

Diretrizes para dimensionamento da técnica de S-ISCO utilizando Persulfato de Sódio

Introdução

A Oxidação Química *In-Situ* (ISCO) desponta como relevante opção para destruição de massa de contaminantes nos *hotspot* com riscos delimitados, a fim de eliminá-los em curto prazo. A utilização de surfactantes, especialmente nas áreas com fase oleosa retida e fase livre (LNAPL), tem a capacidade de aprimorar a técnica de oxidação, caracterizando a técnica S-ISCO. Essa técnica apresenta desafios para viabilização em pequena escala – como o comércio varejista de combustíveis - devido aos custos envolvidos nas etapas do ensaio de bancada e teste piloto em campo, além das dificuldades e incertezas na obtenção dos índices físicos nas profundidades mais elevadas. No Brasil, a Decisão de Diretoria (DD) N° 038/2017/C, de 07 fevereiro de 2017 da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) foi pioneira ao requisitar os ensaios de bancada e piloto de modo a dimensionar o Projeto Executivo do Sistema de Remediação (item 4.2.1.5). Portanto, o objetivo deste trabalho é indicar os requisitos específicos sobre o projeto de remediação utilizando a técnica S-ISCO de modo a atender a DD, de modo a atingir a reabilitação da área, ou seja, atingir as metas de remediação, que é quando após a campanha de injeção (no curto prazo), as concentrações das substâncias químicas de interesse estejam abaixo das concentrações máximas aceitáveis, calculadas através da análise de risco à saúde humana, nas matrizes de interesse (solo, água e vapores). As metas de remediação estão alinhadas com os objetivos de qualidade definidos para a proteção dos receptores pela legislação aplicável (municipal, estadual e/ou federal).

Objetivos

A realização desses ensaios tem sido prevista na legislação (CETESB, 2017), que indica o que fazer, sendo as diretrizes de como elaborar o teste piloto e correlaciona-lo com o ensaio de bancada o principal objetivo desse trabalho, de modo a servir de guia que compreende as etapas do teste piloto, ensaio de bancada até a remediação em escala, com foco na reabilitação do site. Na abordagem de aplicação da técnica S-ISCO esse trabalho também tem como objetivo avaliar às características hidrogeológicas do local, as propriedades químicas da matriz contaminada e as características dos contaminantes alvo.

Técnicas de Oxidação para Remediação

De modo geral, a Oxidação Química *In Situ* (ISCO) consiste na injeção de produtos químicos reativos diretamente no local contaminado com o objetivo de degradar rapidamente os contaminantes por meio de reações químicas que promovem a oxidação das espécies de interesse presentes em uma determinada área em espécies químicas menos nocivas, podendo chegar a mineralização completa (ITRC, 2005). A aplicação da solução aquosa contendo os produtos remediadores é geralmente realizada através de haste de injeção cravada à percussão diretamente no solo (*direct push*), porém existem outras alternativas, como poços de injeção, galerias de infiltração, mistura diretamente no solo (*soil mixing*) quando há possibilidade de escavações, dentre outras (Siegrist et al., 2011). O documento ITRC (2005) é um documento técnico e de referência manual que fornece informações valiosas sobre princípios e práticas da ISCO, experiências de campo e requisitos regulatórios. Os autores Siegrist et al. (2011) relatam uma visão geral da ISCO e sua evolução. Existem vários oxidantes com diferentes formulações, sendo os mais comuns utilizados no passado recente: Peróxido de hidrogênio; permanganato de potássio ou sódio; ozônio e mais recentemente o persulfato de sódio, sendo também possível a combinação deles. O persulfato de sódio tem se apresentado o mais eficiente, porém a forma de ativação influencia diretamente nos resultados. O uso de agente oxidante (Persulfato de Sódio) ativado através do produto liberador gradativo de oxigênio (Peróxido de Cálcio) promove a atuação concomitante na redução das concentrações de fase dissolvida dos compostos orgânicos, como hidrocarbonetos, PAHs, PCBs, solventes e explosivos, dentre outros, aumenta o teor de oxigênio e mantém o pH alcalino, condição de oxidação com menores impactos aos processos microbiológicos subsequentes no meio (Sutton et al., 2011). Assim como toda técnica, a oxidação também apresenta limitações, especialmente quando existe LNAPL (fase livre) hidraulicamente removível com espessuras mensuráveis substanciais, embora sua aplicação possa permitir aumentar a sustentabilidade das abordagens tradicionais de remediação, reduzindo o tempo do bombeamento - *Pump and Treat*. Portanto é de se considerar a S-ISCO após a fase onde as técnicas convencionais apresentam limitações, com recuperação de LNAPL insuficiente do P&T/MPE/DPE/SVE, onde a massa de contaminantes predominantemente está retida no solo e/ou dissolvida na água subterrânea.

