e $48^{\circ}27'6''\text{W}$ e 5m de altitude sendo representativa para o local, com área territorial aproximadamente igual a 2,06 Km². Por sua vez, é composta pelo Campus 1 (Setor básico), Campus 2 (Setor profissional), o Campus 3 (Setor saúde) e o Campus 4 (Setor esportivo). Os métodos para a determinação da condutividade hidráulica foram desenvolvidos em campo se limitando ao campus 2, mais especificamente a área que circunda o laboratório de engenharia sanitária e ambiental – LAESA, ver **Figura 1**.

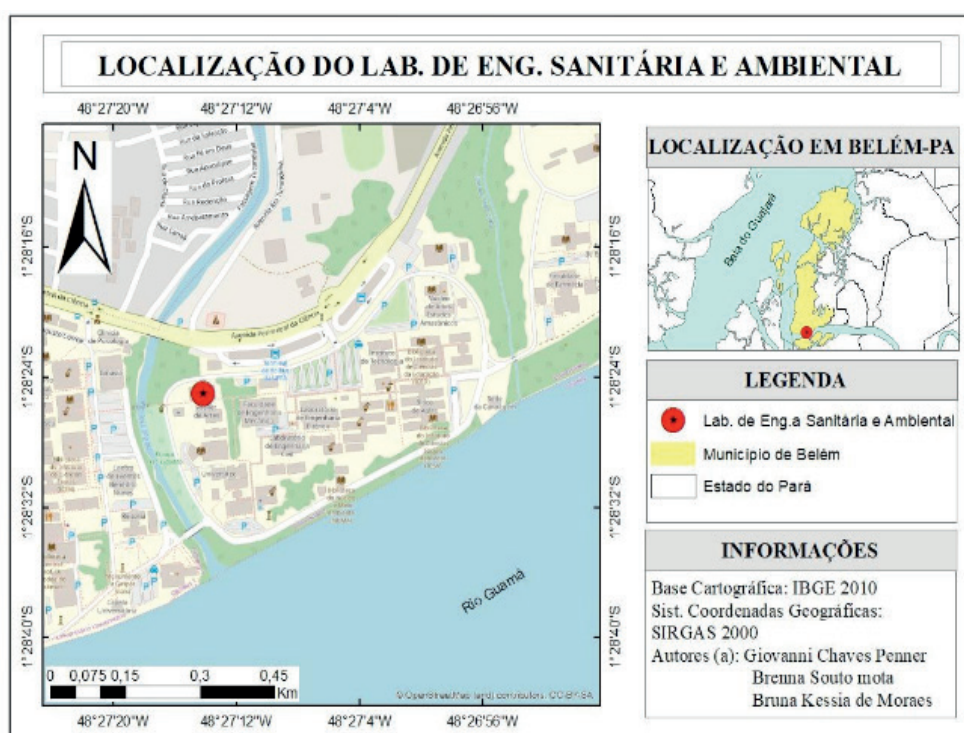


Figura 1. Localização do Laboratório de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFPA

Fonte: os Autores, 2019.

2.2 ENSAIO DE INFILTRAÇÃO ABGE (1996)

O teste de infiltração foi realizado em campo seguindo os procedimentos definidos pela ABGE (1996). Foi realizado um furo de sondagem com geometria cilíndrica no solo com o auxílio do trado manual (“boca de lobo”), onde as dimensões da perfuração eram de 30 cm de profundidade e 20 cm de diâmetro. Em seguida, saturou-se o solo utilizando o reservatório de água, até preencher completamente o furo.

O nível d’água foi mantido à superfície do terreno, tendo como finalidade a

saturação em todo o perfil do furo de sondagem, tendo conseqüentemente, uma execução correta do ensaio. A saturação do furo foi feita durante um período de tempo de 10 minutos com nível constante de água para garantir a saturação em todo o perfil.

Em seguida, efetuou-se a contagem do tempo das medições de rebaixamento do nível d'água no furo, onde a mensuração do nível de água no furo de sondagem foi feita durante 27 minutos de ensaio com a contribuição de uma régua graduada. Os resultados das leituras foram anotados na planilha até que a taxa de infiltração não sofresse mais nenhuma variação. Na **Figura 2** é possível verificar o solo já saturado e, por conseguinte, o início das leituras.



Figura 2. Realização de ensaio recomendado pela ABGE (1996)

Fonte: os Autores, 2019

A ABGE tornou os ensaios de rebaixamento uniformes, tais ensaios também podem ser considerados como ensaios de infiltração a nível variável no solo na zona não saturada de acordo com a **Figura 3** a seguir:

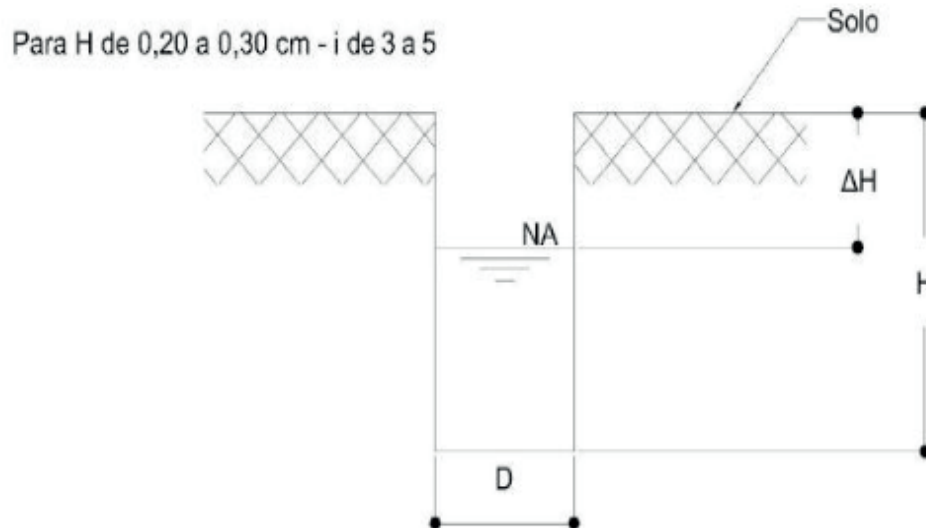


Figura 3. Padronização do Ensaio da ABGE (1996)

Fonte: os Autores, 2019

A **Equação 1** é utilizada para a determinação da condutividade hidráulica de acordo com o método ABGE de 1996 é dada por:

$$k = \frac{\Delta H}{\Delta t} * \frac{1}{i * \left(\frac{2 * H}{r} - 1 \right)} \quad \text{(Equação 1)}$$

Onde k , é a condutividade hidráulica, ΔH é a variação do nível de carga hidráulica, Δt é a variação do tempo, H é a profundidade do poço, r é o raio do furo de sondagem e i é adimensional variando de 3 a 5.

2.3 INFILTRÔMETRO DE ANEL

Neste ensaio foram instalados no solo dois anéis concêntricos com 40 e 20 centímetros de diâmetro, o anel interno é onde se avalia o processo de infiltração e o externo tem como objetivo provocar redução da dispersão lateral da água infiltrada no anel interior. Após a instalação, os anéis foram cravados no solo a uma profundidade de 10 cm, revestiu-se o anel interno com um filme plástico com a finalidade de evitar a infiltração da água no solo antes do teste ser iniciado.

Os anéis foram cravados no solo com auxílio de uma marreta, primeiramente posiciona-se os anéis na posição do ensaio, em seguida usasse um suporte para receber os impactos gerados pela marreta para que não se danifiquem os anéis e possam ser cravados de forma uniforme, ver **Figura 4**.



Figura 4. Realização do ensaio de infiltrômetro de anel.

Fonte: os Autores, 2019

Adiciona-se água ao mesmo tempo nos dois anéis, desta forma, saturou-se o solo no que se refere ao anel externo. Assim, o plástico foi removido e com o auxílio de uma régua graduada, deu-se início as leituras de rebaixamento no anel interno em função do tempo.

Foi considerada como infiltração constante quando o valor da leitura se repetiu por pelo menos três vezes. Foram obtidas curvas de Infiltração Acumulada (I) e Velocidade de Infiltração (VI), de acordo com BERNARDO et al. (2006).

2.4 OPEN END HOLE

O método *Open end Hole* ou “Ensaio de Ponta Aberta” consiste na utilização de um furo de sondagem revestido com tubo de PVC, do topo até a sua base, para a obtenção do coeficiente de condutividade hidráulica vertical de uma determinada profundidade de solo (FIORI, 2010). Na **Figura 5** apresenta-se as variáveis utilizadas para o ensaio.

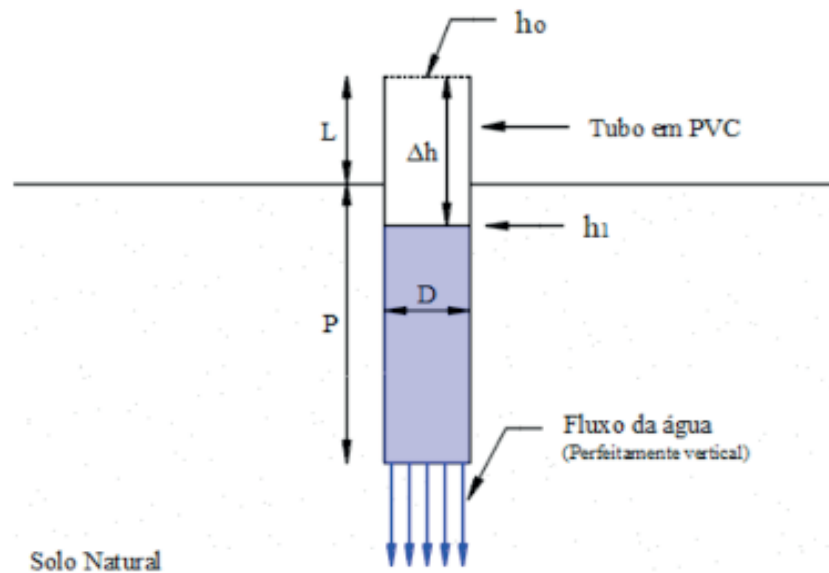


Figura 5. Ilustração do ensaio Open end Hole

Fonte: os Autores, 2019

A carga hidráulica (h_o) é o comprimento do tubo, do topo até a base do tubo e é dado pela expressão $h_o = P + L$ (1). O método consiste na avaliação da infiltração vertical carga hidráulica e/ou nível de água variável. Essa variação do nível de água (Δh) é dada em função do tempo, sendo assim h_o representa o nível de água inicial e h_1 representa o nível de água final. A **Equação 2** expressa essa relação: $h_1 = h_o + \Delta h$ (2). Considerando, ainda, o raio do tubo de PVC ($R = D/2$) e representa a condutividade hidráulica vertical:

$$Kv = 2,303x \left(\frac{R}{4\Delta t} \right) x \left[\log \left(\frac{h_o}{h_1} \right) \right] \quad (\text{Equação 2})$$

Onde: Kv é a condutividade hidráulica vertical, R é raio, Δt é a variação do tempo, h_o é a carga hidráulica inicial e h_1 é a carga hidráulica final.

O ensaio é realizado em três pontos distintos espacializados de forma triangular (equilátera) distanciados em aproximadamente 1,5m (**Figura 6**). Os furos de sondagem tiverem profundidade de 0,50; 1,00 e 1,50 metros, primeiramente deve-se esperar para se verificar se fluirá água nos furos. Após a verificação, se averiguada a presença de água deve-se então descartar o ponto e fazer o ensaio com os três furos, no entanto, com duas profundidades distintas (0,50 e 1,00 m), em caso de a um metro de profundidade também for observada a presença de água deve-se adotar três furos com a mesma profundidade (0,50m), isto pode ocorrer em regiões onde o lençol freático seja raso. Em caso de ainda assim for constatada a presença de água com a 0,50 m então este ponto deve ser descartado e selecionado outro ponto para a realização do ensaio.

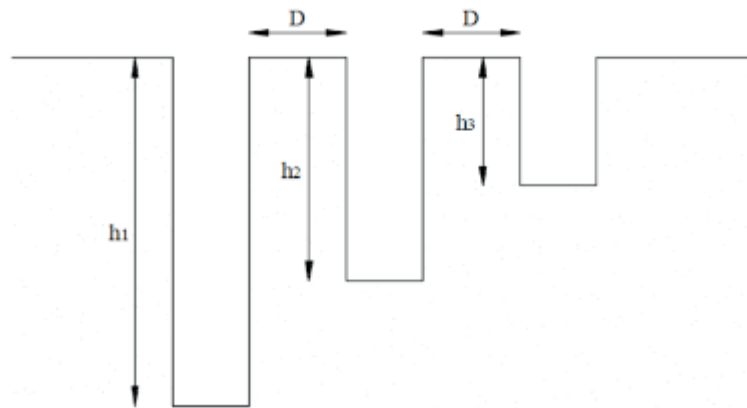


Figura 6. Disposição dos furos de sondagem para o ensaio Open end Hole

Fonte: os Autores, 2019

Um dos cuidados executivos para a realização do ensaio é que o tubo em PVC seja de diâmetro adequado para o furo de sondagem, haja vista, que se é necessário evitar infiltração entre o a parede do tubo de PVC e a parede do furo de sondagem (Externo ao tubo em PVC).

2.5 METODOLOGIA PARA COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS

Para se realizar o comparativo dos métodos avaliaram-se alguns aspectos técnicos, relacionados a custos e praticidade, tendo em vista que são parâmetros importantes para que se possa definir qual método possibilitará maior custo-benefício e se aplicará de forma mais ajustada para cada atividade. Determinadas atividades usualmente necessitam que se estabeleça a condutividade hidráulica no meio para auxiliar na tomada de decisão, tendo em vista que se pode haver uma contribuição relevante para a realização de ações que comumente são realizadas nas obras de engenharia. Diversas atividades se relacionam intrinsicamente e/ou necessitam da determinação da condutividade hidráulica para a manutenção de seu funcionamento, algumas dessas atividades estão apresentadas na **Tabela 1**.

Atividades relacionadas	Infiltração predominante	Prof. Recomendada para o ensaio	Sensibilidade do ensaio	Utilização/Finalidade da atividade
Sumidouro	Lateral	Média/Alta	Baixa	Residencial
Estradas	Vertical	Superficial/baixa	Média	Urbana
Aterro Sanitário	Vertical	Superficial/baixa	Alta	Saneamento
Áreas de infiltração	Livre	Superficial/baixa	Baixa	Urbano
Trincheiras de infiltração	Livre	Média/Alta	Baixa	Residencial/Urbano

Tabela 1. Relação de atividades com metodologias de ensaio de infiltração

Fonte: os Autores, 2019

A **Tabela 1** apresenta algumas atividades que necessitam da determinação da condutividade hidráulica. Sumidouros e trincheiras de infiltração são mais usuais em unidades residências, ambas possuem como finalidade gerar a infiltração de efluentes e águas pluviais, respectivamente. Tanto estradas quanto os aterros sanitários necessitam de técnicas mais sensíveis que não agridam as áreas que já foram compactadas, portanto essas metodologias apresentadas não se enquadram para essas atividades, no entanto, é possível aplica-las na falta de metodologias mais sofisticadas. Com isso, a **Tabela 2** apresenta a avaliação de alguns parâmetros que as metodologias de infiltração devem possuir para que se tenha melhor percepção ao se determinar qual metodologia é mais apropriado para cada atividade e área de aplicação.

Parâmetro	Fácil	Moderada	Difícil
Operação	3	2	1
Transporte	3	2	1
Parâmetro	Baixa	Moderada	Alta
Custo de aquisição/operação	5	3	1
Sensibilidade	1	3	5
Parâmetro	Qualificada		Não qualificada
Mão de obra	1		2

Tabela 2. Classificação dos parâmetros para os ensaios de infiltração

Fonte: os Autores, 2019

3 | RESULTADOS

Para o cálculo proposto pela ABGE (1996), segundo a **Equação 1** foi encontrado uma condutividade hidráulica de $1,11 \cdot 10^{-5} \text{cm/s}$. Para o método do infiltrômetro de anel obtivemos uma condutividade hidráulica de $1,92 \cdot 10^{-4} \text{cm/s}$. Para o método Open end Hole obteve-se uma condutividade hidráulica $1,14 \cdot 10^{-4} \text{cm/s}$. A **Tabela 3** apresenta as características de cada ensaio.

Método	Tipo de ensaio	Tipo de carga	Infiltração predominante	Condutividade hidráulica
Ensaio ABGE	Rebaixamento	Variável	Livre	$1,11 \cdot 10^{-5} \text{cm/s}$
Infiltrômetro de anel	Rebaixamento	Variável	Vertical	$1,92 \cdot 10^{-4} \text{cm/s}$
<i>Open end Hole</i>	Rebaixamento	Variável	vertical	$1,14 \cdot 10^{-4} \text{cm/s}$

Tabela 3. Características dos ensaios de infiltração

Fonte: os Autores, 2019

De acordo com a **Tabela 3**, o ensaio da ABGE foi o método que apresentou menor valor de condutividade hidráulica o que pode ser explicado por ser o único método onde primeiramente satura-se o solo em todo o furo de sondagem. Para o

ensaio do infiltrômetro de anel que representa principalmente a infiltração vertical, tenta-se simular a infiltração de água no solo onde ocorra uma chuva na totalidade de uma área, ou seja, tenta reproduzir o comportamento da percolação de água no solo na forma natural.

Para o método *Open end Hole* assim como no ensaio dos anéis concêntricos a infiltração no solo ocorre de forma livre, no entanto, em três profundidades distintas. Este método permite num mesmo ensaio obter valores de condutividade em diferentes perfis de solo, dado isso é possível ter maior mapeamento do estrato do solo.

Sendo assim, para termos comparativos dos métodos estudados, foram selecionados alguns parâmetros primordiais que ajudaram na análise dos mesmos. Posteriormente, foi atribuído aos parâmetros que foram classificados em: fácil, médio, moderado, qualificada e não qualificada, distribuindo valores para essas faixas de acordo com a **Tabela 2**. Ao final todos os ensaios receberam uma pontuação que convergiu da soma dos valores atribuídos as faixas. Como pode ser observada na **Tabela 4**.

Parâmetros de ensaios de infiltração	ABGE	Infiltrômetro de anel	<i>Open end Hole</i>
Operação	Fácil	Moderada	Difícil
Transporte	Fácil	Moderado	Difícil
Custo de aquisição/ operação	Baixo	Moderado	Baixo
Sensibilidade	Baixa	Moderada	Baixa
Mão de obra	Não qualificada	Não qualificada	Não qualificada
Pontuação	14	12	10

Tabela 4. Resultados comparativo dos ensaios de infiltração

Fonte: os Autores, 2019

A produção das Tabelas tem como objetivo auxiliar na escolha do método mais adequado para cada tipo de atividade listada na **Tabela 1**. Os sumidouros são dispositivos, em geral, residenciais utilizados para receber o efluente tratado proveniente de tanques sépticos, descartado para permitir sua infiltração no solo. Tem como característica infiltração predominantemente lateral.

