

Trabalho de Conclusão de Curso

Curso de Graduação em Geologia

**SIMULAÇÕES ESTOCÁSTICAS DE CONTAMINAÇÃO POR NITRATO NAS ÁGUAS
SUBTERRÂNEAS DO CAMPUS DA UNESP RIO CLARO**

Caio Novais Silva

Prof. Dr. Chang Hung Kiang (orientador)

Dr. Elias Hideo Teramoto (coorientador)

Rio Claro (SP)
2021

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Campus de Rio Claro

CAIO NOVAIS SILVA

SIMULAÇÕES ESTÓCASTICAS DE CONTAMINAÇÃO POR
NITRATO NAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DO *CAMPUS* DA
UNESP RIO CLARO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Instituto de Geociências e Ciências Exatas - *Campus*
de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio
de Mesquita Filho, para obtenção do grau de
Geólogo.

Rio Claro – SP

2021

CAIO NOVAIS SILVA

SIMULAÇÕES ESTÓCASTICAS DE CONTAMINAÇÃO POR
NITRATO NAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DO *CAMPUS* DA
UNESP RIO CLARO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Instituto de Geociências e Ciências Exatas - *Campus*
de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio
de Mesquita Filho, para obtenção do grau de
Geólogo.

Comissão Examinadora

MsC. Bruno Zanon Engelbrecht

MsC Roger Dias Gonçalves

Rio Claro, ____ de _____ de 2021.

Assinatura do aluno

assinatura do orientador

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente à minha família, sem a qual nada disso seria possível. Em especial, minha mãe Zuleika e minhas tias Ana Cláudia e Sandra, que sempre deram apoio incondicional a todos os meus projetos. Essa realização também é de vocês!

Agradeço também a todo o corpo docente do curso de graduação, tanto pelo conhecimento adquirido ao longo de todos esses anos, como também pela inspiração que alguns deles trazem em sua trajetória de vida. É extremamente gratificante ter como mestres pessoas tão inspiradoras como o Profº Dr. José Alexandre Perinotto e o Profº Dr. Mário Luis Assine, pra citar apenas dois grandes exemplos, que ministrando as disciplinas mais básicas conseguem fazer crescer o interesse de todos os ingressantes no estudo da geologia.

Agradeço imensamente todos as amizades adquiridas em todos esses anos de curso: meus grandes amigos de república Gabriel Leite, Ademir, Felipe Galvão, Felipe Degasperi, Jefferson, dos quais levo todos os aprendizados para minha vida; a todos os amigos e colegas da Turmalinda, em especial minha grande amiga Letícia Barbosa, que foi minha parceira de todos os momentos dentro e fora da graduação.

Agradeço minha amiga e companheira Lara Agostini Patto por todo apoio e compreensão, não só nesta etapa que se encerra, mas também na etapa que iniciamos juntos, na vida.

Agradeço ao meu orientador Chang Hung Kiang e meu co-orientador Elias Hideo Teramoto por todo o processo de orientação e disponibilidade de ensinar, além das boas conversas sobre o mundo profissional.

Agradeço o grupo PET Geologia e ao Profº Dr. Washington Barbosa Leite por me ensinar tanto desde o começo da graduação. Os conhecimentos adquiridos aqui serão levados para a vida.

Por fim, agradeço a todos os discentes, funcionários e docentes comprometidos com a constante melhoria não só do curso de graduação em geologia, mas também na construção e fortalecimento do ensino público de excelência.

RESUMO

O nitrato (NO_3^-) constitui um dos contaminantes mais amplamente distribuídos, associado dentre outras fontes, à vazamentos em redes de coleta de esgoto em meios urbanos. Devido à sua ampla ocorrência e toxicidade à saúde humana, as áreas contaminadas por nitrato representam um problema ambiental de grande relevância. Para o gerenciamento efetivo dessas áreas não basta, muitas vezes, apenas o conhecimento da dinâmica hidrogeológica para a tomada de medidas de recuperação dessas áreas. Nesse sentido, os modelos numéricos tem sido adotados como ferramentas importantes de gerenciamento para a tomada de decisões baseadas em cenários geológicos. Contudo, para que os modelos numéricos possam servir de subsídio de gerenciamento efetivo, é necessário que tal modelo expresse da melhor maneira possível o meio geológico, que é substancialmente heterogêneo, o que muitas vezes não se reflete no modelo gerado. Deste modo, os modelos numéricos de abordagem estocástica se apresentam como uma ferramenta interessante para descrever o meio geológico de forma aproximada à realidade. O presente trabalho tem por objetivo entender em que medida diferentes arranjos tridimensionais das fácies sedimentares de um aquífero possuem influência sobre a evolução de uma pluma de contaminação. Para tanto, analisou-se através da modelagem numérica o comportamento da pluma de contaminação por nitrato na Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, *campus* Rio Claro, através da aplicação do método estocástico de Cadeias de Markov. Para isso, fez-se o levantamento de dados de sondagens já realizadas no *campus* e posterior uso no *software* GMS (através da ferramenta T-PROGS), levando à geração de 30 cenários geológicos distintos e seus respectivos arranjos espaciais, para posterior simulação de fluxo e transporte de contaminantes no *software* Visual Modflow. A análise dos diferentes cenários geológicos gerados corrobora a hipótese de que as heterogeneidades geológicas constituem um fator relevante na evolução das plumas de contaminantes analisadas, o que se traduziu na variação dos dados de comprimento e concentração de nitrato observados nos modelos.

Palavras-chave: Cadeias de Markov, Modelos Estocásticos, contaminação de nitrato, heterogeneidades geológicas.

ABSTRACT

Nitrate (NO_3^-) is one of the most widely distributed contaminants in groundwater associated, among other sources, with leaks in sewage collection networks into urban environments. Due to its widespread occurrence and toxicity to human health, contaminated areas by nitrate represents a relevant environmental problem. For the effective management of these areas, knowing about the hydrogeological dynamics, it's often not the only good option to recover these areas. Therefore, numerical models have been adopted as important management tools in order to make decisions based on geological scenarios. However, to make numerical models work as an effective management subsidy, it is necessary that such model expresses the best way ever the geological environment, which is substantially heterogeneous, which is often not reflected in the model generated. In this way, numerical models with a stochastic approach are presented as an interesting tool to describe the geological environment in a way close to reality. This work aims to understand in which way how different three-dimensional arrangements of sedimentary facies in an aquifer have an influence on the evolution of a contamination plume. For this purpose, the behavior of the nitrate plume at the State University of São Paulo "Júlio de Mesquita Filho", Rio Claro campus was analyzed through numerical modeling, by the application of the Markov Chains stochastic method. For this, survey data was already collected on the campus and later used in the GMS software (using the T-PROGS tool), leading to the generation of 30 different geological scenarios and their respective spatial arrangements, related to later flow simulation and contaminants transports in the Visual Modflow software. The analysis of the different geological scenarios generated the hypothesis that the geological heterogeneities constitute a relevant factor in the evolution of the plumes of contaminants analyzed, whose results translate itself into the variation in the length and nitrate concentration data observed in the models.

Keywords: Markov chain. Stochastic models. Nitrate contaminant. Geological heterogeneity.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 Localização da área de estudos e principais vias de acesso.	13
Figura 2: Pluviosidade média anual para a cidade de Rio Claro (extraído e adaptado de pt.climate-data.org).....	15
Figura 3: Localização das Sub-Bacias da UGRHI-5, com destaque (polígono vermelho) para a localização aproximada do município de Rio Claro, na sub-bacia Corumbataí (Comite PCJ, 2019).....	16
Figura 4: Mapa de localização da Bacia do Paraná as unidades aloestratigráficas (Milani, 1997).	18
Figura 5 Mapa geológico da região de estudo.	21
Figura 6: Mapa das Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo (DAEE <i>et al.</i> , 2005).	22
Figura 7: Seção Esquemática do Perfil Hidrogeológico do Estado de São Paulo (DAEE <i>et al.</i> , 2005), com destaque (seta vermelha) para a localização aproximada do município de Rio Claro/SP.....	23
Figura 8: Distribuição das Unidades Aquíferas na UGRHI 05	24
Figura 9: Fluxograma do processo de criação e desenvolvimento de um modelo de águas subterrâneas, segundo Anderson, Woessner e Hunt (2015).	27
Figura 10: Mapa de localização das sondagens distribuídas no <i>campus</i> da UNESP Rio Claro.	34
Figura 11: Bloco diagrama representando a sucessão vertical das camadas sedimentares, a partir das sondagens disponíveis. Para melhor visualização, foi aplicado exagero vertical.	35
Figura 12: Gráficos de probabilidade de transição entre as litofácies sedimentares observadas. A linha pontilhada representa os dados de sondagens e a linha contínua verde representa o ajuste baseado nas Cadeias de Markov.....	36
Figura 13: Cenário Geológico gerado pelo T-PROGS. Não foi alicado exagero vertical.....	37
Figura 14: Representação tridimensional do <i>grid</i> gerado.....	39
Figura 15: Localização das áreas fontes adotadas, baseadas nas simulações reversas realizadas por Teramoto et al., (2021).....	41
Figura 16: Localização dos poços de captação de água subterrânea PM-08 e PM-09.....	42
Figura 17: Comprimento da pluma, obtido através do contorno de isoconcentração correspondente a 44 ppm.....	44
Figura 18: Gráfico 1 apresenta histograma da distribuição dos valores de comprimento observados para a Pluma 1	44

Figura 19: Gráfico 2 apresenta histograma da distribuição dos valores de comprimento observados para a Pluma 2	45
Figura 20: Evolução da pluma de contaminação em profundidade.....	46
Figura 21: Localização dos poços de captação de água subterrânea em relação às plumas de nitrato simuladas.....	47
Figura 22: Gráfico 3 apresenta histograma da distribuição dos valores de concentração observados nos poços de monitoramento PM-08 e PM-09, para todos os cenários gerados. ..	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores de condutividade hidráulica atribuídos a cada litotipo. Adaptado de Teramoto <i>et al.</i> (2021).	30
Tabela 2: Dados das sondagens utilizadas no estudo	33
Tabela 3: Classificação das litologias descritas nas sondagens e posteriormente reagrupadas para o presente trabalho.	34
Tabela 4: Tempo de simulação considerado para os 30 cenários geológicos gerados pelo software Visual Modflow Flex 6.1	43
Tabela 5: Síntese dos resultados obtidos no trabalho, para os parâmetros analisados.	50

APÊNDICES

APÊNDICE I – CENÁRIOS (EM PLANTA).....	55
--	----

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
1.1 Apresentação do tema.....	11
1.2. Objetivos.....	12
2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	13
2.1. Localização, Extensão e Acesso à Área.....	13
2.2. Geomorfologia	14
2.3. Clima.....	14
2.4. Hidrografia.....	15
3. GEOLOGIA REGIONAL	18
3.1. Geologia Local.....	20
3.2. Hidrogeologia	22
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	26
4.1. Referencial Teórico	26
4.1.1. Modelos Matemáticos.....	26
4.1.2. Método de Diferenças Finitas.....	28
4.1.3. Abordagens Estocásticas	28
4.1.4. Probabilidade de transição entre os litotipos	29
4.1.5. Cadeias de Markov	29
4.2. Etapas de trabalho.....	30
4.2.1. Compilação de dados de sondagens	30
4.2.2. Testes de condutividade hidráulica associados	30
4.2.3. Simulação do arranjo das fácies sedimentares	30
4.2.4. Caracterização da contaminação	31
4.2.5. Simulação de fluxo e transporte de soluto.....	31
5. RESULTADOS	33

5.1. Distribuição das litologias	33
5.2. Cenários Geológicos gerados pelo T-PROGS.....	35
5.2.1. Gráficos de probabilidade de transição	35
5.2.2. Distribuição tridimensional das litofácies	36
5.3. Modelo Conceitual.....	37
5.4. Caracterização da contaminação por nitrato.....	39
5.5. Análise das plumas de nitrato simuladas.....	41
5.5.1. Comprimento	43
5.5.2. Profundidade.....	45
5.5.3. Concentrações.....	47
6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	49
7. CONDISERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÃO	53
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54

1. INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação do tema

O nitrato (NO_3^-) constitui um dos contaminantes mais amplamente distribuídos, associado principalmente ao uso extensivo de fertilizantes agrícolas, em meios agrícolas; vazamentos em redes de coleta de esgoto (STRADIOTO *et al.*, 2020) e lançamento de efluentes industriais de diversos setores da cadeia produtiva, em meios urbanos (CETESB, 2016).

Devido à sua ampla ocorrência, principalmente em meio urbanos, onde grande parte da população mundial vive atualmente, as áreas contaminadas por nitrato representam um problema ambiental de grande relevância. O nitrato, acima das concentrações naturais, é tóxico à saúde humana, podendo causar metahemoglobinemia infantil, doença letal em crianças, que prejudica o transporte de oxigênio através do sangue (STRADIOTO *et al.*, 2020).

No Brasil, a Portaria 518/2004 do Ministério da Saúde considera que a água torna-se imprópria para consumo humano quando a concentração de nitrato excede 44 mg/L ou 10 mg/L (nitrato na forma de nitrogênio), o que é adotado em outros importantes órgãos ambientais no mundo, como a USEPA (*United States Environmental Protection Agency*) e a CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo).

Para o gerenciamento de áreas contaminadas não basta, muitas vezes, apenas o conhecimento da dinâmica hidrogeológica, local ou regional, para a tomada de medidas de proteção ou recuperação dessas áreas. Nesse sentido, os modelos numéricos tem sido adotados como ferramentas de gerenciamento para a tomada de decisões baseadas em cenários geológicos possíveis (BERNICE, 2010).

A aplicação de modelos numéricos constitui uma importante ferramenta no gerenciamento de áreas contaminadas, permitindo a previsão do comportamento do contaminante em subsuperfície e, por consequência, uma aplicação mais eficiente do método de remediação adequado, em uma possível intervenção.

Entretanto, para que os modelos numéricos possam servir de subsídio de gerenciamento efetivo, é necessário que tal modelo expresse da melhor maneira possível o meio geológico, que é substancialmente heterogêneo em quase sua totalidade. Deste modo, os modelos numéricos de abordagem estocástica se apresentam como uma ferramenta interessante para descrever o meio

geológico de forma aproximada à realidade, em oposição à modelos determinísticos, pois estes não são capazes de prever as incertezas inerentes ao meio geológico.

Tendo em vista que a disposição espacial das fácies sedimentares de um aquífero é diretamente relacionada às heterogeneidades geológicas, os padrões de distribuição das propriedades do aquífero podem ser simulados a partir da distribuição de suas fácies. Para tanto, o presente trabalho empregará o método de Cadeias de Markov, que é utilizado para a caracterização de processos recorrentes no espaço ou no tempo, como a sucessão de fácies em um mesmo sistema deposicional (KRUMBEIN & DACEY, 1969).

O método de Cadeias de Markov foi empregado em diversos trabalhos (CARLE & FOGG, 1977; CARLE *et al.*, 1998, EIDSVIK *et al.*, 2004, entre outros), constituindo uma ferramenta matemática que possui aplicações em problemas geológicos que envolvam variáveis categóricas.

1.2. Objetivos

O objetivo geral do presente trabalho é entender em que medida diferentes arranjos tridimensionais das fácies sedimentares de um aquífero possuem influência sobre a evolução de uma pluma de contaminação. Para tanto, analisou-se através de modelagem numérica o comportamento da pluma de contaminação por nitrato no campus da Unesp - Rio Claro, especificamente através da aplicação do método estocástico de Cadeias de Markov.

Desta forma, fez-se o levantamento de dados de sondagens já realizadas no *campus*, para posteriormente integrar e sistematizar os dados levantados para uso nos *softwares* GMS (através da ferramenta T-PROGS) e Visual Modflow, o que levou à geração de modelos probabilísticos com seus respectivos arranjos espaciais, incorporados nas simulações de transporte de contaminantes nos cenários geológicos gerados.

