

The background of the slide features a topographic map with white contour lines on a dark blue background, located in the upper-left quadrant.

**GEOAMBIENTE**<sup>®</sup>

# Diretrizes para dimensionamento da técnica de S-ISCO

Hermano Fernandes, Ana Cecília Branco Sowinski, Murilo G. da Rocha



**GEOAMBIENTE**®

**Hermano Gomes Fernandes**

**Técnico em Controle Ambiental (CEFET-RN) 2005**

**Atua na Área Ambiental/Consultorias (GAC) desde 2007**

**Engenheiro Químico (UFRN) 2008**

**Mestre em Engenharia Química, Remediação utilizando Persulfato  
(UFRN) 2014**

**Contato:**

[hermano@geoambiente.eng.br](mailto:hermano@geoambiente.eng.br)

**Telefone/Whatsapp (+55) 41 99899 2120**

# O Principal Objetivo é a

# Reabilitação

## MCR

Medida de Controle para Remediação é a Solução

Destruição do Centro de Massa de Contaminantes

## MCE

Medida de Controle de Engenharia

Atenuação no Efeito dos Contaminantes para os Receptores, com foco na Eliminação da Via de Exposição ao Risco

## MCI

Medida de Controle Institucional

Medidas de gestão com foco na Eliminação da Via de Exposição ao Risco

## Plano de Intervenção

# Objetivo de Destruir os Contaminantes (NAPL) no Centro de Massa (MCR)

- Caracterização das Unidades Hidroestratigráficas
- Balanço de Massa de Contaminantes
- Ensaio de Bancada e Teste Piloto em Campo
- Projeto de Remediação S-ISCO

Modelo Conceitual  
Hidrogeoquímico

Modelo Conceitual  
Tridimensional

# Objetivos para Destruição de NAPL utilizando a Oxidação Química *In Situ*

- Caracterização das Unidades Hidroestratigráficas
- Balanço de Massa de Contaminantes
- Ensaio de Bancada e Teste Piloto em Campo
- Projeto de Remediação S-ISCO

Índices Físicos do Solo

SOD

# Objetivos para Destruição de NAPL utilizando a Oxidação Química *In Situ*

- Caracterização das Unidades Hidroestratigráficas

- Balanço de Massa de Contaminantes

- Ensaio de Bancada e Teste Piloto em Campo

- Projeto de Remediação S-ISCO

Índices Físicos do Solo

SOD



TOD

Ensaio de Tratabilidade

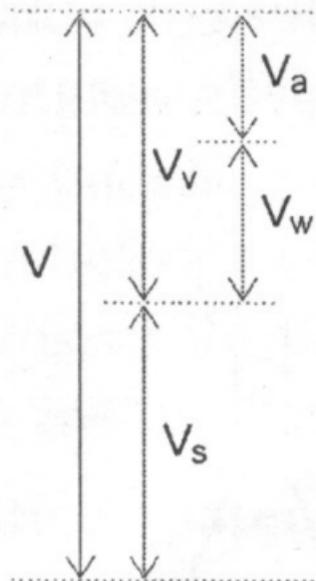
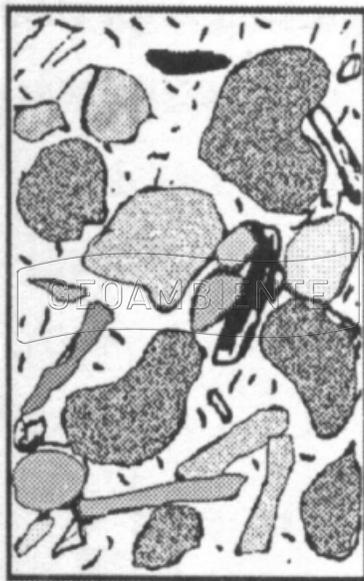
Função entre vazão, pressão e raio de influência (vertical e horizontal)

Sequencia, localização e quantidade de Pontos de Injeção

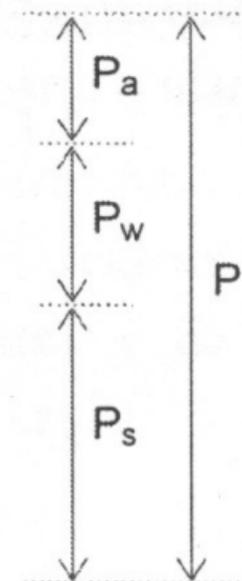
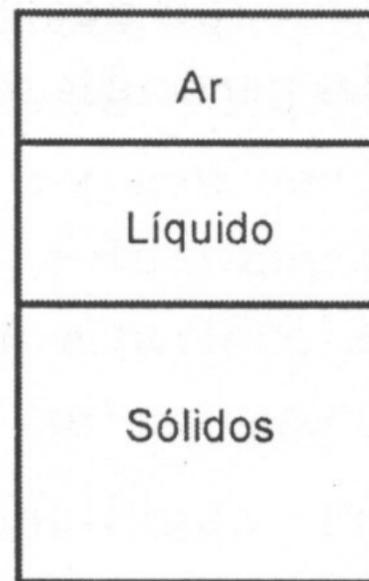
Quantidade de Remediadores e o Volume de Solução por Profundidade e UH

# O que são Índices Físicos?

- Os índices físicos são relações entre volumes, entre pesos ou entre pesos e volumes das três fases constituintes de um solo e prestam-se para avaliar as condições em que o solo se encontra por ocasião das suas determinações.



Volumes



Pesos

$$w = \frac{P_w}{P_s} \times 100$$

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100$$

$$S = \frac{V_w}{V_v} \times 100$$

$$\gamma_n = \frac{P}{V}$$

# Importância da Investigação em Alta Resolução (HRSC)

A heterogeneidade do solo proporciona diferentes configurações de índices físicos que promovem significativa variação no modelo conceitual (zonas de armazenamento e transporte) o que influencia na técnica, na eficiência e eficácia da remediação.

| Soil type (texture)                     | Hydraulic conductivity (m/d) |
|---|------------------------------|
| Dense clay (no cracks, pores)           | < 0.002                      |
| Clay loam, clay (poorly structured)     | 0.002 - 0.2                  |
| Loam, clay loam, clay (well-structured) | 0.5 - 2.0                    |
| Sandy loam, fine sand                   | 1 - 3                        |
| Medium sand                             | 1 - 5                        |
| Coarse sand                             | 10 - 50                      |
| Gravel                                  | 100 - 1000                   |

A vazão de água subterrânea pode variar milhões de vezes dependendo da UH



Heterogenous soil

# SOD/NOD *Soil Oxidant Demand / Natural Oxidant Demand*

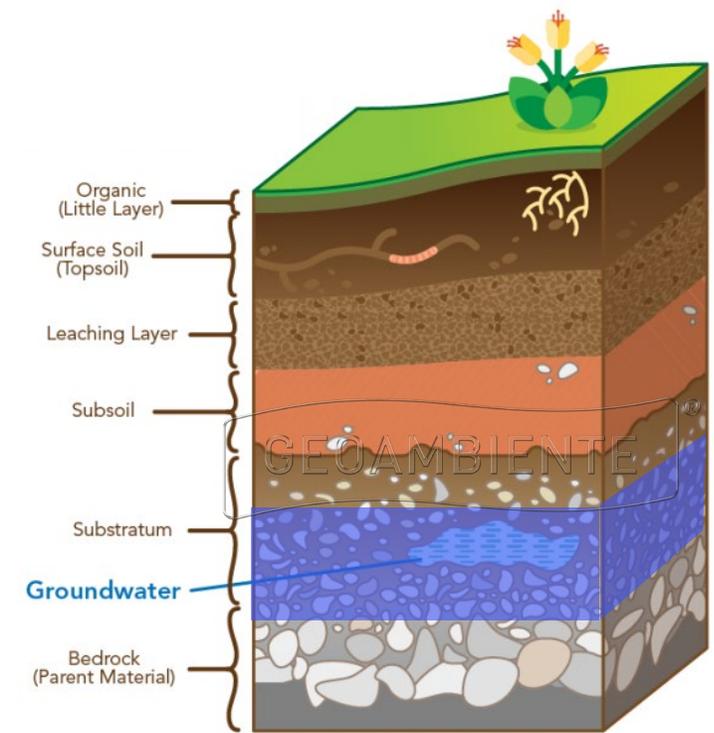
Avaliação do consumo de oxidante pelas substâncias componentes do solo/água – como metais naturais do solo e matéria orgânica.