Crítérios para Aplicação da Técnica ISCO

Quanto as condições hidrogeológicas, a heterogeneidade do meio é praticamente uma regra, portanto o conhecimento dos diferentes tipos de hidroestratigrafia é de fundamental importância. A técnica ISCO é viável para condutividade hidráulica acima de 10^{-4} m/s, difícil, mas eventualmente possível para hidráulica condutividade abaixo de 10^{-5} m/s, de acordo com os resultados obtidos na etapa de investigação. O segundo passo para avaliação da viabilidade da técnica oxidativa *in situ* é quanto as propriedades químicas da matriz, pois a presença de determinados constituintes podem ter efeitos prejudicial no desempenho da oxidação, devido a capacidade de consumo dos agentes oxidantes através da demanda do próprio meio, sem considerar a presença dos contaminantes. Por esta razão, a técnica ISCO é ideal para locais caracterizados por condutividade elétrica suficientemente baixa (por exemplo, <1000mg/L de cloretos, sulfatos e alcalinidade em carbonado de cálcio). Além disso, é importante salientar que a maior parte do oxidante não é consumida pela reação com o(s) contaminante(s), mas por reação com espécies redutíveis presentes na matriz do solo aquífero, sendo mensurado através da Demanda Total de Oxidantes (TOD) e Demanda de Oxidante do Solo (SOD) que podem ser usados para obter uma rápida avaliação do solo, pois são análises rápidas.

Demanda de Oxidantes no Solo (SOD) e Total (TOD)

Tipicamente, a oxidação (ISCO) é viável para TOD/SOD abaixo de 30,0g/kg de solo, enquanto que este valores quando excedido, a aplicação ISCO não deve ser excluída a priori, mas merece uma avaliação mais aprofundada. Se os dados TOD ou SOD não forem disponíveis, os valores e estimativas apresentados neste documento podem ajudar na determinação para as respectivas unidades hidroestratigráficas com predominância nos diferentes tipos de solo, afim de avaliar a viabilidade técnico/econômica da remediação.

Estimativa dos Crítérios Adotados para ISCO

A caracterização do local deve ser realizada, por um lado, para coletar amostras de solo e águas subterrâneas que serão usadas para as diferentes análises laboratoriais, por outro lado, avaliar os parâmetros hidrogeológicos a serem utilizados para a elaboração do modelo conceitual e projeto de remediação. Para isso, as amostras de solo devem ser coletados até a profundidade em que a contaminação foi encontrada, inclusive com análise do solo na zona saturada, sendo preferível a utilização da técnica de alta resolução HRSC (*High-resolution site characterization*). As estimativas do **Quadro 1** podem ser utilizadas na ausência de dados coletados da área e na profundidade alvo, considerados como médias das literaturas para solos isentos de matéria orgânica, sendo fortemente recomendada a realização dos ensaios e coletas para definição dos valores reais do site, quando possível. Sendo o local caracterizado por diferentes unidades hidroestratigráficas, recomenda-se coletar ao menos uma amostra para cada unidade alvo que será aplicada oxidante ao longo das injeções, e enviada para análise dos índices físicos (granulometria, porosidades total e efetiva, peso específico, fração de carbono orgânico, umidade, etc). A água subterrânea também deve ser coletada dos poços localizados no centro de massa, afim de definir as concentrações de contaminantes na linha de base da remediação, bem como obtenção de amostras de água para utilizar no ensaio de bancada em conjunto com as amostras de solo contaminadas, coletadas na etapa de investigação em alta resolução.