Correlacionando as características mencionadas com os dados da **Tabela 3 e 4** o método que melhor se adequa para a determinação da condutividade hidráulica do solo para aplicação da atividade do sumidouro é o método propostos *Open end Hole*, este ensaio apresenta características de infiltração: livre; profundidade recomendada para o ensaio de média/alta e sensibilidade baixa. Uma análise similar pode ser realizada para as trincheiras de infiltração, onde os métodos mais apropriados para atividades similares são o ensaio da ABGE e o *Open end Hole*, para áreas de infiltração têm-se as metodologias da ABGE e Infiltrômetro de anel.

Essa atividade áreas de infiltração devem ser propostas para auxiliar no

zoneamento urbano, de acordo com os diferentes tipos de solo, com isso o método dos anéis concêntricos pode ser atribuído para simular situações em que o solo não está saturado, ou seja, em que se tenham chuvas intensas e desta forma o solo rapidamente alcançará a saturação em uma lâmina curta de água que dependerá do tipo de solo na bacia. O ensaio da ABGE é mais propício para situações em que o solo já está saturado, ou seja, melhor para ser avaliado em condições de chuvas abundantes.

Os métodos até o momento apresentados foram desenvolvidos de modo a discutir suas aplicabilidades. O método proposto pela ABGE gera resultados significativos, no entanto, tem algumas limitações em virtude de gerar dados de condutividade hidráulica a uma profundidade de no máximo 0,30m. As informações geradas por este ensaio com o solo saturado podem ser expressivas para a discussão de medidas mitigadoras com relação ao escoamento superficial.

O método do infiltrômetro de anel é largamente aplicado na agricultura, sobretudo na irrigação. A partir dele pode-se estimar a capacidade de infiltração de uma determinada área e, em seguida, selecionar equipamentos para irrigação.

O método de *Open end Hole* é bem representativo para a determinação da condutividade hidráulica média em uma bacia em virtude de ser realizado em camadas distintas do solo. Com isso, a investigação no solo é melhor distribuída, levando-se em consideração as diferentes profundidades utilizadas.

Como pode-se observar as metodologias para a determinação da condutividade hidráulica devem ser amplamente usadas para auxiliar na tomada de decisão em áreas do conhecimento distintas. É fundamental o conhecimento desta variável, no entanto, nota-se que as atividades podem ter algumas restrições quanto as metodologias, que vão desde custos relacionados a operação e aquisição de equipamento, tanto como a necessidade da não alteração na área de aplicação.

A vista disso, destacasse a importância de haverem diversas metodologias para auxiliarem na geração de dados para esses estudos, posto isto é fundamental que se diferencie cada uma dessas metodologias e definir o quão cada método pode ser aplicado para determinada atividade ou empreendimento. Em busca disso a **Tabela 5** demonstra o balanço realizado entre as metodologias de ensaio de infiltração.

Métodos	Vantagens	Desvantagens	Atividade apropriada	Investimento
Ensaio ABGE	Baixo custo e fácil aplicação	Limitado em zonas superficiais	<ul style="list-style-type: none"> • Trincheiras de infiltração • Sumidouros 	R\$ 600,00
Infiltrômetro de anel	Fácil operação e resultados bem expressivos na agricultura	Custo médio a elevado do equipamento	<ul style="list-style-type: none"> • Irrigação • Construção de estradas 	R\$ 5.000

<i>Open end Hole</i>	Baixo custo e fácil aplicação	Dificuldade operacional e de deslocamento	<ul style="list-style-type: none"> Determinação da condutividade hidráulica média em uma bacia 	R\$ 800
----------------------	-------------------------------	-------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------

Tabela 5. Balanço comparativos entre as metodologias de infiltração

Fonte: os Autores, 2019

Com o balanço apresentado na Tabela 7 têm-se diversas atividades que dependem das características do meio e essas metodologias de determinação de ensaios de infiltração seguem como suporte para a caracterização de tais áreas. Os mais distintos métodos apresentam particularidades e/ou singularidades que vão desde de forma de aplicação até questões relacionados com custo de aquisição e custo de mão de obra. Diante desta configuração é fundamental que se entenda qual a demanda do ensaio para se aplicar o melhor método disponível considerando principalmente a relação de custo x benefício, haja vista a necessidade do não desperdício de recursos que podem ser limitados.

4 | CONCLUSÕES

Com o trabalho desenvolvido observou-se que o método proposto pela ABGE (1996) mostrou como vantagens, baixo custo e facilidade na aplicação do ensaio, como desvantagem, têm-se limitação a áreas superficiais devido à profundidade da perfuração sugerida. Possui um investimento de aquisição de equipamentos necessários por volta de 600,00 reais e as atividades apropriadas para aplicação do ensaio supracitado são as trincheiras de infiltração, sumidouros e também aplicável para áreas de infiltração.

O Infiltrômetro de Anel, como vantagem têm-se a facilidade de operação, um dos pontos que podemos destacar é que este método é largamente utilizado na agricultura, como desvantagem podemos destacar o custo de médio de aquisição chegando aproximadamente a R\$ 5 mil. As atividades onde pode ser aplicado o método com Infiltrômetro de Anel são as atividades relativas à irrigação, bem como no auxílio para a determinação da condutividade hidráulica para áreas de infiltração.

O *Open end Hole*, apresentou como vantagem baixo custo no investimento dos equipamentos utilizados no ensaio, onde a soma dos materiais é em torno de 800,00 reais, também podemos realçar a facilidade de aplicação do ensaio. Porém, esta metodologia de infiltração mostra desvantagens relacionadas a dificuldade de operação, assim como a dificuldade no deslocamento dos equipamentos utilizados. As atividades mais indicadas para esse método são referentes a determinação de condutividade hidráulica numa bacia, assim como para sumidouros e trincheiras de infiltração e para atividades similares.

Sendo assim, a determinação da condutividade hidráulica dos métodos em questão são informações importantes para auxiliar em diversas áreas de estudo de

acordo com a análise comparativa das metodologias de infiltração.

REFERÊNCIAS

ABGE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA. **Ensaio de Permeabilidade em Solos: Orientações para sua execução no campo**. 4.ed. São Paulo, 2013.

AGUIAR, A. B. **O emprego do permeâmetro de Guelph na determinação da permeabilidade do solo, de camadas de lixo e sua cobertura**. 67 f. Dissertação (Mestrado em ciências)- Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001

BACCHI, O.O.S.; CORRENTE, J.E. & REICHARDT, K. **Análise comparativa de dois métodos simplificados de determinação da condutividade hidráulica de solos**. R. Bras. Ci. Solo, 15:249-252, 1991.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MONTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8 ed. Viçosa: Ed. UFV, 2006.

COSTA, F. P. M.; NISHIYAMA, L. **Utilização do permeâmetro guelph e penetrômetro de impacto em estudos de uso e ocupação dos solos em bacias hidrográficas**. Caminhos de Geografia, Uberlândia, v. 8, n. 24, Dez. 2007.

DECAGONDEVICES. Disponível em: <<http://www.decagon.com.br/hidrologia/condutividade/mini-disk/>>. Acesso em: 06 dez. 2018.

ELRICK, D. E.; REYNOLDS, W. D.; TAN, K. A. **Hydraulic conductivity measurements in the unsaturated zone using improved well analysis**. *Groundwater Monitoring Review*. v.9, 1989. p.184- 193.

FAGUNDES, E. A. A. et al. **Determinação da infiltração e velocidade de infiltração de água pelo método de infiltrômetro de anel em solo de cerrado no município de Rondonópolis-MT**. Enciclopédia Biosfera, Goiânia, v. 8, n. 14, p. 369-378, 2012.

FEITOSA, F. A. C. et al. **Hidrogeologia: Conceitos e aplicações**. 3a Edição Revisada e Ampliada. CPRM Serviço Geológico Nacional, 2008. p. 77 – 91.

FILHO, A. G. A.; SZÉLICA, M. R.; ENOMOTO, C. F. **Estudo de medidas não- estruturais para controle de inundações urbanas**. *PUBLICATIO UEPG: Ciências Exatas e da Terra, Agrárias e Engenharias*, Ponta Grossa, v. 6, n. 1, 2000.

FIORI, Joyce Pinheiro de Oliveira. **Avaliação de métodos de campo para a determinação de condutividade hidráulica em meios saturados e não saturados**. 2010. 110 f. Dissertação (Mestrado em Área de concentração: Hidrogeologia e Meio Ambiente) – Instituto de Geociência, Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

GUELPH PERMEAMETER 2800 MANUAL. Disponível em: <http://www.ictinternational.com/content/uploads/2014/03/Guelph-Manual.pdf>. Acesso em: 03/01/2019.

IBRAHIM M. M.; ALIYU J. **Comparison of Methods for Saturated Hydraulic Conductivity Determination: Field, Laboratory and Empirical Measurements**. *British Journal of Applied Science & Technology*. v. 15, n. 3, p. 1-8, 2016.

INFILTRÔMETRO DE TENSÃO MINI DISK. Disponível em: <http://www.decagon.com.br/hidrologia/condutividade/mini-disk/>. Acesso em: 20/11/2018.

- JACKA, L. et al. **A comparison of three measuring methods for estimating the saturated hydraulic conductivity in the shallow subsurface layer of mountain podzols.** *Geoderma*, v. 219-220, p. 82-88, may. 2014.
- LUCAS, A. H. et al. **Avaliação da construção e operação de técnicas compensatórias de drenagem urbana: o transporte de finos, a capacidade de infiltração, a taxa de infiltração real do solo e a permeabilidade da manta geotêxtil.** *EngSanitAmbient*, [S.l.], v. 20, n. 1, jan./mar. 2015.
- MERCADO LIVRE. Disponível em: <<https://www.mercadolivre.com.br/>>. Acesso em: 06 dez. 2018.
- PENNER, G. C. et al. **Avaliação da capacidade de infiltração na bacia hidrográfica do igarapé sapucajuba (Belém-PA).** In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos XXII, 2017, Florianópolis. Anais...Florianópolis: ABRH, 2017.
- PERROUX, K.M. & WHITE, I. **Designs for disc permeameters.** *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52:1205-1215, 1988.
- PROFILL ENGENHARIA E AMBIENTE LTDA. RELATÓRIO PARCIAL RP 03. **Estudos Hidrogeológicos para a Definição de Estratégias de Gestão das Águas Subterrâneas da Cidade de Belém/PA e Municípios Adjacentes.** Porto Alegre, 2017.
- REYNOLDS, W. D.; ELRICK, D. E.; TOPP, G. C. **A reexamination of the constant head well permeameter method for measuring saturated hydraulic conductivity above the water table.** *Soil Science*, v.136, 1983. p.250–268
- REYNOLDS, W. D.; ELRICK, D. E. **In situ measurement of field saturated hydraulic conductivity, sorptivity and the α -parameter using the Guelph permeameter.** *Soil Science*, v.140, n. 4, 1985. p. 292–302
- RICHARDS, B. G. **Capillary conduction of liquids through porous medium.** *Physics*, New York, 1, 1931. p. 318-333.
- SANTOS, V. J.; SANTOS, C. O. **A evolução da urbanização e os processos de produção de inundações urbanas.** *Estação científica (UNIFAP)*. Macapá, v. 3, n.1, p. 19-30, jan-jun. 2013.
- SHWETHA, P.; VARIJA K. **Soil water retention curve from saturated hydraulic conductivity for sandy loam and loamy sand textured soils.** *Aquatic Procedia*, v. 4, 2015. pg. 1142-1149
- SILVA, L. P. *Hidrologia: Engenharia e Meio Ambiente.* Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.
- SOILCONTROL. Disponível em: <<https://www.soilcontrol.com.br/produto/92574/infiltrometro-de-duplo-anel.aspx>>. Acesso em: 06 dez. 2018.
- SOTO, M. A. A. **Estudo da Condutividade Hidráulica em Solos não Saturados.** 1996, 136 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.
- TECNAL EQUIPAMENTO CIENTIFICO. Disponível em:<<http://tecnal.com.br/orcamento/>>. Acesso em: 06 dez. 2018.

DETERMINAÇÃO DA TAXA MÉDIA DE INFILTRAÇÃO PARA A MICROBACIA DO IGARAPÉ URIBOQUINHA NA REGIÃO DO ATERRO SANITÁRIO DE MARITUBA-PA

Giovanni Chaves Penner

Universidade Federal do Pará, curso de Engenharia Sanitária e Ambiental
Belém – Pará

Moisés Marçal Gonçalves

Universidade Federal do Pará, curso de Engenharia Sanitária e Ambiental
Belém – Pará

Rubens Takeji Aoki Araujo Martins

Universidade Federal do Pará, curso de Engenharia Sanitária e Ambiental
Belém – Pará

RESUMO: O presente trabalho consistiu na determinação da taxa de infiltração na zona não saturada do solo na região do Aterro Sanitário de Marituba, localizado no município de Marituba-PA. A metodologia adotada para a pesquisa foi proposta pela Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE) no ano de 1996, tal metodologia consiste na perfuração de um furo de sondagem no solo a uma profundidade que varia de 20 a 30 centímetros. Primeiramente satura-se o furo de sondagem em seguida com auxílio de uma régua graduada acompanha-se o rebaixamento do nível de água no furo de sondagem. Foram executados 3 ensaios em pontos distintos haja vista que é uma bacia de pequeno porte de aproximadamente 5 km² e estes pontos foram selecionados nas redondezas do empreendimento. No primeiro ponto (Ponto 01) obteve-se uma taxa de

infiltração de 7,35.10⁻⁶ cm/s, para o Ponto 02 de 9,52.10⁻⁵ cm/s e para o Ponto 3 de 1,10.10⁻⁴ cm/s. A taxa de infiltração média determinada através da média geométrica foi de 4,25.10⁻⁵ cm/s.

PALAVRAS-CHAVE: Ensaio de infiltração; Ensaio da ABGE; Taxa de infiltração

ABSTRACT: The present work consisted in the determination of the infiltration rate in the unsaturated soil zone in Marituba Landfill region, located in Marituba-PA. The methodology adopted for the research was proposed by the Brazilian Association of Engineering Geology (ABGE) in 1996, such methodology consists of drilling a drilling hole in the ground to a depth ranging from 20 to 30 centimeters. First drill the borehole and then with a graduated ruler, the lowering of the water level in the drillhole is followed. Three trials were performed at different points since it is a small basin of approximately 5 km² and these points were selected in the vicinity of the project. In the first point (Point 01) an infiltration rate of 7.35.10⁻⁶ cm / s was obtained for Point 02 of 9.52.10⁻⁵ cm / s and for Point 3 of 1.10.10⁻⁴ cm / s . The average infiltration rate determined by the geometric mean was 4.25.10⁻⁵ cm / s.

KEYWORDS: Infiltration test; ABGE test; Infiltrate rate

1 | INTRODUÇÃO

A condutividade hidráulica saturada no solo apresenta-se como um parâmetro chave para a análise de intensidade e deslocamento de água no solo (MARQUES et al, 2008). Segundo (GONÇALVES & LIBARDI, 2013) esse parâmetro é uma propriedade do solo que expressa a facilidade com que a água percola sobre o mesmo, para se determinar a condutividade hidráulica é utilizada a lei experimental de Darcy. A equação de Darcy estabelece que a quantidade de água que passa por unidade de tempo e de área pelo meio poroso saturado é proporcional ao gradiente de potencial (entende-se gradiente de potencial como gradiente hidráulico) da água nesse meio.

O projeto contemplou a determinação da taxa de infiltração média medida em campo para a bacia hidrográfica do Igarapé Uriboquinha, também chamado de Igarapé Pau Grande, na região do aterro sanitário no município de Marituba no Estado do Pará. A metodologia utilizada foi proposta pela Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE, 1996), já apresentada no capítulo anterior. A taxa de infiltração média na bacia permitiu realizar diversas discussões acerca do assunto, dentre elas temos, o tipo de solo predominante na região, a facilidade com o que a água infiltra no solo e também discutir sobre a vulnerabilidade e/ou fragilidade do aquífero livre na região.

Estas informações podem ser de extrema importância na área do empreendimento em Marituba-PA para realizar tomadas de decisão, tendo em vista a quantidade de volume produzido de chorume no local. A presente pesquisa possui como principal finalidade a determinação da taxa de infiltração média na bacia e a partir das concepções geradas discutir sobre a temática que envolve o contexto do aterro sanitário em Marituba-PA.

Este trabalho focou na avaliação da taxa de infiltração do solo da zona não saturada, realizando ensaios de campo, onde foi acompanhado o rebaixamento do nível da água em função do tempo até que a taxa de infiltração, controlada pela condutividade hidráulica (K), sofra a menor variação em função do tempo (t) e atinja o regime permanente ou estado estacionário.

2 | MATERIAL E MÉTODOS

O tipo de ensaio estabelecido para a determinação da taxa de infiltração é considerando um nível ou carga de água variável. Primeiramente perfura-se o solo com um trado mecânico ou manual e depois deve-se fornecer água no furo. A metodologia utilizada para o desenvolvimento da pesquisa foi proposta pela Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE) em seu Boletim 04 no ano de 1996, onde deve-se inicialmente fornecer água no furo de sondagem perfurado e esperar a saturação do mesmo, determinou-se o ensaio com o solo saturado em virtude dos altos índices pluviométricos da região com isso o solo mantém-se com

sua capacidade completamente preenchida no maior período do ano.

A metodologia proposta é realizada com a carga de água variável, ou seja, após a saturação inicial do solo deve-se observar o rebaixamento do nível de água no furo de sondagem em função do tempo. O ensaio é realizado sem revestimento no poço, desta forma contempla-se a infiltração vertical e horizontal, ou seja, água infiltra de forma livre. A Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE) padronizou no Boletim 04 (ABGE, 1996) ensaios de infiltração de água em solo saturado a carga variável (ensaio de rebaixamento), conforme exposto no item 3.2.2.

O ensaio proposto pela ABGE é de baixo custo, para a realização do ensaio basta ter um trado manual e uma régua graduada para fazer a leitura do rebaixamento do nível de água em função do tempo que foi cronometrado.

3 | RESULTADOS

Ao longo da bacia do Igarapé Uriboquinha foram selecionados três pontos para a realização do ensaio de infiltração. Estes pontos foram selecionados de modo que fiquem bem distribuídos na bacia e próximos ao empreendimento para que as informações extraídas sejam as mais representativas possível, conforme apresentado na **Figura 1**.