2.2. Geomorfologia

A região de Rio Claro situa-se no compartimento geomorfológico denominado Depressão Periférica. As primeiras considerações sobre esse compartimento surgem com Moraes Rego (1932), seguida de outros autores. Segundo Almeida (1964), a Depressão Periférica constitui uma área de acentuado rebaixamento causado por processos erosivos, localizada entre os compartimentos geomorfológicos Planalto Atlântico, a leste, e as Cuestas Basálticas, a oeste.

Segundo Penteado (1971), a Depressão Periférica pode ser definida como uma área topograficamente deprimida contida entre as escarpas da zona de cuestas, associada aos derrames basálticos da Formação Serra Geral e o Planalto Atlântico. Esse compartimento geomorfológico possui aproximadamente 100 km de largura e 450 km de extensão norte-sul, com desníveis da ordem de 200 a 300 metros, próximos a zona de custas (PENTEADO, 1971).

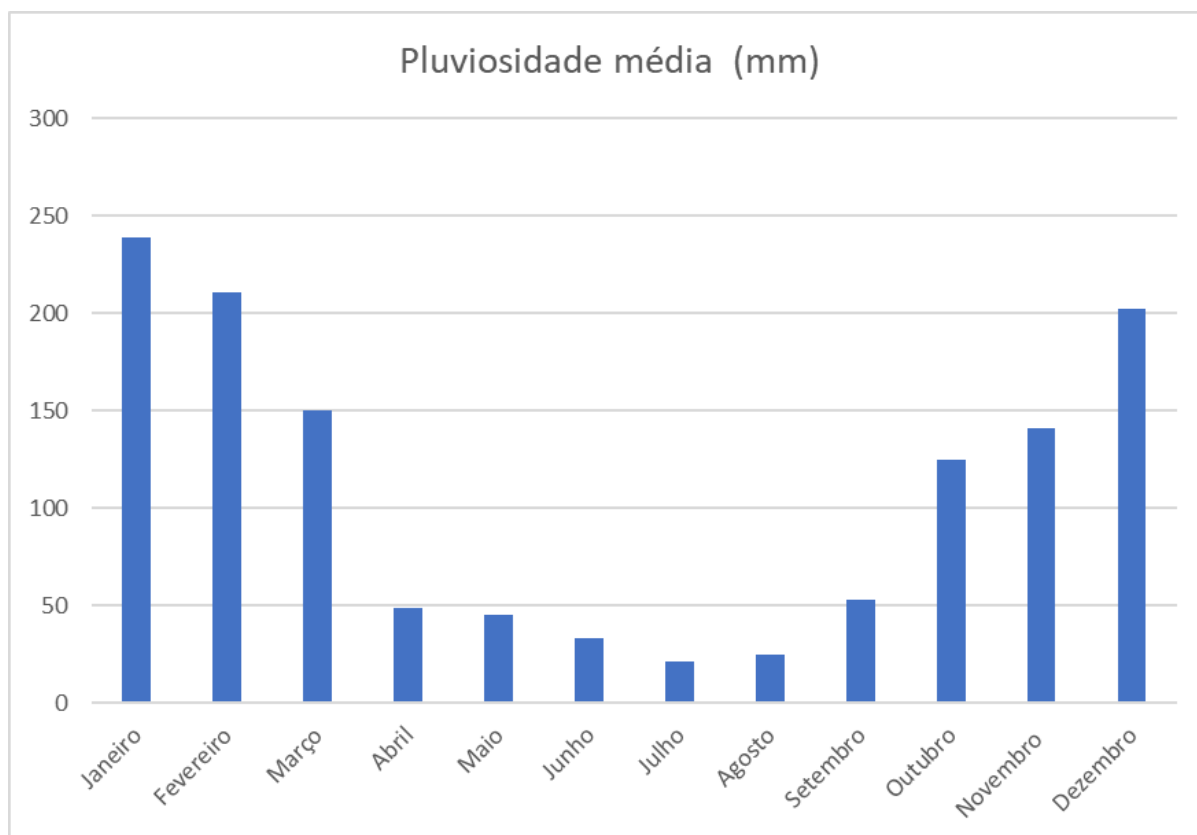
Segundo Penteado (1971), a região de Rio Claro é caracterizada localmente por colinas tabuliformes, com vertentes suavemente convexas e patamares com baixa inclinação, com altitudes que variam entre 550 e 650 metros. Segundo o autor, poucos elementos geomorfológicos se destacam dessa descrição, atribuindo a este relevo um aspecto de característica monótona e de pouca variação.

São descritas para região de Rio Claro a presença de lagoas de formato ovalado, com extensões entre 100 e 500 metros, aproximadamente, e que ocorrem em depressões de relevo suavizadas. Apresentam níveis d'águas intermitentes e, portanto, com forte relação ao regime de chuvas ao longo do ano (ZAINE, 1994).

2.3. Clima

De acordo com a classificação de Köppen, a área de estudo apresenta clima subtropical úmido (Cwa) com predominância de invernos secos e verões quentes. Quanto a distribuição anual do regime de chuvas, o período chuvoso se concentra nos meses de outubro a março, onde são registradas precipitações entre 130 mm a 250 mm, enquanto que o período de seca se estende de abril a setembro, com uma média de precipitação em torno de 20 mm a 50 mm. A pluviosidade média anual gira em torno de 1.294 mm, conforme apresentado na **Figura 2**.

Figura 2: Pluviosidade média anual para a cidade de Rio Claro (extraído e adaptado de pt.climate-data.org)



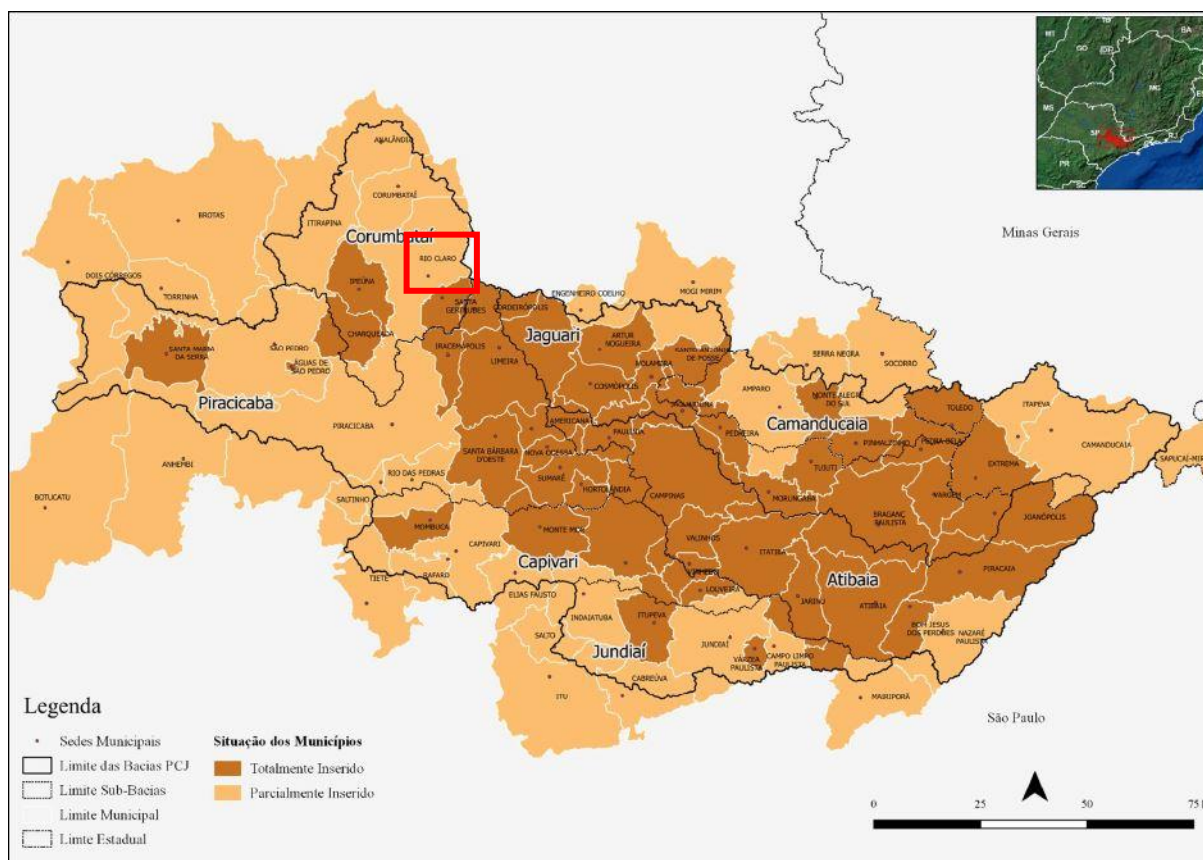
2.4. Hidrografia

Segundo a Lei Estadual nº 7.663/91 que institui a Política Estadual dos Recursos Hídricos e o Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos, a área de estudo situa-se na Bacia Hidrográfica dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí - UGRHI-5.

A Bacia do PCJ (Piracicaba, Capivari, Jundiaí) é dividida em 7 sub-bacias principais, sendo cinco pertencentes ao Rio Piracicaba (Piracicaba, Corumbataí, Jaguari, Camanducaia e Atibaia) e as demais ao Capivari e Jundiaí, ocupando uma área total de aproximadamente 15.377,81 km².

O município de Rio Claro está inserido na Sub-Bacia Corumbataí, conforme mostra a **Figura 3**, retirada do Relatório de Situação dos Recursos Hídricos da UGRHI 05 (Comitê PCJ, 2019). A Sub-Bacia Corumbataí ocupa um total de 14% da área total das Bacias do PCJ, com área de drenagem de aproximadamente 1.717,59 m². A vegetação nativa remanescente corresponde a 14,63% da área total, concentrando-se principalmente na região oeste da sub-bacia.

Figura 3: Localização das Sub-Bacias da UGRHI-5, com destaque (polígono vermelho) para a localização aproximada do município de Rio Claro, na sub-bacia Corumbataí (Comite PCJ, 2019).



As principais atividades econômicas na UGRHI-5 são a agropecuária e a produção industrial, sendo que na Sub-Bacia do Corumbataí, destaca-se a produção de cana de açúcar, que ocupa um total de 41,97% do total de solo ocupado para esta atividade. Com relação aos recursos hídricos, o município de Rio Claro é margeado por diversos corpos d'água, sendo os Rios Corumbataí, Cabeça, Passa Cinco e Ribeirão Claro os principais; cada um compondo uma Microbacia Hidrográfica.

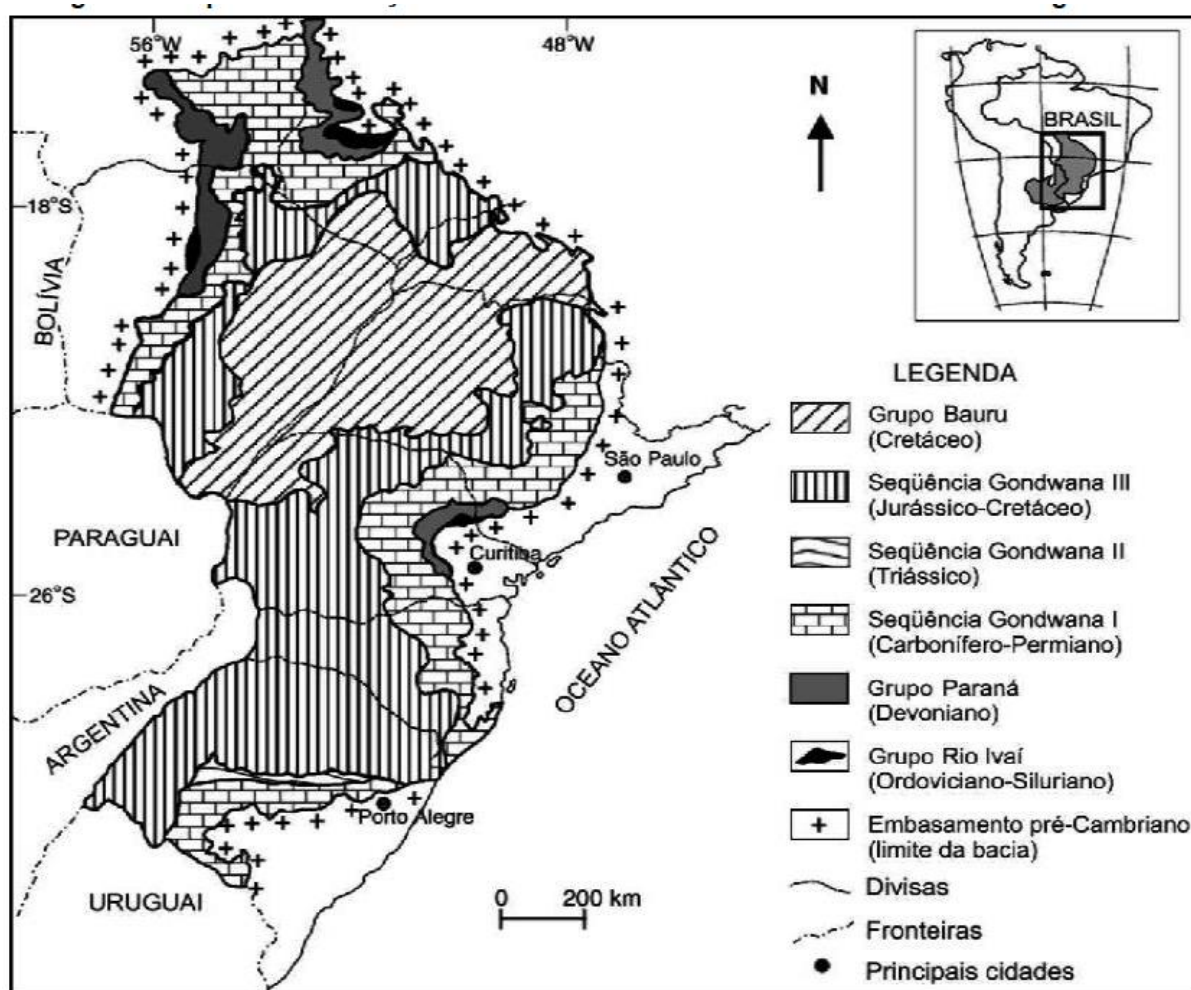
Segundo o Diagnóstico Ambiental e Desenvolvimento de Sistemas de Implementações de projetos de recuperação da Qualidade dos Corpos d'água do município de Rio Claro (FEHIDRO, 2014), as microbacias pertencentes ao território municipal são as microbacias: Alto, Médio e Baixo Corumbataí, Servidão, Baixo Passa Cinco, Alto, Médio e Baixo Cabeça, Sapezeiro, Rio Jacu, Jacutinga, Ibitinga, Alto e Baixo Ribeirão Claro, Cachoeirinha, Assistência, e Campo do Cocho. Neste mesmo diagnóstico constatou-se que a Microbacia Hidrográfica (MBH) do Alto Corumbataí é a qual apresenta maior extensão hídrica, seguida pela MBH Alto Ribeirão Claro.

Na área de estudo não há corpos d'água que cruzam o campus da UNESP de Rio Claro. Entretanto, há apenas um curso d'água que margeia a área, referente a um afluente do Ribeirão Claro situada nas áreas verdes do Horto Florestal Edmundo Navarro de Andrade, distante cerca de 900 m do *campus* universitário.

3. GEOLOGIA REGIONAL

A Bacia do Paraná é uma ampla região sedimentar do continente sul-americano (**Figura 4**), que inclui porções territoriais do Brasil meridional, Paraguai oriental, nordeste da Argentina e norte do Uruguai, totalizando uma área que se aproximadamente de 1,5 milhão de quilômetros quadrados (Milani *et al.*, 2007). Trata-se de uma bacia intracratônica de forma ovalada-irregular com eixo maior alongado segundo a direção NNE-SSW (1.750 km de comprimento) e largura média de 900 km (Zalán, 1987).

Figura 4: Mapa de localização da Bacia do Paraná as unidades aloestratigráficas (Milani, 1997).



