

Avaliação dos métodos utilizados para amostragem em águas subterrâneas e sua eficácia no gerenciamento de áreas contaminadas utilizando Bomba Bexiga e Bomba peristáltica

Evaluation of methods used for sampling in groundwater and their effectiveness in managing contaminated areas using Bladder Pump and Peristal

Gustavo Cardamone Athayde (1)

Conrad Elber Pinheiro (2)

(1) *Graduando em Engenharia Ambiental, Universidade Anhembi Morumbi, guga.cardamone@gmail*

(2) *Professor Mestre, Departamento de Engenharia, Universidade Anhembi Morumbi, conrad.yy@gmail.com*

Resumo

A amostragem de águas subterrâneas é uma prática fundamental para entender a qualidade e a quantidade desses recursos, trazendo várias implicações e importâncias. Dentre tais razões pode-se citar a avaliação da qualidade da água, existência de contaminação, o que influencia na proteção da saúde pública, monitoramento de recursos hídricos, bem como maior entendimento de processos geológicos, entre outras, sendo sua realização feita sempre em concordância com as regulamentações e leis ambientais. Para a realização das amostragens, diferentes métodos podem ser aplicados, como amostragem a baixo fluxo, método Bailer e amostragem por difusão, sendo objeto deste trabalho a comparação e avaliação, com base em dois estudos de caso, da eficácia desses métodos, com enfoque na utilização de bombas peristálticas e bombas bexiga para baixo fluxo, no contexto do gerenciamento de áreas contaminadas. Além disso, para estruturação das informações foi realizada uma revisão bibliográfica abrangente, incorporando estudos científicos e técnicos relacionados ao tema e extraídas as informações mais relevantes ao escopo deste estudo. No primeiro estudo foi analisada a amostragem de BTEX em água subterrânea e sua eficácia no gerenciamento de áreas contaminadas a partir de dois poços, com altas e baixas concentrações de diferentes compostos. No caso do poço com concentrações elevadas, constatou-se que, independentemente do método escolhido, os resultados apresentam a mesma representatividade, não interferindo nas concentrações e revelando valores de correlação próximos de 1. Já para o poço com baixas concentrações, o método convencional Bailer revelou falta de correlação com as metodologias por difusão e baixa vazão tanto por bomba bexiga quanto bomba peristáltica. Quanto ao segundo estudo de caso, o mesmo visava investigar a viabilidade de utilizar a purga e amostragem a baixo fluxo em um monitoramento de um corpo d'água, e chegou-se à conclusão de que tal método pode ser considerado viável para monitoramentos de alto custo.

Palavras-Chave: amostragem, águas subterrâneas, contaminação.

Abstract

Groundwater sampling is a fundamental practice for understanding the quality and quantity of these resources, bringing several implications and importance. Among these reasons, we can mention the assessment of water quality, the existence of contamination, which influences the protection of public health, monitoring of water resources, as well as a greater understanding of geological processes, among others, which are always carried out in accordance with environmental regulations and laws. To carry out sampling, different methods can be applied, such as low flow sampling, the Bailer method and diffusion sampling, the object of this work being the comparison and evaluation, based on two case studies, of the effectiveness of these methods, focusing on the use of peristaltic pumps and bladder pumps for low flow, in the context of managing contaminated areas. Furthermore, to structure the information, a comprehensive bibliographic review was carried out, incorporating scientific and technical studies related to the topic and the most relevant information to the scope of this study was extracted. In the first study, BTEX sampling in groundwater and its effectiveness in managing contaminated areas from two wells, with high and low concentrations of different compounds, was analyzed. In the case of the well with high concentrations, it was found that, regardless of the method chosen, the results present the same representativeness, not interfering with the concentrations and revealing correlation values close to 1. For the well with low concentrations, the conventional Bailer method revealed a lack of correlation with diffusion methodologies and low flow rates for both bladder and peristaltic pumps. As for the second case study, it aimed to investigate the feasibility of using low-flow purging and sampling in monitoring a body of water, and it was concluded that such a method can be considered viable for high-flow monitoring. cost.

Keywords: sampling, groundwater, contamination.

Introdução

O emprego de normas técnicas, procedimentos e a utilização da técnica correta na amostragem de águas subterrâneas, em áreas que estão sob investigação ambiental, são de fundamental importância para que os estudos hidrogeoquímicos sejam considerados consistentes. A qualidade dos resultados analíticos encontrados a partir de uma amostra de água subterrânea depende diretamente das características construtivas do poço de monitoramento, da técnica de amostragem adotada, do comportamento do contaminante em subsuperfície e do critério técnico do profissional em campo (BOSSI et al., 2013).

O estudo visa avaliar a eficácia desses métodos, com foco nas bombas peristálticas e nas bombas bexiga, no contexto do gerenciamento de áreas contaminadas. As bombas peristálticas são equipamentos que transferem fluidos de um local para outro sob uma determinada vazão. Assim, elas se apresentam como uma opção multifuncional e versátil, sendo especialmente indicadas para usuários finais em busca de tecnologia avançada, proporcionando a eliminação de diversos problemas relacionados à manutenção e ao desgaste excessivo.

Uma característica fundamental da bomba peristáltica é que o fluido transportado não entra em contato com nenhuma parte do equipamento, estabelecendo contato apenas com a superfície interna da mangueira. Essa particularidade previne danos ao fluido, evitando a ocorrência de contaminações. Por conta dessa característica, a bomba peristáltica de mangueira tornou-se amplamente utilizada em aplicações laboratoriais e encontrou aplicação em diversas indústrias, como a farmacêutica, processamento químico, indústria de insumos agrícolas e estações de tratamento de água (MACINTYRE, 2012; MARKOS, 2013).

Quanto à bomba de bexiga, sua utilização pode alcançar profundidades de até 60 metros, atendendo a diferentes demandas de vazão, seja baixa, média ou alta, dependendo do objetivo da amostragem. O funcionamento desse equipamento baseia-se na injeção de ar na bomba, comprimindo a bexiga de teflon e, conseqüentemente, provocando a liberação da água a ser coletada (AMBIOS, 2005).

A escolha entre bombas peristálticas e bombas bexiga para amostragem em águas subterrâneas é crucial, pois afeta diretamente a qualidade e confiabilidade dos dados coletados. Compreender as vantagens e desvantagens de cada método é essencial para garantir a eficácia da amostragem.

A importância deste trabalho reside na necessidade de aprimorar as técnicas de amostragem, contribuindo para a obtenção de dados mais precisos e representativos. Tem-se como objetivo principal avaliar criticamente os métodos de amostragem em águas subterrâneas, destacando a eficácia das bombas peristálticas e bexiga no contexto do gerenciamento de áreas contaminadas. Busca-se, assim, fornecer subsídios para a escolha adequada desses métodos, considerando fatores como custo, precisão e facilidade operacional.

Revisão Bibliográfica

A importância do estudo de águas subterrâneas: por que uma boa amostragem é necessária?

A atividade antrópica, desde muito cedo na história humana, é o maior contaminante hidrogeológico. Segundo a CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (2021), as principais fontes potenciais de contaminação das águas subterrâneas são os lixões, aterros mal operados, acidentes com substâncias tóxicas, entre diversas outras fontes dispersas de poluentes.

Fontes de contaminação podem ser pontuais ou não pontuais. As pontuais são as tais que o espalhamento é pequeno, como uma tubulação ou tanque subterrâneo vazando. Já fontes não pontuais têm fontes de dispersão maiores, como precipitação de chuvas poluídas e uso de pesticidas aplicados a uma lavoura na agricultura (FITTS, 2015).

Esses contaminantes podem ser agravantes para a saúde e qualidade de vida de uma comunidade a curto e longo prazo, pois se não tratada, a água consumida leva resíduos químicos e biológicos para o corpo humano e, sendo um mal silencioso, pode durar por gerações.

