

Delineamento de plumas de contaminação através de recursos tecnológicos¹

Delineation of contamination plumes through technological resources

Delimitación de plumas de contaminación mediante recursos tecnológicos

Recebido: 20/03/2026 | Revisado: 25/03/2026 | Aceitado: 25/03/2026 | Publicado: 26/03/2026

Luísa Helena dos Santos Oliveira¹

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5632-2023>

Universidade Federal do ABC, Brasil

E-mail: luisa.oliveira@ufabc.edu.br

João Marcelo Borovina Josko²

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8654-5866>

Universidade Federal do ABC, Brasil

E-mail: marcelo.josko@ufabc.edu.br

Carlos Vinícius de Lima³

Universidade Federal do ABC, Brasil

E-mail: carlosdelima8@gmail.com

Resumo

O gerenciamento de áreas contaminadas e os tratamentos necessários pós derramamentos, em especial dos hidrocarbonetos, são essenciais em uma sociedade cujo desenvolvimento trouxe consigo o uso desses compostos. Cidades como São Paulo, que possuem parques fabris, que por muitos anos funcionaram com pouca ou nenhuma normativa ou fiscalização a despeito do controle de poluentes derramados em solo, possuem um passivo ambiental que precisa ser trabalhado a fim de evitar maiores impactos. Neste sentido, o presente estudo objetiva explorar métodos de visualização espacial para auxiliar no estudo dessas áreas, no que tange ao espalhamento dos contaminantes em solo. Realizou-se uma pesquisa experimental, laboratorial num estudo de abordagem quantitativa com uso de modelagem matemática de fenômenos com recursos computacionais na linguagem de programação Python. O modelo pode ser válido quando os pontos amostrados são previamente conhecidos como sendo as fontes poluidoras ou os pontos de maior concentração do contaminante de interesse, uma vez que delimita a área de influência de uma região que é responsável pela propagação do contaminante.

Palavras-chave: Áreas contaminadas; Métodos de interpolação; Contaminação; Recursos computacionais tecnológicos.

Abstract

The management of contaminated areas and the necessary post-spill treatments, especially of hydrocarbons, are essential in a society whose development has brought with it the use of these compounds. Cities like São Paulo, which have industrial parks that for many years operated with little or no regulation or oversight regarding the control of pollutants spilled on the ground, have an environmental liability that needs to be addressed in order to avoid greater impacts. In this sense, the present study aims to explore spatial visualization methods to assist in the study of these areas, regarding the spread of contaminants in the soil. An experimental, laboratory research was carried out in a quantitative approach study using mathematical modeling of phenomena with computational resources in the Python programming language. The model can be valid when the sampled points are previously known as the polluting sources or the points of highest concentration of the contaminant of interest, since it delimits the area of influence of a region that is responsible for the propagation of the contaminant.

Keywords: Contaminated areas; Interpolation methods; Contamination; Technological computational resources.

Resumen

La gestión de áreas contaminadas y los tratamientos posteriores a los derrames, especialmente de hidrocarburos, son esenciales en una sociedad cuyo desarrollo ha traído consigo el uso de estos compuestos. Ciudades como São Paulo, que cuentan con parques industriales que durante muchos años operaron con escasa o nula regulación o supervisión respecto al control de los contaminantes derramados en el suelo, tienen una responsabilidad ambiental que debe abordarse para evitar mayores impactos. En este sentido, el presente estudio tiene como objetivo explorar métodos de visualización espacial para ayudar en el estudio de estas áreas, en relación con la dispersión de contaminantes en el

¹ CECS, UFABC – Universidade Federal do ABC, Brasil.

² CMCC, UFABC – Universidade Federal do ABC, Brasil.

³ EAU, UFABC – Universidade Federal do ABC, Brasil.

suelo. Se realizó una investigación experimental de laboratorio en un estudio de enfoque cuantitativo utilizando modelado matemático de fenómenos con recursos computacionales en el lenguaje de programación Python. El modelo puede ser válido cuando los puntos muestreados se conocen previamente como fuentes de contaminación o puntos de mayor concentración del contaminante de interés, ya que delimita el área de influencia de una región responsable de la propagación del contaminante.

Palabras clave: Áreas contaminadas; Métodos de interpolación; Contaminación; Recursos computacionales tecnológicos.

1. Introdução

O crescente uso de hidrocarbonetos e seus mais variados usos, trouxe como consequência negativa uma geração de efluentes altamente poluidores (Moreira e Dourado, 2005), seja por processos fabris ou pelas inúmeras formas de vazamento possíveis.

Os hidrocarbonetos são NAPLs (*non aqueous phase liquids*, compostos de fase líquida não aquosa), que podem ser separados em dois grandes grupos, a partir de sua densidade, que irá determinar seus comportamentos básicos em caso de derramamento no solo, que são:

- LNAPL - *light non aqueous phase liquids* (Compostos de Fase Líquida Leve Não Aquosa), caracterizados por serem mais leves que a água. Compostos como Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xileno (BTEX), componentes da gasolina
- DNAPL - *dense non aqueous phase liquids* (Compostos de Fase Líquida Leve Não Aquosa), caracterizado por serem mais densos que a água.

Dentre todas as contaminações por hidrocarbonetos, as relacionadas às atividades de refinarias de petróleo, armazenamento e distribuição de combustíveis representam uma grande fonte de contaminação.