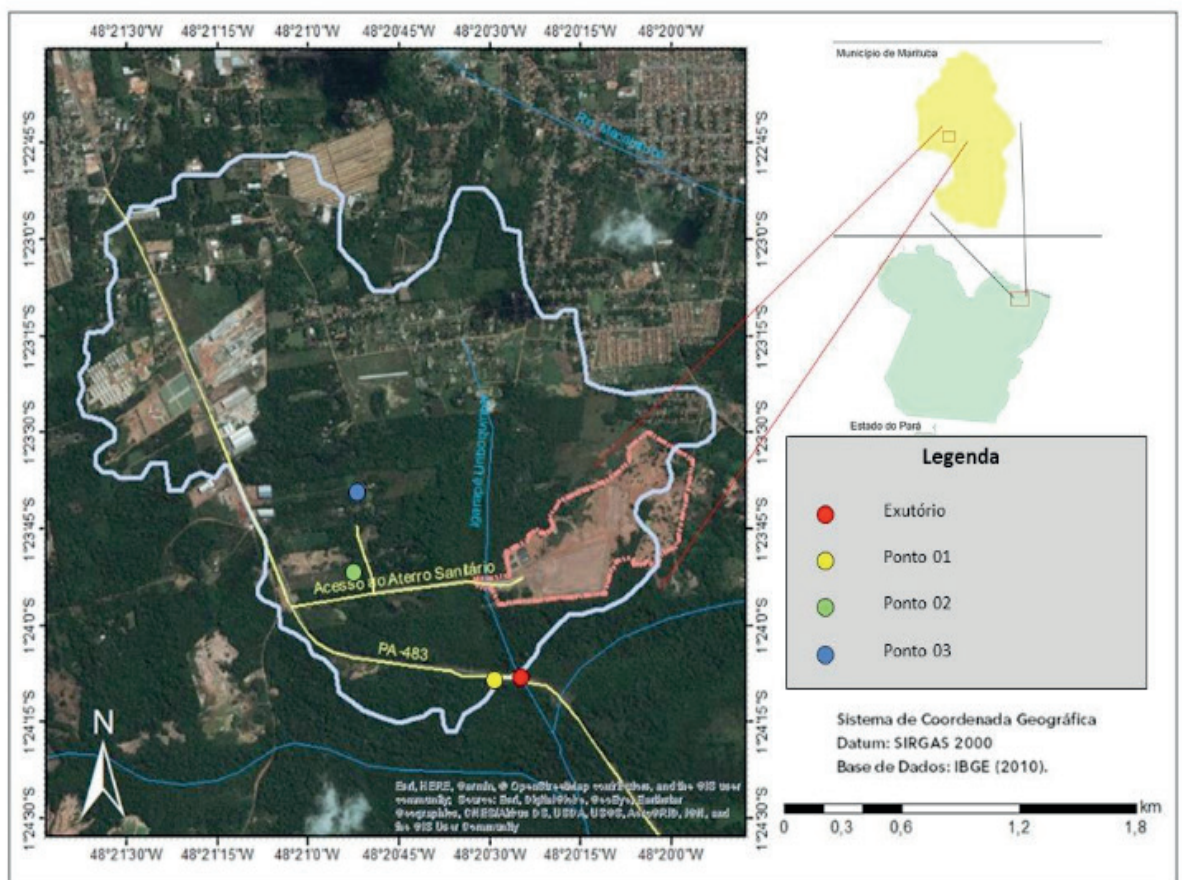


Figura 1. Localização dos pontos de ensaio de infiltração na bacia do Igarapé Uriboquinha.

Fonte: os Autores, 2019

Os ensaios foram realizados em campo com auxílio de trado manual para a perfuração dos poços apresentado na **Figura 2**. Primeiramente saturou-se o solo e depois acompanhou o rebaixamento do nível de água, cada ensaio teve duração de 40 minutos. Foram realizadas as leituras do rebaixamento do nível de água com a auxílio de uma régua graduada de alumínio inox em cada intervalo de tempo selecionado.



Figura 2. A, Perfuração do solo e B, Leitura de dados.

Fonte: os Autores, 2019

Os cálculos foram feitos a partir do método proposto pela ABGE (1996) apresentado na **Equação 1** do Capítulo 3, observou-se uma taxa de infiltração média de $K_{\text{média}}$ de $4,25 \cdot 10^{-5} \text{ cm/s}$. A **Tabela 1** apresenta as informações geradas nos ensaios nos três pontos.

Ponto	H (cm)	Δt (min)	ΔH (cm)	D (cm)	r (cm)	i	K (cm/s)
01	30	40	0,5	18	9	5	$7,35 \cdot 10^{-6}$
02	30	40	8	15	7,5	5	$9,52 \cdot 10^{-5}$
03	30	40	17,5	17	8,5	5	$1,10 \cdot 10^{-4}$

Tabela 1. Dados de taxa de infiltração

Fonte: os Autores, 2019

Conforme apresentado na **Tabela 1** nota-se que o Ponto 03 apresentou a maior variação de nível d'água e consequentemente maior taxa de infiltração, em contrapartida, o Ponto 1 apresentou a menor variação no nível de água e consequentemente menor taxa de infiltração. Foram geradas curvas de comportamento referentes a cada ensaio realizado, estas estão apresentadas na **Figura 3**. O rebaixamento do nível de água no furo de sondagem foi observado em função do tempo.

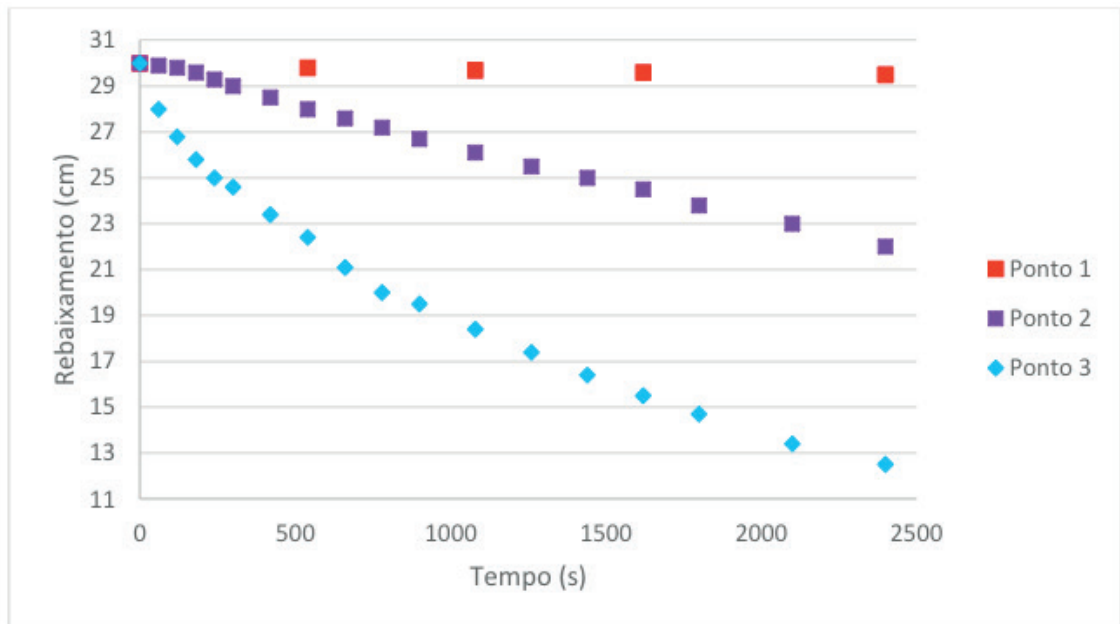


Figura 3. Ensaio de rebaixamento na microbacia do Igarapé Uriboquinha.

Fonte: os Autores, 2019

Observa-se na **Figura 3** que o comportamento dos ensaios de infiltração obteve curvas completamente diferentes. Isso demonstra que o solo na bacia não é uniforme ou que as características hidráulicas variam bastante. O Ponto 01 quase não teve volume de água infiltrado, isto pode ser em função de o mesmo estar com a sua capacidade de infiltração completamente preenchida. Pois, a capacidade de infiltração do solo é entendida como a quantidade máxima de água que um solo, sob uma dada condição, pode absorver na unidade de tempo por unidade de área horizontal, considerando que o solo assume o comportamento de um reservatório.

Para os Pontos 02 e 03 a água encontrou maior facilidade para percolar no solo. Sendo o Ponto 03 o de maior taxa de infiltração, este ponto pode ter apresentado maior facilidade de penetração de massa de água em função de sua capacidade não estava completamente preenchida e também em função de raízes de árvores que provavelmente funcionaram como caminho preferencial de escoamento de água.

Notou-se que o Ponto 01 possui maior resistência a infiltração, portanto possui menor taxa de infiltração e o Ponto 03 é o possui maior taxa de infiltração. Esses dados demonstram que pode haver vulnerabilidade aos aquíferos livres na região com essa taxa de infiltração média na ordem de grandeza de 10^{-5} . Segundo PENNER et al (2017) o solo na bacia do Igarapé Uriboquinha estaria classificado como areais finas *siltosas e argilas, siltes argilosos*, conforme apresenta-se na **Figura 4**. Essa avaliação traduz que qualquer massa líquida proveniente da carga poluidora do aterro ou outra fonte poluidora tem potencial para contaminar os aquíferos livres do local.

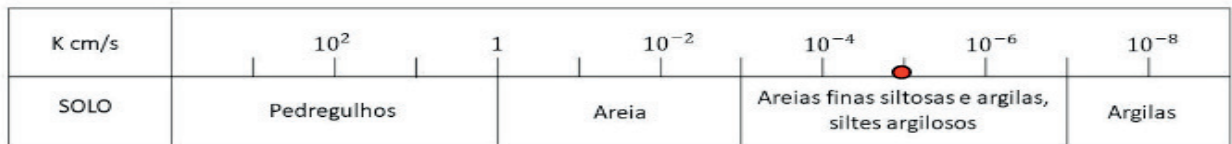


Figura 4. Caracterização do solo na bacia do Igarapé Uriboquinha (Adaptado de ABGE, 1996)

Fonte: os Autores, 2019

A taxa média de infiltração na zona não saturada do solo possui ordem de grandeza de 10^{-5} cm/s isto implica dizer que a bacia do Uriboquinha possui certa vulnerabilidade para a infiltração e percolação de poluentes dada tais condições. No entanto, é um indicativo de facilidade de recarga para o aquífero livre tendo em vista a facilidade de água infiltrar no meio.

4 | CONCLUSÕES

A pesquisa foi desenvolvida e foram alcançados dados satisfatórios. A determinação da taxa de infiltração média na bacia permitiu determinar o solo predominante dentro da mesma. Outras análises também foram feitas com os resultados obtidos, a taxa média de infiltração teve ordem de grandeza de 10^{-5} cm/s e pode indicar vulnerabilidade para as águas subterrâneas, sobretudo em virtude de o aquífero livre estar a profundidades baixas na região.

REFERÊNCIAS

- ABGE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA. **Ensaio de Permeabilidade em Solos: Orientações para sua execução no campo**. São Paulo, 1996.
- ABGE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA. **Ensaio de Permeabilidade em Solos: Orientações para sua execução no campo**. São Paulo, 2013.
- GONÇALVES, A. D. M. A.; LIBARDI, P. L. **Análise da determinação da condutividade hidráulica do solo pelo método do perfil instantâneo**. R. Bras. Ci. Solo. V.37: 1174 – 1184, Viçosa, set./out, 2013.
- GOMES, T.A.T; COSTA, K.S. **Estudo do coeficiente de permeabilidade em ensaios de poço pelo padrão ABGE: complexo alcalino carbonatítico do barreiro (cacb)**. Araxá-MG.
- MARQUES et al. **Avaliação da condutividade hidráulica do solo saturada utilizando dois métodos de laboratório numa topossequência com diferentes coberturas vegetais no Baixo Amazonas**. ACTA Amazonica. Petrópolis, v. 38, p. 193-206, 2008.
- MERCADANTE, R. **Avaliação da condutividade hidráulica do solo por meio do ensaio de rebaixamento variando o diâmetro do furo**. 2014. 35p. Universidade Católica de Brasília;
- MESQUITA, M. G.B. F; MORAES, S. O. **A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo**. Ciência Rural, Santa Maria, n.3, 2004, p. 963-969.
- PENNER et al. **Avaliação da capacidade de infiltração na bacia hidrográfica do Igarapé Sapucajuba (Belém-PA)**. XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Florianópolis, 2017.

REGIONALIZAÇÃO DE VAZÃO COMO FERRAMENTA PARA A DETERMINAÇÃO DA VAZÃO DE REFERÊNCIA DO IGARAPÉ URIBOQUINHA NO MUNICÍPIO DE MARITUBA/PA

Rubens Takeji Aoki Araujo Martins

Universidade Federal do Pará, curso de Engenharia Sanitária e Ambiental
Belém – Pará

Giovanni Chaves Penner

Universidade Federal do Pará, curso de Engenharia Sanitária e Ambiental
Belém – Pará

Moisés Marçal Gonçalves

Universidade Federal do Pará, curso de Engenharia Sanitária e Ambiental
Belém – Pará

RESUMO: No presente capítulo será abordada a regionalização hidrológica realizada para obtenção da vazão de estiagem do Igarapé Uriboquinha por meio do método de vazão específica. Para isto, utilizou-se dados físicos e de vazão da bacia hidrográfica do rio Carapucu, localizado na mesma região hidrográfica do curso d'água de estudo. Com base em medições in loco, verificou-se que os resultados, estimados para a vazão de estiagem do igarapé, apresentaram valores elevados em comparação com os observados em campo, indicando uma tendência de superestimar estes valores. Este fato pode ter sido ocasionado devido a grande diferença entre os portes das duas bacias hidrográficas consideradas. Portanto, recomenda-se a utilização de métodos mais robustos e que considerem a área da bacia hidrográfica como parâmetro de extrapolação. Com relação ao processo de gestão dos

recursos hídricos, recomenda-se cautela ao utilizar o método como base para avaliação de disponibilidade hídrica, pois pode não refletir fielmente a realidade do curso d'água, podendo levar o órgão competente a conceder o direito de uso de vazões superiores as existentes.

PALAVRAS-CHAVE: Regionalização hidrológica, Vazão de estiagem, Recursos hídricos.

ABSTRACT: The purpose of this chapter is to discuss about the hydrological regionalization carried out to estimate Uriboquinha stream's drought flow, using the specific flow rate method. Physical and flow data was used from another river basin, located in the same hydrographic region. As result, it was found that the estimation using the specific flow presented high values compared to those observed in the field, indicating a tendency to overestimate these values. This fact may have been caused due to the large difference between the sizes of the two watersheds considered. Therefore, it is recommended to use more robust methods that consider the watershed area as an extrapolation parameter.

KEYWORDS: Hydrological regionalization, Drought flow, Water resources.

1 | INTRODUÇÃO

O monitoramento hidrológico é uma importante ferramenta para a gestão adequada dos recursos hídricos de uma bacia

hidrográfica, pois é a partir dos dados gerados que são realizadas avaliações de disponibilidade hídrica e tomadas de decisões. No entanto, nem todas as bacias hidrográficas contam com estações de monitoramento. Na região norte, em especial, além da baixa densidade de estações fluviométricas existente, é comum se encontrar muitas estações sem uma série histórica de dados adequada. Por este motivo, é necessária a utilização de outros artifícios para se estimar a disponibilidade hídrica em algumas bacias hidrográficas na região, como por exemplo, a regionalização hidrológica. Segundo Garbossa & Pinheiro (2015), “a regionalização de vazão tem como premissa que a região hidrológica pode ser considerada homogênea quando suas características fisiográficas e hidrometeorológicas são similares”. A regionalização consiste basicamente na transferência de dados hidrológicos de bacias hidrográficas monitoradas para bacias não monitoradas, desde que estejam na mesma região hidrográfica e apresentem as características supracitadas.

As vazões de referência são vazões mínimas de um curso d’água obtidas com o objetivo de representar a sua condição mais desfavorável. A partir dela é estabelecida a vazão máxima outorgável e, de forma indireta, a vazão ecológica. A vazão outorgável é basicamente a vazão máxima que pode ser consumida pelos múltiplos usos da água em uma bacia, sem que cause o desequilíbrio do ecossistema aquático ou afete a disponibilidade hídrica. Cada Unidade da Federação tem autonomia para definir a sua vazão de referência. No Pará, por exemplo, utiliza-se a Q_{95} , já em Minas Gerais, a $Q_{7,10}$. Algumas vazões de referência são mais restritivas que outras, no entanto, sempre partem do mesmo pressuposto, que é representar a condição de estiagem do curso d’água.

Neste estudo utilizou-se o método da vazão específica para a estimativa da vazão de referência do igarapé Uriboquinha. Este método é considerado simples e prático e necessita somente da Q_{95} e da área de drenagem de uma bacia com características semelhante à de estudo.

2 | MATERIAL E MÉTODOS

O método de regionalização utilizado no presente trabalho foi o de vazão específica, no qual é obtido a partir de uma outra bacia hidrográfica localizada na mesma região hidrográfica, com características físicas, geológicas e hidrogeológicas semelhantes a bacia de estudo e que apresentasse pelo menos dois anos de dados de monitoramento diários de vazão. A estação selecionada foi a Porto de Minas de responsabilidade da Agência Nacional de Águas - ANA cujo código é 31850000, no qual monitora o rio Carapucu em Santa Isabel do Pará. Os dados foram obtidos a partir da opção de série histórica da plataforma hidroweb da ANA. Em seguida, construiu-se a curva de permanência do curso d’água (rio Carapucu) para a obtenção da Q_{95} , para em seguida, com área de drenagem da estação, calcular a vazão específica de estiagem da bacia:

$$q_e = \frac{Q_{95}}{A} \quad \text{(Equação 1)}$$

Onde:

q_e – Vazão específica de estiagem (L/s.km²);

Q_{95} – Vazão de referência do rio Carapucu (L/s);

A – Área de drenagem até o ponto monitoramento (km²).

Em posse da vazão específica, calculou-se a do igarapé Uriboquinha a partir da sua área de drenagem:

$$Q_{95} = q_e \cdot A_u \quad \text{(Equação 2)}$$

Onde:

A_u – Área de drenagem do igarapé Uriboquinha (km²);

q_e – Vazão específica (L/s.km²);

Q_{95} – Vazão de referência do igarapé Uriboquinha (L/s).

3 | RESULTADOS

O igarapé Uriboquinha está situado no município de Marituba, na Região Metropolitana de Belém, Estado do Pará. O curso d'água é um afluente do rio Guamá, ao sul, e possui cerca 5 km² de área, até o exutório considerado. Na sua drenagem, está localizado o Aterro Sanitário de Marituba, no qual é destino dos resíduos sólidos urbanos da Região Metropolitana de Belém. Na **Figura 1** é apresentado o mapa de localização do igarapé, nela também é possível verificar a proximidade do curso d'água com o empreendimento.