Seu contorno atual é definido por limites erosivos relacionados em grande parte à história geotectônica Meso-Cenozoica do continente, cujo registro estratigráfico da bacia compreende um pacote sedimentar-magmático com uma espessura total máxima em torno dos 7 mil metros, coincidindo geograficamente o depocentro estrutural da sinéclise com a região da calha do Rio Paraná (Milani *et al.*, 2007).

Desta forma, seis unidades aloestratigráficas de segunda ordem ou supersequências (Milani, 1997) são reconhecidas na bacia: Rio Ivaí (Caradociano-Landoveriano), Paraná (Lockoviano-Frasniano), Gondwana I (Westfaliano-Scythiano), Gondwana II (Anisiano-Noriano), Gondwana III (Neojurássico-Berriasiano) e Bauru (Aptiano-Maestrichtiano). De acordo com Milani (1998), três delas correspondem a ciclos transgressivo-regressivos paleozoicos, enquanto as demais são pacotes sedimentares continentais mesozoicos com rochas ígneas associadas. Estas supersequências constituem o registro remanescente de sucessivas fases de acumulação sedimentar que se alternaram a épocas de regime erosivo (Milani, 1998).

Em relação ao contexto das bacias sedimentares brasileiras, a origem da subsidência inicial que localiza geograficamente as sinéclises está atrelada ao ciclo tecto-orogênico Brasileiro, o qual garantiu a formação e consolidação da Plataforma Sul-Americana que serviria de substrato para a evolução fanerozoica (Zalán, 2004). A ocorrência de um vulcanismo basáltico no fundo de outras bacias sedimentares brasileiras tem sido interpretada como um prenúncio de esforços distensionais, com falhamentos, condicionando uma calha tectônica precursora da bacia (Zalán, 2004). Desta forma, a hipótese de um início semelhante à de um rifte ativo ganha força como hipótese para o mecanismo inicial da subsidência das sinéclises paleozóicas da Plataforma Sul-Americana (Zalán, 2004), juntamente aos mecanismos de subsidências adicionais que vão aprisionando as supersequências posteriores.

Quanto aos aspectos tectônicos, sinéclises intracratônicas são pouco deformadas em comparação a outros tipos de bacias sedimentares, sua arquitetura é caracterizada por unidades litoestratigráficas sub-horizontais que podem ser acompanhadas por grandes distâncias sem alterações estruturais significativas (Siqueira, 2011). O tectonismo se concentra em alguns locais, tais como zonas de falha e altos estruturais, onde ocorre diversas estruturas geológicas predominantemente rúpteis. O arcabouço estrutural da Bacia do Paraná é marcado por grandes lineamentos estruturais que se orientam nas direções preferenciais de NW-SE, NE-SW e E-W (Zalán *et al.*, 1987). A partir destes grandes traços, que representam linhas de fraqueza, são condicionadas as respostas às atividades tectônicas impostas, tanto na geração e favorecimento de falhamentos, como também na sedimentação.

Outros elementos que merecem destaques na Bacia do Paraná são os altos estruturais, que por vezes estão associados aos grandes lineamentos estruturais (Siqueira, 2011). Trata-se de uma estrutura geológica associada a diferentes elementos como anticlinais, estruturas dômicas, horsts e estruturas em flor (Siqueira, 2011), os quais são oriundos das movimentações em

antigos lineamentos do embasamento pré-cambriano da bacia. A movimentação dessas paleoestruturas, sobretudo em caráter transcorrente, é transmitida à cobertura sedimentar causando a sua estruturação (Zalán *et al.*, 1987). Essa tectônica ressurgente normalmente é creditada a esforços advindos das bordas da placa Sul-Americana, contemporâneos à evolução da Bacia (Siqueira, 2011).

3.1.Geologia Local

Dentre as unidades litoestratigráficas mais recentes da Bacia do Paraná, encontra-se a Formação Rio Claro, composta por arenitos finos a grossos, regular a mal selecionados, friáveis, com camadas delgadas de argilitos intercaladas e tendo em sua base conglomerados com clastos de quartzito e quartzo (Perinotto *et al.*, 2006).

Esta unidade se insere no contexto dos sedimentos cenozoicos que ocorrem em todo o Estado de São Paulo, de forma generalizada, desde pequenas manchas isoladas, na forma de depósitos aluvionares, terraços, depósitos coluvionares, depósitos de reverso de escarpas, até ocorrências maiores, como em bacias terciárias na porção leste do estado (ZAINE, 1994). Segundo Soares & Landim (1976), a Formação Rio Claro foi depositada em ambiente fluvial de rios meandrantess.

A Formação Rio Claro possui uma faixa de ocorrência de direção NE-SW de aproximadamente 30 km de extensão e 10 km de largura. Sua ocorrência é limitada a nordeste e sudeste pelo Ribeirão Claro, a sul pelo Domo de Pitanga, a sudoeste pelo Ribeirão Vermelho e a noroeste pela ocorrência de relevos mais acidentados, associados à Formação Pirambóia. Possui baixa espessura, em torno de 30 metros e se posiciona em cotas máximas entre 650 e 670 metros e cotas mínimas próximas de 580 metros (ZAINE, 1994).

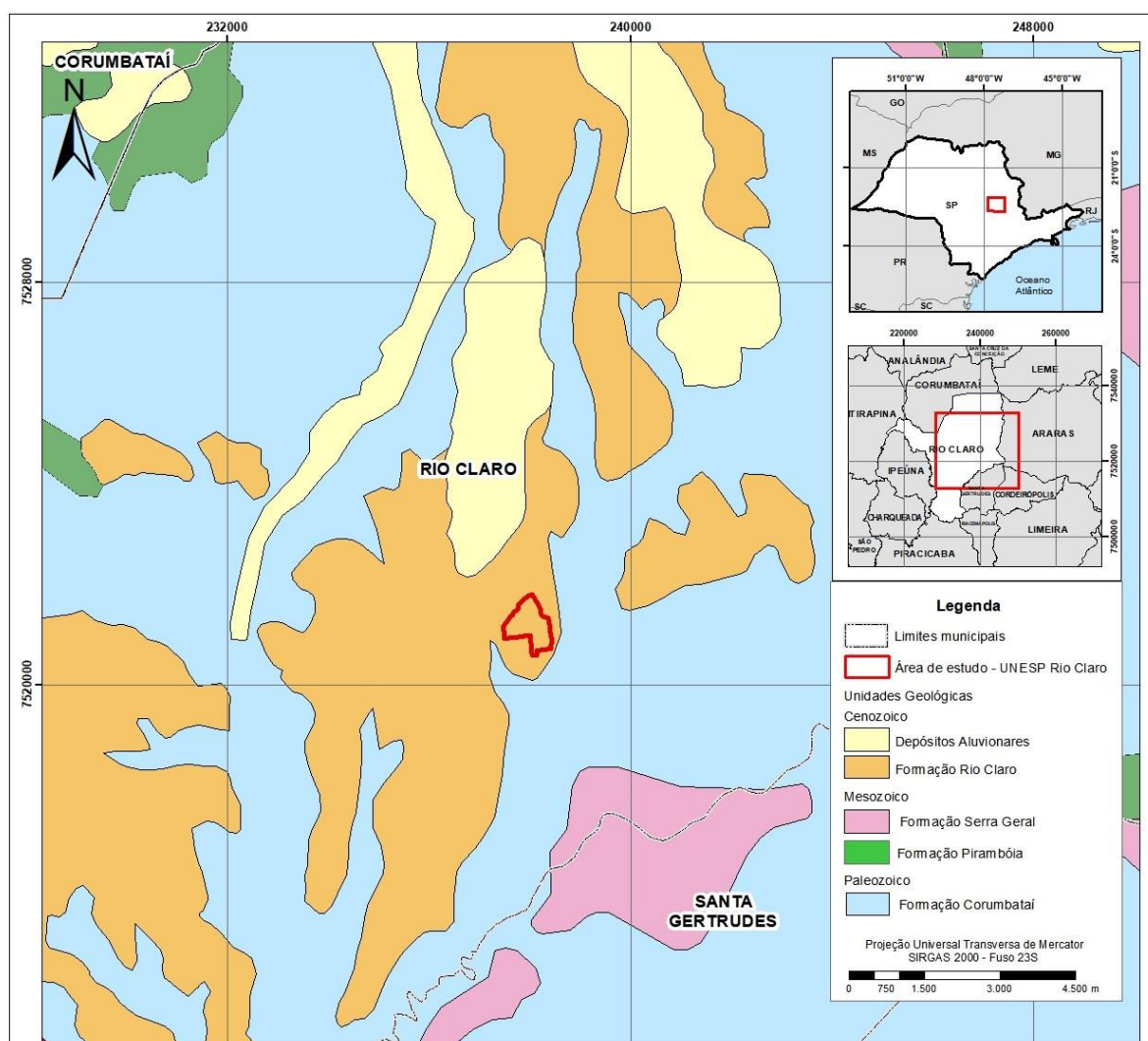
Esta unidade pode apresentar contato com três unidades litoestratigráficas distintas: Formação Corumbataí, Formação Pirambóia e Formação Tatuí (esta última de forma pontual) (ZAINE, 1994). A **Figura 5** ilustra o mapa de distribuição das unidades litoestratigráficas para o município de Rio Claro, com destaque à delimitação do *campus* da UNESP (área de estudo) inserida no contexto geológico da Formação Rio Claro.

Seu contato com a Formação Corumbataí é marcado de forma característica por um nível conglomerático que pode ou não ser precedido de paleossolo (ZAINE, 1994). Este contato é definido como uma paraconformidade já que esta unidade é de idade permiana.

Seu contato com a Formação Pirambóia ocorre próximo ao limite noroeste de extensão, em cotas mais elevadas, próximas de 650 metros. Devido às características litológicas e aos produtos de intemperismo de ambas as unidades, este contato é de difícil observação em campo, sendo inferido muitas vezes regionalmente por diferença de feições de relevo (ZAINÉ, 1994).

Por fim, o contato com a Formação Tatuí foi inferido na região do Domo de Pitanga, tendo por base a cobertura de solos arenosos associados à Formação Rio Claro e a continuidade de porções mapeadas desta formação ao longo de áreas próximas (ZAINÉ, 1994)

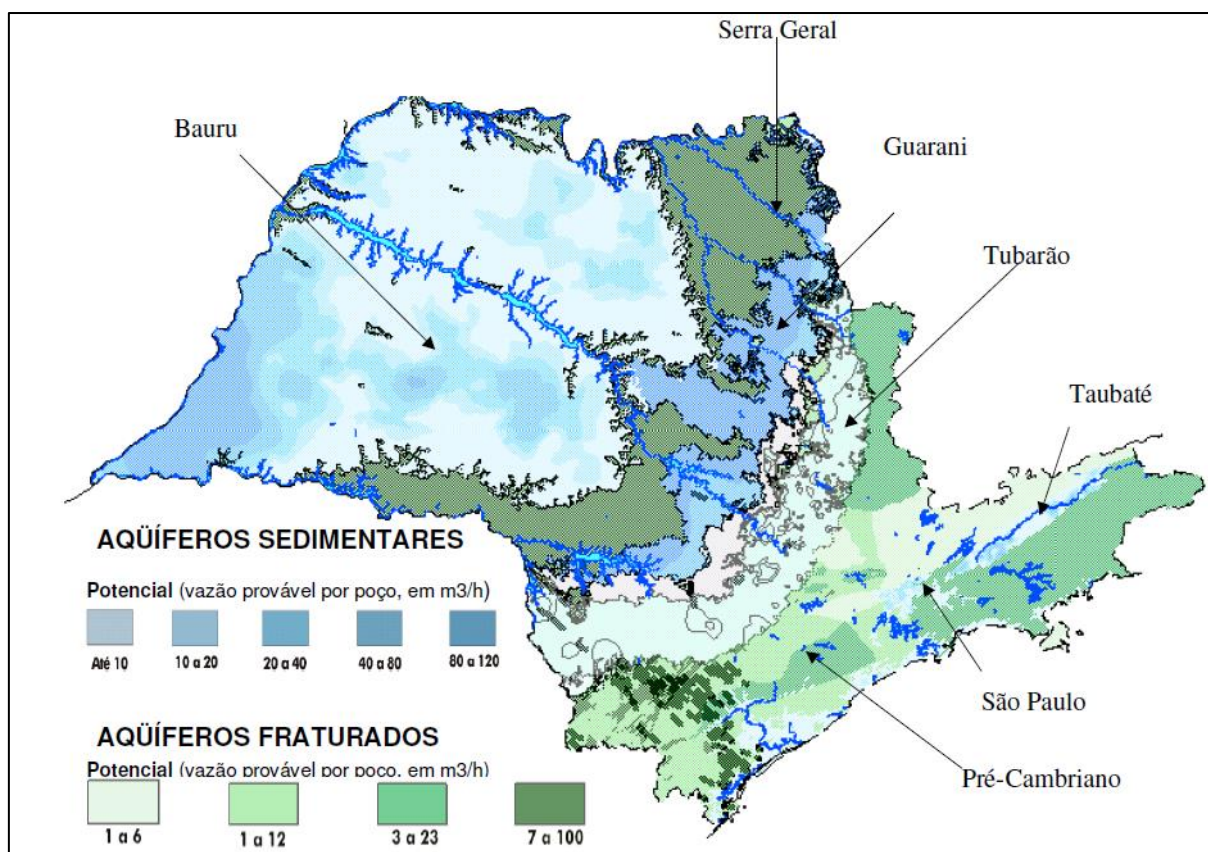
Figura 5 Mapa geológico da região de estudo.



3.2.Hidrogeologia

O Estado de São Paulo é, em termos de águas subterrâneas, dividido entre a Província Hidrogeológica da Bacia do Paraná, composta pelos Aquíferos Bauru, Serra Geral, Guarani e Tubarão, e pela Província do Escudo Ocidental do Sudeste, formada pelos Aquíferos Pré-Cambriano, Taubaté e da Bacia do Alto Tietê (CETESB, 2020). A **Figura 6** apresenta a distribuição dos aquíferos fraturados e sedimentares pelo Estado, segundo o Mapa das Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo, elaborado em conjunto pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE), Instituto Geológico (IG-SMASP), Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), e Serviço Geológico do Brasil (CPRM).

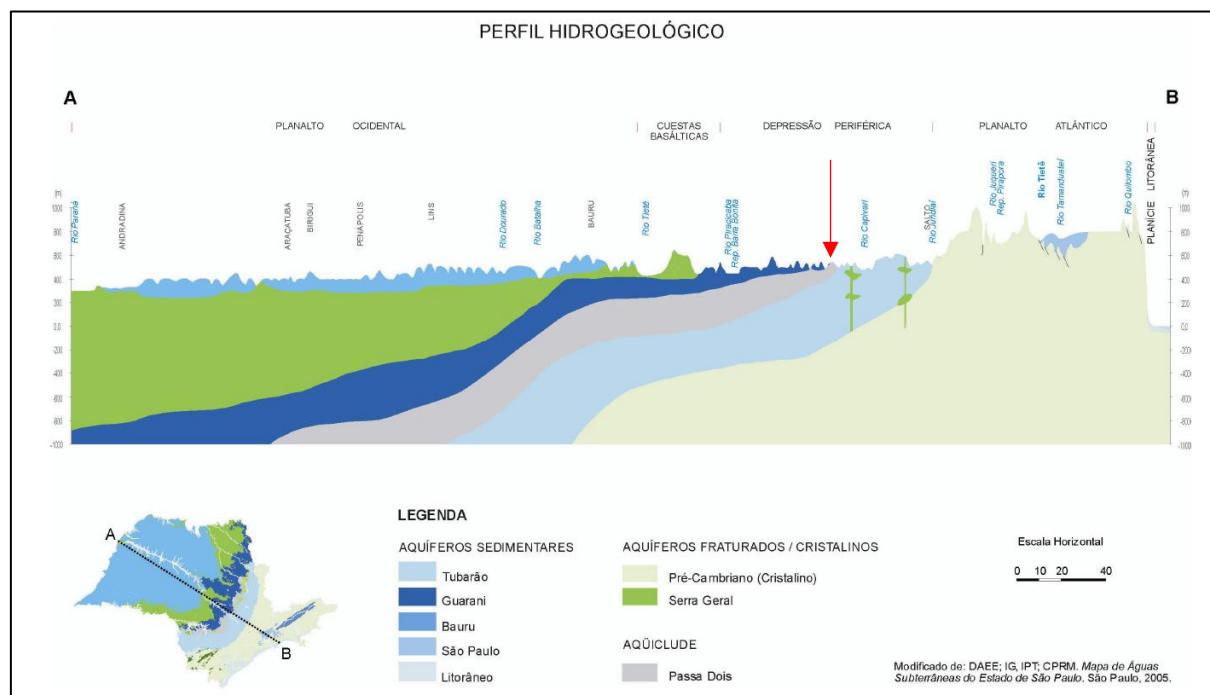
Figura 6: Mapa das Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo (DAEE *et al.*, 2005).