Nesse sentido, conclui-se que as análises hidrogeoquímicas são fundamentais para o entendimento da qualidade de uma fonte de água (subterrânea ou não), e portanto dependem diretamente de uma amostragem adequada para que os resultados sejam condizentes com a realidade.

Métodos de amostragem de águas subterrâneas e aplicabilidade da Portaria 518 do Ministério da Saúde.

A avaliação de áreas contaminadas tem se beneficiado significativamente da utilização de métodos de amostragem de águas subterrâneas. Órgãos ambientais, como a CETESB e a FEEMA, adotaram esses métodos como referência na elaboração de listas de valores orientadores.

Conforme mostra o artigo de Lima e Penner (2014), é importante obter levantamento histórico de informações sobre a área escolhida e conhecimento devido do caso analisado (parâmetros de amostragem, objetivos do projeto, histórico ambiental, informações e caracterização da área de estudo), para um planejamento adequado e como será feita a amostragem. Para isso, busca-se informações na literatura, como a hidrogeologia local, acessibilidade.

A CETESB (2016) ainda ensina que antes de fazer as amostragens, deve-se estudar a geologia, hidrogeologia, geoquímica e os contaminantes alvos — isso é, caracterização da área — e o design do sistema de monitoramento — distribuição dos poços, vertical e horizontal. Mostra ainda que é importante um programa de definição de amostragem, com fatores tipo frequência de amostragem, método de amostragem a ser seguido, procedimentos de coleta e manuseio das amostras.

O Bailer, ou método por volume determinado, é um equipamento utilizado tanto na coleta de amostras quanto na depuração de poços de monitoramento. É constituído por diversos materiais, e é amplamente utilizado devido ao seu baixo custo (AgSolve, 2018).

Bombas a vácuo, centrífugas e peristálticas são comuns, sendo a última a mais utilizada devido ao menor distúrbio na água amostrada. Limitações incluem a profundidade de amostragem, não podendo exceder 7,0 metros. Este método, que envolve baixa velocidade de entrada de água durante a amostragem, apresenta vantagens como eliminação dos efeitos da turbulência, não necessidade de esgotamento dos poços e monitoramento contínuo de parâmetros físico-químicos (MILIORINI; ISHIMINE, 2005).

A preservação das amostras é importante para garantir resultados confiáveis. Frascos recomendados, métodos de preservação e tempo máximo de armazenagem variam conforme o parâmetro a ser analisado.

A Portaria 518/2.004 tornou a referência mais apropriada para avaliação do nível de contaminação das águas subterrâneas. A aplicação mais frequente do método de micropurga reflete a busca por resultados de maior qualidade diante das exigências crescentes dos Órgãos de Controle Ambiental.

Avaliação e comparação dos métodos mais utilizados para amostragem de BTEX (benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos) em água subterrânea e sua eficácia no gerenciamento de áreas contaminadas.

A aplicação de normas técnicas, procedimentos adequados e a correta abordagem na amostragem de águas subterrâneas, especialmente em áreas sujeitas a investigação ambiental, é de alta importância para assegurar a consistência dos estudos hidrogeoquímicos. A qualidade dos resultados analíticos obtidos a partir de uma amostra de água subterrânea está intrinsecamente ligada às características construtivas do

poço de monitoramento, à metodologia de amostragem utilizada, ao comportamento do contaminante nas camadas subsuperficiais e ao discernimento técnico do profissional em campo (BOSSI *et al*, 2013).

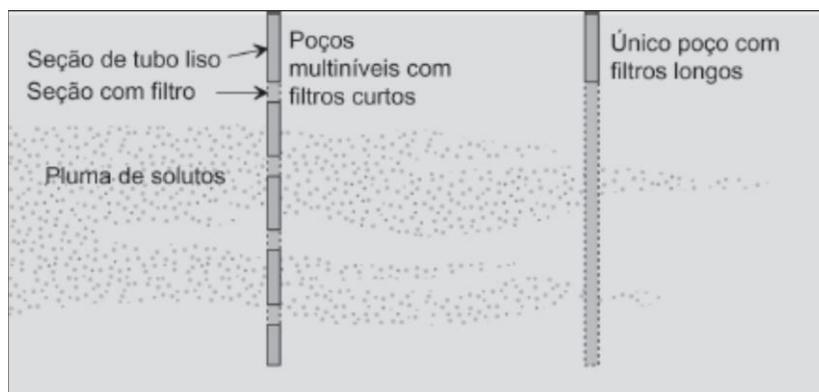


Figura 1: Uma pluma de solutos irregulares e como ela é amostrada por poços. (FITTS, 2015).

Na Figura 1 acima tem-se uma representação de como é amostrada por poços uma pluma de solutos irregulares. Os filtros curtos dos poços multiníveis (esquerda) são mais capazes de definir a geometria da pluma que o único poço com filtro longo (direita). Os poços multiníveis são instalados em um furo de sondagem, com quatro filtros separados conectados a quatro tubos elevadores sólidos separados. Neste artigo, avaliou-se a correlação dos resultados analíticos para as amostras coletadas pelo método de baixa vazão (bombas de bexiga e peristáltica), amostragem passiva (*Diffusion Bag*) e o amostrador descartável Bailer.

Avaliação e comparação dos métodos mais utilizados para amostragem bomba bexiga e bomba peristáltica

Os poços de monitoramento são avaliados pela qualidade das águas subterrâneas em áreas com possível contaminação, com o método de baixa vazão para purgar a água que se encontra no interior do poço e posteriormente as amostras coletadas serem analisadas em laboratórios.

A água subterrânea é um recurso natural de extrema importância para o fornecimento de água potável em ambientes rurais e urbanos, sendo essencial para atividades econômicas e a preservação de ecossistemas aquáticos e terrestres. A degradação da qualidade das águas superficiais, juntamente com avanços nas técnicas de perfuração, que tornam o acesso à água subterrânea mais acessível e econômico, tem contribuído para um aumento significativo de sua utilização em diversas finalidades.

Um plano de amostragem projetado para coletar amostras representativas deve levar em consideração a escala potencial das mudanças nas condições do local ao longo do espaço e do tempo, além das associações químicas e do comportamento dos parâmetros investigados (PULS; BARCELONA, 1996).

Por exemplo, em sistemas subsuperficiais, as propriedades físicas e químicas ao longo do tempo ou do espaço não são mutuamente independentes. Na verdade, amostras coletadas em proximidade uma da outra (por exemplo, dentro de algumas dezenas de metros) ou em curtos períodos de tempo (ou seja, mais frequentemente que mensalmente) apresentam uma correlação significativa. Nesse exemplo, o resultado pode ser uma coleta de dados redundante e não representativa do todo daquele local (PULS; BARCELONA, 1996).

As amostragens são feitas em poços de monitoramento que são espalhados de uma maneira estratégica. A amostragem *low flow* simula um dos procedimentos mais usados na amostragem de água subterrânea, já que incide em um processo que é utilizado para análise e identificar se determinada região está ou não contaminada com compostos químicos ou predisposta a contaminação. Este processo se trata do bombeamento feito diretamente da seção filtrante do poço de forma lenta (isto é, baixa vazão), somente depurando a zona de amostragem, o que permite diminuição na turbidez da amostra e distúrbios na água (AgSolve, 2017).

Na prática, é possível destacar que uma determinada contaminação da água pode ser altamente danoso para o meio ambiente e para os seres humanos. Além do mais, a amostragem *low flow* pode aproveitar-se tanto de bombas peristálticas, quanto de bomba de bexiga, desde que elas sejam conectadas a dispositivos controladores de purga para se fazerem dentro das normas impostas de baixa pressão. Como não poderia ser diferente, tal tipo de amostragem se baseia em um sistema de *low flow* no qual a água entra lentamente sendo controlada pelo rebaixamento do nível d'água ao longo do procedimento.