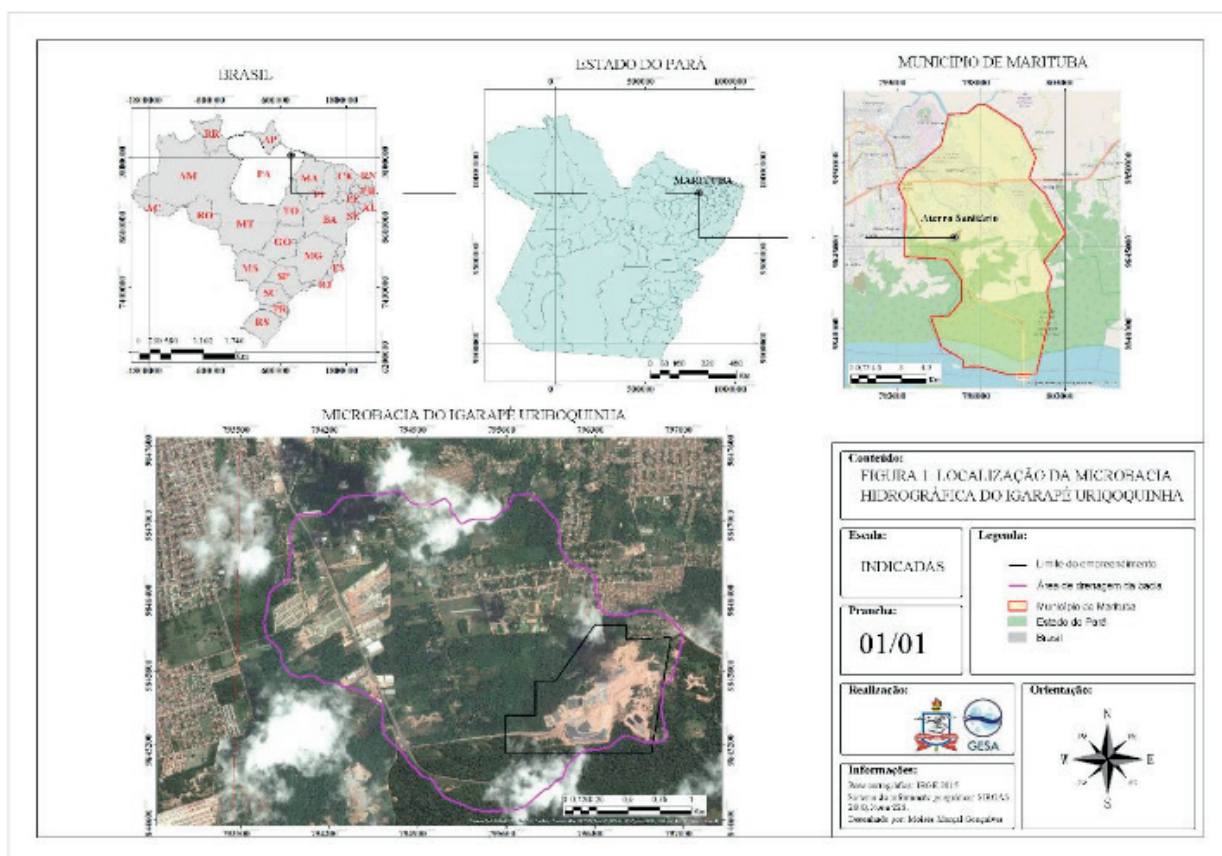


Figura 1. Mapa de localização da microbacia hidrográfica do igarapé Uriboquinha, Marituba/PA

Fonte: Autores, 2019.

A estação fluviométrica utilizada como referência para a regionalização da vazão, foi a Porto de Minas cujos dados são apresentados na **Tabela 1** a seguir. Ao todo foram utilizados 1017 dados diários de vazão ao longo dos mais de dois anos de funcionamento da mesma. A estação monitorava o rio Carapucu localizado no município de Santa Isabel do Pará, também localizada na Região Metropolitana de Belém.

Após tratamento estatístico dos dados, construiu-se a curva de permanência (**Figura 2**) do rio para a obtenção da vazão de referência Q95, apresentada na **Tabela 1**. Em seguida, dividiu-se a mesma pela área de drenagem do rio até o ponto de monitoramento, para a obtenção da vazão específica.

Código da estação	31850000
Nome da estação	Porto de Minas
Tipo	Fluviométrica
Código do rio	31665000
Curso d'água	Rio Carapucu
UF	Pará
Entidade	Agência Nacional de Águas – ANA
Latitude	-01 21 00
Longitude	-48 08 00
Área (km²)	162

Q95 (m³/s)	0,94
Q90 (m³/s)	1,04
Q50 (m³/s)	1,70
Vazão específica – Q95 (L/s.km²)	5,80

Tabela 1. Informações da estação fluviométrica utilizada na regionalização da vazão

Fonte: Adaptado. ANA (2009)

A vazão específica obtida no presente estudo, mostrou-se coerente com o valor apresentado pela ANA (2009, p. 192) para Unidade de Planejamento Acará-Guamá, onde igarapé Uriboquinha está inserido. Segundo o estudo, a vazão específica estimada no período de estiagem para a Unidade de Planejamento foi de 5,59 L/s.km², valor este muito próximo do obtido no rio Carapucu, com valor de 5,80 L/s.km².

Com relação a curva de permanência apresentada na **Figura 2**, verificou-se que a mesma apresenta uma baixa inclinação, o que indica que a bacia possui uma boa regularização natural e grande influência de contribuições subterrâneas, ou seja, uma boa parcela da vazão do rio é de origem subterrânea, além de apresentar boa resposta a cheias naturais.

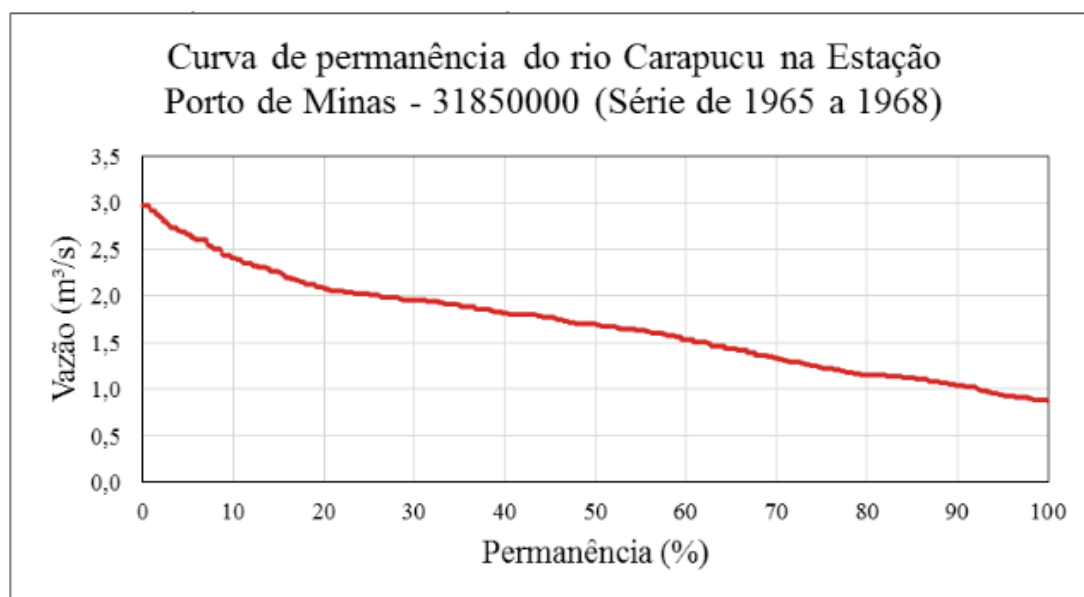


Figura 2. Curva de permanência do rio Carapucu, Santa Isabel/PA

Fonte: Autores, 2019.

A partir da **Equação 1**, obteve-se a vazão de referência do igarapé Uriboquinha, utilizando a vazão específica de 5,80 l/s.km² e a área de drenagem do curso d'água de 5,0 km²:

$$Q_{95} = 5,80 \text{ L/s.km}^2 \times 5,0 \text{ km}^2 = 29 \text{ L/s}$$

No Estado do Pará, a vazão passível de ser outorgável é equivalente a 70% da Q_{95} (SEMAS, 2014, p. 23), ou seja, 20,3 L/s estariam disponíveis para outorga,

enquanto que 8,7 L/s seriam destinados para o equilíbrio do ecossistema aquático. No entanto, antes de qualquer tomada de decisão, deve-se verificar se esta situação realmente acontece. Por se tratar de uma pequena bacia, a precisão do método pode influenciar de forma decisiva no desempenho do gerenciamento dos recursos hídricos locais. Para isto, realizou-se campanhas mensais de medição de vazão do curso d'água. Os dados obtidos, apesar de não apresentarem grande representatividade, ajudaram a verificar a coerência do resultado.

Mês/Ano	2018
Janeiro	-
Fevereiro	3,01
Março	52,68
Abril	24,4
Mai	6,25
Junho	11,93
Julho	6,11
Agosto	10,8
Setembro	13,74
Outubro	6,61
Novembro	-
Dezembro	-

Tabela 2. Medições de vazão (L/s) no igarapé Uriboquinha

Fonte: Autores, 2019.

As medições indicadas na Tabela 1 foram realizadas mensalmente, pelo período da manhã, para fins confirmatórios. E a partir delas foi possível verificar que das nove medições, apenas uma ultrapassou 29 L/s, ocorrendo no mês de março, período mais chuvoso da região. Com isso, é possível avaliar que se fossem outorgados os 20,3 L/s, poderia comprometer a disponibilidade de água em alguns momentos. Apesar de indicar uma permanência de 95%, verificou-se que em várias oportunidades esta vazão não foi atingida, podendo levar o órgão competente a outorgar mais do que há disponível.

Esta diferença nos resultados (Q_{95} estimada e vazão real) pode estar relacionada a própria imprecisão inerente ao método utilizado e a diferença de tamanho entre as duas bacias hidrográfica (igarapé Uriboquinha: 5 km² e rio Carapucu: 162 km²) não considerada. Além do mais, deve-se ressaltar que os dados utilizados na comparação apresentam pouca representatividade, devido a sua baixa extensão.

4 | CONCLUSÕES

As vazões de referência são ferramentas importantes no gerenciamento dos recursos hídricos em uma Bacia Hidrográfica, e a partir delas são indicadas as parcelas que podem ser consumidas pelos diversos usuários de água, garantindo assim os usos múltiplos, sem comprometer os ecossistemas aquáticos e a disponibilidade hídrica.

No entanto, nem todos os cursos d'águas possuem estações de monitoramento, sendo necessário, portanto, a utilização de outros artifícios, como a regionalização de vazão. No presente trabalho, estimou-se a Q95 para a microbacia do Igarapé Uriboquinha a partir do método de vazão específica, e para isto utilizou-se a bacia do rio Carapucu devido estar na mesma região hidrográfica e possuir no mínimo dois anos de dados diários de monitoramento. A Q95 do rio Carapucu foi de 940 L/s, obtida a partir da curva de permanência e a vazão específica de 5,80 L/s.km². E a partir da área de drenagem do igarapé Uriboquinha (5km²), estimou-se para esse curso d'água uma Q95 de 29 L/s. No entanto, a partir de medições feitas no período de fevereiro a outubro, verificou-se que das nove medições, apenas uma ultrapassou 29 L/s e que se fossem outorgados os 70% da vazão de referência, haveria grandes chances de faltar água para os usuários. O método utilizado apresenta bastante praticidade e simplicidade, no entanto, não deve ser utilizado indiscriminadamente pois pode incrementar erros e prejudicar o gerenciamento dos recursos hídricos em pequenas bacias hidrográficas. Para futuros trabalhos, recomenda-se cautela na utilização deste método para bacias pequenas, e a elaboração de estudos entre bacias pequenas de áreas semelhantes.

REFERÊNCIAS

- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. 2009. **Plano estratégico de recursos hídricos da bacia hidrográfica dos rios Tocantins e Araguaia**. Relatório Síntese/Agência Nacional de Águas – Brasília, DF, 2009.
- _____. 2009. **Inventário das estações fluviométricas** – 2 ed. Brasília: ANA; SGH, 2009.
- _____. 2017. **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil: relatório pleno**. ANA. Brasília: ANA, 2017. p.117. 2017.
- _____. 2018. **Estudos Hidrogeológicos para a Definição de Estratégias de Gestão das Águas Subterrâneas da Cidade de Belém/PA e Municípios Adjacentes**. Relatório Parcial RP 06. Brasília, DF. p. 112. 2018.
- BRASIL. **Lei nº. 9.433, em 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº. 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº. 7.990, de 28 de dezembro de 1989**. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 9 de janeiro de 1997.
- CPRM – COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. 2002. **Projeto estudos Hidrogeológicos da Região Metropolitana de Belém e adjacências**. Disponível em: < http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/10744/1/reI_hidro_belem_adj2002.pdf> Acesso em 15 ago 2018.
- GARBOSSA, L. H. P.; PINHEIRO, A. **Vazões de referência para gestão de bacias hidrográficas rurais e urbanas sem monitoramento**. REGA, Porto Alegre, v. 12, no 1, p. 43-52, jun. 2015.
- SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E SUSTENTABILIDADE – SEMAS. 2014. **Manual para usuários: outorga de direito de uso de recursos hídricos**. Belém: SEMA, 2014.

ESTIMATIVA DA RECARGA NATURAL DO AQUÍFERO LIVRE NA MICROBACIA HIDROGRÁFICA DO ENTORNO DO ATERRO SANITÁRIO DE MARITUBA/PA

Rubens Takeji Aoki Araujo Martins

Universidade Federal do Pará, curso de Engenharia Sanitária e Ambiental
Belém – Pará

Giovanni Chaves Penner

Universidade Federal do Pará, curso de Engenharia Sanitária e Ambiental
Belém – Pará

Moisés Marçal Gonçalves

Universidade Federal do Pará, curso de Engenharia Sanitária e Ambiental
Belém – Pará

RESUMO: O presente estudo apresenta uma avaliação da recarga natural aquífera da área do entorno do Aterro Sanitário de Marituba, no Pará. A área está inserida na bacia hidrográfica do Igarapé Uriboquinha, cuja área de drenagem até o exutório considerado é de 5 km². A estimativa da Recarga Potencial Direta - RPD foi realizada com base na metodologia utilizada pela ANA (2017) no estudo hidrogeológico realizado na Região Metropolitana de Belém no ano 2017. A partir de séries históricas de precipitação e escoamento de base do igarapé, obteve-se uma recarga potencial direta de 6%, variando de 214 mm em 2017 a 158 mm no período de janeiro a julho de 2018. O método utilizado, em comparação aos demais disponíveis, apresentou dados de entrada mais acessíveis, e que apesar de serem simples, precisaram ser estimados para a bacia de estudo, devido à escassez de informações. Deve-se ressaltar

também, que a regionalização de vazão e a coleta de dados de precipitação da estação em Belém incrementaram erros aos resultados, mas que para os objetivos propostos mostraram satisfatórios. Além disso, o método é indicado para estimativas anuais, sendo limitado para estimativas mensais.

PALAVRAS-CHAVE: Recarga subterrânea, Uriboquinha, Aterro sanitário de Marituba.

ABSTRACT: This research presents an evaluation of natural groundwater recharge for the unconfined aquifer in the area around Marituba's Sanitary Landfill. The study area is inserted within Uriboquinha stream's watershed, which is located in the state of Pará, north of Brazil. The drainage area considered is near to 5 km². Estimates of mean-annual recharge were based on precipitation historical series and the Uriboquinha stream's base flow. This method was used by the Brazilian National Water Agency - ANA (2017) in the hydrogeological study in Belém's Metropolitan Region in 2017, and it allows to estimate the groundwater Direct Potential Recharge. The natural groundwater recharge estimate obtained for the area ranged around 6% of annual precipitation, from 214 mm in 2017 to 158 mm in the period from January to July 2018. Despite the input data simplicity, some difficulty was found, due to the lack of information available for the study area, as the absence of streamflow measurements. Besides that, the streamflow's regionalization and the input data from Belém's precipitation

site increased errors to the results, but considering the research main purpose, it was considered satisfactory. In addition, the method is indicated for annual estimates and is limited to monthly estimates.

KEYWORDS: Groundwater recharge, Uriboquinha, Marituba's Sanitary Landfill.

1 | INTRODUÇÃO

A gradativa poluição dos corpos hídricos superficiais somada as crescentes demandas por água e crises hídricas que ocorreram nos últimos anos, fizeram com que uma outra fonte de água ganhasse cada vez mais espaço como alternativa para o abastecimento, os reservatórios subterrâneos. Segundo a ANA (2017), em 2008 haviam cadastrados cerca de 145 mil fontes de abastecimento de água subterrânea no Brasil, já em 2016 este número quase dobrou, passando para mais de 278 mil poços tubulares cadastrados, e uma nova projeção indica que este número já chega em quase 1,2 milhões de poços existentes. Segundo Martelli (2012), o aumento significativo de exploração de água subterrânea se faz possível devido a quatro fatores principais: econômico, tecnológico, segurança e institucional. Segundo o mesmo autor, a água subterrânea geralmente possui menor custo e apresenta elevado benefício, possui maior segurança sanitária e menor necessidade de tratamento. Adicionalmente, os reservatórios subterrâneos também possibilitam maior resiliência frente as variabilidades da precipitação e enfrentamento as crises hídricas; podendo pertencer a usuários individuais, indústrias ou pequenos municípios. Todavia, a crescente exploração deste recurso exige maior controle, visando a sustentabilidade dos seus usos. Apesar da crescente demanda, o reabastecimento destes reservatórios subterrâneos, denominados de aquíferos, não segue o mesmo ritmo, podendo chegar em determinado momento, a ser superado pelo ritmo de exploração, gerando um déficit.

A superexploração dos aquíferos gera grandes problemas como: rebaixamento exagerado do nível de água nos poços; colapso dos terrenos (recalque do solo devido ao bombeamento excessivo de água); aumento na intrusão salina em regiões litorâneas, entre outros. Em países como Estados Unidos, China e Índia, a superexploração devido as atividades agrícolas e industriais vem provocando impactos irreversíveis nos aquíferos locais, causando um declínio acelerado nas reservas subterrâneas permanentes. Este uso insustentável, pode agravar ainda mais uma possível futura crise hídrica, exaurindo a principal reserva estratégica de água.

A principal forma de se evitar o uso excessivo da água subterrânea, é através da gestão e planejamento adequados do uso dos recursos hídricos, permitindo somente a exploração de vazões inferiores a capacidade de renovação dos aquíferos. No entanto, a principal dificuldade encontrada no planejamento e tomadas de decisões está na escassez de informações confiáveis a respeito das próprias características físicas dos mesmos. Segundo Healy & Cook (2002) uma estimativa precisa da recarga

natural dos aquíferos é extremamente importante para a devida gestão dos sistemas subterrâneos, além de fornecerem os subsídios necessários para o aproveitamento racional e sustentável da água subterrânea (MAZIERO & WENDLAND, 2017). Neste contexto, é importante se conhecer qual o comportamento natural do aquífero, quanto a sua capacidade de renovação ou recarga. A partir dela, é possível se estimar a capacidade de exploração máxima que este consegue suportar sem comprometer sua reserva estratégica.