A **Figura 7** apresenta o perfil hidrogeológico do Estado de São Paulo (DAEE *et al.*, 2005), com a distribuição espacial e territorial dos aquíferos sedimentares e fraturados em seção esquemática. Neste perfil, observa-se a subdivisão do terreno do estado dentro do sistema geomorfológico correlacionado com as unidades aquíferas regionais. Há destaque, pela seta

vermelha, para a localização aproximada do município de Rio Claro/SP, em relação ao domínio geomorfológico de cuestas basálticas.

Figura 7: Seção Esquemática do Perfil Hidrogeológico do Estado de São Paulo (DAEE *et al.*, 2005), com destaque (seta vermelha) para a localização aproximada do município de Rio Claro/SP.



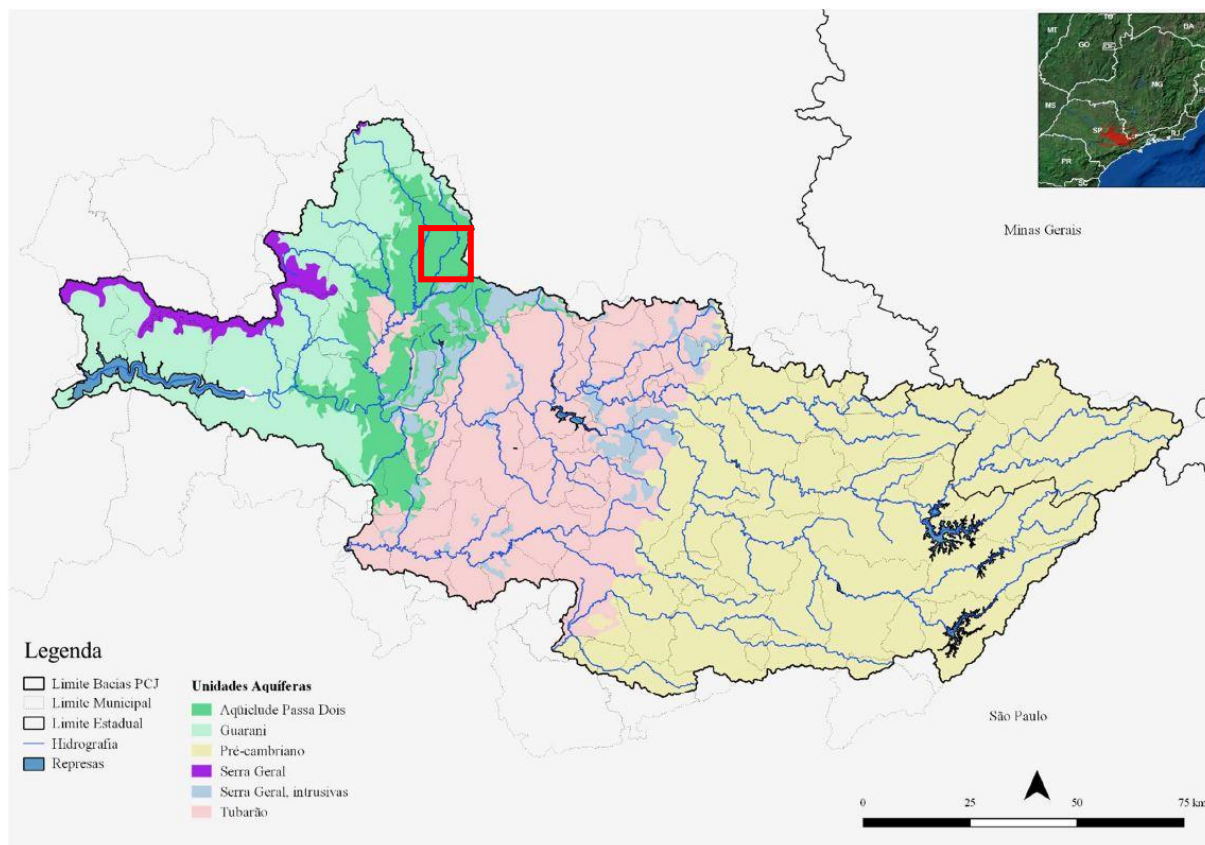
A Bacia Hidrográfica do Piracicaba-Capivari-Jundiá (UGRHI 05) está inserida em um contexto que conforma duas unidades da Província do Escudo Ocidental do Sudeste (os Aquíferos Fraturados Pré-Cambriano e o Serra Geral); e quatro unidades da Província Hidrogeológica da Bacia do Paraná: Aquíferos Sedimentares Guarani, Tubarão e Aquíclode Passa Dois. A **Figura 8** ilustra a seguir a distribuição das Unidades Aquíferas para a UGRHI 05.

Observa-se, a partir deste mapa de distribuição, que o município de Rio Claro se insere dentro do Aquíclode Passa Dois. O Aquíclode Passa dois é uma unidade hidrogeológica sedimentar de extensão regional que separa os Aquíferos Tubarão e Guarani. Formado entre 250 e 230 milhões de anos atrás, este aquíclode é formado por sedimentos depositados em ambiente marinho (SMA, 2014).

As litologias encontradas, bastante heterogêneas, são predominantemente de folhelhos, siltitos, argilitos, calcários e dolomitos que ocorrem como camadas com diferentes espessuras, às vezes, ritmicamente intercaladas. Como é constituído por sedimentos predominantemente finos, sua

capacidade em fornecer água é bastante baixa e com produtividade insuficiente para o abastecimento de grandes comunidades (SMA, 2014).

Figura 8: Distribuição das Unidades Aquíferas na UGRHI 05



Esta unidade aflora em uma faixa estreita de aproximadamente 6.900 km², que se estende do norte ao sul do Estado de São Paulo, passando pelas cidades de Porto Ferreira, Pirassununga, Rio Claro, Cesário Lange, Angatuba, Paranapanema e Fartura. Nesta porção aflorante, sua espessura média é em torno de 120 metros (IG/CETESB/DAEE 1997).

Devido à produtividade bastante baixa, esta unidade é pouco explorada e, consequentemente, pouco estudada do ponto de vista hidrogeológico. Na região de Rio Claro, litoestratigraficamente acima do Aquicludo Passa Dois, encontra-se o sistema aquífero Rio Claro. Este aquífero, objeto de estudo do presente trabalho, é classificado como livre, portanto, não confinado, de baixa profundidade, com espessuras médias próximas de 30 metros e vazões entre 5 m³/h e 25 m³/h (OLIVA, 2006).

Segundo Oliva (2006), o Aquífero Rio Claro é constituído pelos arenitos da Formação Rio Claro, intercalado por camadas argilosas que geram aquíferos suspensos localmente. Alguns

desses arenitos apresentam alto teor de argilas, outros são conglomeráticos, coerentes com sua sedimentação em ambiente fluvial, no qual os níveis mais argilosos correspondem a planícies de inundação e os níveis conglomeráticos aos canais (OLIVA, 2002).

A potenciometria do Aquífero Rio Claro aponta um fluxo de água subterrâneas para sul, acompanhando a topografia, e a principal área de recarga do aquífero localiza-se a norte, em região predominantemente agrícola, onde o aquífero apresenta maior espessura e baixa taxa de exploração (GONÇALVES, 2016). Segundo o autor, a região sul do aquífero situa-se em área intensamente urbanizada, acarretando em diminuição da taxa de recarga devido à impermeabilização do solo no meio urbano.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Referencial Teórico

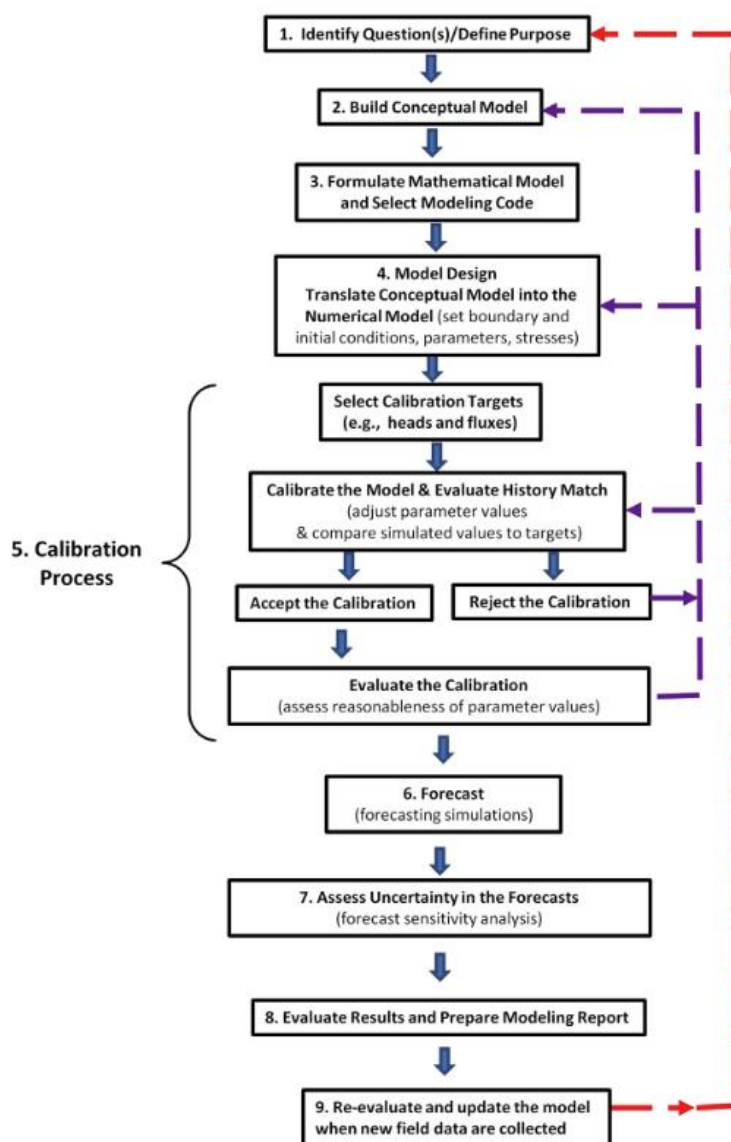
4.1.1. Modelos Matemáticos

Modelos são ferramentas destinadas a representação da realidade de maneira simplificada (WANG e ANDERSON, 1995). Os modelos se destinam à realização de previsões ou compreensão de problemas complexos.

Segundo Anderson *et al.*, (2015), os modelos matemáticos podem ser divididos em dois tipos principais: os modelos baseados em dados, que fazem uso de equações matemáticas para, a partir de um dado conhecido, inferir dados calculados pelo modelo; e os modelos baseados em processos, que utilizam como referencial leis físicas para inferir dados e a dinâmica dos processos dominantes na área de interesse, além do fator tempo que, em alguns casos, é determinante da dinâmica natural.

Segundo Anderson *et al.* (2015), o processo de criação de um modelo começa pela definição de seu propósito, ou seja, para qual objetivo se deseja criar um modelo de águas subterrâneas (**Figura 9**). Dentre esses objetivos, pode-se destacar a previsão de impactos (ainda não realizados) na dinâmica hidrológica de uma certa região, reproduzir condições da dinâmica natural pretérita e a interpretação inicial de processos hidrológicos/hidrogeológicos. Para este último objetivo, o modelo gerado pode ou não ser calibrado.

Figura 9: Fluxograma do processo de criação e desenvolvimento de um modelo de águas subterrâneas, segundo Anderson, Woessner e Hunt (2015).



Por ser uma representação simplificada de processos naturais, os modelos apresentam sempre um determinado grau de incerteza e neste fato reside sua limitação. Dessa forma, os dados utilizados para alimentar um modelo podem gerar diversos modelos igualmente razoáveis, em termos de interpretação do ambiente, o que faz com que não haja um modelo definitivo (ANDERSON *et al.* 2015). Nesse sentido, a calibração do modelo com a aquisição de novos dados e novas interpretações do ambiente constitui a principal ferramenta para refinar os parâmetros e, portanto, se aproximar da realidade.

4.1.2. Método de Diferenças Finitas

Segundo Fitts (2013), os softwares de modelagem numérica de fluxo de água subterrânea se baseiam em três principais métodos: Diferenças Finitas, Elementos Finitos ou Elementos Analíticos. Os modelos numéricos baseados nos métodos de Diferenças Finitas e Elementos finitos são mais comumente usados para resolução de modelos hidrogeológicos, por permitirem o desenvolvimento de modelos com alto grau de complexidade de seus parâmetros (ANDERSON *et al.* 2015).

O método de Diferenças Finitas, particularmente, possui larga utilização devido a sua versatilidade e relativa simplicidade de seus conceitos (FITTS, 2013). Tal método é utilizado pelos *softwares* da “família” MODFLOW, tais como o USGS Model Muse, Visual Modflow e GMS (*Groundwater Modeling System*).

O método, de maneira geral, se baseia em uma série de equações algébricas baseadas em premissas físicas, como a Lei de Darcy e a Lei de Conservação da Massa. Para tanto, os *softwares* que utilizam o método fazem a subdivisão da área que está sendo modelada em blocos retangulares e, em cada um deles, as propriedades físicas assumidas são homogêneas (FITTS, 2013).

4.1.3. Abordagens Estocásticas

As diversas abordagens utilizadas nos modelos numéricos podem ser subdivididas em, basicamente, abordagens determinísticas ou estocásticas. Segundo Anderson *et al.* (2015), nos modelos estocásticos parte dos dados possui uma distribuição relativa em termos de probabilidades, enquanto que os modelos determinísticos, os dados possuem um valor fixo no espaço.

4.1.4. Probabilidade de transição entre os litotipos

Os modelos que possuem uma abordagem estocástica tendem a se aproximar mais da realidade observável, quando comparados a modelos determinísticos. Isso ocorre devido ao fato de que, na natureza, as heterogeneidades são a regra na maioria dos casos.

O T-PROGS (*Transition Probability Geostatistical Software*) constitui uma ferramenta interessante, que utiliza abordagem estocástica com resultados, portanto, em termos de probabilidade. Segundo Carle (1999), o T-PROGS é definido como uma ferramenta computacional que faz uso de uma abordagem em termos de probabilidade de transição entre unidades geológicas, ou seja, uma abordagem de caráter markoviano. Essa ferramenta é utilizada para, em linhas gerais, simular a distribuição espacial de variáveis categóricas, como as fácies sedimentares de um aquífero (CARLE, 1999).

A aplicação de uma abordagem que leve em consideração variáveis categóricas possuem uma maior aplicação em várias áreas do conhecimento geológico. Em primeiro lugar, este tipo de abordagem pode ser empregado na utilização de dados mais esparsos, onde a aquisição de dados não seja tão simples. Além disso, determinadas áreas da geologia, como na indústria do petróleo, onde as litologias possuem diferentes funções dentro do sistema petrolífero, ou na hidrogeologia, onde as litologias formam estruturas selantes ou meios porosos, a divisão dos dados em categorias se torna mais interessante (CARLE, 1999).

4.1.5. Cadeias de Markov

O método de Cadeias de Markov constitui uma ferramenta matemática que possui aplicações em problemas geológicos que envolvam variáveis categóricas. Segundo Carle & Fogg (1997), as aplicações do método em uma única dimensão, utilizando dados geológicos, é bastante conhecida, embora aplicações em duas ou três dimensões sejam mais recentes.