Amostragem Low Flow

A amostragem de baixo fluxo, ou "*low flow*", de águas subterrâneas refere-se a uma técnica específica de coleta de amostras em poços de monitoramento. Essa abordagem é comumente utilizada em estudos hidrogeológicos e ambientais para obter amostras representativas da água subterrânea sem perturbar as condições naturais do aquífero. É o método mais indicado pelos órgãos de controle ambiental para a obtenção das amostras.

A amostragem de baixo fluxo é especialmente importante quando se deseja obter amostras que reflitam as condições químicas e físicas da água subterrânea sem misturá-las com água do poço ou introduzir ar na amostra. Se o método não for de baixa vazão tem-se maior chance de agitação, causando perda de massa de substâncias ou contaminação.

Bombas peristálticas e de balão podem ser usadas para amostragem de baixa vazão, conforme ilustra a Figura 2, desde que estejam conectadas a controles de purga para cumprir os padrões de baixa pressão impostos. Isso porque este tipo de amostragem baseia-se num sistema de baixa pressão onde a água entra lentamente e é controlada pela redução do nível da água ao longo do processo (DOXOR, 2020).



Figura 2: Equipamento de amostragem por baixa vazão (VENTURO, 2020)

A CETESB (2021) explica que neste método faz-se uma purga com vazões ligeiramente abaixo da capacidade de produção/manutenção do poço, para assim levar ao mínimo de rebaixamento da água possível. Assim, diversos parâmetros listados na Figura 3 devem ser avaliados para enfim definir o ponto (tempo) de coleta da água. A purga termina quando o poço atinge estabilidade hidrogeológica, conforme os critérios abaixo.

Parâmetro	Varição permitida
pH	0,1 unidades
Condutividade elétrica	3%
Potencial oxi-redução (EH)	10 milivolts
Turbidez	10% (quando a turbidez for maior que 10 UTN)
Oxigênio dissolvido	0,3 mg/L

Figura 3: Critérios de estabilização definidos pela Agência de Proteção Ambiental dos

Estados Unidos - USEPA (EPA, 2000)

Vale ressaltar que o rebaixamento da coluna de água deve ser definido para cada poço medido conforme sua estabilidade. Finalmente, as amostras devem ser levadas e analisadas em laboratório, e sua quantidade não deve ser alterada em nenhum momento (CETESB, 2021).

Amostragem *Low Flow*: Bomba Bexiga

Aprovada pela EPA para coletas de amostragem *low flow* e coletas de VOCs (compostos orgânicos voláteis), a bomba bexiga, que podemos observar na figura 4, funciona tal que a água coletada fica dentro da bexiga sem contato com o ar externo ou o gás que alimenta a bomba. A água é mantida dentro da bexiga até que haja pressão externa de gás, comprimindo a bexiga. Assim, é possível manter a integridade da amostra.



Figura 4: Bomba Bexiga da marca Sample Pro (GeoAcqua, 2023)

A bomba bexiga é um método barato de se manter e simples — mesmo com um possível grande investimento inicial, que demanda pouco tempo e retorna resultados precisos se bem utilizado. O controlador pode ser reutilizado várias vezes e o ar para bombear pode ser alugado (AgSolve, 2018).

Amostragem *low flow*: Bexiga peristáltica

"Os movimentos peristálticos ocorrem como consequência da contração dos músculos lisos que constituem os órgãos do tubo digestório" (SANTOS, 2022). Usando dessa definição, entende-se que uma bomba peristáltica trabalha semelhante ao intestino humano, mas com uma precisão maximizada sempre.

Para simular o movimento do sistema digestivo humano, a bomba peristáltica, ilustrada na Figura 5, usa de uma mangueira, *drive* e um cabeçote, posicionadas tais que a mangueira é posicionada e fixada no cabeçote, sendo comprimida por roletes que circundam o rotor, o qual executa um movimento circular. À medida que os roletes se deslocam, exercem pressão sobre a mangueira, promovendo seu fechamento (EXATTA, 2022).

A compressão total do mangote entre o rolete e a pista confere à bomba sua capacidade de deslocamento positivo. Essa característica evita o contrafluxo e elimina a necessidade de válvulas de retenção quando a bomba está inativa. Imediatamente após a passagem do rolete, a mangueira retoma seu diâmetro original devido às propriedades do material utilizado em sua fabricação (EXATTA, 2022).



Figura 5: Bomba peristáltica (Blue-White, 2014)

As bombas peristálticas desempenham a função de transferir fluidos — inclusive os abrasivos, corrosivos e viscosos — de um local para outro com uma determinada taxa de fluxo. Como resultado, elas se destacam como uma excelente escolha multifuncional e multipropósito, sendo particularmente adequadas para usuários finais em busca de tecnologia avançada, capaz de eliminar uma variedade de problemas relacionados à manutenção e ao desgaste excessivo (EXATTA, 2022).

Elas conseguem bombear fluidos e gases de maneira eficiente, eliminando a possibilidade de sifonagem, bloqueio de vapor ou perda de escorva, mesmo quando operam em taxas de saída muito baixas. A saída praticamente contínua resulta em uma dispersão mais fina do produto químico no sistema de tubulação em comparação com bombas pulsantes, como as bombas de diafragma. A Figura 6 ilustra a saída praticamente contínua do produto químico na corrente de fluxo ao usar uma bomba peristáltica, em contraste com a dispersão química interrompida ao utilizar uma bomba de diafragma.

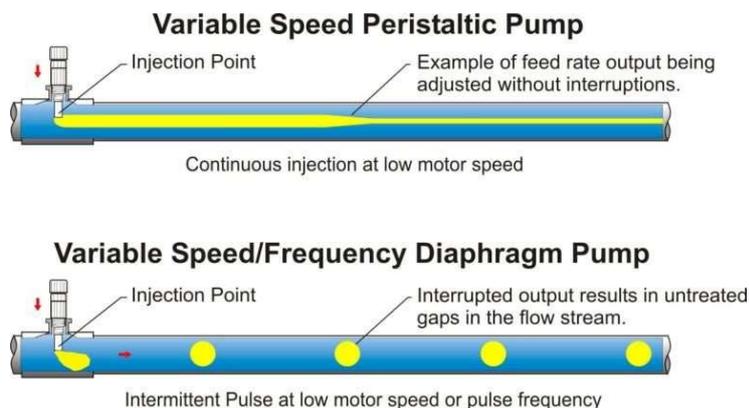


Figura 6: Fluxo contínuo da bomba peristáltica vs. fluxo intermitente da bomba de diafragma (Blue-White, 2014)

Devido a essa particularidade, as bombas peristálticas de mangueira tornaram-se amplamente utilizadas em aplicações laboratoriais. Além disso, são empregadas em diversas indústrias, como a farmacêutica, o processamento químico, a indústria de insumos agrícolas e em estações de tratamento de água (EXATTA, 2022).

Bailer

O Bailer, conforme citado anteriormente, é também conhecido por método por volume determinado. Trata-se de um tubo de amostragem que pode ser usado em diferentes níveis de poços de monitoramento, tanques ou piezômetros, como pode ser observado na figura 7.

Os bailers são vinculados a um segmento de corda, geralmente fabricado em nylon ou polipropileno, ou a um trecho de fio, composto por teflon ou aço inoxidável, e são então baixados na coluna de água.

Após a descida, o bailer utiliza uma válvula de retenção de esfera simples para selar na extremidade inferior, facilitando a coleta de uma amostra do lençol freático. Esses bailers podem ser de uso único ou reutilizáveis e são confeccionados em materiais como polietileno, PVC, FEP ou aço inoxidável.