Os LNAPL são comuns na produção, refino e distribuição do petróleo. São os mais presentes em derramamentos dentro da cadeia produtiva de produtos como gasolina e diesel (Guerra e Marques, 2017).

Segundo o Relatório Anual de Áreas contaminadas (Cetesb, 2021), o Estado de São Paulo possui 6434 áreas contaminadas com suas fontes distribuídas entre atividades comerciais, industriais, resíduos, postos de combustíveis e acidentes, fontes desconhecidas ou agricultura. Dentre essas, 4523 pontos de contaminação (70%) são oriundos de postos de combustíveis, evidenciando a presença de LNAPL no solo distribuído pelo estado.

Investigações de contaminação por hidrocarbonetos no solo não são simples, devido sua heterogeneidade e influência no comportamento do contaminante. Dado o exposto e, pensando em auxiliar as análises ambientais sobre derramamentos para que possam ser mais rápidas e assertivas, a visualização do estado atual da contaminação desempenha um papel importante, pois partindo de um modelo espacializado do estado de contaminação, é possível ser mais objetivo sobre qual método de remediação utilizar.

O comportamento de contaminantes em subsuperfície é influenciado por processos físicos, químicos e biológicos (Chapelle, 1992), sendo os dois últimos difíceis de serem analisados separadamente, tendo alguns autores, inclusive, usando o termo bioquímico ou até bio-físico-químico.

De acordo com Valentin (2006), os hidrocarbonetos, no geral, podem formar cinco fases de contaminação:

- Fase Livre:
 - Apresenta mobilidade, podendo ser bombeado.
- Vapor:
 - Parte volatilizada, se encontra na zona não saturada do solo.
- Adsorvida:

- Moléculas do composto interagem físico-quimicamente, prendendo-se à superfície das partículas do solo. A interação irá variar com o tipo do solo. Solos mais finos, com maior teor de argila, tem um poder maior de interação com os hidrocarbonetos;
- Distribui-se na zona de dispersão, entre a fonte de contaminação e o lençol freático (Guerra e Marques, 2017);
- Residual:
 - Agrupamentos isolados no meio poroso, não tendo mobilidade;
 - Distribui-se na zona de dispersão, entre a fonte de contaminação e o lençol freático (Guerra e Marques, 2017).
- Dissolvida:
 - Parcela que se dissolve na água subterrânea.

O comportamento dessas fases está ilustrado nas Figuras 1 e 2. No caso dos LNAPLs, não há dissolução em água, por serem compostos imiscíveis. A fase livre dos LNAPLs migra através da zona não saturada até a zona de capilaridade, posicionada logo acima do nível d'água. Nesta região, há um aumento da saturação do solo, logo, o LNAPL, por ser mais leve que a água, tende a parar sua migração vertical e migrar horizontalmente, na direção do fluxo de água (Hasan, 1996).

Figura 1 - Comportamento de LNAPL e DNAPL no solo.

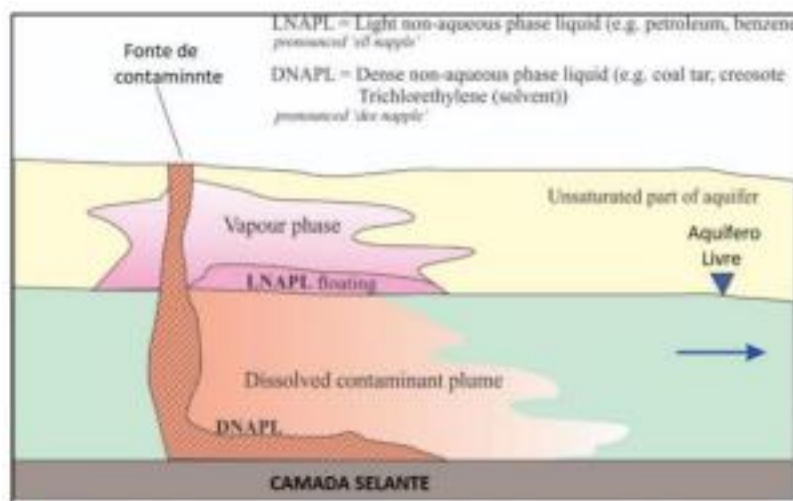
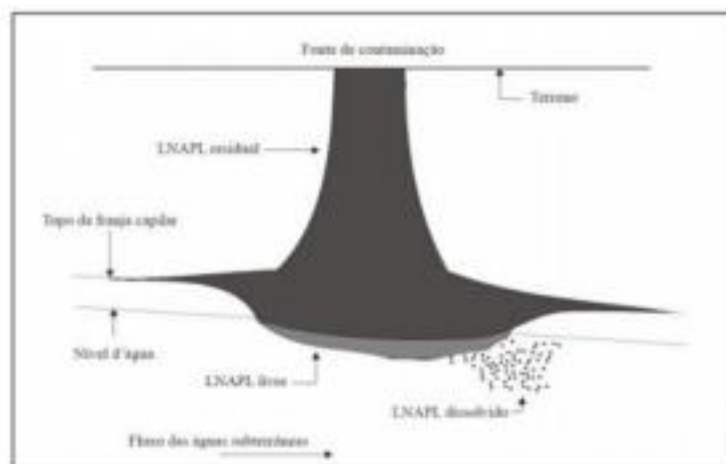


Figura 2 - Comportamento do LNAPL no solo.