Conceitualmente, as premissas assumidas em uma dimensão podem ser extrapoladas para as demais dimensões, a depender do modelo no qual se deseja aplicar o método. Dessa forma, a extrapolação dessas premissas faz-se assumir que a ocorrência local de uma determinada categoria (por exemplo, uma camada sedimentar específica) depende inteiramente da ocorrência mais próxima de outra categoria (ou da mesma), sem levar em consideração outras ocorrências. Ou seja, assume-se que a variabilidade espacial das categorias definidas ocorre em todas as direções (CARLE, 1999).

4.2. Etapas de trabalho

4.2.1. Compilação de dados de sondagens

Os dados utilizados neste trabalho foram obtidos a partir da descrição de 22 sondagens realizadas no *campus* e posterior compilação dos dados levantados pelos colaboradores do Laboratório de Estudo de Bacias (Lebac), da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – *Campus* Rio Claro. Através das sondagens, pôde-se visualizar a sucessão vertical das camadas sedimentares bem como dividir os litotipos descritos em categorias.

4.2.2. Testes de condutividade hidráulica associados

Através de ensaios *Slug*, fornecidos pelo Laboratório de Estudo de Bacias (Lebac), foi realizada a caracterização dos valores de condutividade hidráulica nas áreas adjacentes às seções filtrantes dos poços de monitoramento (**Tabela 1**). Com essa informação levantada e com o conhecimento do perfil construtivo dos poços de monitoramento, foi possível atribuir valores de condutividade hidráulica a cada litotipo anteriormente definido.

Os valores adotados baseiam-se no trabalho de Teramoto *et al.* (2021), publicado recentemente.

Tabela 1: Valores de condutividade hidráulica atribuídos a cada litotipo. Adaptado de Teramoto et al. (2021).

Condutividade Hidráulica (m/s)				
Litotipos	Valor médio	Desvio padrão	Numero de testes	Porosidade efetiva
Areia argilosa	1.75×10^{-5}	1.88×10^{-5}	15	0.25
Areia	2.10×10^{-4}	9.3×10^{-5}	5	0.19
Argila	3.39×10^{-7}	-	2	0.06

4.2.3. Simulação do arranjo das fácies sedimentares

A partir das informações adquiridas nas sondagens e posterior categorização das litologias descritas, foram realizadas simulações utilizando a ferramenta T-PROGS (*Transition Probability Geostatistical Software*), disponível no *software* GMS (Groundwater Modeling System) desenvolvido pela empresa Aquaveo.

Essas simulações têm por finalidade a modelagem da variabilidade espacial das litologias, ou seja, elas geram como resultados um número definido de cenários geológicos de possível

ocorrência, baseado nos dados fornecidos. As simulações realizadas pelo *software* se baseiam no método de Cadeias de Markov.

Segundo Carle (1997), a probabilidade de transição entre duas litologias pode ser entendida como a probabilidade da litologia (k) ocorrer na posição espacial (x+h). Nesse contexto, o modelo de Cadeias de Markov se baseia em uma função que relaciona probabilidade de transição entre as litologias de um meio $t_{jk}(h)$ em resposta a variação de h:

$$t_{jk}(h) = Pr\{k \text{ ocorrer em } x+h \mid j \text{ ocorrer em } x\}$$

Com base no ajuste entre as curvas de transição geradas pelo *software* a partir dos dados fornecidos e as calculadas pelas Cadeias de Markov, na direção vertical, a variabilidade associada a esta direção é extrapolada para as direções x e y através de um modelo de variabilidade espacial (TERAMOTO, 2017)

4.2.4. Caracterização da contaminação

O *campus* da Unesp em Rio Claro possui uma já conhecida contaminação de nitrato detectada em alguns de seus poços de monitoramento. Segundo Teramoto et al. (2021), em campanha de amostragem de águas subterrâneas realizadas em julho e outubro de 2014, onde foram coletadas amostras de quatro poços de monitoramento e três poços de abastecimento de água, detectou-se concentrações de nitrato nos poços amostrados, todas acima do limite de potabilidade estabelecido pelos órgãos ambientais.

As fontes potenciais dessas contaminações foram interpretadas inicialmente como sendo as fossas sépticas instaladas no *campus*. Por este motivo, as fossas sépticas foram desativadas e o esgoto produzido foi direcionado para a rede de esgoto. Entretanto, após as conclusões de Teramoto et al. (2021), tais áreas fontes foram descartadas. Uma discussão mais aprofundada a este respeito encontra-se no **item 5.4** do presente trabalho.

4.2.5. Simulação de fluxo e transporte de soluto

Como última etapa, os cenários geológicos gerados pelo T-PROGS foram convertidos em valores de condutividade hidráulica e porosidade específica equivalente e posteriormente incorporados ao modelo numérico da área de estudo. Desta forma, os dados gerados servirão de parâmetros para as simulações de fluxo de água subterrânea e de transporte de contaminante na área, através do *software* Visual Modflow.

5. RESULTADOS

5.1. Distribuição das litologias

Com base na descrição de 22 sondagens (**Tabela 2**) distribuídas no *campus* da Unesp em Rio Claro (**Figura 10**), pôde-se visualizar a sucessão vertical das camadas sedimentares, conforme apresentado na **Figura 11**. As descrições das sondagens foram realizadas pelo Laboratório de Estudo de Bacias (Lebac). A partir da sucessão vertical das litologias, foram classificadas 6 litologias distintas, utilizando critérios laboratoriais e de campo. Foram classificados da base para camadas de Arenito (Alto e Baixo Gamma), Intercalação entre Argila e Silte, Argila, Arenito (Baixo Gamma) e Arenito Argiloso.

Tabela 2: Dados das sondagens utilizadas no estudo

SPT	Descrição	Perfilagem	HPT	Granulometria	Sondagens	X (m)	Y (m)	Cota Topográfica (m)
					PM11	237550.88	7521041.55	616.61
			X		HPT 04	237548.09	7521041.81	616.61
		X			PM 04	237646.76	7520984.23	617.18
		X			PM 07	237527.81	7521053.08	617.09
			X		HPT 01	237528.77	7521050.27	617.09
	X	X		X	PM 35	237545.61	7521082.01	616.65
			X		HPT 06	237545.61	7521082.01	616.65
	X			X	S1	237584.00	7520988.00	616.96
	X			X	S2	237568.00	7521189.00	617.46
	X			X	S3	237567.00	7521274.00	617.65
	X				S4	237510.00	7521188.00	616.92
	X			X	S5	237614.00	7521229.00	618.03
	X				S6	237621.00	7521120.00	617.21
				X	PM 33	237587.40	7521062.12	616.57
	X			X	S7	237587.40	7521062.12	616.57
			X		HPT 02	237502.14	7521081.46	616.10
			X		HPT 03	237557.35	7521077.52	616.61
			X		HPT 05	237550.21	7521087.21	616.58
	X				PM 26	237545.23	7521087.27	616.64
	X				PM 25	237551.14	7521083.25	616.60
	X				PM 27	237540.44	7521081.95	616.62
	X				PM 28	237546.12	7521076.89	616.62

Figura 10: Mapa de localização das sondagens distribuídas no campus da UNESP Rio Claro.

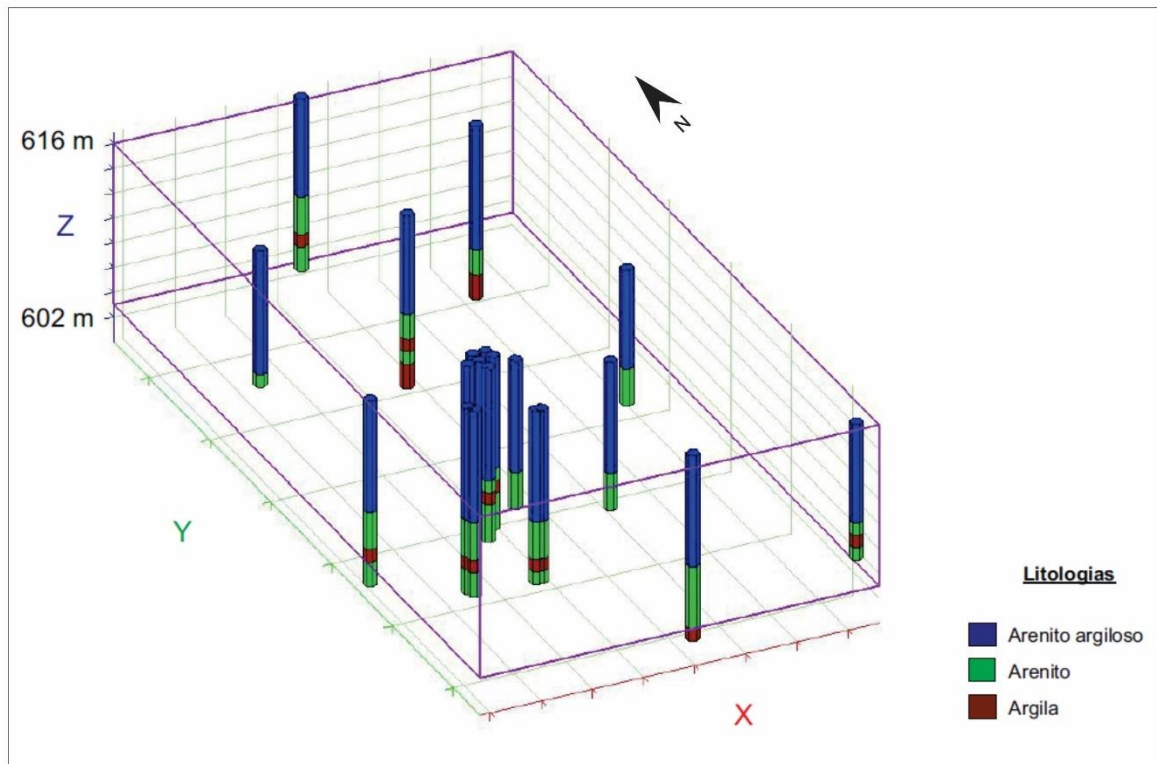


Devido à baixa ocorrência de alguns litotipos e, portanto, sua baixa representatividade na área, para o presente estudo reagrupou-se as litologias descritas, conforme apresentado na **Tabela 3** e ilustrado na **Figura 11**.

Tabela 3: Classificação das litologias descritas nas sondagens e posteriormente reagrupadas para o presente trabalho.

Litologias Descritas	Litologias Reagrupadas
Arenito Argiloso	Arenito Argiloso
Arenito (Baixo Gamma)	Arenito
Arenito (Alto e Baixo Gamma)	
Argila	Argila
Intercalação Argila Sile	
Embasamento Cristalino	-

Figura 11: Bloco diagrama representando a sucessão vertical das camadas sedimentares, a partir das sondagens disponíveis. Para melhor visualização, foi aplicado exagero vertical.

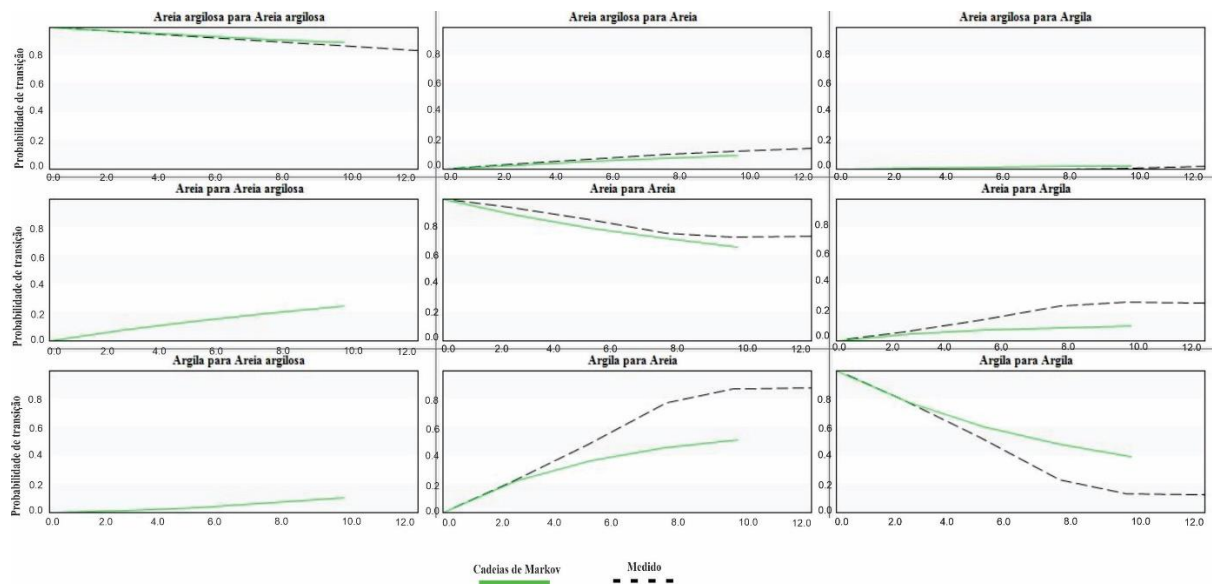


5.2. Cenários Geológicos gerados pelo T-PROGS

5.2.1. Gráficos de probabilidade de transição

Tendo por base a sucessão vertical das fácies sedimentares observadas nas sondagens, foram gerados gráficos de probabilidade de transição entre as litofácies (**Figura 12**). De acordo com os gráficos gerados, as maiores probabilidades de transição observadas se deram da litologia Argila para Areia.

Figura 12: Gráficos de probabilidade de transição entre as litofácies sedimentares observadas. A linha pontilhada representa os dados de sondagens e a linha contínua verde representa o ajuste baseado nas Cadeias de Markov.

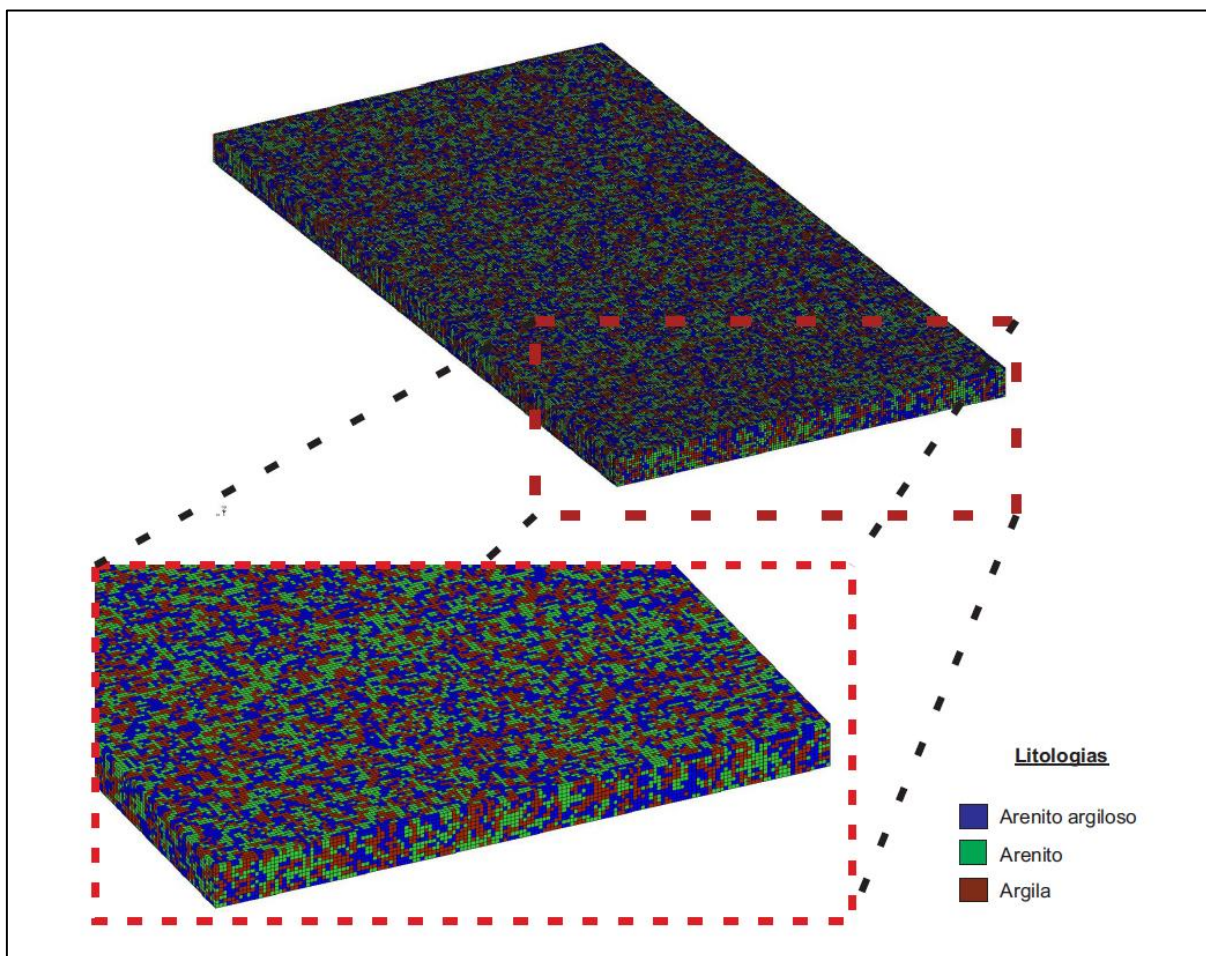


5.2.2. Distribuição tridimensional das litofácies

Foram gerados 30 cenários geológicos com base nos dados de sondagem. Na **Figura 13** é apresentado um dos cenários gerados. Cabe ressaltar que os cenários geológicos se dão em termos de probabilidade de ocorrência.