A recarga é, portanto, o processo de renovação da água subterrânea, por meio da percolação da água da zona não-saturada até a zona saturada, contribuindo assim para o reabastecimento do aquífero livre. Este processo, pode ocorrer de forma direta, indireta e até mesmo de forma induzida. A recarga direta pode ser definida como a parcela da precipitação atmosférica que efetivamente alcança a zona saturada, ou seja, durante o processo de infiltração e percolação, parte da água da chuva é perdida por meio de processos de absorção, adsorção, evaporação, transpiração e até mesmo escoamento em subsuperfície, fazendo com que somente uma pequena parcela chegue ao nível d'água subterrâneo (recarga). A recarga indireta corresponde às contribuições de volumes de água oriundas de corpos d'água superficiais, como rios e lagos. Isto ocorre em situações onde há uma conexão hidráulica sob condição influente entre o corpo hídrico e o aquífero ou até mesmo quando ambos estão hidraulicamente desconectados, assim o fluxo da água fica no sentido corpo hídrico/aquífero. Alguns autores, como Hirata et al (2002) Wahnfried & Hirata (2005), defendem que em áreas urbanas o processo de recarga é ainda mais complexo que em áreas rurais, apresentando um maior número de fontes e caminhos, como é o caso das contribuições de fontes antrópicas não-intencionais, como as perdas em redes públicas de água e esgoto, estas são chamadas de recarga induzidas (ANA, 2017). Entre todos os três tipos de recarga, a principal é a recarga direta, a qual é alvo do presente trabalho.

Existem diversos métodos disponíveis para a quantificação da recarga subterrânea, e cada um destes apresentam diferentes complexidades e custos, e suas aplicações dependem principalmente dos dados disponíveis para uso. Para Risser et al. (2005) e Healy & Cook (2002) é altamente recomendável a utilização de mais de um método na estimativa da recarga, no entanto, nem sempre os dados estão disponíveis ou apresentam fácil acesso. Entre os métodos mais conhecidos estão:

- Balanço hídrico ou Water Budget;
- Método da variação dos níveis d'água (VNA) ou Water Table Fluctuation (WTF);
- Equação de Darcy ou Darcy's Law;
- Traçadores ou Tracers;

- Escoamento de base ou Baseflow discharge;
- Modelos numéricos.

A Agência Nacional de Águas (2017) aplicou o método do Escoamento de Base nos estudos hidrogeológicos realizados na Região Metropolitana de Belém entre 2017 e 2018. Este método permite calcular a Recarga Potencial Direta (RPD) de aquíferos livres por meio de dados de vazão e precipitação atmosférica. A recarga natural do aquífero, portanto, pode ser representada pelo escoamento de base médio do curso d'água. Risser et al. (2005), ao comparar vários métodos de estimativa de recarga para bacias no leste do Estados Unidos, verificou que os resultados obtidos são comparáveis ao escoamento básico a longo prazo, e quase sempre, este último fornece as melhores estimativas de recarga anuais. No Brasil, pode-se citar os trabalhos realizados por Mattiuzi (2013) e Maluta (2014), nas bacias do rio Ibicuí/RS e Rio Claro/SP; os autores chegaram a valores entre 13% a 47% e 9,22% a 14,4% respectivamente.

Segundo a ANA (2013), as vazões mínimas de um corpo hídrico são formadas em grande maioria por contribuição de água subterrânea, podendo-se admitir, que em alguns casos, as vazões de referência, como a Q95 e a Q7,10, possam representar esta parcela. Isto indica que, a longo prazo, a Q95 pode ser representativa do escoamento básico do curso d'água. Por este motivo, muitos autores admitem a aproximação da recarga natural com a vazão Q95.

Especificamente, o presente estudo visou a estimativa da recarga potencial direta anual da microbacia hidrográfica do igarapé Uriboquinha/Pau Grande (existe uma duplicidade de informação quanto ao nome do curso d'água), localizado no município de Marituba, Estado do Pará. O objetivo do trabalho é fornecer informações importantes quanto a capacidade de recarga do aquífero com o intuito de servir como base para futuros estudos, além de auxiliar na gestão e planejamento da bacia, fornecendo informações importantes para a sustentabilidade do uso dos recursos hídricos locais. Adicionalmente na mesma região está inserida a Central de Processamento e Tratamento de Resíduos, onde está inserido o Aterro Sanitário que recebe os resíduos sólidos domiciliares da Região Metropolitana de Belém.

2 | MATERIAL E MÉTODOS

Para o presente trabalho utilizou-se a mesma metodologia que foi aplicada por ANA (2017), nos estudos hidrogeológicos realizados na Região Metropolitana de Belém entre 2017 e 2018. Este método permite calcular a Recarga Potencial Direta (RPD) de aquíferos livres por meio de dados de precipitação anual e escoamento de base do rio principal de uma bacia.

Em um primeiro momento foi realizada a caracterização da área da microbacia, para em seguida serem coletados os dados de entrada do modelo. Os dados

necessários foram: precipitação média da área de estudo e valor médio do escoamento do escoamento de base do curso d'água. Os dados de precipitação atmosférica foram coletados do Banco de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). E o escoamento de base foi obtido por meio da regionalização de vazão, através do método da vazão específica, obtida a partir de um curso d'água dentro da mesma região hidrográfica. Este último procedimento foi necessário devido à escassez de dados de vazão do curso d'água, impossibilitando a construção da curva de permanência.

2.1 DADOS DE PRECIPITAÇÃO

Os dados de precipitação foram obtidos a partir do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BMEP) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), para a estação meteorológica convencional de código 82191, localizada em Belém, nas coordenadas Latitude: -1.433333° e Longitude: -48.433333° . Esta estação foi selecionada, devido a sua proximidade com a área de estudo e por apresentar extensão de séries de dados superior a 30 anos, configurando uma boa representatividade para a finalidade do presente estudo. Nela foram obtidos dados mensais de precipitação no período de janeiro de 1962 a julho de 2018. A organização e tratamento estatístico dos dados foram realizados em planilha eletrônica *Microsoft Excel*, obtendo-se a média aritmética da precipitação mensal e anual, durante período supracitado.

2.2 ESCOAMENTO DE BASE DO IGARAPÉ URIBOQUINHA

O escoamento de base é a parcela de contribuição do escoamento superficial de rios e lagos de origem subterrânea. Esta parcela é responsável pela manutenção dos corpos hídricos durante períodos de estiagem. Isto é possível a partir conexão existente entre rio-aquífero. Segundo Martelli (2012), muitos sedimentos próximos à borda de lagos e às margens de rios são altamente permeáveis, assim a água pode infiltrar e/ou percolar facilmente para o sistema aquífero ou vice-versa. Segundo ANA (2017), em alguns rios brasileiros a contribuição da água subterrânea pode representar em média 30% da vazão do rio, podendo atingir até 90% nos períodos de estiagem, como é o caso do rio São Francisco.

Com relação ao escoamento de base do igarapé Uriboquinha, em função da inexistência de estações fluviométricas no curso d'água e a escassez de dados de vazão, fez-se necessária a utilização da regionalização de vazão para uma estimativa inicial da vazão de base do referido igarapé. Para tanto, utilizou-se o método de vazão específica apresentada no **Capítulo 5** para o presente estudo.

2.3 ESTIMATIVA DA RECARGA POTENCIAL DIRETA

Segundo ANA (2013), a Recarga Potencial Direta – RPD é a parcela da precipitação média anual que se infiltra no solo e alcança os aquíferos livres, contribuindo para a renovação da reserva reguladora. Para este método a RPD pode ser obtida a partir da seguinte equação matemática:

$$RPD = C_i \cdot P \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

RPD = recarga potencial direta (m³/s);

C_i = coeficiente de infiltração (%);

P = precipitação média total do período de estudo (m³/s).

A precipitação média em metros cúbicos por segundo é obtida a partir multiplicação da precipitação média anual com a área da microbacia, adotando as conversões necessárias. O coeficiente de infiltração (C_i) utilizado no método representa, em termos percentuais médios, a parcela da chuva que efetivamente irá contribuir para a recarga do aquífero. Deve-se diferencia-lo, portanto, da taxa de infiltração do solo, pois esta última indica somente a parcela da chuva que irá infiltrar, não significando necessariamente que a água chegará ao aquífero. Ao longo do processo de percolação no solo, a água pode ficar retida na zona não-saturada; escoar subsuperficialmente ou até mesmo sofrer evapotranspiração. O coeficiente de infiltração pode ser obtido pela seguinte expressão (ANA, 2017):

$$C_i = \frac{Q_b}{P} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

Q_b = escoamento de base, Q95 (m³/s);

P = precipitação média total anual obtida de séries históricas da bacia hidrográfica (m³/s).

3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

A área de estudo compreende a bacia hidrográfica do igarapé Uriboquinha/Pau Grande até a sua interseção com a PA-483 que dá acesso à Alça Viária. A bacia está localizada no município de Marituba, Região Metropolitana de Belém, e apresenta cerca de 5 km² de área até o exutório considerado. Além disso, o curso d'água está próximo ao Aterro Sanitário de Marituba chegando a cruzar o empreendimento em determinado ponto. Na Figura 1 é apresentado o mapa de localização do igarapé e do exutório considerado no estudo, nela também é possível verificar a proximidade do

curso d'água com o empreendimento. O ponto do exutório foi escolhido devido a sua facilidade de acesso, o que possibilitou o desenvolvimento de outras atividades dentro do projeto, como medições de vazão. A partir da figura é possível verificar também que grande parte da área do Aterro Sanitário está inserida dentro da drenagem do igarapé, o que implica em dizer que quaisquer incidentes, como vazamentos de chorume ou até mesmo eventuais carreamentos de solo, podem afetar diretamente a qualidade da água do mesmo.

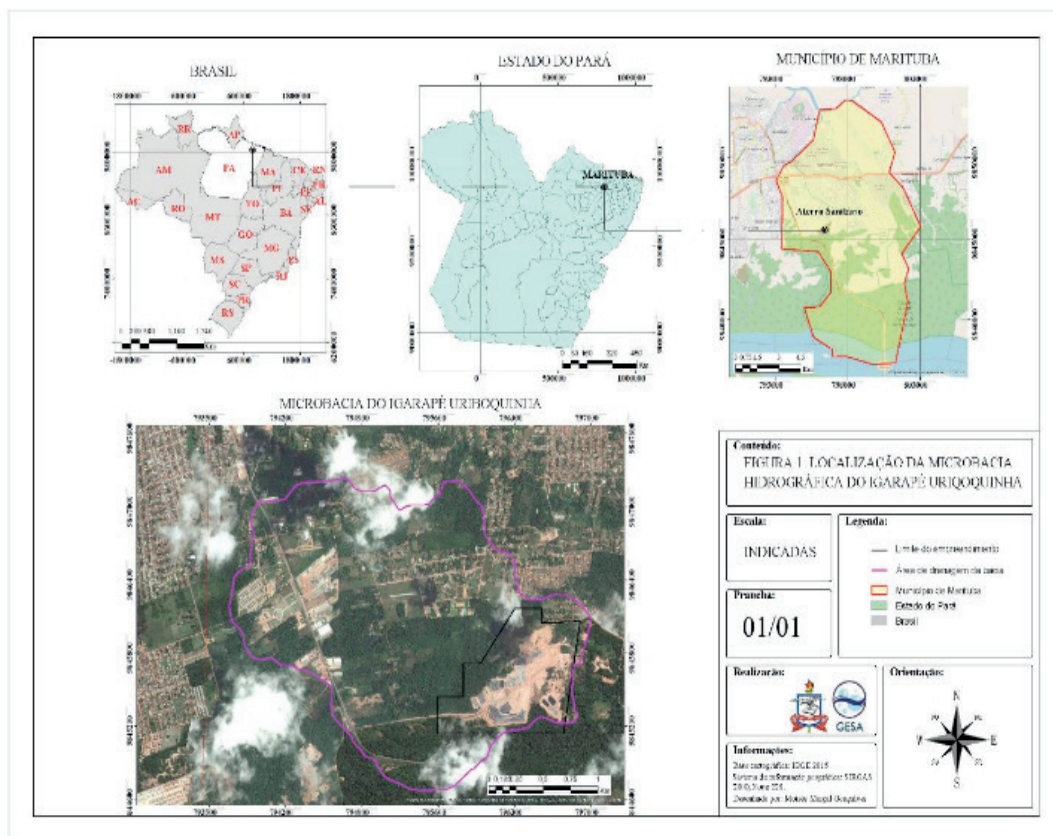


Figura 1. Localização do Igarapé Uriboquinha, Marituba/PA.

Fonte: Autores, 2019.

3.1. Hidrogeologia

Estudos hidrogeológicos realizados pela ANA (2017) na Região Metropolitana de Belém indicam a existência de dois principais sistemas de aquíferos na região, sendo eles: Sistema aquífero Barreiras, composto por rochas reservatório da Formação Barreiras, unidade Pós-Barreiras e sedimentos aluvionares e Sistema aquífero Pirabas, composto pelos aquíferos Pirabas superior e inferior.

Sistema aquífero Barreiras: O primeiro é composto principalmente pela formação barreiras e pós-barreiras. Este último é do tipo poroso, constituído pelos sedimentos da cobertura detrítico laterítica. A água, em alguns casos e dependendo da profundidade, pode não ser potável devido ao alto teor de ferro. A sua recarga se dá diretamente pela precipitação pluviométrica, enquanto que a descarga ocorre

através dos rios, nascentes, evapotranspiração e poços de captação.

O aquífero Barreiras apresenta litotipo heterogêneo, predominando argilitos intercalados com arenitos grosseiros e níveis de lateritos e níveis argilosos caulinizados (CPRM, 2002). Esta camada possui cerca de 59 metros de espessura média e seus aquíferos não permitem grandes vazões, com sua capacidade específica de 2,68 m³/h.m.

Sistema aquífero Pirabas: Segundo estudo realizado pela CPRM (2002), este é formado por dois sistemas aquíferos do tipo multicamadas, que são denominados de Pirabas superior e inferior, respectivamente. O primeiro é caracterizado por sedimentos marinhos, fossilíferos, composto por argila calcífera cinza-esverdeada e leitos de calcário duro cinza-esbranquiçado, que se alternam com camadas de arenito calcífero, siltitos e areias existentes entre as profundidades de 80 a 180 m. O sistema aquífero Pirabas Inferior, constitui-se, predominantemente, de camadas repetitivas de arenitos cinza-esbranquiçado, granulação fina à conglomerática, com intercalações mais espessas de argilas e siltitos esverdeados. De acordo com estudo realizado pela ANA (2017), a mediana da capacidade específica do sistema aquífero é de 13,48 m³/h.m, com espessura média de 186 metros. Este sistema está localizado abaixo de 180 m e se apresentam como excelentes aquíferos, com excelentes vazões e boa potabilidade e teores de ferro baixíssimos ou mesmo ausentes na maioria das vezes.

3.2 Precipitação

Como mencionado anteriormente, em função da ausência de estações meteorológicas no município de Marituba, considerou-se a estação existente em Belém como sendo representativa para a Região Metropolitana, incluindo a área de estudo. No entanto, deve-se ressaltar que o ideal seria a utilização de no mínimo três estações próximas, para a utilização de técnicas para o cálculo da chuva média na bacia, como por exemplo, método das isoietas ou polígono de Thiessen. Na **Tabela 1** é apresentado o resultado do tratamento estatístico dos dados coletados na estação 82191 para uma série histórica de 56 anos.

Meses	Precipitação média (mm)
Janeiro	385
Fevereiro	425
Março	464
Abril	408
Maio	305
Junho	182
Julho	156
Agosto	128
Setembro	128
Outubro	122

Novembro	122
Dezembro	246
Média mensal	255,8
Média anual	3070

Tabela 1. Precipitação média anual da Região Metropolitana de Belém (série histórica de Jan/1962 a Jul/2018)

Fonte: Adaptado da base de dados INMET (2018)

A partir da **Tabela 1** é possível verificar que o mês de março é o mês com maior precipitação, com altura de 464 mm/mês, enquanto que outubro e novembro são os meses com menores alturas pluviométricas, com 122 mm/mês cada.

Na **Figura 2** é possível identificar o período chuvoso e o seco a partir da média mensal da série histórica de janeiro de 1962 a julho de 2018. Sendo o primeiro período composto pelos meses de janeiro a maio e o segundo de junho a dezembro.

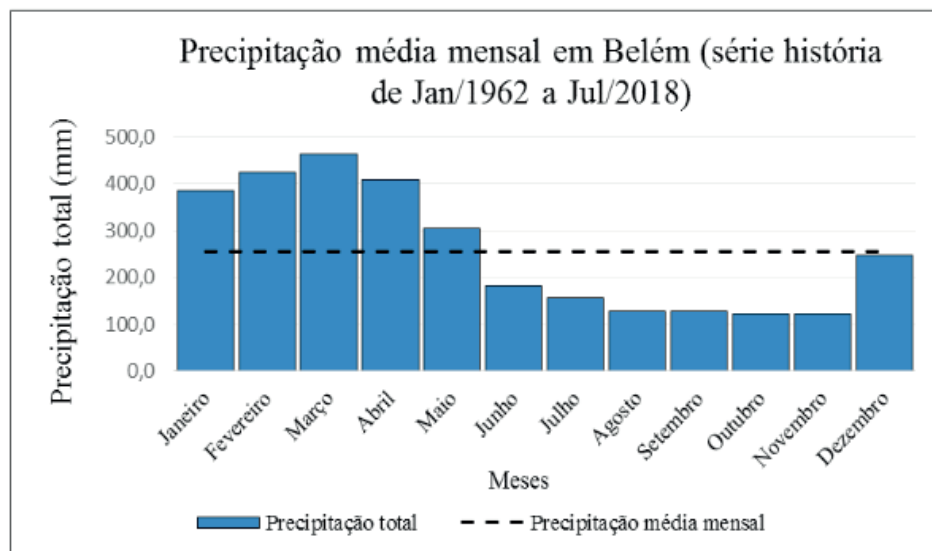


Figura 2. Precipitações médias mensais no município de Belém/PA

Fonte: Autores, 2019.

3.3 Escoamento de base

A estação fluviométrica utilizada como referência para a estimativa inicial do escoamento básico do igarapé Uriboquinha/Pau Grande foi a Porto de Minas cujos dados são apresentados na **Tabela 1** do Capítulo 5. Ao todo foram utilizados 1017 dados diários de vazão ao longo dos mais de dois anos de funcionamento da mesma. A estação monitorava o rio Carapucu localizado no município de Santa Isabel do Pará.