Unidade Hidroestratigráfica	Densidade (ton/m ³)	Porosidade Efetiva	Porosidade Total	SOD (kg/ton)	ROI (m)
Argila	1,4	2,5%	60%	1,00	2,50
Silte Argiloso	1,45	5,6%	51%	0,80	3,00
Areno Siltoso	1,5	6,3%	40%	0,70	3,50
Areno Argilosa	1,53	7,5%	55%	0,90	4,50
Argilo Arenosa	1,57	10,4%	49%	0,80	5,00
Silte	1,58	11,0%	43%	0,70	4,50
Silte Arenoso	1,6	12,4%	40%	0,60	5,00
Areia Fina	1,7	19%	50%	0,60	5,50
Areia Média	1,7	24%	38%	0,50	6,50
Areia Grossa	1,7	28%	25%	0,50	7,00
Cascalho	1,7	24%	30%	0,50	7,50

Quadro 1. Estimativa dos Índices Físicos, Demanda de Oxidantes e Raio de Influência

SOD: Demanda de Oxidantes do Solo para o Persulfato de Sódio; ROI: Raio de Influência para Injeção de Persulfato de Sódio; kg: quilograma; m: metro; ton: tonelada.

Ensaio de Bancada – Demanda de Oxidantes e o Cálculo da Massa

As análises de SOD/TOD marcam o início dos teste de bancada, resultados que são combinados com os obtidos durante a caracterização do local (peso específico) para o cálculo da massa de oxidantes para suprir a demanda de oxidantes (SOD/TOD) para cada ponto e faixa de profundidades (unidades hidroestratigráficas), conforme equação:

$$\text{Massa de Solo Total (tonelada)} = \text{Volume Total (m}^3\text{)} \times \text{Massa Específica do Solo (} \frac{\text{tonelada}}{\text{m}^3}\text{)}$$

$$\text{Massa de Persulfato Mínima para Atender ao SOD/TOD (kg)} = \text{Massa de Solo Total (toneladas)} \times \text{SOD/TOD (} \frac{\text{kg}}{\text{toneladas}}\text{)}$$

Entretanto ainda é necessário o cálculo da massa de oxidantes para efetivamente reduzir as concentrações dos contaminantes a níveis aceitáveis, correlacionada com as eficiências de acordo com a faixa de concentrações de oxidantes a serem avaliadas no ensaio de bancada de tratabilidade. As concentrações a serem ensaiadas necessitam dos volumes (injeção e de água subterrânea), calculados a partir do raio de influência obtido no ensaio piloto ou estimados de acordo com o **Quadro 1**.

Importância das Porosidades para Cálculo dos Volumes

A porosidade efetiva é de fundamental importância para as técnicas de remediação que consistem na injeção de remediadores, como é o caso da oxidação. Esse parâmetro varia sensivelmente em função da área e ao longo da profundidade, de acordo com as diferentes unidades hidroestratigráficas. O volume efetivamente injetado é diretamente proporcional a porosidade efetiva no meio, pois esse volume é conduzido através dos poros (espaços vazios) interconectados, preenchendo-os com a solução remediadora ao longo do processo de injeção. A porosidade total é referente ao espaço vazio total nos poros - conectados e não conectados - sendo estes não conectados, preenchidos com a solução remediadora muitas vezes através da difusividade.