Os cenários geológicos gerados pelas simulações serão convertidos em valores de condutividade hidráulica e porosidade específica equivalente. Desta forma, será possível simular o fluxo de contaminante na área através do *software* Visual Modflow e inferir interpretações a respeito da totalidade dos dados gerados.

Figura 13: Cenário Geológico gerado pelo T-PROGS. Não foi alicado exagero vertical



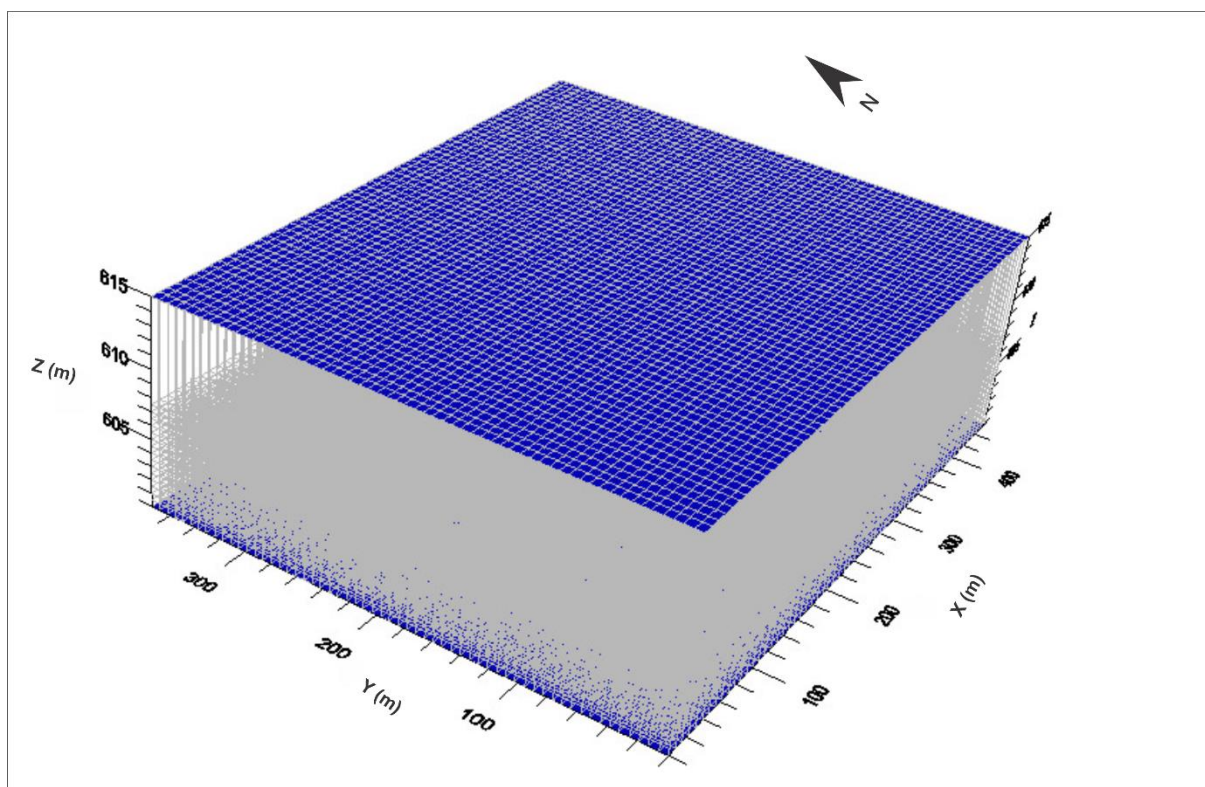
5.3. Modelo Conceitual

O Modelo Conceitual elaborado adotou como áreas fontes de contaminação as localidades probabilísticas concluídas por Teramoto *et al.*,(2021). Segundo as conclusões dos autores no referido artigo, as fossas sépticas, que antes eram adotadas como fontes principais de contaminação por outros modelos conceituais, foram descartadas visto que não foi possível traçar uma relação entre tais áreas fontes e a pluma de contaminação de nitrato. As áreas fontes sugeridas por Teramoto *et al.*,(2021) são constituídas por vários pontos de vazamento nas tubulações da rede de coleta de esgoto. Para efeitos práticos, foram adotadas duas áreas fontes que constituem as localidades com maiores probabilidades de representar as áreas fontes de fato.

As condições de contorno adotadas foram de não-fluxo (para os limites sudeste, nordeste e noroeste da área de estudo) e de carga especificadas (para o limite sudoeste da área de estudo).

A área total do domínio do modelo conteitual possui 170 m^2 , sendo 457 metros de comprimento, 375 metros de largura e 15 metros de altura e o *grid* gerado possui um total de 16 camadas, 457 colunas e 375 linhas (**Figura 14**).

Figura 14: Representação tridimensional do *grid* gerado.



A primeira camada possui uma espessura que equivale a 7,50 metros, com valor de topo na cota topográfica de 615,00 metros e base em 607,50 metros. A partir da segunda camada do modelo, as espessuras são as mesmas, no valor de 0,50 metro, com topo valor de topo na cota 607,50 metros (topo da camada 2) e base em 600,00 metros (base da camada 16).

5.4. Caracterização da contaminação por nitrato

Nos meios urbanos, em especial nos meios onde a infraestrutura de saneamento básico não acompanha o aumento da taxa de ocupação, é bastante comum a ocorrência de contaminação de águas subterrâneas por nitrato. Segundo a Decisão de Diretoria nº 256/2016/E da CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo), que estabelece os Valores Orientadores de substâncias poluidoras, para os quais são necessárias intervenções ambientais em caso de concentrações superiores ao estabelecido pela norma, o nitrogênio (na forma de nitrato) não pode ultrapassar 10.000 µg/L (10 mg/L ou 10 ppm) em águas subterrâneas, o que equivale a 44.000 µg/L (44 mg/L ou 44 ppm) de nitrato.

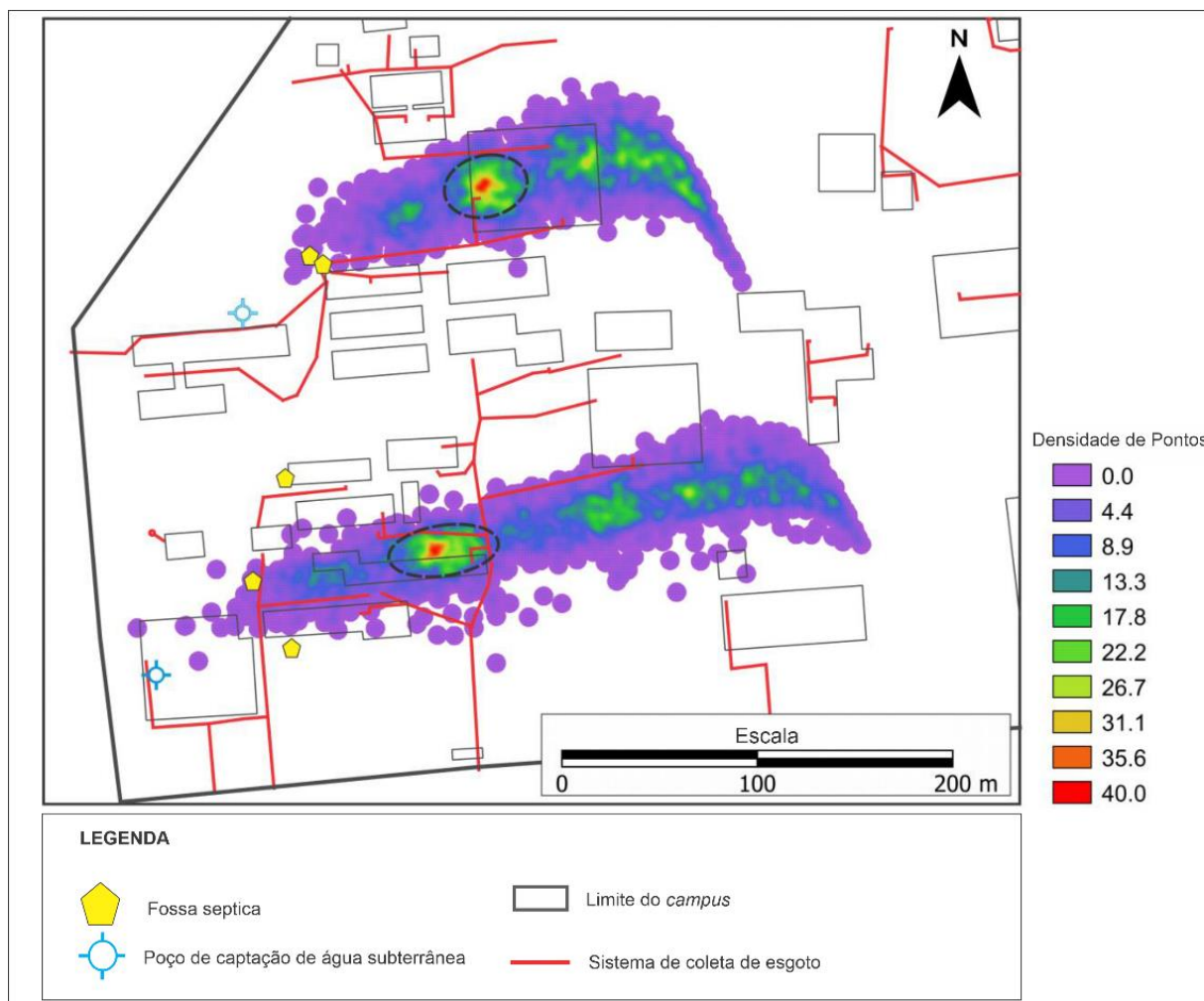
O nitrato (NO_3^-) ocorre em condições naturais em águas subterrâneas. Entretanto, as concentrações naturais dessa substância variam entre 0,1 e 10 mg/L, enquanto que em áreas com contaminação estabelecida, esses valores podem chegar a 1000 mg/L (BERNICE, 2010).

Na área de estudo, onde a contaminação por nitrato é conhecida e monitorada desde, pelo menos, junho de 2014, eram admitidas como áreas fontes as fossas sépticas que haviam no *campus*. As fossas sépticas foram instaladas nos anos 1970, quando a rede de coleta de esgoto ainda não havia sido instalada na região. Após as conclusões que levavam a crer que tais fossas sépticas eram as prováveis áreas fontes de nitrato, elas foram limpas e desativadas pela administração do *campus* (TERAMOTO, 2021). Entretanto, após as conclusões de Teramoto *et al.*, (2021), tais áreas fontes foram descartadas.

Na área de estudo, adotou-se duas fontes de contaminação distintas. As áreas fontes admitidas para este trabalho foram obtidas utilizando as maiores densidades de pontos resultantes das simulações reversas realizadas por Teramoto *et al.*, (2021), que representam, estatisticamente, as regiões com maiores probabilidades de serem, de fato, áreas fontes de contaminação (**Figura 15**).

As concentrações iniciais de nitrato admitidas para essas fontes foram de 619 mg/L, obtidas através de análises laboratoriais de amostras de água subterrânea.

Figura 15: Localização das áreas fontes adotadas, baseadas nas simulações reversas realizadas por Teramoto et al., (2021).



Fonte: Adaptado de Teramoto et al., (2021)

5.5. Análise das plumas de nitrato simuladas.

Após a elaboração do Modelo Conceitual da área de estudo, já incorporada as heterogeneidades geológicas, além da geração dos 30 cenários geológicos simuladas pelo ferramenta T-PROGS, foram realizadas as simulações de fluxo de água subterrânea e transporte de contaminante, utilizando o *software* Visual Modflow Flex 6.1. O mecanismo de simulação de fluxo utilizado foi o USGS MOFLOW 2005 *from* WH, além do mecanismo de simulação de transporte MT3DMS.

Para a análise e comparação das plumas de nitrato geradas em cada um dos diferentes cenários geológicos, utilizou-se os parâmetros de comprimento e profundidade da pluma simulada, além das concentrações de nitrato que foram observadas nos poços de captação de água subterrânea PM-08 e PM-09 em cada cenário.

Conforme discutido no tópico anterior (**item 4.4**), os Valores Orientadores de substâncias poluidoras estabelecidos pela CETESB indicam a concentração máxima permitida de nitrogênio na forma de nitrato que, após as devidas conversões, é de 44 ppm de nitrato. Para as análises que se seguem, será adotado esse valor e unidade de medida.

No total, simulou-se 30 cenários geológicos distintos no *software* Visual Modflow Flex 6.1, tendo em vista que cada cenário possui um arranjo tridimensional único das fácies sedimentares. Para todos os cenários apresentados, foram simuladas duas plumas de contaminação, associadas às áreas fontes admitidas anteriormente. Para efeito de sistematização das análises que seguem, determinou-se Pluma 1 (associada à área fonte localizada a leste do poço de captação PM-09) e Pluma 2 (associada à área fonte localizada a leste do poço de captação PM-08). A **Figura 16** apresenta a localização dos poços de captação de água mencionados.

Os tempos de simulação para todos os cenários são apresentados na **Tabela 4**. Os resultados apresentados a seguir levaram em conta os dados gerados para 7300 dias de simulação (o que equivale a 20 anos), devido ao maior desenvolvimento da pluma de contaminação observado para este período.