O SOD é determinado para cada horizonte/tipo de solo encontrado dentro da área da pluma de contaminação;

As amostras utilizadas são coletadas fora da pluma de contaminação;

O NOD pode ser feito utilizando também amostras de água.



# Demanda de Oxidantes do Solo

| Unidade Hidroestratigráfica | SOD (kg/ton) | Concentração de Oxidantes na Injeção (%) | Concentração de Oxidantes na Água Subterrânea (g/L) |
|-----------------------------|--------------|--|---|
| Argila                      | 3,33         | 18,65%                                   | 7,8   |
| Silte Argiloso              | 2,70         | 6,96%                                    | 7,6   |
| Areno Siltoso               | 2,10         | 4,96%                                    | 7,9   |
| Areno Argilosa              | 1,59         | 3,24%                                    | 4,4   |
| Argilo Arenosa              | 0,53         | 0,80%                                    | 1,7   |
| Silte                       | 0,39         | 0,56%                                    | 1,4   |
| Silte Arenoso               | 0,27         | 0,35%                                    | 1,1   |
| Areia Fina                  | 0,22         | 0,20%                                    | 0,7   |
| Areia Média                 | 0,18         | 0,13%                                    | 0,8   |
| Areia Grossa                | 0,09         | 0,06%                                    | 0,6   |
| Cascalho                    | 0,03         | 0,02%                                    | 0,2   |

# Volumes e Porosidades

A porosidade total é referente ao espaço vazio total nos poros - conectados e não conectados - sendo estes não conectados, preenchidos com a solução remediadora através da difusividade predominantemente. De posse das porosidades, é possível calcular o volume injetado (de um volume poroso) através da multiplicação da porosidade efetiva pelo volume total. A equação do volume de água subterrânea (influenciada pela injeção) é obtido através da multiplicação do volume total pela porosidade total, isso para cada unidade hidroestratigráfica.

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

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

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

# Cálculo da Concentração de Oxidantes

$$m_{Oxidantes} = V_P \cdot d_{solo} \cdot (\text{Demanda de Oxidantes})$$

$$\frac{m_{Oxidantes}}{V_{Injeção}} = C_{Injeção}$$

$$\frac{m_{Oxidantes}}{V_{Ág.Sub}} = C_{Ág.Sub}$$

$$V_{injeção} = V_T \cdot \phi_{Efetiva}$$

$$V_{Ág.Sub.} = V_T \cdot \phi_{Total}$$

# Objetivos para Destruição de NAPL utilizando a Oxidação Química *In Situ*

- Caracterização das Unidades Hidroestratigráficas

- Balanço de Massa de Contaminantes

- Ensaio de Bancada e Teste Piloto em Campo

- Projeto de Remediação S-ISCO

Índices Físicos do Solo

SOD

# Objetivos para Destruição de NAPL utilizando a Oxidação Química *In Situ*

- Caracterização das Unidades Hidroestratigráficas

- Balanço de Massa de Contaminantes

- Ensaio de Bancada e Teste Piloto em Campo

- Projeto de Remediação S-ISCO

Índices Físicos do Solo

SOD

TOD

# Investigação para Remediação

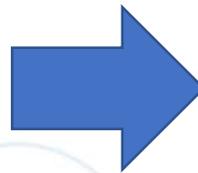
- Utilização de ferramentas de alta resolução, como OIPHPT e MIPHPT.
- Coleta e Amostragem de Solo (*direct push*) através da cravação de *liners*, com descrição geológica das unidades hidroestratigráficas alvos.
- Seleção de amostras através da caixa de luz ultra violeta e medição dos compostos orgânicos voláteis com equipamento mobilizado em campo (*Photo Ionization Detector – PID*), a cada 15cm nos liners nas zonas saturadas e não saturadas;
- Envio para análise química laboratorial, inclusão de parâmetros para o cálculo de massa, como TPH *fingerprint* e tomada de decisão, como TPH fracionado, BTEX e PAH, para o caso de LNAPL.

# Descrição de Solo e Coleta de Amostras

## Caracterização das Unidades Hidroestratigráficas



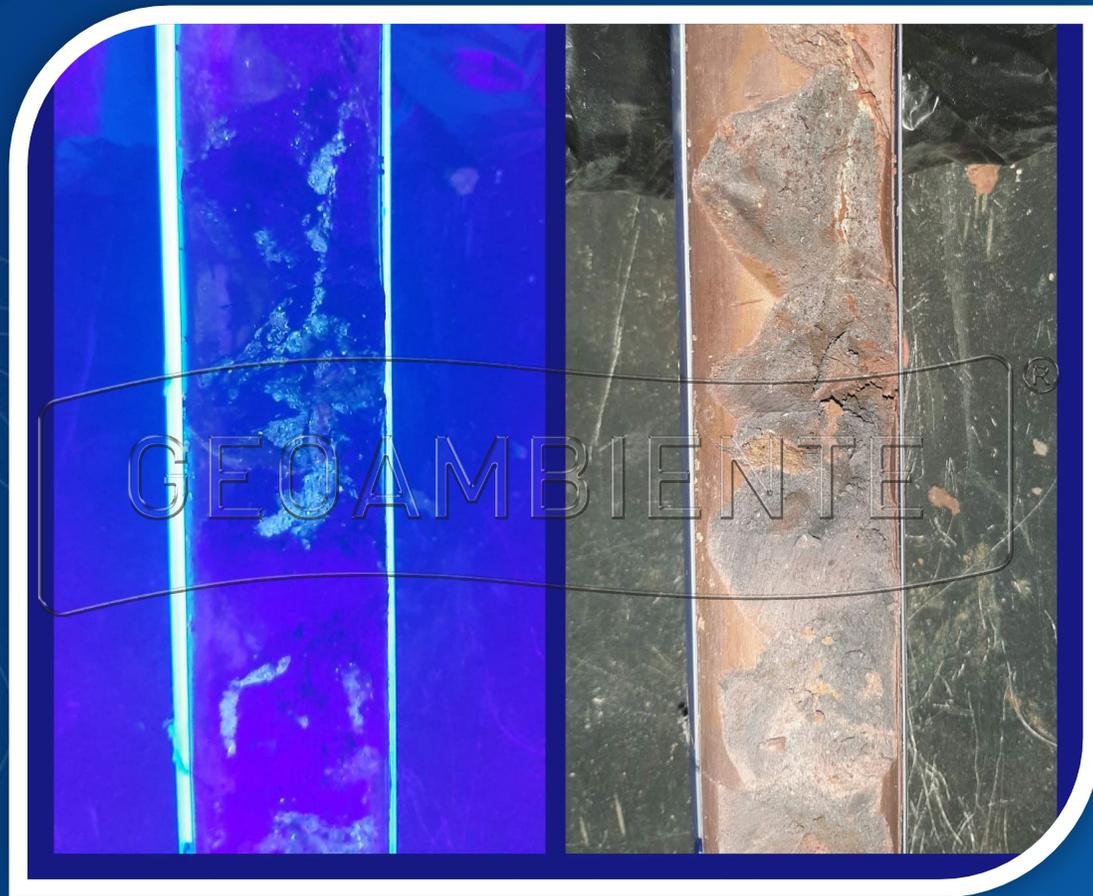
Mas..  
Onde Coletar?