Figura 7: Exemplo de Bailer e seus componentes (AgSolve, 2018)

Diffusion Bag

O amostrador por difusão passiva é uma alternativa para amostragem em poços de monitoramento de baixa capacidade hidráulica, que podem secar facilmente durante ou depois de uma purga, mesmo com vazões muito baixas. (CLEAN, 2023)

O modo de operação do PDB (*Passive Diffusion Bag*) é fundamentado nos princípios dos processos de difusão molecular. Os componentes de interesse presentes nas águas subterrâneas difundem-se através da membrana de polietileno, resultando no equilíbrio de concentração (conforme a Lei de Fick) na água destilada no interior do PDB.

Deve-se encher o amostrador com água deionizada, depois instalar um ou mais amostradores nas zonas de interesse no interior da coluna de filtros do poço e manter o amostrador no poço por um tempo específico para coletar a amostra (BOTTURA, 2009). O período para a realização desse equilíbrio varia de acordo com a natureza do composto de interesse, e vai de 30 a 45 dias.

Após permanecer no poço de monitoramento durante o tempo necessário para o estabelecimento do equilíbrio, o PDB, Figura 8, é retirado, e a amostra é obtida mediante a criação de uma pequena abertura na membrana de polietileno.



Figura 8: *Diffusion Bag* (CLEAN, 2023)

Possíveis problemas em sistemas de amostragem

Existe a possibilidade de contaminação dos dispositivos de amostragem, sejam baldes ou bombas. Se for necessário amostrar vários poços, deve-se ter o cuidado de limpar o equipamento de amostragem após a amostragem de cada um. A descontaminação pode levar tempo e ser cara. Para economizar dinheiro, o equipamento de amostragem dedicado geralmente é deixado em cada poço (FITTS, 2015).

Outro problema, ainda segundo Fitts (2015), é a contaminação durante a perfuração e instalação de poços. De óleos usados na lubrificação das bombas a movimento da água de camadas contaminadas a camadas “limpas”, são muitas variáveis que podem levar à impurezas nas amostras.

Ainda nesse caminho, outras contaminações podem acontecer em diferentes fases do processo. Voláteis químicos podem ser perdidos, mudanças na taxa de oxigênio se a amostra entrar em contato com o ar, microrganismos originais do corpo d’água ou não podem mudar a química da amostra, ou ainda, outros contaminantes podem ser introduzidos durante a amostragem, transporte ou permanência no laboratório (FITTS, 2015).

Para evitar esse tipo de problema, deve-se sempre esterilizar todos os equipamentos de amostragem antes de cada procedimento, em especial se mais de um poço for amostrado. Além disso, Fitts (2015) afirma que parâmetros facilmente mensuráveis em campo, tais como pH, temperatura e alguns outros, podem ser monitorados durante a vazão da bomba.

Metodologia (ou Materiais e Metodologia)

A metodologia adotada para este estudo compreende uma revisão bibliográfica abrangente, incorporando estudos científicos e técnicos relacionados à amostragem em águas subterrâneas. A análise crítica das bombas bexiga e peristáltica foi embasada nos princípios operacionais apresentados por SPLabor (2023), AgSolve (2023) e outros, que destacam suas vantagens, como alta eficiência, baixo nível de ruído e fácil operação.

Para compreender a aplicação prática dessas tecnologias, foi realizado um estudo de caso com base nas experiências relatadas por Gray *et al.* (1996), destacando os desafios enfrentados e os resultados obtidos no gerenciamento de áreas contaminadas.

Além disso, a análise da amostragem low flow, conforme descrito por Doxor (2023), foi incorporada à pesquisa, considerando a eficácia desse método na identificação de contaminação e sua contribuição para a preservação da qualidade do meio ambiente.

Para alcançar esse propósito, propõe-se:

- Investigar a fundamentação teórica e operacional das bombas bexiga e peristáltica, considerando suas características, vantagens e desafios, conforme discutido por SPLabor (2023), AgSolve (2023) e outros em seus respectivos materiais.
- Analisar casos práticos de aplicação dessas técnicas, focando na obtenção de dados relevantes para o gerenciamento ambiental, conforme abordado por Bossi *et al.* (2013) em seu estudo de caso de comparação de amostradores diferentes em áreas contaminadas.
- Analisar a eficácia e baixo custo da amostragem *low flow* conforme diz Gray *et al.* (1996) em seu estudo *Go With The Low Flow*, que mostra uma situação prática de uso da bomba bexiga na coleta de dados.

Resultados e Discussões

Estudo de caso: Avaliação e comparação dos métodos mais utilizados para amostragem de BTEX em água subterrânea e sua eficácia no gerenciamento de áreas contaminadas por Bossi *et al.* (2013)

O objetivo do estudo dos autores foi analisar e comparar diferentes métodos de amostragem de águas subterrâneas. As amostras foram coletadas em áreas contaminadas por hidrocarbonetos de petróleo, sendo estas comprovadamente apresentando concentrações de BTEX.

Dois poços foram escolhidos para a realização das amostragens, um com concentrações mais elevadas de BTEX e outro com concentrações mais baixas. Seguindo normas técnicas nacionais e internacionais, foram coletadas amostras utilizando o método de amostragem passiva (*Diffusion Bag*), por baixa vazão (usando bombas peristálticas e de bexiga) e através do amostrador descartável Bailer.

A metodologia envolveu o preenchimento do amostrador *Equilibrator Diffusion Bag* com água deionizada certificada pelo laboratório responsável pelas análises químicas. Utilizando uma fita de 20 metros graduada a cada cinco milímetros, o amostrador de difusão foi posicionado pela equipe exatamente na metade da seção filtrante do poço de monitoramento. Ele permaneceu exposto ao meio ambiente por 15 dias consecutivos, conforme as orientações do fabricante, para permitir a renovação natural da água e a troca osmótica com o meio.

Em seguida, deu-se início ao procedimento de amostragem *low flow* com bomba de bexiga. No entanto, antecedendo esse processo, foram realizados os procedimentos de limpeza do equipamento, utilizando água deionizada e detergente neutro, seguidos por um enxágue abundante com água. Para avaliar a estabilização dos parâmetros foram feitas leituras de a cada intervalo de cinco minutos, dado que a célula

de fluxo tem capacidade para 500 mL e a vazão adotada foi de 100 mL/min, conforme estabelecido pela norma ABNT NBR 15847 (2010) sobre amostragem de água subterrânea em poços de monitoramento e métodos de purga. Os critérios foram os seguintes:

- Temperatura: $\pm 0,50^{\circ}\text{C}$;
- pH: $\pm 0,20$ unidades;
- Condutividade: $\pm 5,00\%$ das leituras;
- Oxigênio dissolvido: $\pm 10,00\%$ ou $0,20$ mg/L (o que fosse maior);
- Potencial de redox: $\pm 20,00$ mV.

Após essa etapa, deu-se início à coleta utilizando o método de baixa vazão com bomba peristáltica. Esse método operou com o mesmo princípio do método anterior, utilizando bombas succionadoras de vazão controlável para causar um rebaixamento mínimo na coluna d'água do poço amostrado. Os critérios de estabilização foram os mesmos da bomba bexiga, conforme recomendado pela ABNT (2010).

Por último, foi feita a amostragem com o amostrador Bailer. O procedimento iniciou-se ao posicionar o amostrador cuidadosamente dentro do poço até entrar em contato com a água subterrânea. O próprio peso do amostrador ocasionou seu afundamento na água, e, devido à pressão externa ser maior que a interna, a válvula inferior se abriu, preenchendo o amostrador com a amostra. Dessa forma, quando o nível da água dentro do amostrador se equilibrou com o meio externo, a válvula se fechou automaticamente, impedindo a saída da amostra. Nesse momento, o amostrador foi retirado cuidadosamente e lentamente do interior do poço.

Todas as amostras de todos os procedimentos foram tabeladas e refrigeradas com gelo em uma caixa térmica, a cerca de 4°C .