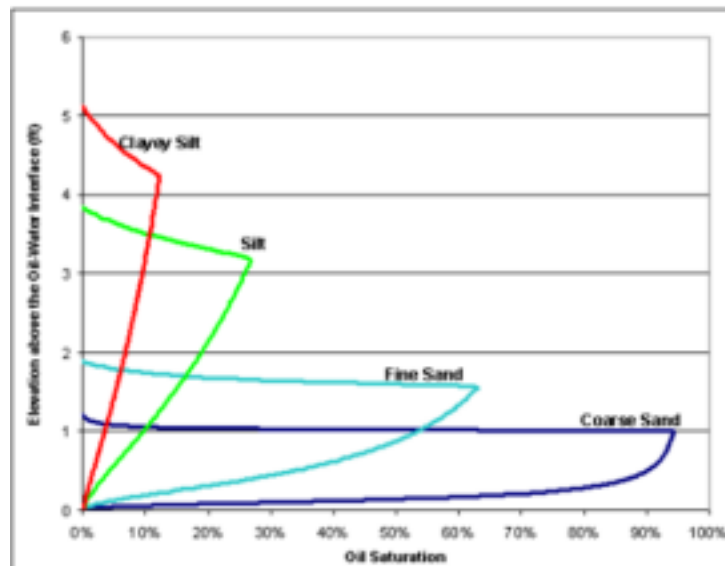
As primeiras tentativas de estimar o volume de LNAPL através da espessura de fase livre medida no poço, considerava que a saturação de LNAPL de 100% ou 100% menos a saturação de água residual (Hampton, 1989).

Com o avanço de estudos e pesquisas, Van Dam (1967) mostrou que a espessura medida com a interface seria apenas uma espessura aparente, diferente da espessura de fase livre real encontrada no solo. Alguns anos mais tarde, Zilliox e Muntzer (1975), relacionou a espessura real no subsolo à espessura aparente medida no *interface*, que irá depender do tamanho do grão do solo, entre outros fatores.

O modelo desenvolvido por Charbeneau (2003), traz relações fundamentais de saturação e pressão de capilaridade, é muito utilizado e é a base do software do *American Petroleum Institute* (API, 2007). O modelo pode estimar com maior precisão o volume de LNAPL a partir de medições feitas em poços de monitoramento.

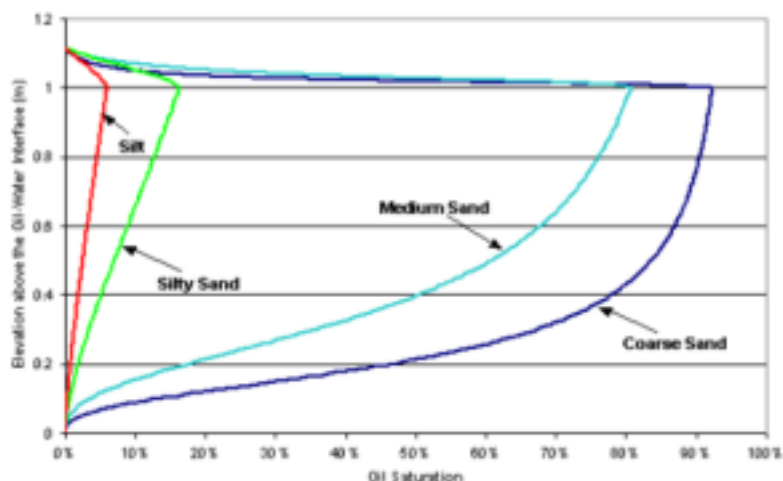
O modelo API (2007) ilustrado na Figura 3, usa, dentre outros fatores, a curva de pressão capilar, abordada com mais detalhe na seção 3.3, e a relação saturação/pressão capilar dos sistemas água-LNAPL, ilustrado na Figura 4. As funções são aplicáveis em meios porosos com distribuição de poros unimodal.

Figura 3 - Elevação por capilaridade, de óleo, em diferentes solos.



Fonte: API (2004).

Figura 4 - Distribuição da saturação de óleo na fase livre em diferentes solos.



Fonte: API (2004).

A flutuação sazonal do nível d'água em decorrência da alternância entre períodos secos e chuvosos, induz a constante redistribuição horizontal do LNAPL, uma vez que ele é mais leve que a água (Elias, 2018). Junto com a capilaridade, terão um papel importante no aumento da fase adsorvida do solo, através do fenômeno chamado de traçamento. A interação eletrônica entre o contaminante e as partículas do solo passa a ter um papel mais importante que a gravidade na determinação da posição do contaminante na subsuperfície (Lenhard & Parker, 1990).

A redistribuição do LNAPL deve ser adequadamente avaliada para seleção adequada do programa de remediação (Van Geel & Sykes, 1997). O traçamento do hidrocarboneto restringe sua mobilidade, impedindo que técnicas convencionais de tratamento por bombeamento possam ser utilizadas com resultados satisfatórios (Chabernau, 2007).

As técnicas convencionais utilizadas para estudo de áreas contaminadas deixam lacunas em relação à elaboração de modelos conceituais que delimitam tridimensionalmente a contaminação, principalmente a região em que houve traçamento de contaminantes. Isso se deve à ausência de parâmetros confiáveis de identificação da contaminação de maneira detalhada e contínua na direção vertical. (Niessner et al., 1991).