# Ferramentas que utilizam UV-A

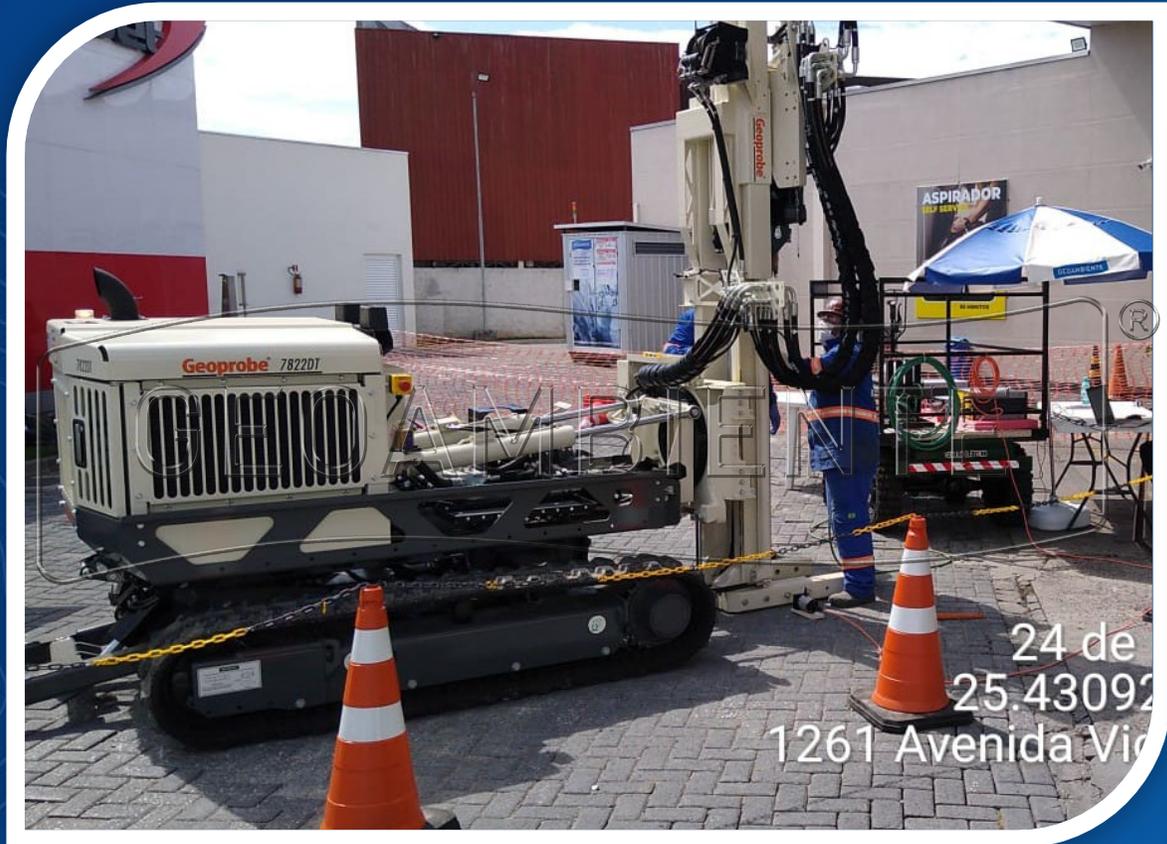


# Caixa de Luz Ultra Violeta (UV-A)

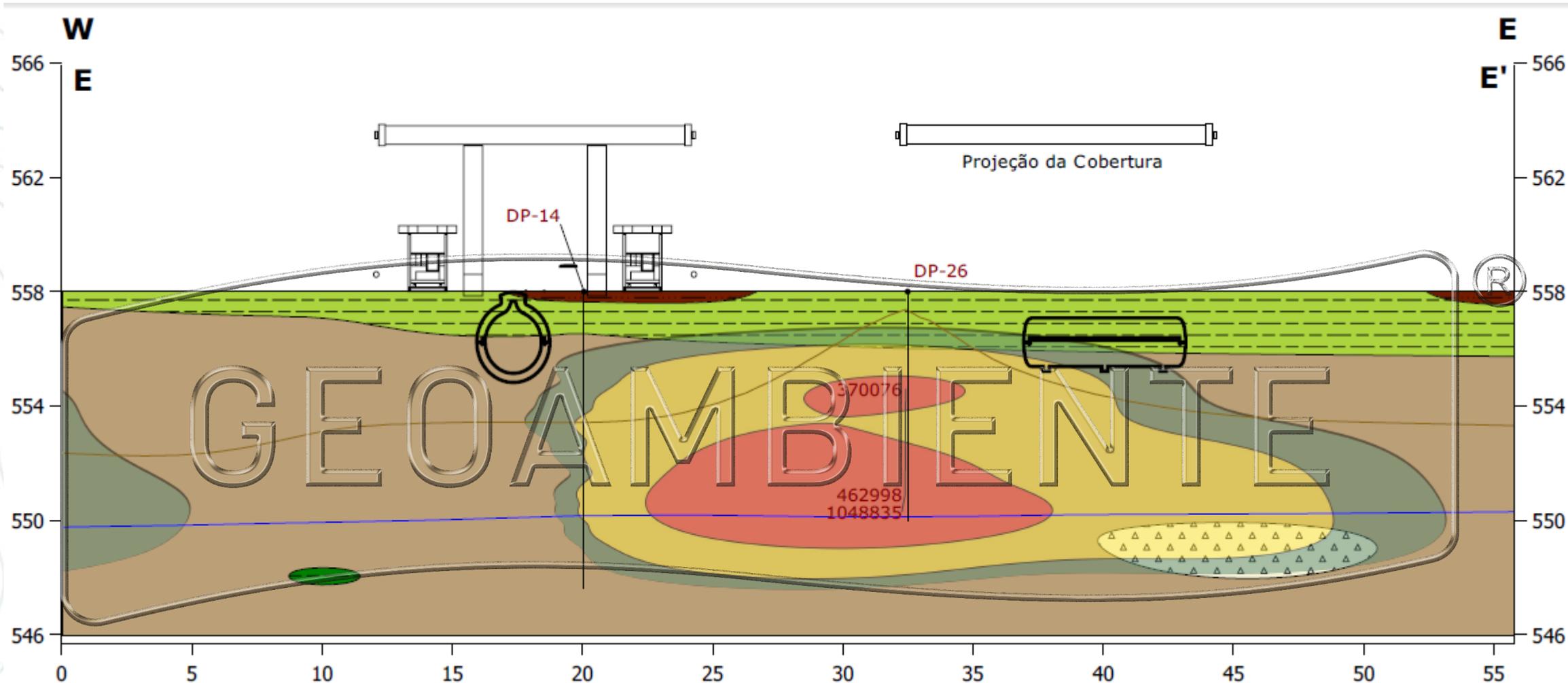




# GEOPROBE® OIP/HPT



# Balanço de Massa de Contaminantes



### Modelo Geológico

- Areno-Argiloso
- Silte-Arenoso
- Arenoso
- Silte-Arenoso Lente
- Saprólito

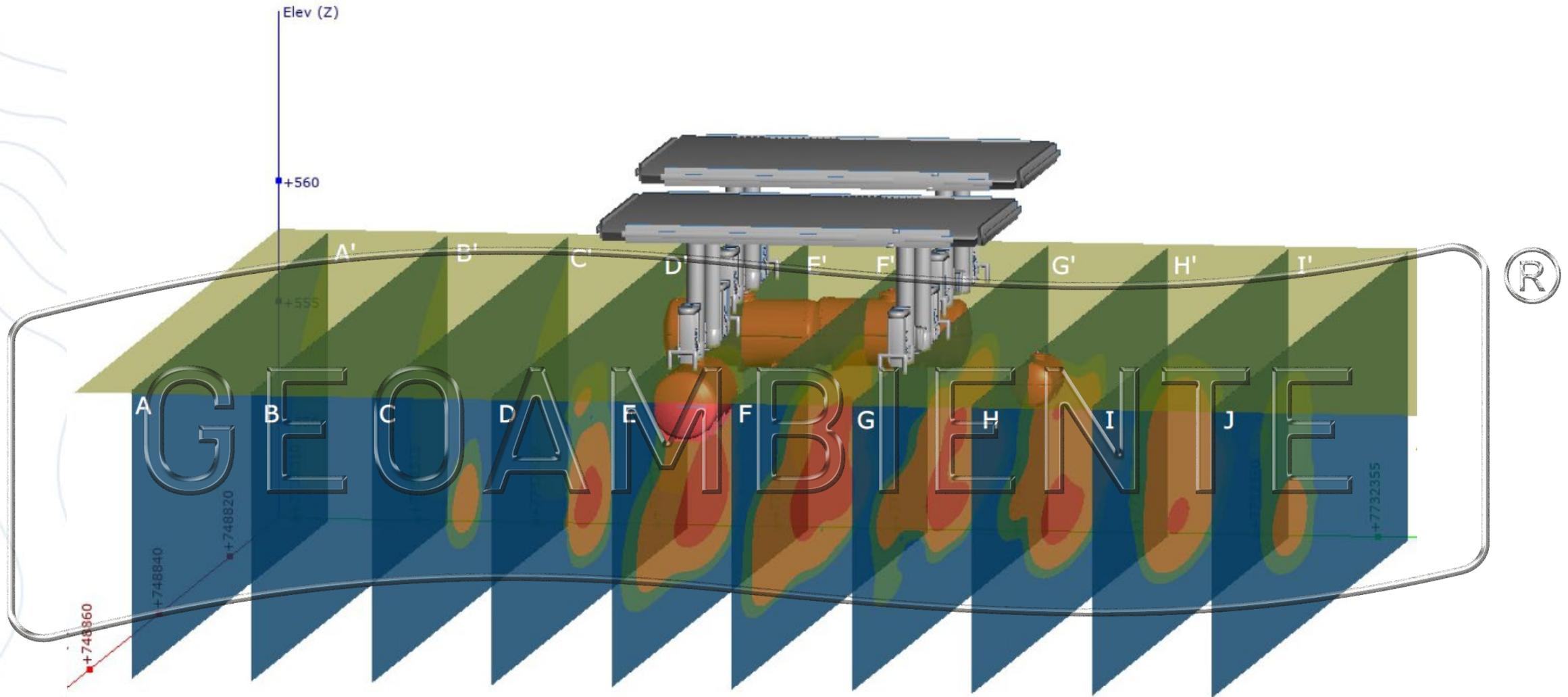
### Pluma HRP

- 10.000 - 40.000
- 40.000 - 210.000
- > 210.000

### Superfícies

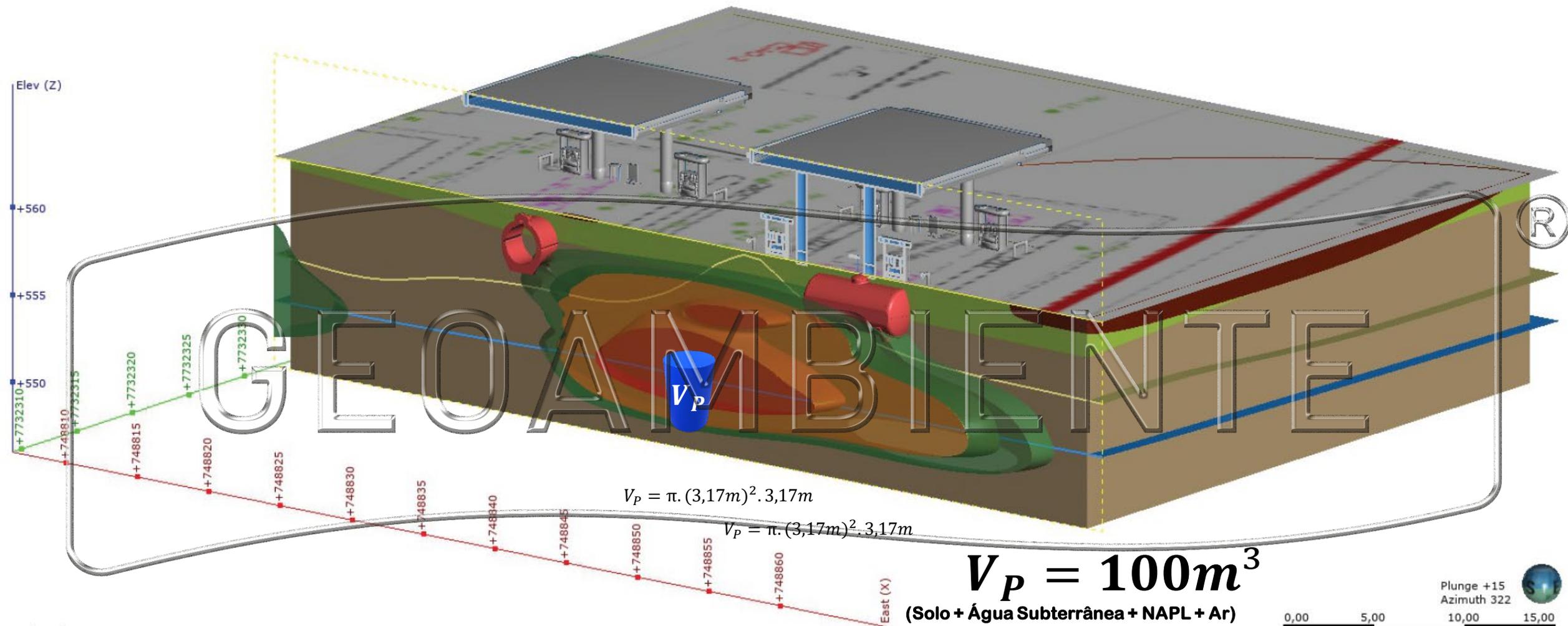
- Limite Zona Não Saturada/Vadosa