As amostras foram encaminhadas a um laboratório credenciado pela ISO 17025 (2005) para análises analíticas de BTEX. Com os resultados das concentrações analíticas em mãos, realizou-se uma análise estatística para avaliar a correlação dos dados e verificar se o método de amostragem influencia nos resultados obtidos.

Resultados Analíticos: BTEX				Poço com altas concentrações			
Parâmetros	Unidade	LD	LQ	Diffusion Bag (DF-01)	B. Bexiga (BB-01)	B. Peristáltica (BP-01)	Bailer (BL-01)
Benzeno	$\mu\text{g/L}$	0,10	1,00	808,20	1344,40	1086,20	1455,40
Tolueno	$\mu\text{g/L}$	0,10	1,00	1022,40	1670,40	1321,10	1994,50
Etilbenzeno	$\mu\text{g/L}$	0,10	1,00	435,30	947,10	752,00	952,70
m, p-Xilenos	$\mu\text{g/L}$	0,10	1,00	639,70	1300,90	1068,30	1650,90
o-Xileno	$\mu\text{g/L}$	0,10	1,00	676,10	1268,70	1146,90	1460,20
Xilenos totais	$\mu\text{g/L}$	0,10	1,00	1315,80	2569,60	2215,20	3111,10

Tabela 1: Tabela mostrando os resultados analíticos do poço com altas concentrações (BOSSI *et al.*, 2013)

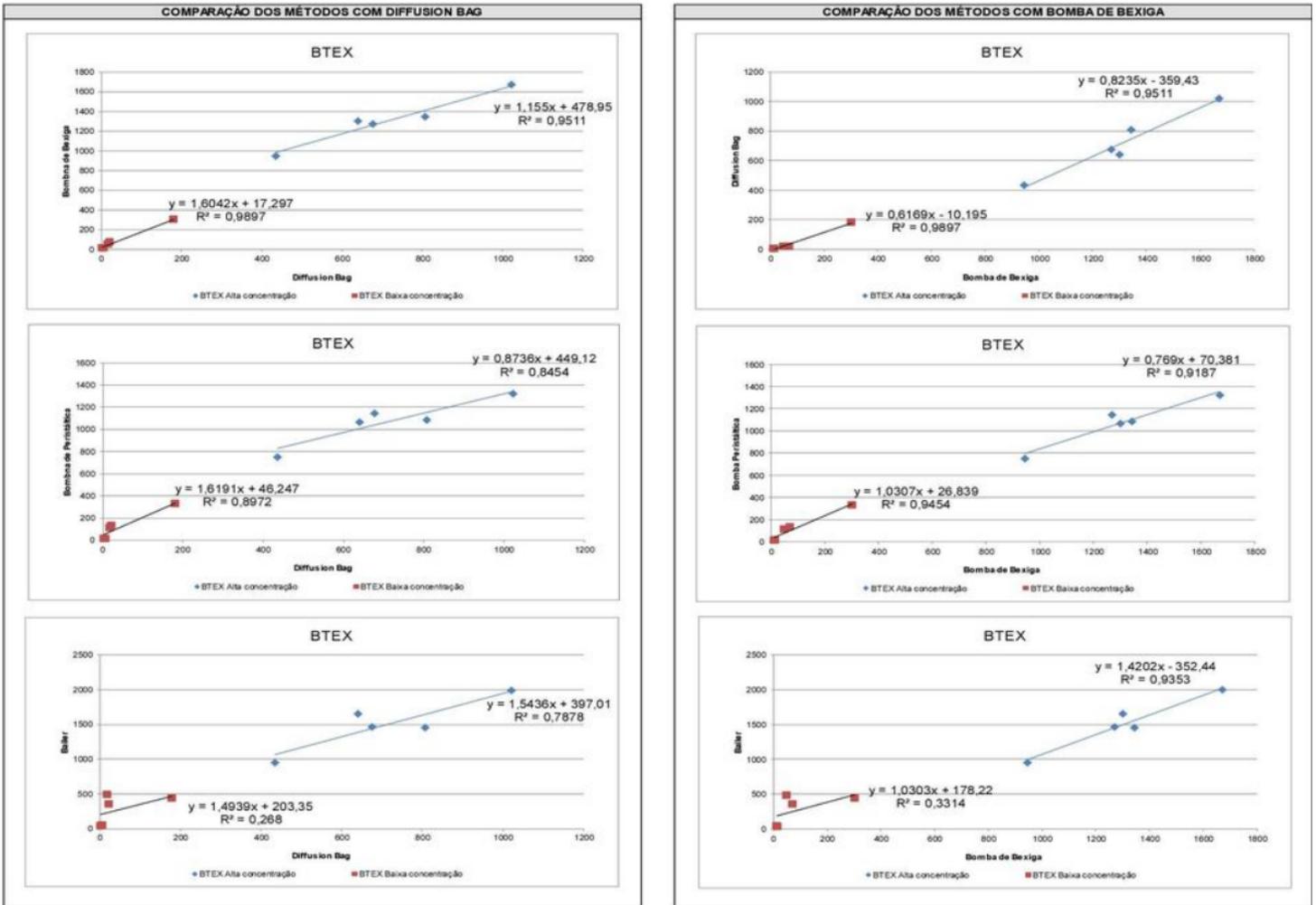
Resultados Analíticos: BTEX				Poço com altas concentrações			
Parâmetros	Unidade	LD	LQ	Diffusion Bag (DF-01)	B. Bexiga (BB-01)	B. Peristáltica (BP-01)	Bailer (BL-01)
Benzeno	µg/L	0,10	1,00	180,20	304,40	330,30	440,40
Tolueno	µg/L	0,10	1,00	6,80	12,90	15,30	42,80
Etilbenzeno	µg/L	0,10	1,00	22,10	71,30	134,20	354,10
m, p-Xilenos	µg/L	0,10	1,00	18,60	50,30	109,00	487,20
o-Xileno	µg/L	0,10	1,00	2,40	16,70	15,00	36,00
Xilenos totais	µg/L	0,10	1,00	21,00	67,00	124,00	523,20

Tabela 2: Tabela mostrando os resultados analíticos do poço com baixas concentrações (BOSSI *et al.*, 2013)