Denomina-se capilaridade o fenômeno que faz com que a água suba, acima do nível da pressão atmosférica, num tubo fino. Quanto mais fino o tubo, maior será a elevação, por conta da interação eletrostática da água com as paredes desse tubo.

O fenômeno pode acontecer em solos cuja espessura média das partículas seja pequena. Assim como no caso do tubo, a elevação por capilaridade será inversamente proporcional ao tamanho das partículas que, no solo, passam a agir como pequenos tubos.

Quanto menor forem os poros no solo, maior a força de capilaridade, sendo que a curva depende do tipo de solo e umidade. O sobe e desce do freático, causado pela variação das chuvas ao longo do ano, somado com a ação de capilaridade tem a ação de traçar o contaminante no solo.

Nesse contexto, o intuito desse trabalho é estudar meios que facilitem a visualização de plumas de contaminação de LNAPL (*Light Non Aqueous Phase Liquid*) cuja fonte são postos de gasolina.

Para isso, partindo de resultados obtidos através da análise de amostragem de água subterrânea, cujos dados sejam dotados de coordenadas espaciais x , y e da concentração do contaminante de interesse Z , espera-se avaliar diferentes métodos de interpolação e suas possíveis aplicações para obtenção do delineamento de plumas de contaminação, a fim de facilitar posteriores análises e propostas de remediação ou contenção da contaminação.

Este artigo objetiva explorar métodos de visualização espacial para auxiliar no estudo dessas áreas, no que tange ao espalhamento dos contaminantes em solo.

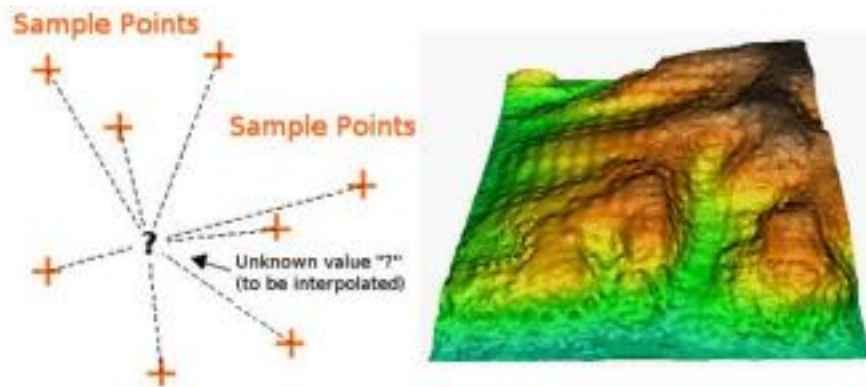
2. Metodologia

Realizou-se uma pesquisa experimental laboratorial num estudo de abordagem quantitativa (Pereira et al., 2018; Risemberg et al., 2026), com uso de modelagem matemática de fenômenos com recursos computacionais na linguagem de programação Python (Araújo & Oliveira, 2024).

2.1 Interpolação por Krigagem

Um dos métodos para interpolação de dados espaciais a partir de pontos conhecidos, dotados de coordenadas espaciais x , y e Z (concentração dos contaminantes de interesse) é o “*Kriging*”, que estima o valor de um atributo espacialmente a partir do cálculo da média ponderada dos pontos amostrados e conhecidos, conforme ilustrado na Figura 5.

Figura 5 - Ilustração interpolação espacial.



Fonte: Mitas & Mitasova (1999).

Krigagem ou *Kriging* é um método de regressão linear usado em geoestatística para interpolação de dados em superfícies. O método tem como objetivo o menor erro possível na predição, através da atribuição de pesos distintos aos pontos conhecidos. Quando aplicado, Gotway et al. (1996) concluiu que, trabalhando com atributos de solo, a Krigagem proporciona melhores resultados que outros métodos de interpolação linear, como o método do inverso da distância.

A Krigagem leva em consideração fatores como:

- Proximidade das amostras: quanto mais próximo de um ponto amostral, maior a influência do ponto conhecido. Após um certo limite, que deve ser determinado de acordo com o tipo de dado a ser interpolado, a influência do ponto conhecido tende a zero;
- Redundância dos dados amostrais: em situações em que haja concentração espacial de amostras conhecidas, passa-se a adotar pesos menores para cada uma delas, de modo a evitar que essa área super-amostrada tenha influência exagerada sobre as demais.

O método utiliza para projeção um Semi-variograma, que estima o grau de dependência espacial da amostra conhecida. O gráfico é construído em função da distância a um ponto. Um dos pressupostos do modelo é que existe uma distância (h) do ponto conhecido em que a influência do ponto a mostrado tende a ser insignificante. O racional dessa influência está exposto na Figura 6.

Figura 6 - Modelo de Semivariograma.



Fonte: Mello et al. (2005)

2.2 Interpolação pela função Scipy Interpolate

Através da linguagem computacional *Python*, é possível utilizar a biblioteca *Scipy* a função *interpolate*, a qual permite trabalhar com alguns métodos distintos de interpolação: linear, cúbico e quártico, nos quais são utilizadas equações polinomiais de primeiro, terceiro e quinto grau, respectivamente, para a criação de uma curva que consiga fazer a interpolação mais suave possível entre os pontos conhecidos.