- Limite Zona Vadosa/Saturada
- Tanques Subterrâneos 30.000L

# Identificação das Fontes



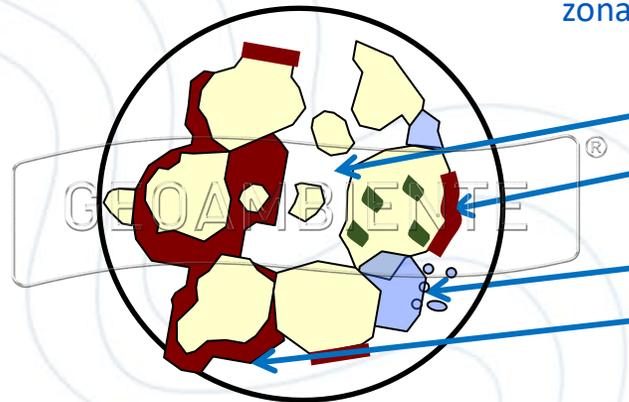


# Volume de Influência do Teste Piloto



# Saturação de NAPL vs TOD - Demanda de Oxidantes Total

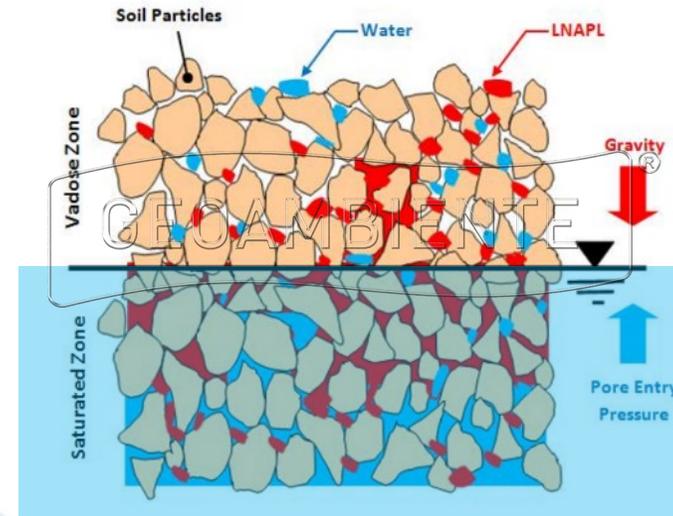
• Distribuição de NAPL  
(Hidrocarbonetos) no solo em  
zona não saturada:



Suthersan, 1996

- Fase Vapor
- Adsorvido em partículas e Absorvido nos poros solo
- Fase Dissolvida
- Fase livre

Mais de 80% da massa de hidrocarbonetos está nas fases adsorvida e livre.