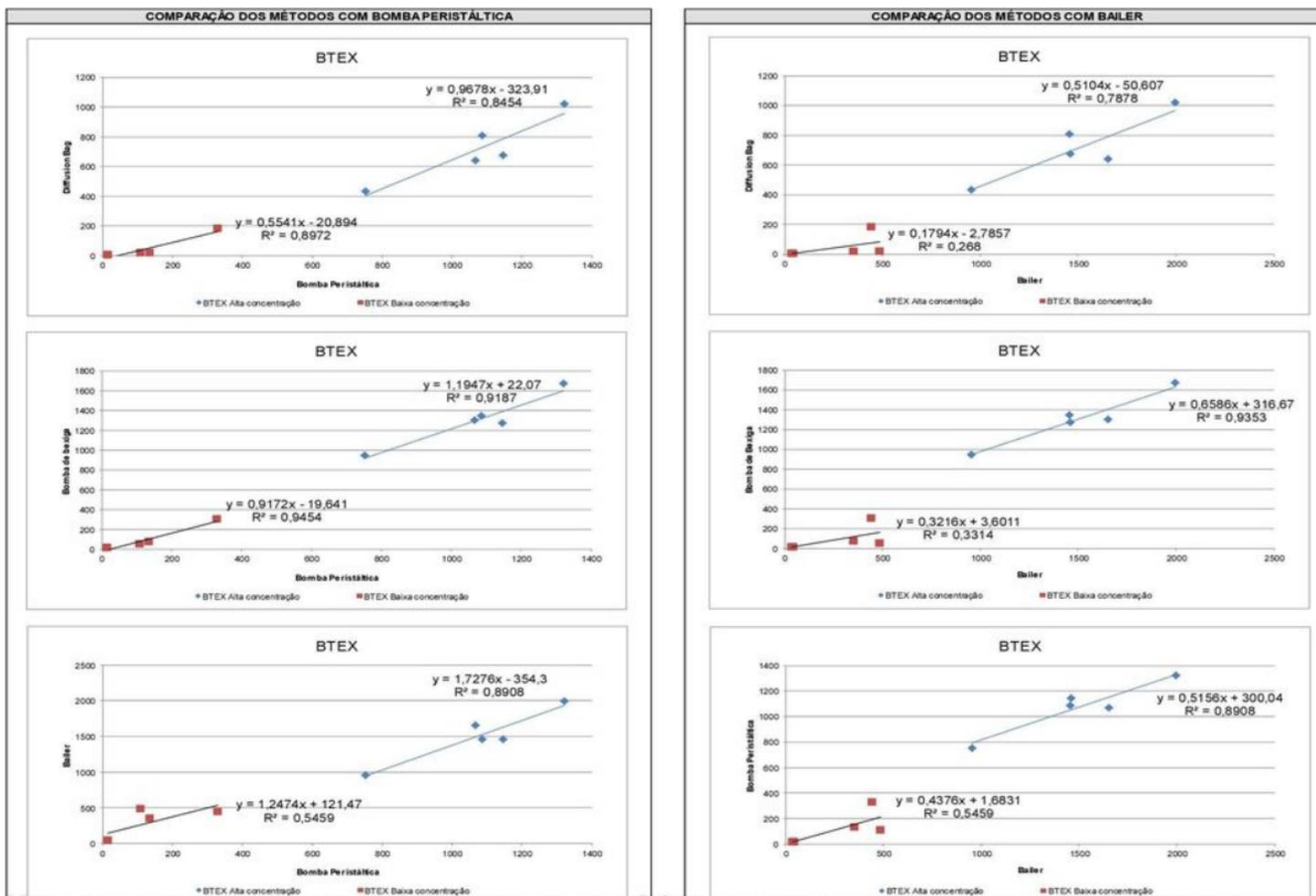
Para avaliar a correlação entre os métodos de amostragem, criou-se um gráfico de dispersão. No eixo horizontal, foram posicionados os métodos a serem comparados, enquanto no eixo vertical, encontram-se os métodos de comparação. Além disso, foi incluída uma linha de tendência e o coeficiente de ajuste (R^2), conforme ilustrado nas Figuras 9 e 10. Desse modo, todos os métodos foram confrontados entre si, revelando seus coeficientes de ajuste em relação ao tipo de metodologia empregada para a amostragem.

Os pontos indicados nas Figuras 9 e 10 pela cor vermelha representam o BETEX baixa concentração e em azul o de alta concentração. Tem-se na Figura 9 a comparação dos métodos bomba bexiga, bomba peristáltica e Bailer, sendo representados em cada gráfico à esquerda, de cima para baixo, respectivamente, com diffusion bag indicado no eixo horizontal. Já nos três gráficos à direita são representados os métodos diffusion bag, bomba peristáltica e Bailer, respectivamente, na mesma ordem citada, porém com eixo horizontal indicando o método bomba bexiga.

Na Figura 10 são representados, à esquerda, de cima para baixo, respectivamente, os métodos diffusion bag, bomba bexiga e Bailer, com bomba peristáltica no eixo horizontal. Nos três gráficos à direita, na mesma figura, tem-se na mesma ordem citada, respectivamente, os métodos diffusion bag, bomba bexiga e bomba peristáltica, com Bailer no eixo horizontal.



Figuras 9: Gráficos de dispersão comparando as técnicas de amostragem e coeficiente de correlação (Bossi *et al.*, 2013).



Figuras 10: Gráficos de dispersão comparando as técnicas de amostragem e coeficiente de correlação (Bossi *et al*, 2013).

Quanto aos resultados obtidos para todos os compostos analisados, tanto no poço com elevadas concentrações quanto no poço com baixas concentrações, observou-se que os maiores coeficientes de correlação foram encontrados ao utilizar a metodologia de amostragem convencional Bailler, enquanto os menores valores foram associados ao método *Diffusion Bag*. No caso do poço com concentrações elevadas, constatou-se que, independentemente do método escolhido, contanto que seja realizado com critérios e por um profissional qualificado, os resultados apresentam boa representatividade, não interferindo nas concentrações e revelando valores de correlação próximos de 1.

No que diz respeito ao poço com baixas concentrações (inferiores ao valor de intervenção da CETESB, 2005), o método convencional Bailler revelou falta de correlação com as metodologias *Diffusion Bag*, baixa vazão tanto por bomba bexiga quanto bomba peristáltica. Por outro lado, os demais métodos, quando contrastados entre si, apresentaram valores representativos e coerentes.

Estudo de caso: Go with the low flow por Gray *et al*. (1996)

Os autores do artigo descrevem que, de março a abril de 1995, foi realizado um estudo pela empresa DDRW-T para investigar a viabilidade de utilizar a purga e amostragem *low flow* em um monitoramento de um corpo d’água. Foram colocadas bombas bexigas em 30 dos 132 poços de monitoramento.

As bombas conseguiram operar a uma vazão muito baixa — 110 a 400 mililitros por minuto — então podia-se evitar facilmente a turbidez gerada artificialmente pelo equipamento.

Durante a amostragem, foi possível medir o pH, condutividade específica, potencial de oxirredução, taxa de oxigênio dissolvido e a turbidez. As amostras não foram retiradas até que todos os parâmetros se estabilizassem.

A conclusão dessa análise foi que os resultados para VOCs e metais dos 30 poços usando esse método de amostragem se mostraram precisos com os relatórios do que já se sabia sobre a região. A perturbação mínima da água e a purga com vazão baixa foi relevante na obtenção desses resultados. Isso aconteceu porque dessa forma, houve pouquíssima liberação de gases dos compostos orgânicos voláteis.

Dito isso, o artigo mostra que o custo-benefício da amostragem de baixo fluxo, enfatizando que o custo da amostragem de cem poços com o método convencional custou mais de 27 mil dólares, com nove mil galões de água gasta. Já a amostragem *low flow* custou somente 400 dólares, gastando menos de 100 galões, conforme o gráfico da Figura 11.

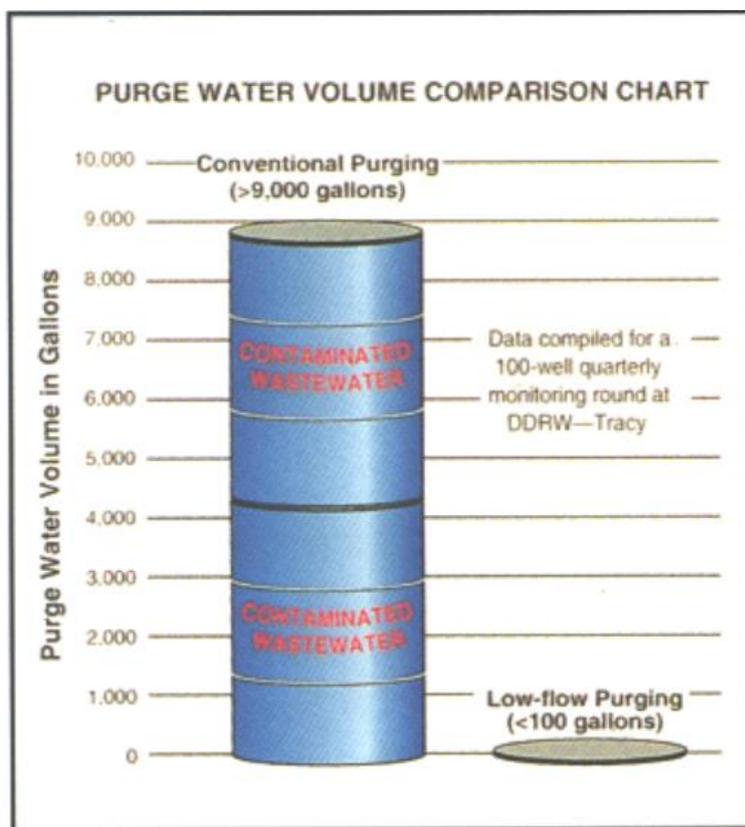


Figura 11: Comparação entre purga convencional (esquerda) e purga *low flow* (direita). O gráfico mostra que a amostragem convencional gasta mais de 9 mil galões de água e a amostragem *low flow* gasta menos de 100 (Gray *et al.*, 1996).