De posse das porosidades, é possível calcular o volume a ser injetado (de um volume poroso) tanto no teste piloto, quanto no projeto de remediação, através da multiplicação da porosidade efetiva pelo volume total, e a equação do volume de água subterrânea (influenciada pela injeção), obtida através da multiplicação do volume total pela porosidade total, para cada unidade hidroestratigráfica.

$$\text{Volume de Injeção (m}^3\text{)} = \text{Volume Total (m}^3\text{)} \times \text{Porosidade Efetiva (\%)}$$

$$\text{Volume de Água Subterrânea (m}^3\text{)} = \text{Volume Total (m}^3\text{)} \times \text{Porosidade Total (\%)}$$

Estão contidos no volume total da área alvo sob influência da injeção o solo, água, ar, em função da espessura alvo da remediação e do raio de influência obtido no teste piloto, ou estimado conforme equação:

$$\text{Volume Total} = \pi \cdot (\text{Raio de Influência})^2 \cdot \text{Espessura Alvo}$$

A equação da porosidade efetiva móvel estimada em campo através do teste piloto pode calculada para cada unidade hidroestratigráfica a partir da equação:

$$\text{Porosidade Efetiva Estimada Piloto} = \frac{\text{Volume de Injeção (m}^3\text{)}}{\pi \cdot (\text{Raio de Influência})^2 \cdot \text{Espessura Alvo}}$$

O ideal é que seja utilizado no projeto do teste piloto, as porosidades obtidas a partir das coletas de amostras para análise dos índices físicos, porém, caso não seja possível a realização de tais coletas, as estimativas do **Quadro 1** pode ser utilizadas, a depender da complexidade do modelo conceitual da área.

Cálculo do Raio de Influência no Teste Piloto

O cálculo do raio de influência pode ser realizado através de análises físico químicas (pH, ORP, OD e Condutividade) realizadas antes, durante e após a realização do teste piloto nos poços de observação localizados a diferentes distâncias do ponto de injeção, embora seja idealmente incluído o parâmetro de análise da concentração de persulfato remanescente no meio. Os resultados de condutividade por exemplo

são submetidos a análise estatística e gráfica, com as curvas dos valores de condutividade monitoradas plotadas afim de se obter a equação da reta que representa o comportamento dos oxidantes na água subterrânea, conforme **Quadro 2**.

Dados Considerados para o Cálculo do ROI		PO-01	PO-02	PO-03
Resultados de Condutividade ($\mu\text{S/cm}$)	Mínimo	414,0	745,0	239,0
	Média	1736,38	2187,28	262,66
	Máximo	>5000,0*	>5000,0*	343,0
Análise Estatística da Condutividade (variação de "n" vezes comparado ao inicialmente identificado)	Varição Média	3,2	1,9	0,1
	Varição Máxima	11,1	5,7	0,4
Distância entre o poço e o ponto de Injeção (m)		2,7	3,6	7,2
Logaritmo Neperiano da Distância (LnD) para Linearização		0,9932	1,2809	1,974'

Quadro 2 – Exemplo da Variação Estatística da Condutividade no Teste Piloto

*Resultado de Condutividade acima do L.O.: Limite Operacional do Condutímetro SD 320 Con 5.000 $\mu\text{S/cm}$ (microsiemes por centímetro); m: metro.

Os dados adquiridos ao longo do monitoramento no teste piloto são representados graficamente para identificação da influência dos parâmetros físico químicos em função da distância do poço de observação em relação ao ponto de injeção. Calcula-se o raio de influência considerando a variação de cada parâmetro observado nos poços e a distância deles em relação ao ponto onde foi executada a injeção. Na regressão linear a variável "y" da equação da reta representará os valores dos parâmetros físico químicos no poço de monitoramento (observação) o qual se encontra a uma distância "x" do ponto de injeção. Sendo assim, "x" representa o raio de influência (r) enquanto "y" refere-se à influência ao longo da distância. O raio de influência máximo é obtido até o ponto onde a influência é nula, ou $y=0$, sendo esse o raio onde a influência é infinitesimal, porém ainda não é o raio de influência efetivo. Com os dados obtidos plotados graficamente é possível determinar a inclinação (a) e a interceptação das retas (b), bem como o coeficiente de correlação que define o quanto essa equação representa a realidade. Onde valores superiores a 95% tendem a representar uma boa estimativa do cálculo do raio de influência. Na **Figura 1** são apresentados os resultados obtidos das variações médias e máximas da condutividade monitorada nos poços de observação, com representação das linhas de tendências e os modelos com melhor ajuste em equações lineares (primeiro grau) e não lineares. A alternativa para equação não lineares obtidas é realizar a linearização, através da aplicação do logaritmo natural no eixo das abcissas (x), que é a distância entre os poços de monitoramento e o ponto de injeção, promovendo uma simplificação na metodologia numérica de resolução das equações bem como melhorando a correlação, refletindo em um maior coeficiente de regressão, importante passo para obter equações representativas e simplificadas afim de calcular o raio de influência efetivo. Com a linearização é possível obter as equações e o respectivo raio onde a influência é infinitesimal, ou seja, o raio máximo obtido de 7,2m, mas esse ainda não é o raio de influência efetivo que é utilizado para aferição das equações que melhor descreve o modelo:

$$y' = -3,0625x' + 6,0798$$

$$x' = \frac{-b}{a} = \frac{-6,08}{-3,062}$$

$$X' = 1,985$$

$$\text{Raio no limite da influência} = x = e^{X'} = e^{1,985} = 7,279\text{m}$$

$$y' = -10,253x' + 20,261$$

$$x' = \frac{-b}{a} = \frac{-20,261}{-10,253}$$

$$X' = 1,976$$

$$\text{Raio de Influência} = x = e^{X'} = e^{1,976} = 7,213\text{m}$$

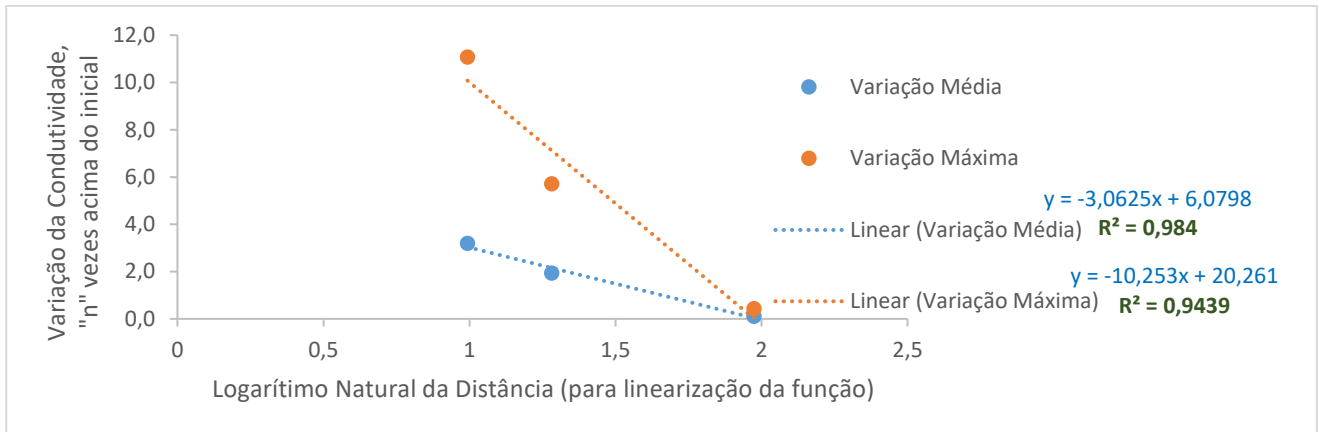


Figura 1 - Gráfico Linearizado Da Variação Da Condutividade No Teste Piloto

Essas equações são importantes para a aferição do cálculo do raio de influência efetivo, obtido a partir dos dados do ensaio de bancada, onde são correlacionadas as informações da quantidade de oxidante remanescente no meio, como a condutividade e a respectiva eficiência obtida no ensaio, a partir de amostra da água subterrânea e solo coletados no local. Para simular melhor o comportamento oxidante esperado no campo, testes de coluna experimentais devem ser realizados. Em particular, estes testes permitem avaliar a entrega real do oxidante e a consequentes potenciais efeitos secundários, bem como para confirmar a eficiência esperada de remoção de contaminantes.