TOD: Demanda Total de Oxidantes, considerada parcela da matriz solo (SOD) e do NAPL

# Influência do Surfactante na Remediação S-ISCO

## Emulsificação do LNAPL (fase livre)

Utilização de surfactante para aumento da área de contato em água da substância química a ser oxidada.

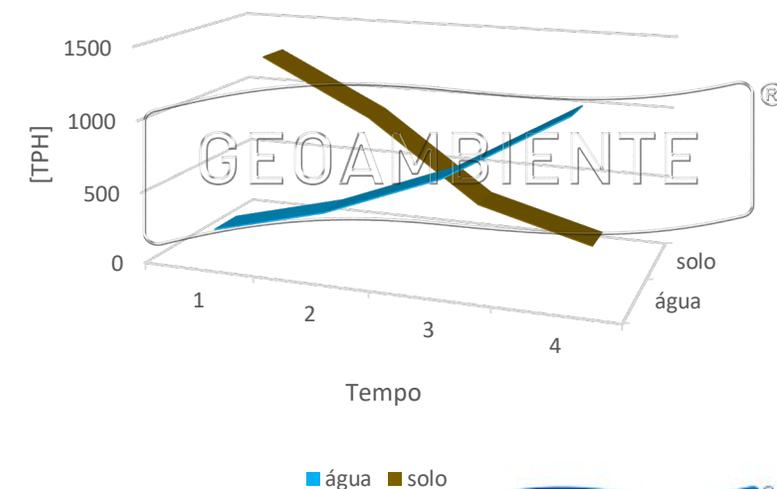
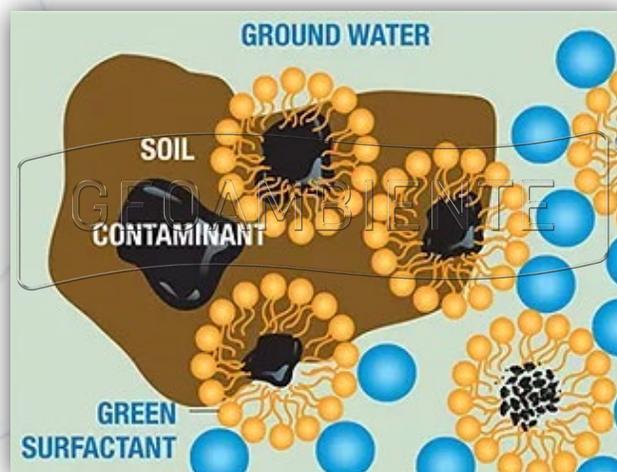
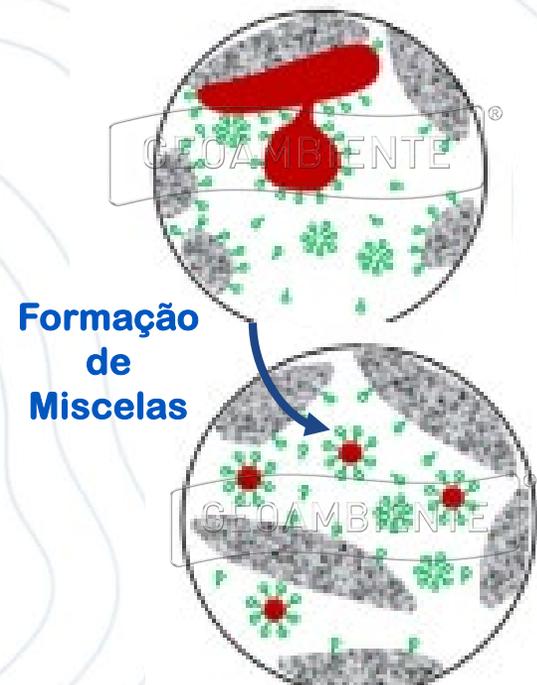
LNAPL



# Emulsificação do Óleo para Oxidação na Água

## Dessorção da Fase Líquida Não Aquosa (NAPL)

- Aprimoramento na Eficiência da Oxidação
- O SurfGEO-E é biodegradável e pode ser oxidado;





# Remediadores Registrados



+



Persulfato de Sódio (99%) Peróxido de Cálcio (75%)

- PersulGEO (Persulfato de Sódio 99%) - Registro IBAMA nº 0573500/2017 - CONP/CGASQ/DIQUA
- PeroxyGEO (Peróxido de Cálcio 75%) - Registro IBAMA nº 1693008/2018 - CONP/CGASQ/DIQUA
- OXYGEO (Blending de Persulfato de Sódio e Peróxido de Cálcio) Patente Registrada no INPI
- Peróxido de Cálcio Ativador por variação de pH para Persulfato.



Persulfato de Sódio + Peróxido de Cálcio

OxyGEO mistura pronta para remediação.

# Objetivos para Destruição de NAPL utilizando a Oxidação Química *In Situ*

- Caracterização das Unidades Hidroestratigráficas
- Balanço de Massa de Contaminantes
- Ensaio de Bancada e Teste Piloto em Campo
- Projeto de Remediação S-ISCO

Índices Físicos do Solo

SOD / TOD

Tratabilidade (Eficiências)

# Objetivos para Destruição de NAPL utilizando a Oxidação Química *In Situ*

- Caracterização das Unidades Hidroestratigráficas
- Balanço de Massa de Contaminantes
- Ensaio de Bancada e Teste Piloto em Campo
- Projeto de Remediação S-ISCO

Índices Físicos do Solo

SOD / TOD / Tratabilidade

Função entre vazão, pressão  
e raio de influência (vertical e  
horizontal)

# Serviços Pré Piloto - Mobilização



- Laboratório Móvel
- Execução das Sondagens
- Instalação de Poços de Observação
- Cravação do Ponto de Injeção

# Teste Piloto com Injeção de Oxidantes

Para atingir o objetivo principal do teste piloto, foram realizadas as seguintes atividades:

- Realização de sondagem *direct push*, cravação de hastes para injeção da solução com remediadores, nas profundidades alvos onde estão os contaminantes nas zonas saturadas, atingindo o solo e água subterrânea;
- Determinação da vazão e pressão de aplicação através de injeção de solução de oxidante por *direct push*, com registros horários de hidrômetros e manômetros;
- Monitoramento da concentração de oxidantes remanescentes e parâmetros físico químicos (pH, ORP, condutividade, oxigênio dissolvido e temperatura) proveniente dos poços de observação do entorno do ponto de injeção, antes, durante e após o término do teste piloto, a fim de registrar a variação horária de tais parâmetros.