3. Resultados e Discussão

3.1 Análise dos métodos de interpolação

3.1.1 Resultados da Interpolação por Krigagem

A ideia inicial do trabalho foi utilizar a biblioteca chamada *Pykrige*, que utiliza como base o método da Krigagem, em *Python*, para simulação da pluma e o *Matplotlib* para a visualização dos resultados. Porém, foram encontrados problemas com o uso da biblioteca. Em diversas situações hipotéticas, como a ilustrada a seguir na Tabela 1 e na Figura 7, o resultado da interpolação foi o preenchimento dos pontos desconhecidos com valores constantes e iguais.

Como, em tese, a Krigagem deveria estabelecer uma distância h , em que a influência do ponto conhecido passa a não ter significância, aqui não foi delimitado um ponto em que a concentração dos contaminantes fosse igual a zero.

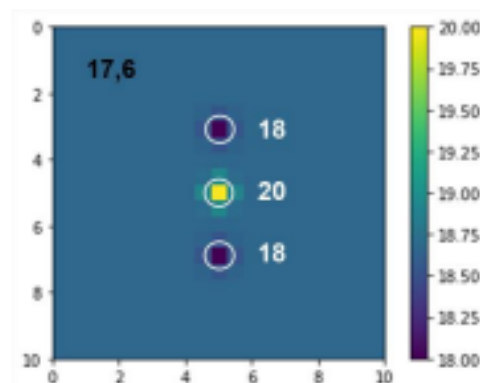
Para o exercício, foram utilizados três pontos, exibidos na Tabela 1 e circulos de branco na imagem plotada, com seus valores de contaminação ilustrados, conforme Figura 7.

Tabela 1 - dados utilizados para teste da interpolação Kriging.

X	Y	Z
5	3	18
5	5	20
5	7	18

Fonte: Autoria própria.

Figura 7 - Interpolação Kriging dos dados da Tabela 1 pela biblioteca *PyKrige*.



Fonte: Autoria própria.

A expectativa era a formação de algum contorno espacial, que indicasse ao mínimo um decaimento da concentração de poluentes exibida entre o ponto central e os demais pontos conhecidos em seu entorno. Ao invés disso, o retorno foi uma matriz com todos os seus pontos iguais a 17,6. Ou seja, não houve decaimento ou formação de pluma reconhecível. O mesmo cenário foi encontrado em diversas simulações, inviabilizando o uso do método.

É importante citar que esse resultado, porém, não invalida o uso da Krigagem como meio interpolador, apenas expõe uma dificuldade encontrada nesse trabalho com a biblioteca *PyKrige*.

3.1.2 Resultados da interpolação pela função *Scipy Interpolate*

Para todos os exercícios a seguir, partindo do pressuposto que as interpolações presentes em cada um dos métodos são puramente matemáticos, que não dispõem de uma abordagem física, foi definido que os limites da projeção sejam iguais a zero, a fim de evitar que a curva interpolada tenha tendência crescente em direções em que não haja pontos conhecidos. Isso seria o equivalente a dizer que a contaminação se encontra totalmente dentro do espaço analisado.

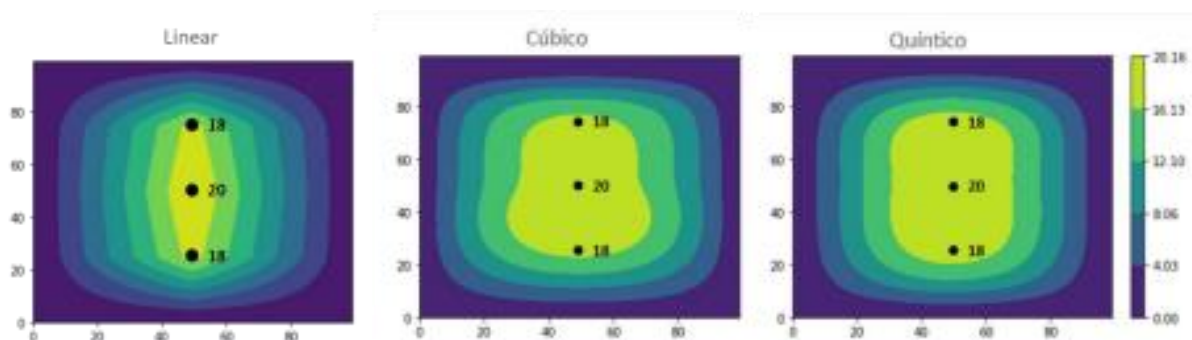
O primeiro exemplo utiliza como base os mesmos valores conhecidos que foram anteriormente testados pelo método de Kriging, com coordenadas expressas na Tabela 2, agora com as interpolações possíveis dentro da biblioteca *Scipy*. Os resultados das interpolações estão na Figura 8.

Tabela 2 - Coordenadas Teste.

X	Y	Z
50	50	20
50	25	18
50	75	18

Fonte: Autoria própria.

Figura 8 - Interpolações dos dados do Quadro 2.



Fonte: Autoria própria.