Após tratamento estatístico dos dados, construiu-se a curva de permanência (**Figura 3**) do rio para a obtenção da vazão de referência. Em seguida, dividiu-se a mesma pela área de drenagem do rio até o ponto de monitoramento, para a obtenção da vazão específica.

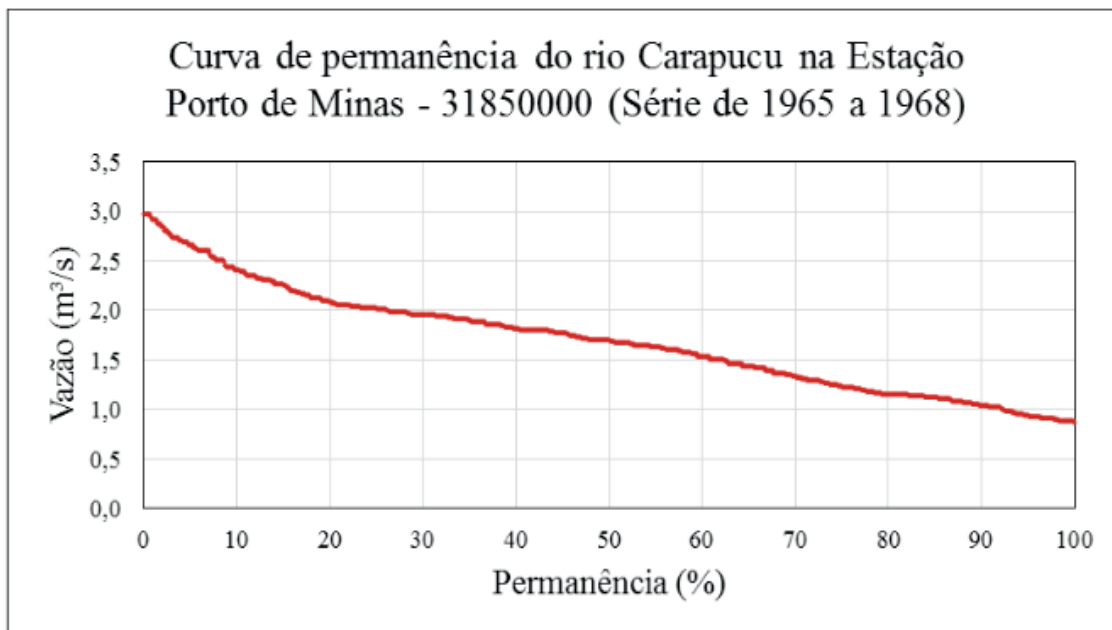


Figura 3. Curva de permanência do rio Carapucu, Santa Isabel/PA

Fonte: Autores, 2019.

A vazão específica obtida no presente estudo, mostrou-se coerente com o valor apresentado pela ANA (2009, p. 192) para Unidade de Planejamento Acará-Guamá, onde igarapé Uriboquinha está inserido. Segundo o estudo, a vazão específica estimada no período de estiagem para a Unidade de Planejamento foi de 5,59 L/s.km², valor este muito próximo do obtido no rio Carapucu, com valor de 5,80 L/s.km².

Com relação a curva de permanência apresentada na **Figura 3**, verificou-se que a mesma apresenta uma baixa inclinação, o que indica que a bacia possui uma boa regularização natural e grande influência de contribuições subterrâneas, ou seja, uma boa parcela da vazão do rio é de origem subterrânea, além de apresentar boa resposta a cheias naturais.

Obteve-se o escoamento de base, utilizando a vazão específica de 5,80 L/s.km² e a área de drenagem do Igarapé Uriboquinha/Pau Grande de 5,0 km²:

$$Q_b = 5,80 \frac{L}{s.km^2} \cdot 5,0 km^2 = 29,0 \frac{L}{s} \quad (\text{Equação 3})$$

3.4 Recarga Potencial Direta - RPD

A partir do escoamento básico (Q_b), foi possível estimar o valor do coeficiente de infiltração (C_i) médio, utilizado no cálculo da recarga potencial direta. A precipitação média anual precisou ser convertida de milímetro por ano para metros cúbicos por segundo. A conversão foi realizada pela equação a seguir:

$$P \left(\frac{m^3}{s} \right) = P \left(\frac{m}{ano} \right) \times A \left(m^2 \right) \times \frac{1 \text{ ano}}{31536000 \text{ s}} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

A = Área da bacia hidrográfica do igarapé Uriboquinha.

$$P = 3,07 \frac{m}{ano} \times 5 \times 10^6 \text{ m}^2 \times \frac{1 \text{ ano}}{31536000 \text{ s}} = 0,487 \text{ m}^3/\text{s} \quad (\text{Equação 5})$$

$$Ci = \frac{0,029 \text{ m}^3/\text{s}}{0,487 \text{ m}^3/\text{s}} = 0,06 \text{ ou } 6,0 \% \quad (\text{Equação 6})$$

Em seguida, substituindo o valor na **Equação 1**, tem-se:

$$RPD = 0,06 \times \frac{P \times A}{31536000 \times 1000} \quad (\text{Equação 7})$$

Onde:

RPD = Recarga potencial direta (m³/s);

P = Precipitação média (mm);

A = Área da bacia hidrográfica (m²).

$$RPD = 0,06 \times \frac{P \times 5 \times 10^6}{31536000 \times 1000} \quad (\text{Equação 8})$$

$$RPD = 0,06 \times \frac{P}{6307,2} \quad (\text{Equação 9})$$

A partir da **Equação 9**, é possível estimar a Recarga Potencial Direta anual na bacia desejada.

Ano	Área (km ²)	P. média Total (mm)	Eb = Q95 (m ³ /s)	Ci (%)	RPD (m ³ /s)
2017	5,00	3564	0,029	6	0,034
2018*	5,00	2654	0,029	6	0,025

Tabela 2. Precipitação média anual, escoamento de base, coeficiente de infiltração e Recarga Potencial Direta estimados para a bacia do igarapé Uriboquinha para os anos de 2017 e 2018

Fonte: Autores, 2019.

Legenda: * O cálculo da recarga foi estimado no período de janeiro até julho.

A partir do método apresentado pela Agência Nacional de Águas (ANA, 2017), estima-se que em 2017 houve uma recarga de 0,034 m³/s ou 214 mm, o equivalente

a 6 % da precipitação do mesmo período, e de janeiro a julho de 2018 estima-se que a recarga foi de 0,025 m³/s.

Os resultados apresentados na **Tabela 2** indicam que apenas 6% da precipitação anual é efetivamente incorporada às reservas aquíferas reguladoras, e que 94% são convertidos em: escoamento superficial e subsuperficial; humidade do solo; evaporação ou transpiração devido vegetação. O valor obtido é considerado baixo em comparação aos encontrados na literatura pertinente. Mattiuzi (2013) e Maluta (2014), nas bacias do rio Ibicuí/RS e rio Claro/SP; chegaram a valores entre 13% a 47% e 9,22% a 14,4% respectivamente. Outros trabalhos como Barreto (2006) e Gomes (2008) apresentaram recarga de 29% a 31% e 14% a 38% respectivamente, utilizando o método da variação dos níveis d'água.

Este fato pode estar relacionado a utilização de muitos dados de entrada estimados para a bacia de estudo, devido à escassez de informações. Além disso, o método também possui muitas imprecisões, como por exemplo, assumir que a vazão do curso d'água seja representativa do escoamento de base. A regionalização da vazão utilizada no trabalho também incrementa erros na estimativa, no entanto, os resultados apresentaram coerência com os estudos realizados pela ANA (2017) para a mesma região. O procedimento ideal seria analisar o hidrograma da bacia para a separação do escoamento de base e do escoamento direto, por meio de técnicas adequadas.

Uma limitação do modelo é quanto a sua utilização, sendo indicado somente para estimativas anuais da recarga, diferente de outros modelos como o VNA e Balanço Hídrico que podem fornecer resultados mensais. Além do mais, os resultados obtidos podem estar sendo subestimados, devido desconsiderarem outros componentes do ciclo hidrológico, como evapotranspiração, variação do armazenamento em subsuperfície, recarga profunda, circulação lateral.

Na literatura pertinente é comumente recomendado que a estimativa da recarga seja feita por meio da comparação dos resultados de diferentes métodos (RISSER et al, 2005; HEALEY & COOK, 2002). No entanto, este procedimento muitas vezes não é possível devido à escassez de dados de entrada confiáveis.

4 | CONCLUSÕES

Uma das grandes dificuldades encontradas na gestão e planejamento do uso dos recursos hídricos na Amazônia, está na escassez de informações confiáveis e que auxiliem na tomada de decisões. Com relação a gestão das águas subterrâneas, é de fundamental importância o conhecimento da capacidade máxima de exploração que um determinado aquífero tem, visando o estabelecimento de valores limites de exploração, para o uso sustentável do recurso. A recarga natural é uma importante ferramenta que deve ser utilizada na gestão dos recursos hídricos subterrâneos, e é em cima dela que são estabelecidas as vazões sustentáveis.

Após o estudo da recarga natural da bacia hidrográfica do igarapé Uriboquina,

verificou-se, por meio do método utilizado pela Agência Nacional de Águas, que cerca de 6% da precipitação anual contribui diretamente para a recarga do aquífero livre. Em termos percentuais, 6% está abaixo do valor usualmente encontrado na literatura, o qual gira entorno de 9 a 30% em média. No entanto, em comparação com o resultado apresentado pelo estudo realizado pela ANA (2017) na Região Metropolitana de Belém, os valores obtidos mostraram-se coerentes. Em valores absolutos, a recarga estimada para o ano de 2017 foi de 214 mm/ano e para o período de janeiro a julho de 2018 de 159 mm, o equivalente a uma vazão de 34 e 25 L/s respectivamente.

O método utilizado, em comparação aos demais disponíveis, apresentou dados de entrada mais acessíveis, e que apesar de serem simples, precisaram ser estimados para a bacia de estudo, devido à escassez de informações. Deve-se ressaltar também, que a regionalização de vazão e a coleta de dados de precipitação da estação em Belém incrementaram erros aos resultados, mas que para os objetivos propostos mostraram satisfatórios. Além disso, o método é indicado para estimativas anuais, sendo limitado para estimativas mensais.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a utilização de novos métodos para a comparação dos resultados, como o método da variação dos níveis d'água e balanço hídrico, assim as estimativas de recarga apresentarão maior consistência e confiabilidade.

REFERÊNCIAS

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. 2009. **Plano estratégico de recursos hídricos da bacia hidrográfica dos rios Tocantins e Araguaia**. Relatório Síntese/Agência Nacional de Águas – Brasília, DF.

_____. 2009. **Inventário das estações fluviométricas** – 2 ed. Brasília: ANA; SGH, 2009.

_____. 2013. **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil**. Brasil. ANA. 432 p.

_____. 2017. **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil: relatório pleno**. ANA. Brasília: ANA, 2017. 117 p.

_____. 2017. **Estudos Hidrogeológicos para a Definição de Estratégias de Gestão das Águas Subterrâneas da Cidade de Belém/PA e Municípios Adjacentes**. Relatório Parcial RP 06. Brasília, DF. 112 p. No Prelo.

CPRM – COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. 2002. **Projeto estudos Hidrogeológicos da Região Metropolitana de Belém e adjacências**. Disponível em: < http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/10744/1/rel_hidro_belem_adj2002.pdf > Acesso em 15 ago 2018.

CRH – Conselho Estadual de Recursos Hídricos. 1999. **Relatório de situação dos recursos hídricos do Estado de São Paulo**. Comitê Coordenador do Plano Estadual de Recursos Hídricos, 128 p.

MARTELLI, G. V. **Monitoramento da flutuação dos níveis de água em aquíferos freáticos para avaliação do potencial de recarga em área de afloramento do sistema aquífero Guarani em Cacequi - RS**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, Santa Maria, 2012.

MALUTA, M. C. **Estimativa da recarga natural do aquífero Rio Claro: uma abordagem da regionalização hidrológica através da vazão de permanência**. Dissertação (Mestrado em geociências e meio ambiente), Universidade Estadual Paulista – UNESP, Rio Claro, 2014.

MATTIUZI, C. D. P. **Estimativa de recarga a partir da separação de escoamento de base na bacia hidrográfica do Rio Ibicuí/RS**. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia ambiental), Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, 2013.

MAZIERO, T. A.; WENDLAND, E. Variabilidade Espacial da Recarga em Área Urbana. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Volume 12, Número 3, Jul/Set 2008. p. 35- 46.

RISSER, D. W.; GBUREK, W. J.; FOLMAR, G. J. **Comparison of methods for estimating ground-water recharge and base flow at a small watershed underlain by fractured bedrock in the eastern United States**: U.S. Geological Survey Scientific Investigation Report, 2005. 35 p.

WAHNFRIED, I.; HIRATA, R. Comparação de Métodos de Estimativa de Recarga de Aquíferos em uma Planície Aluvionar na Bacia Hidrográfica do Alto Tietê (São Paulo). **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Volume 10, Número 2, Abr/Jun 2005. p.15- 25.

PROPOSTA DE ALTERNATIVA PARA ESTIMAR O TEMPO DE REMEDIAÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS CONTAMINADAS POR BTEX

Giovanni Chaves Penner

Universidade Federal do Pará, curso de Engenharia Sanitária e Ambiental
Belém – Pará

Daniel Locoselli Garcez

Biólogo pela Universidade Estadual Paulista, Mestre em Geociências e Meio Ambiente pela Universidade Estadual Paulista, Consultor
São Carlos – SP

Hélio da Silva Almeida

Universidade Federal do Pará, curso de Engenharia Sanitária e Ambiental
Belém – Pará

André Luiz da Silva Salgado Coelho

Universidade Federal do Pará, curso de Engenharia Sanitária e Ambiental
Belém – Pará

Neyson Martins Mendonça

Universidade Federal do Pará, curso de Engenharia Sanitária e Ambiental
Belém – Pará

RESUMO: O desenvolvimento da economia brasileira aliado à ausência do entendimento e aplicação de procedimentos de gestão ambiental propiciou um imenso número de áreas impactadas por substâncias tóxicas à saúde humana e ao meio ambiente. Neste contexto, o gerenciamento de sítios contaminados tem sido objeto de estudo e desenvolvimento de legislações por parte dos órgãos ambientais, sendo a etapa de remediação de uma área contaminada um momento decisivo para

recuperação da qualidade ambiental. Neste trabalho são apresentados os resultados da remediação de uma área onde foi constatada fase livre de gasolina e uma extensa pluma de fase dissolvida de compostos orgânicos aromáticos. Os dados de monitoramento da água subterrânea permitiram elaborar uma forma de estimar o tempo para o encerramento da remediação. Neste caso, em função da tendência dos dados, partiu-se de um modelo exponencial usando o método dos mínimos quadrados e um algoritmo de minimização sendo obtidos os valores para os parâmetros de ajuste. Com o modelo exponencial ajustado aos dados fez-se a projeção das concentrações até que fosse atingida a meta de remediação. Os resultados permitiram estimar o tempo necessário para o término de remediação e o início do monitoramento para encerramento do caso.

PALAVRAS-CHAVE: Gerenciamento de Áreas Contaminadas, Encerramento da Remediação, Benzeno em Água Subterrânea.

ABSTRACT: The development of the Brazilian economy added to the lack of understanding and application of management procedures provided a wide number of impacted areas by toxic substances to the human health and the environment, which are known as environmental liabilities. Thus, the management of contaminated sites has been the aim of the researches and development of laws by

the environmental agencies. The remediation of a contaminated area is the turning-point to restoration of environmental quality. In this study are presented the results of remediation of a contaminated area with phase liquid of gasoline and a wide plume of dissolved phase of aromatic organic compounds. The data concerning to the groundwater monitoring enabled to develop a method to estimate the time for closure of remediation. In this case, according to the trend data, it was applied an exponential model using the method of least squares and a minimization algorithm to obtain the values for the parameters of adjustment. After this adjustment, it was predicted the concentrations until it was achieved the goal of remediation. The results enabled to establish the necessary time for the end of remediation and the beginning of monitoring for the case closure.

KEYWORDS: Management of Contaminated Sites, Remediation Closure, Benzene in Groundwater.

1 | INTRODUÇÃO

No Brasil, o desenvolvimento do setor industrial e de serviços, ocorrido principalmente em uma época anterior a aplicação da gestão ambiental, quando não eram adotadas medidas preventivas, implicou no aumento do número de áreas impactadas por diversos contaminantes. Ênfase é dada ao estado de São Paulo, pela industrialização ocorrida nas décadas de 1950 e 1960, culminando hoje em grande especulação imobiliária, por áreas que eram unicamente industriais e passaram a ser residenciais.

Neste contexto, o desconhecimento ou descaso em relação aos impactos ambientais oriundos dos processos produtivos, incluindo a incorreta gestão da matéria prima e falta de gestão dos resíduos gerados, contribuiu significativamente para geração de áreas contendo compostos e substâncias tóxicas à saúde humana e ao ambiente (GUERRA; ARAUJO; ALMEIDA, 2010). Tal fato se aplica também as atividades agrárias, ao setor de resíduos e de serviços, tendo destaque neste setor os postos e sistemas retalhistas de combustíveis.

Segundo o Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas, publicado pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2001), uma área contaminada (AC) é definida como uma área onde foi comprovada a existência de poluição, oriunda de substâncias ou resíduos que nela tenham sido dispostos, gerando impactos negativos sobre o meio. Em 2007, a CETESB publicou a Decisão de Diretoria nº 103/2007/C/E, a qual revia o conceito de área contaminada, dando ênfase ao efetivo risco à saúde humana oriundo da contaminação presente na área. Assim, na D.D. nº 103, o termo é definido como área com presença de compostos ou substâncias em condições que causem, ou possam causar, danos à saúde humana (CETESB, 2007).

A questão da contaminação do solo e da água subterrânea tem sido objeto de grande discussão, tanto em âmbito federal, no Conselho Nacional de Meio Ambiente

(CONAMA), com publicação da Resolução CONAMA nº 420/2009, que trata do gerenciamento ambiental de áreas contaminadas, quanto em âmbito estadual, em razão da Lei Estadual nº13.577/2009, que dispõe sobre os procedimentos para a proteção da qualidade do solo e gerenciamento de áreas contaminadas.

Desta forma, observa-se que no Brasil a questão da contaminação do solo e das águas subterrâneas e o gerenciamento de sítios contaminados, tem sido objeto de estudo e desenvolvimento de legislações por parte dos órgãos ambientais, embora a cerca de poucas décadas.