# Monitoramento do Teste Piloto

Persulfato  
Remanescente  
Físico-Químicos



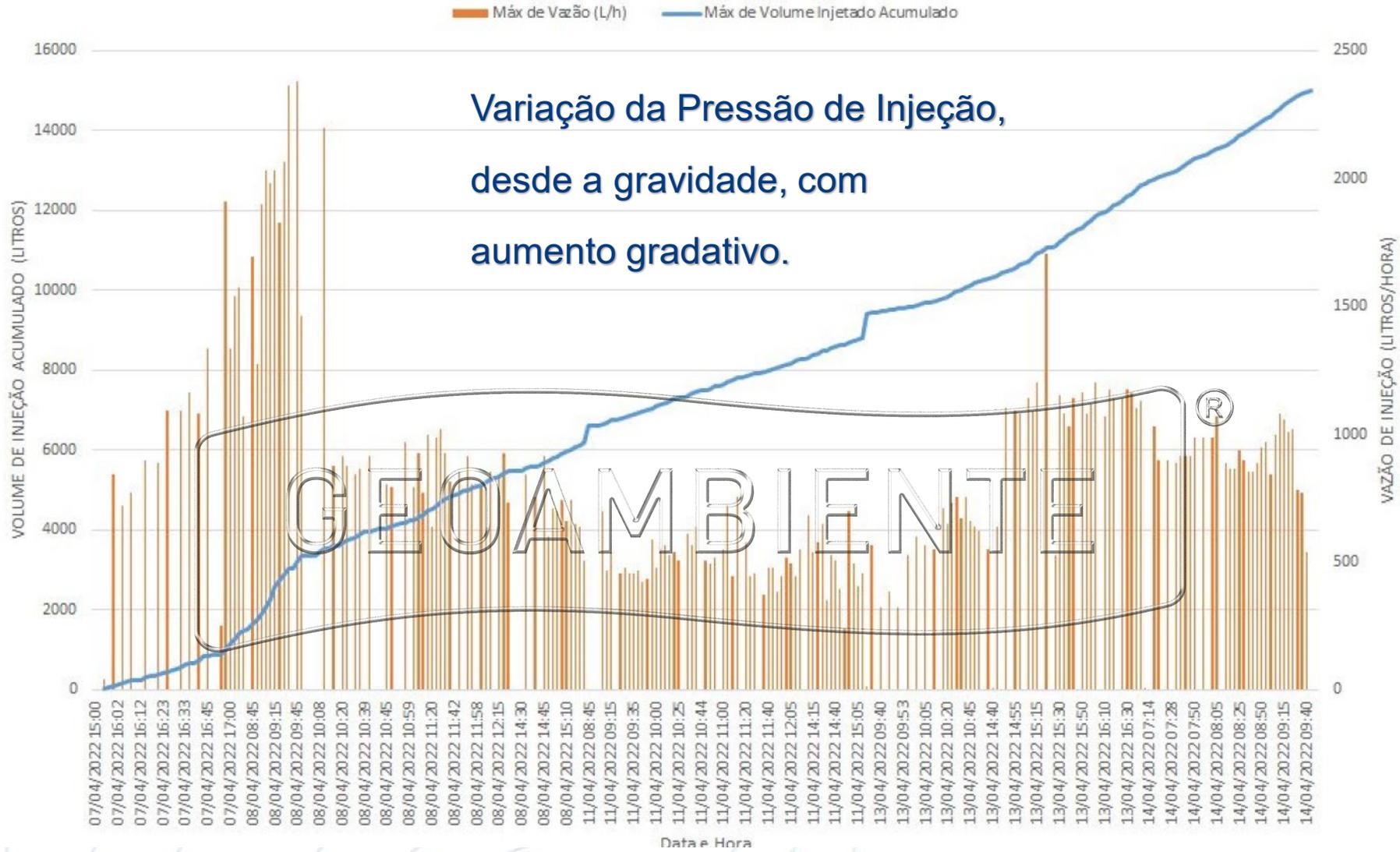
Laboratório Móvel  
Acreditado

Cromatógrafos CG-FID



# Vazão e Volume de Injeção

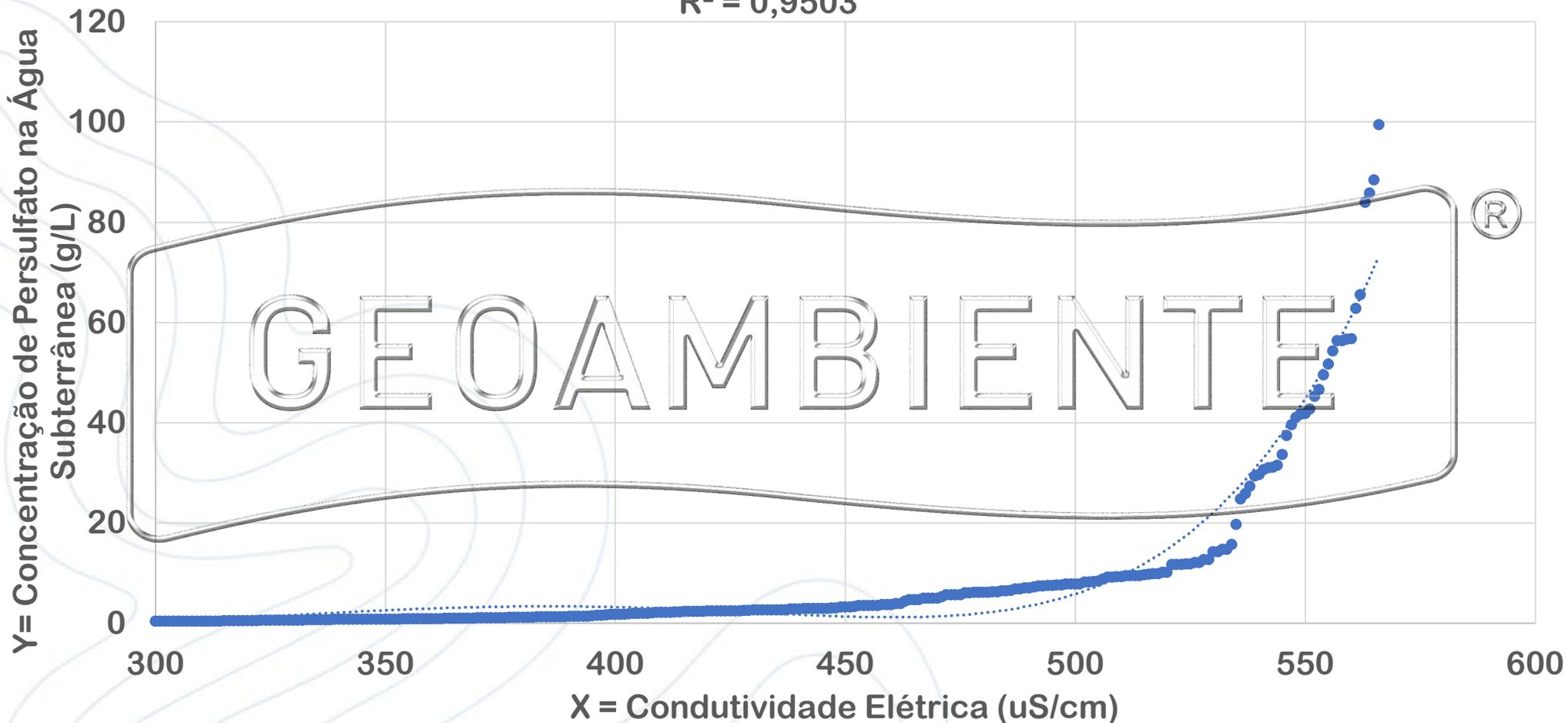
Volume  
Acumulado  
(m<sup>3</sup>)



Vazão de  
Injeção (L/h)

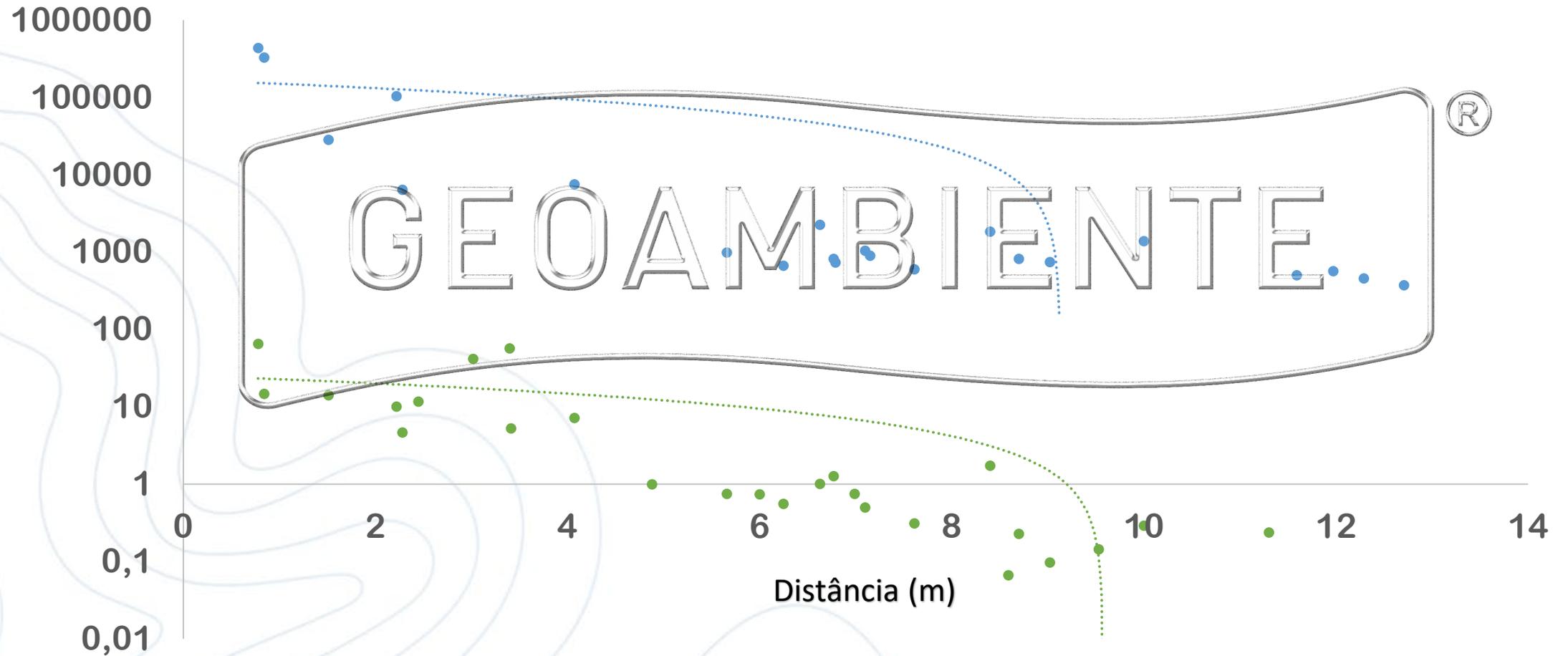
# Relação Condutividade Elétrica vs Concentração de Oxidantes