Além disso, ainda foram documentados os custos e economias em geral do estudo, incluindo desperdício, conforme mostra a Figura 12 abaixo.

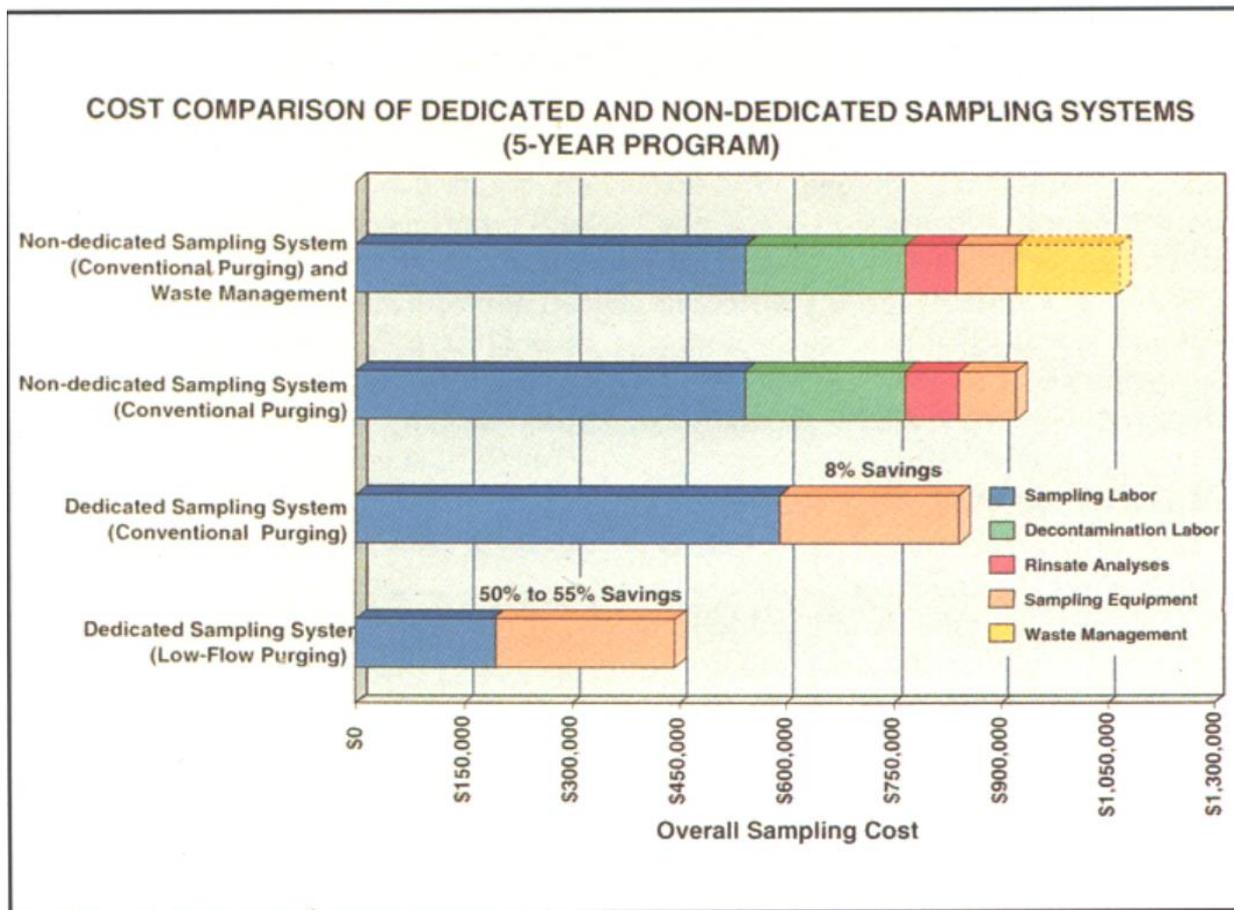


Figura 12: Comparação de custos entre outros tipos de amostragem e amostragem *low flow* em cinco anos usando de diversos critérios — dificuldade de amostragem, dificuldade em descontaminação, análises de enxágue, equipamento de amostragem e gerenciamento de desperdícios. Conclui-se que outros tipos são mais caros e demandam mais procedimentos do que a amostragem *low flow* (GRAY *et al.*, 1996).

A conclusão do artigo é que o método de purga e amostragem *low flow* é considerado viável para monitoramentos de alto custo (seja de vários poços, por exemplo). Contudo, mesmo sendo econômico e viável, cada sítio de monitoramento é diferente e deve ser analisado para determinar o tipo de amostragem correta e a viabilidade de usar a amostragem de baixa vazão.

Conclusões

A Portaria MS n.º 518/2004 de 2005 conclui que sempre que forem identificadas situações de risco à saúde, o indivíduo encarregado da operação do sistema ou da solução alternativa de abastecimento de água, juntamente com as autoridades de saúde pública, devem estabelecer acordos para desenvolver um plano de ação e implementar as medidas apropriadas. Isso inclui a comunicação eficiente à população, sem negligenciar as ações imediatas para corrigir a anormalidade.

Para garantir a qualidade da amostragem e das análises, conclui-se que desenvolver protocolos robustos de amostragem para o monitoramento de qualidade da água subterrânea é um processo intrincado e programático que precisa ser meticulosamente adaptado aos objetivos específicos do esforço de monitoramento em questão. A compreensão aprofundada dos objetivos de longo prazo e das necessidades de informação do programa de monitoramento é o ponto de partida crucial (BARCELONA *et al.*, 1985).

Ao conceber o protocolo de amostragem, a ênfase recai na coleta de dados hidrológicos e químicos que reflitam com precisão as condições hidrológicas e químicas *in situ* (BARCELONA *et al.*, 1985). Com

diretrizes robustas de garantia de qualidade e medidas de controle eficazes, o protocolo deve fornecer os dados necessários para a administração bem-sucedida do programa de monitoramento com elevado grau de confiança (BARCELONA *et al.*, 1985). Técnicas diretas que minimizam a perturbação do subsolo e das amostras em cada etapa do esforço de amostragem devem ser priorizadas (BARCELONA *et al.*, 1985).

O planejamento de um programa de monitoramento deve ser uma iniciativa progressiva, projetada para coletar informações durante as fases exploratórias ou iniciais do programa. Os *insights* adquiridos ao longo do desenvolvimento do programa devem ser aplicados para aprimorar o desenho preliminar do programa (BARCELONA *et al.*, 1985). Durante todas as etapas do desenvolvimento do protocolo, é imperativo manter em mente os custos a longo prazo associados à produção dos dados hidrológicos e químicos requeridos (BARCELONA *et al.*, 1985).

Esses custos a longo prazo ultrapassam significativamente os custos totais de planejamento, construção de poços, aquisição de equipamentos de amostragem e de campo, e o início da coleta de dados (BARCELONA *et al.*, 1985). Além disso, é crucial recordar que dados de alta qualidade não podem ser obtidos a partir de um programa de monitoramento mal concebido e implementado, independentemente do cuidado adicional e dos custos associados a procedimentos de amostragem e análise avançados (BARCELONA *et al.*, 1985).