Com efeito, durante o processo de gerenciamento do risco de um sítio que esteja contaminado, a remediação surge como alternativa para remoção da massa de contaminante, isto é, a minimização da concentração do contaminante no meio afetado (SHARMA e REDDY, 2004). A remediação consiste na aplicação de técnicas isoladas ou em conjunto, que possibilitem a remoção da massa de contaminante até que sejam obtidos níveis de risco que sejam aceitáveis ao uso e ocupação da área (KAHN; HUSAIN; HEJAZI, 2004). Estes níveis ou limites são definidos através de estudos de avaliação de risco à saúde humana, considerando os cenários de exposição para os receptores humanos, quer sejam estes cenários reais ou potenciais.

Durante a etapa de remediação, a área contaminada deve ser monitorada no tocante ao compartimento ambiental impactado, com o objetivo de verificar a eficiência e eficácia do método de remediação aplicado (RAST, 1997). Em casos de o compartimento remediado ser a água subterrânea, sendo está o escopo deste trabalho, o monitoramento deve ser realizado através da coleta e análise da água, para as substâncias químicas de interesse (SQIs).

Uma vez iniciada a remediação, emerge a necessidade de estimar o tempo necessário para que as metas de remediação sejam atendidas e, com isso, conduzir o sítio contaminado ao estágio de monitoramento para encerramento. Assim que o monitoramento da remediação indique que as concentrações das SQIs permanecem abaixo das metas de remediação, deve ser iniciado o encerramento da remediação (CETESB, 2007).

Considerando que o prazo máximo definido pela CETESB -para o gerenciamento de uma área contaminada é de 5 anos, após a confirmação da existência de contaminação através da etapa de investigação confirmatória, a estimativa do tempo de remediação é de extrema importância para as correções e adequações necessárias no projeto e método de remediação selecionado. Há de se destacar que os custos envolvidos no processo de remediação são elevados, e a estimativa do tempo de remediação permite aos envolvidos no gerenciamento do sítio planejarem ações conjuntas para a redução do tempo de remediação e custos envolvidos.

Este trabalho discute e aplica uma forma para se estimar o tempo necessário para que as metas de remediação sejam atendidas, através de ajuste de linha de tendência aos dados de concentração de um ponto de conformidade.

2 | MATERIAL E MÉTODOS

Neste trabalho são abordados os resultados da remediação de um Posto de Revenda de Combustíveis, localizado na cidade de Ribeirão Pires, onde foi constatada a presença de fase livre de gasolina em 02 poços de monitoramento de água subterrânea. A pluma de fase livre contribuiu para a formação de uma extensa pluma de fase dissolvida dos compostos orgânicos aromáticos Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xilenos (BTEX), sendo a pluma de fase dissolvida de Benzeno a mais extensa.

Conforme o modelo de gerenciamento de áreas contaminadas para o estado de São Paulo, para definição das metas de remediação da área de estudo, foi realizada uma avaliação de riscos à saúde humana. Tal avaliação considerou os modelos de risco e fluxo de transporte, os princípios de toxicologia humana, o comportamento dos contaminantes nos meios afetados e suas características físico-químicas. Foi calculada uma meta de remediação para o cenário hipotético mais restritivo (cenário ingestão de água subterrânea), sendo este valor aprovado pela CETESB à época dos estudos. Os resultados obtidos indicaram uma meta de remediação de 310,00µg/L para o composto Benzeno, no poço de monitoramento de água subterrânea PM-22. Destaca-se que a utilização de tal procedimento se deve ao fato dos estudos ambientais ocorridos na área serem anteriores à publicação da Decisão de Diretoria 263/2009/P da CETESB, a qual define as concentrações máximas aceitáveis (metas de remediação), exclusivamente para as áreas contaminadas de postos e sistemas retalhistas de combustíveis.

Dado o cenário de contaminação da área, em agosto de 2008 foi instalado um sistema de remediação por Extração Multifásica (Multi-Phase Extraction - MPE), como ação emergencial. O sistema foi interligado aos poços de monitoramento: 03,15, 17, 18, 19 e 24.

Durante o processo de remediação do referido Posto de Revenda de Combustíveis, foi realizado o monitoramento da eficiência e eficácia da remediação, contando com a amostragem e análise da água subterrânea para as substâncias químicas de interesse (SQIs), dentre estas o grupo BTEX. Este tipo de monitoramento também permite verificar quando as metas de remediação estabelecidas para o caso foram atingidas, e assim quando o sistema de remediação poderá ser desativado e iniciado o monitoramento para encerramento. No entanto, o simples monitoramento das concentrações das SQIs em água subterrânea, não permite estimar qual será a duração do tempo de remediação.

Pelo exposto, foram ajustados os dados de monitoramento do ponto de conformidade (PM-22), possibilitando assim estabelecer uma previsão do tempo de remediação para o sítio em questão. Segundo Chapra (1997) e Mihelcic (1999), diversas reações ou eventos na área ambiental podem ser descritos por reações de ordem zero, um ou dois. Todavia são muito frequentes as reações de primeira

ordem, sendo caracterizada por uma função exponencial.

Para o modelo de primeira ordem ($n = 1$), a equação a ser integrada é a seguinte:

$$\frac{dc}{dt} = -k \cdot c \quad (1)$$

Onde k possui unidade em $1/T$.

Se $c = c_0$ em $t = 0$, a equação pode ser integrada pela separação das variáveis fornecendo:

$$\ln c - \ln c_0 = -k \cdot t \quad (2)$$

Empregando a exponencial em ambos os lados se obtêm:

$$c = c_0 \cdot e^{-k \cdot t} \quad (3)$$

A análise da Eq. 3, sugere que este modelo especifica uma taxa de redução exponencial; isto é, a concentração decai em função do tempo, aproximando-se assintoticamente do valor zero.

O Método dos Mínimos Quadrados é amplamente utilizado para a solução deste tipo de equação. Nesta abordagem, são sugeridos valores iniciais para os parâmetros (c_0 e k) e a Eq. 3 é resolvida para $c(t)$. Então, a solução é resolvida numericamente. A solução consiste de uma tabela de concentrações medidas com correspondentes concentrações calculadas. Deve ser calculada a soma dos quadrados dos resíduos entre as concentrações medidas e previstas. Os valores supostos para c_0 e k são ajustados até ser atingido um mínimo ou uma condição de mínimos quadrados. Isto pode ser feito por tentativa e erro. Entretanto, (softwares de uso comum) ferramentas de programas para computadores modernos, tais como planilhas eletrônicas, possuem algoritmos não lineares de aperfeiçoamento que fornecem uma maneira automática para realizar a mesma função, como a ferramenta Solver do Excel. Os valores finais dos parâmetros c_0 e k representam o melhor ajuste correspondente aos dados.

3 | RESULTADOS

Os registros históricos, da área objeto de estudo, revelaram a presença de produto em fase livre, com características de gasolina, nos poços de monitoramento PM-15 e PM-17, e plumas de BTEX abrangentes. Na região do Posto de Combustíveis ocorre um aquífero livre raso, com uma profundidade média de 1,66 m, obtida através das medições do nível d'água estático realizadas entre agosto de 2008 e setembro

de 2010. À exceção dos poços interligados ao sistema de remediação PM-17, PM-19 e PM-24, à época das medições do nível d'água, os demais poços de monitoramento apresentaram comportamento homogêneo, com rebaixamento do aquífero na estação seca e posterior recuperação no período chuvoso. Já os poços ligados ao sistema apresentaram comportamento divergente devido à extração realizada pelo sistema. Contudo, após a interrupção no processo de extração destes poços, foi constatada a normalização do nível d'água estático do aquífero.

O escoamento da água subterrânea na área de estudo segue orientado entre as direções sudoeste (SO) para nordeste (NE) e sul (S) para norte (N), conforme exibido no mapa potenciométrico (Figura 1), referente ao monitoramento de setembro de 2010.

As porcentagens de redução das concentrações das SQIs Benzeno, Etilbenzeno, Tolueno e Xilenos, presentes na água subterrânea, são exibidas nas Figuras 2-a a 5-b. Os dados apresentados referem-se à primeira amostragem realizada após a instalação do sistema de remediação MPE, em janeiro de 2009, e da amostragem realizada após 19 meses de operação do sistema, em agosto de 2010.

Os resultados apresentados apontam reduções significativas das concentrações de Benzeno, Etilbenzeno, Tolueno e Xilenos, no decorrer da operação sistema de remediação. Os compostos que não foram detectados nos dois monitoramentos, não são ilustrados nas figuras. A concentração de Tolueno no PM-24 aumentou no segundo monitoramento e, assim, também não é ilustrada nas figuras.

No intervalo de tempo avaliado (19 meses), foram observadas reduções nas concentrações de Benzeno de até 100% (PM-17 e 18), ou seja, abaixo do limite de detecção do método analítico ($1 \mu\text{g/L}$). Entretanto, não houve a completa remoção deste composto nos demais poços de monitoramento avaliados. Para os compostos Tolueno, Etilbenzeno e Xilenos, o mesmo comportamento foi observado, com redução das concentrações destes compostos variando de 11 até 100%.

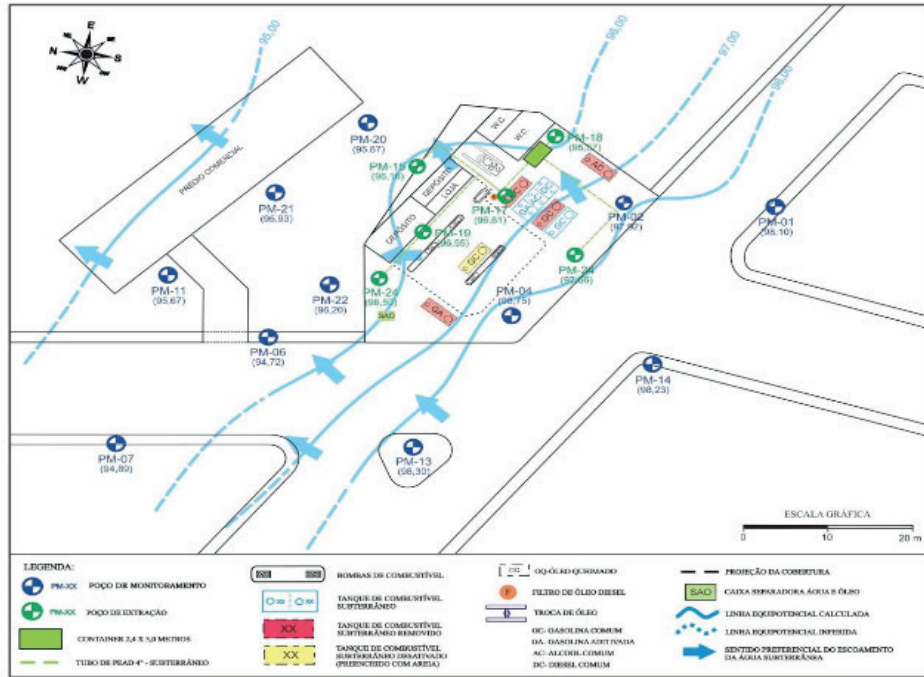


Figura 1 – Mapa potenciométrico referente ao monitoramento de setembro de 2010.

Assim, apesar da evidente redução das concentrações dos compostos BTEX, em especial o Benzeno, tais informações não permitem prever até quando a remediação deve ser mantida para que as metas de remediação sejam atendidas.

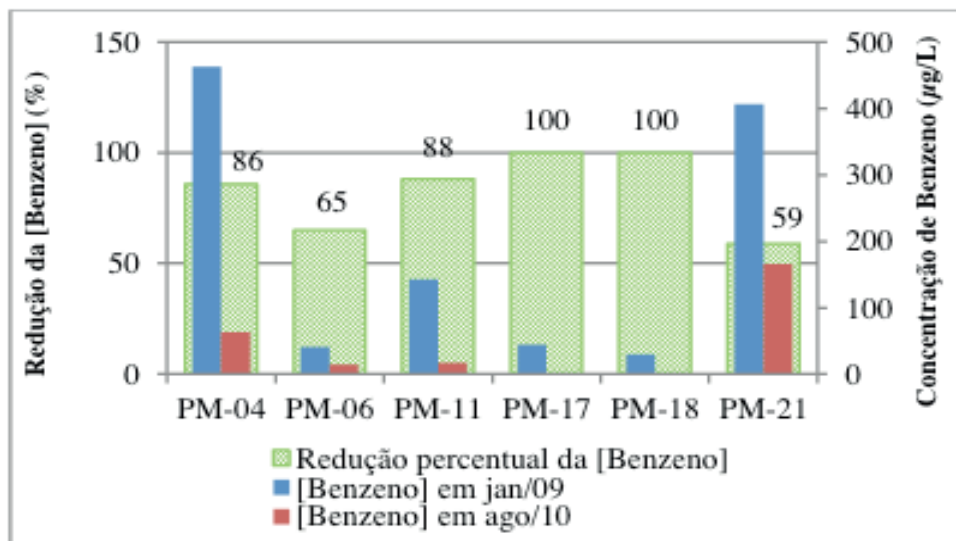


Figura 2-a. Variação das concentrações de Benzeno (jan-2009 e ago-2010).

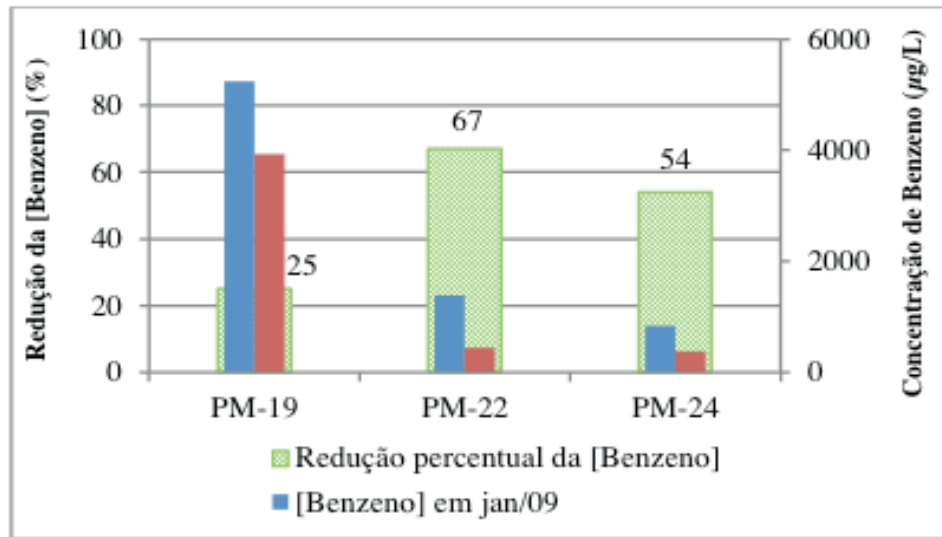


Figura 2-b. Variação das concentrações de Benzeno (jan-2009 e ago-2010).

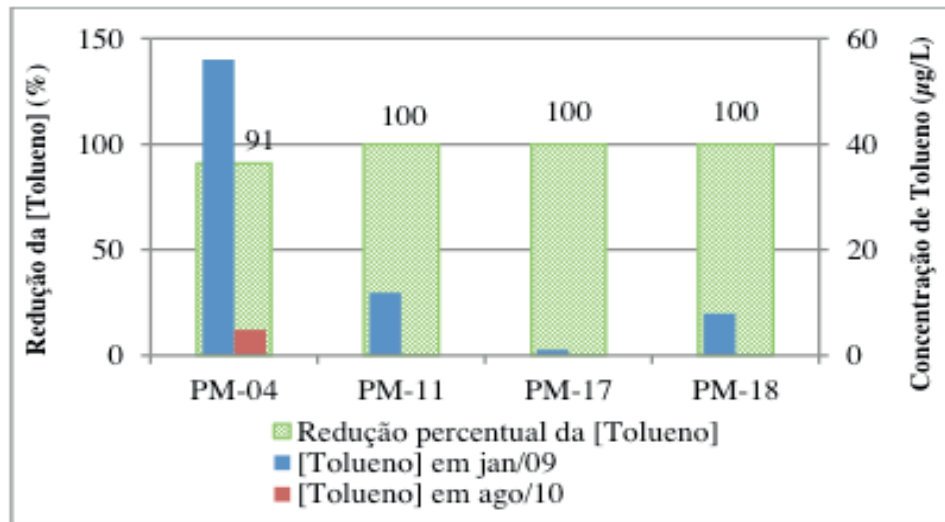


Figura 3-a. Variação das concentrações de Tolueno (jan-2009 e ago-2010).

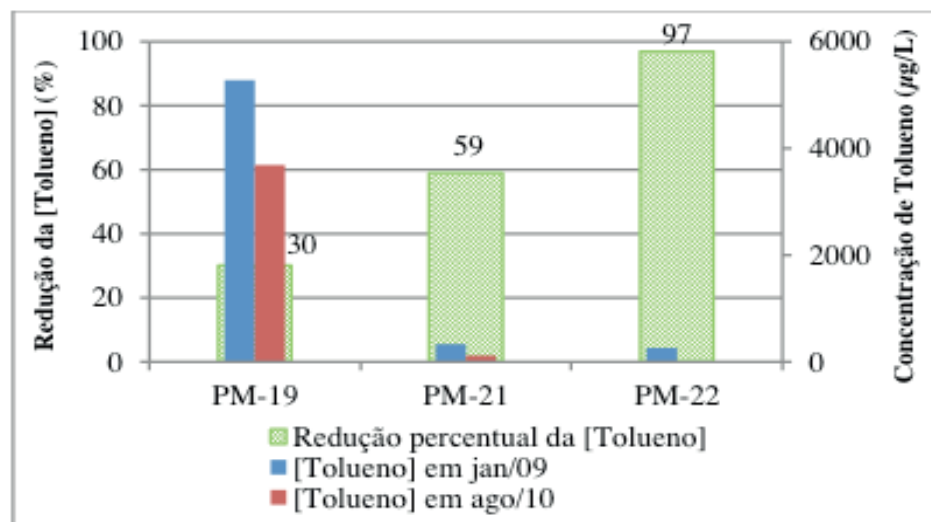


Figura 3-b. Variação das concentrações de Tolueno (jan-2009 e ago-2010).