$$[\text{Persulfato}] = 3\text{E-}13x^6 - 4\text{E-}10x^5 + 2\text{E-}07x^4 - 6\text{E-}05x^3 + 0,0073x^2 - 0,3607x + 4,236$$
$$R^2 = 0,9503$$



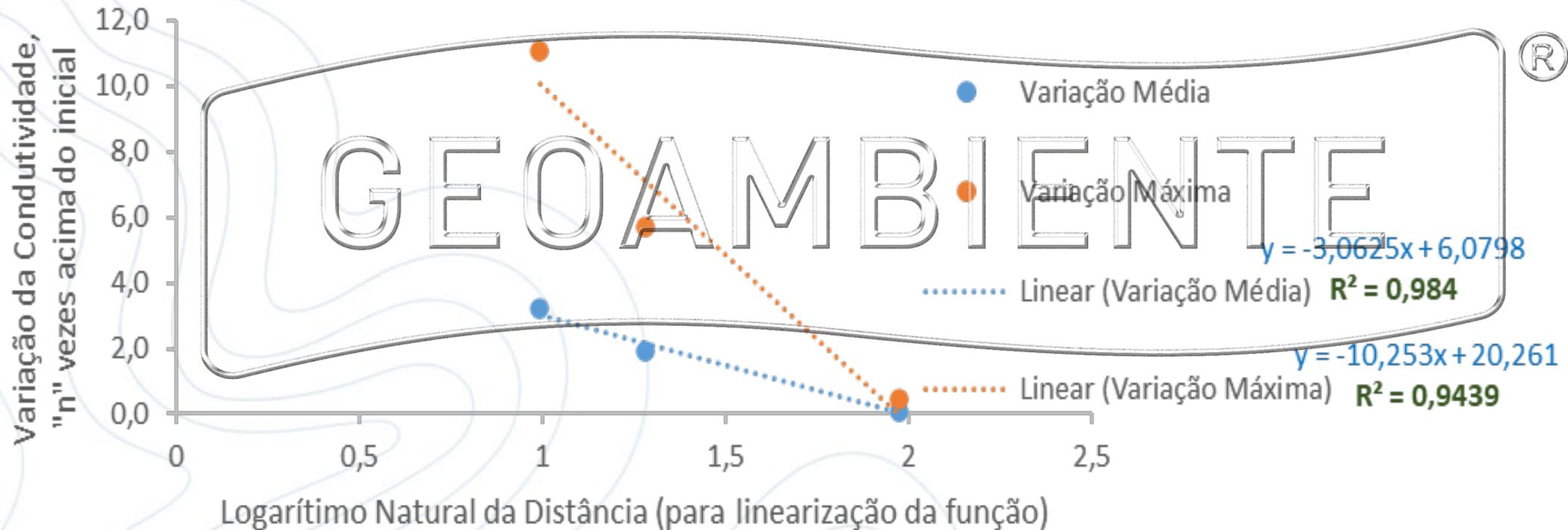
- Condutividade (uS/cm)
- ..... Polinômio (Condutividade (uS/cm))

# Distância vs Condutividade Elétrica vs Concentração de Oxidantes



- Concentração de OxyGEO (g/L)
- Condutividade (uS/cm)
- ..... Linear (Concentração de OxyGEO (g/L))
- ..... Linear (Condutividade (uS/cm))

# Normalização e Linearização



# Aferição do Raio de Influência

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

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

$$X' = 1,985$$

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

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

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

$$X' = 1,976$$

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

# Objetivos para Destruição de NAPL utilizando a Oxidação Química *In Situ*

- Caracterização das Unidades Hidroestratigráficas
- Balanço de Massa de Contaminantes
- Ensaio de Bancada e Teste Piloto em Campo
- Projeto de Remediação S-ISCO

Índices Físicos do Solo

SOD / TOD / Tratabilidade

Função entre vazão, pressão  
e raio de influência (vertical e  
horizontal)

# Objetivos para Destruição de NAPL utilizando a Oxidação Química *In Situ*

- Caracterização das Unidades Hidroestratigráficas
- Balanço de Massa de Contaminantes
- Ensaio de Bancada e Teste Piloto em Campo
- Projeto de Remediação S-ISCO

Índices Físicos do Solo

SOD / TOD / Tratabilidade

Função entre vazão, pressão e raio de  
influência (vertical e horizontal)