A avaliação comparativa dos métodos de amostragem, incluindo Diffusion Bag, Bomba Bexiga, Bomba Peristáltica e Bailer, revelou dados valiosos para o gerenciamento de áreas contaminadas. A eficácia dessas técnicas varia em diferentes condições e concentrações de contaminantes. A utilização do Diffusion Bag mostrou-se eficaz em concentrações mais elevadas, enquanto a Bomba Bexiga e Bomba Peristáltica apresentaram resultados consistentes em diversas situações. No entanto, é crucial considerar as especificidades do ambiente e dos compostos contaminantes ao escolher o método mais apropriado.

As conclusões derivam da análise estatística, correlação e representatividade dos métodos, conforme descrito por Lima e Penner (2014) em seu estudo sobre amostragem de BTEX em água subterrânea. A abordagem adotada para cada método, juntamente com o cuidado na execução das técnicas, pode influenciar significativamente a precisão dos resultados.

Além disso, é pertinente ressaltar que a escolha de métodos de baixa vazão, como a Bomba Bexiga e a Bomba Peristáltica, encontra respaldo na abordagem "*Go With The Low Flow*" proposta por Gray, Light e Cloud (1996). Esse enfoque preconiza a utilização de baixas taxas de fluxo durante a amostragem, visando minimizar distúrbios no ambiente subterrâneo e proporcionar resultados mais representativos.

Agradecimentos

Agradeço por ter conseguido desenvolver o trabalho em apoio sempre da minha família. Agradeço meus pais, pelo apoio e pelo incentivo. Agradeço também ao meu orientador Conrad Elber Pinheiro por me orientar e me auxiliar com o trabalho.

Referências

ABNT NBR 15847. Amostragem de água subterrânea em poços de monitoramento — Métodos de purga. 2010. Disponível em: <<https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/29632/nbr15847-amostragem-de-agua-subterranea-em-pocos-de-monitoramento-metodos-de-purga>>. Acesso em: 22 nov. 2023.

AgSolve. Novo vídeo de treinamento sistema low flow. 2017. Disponível em: <<https://www.agsolve.com.br/noticias/10358/novo-video-de-treinamento-sistema-low-flow#:~:text=No%20Low%20Flow%2C%20a%20%20C3%A1%20gua,reduz%20a%20turbidez%20da%20amostra.>> Acesso em: 24 nov. 2023.

AgSolve. Por que usar bombas bexiga. 2018. Disponível em: <www.agsolve.com.br/dicas-e-solucoes/10403/por-que-usar-bombas-bexiga> Acesso em: 15 nov. 2023.

AMBIOS. Laudo descritivo dos trabalhos realizados no âmbito da área da Concima, em Campinas – SP. 2005. p. 11.

BARCELONA, M. J.; GIBB, J. P.; HELFRICH, J. A.; GARSKE, E. E. Um guia prático para amostragem de águas subterrâneas. Research Gate. 1985. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/241286817_A_Practical_Guide_for_Ground-Water_Sampling>. Acesso em: 23 nov. 2023.

BOSSI, M. L.; MACEDO, L. V.; LIMA, E. B.; Chaves PENNER, G. C.. 2013. Avaliação e comparação dos métodos mais utilizados para amostragem de BTEX em água subterrânea e sua eficácia no gerenciamento de áreas contaminadas. Águas Subterrâneas Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/27479> > Acesso em: nov. 2023.

BOTTURA, J. A. Amostragem de água subterrânea em poços de monitoramento. Curso Aesas. Notas de aula. 2009. Disponível em: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwi2wuulheCCAxV_qpUCHbVeDY0QFnoECBsQAQ&url=https%3A%2F%2Fgeowater.com.br%2Fimg%2Fartigos%2Fpdf%2Fpdf2.pdf&usq=AOvVaw3nLT5-wLzlSeJThO72YpRI&opi=89978449>. Acesso em: 22 nov. 2023.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Poluição das águas subterrâneas. 2021. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/aguas-subterraneas/poluicao-das-aguas-subterraneas/#:~:text=As%20principais%20fontes%20potenciais%20de,atividades%20industriais%2C%20como%20ind%C3%BAstrias%20qu%C3%ADmicas%2C>>. Acesso em: 25 nov. 2023.

CETESB. SISTEMA DE LICENCIAMENTO DE POSTOS - Procedimento para Amostragem de Água Subterrânea. 2005. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/licenciamento/arquivos/S704.pdf>>. Acesso em: 22 nov. 2023.

CLEAN. Equilibrador passive diffusion bag. 2023. Disponível em: <<https://www.clean.com.br/Produto/Detalle/134#:~:text=Membrana%20semiperme%C3%A1vel%20de>>

%20polietileno%2C%20preenchida,deionizada%20no%20interior%20do%20amostrador.>. Acesso em: 20 nov. 2023.

DOXOR. Saiba mais sobre o funcionamento da amostragem low flow. 2023. Disponível em: <<https://www.doxor.com.br/amostragem-low-flow>> Acesso em: nov. 2023.

DOXOR - Serviços de Instalações e Montagens Industriais. 2020. Disponível em: <<https://www.doxor.com.br/amostragem-low-flow>>. Acesso em: 23 nov. 2023.

EXATTA. Bomba peristáltica: saiba o que é e como funciona. 2022. Disponível em: <<https://blog.exatta.ind.br/bomba-peristaltica-o-que-e-e-como-funciona/>>. Acesso em: 26 nov. 2023.

FITTS, C. R. Águas Subterrâneas. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

GRAY, S., LIGHT, S.; CLOUD, M. Go with the Low Flow. The Military Engineer, October – November 1996, p. 580-581.

LIMA, M. P.; PENNER, G. C. Amostragem de BTEX em água subterrânea: comparação de resultados e o gerenciamento de áreas contaminadas. Revista Científica Eletrônica Uniseb. n. 3. ano 2. Ribeirão Preto. 2014. p. 247- 258.

MACINTYRE, J. A. M. Bombas e Instalações de Bombeamento. 2. ed. Editora LTC, 2012. 782 p.

MARKOS. Água – Um olhar integrado, Automação livre para laboratórios de Águas. 2013.

MILIORINI, L. F.; ISHIMINE, V. Métodos de amostragem de águas subterrâneas e aplicabilidade da Portaria 518 do Ministério da Saúde. XIV Encontro Nacional de Perfuradores de Poços e II Simpósio de Hidrogeologia do Sudeste. 2005. Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/assubterraneas/article/view/23241>>. Acesso em: 25 nov. 2023.

Portaria MS nº. 518/2004. Ministério da Saúde. 2005. Disponível em: <https://bvsms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/portaria_518_2004.pdf>. Acesso em: 18 nov. 2023.

PULS, R. W.; BARCELONA, M. J. LOW-FLOW (MINIMAL DRAWDOWN) GROUND-WATER SAMPLING PROCEDURES. 1996. Disponível em: <<http://www.clean.com.br/artigos/sampling/EPA540S95504.pdf>>. Acesso em: 22 nov. 2023.

SANTOS, V. S. Movimentos peristálticos. Brasil Escola. 2022. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/biologia/movimentos-peristalticos.htm>>. Acesso em 26 de novembro de 2023.

SPLabor. O que você deve saber sobre bomba peristáltica. 2023 Disponível em: <<https://www.splabor.com.br/blog/bombas-peristalticas-2/o-que-voce-deve-saber-sobre-bomba-peristaltica/>> Acesso em: nov. 2023.

VENTURO - Análises Ambientais. Amostragem por baixa vazão. 2020. Disponível em: <<https://www.venturoanalises.com.br/amostragem-baixa-vazao>>. Acesso em: 23 nov. 2023.