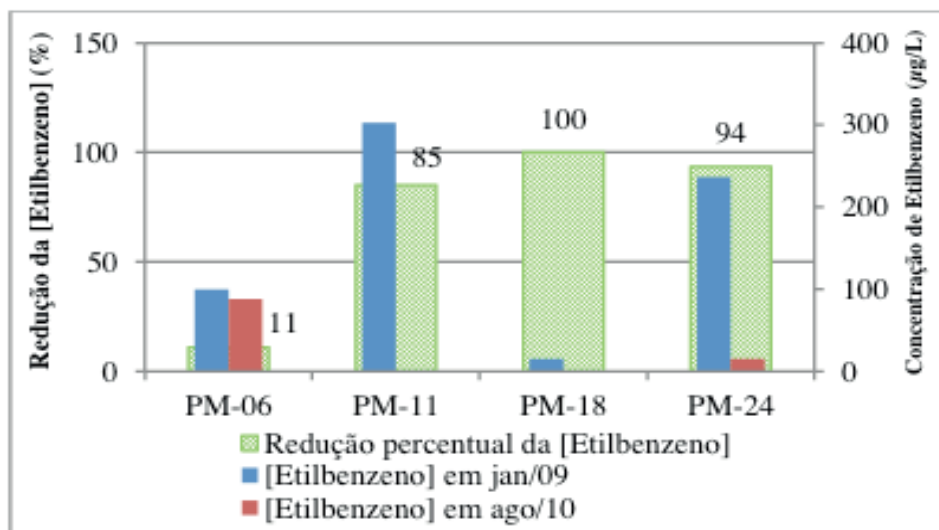


Figura 4-a. Variação das concentrações de Etilbenzeno (jan-2009 e ago-2010).

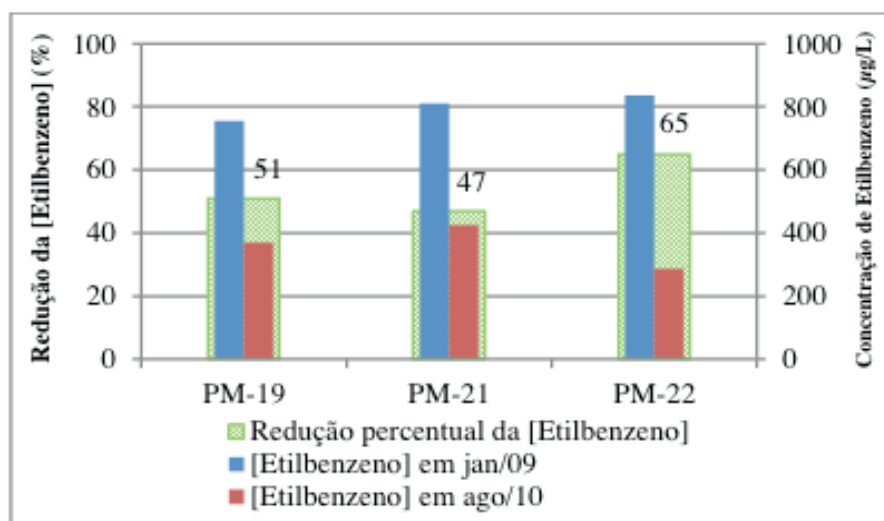


Figura 4-b. Variação das concentrações de Etilbenzeno (jan-2009 e ago-2010).

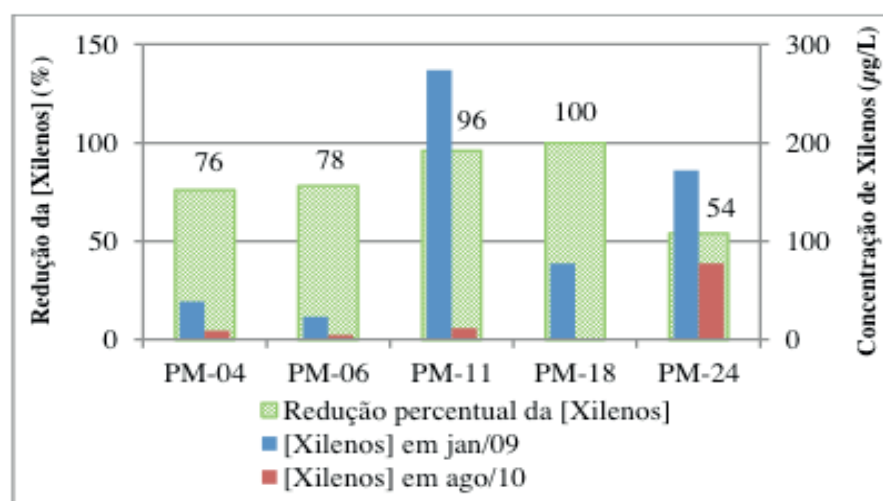


Figura 5-a. Variação das concentrações de Xilenos (jan-2009 e ago-2010).

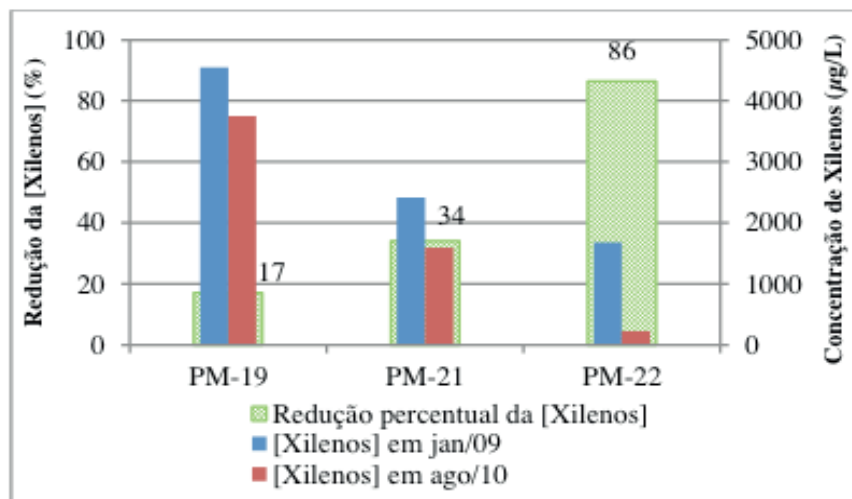


Figura 5-b. Variação das concentrações de Xilenos (jan-2009 e ago-2010).

4 | RESULTADOS

De modo a se fazer uma estimativa do tempo necessário para a completa remediação da área, foi realizada uma previsão do tempo necessário, para que as concentrações de Benzeno existentes na área atinjam a meta de remediação preteritamente definida ($310 \mu\text{g/L}$). Para tanto, foram utilizados os resultados analíticos obtidos para o PM-22. Os dados obtidos neste ponto sugeriram um decaimento exponencial das concentrações de Benzeno na área. Desta maneira, aplicou-se um ajuste exponencial aos dados, conforme Figura 6.

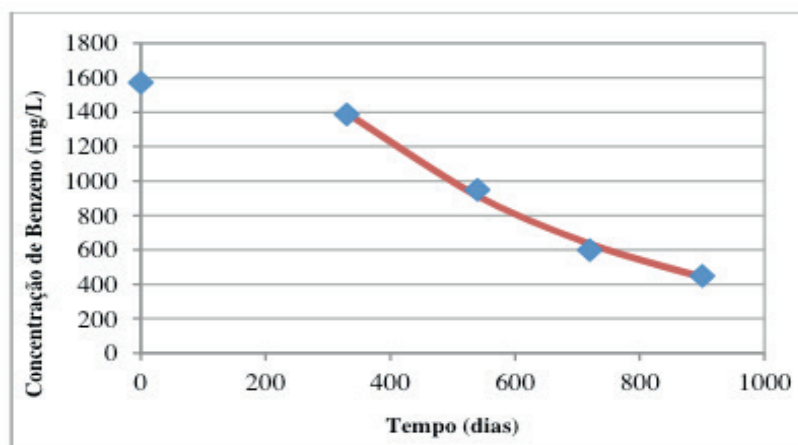


Figura 6 – Curva ajustada da redução das concentrações de Benzeno no PM-22.

Nota: (\blacklozenge) Concentrações de Benzeno quantificadas em água subterrânea; (—) Redução das concentrações de Benzeno – modelo exponencial.

Pela análise do gráfico da Figura 6, observa-se uma tendência de redução das concentrações, seguindo um decaimento exponencial a partir da segunda concentração medida. A primeira concentração medida foi desconsiderada porque se refere a fevereiro de 2008, isto é, antes do início da operação do sistema de remediação. Neste caso, usando o método dos mínimos quadrados e ferramenta

Solver do Excel como algoritmo de minimização, foram obtidos os valores para os parâmetros do modelo exponencial. Para a concentração inicial (C_0) foi obtido um valor de $2719,2 \mu\text{g/L}$, e para a constante de decaimento exponencial (k), o valor foi $0,002022 \text{ dia}^{-1}$. Desta maneira, obteve-se a curva que melhor se ajusta aos pontos.

Com os parâmetros ajustados pelo modelo exponencial, foi construído um gráfico da concentração estimada de Benzeno ao longo do tempo, de modo a se estabelecer o período necessário para obtenção da meta de remediação definida no estudo de avaliação dos riscos a saúde humana. Este gráfico pode ser visualizado na Figura 7.

Analisando as informações obtidas, verifica-se que as concentrações de Benzeno serão menores que a meta de remediação após transcorridos 1074 dias. Considerando que o ponto inicial para a curva foi a amostragem de janeiro de 2009, estimou-se que em dezembro de 2011 seria iniciada a etapa de monitoramento para encerramento, caso não houvesse mais nenhuma intervenção na área que pudesse acelerar o processo de degradação, remoção e tratamento dos compostos BTEX presentes em água subterrânea.

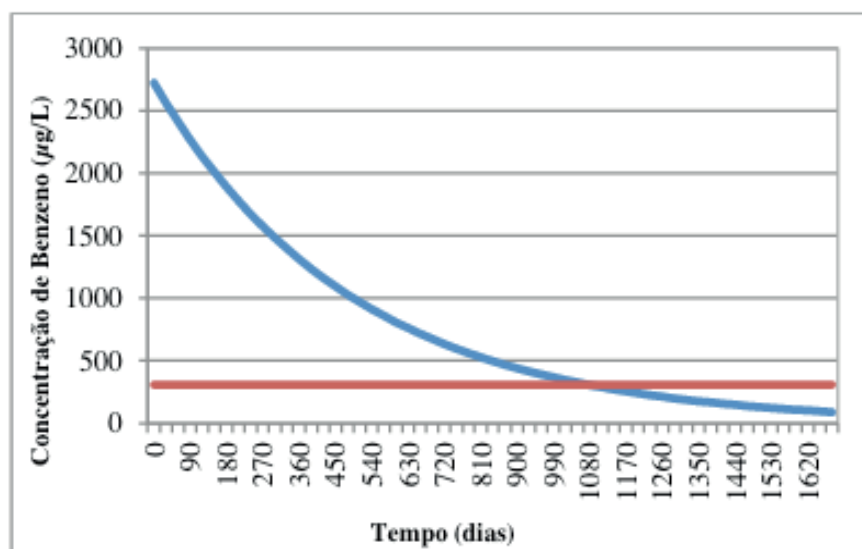


Figura 7 – Estimativa da redução da concentração Benzeno em água subterrânea (PM-22) ao longo do tempo.

Nota: (—) Modelo exponencial para previsão das concentrações futuras de Benzeno no PM-22; (—) Meta de remediação – $310 \mu\text{g/L}$.

Zahiralesslamzadeh, Bensch e Cutler (1998) encontraram resultados de redução da concentração de compostos orgânicos voláteis com a aplicação da técnica DPE (Extração Bifásica, para caso onde não ocorre fase livre), sendo o principal contaminante TCE, seguindo uma exponencial de queda, similar ao comportamento da cinética de primeira ordem. Neste caso os resultados poderiam ser facilmente lançados em gráfico para ser determinado o tempo necessário para atingir a meta de remediação (ou de redução de concentração/massa) com descrito no presente artigo.

Fernandes (2002), num trabalho pioneiro no Brasil sobre atenuação natural monitorada, encontrou melhores resultados para a redução das concentrações de BTEX considerando uma cinética de primeira ordem.

Segundo Malamud et. al. (2005), para atenuação natural de BTEX, num derramamento controlado de gasolina, a cinética de decréscimo de massa dos contaminantes foi a cinética de primeira ordem.

5 | CONCLUSÕES

Os resultados apresentados neste trabalho indicam que a técnica de remediação por Extração Multifásica é eficiente na redução da contaminação e suficiente para atingir níveis aceitáveis de risco a saúde humana. A comparação das concentrações, entre os monitoramentos de janeiro de 2009 e agosto de 2010, mostrou significativa redução nas concentrações de BTEX na água subterrânea da área de estudo.

No entanto, a estimativa do tempo de remedição de uma área contaminada é de extrema relevância, uma vez que permite aperfeiçoar as técnicas de remediação utilizadas, empregando outras técnicas em conjunto, caso necessário, garantindo assim a remediação adequada do sítio e a viabilidade econômica de tal remedição.

A aplicação de um método baseado em um modelo exponencial mostrou-se ser uma boa alternativa para a estimativa do prazo de encerramento de processo de remediação. O método sugerido pode ser aplicado em áreas com contaminação da água subterrânea por compostos orgânicos do grupo BTEX, uma vez que os dados dos monitoramentos ambientais indiquem tendência de redução e aderência a uma função conhecida.

Neste caso, o processo de remediação teve início em agosto de 2008 e como a estimativa para encerramento foi dezembro de 2011, totalizando 3 anos e 4 meses. Quando considerado 2 anos de monitoramento para encerramento, o processo como um todo tem duração de 5 anos e 4 meses, muito próximo aos 5 anos, sendo este o prazo máximo permitido pela CETESB. De posse desta informação, seria possível intervir no processo de remediação, de forma a acelerá-lo, cumprindo assim o prazo estabelecido pelo órgão ambiental.

REFERÊNCIAS

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Decisão de Diretoria nº103/2007/C/E - **Procedimento para gerenciamento de áreas contaminadas**. São Paulo: CETESB, 40p., 2007.

_____- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Decisão de Diretoria nº 263/2009/P - **Roteiro para execução de investigação detalhada e elaboração de plano de intervenção em postos e sistemas retalhistas de combustíveis**. São Paulo: CETESB, 24p., 2001.

_____- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Manual de gerenciamento de áreas contaminadas (CETESB/GTZ)**. 2 ed. São Paulo: CETESB, 389p., 2001.

CHAPRA, S. C. **Surface Water-Quality Modeling**. Texas, EUA: McGraw-Hill, 844 p., 1997.

CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº 420, de 28 de dezembro de 2009, que dispõe sobre **critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental em áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas**, de 28 de dezembro de 2009. Brasília: DOU, 16p., 2009.

FERNANDES, M. **Atenuação da Contaminação de aquífero submetido a derramamento de gasolina**. 2002. 212f. Tese (Doutorado em Química).UFSC, Florianópolis, 2002.

GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. Lei nº 13.577, de 8 de julho de 2009, que dispõe sobre **diretrizes e procedimentos para a proteção da qualidade do solo e gerenciamento de áreas contaminadas, e dá outras providências correlatas**. São Paulo: DOESP, Volume 119, Número 127, 2009.

GUERRA, A. J. T.; ARAUJO, G. H. S.; A, J.R. **Gestão Ambiental de Áreas Degradadas**. 5 ed. Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, 320p., 2010.

KHAN, F.I.; HUSSEIN, T.; HEJAZI, R. **An overview and analysis of site remediation technologies**. Journal of Environmental Management. London, v. 71, p. 95-122, 2004.

MALAMUD, E. S. T.; AMORIM JR., C. J.; OLIVEIRA, J. C. S.; CORSEUIL, H. X.. 2005, **Avaliação da atenuação natural dos contaminantes BTEX e etanol em um derramamento controlado de gasolina através do balanço de massa**. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 23, Campo Grande, Anais... Rio de Janeiro: ABES.

MIHELIC, J. R. **Fundamentals of Environmental Engineering**. New York, EUA: John Wiley & Sons Inc., 352p., 1999.

RAST, R. R. **Environmental Remediation Estimating Methods**. 2 ed. New York, John Wiley & Sons Inc., 742p., 2002.

SHARMA, H. D.; REDDY, K. R. **Geoenvironmental engineering: site remediation, waste containment, and emerging waste management technologies**. New York, John Wiley & Sons Inc., 968p., 2004.

ZAHIRALESLAMZADEH, Z.M., J.C. BENSCH, AND W.G. CUTLER, 1998, **Enhanced Soil Vapor Extraction for Source Area Remediation Using Dual Phase Extraction with Pneumatic Fracturing**, Presented at the 14th Annual Conference on Contaminated Soils, University of Massachusetts, Amherst, MA, October 22, 1998.

SOBRE O ORGANIZADOR

Giovanni Chaves Penner - Graduado em Engenharia Sanitária pela UFPA (1997), mestrado e doutorado pela EESC-USP (2000 e 2005). Intercâmbio com a USEPA (2004). Especialista em Gestão Municipal de Recursos Hídricos ANA/IFCE (2018). Trabalha como professor doutor desde (2005). Tem experiência na área de Engenharia Sanitária, Hidrologia e Recursos Hídricos, com ênfase em Gerenciamento de Áreas Contaminadas e Controle da Poluição, atuando principalmente nos seguintes temas: modelagem matemática de plumas poluentes, contaminação do solo, passivos ambientais, qualidade da água subterrânea, diagnóstico ambiental, avaliação de risco e remediação, estudo de chuvas intensas, bacia hidrográficas, medição de vazão em cursos d'água e infiltração. Atualmente Professor Doutor na UFPA, Faculdade de Engenharia Sanitária e Ambiental e Consultor na área de Saneamento Ambiental com ênfase no Gerenciamento de Áreas Contaminadas e Recursos Hídricos.

ÍNDICE REMISSIVO

A

Aterro sanitário de Marituba 38, 51

B

Balanço hídrico 14, 15, 16, 17, 18, 21, 22, 23, 53, 62, 63

Benzeno em água subterrânea 65, 75

C

Climatológico 14, 15, 17, 18, 22, 23

Contaminadas 65, 66, 67, 68, 76, 77, 78

D

Demandas hídricas 14, 18, 21

E

Encerramento da remediação 65, 67

Ensaio da ABGE 24, 28, 32, 33, 34, 38

Ensaio de infiltração 24, 26, 31, 34, 38, 40

G

Gerenciamento de áreas 65, 66, 67, 68, 76, 77, 78

H

Hídricos 7, 8, 13, 15, 17, 21, 22, 37, 43, 44, 49, 50, 52, 54, 55, 62, 63, 64, 78

Hidrológica 44, 45, 64

I

Infiltrômetro de anel 24, 25, 28, 29, 32, 33, 34, 35, 36

M

Medição de vazão 7, 13, 49, 78

Método de diluição salina 7

O

Open end Hole 24, 25, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35

R

Recarga subterrânea 51, 53

Recursos 7, 8, 13, 15, 21, 22, 35, 37, 43, 44, 49, 50, 52, 54, 62, 63, 64, 78

Regionalização 44, 45, 47, 48, 50, 51, 55, 62, 63, 64

T

Taxa de infiltração 27, 37, 38, 39, 41, 42, 43, 56

Thorntwaite & Mather 14, 15, 16, 22

Traçador salino 7, 10, 11

U

Uriboquinha 7, 8, 9, 11, 12, 14, 15, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 38, 39, 40, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 54, 55, 56, 57, 59, 60, 61, 62

V

Vazão de estiagem 44