Correlação do Piloto com Ensaio de Bancada

Testes em escala laboratorial podem ser realizados para demonstrar a capacidade da ISCO de degradar os diferentes produtos químicos de interesse. Para isso, além dos testes de SOD e TOD, são realizados ensaios para triagem dos diferentes tipos de oxidantes e formulação, a seleção do tipo e formulação de oxidante mais eficiente, a avaliação de sua estabilidade em contato com o solo e a otimização das condições de operação. Para efeito de cálculo para apresentação da estimativa do raio de influência efetivo, com dados do ensaio de bancada, estimando que uma condutividade de $1.000 \mu\text{S}/\text{cm}$ identificada após a injeção de oxidantes, represente uma concentração de persulfato remanescente de $1\text{g}/\text{L}$. Essa concentração nesse exemplo, foi identificada como a menor cujo eficiência seria satisfatória para atingir as metas de remediação. Portanto o raio de influência a ser utilizado no projeto de remediação é calculado considerando quando a faixa de condutividade saiu de $500 \mu\text{S}/\text{cm}$ para $1.000 \mu\text{S}/\text{cm}$ após as injeções, ou seja, o y seria o dobro do inicial ($y=2$), e o x seria o raio de influência efetivo, conforme equações:

$$y' = -3,0625x' + 6,0798$$

$$2 = -3,0625x' + 6,0798$$

$$x' = \frac{-b}{a} = \frac{-4,08}{-3,062}$$

$$X' = 1,33$$

$$\text{Raio de Influência Efetivo Médio} = x = e^{X'} = e^{1,33} = \mathbf{3,78m}$$

$$y' = -10,253x' + 20,261$$

$$2 = -10,253x' + 20,261$$

$$x' = \frac{-b}{a} = \frac{-18,261}{-10,253}$$

$$X' = 1,781$$

$$\text{Raio de Influência Efetivo Máximo} = x = e^{X'} = e^{1,781} = \mathbf{5,93m}$$

Nesse caso, o valor do raio de influência efetivo será de 3,8 m, podendo chegar até 5,9 m após a injeção do volume máximo alcançado no teste piloto. A influência dos oxidantes tende a chegar até 7,2 m, porém as concentrações remanescente nessa distância, geralmente são as menores eficiências para degradação de todos os contaminantes, aferida no ensaio de bancada.

Projeto Full Scale de Remediação

Os resultados apresentados ao longo do presente estudo possibilitam dimensionar o projeto *Full Scale*, com foco na viabilidade técnica, eficiência (inclusive energética) na continuidade de um processo eficaz de remediação. A massa total de oxidantes pode ser obtida através da soma da massa de oxidantes para atendimento da demanda do solo (SOD) e a demanda para destruição dos contaminantes em fase retida (LNAPL) e dissolvida (TOD), os volumes (de injeção e de água subterrânea) são calculados a partir das equações correlacionadas com as respectivas porosidades (efetiva e total), portanto as respectivas concentrações são calculadas de acordo com as equações:

$$\text{Concentração de Oxidantes na Injeção} \left(\frac{kg}{m^3} \right) \text{ ou } \left(\frac{g}{L} \right) = \frac{\text{Massa de Oxidante (kg)}}{\text{Volume Injetado (m}^3\text{)}}$$

Com objetivo de atingir todos os poros (conectados e não conectados) onde estão os contaminantes, o processo de difusividade precisa ser considerado, sendo avaliado em bancada as concentrações diluídas ao longo do contato com a água subterrânea. Portanto ocorre um gradiente de injeção ao longo do raio de influência obtido no teste piloto, onde as concentrações foram aferidas no ensaio de bancada, conforme equação:

$$\text{Concentração de Oxidantes na Água Subterrânea} \left(\frac{kg}{m^3} \right) \text{ ou } \left(\frac{g}{L} \right) = \frac{\text{Massa de Oxidante (kg)}}{\text{Volume de Água Subterrânea (m}^3\text{)}}$$

De modo geral para cenários convencionais identificados em postos revendedores de combustíveis, concentrações na água subterrânea tende a ser dimensionadas para variarem de 3g/L de oxidantes nas áreas contaminadas com fase dissolvida, até o patamar de 12g/L nos locais com LNAPL (fase livre e películas). Vale ressaltar que tais concentrações são diferentes da concentração de injeção, que geralmente é representada percentualmente, podendo chegar até 10% (ou 100g/L) na injeção.