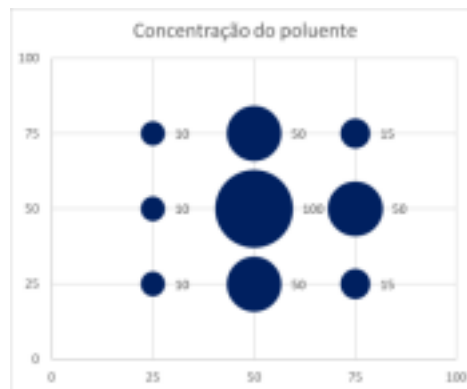
O mesmo teste, aqui descrito como Exemplo 2, foi feito com outra série de dados expressos na Tabela 3, que tem sua disposição e concentração ilustradas pelo Gráfico 1, bem como a interpolação feita por cada um dos três métodos disponíveis, ilustrada pela Figura 9:

Tabela 3 - Discriminação dos pontos utilizados no Exemplo 2.

X	Y	Concentração
25	25	10
25	50	10
25	75	10
50	25	50
50	50	100
50	75	50
75	25	15
75	50	50
75	75	15

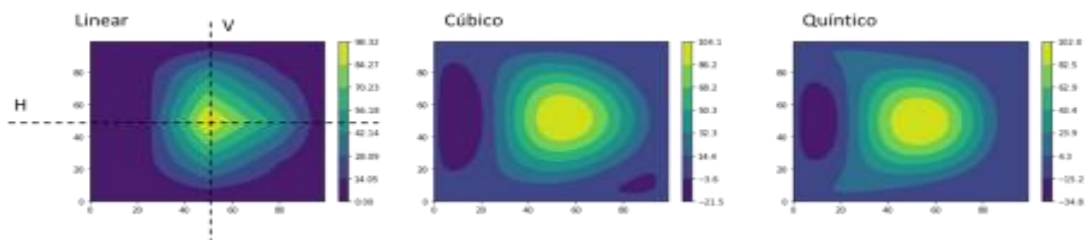
Fonte: Autoria própria.

Gráfico 1 - Distribuição espacial dos dados do Exemplo 2.



Fonte: Autoria própria.

Figura 9 - Interpolações obtidas por método.

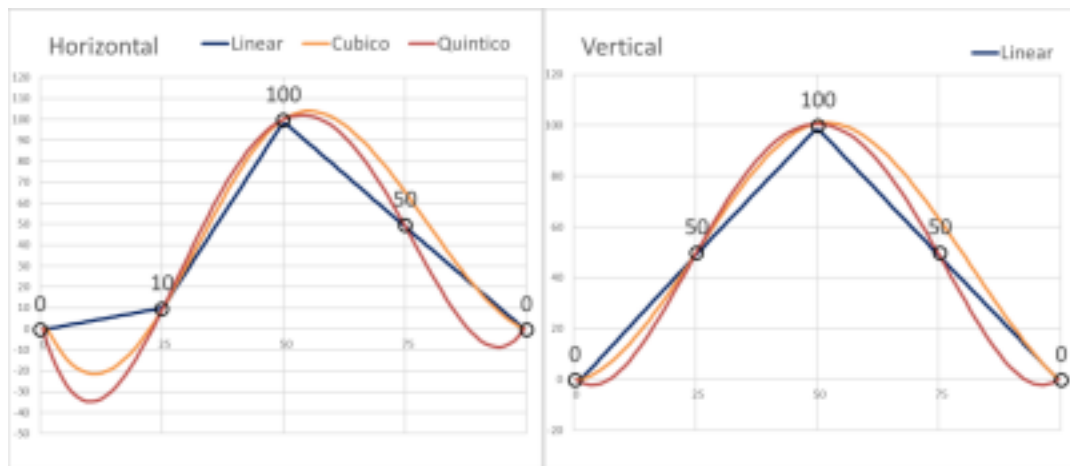


Fonte: Autoria própria.

Dos dois exemplos, é possível dizer que o método de interpolação é capaz de criar uma figura que se assemelha a uma pluma de contaminação, que são discutidas no decorrer desse trabalho.

As imagens frutos da interpolação são compostas de matrizes de dados de tamanho $n \times n$, coloridos de acordo com seus intervalos de valor, a fim de criar o visual de pluma. Portanto, é possível examinar através de um vetor unidimensional uma seção horizontal ou vertical, dentro da matriz, recortado conforme indicado com as linhas pontilhadas, indicadas pelas letras H e V sobre a imagem da plotagem linear, da Figura 10, a fim de obter comparações entre os métodos, ilustradas pelo Gráfico 2 abaixo.

Gráfico 2 - Corte horizontal e vertical da matriz de dados.

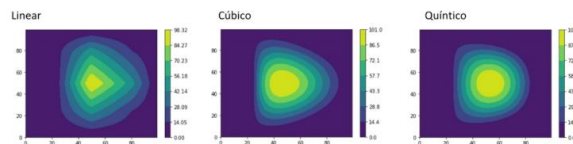


Fonte: Autoria própria.

É possível notar que as curvas são caracterizadas pelo polinômio de grau utilizado em cada um dos métodos. Os pontos conhecidos estão circulos e com seus valores destacados.

Com exceção da interpolação linear, que é construída linearmente entre cada ponto conhecido, a cúbica e quinta são compostas pela função que mais se aproxima dos pontos dados, gerando algumas pequenas divergências entre o valor estimado e o conhecido, como é o caso da projeção cúbica. Por se tratar de funções matemáticas, as curvas podem, inclusive, ter valores negativos, o que não tem sentido físico. Valores negativos poderiam ser corrigidos *à posteriori*, sendo substituídos por zero, como na Figura 10.