Figura 16: Localização dos poços de captação de água subterrânea PM-08 e PM-09



Tabela 4: Tempo de simulação considerado para os 30 cenários geológicos gerados pelo software Visual Modflow Flex 6.1

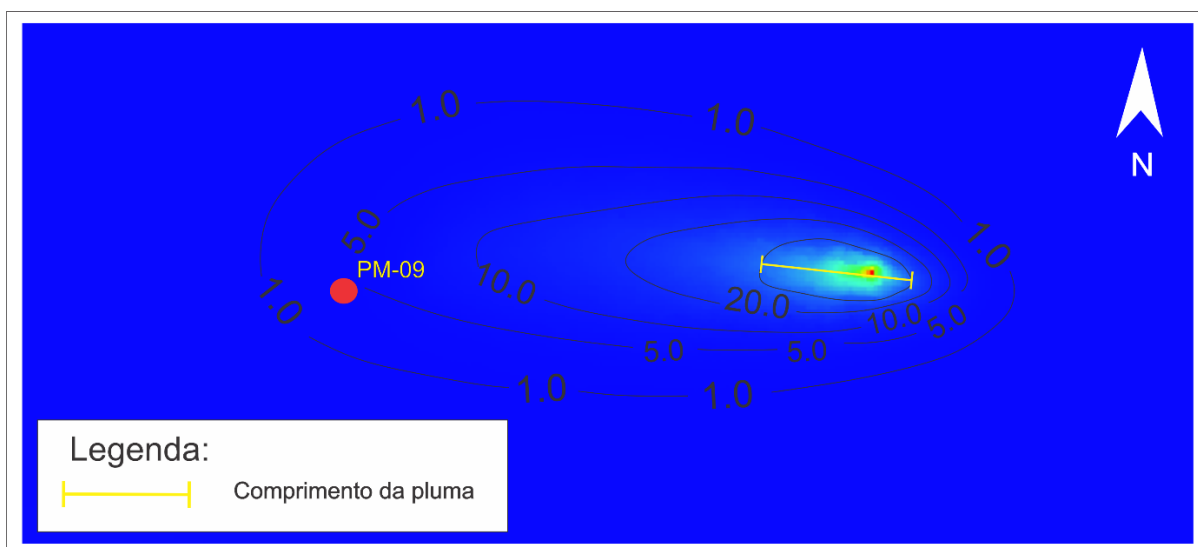
Tempo de simulação (em dias)	Tempo equivalente (em anos)
1	
200	
400	1 ano e 35 dias
600	1 ano e 235 dias
800	2 anos e 70 dias
1000	2 anos e 270 dias
1095	3 anos
1825	5 anos
3650	10 anos
5475	15 anos
7300	20 anos

5.5.1. Comprimento

Os comprimentos das plumas foram aferidos em sua maior extensão, de forma paralela à direção de fluxo. Para isso, utilizou-se um contorno de isoconcentração no valor de 44 ppm admitindo, portanto, que a extensão da pluma de contaminação corresponde a distância entre as extremidades do contorno de isoconcentração do valor máximo permitido para o contaminante (**Figura 17**).

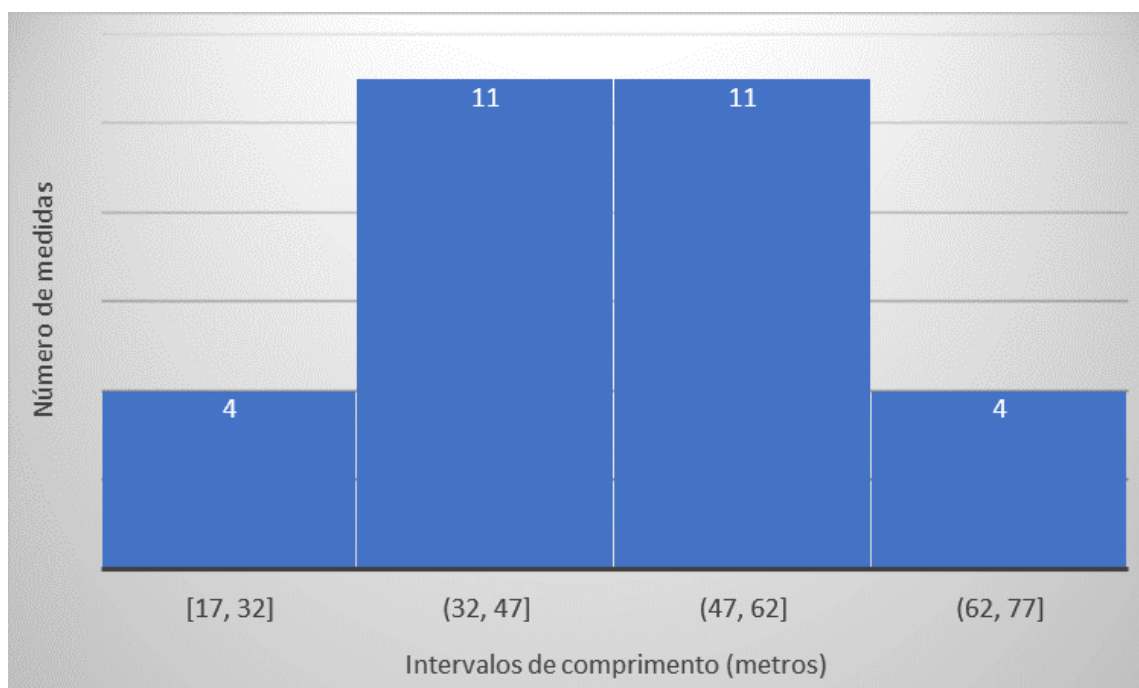
Além do contorno de isoconcentração mencionado, foram adotados contornos intermediários entre 1 ppm e 44 ppm a fim de se ter a distribuição das concentrações de nitrato para todo o domínio do cenário simulado.

Figura 17: Comprimento da pluma, obtido através do contorno de isoconcentração correspondente a 44 ppm.



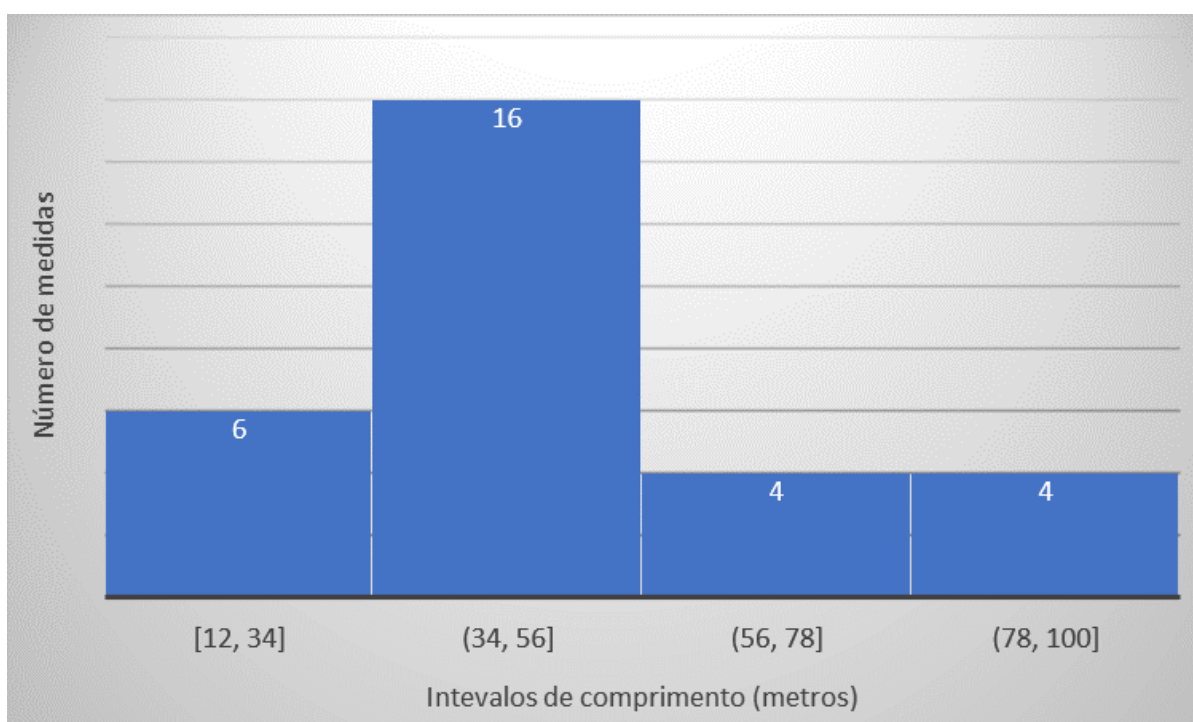
De maneira geral, o comprimento da Plumas 1 variou entre 69,00 e 17,00 metros. As maiores incidências de medidas foram observadas nos intervalos entre 32,0 e 47,0 metros e entre 47,0 e 62,0 metros (**Figura 18 - Gráfico 1**), totalizando 73,3 % das medidas levantadas. O valor médio dos comprimentos da Pluma 1 corresponde a 47,06 metros de extensão, com desvio padrão de 13,37 metros.

Figura 18: Gráfico 1 apresenta histograma da distribuição dos valores de comprimento observados para a Pluma 1



Para a Pluma 2, foi observado que os comprimentos variaram entre 12,0 e 82,0 metros. As medidas com maior incidência ocorreram no intervalo entre 34,0 e 56,0 metros (Figura 19 - **Gráfico 2**), o que corresponde a 53,3 % do total de medidas de comprimento levantadas. Para a Pluma 2, o valor médio das medidas corresponde a 50,6 metros, com desvio padrão de 19,52 metros.

Figura 19: Gráfico 2 apresenta histograma da distribuição dos valores de comprimento observados para a Pluma 2

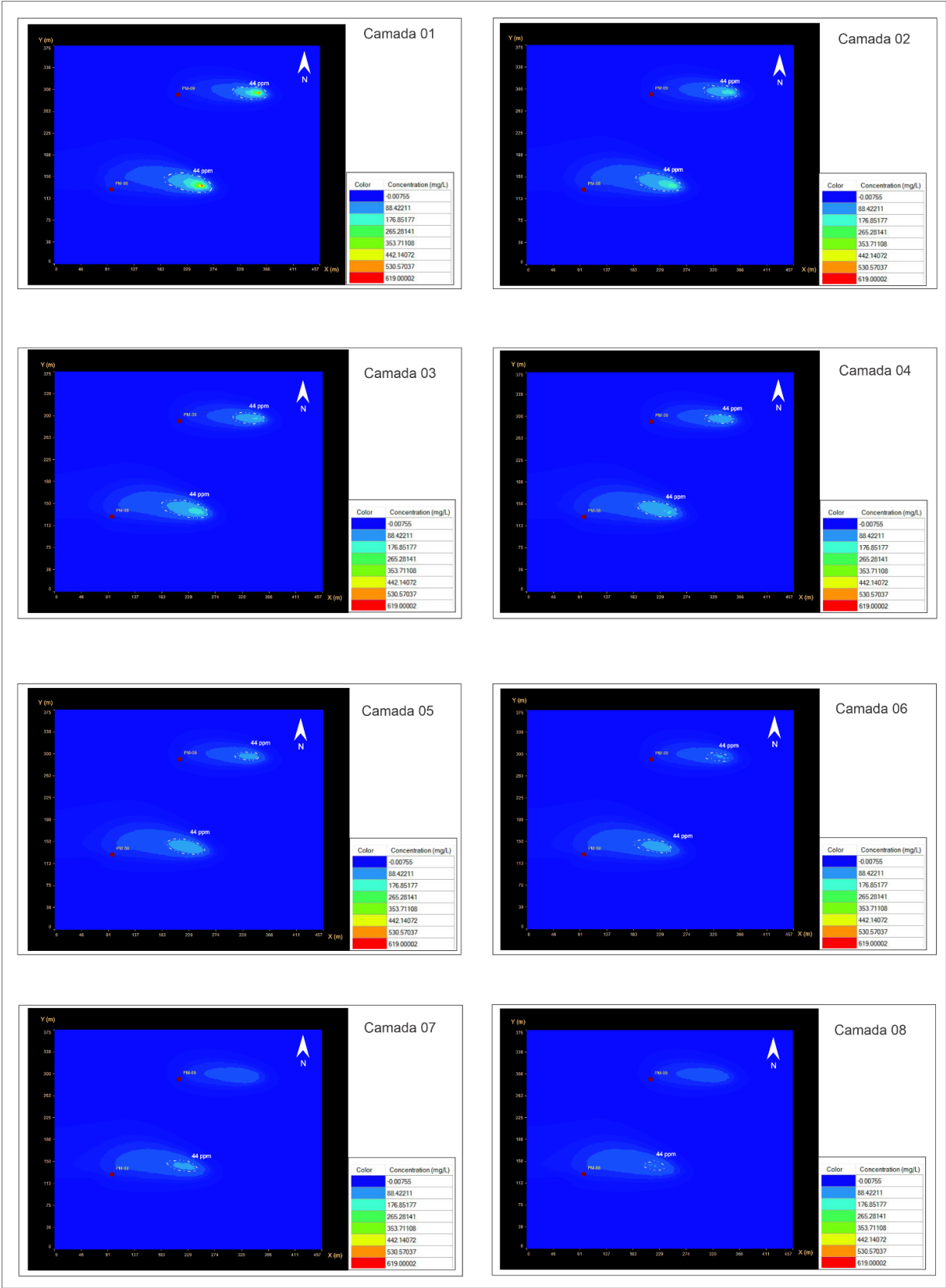


5.5.2. Profundidade

Em todos os cenários simulados, foi observado que o maior desenvolvimento da pluma ocorreu na primeira camada estabelecida para o modelo. De maneira geral, as plumas apresentaram seu maior desenvolvimento, em termos de extensão e concentrações, na primeira camada e, seu desenvolvimento pôde ser observado de maneira clara até a oitava camada do modelo, o que corresponde à profundidade máxima de 604 metros. Após a oitava camada do modelo, a pluma torna-se pouco perceptível (**Figura 20**).

Destaca-se que se levou em consideração para essa análise o comprimento da pluma a partir da maior extensão do contorno de isoconcentração de 44 ppm, como destacado na figura mencionada.

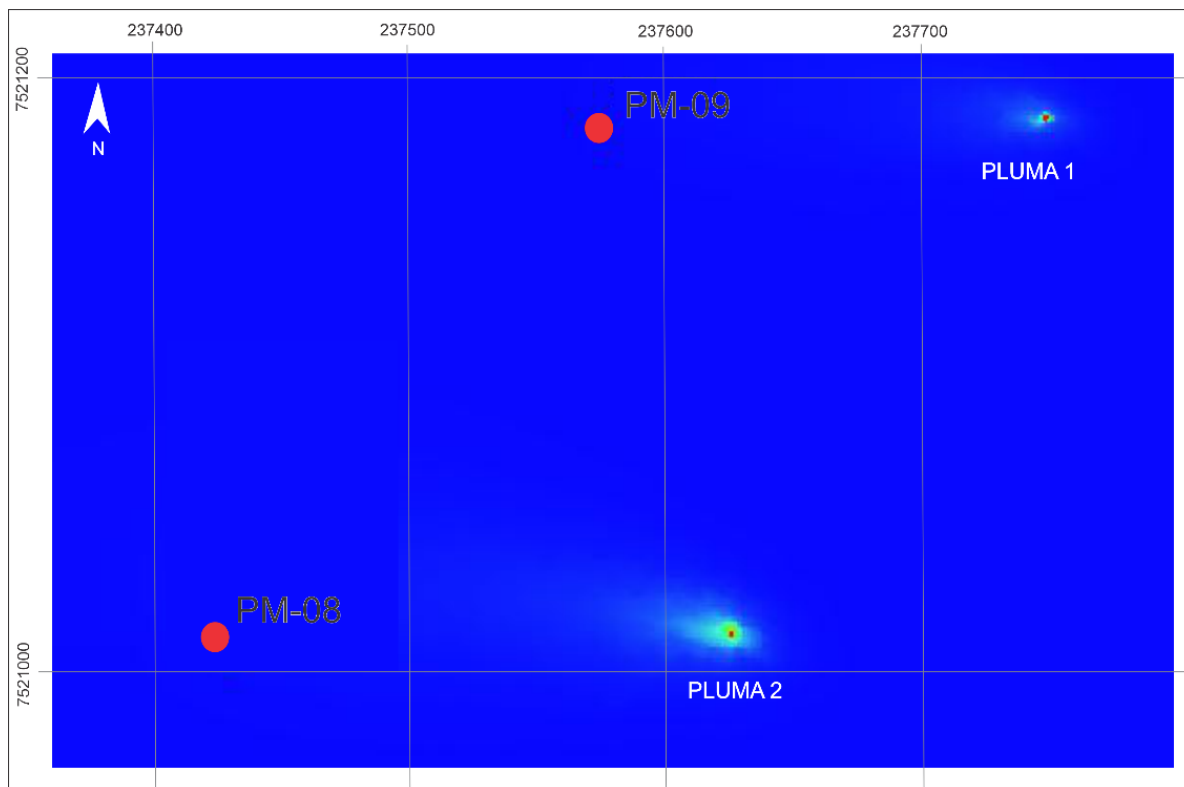
Figura 20: Evolução da pluma de contaminação em profundidade (Cenário 17)



5.5.3. Concentrações

Foram observadas as concentrações de nitrato, em cada um dos cenários gerados, que seriam observadas nos poços de captação de água subterrânea PM-08 e PM-09, que se situam a oeste dos focos de concentração inicial utilizados nos modelos (**Figura 21**).