Cálculo das Concentrações de Surfactantes

O cálculo da massa de surfactantes é elaborado de modo a dimensionar que na água subterrânea esteja com concentrações acima da concentração miscelar crítica (CMC) para as áreas com LNAPL (espessura de fase livre e películas), que para o SURFGEO-E é em torno de 10g/L para formação de microemulsão (de acordo com o fabricante), a ser avaliada eficiência de faixa de concentração no ensaio de bancada, quando viabilizado. Nos locais onde foram impactadas apenas por fase dissolvida na água subterrânea, essa concentração geralmente é dimensionada para melhorar a molhabilidade e otimizar o raio de influência, sendo estimada em 1g/L na água subterrânea, apenas para quebra da tensão interfacial e aumentar a molhabilidade da solução no solo.

$$\text{Concentração de Surfactantes na Injeção} \left(\frac{kg}{m^3} \right) \text{ ou } \left(\frac{g}{L} \right) = \frac{\text{Massa de Surfactantes (kg)}}{\text{Volume Injetado (m}^3\text{)}}$$

$$\text{Concentração de Surfactantes na Água Subterrânea} \left(\frac{kg}{m^3} \right) \text{ ou } \left(\frac{g}{L} \right) = \frac{\text{Massa de Surfactantes (kg)}}{\text{Volume de Água Subterrânea (m}^3\text{)}}$$

Considerações Finais

A partir das massas, volumes e concentrações calculadas para cada ponto de injeção e suas respectivas unidades hidroestratigráficas, são dimensionados tantos pontos quantos forem necessários para englobar todas as plumas de contaminantes identificadas com riscos nas matrizes (fase retida, fase dissolvida e eventualmente películas de LNAPL). A sequência de injeção direct push desses pontos geralmente é iniciada a partir dos pontos mais à jusante da pluma, formando uma barreira reativa para quando injetar no hotspot. Os pontos de injeção podem ser sequenciados de modo a envolver o hotspot e atingir esse por último, quando toda a borda da pluma estiver influenciada e protegida. As injeções tendem a ter uma maior efetividade quando iniciadas na região mais profunda em direção a mais rasa, de modo a montar uma barreira reativa que elimina o risco de migração vertical.

Referências

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Decisão de Diretoria nº 038/2017/C, de 07 de fevereiro de 2017. Dispõe sobre a aprovação do “Procedimento para a Proteção da Qualidade do Solo e das Águas Subterrâneas”, da revisão do “Procedimento para o Gerenciamento de Áreas Contaminadas” e estabelece “Diretrizes para Gerenciamento de Áreas Contaminadas no Âmbito do Licenciamento Ambiental”, em função da publicação da Lei Estadual nº 13.577/2009 e seu Regulamento, aprovado por meio do Decreto nº 59.263/2013, e dá outras providências. Diário Oficial do Estado, São Paulo, 10 fev. 2017.

Eincander, R., Monroe, J. S. Fundamentos de Geologia. CENGAGE Learning

Fetter, C. W. Contaminant Hydrogeology

Freeze, R. A., Cherry, J. A. Groundwater.

ITRC, 2005. Technical and Regulatory Guidance for in situ Chemical Oxidation of Contaminated Soil and Groundwater, second ed. Interstate Technology & Regulatory Council.

Oliveira, A. M., Brito, S. N. A. Geologia de Engenharia. ABGE

Siegrist, R.L., Crimi, M., Simpkin, T.J., 2011. In Situ Chemical Oxidation for Groundwater Remediation. Springer.

Sutton, N.B., Grotenhuis, J.T.C., Langenhoff, A.A., Rijnaarts, H.H., 2011. Efforts to improve coupled in situ chemical oxidation with bioremediation: a review of optimization strategies. J. Soils Sed. 11 (1), 129e140.