Figura 10 - plotagens com correção de valores negativos.



Fonte: Autoria própria.

3.2 Inclusão do fluxo de água na projeção

Todas as interpolações mostradas até aqui foram fruto de equações matemáticas que buscavam, em resumo, preencher o espaço vazio entre pontos conhecidos. Esse preenchimento, no entanto, não necessariamente faz jus às interações físico-químicas presentes no local de investigação.

A inclusão do fluxo d'água como variável física do modelo é de suma importância, pois pode ajudar a delinear com mais precisão o alcance que o contaminante tem no terreno e indicar a direção que pode tomar. Com isso é possível ser mais assertivo na escolha do método de remediação.

A tentativa de incorporação dessa variável passou pelo delineamento de uma parábola, onde pontos no interior dessa parábola são mantidos e os externos são excluídos da projeção. Para esse trabalho a parábola foi função da velocidade média do fluxo d'água em torno da região contaminada. Aqui descrita genericamente como:

$$y = -vx^2 + h + \frac{h}{v} \text{ ou}$$

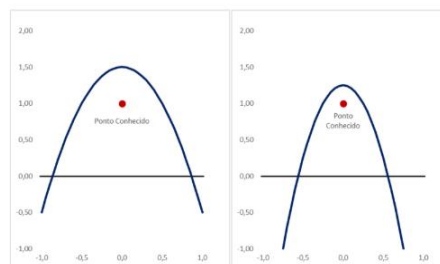
$$y = -vx^2 + h \left(1 + \frac{h}{v}\right)$$

Onde v é a velocidade média do fluxo d'água e h a localização do ponto conhecido. Esse modelo implica que quanto maior a velocidade, menor será a tendência de espalhamento tanto no sentido inverso quanto perpendicularmente ao fluxo d'água, portanto mais estreita a parábola tenderá a ser, prevendo um menor deslocamento perpendicular ao fluxo dado carreamento das partículas de contaminante pela água.

O termo h/v tem a função de acrescentar um componente constante na equação a fim de aumentar a distância do vértice da parábola do ponto de referência. Esse termo infere a possibilidade do contaminante se deslocar no sentido inverso ao fluxo subterrâneo. A admissão dessa possibilidade se dá pela não conformidade no fluxo subterrâneo, presumindo uma sazonalidade natural da quantia de água disponível para transporte. Como o modelo atua com o fluxo médio, é uma maneira, ainda que primordial, de considerar tal variabilidade.

O racional para essa demarcação está ilustrado na Figura 11. À esquerda, a parábola plotada com $v = 2$, à direita $v = 4$. Aqui as velocidades são adimensionais, por se tratar de um modelo ainda embrionário, com necessidade de evolução em estudos de campo mais elaborados.

Figura 11 - Racional parábola de delimitação da projeção.

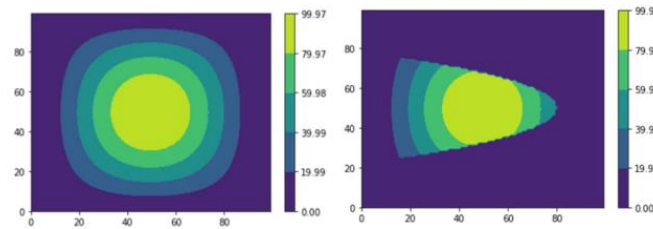


Fonte: Autoria própria.

Como esse recorte ainda é um protótipo, não há rigor científico apoiado na literatura para delimitação matemática tanto da abertura quanto da altura da parábola, sendo um ponto de melhoria para futuros trabalhos.

Ainda são limitações dessa projeção a determinação da direção do fluxo d'água, só sendo possível fazer o recorte nas direções horizontal e vertical. Além de funcionar apenas em situações em que se tenha apenas um ponto conhecido, uma vez que a parábola é inteira traçada em relação a um único ponto. Esse racional está exposto na Figura 12, em que a imagem à esquerda representa a interpolação da contaminação de um ponto conhecido e à direita o recorte provocado pela parábola. Tal situação de investigação é uma simplificação, que necessitaria futuras explorações para uso em campo.

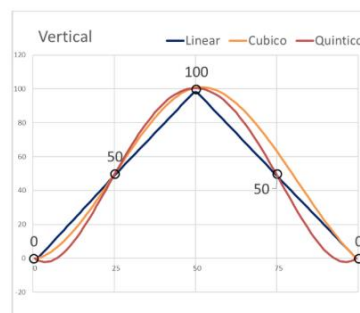
Figura 12 - Exemplo de projeção delimitada pela parábola descrita.



Fonte: Autoria própria.

O fato das interpolações cúbicas e quinticas utilizadas pelo método *Scipy Interpolate* utilizarem equações matemáticas que busquem fitar o maior número de pontos disponíveis, a depender da disposição dos pontos conhecidos e seus valores, a curva estimada pode apresentar valores distintos em pontos cujo valor já se conhece, ilustrado pelo Δ no Gráfico 3. Fisicamente, esse efeito tem o potencial de acrescentar uma camada de erro indesejada e que pode enviesar as análises.

Gráfico 3 - Erro incremental da interpolação.



Fonte: Autoria própria.