Sequência, Localização e Quantidade de Pontos de Injeção

Quantidade de Remediadores e o Volume de Solução por

Profundidade e UH

# Injeção de baixo para cima

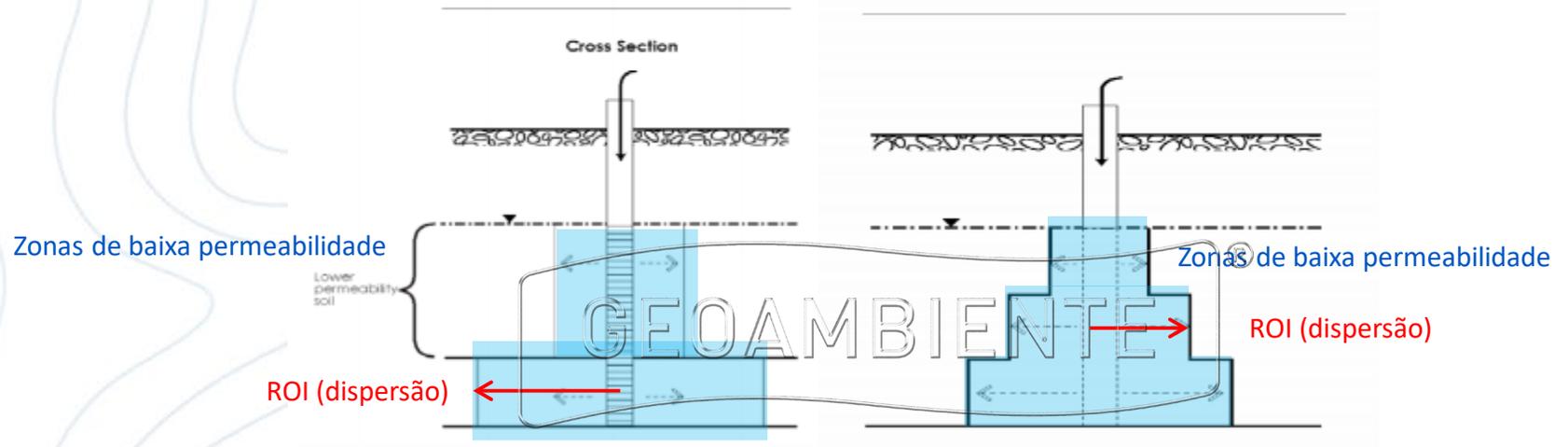
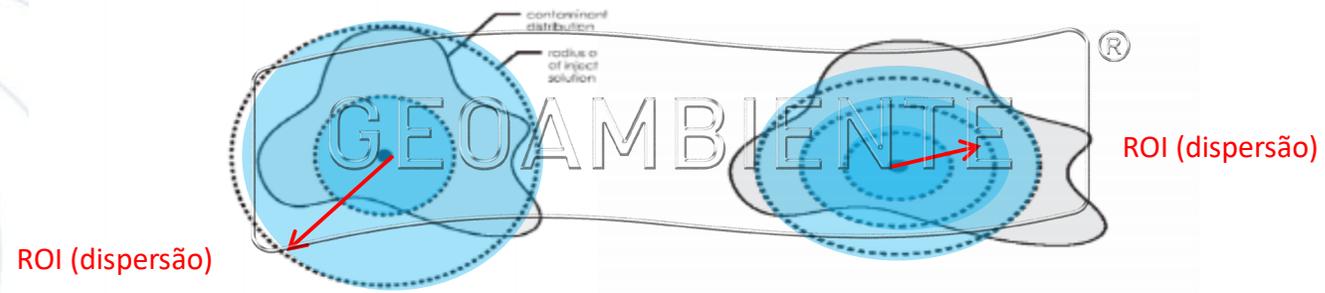
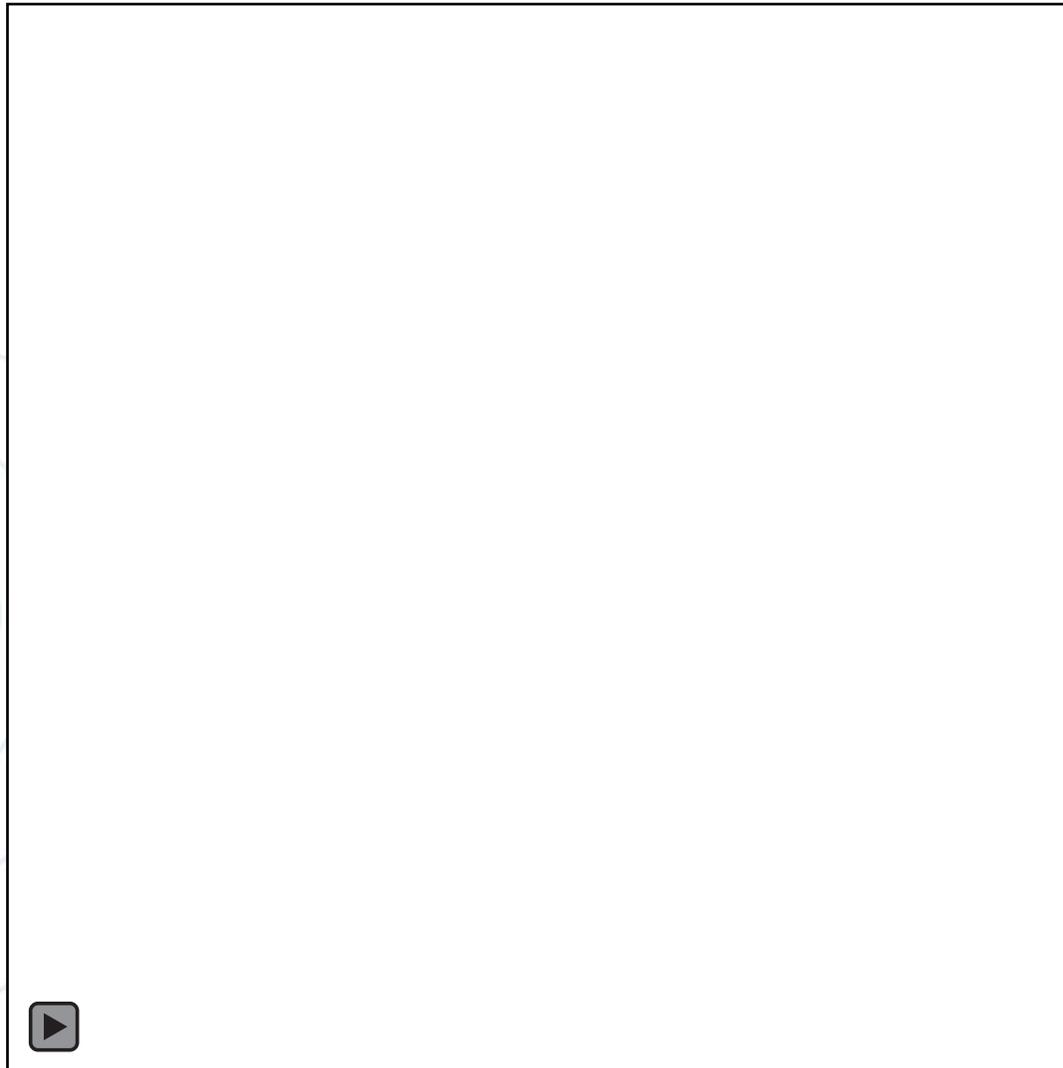


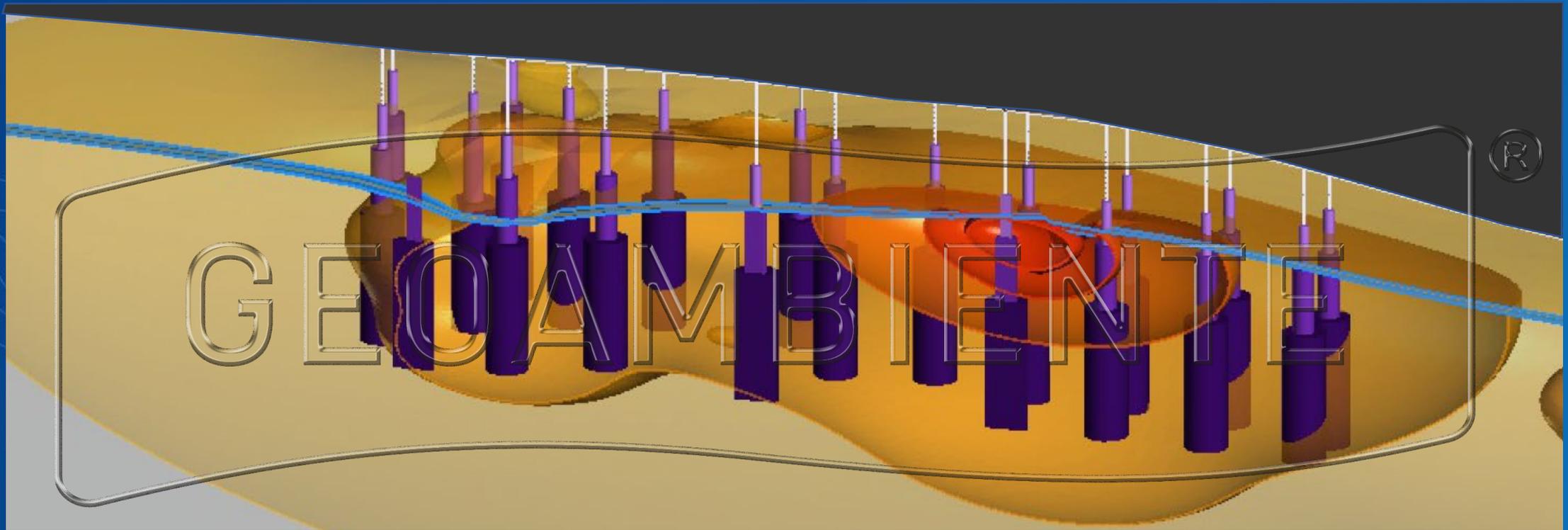
Figure 5-2. Permeability influences.

Figure 5-3. Bottom-up injections.

# Profundidade dos Pontos de Injeção



# Distribuição dos Pontos de Injeção nas Unidades Hidroestratigráficas Alvos





**GEOAMBIENTE**

®