Por outro lado, diferentemente dessas duas, a interpolação linear funciona “ligando” os dois pontos conhecidos linearmente. Ou seja, não haverá erro adicional incrementado pelo método de interpolação. Com isso, o fato de “conectar” os pontos conhecidos linearmente, foi possível estimar uma mancha de contaminação com decaimento gradual e sem incremento de erros.

4. Considerações Finais

Para uma melhor estimativa, faz-se necessário uma distribuição espacial das amostragens de campo para que consigam mapear o espalhamento da contaminação, e assim, delimitar com maior confiança seus limites. Uma limitação deste trabalho foi a inclusão do efeito que o fluxo de água tem sobre a mancha de contaminação em situações com mais de um ponto conhecido. Como sugestão: explorar a criação de múltiplas delimitações de espalhamento, uma para cada ponto conhecido e a posterior união de cada uma das delimitações, a fim de ter o efeito de arraste dos contaminantes pelo fluxo de água considerado para todo o espaço analisado.

No entanto, esse modelo pode ser válido quando os pontos amostrados são previamente conhecidos como sendo as fontes poluidoras ou os pontos de maior concentração do contaminante de interesse, uma vez que delimita a área de influência de uma região que é responsável pela propagação do contaminante.

Além disso, fazem-se necessários estudos que possam delimitar uma distância (h) em que a influência do ponto

amostrado deixa de ser significativa. Uma melhor estimativa de pluma tende a estar positivamente correlacionada com a densidade de pontos amostrados no terreno. Ademais, é necessária a comparação do modelo teórico apontado por esse trabalho com outros métodos, a fim de se validarem premissas e aperfeiçoar o resultado.

Referências

- Araújo, A. & Oliveira, M (2024). *Modelagem Computacional com Web Vpython*. Editora LF Editorial. ISBN-13: 978-6555634587.
- CETESB. (2020). *Relatório de Áreas Contaminadas e Reabilitadas no Estado de São Paulo 2020*. São Paulo.
- Chapelle, F. H. (1992). *Groundwater microbiology & geochemistry* – New York . John Wiley & Sons Inc. 424 p.
- Charbeneau, R. J. (2003). *Models for design of free-product recovery systems for petroleum hydrocarbon liquids*. American Petroleum Institute.
- Gotway, C. A., Ferguson, R. B., Hergert, G. W. & Peterson, T. A. (1996). Comparison of Kriging and Inverse-distance methods for mapping soil parameters. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60:1237-47.
- Hampton, D. R. (1989). *Laboratory investigation of the relationship between actual and apparent product thickness in sands*. Pacific Section of AAPG Publisher.
- Hasan, S. E. (1996). *Geology and Hazardous Waste management*. Pentice-Hall. Nova Jersey.
- Lenhard, R. J. & Parker, J. C. (1990). Estimation of free hydrocarbon vol-ume from fluid levels in monitoring wells. *Groundwater*. 28(1), 57-67.
- Marques, E. M. & Guerra, A. J. T. (2017). *Solos contaminados por hidrocarbonetos de petróleo - artigo*. Universidade de Brasília. <http://lsie.unb.br/ugb/sinageo/7/0109.pdf>.
- Mello, J. M., Batista, J. L. F., Ribeiro, P. J. O. & Oliveira, M. S. (2005). Ajuste e seleção de modelos espaciais de semivariograma visando à estimativa volumétrica de *Eucalyptus grandis*. *Scientia Forestalis/Forest Sciences*. 69, 25–37.
- Mitas, L. & Mitasova, H. (1999). *Spatial Interpolation*. In: P.Longley, M.F. Goodchild, D.J. Maguire, D.W.Rhind (Eds.), *Geographical Information Systems: Principles, Techniques, Management and Applications*, Wiley.
- Moreira, C. A. & Dourado, J. C. (2005). Análise de contaminantes de fase líquida não aquosa (NAPLs) por aplicação do método Eletromagnético Indutivo (EM). *Revista Brasileira de Geofísica*. 23(3), 213-20.
- Niessner, R. et al. (1991). Fibre-optic sensor for the determination of polynuclear aromatic hydrocarbons with time-resolved, laser-induced fluorescence. *Analytica Chimica Acta*. 255(2), 231-43.
- Pereira et al. (2018). *Metodologia da pesquisa científica*. [Free ebook]. Editora da UFSM.
- Risemberg, R. I. C., Wakin, M., & Shitsuka, R. (2026). A importância da metodologia científica no desenvolvimento de artigos científicos. *E-Acadêmica*, 7(1), e0171675. <https://doi.org/10.52076/eacad-v7i1.675>.
- Valentin, L. A. (2006). *Boas práticas de laboratório: aplicação para avaliar o impacto ambiental causado pelo derrame de derivados de petróleo*. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- Van Dam, J. (1966). *The migration of hydrocarbons in a water bearing stratum*. Stichting Concawe.
- Van Geel, P. J. & Sykes, J. F. (1997). The importance of fluid entrapment, saturation hysteresis and residual saturations on the distribution of a lighter-than-water non aqueous phase liquid in a variably satu-rated sand medium. *Journal of Contaminant Hydrology*. 25(3-4), 249-70.
- Zilliox, L. & Muntzer, P. (1975). *Effects of hydrodynamic processes on the development of groundwater pollution: Study on physical models in a saturated porous medium*. Progress in Water Technology.