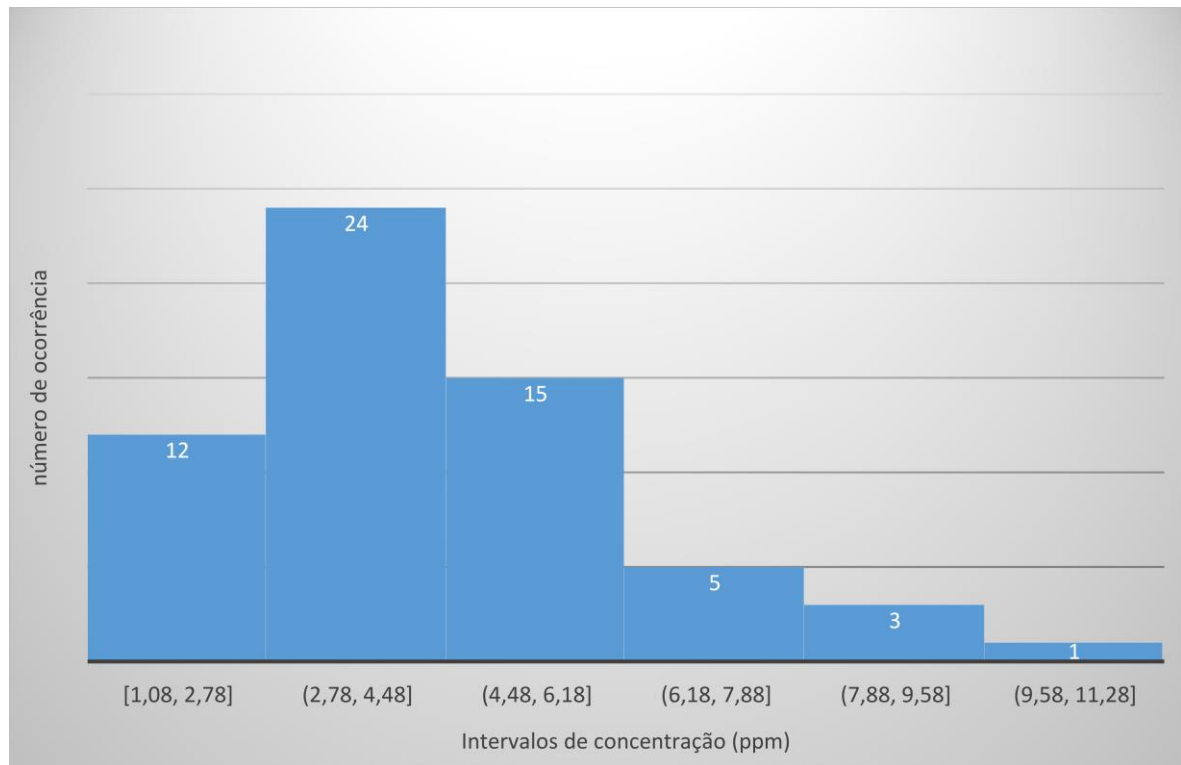
Figura 21: Localização dos poços de captação de água subterrânea em relação às plumas de nitrato simuladas



As concentrações observadas nos cenários simulados variaram entre 1,08 ppm (PM-09, Cenário 1) e 10,20 ppm (PM-08, Cenário 27). Dentre os valores levantados, foi observado uma maior incidência de valores entre 2,78 e 4,48 ppm, representando 40,67 % das concentrações levantadas, seguido do intervalo entre 4,48 e 6,18 ppm, que representa 25,42%. Essas duas tendências majoritárias, quando somadas, representam 66,09 % das concentrações levantadas (**Figura 22 - Gráfico 3**).

As concentrações médias observadas foram de 5,09 ppm para o PM-08, com desvio padrão de 2,16 ppm e 3,75 ppm para o PM-09, com desvio padrão de 1,16 ppm.

Figura 22: Gráfico 3 apresenta histograma da distribuição dos valores de concentração observados nos poços de monitoramento PM-08 e PM-09, para todos os cenários gerados.



6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Com base nos resultados apresentados, pode-se afirmar que a pluma de contaminação de nitrato simulada possui uma evolução bastante lenta, com poucas diferenças quando considerados períodos de tempo menores, como períodos inferiores a 10 anos, para todos os parâmetros analisados.

Para uma melhor compreensão da evolução da pluma, os parâmetros analisados levaram em consideração os resultados gerados para o período de 20 anos. Para este tempo específico, foram gerados dados gráficos suficientes para uma análise razoável dos cenários geológicos.

A **Tabela 5** apresenta a síntese dos resultados obtidos no trabalho, para os parâmetros analisados.

Tabela 5: síntese dos resultados obtidos no trabalho, para os parâmetros analisados.

Cenários gerados	Comprimento da pluma (metros)		Concentração no poço de captação de água (ppm)		Camada de maior desenvolvimento da pluma
	Pluma 1 (próxima ao PM-09)	Pluma 2 (próxima ao PM-08)	PM-08	PM-09	
Cenário 1	17.0	23.0	3.53	1.08	Primeira Camada
Cenário 2	37.0	47.0	6.16	4.14	Primeira Camada
Cenário 3	68.0	50.0	4.38	6.12	Primeira Camada
Cenário 4	27.0	55.0	5.07	2.29	Primeira Camada
Cenário 5	18.0	74.0	6.47	1.58	Primeira Camada
Cenário 6	41.0	79.0	8.33	3.2	Primeira Camada
Cenário 7	63.0	29.0	2.63	5.26	Primeira Camada
Cenário 8	35.0	59.0	6.49	2.88	Primeira Camada
Cenário 9	43.0	75.0	7.02	2.54	Primeira Camada
Cenário 10	69.0	56.0	6.36	5.99	Primeira Camada
Cenário 11	47.0	14.0	1.49	3.63	Primeira Camada
Cenário 12	64.0	53.0	5.09	5.25	Primeira Camada
Cenário 13	62.0	75.0	7.53	5.11	Primeira Camada
Cenário 14	45.0	54.0	5.12	3.24	Primeira Camada
Cenário 15	53.0	54.0	5.54	4.02	Primeira Camada
Cenário 16	43.0	32.0	2.56	2.69	Primeira Camada
Cenário 17	44.0	52.0	4.68	3.95	Primeira Camada
Cenário 18	41.0	45.0	4.48	2.35	Primeira Camada
Cenário 19	54.0	50.0	4.39	4.31	Primeira Camada
Cenário 20	51.0	37.0	3.6	3.77	Primeira Camada
Cenário 21	47.0	40.0	3.7	3.92	Primeira Camada
Cenário 22	49.0	31.0	2.88	3.45	Primeira Camada
Cenário 23	48.0	12.0	1.26	3.65	Primeira Camada
Cenário 24	59.0	35.0	3.06	5.09	Primeira Camada
Cenário 25	55.0	37.0	2.87	3.72	Primeira Camada
Cenário 26	60.0	82.0	7.97	4.77	Primeira Camada
Cenário 27	51.0	81.0	10.02	3.66	Primeira Camada
Cenário 28	29.0	80.0	8.45	1.97	Primeira Camada
Cenário 29	55.0	55.0	5.23	3.56	Primeira Camada
Cenário 30	37.0	52.0	4.78	2.65	Primeira Camada
Maior Valor	69.0	82.0	10.02	6.12	
Menor valor	17.0	12.0	1.26	1.58	
Valor Médio	47.1	50.6	5.09	3.75	
Desvio padrão	13.37	19.52	2.16	1.16	

Observou-se que as plumas geradas nos cenários simulados, de maneira geral, apresentaram desenvolvimento até a oitava camada do modelo, o que corresponde a uma profundidade, a partir da superfície, de 11 metros. A partir dessa profundidade, os contornos de isoconcentração de 44 ppm, que delimitam as plumas de contaminação, tornam-se quase imperceptíveis e, conseqüentemente, os comprimentos observados foram cada vez menores com o aumento da profundidade.

As plumas geradas apresentam forte assimetria, com maior alongamento paralelo à direção de fluxo da água subterrânea. Na direção de maior alongamento, foram observadas alterações significativas em cada modelo, o que possui relação direta com as heterogeneidades geológicas geradas pelo T-PROGS. Já nas outras direções, as plumas se mostraram bastante uniformes.

Os comprimentos observados foram bastante variáveis, com a maior incidência de comprimentos entre 47,0 e 62,0 metros (para a Pluma 1), com comprimento médio de 47,1 metros (para a Pluma 1), e entre 34,0 e 56,0 metros, com comprimento médio de 50,6 metros (para a Pluma 2). Quanto a este parâmetro, cabe destacar que os maiores comprimentos foram observados na primeira camada dos modelos, que possui espessura de 7,50 metros e se localiza entre as cotas topográficas de 615,0 e 607,50 metros. Portanto, de maneira geral, os comprimentos das plumas de contaminação decrescem com o aumento da profundidade, de acordo com os cenários gerados.

As concentrações observadas nos poços de captação PM-08 e PM-09 variaram entre 1,08 e 10,20 ppm, com maior incidência de valores contidos no intervalo entre 2,78 e 4,48 ppm. Desta forma, os valores observados em todos os cenários gerados se encontram abaixo dos Valores Orientadores de substâncias poluidoras, relacionado pela CETESB através da Decisão de Diretoria nº 256/2016/E da CETESB, que estabelece que as concentrações de nitrogênio na forma de nitrato não podem ultrapassar o equivalente a 44 ppm de nitrato, já com as devidas conversões de unidades de medida. Embora as concentrações observadas não tenham ultrapassado os parâmetros estabelecidos pela CETESB, os resultados apresentaram diferenças significativas entre si.

As heterogeneidades geológicas geradas pela ferramenta T-PROGS e posteriormente incorporadas ao modelo numérico parecem ser um fator determinante na evolução das plumas de nitrato, ao menos para a área de estudo, o que não pode ser inferido necessariamente para outras porções do aquífero Rio Claro. Essa conclusão se deve ao fato de que as plumas

simuladas apresentam grandes variações de comprimento, o que pode ser associado à arranjos mais arenosos com alta conectividade das lentes, para os cenários onde os comprimentos das plumas de nitrato foram altos, ou de composição mais pelíticas, onde os comprimentos gerados foram baixos.

Para alguns cenários simulados, foi observado um desenvolvimento incipiente de ao menos uma das plumas analisadas. Isso se deve à uma maior ocorrência de sedimentos pelíticos nas regiões próximas das áreas fontes adotadas, geradas pela ferramenta T-PROGS.

Embora se possa fazer uma relação causal entre litologias arenosas e um maior desenvolvimento da pluma de nitrato, não foi possível observar essa relação diretamente nos arranjos tridimensionais das fácies sedimentares geradas pelo T-PROGS, devido ao fato de que, pela própria forma como o arranjo é gerado pela ferramenta, sua análise é somente de aspecto visual, o que não permite a associação direta entre as litologias simuladas e o comportamento das plumas geradas pela simulação de transporte.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÃO

Os dados e produtos finais gerados no presente trabalho se mostraram suficientes para entender em que medida as heterogeneidades geológicas, que são produtos dos diferentes arranjos tridimensionais das fácies sedimentares de um aquífero, possuem influência sobre a evolução de uma pluma de contaminação.

A análise dos diferentes cenários geológicos gerados pela ferramenta T-PROGS e, posteriormente, incorporadas ao modelo numérico, corroboram a hipótese de que as heterogeneidades geológicas constituem um fator relevante na evolução de plumas de contaminantes analisadas através de softwares de modelagem de águas subterrâneas. Dessa forma, a ferramenta T-PROGS se mostrou bastante útil dentro da metodologia adotada, como uma forma eficiente de expressar, de maneira probabilística, diferentes cenários geológicos que podem ser incorporados ao processo de modelamento.

As plumas de nitrato geradas pelos modelos numéricos nos diferentes cenários geológicos apontam para uma influência considerável do arranjo das fácies sedimentares na evolução das plumas ao longo do tempo, o que se traduz na variação dos dados de comprimento e concentração de nitrato observados nos modelos. O único parâmetro analisado que se mostrou uniforme para todos os cenários gerados foi a profundidade alcançada pelas plumas, que tiveram resultados bastante parecidos.

Além disso, observou-se indiretamente que as metodologias de pesquisa que se utilizam de abordagens estocásticas podem ser utilizadas para previsão ou, ao menos, para uma estimativa confiável das incertezas que podem estar associadas à modelagem do meio hidrogeológico. Embora não seja uma prática comum a utilização desse tipo de abordagem na resolução de problemas ambientais, percebe-se que ainda existe muito a se explorar neste tema, no que se refere a elaboração de metodologias de abordagens estocásticas que possam ser amplamente utilizadas.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, F. F. M. Fundamentos Geológicos do Relevo Paulista. São Paulo. Instituto Geográfico e Geológico, Boletim, 41, p.: 169-263. 1964.
- ANDERSON, Mary P.; WOESSNER, William W.; HUNT, Randall J. **Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport**. Academic press, 2015.
- BERNICE, Aline Michelle. **Evolução da Contaminação por Nitrato em Aquíferos Urbanos: estudo de caso em Urânia (SP)**. 2010. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- CARLE, S.F.; FOGG, G.E. Modeling spatial variability with one and multi-dimensional continuous-lag Markov chains. *Mathematical Geology*, v. 29, n. 7, p. 891-918, 1997. Disponível em: < 10.1023/A:1022303706942>. Acesso em: 13 mar. 2017.
- CARLE, Steven F.; FOGG, Graham E. Modeling spatial variability with one and multidimensional continuous-lag Markov chains. **Mathematical Geology**, v. 29, n. 7, p. 891-918, 1997.
- CARLE, STEVEN F. et al. Conditional simulation of hydrofacies architecture: a transition probability/Markov approach. **Hydrogeologic models of sedimentary aquifers, concepts in hydrogeology and environmental geology**, v. 1, p. 147-170, 1998.
- CARLE, Steven F. T-PROGS: Transition probability geostatistical software. **University of California, Davis, CA**, v. 84, 1999.
- COMITE PCJ. 2019. Relatório de Situação dos Recursos Hídricos Da Bacia PCJ – Piracicaba/Capivari/Jundiaí. Ano Base 2018. Agência de Bacias PCJ.
- COMPANHIA, DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. Qualidade das águas doces no Estado de São Paulo: Significado ambiental e sanitário das variáveis de qualidade das águas e dos sedimentos e metodologias analíticas e de amostragem. São Paulo: Cetesb, 2016.
- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. DECISÃO DE DIRETORIA Nº 256/2016/E, DE 22 DE NOVEMBRO DE 2016. São Paulo, 2016. 5 p. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-subterraneas/valores-orientadores-para-solo-e-agua-subterranea/>. Acesso em: 14 fev. 2021.

DAEE *et al.* DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. Mapa de Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo. Escala 1:1.000.000. Governo do Estado de São Paulo. Conselho Estadual de Recursos Hídricos. 2005

DIAS GONÇALVES, Roger. Modelagem Numérica e Avaliação Hidrogeológica do Aquífero Rio Claro. 2016.

EIDSVIK, Jo; MUKERJI, Tapan; SWITZER, Paul. Estimation of geological attributes from a well log: an application of hidden Markov chains. **Mathematical Geology**, v. 36, n. 3, p. 379-397, 2004.

FEHIDRO. 2014. Fundo Estadual de Recursos Hídricos. Diagnóstico Ambiental e Desenvolvimento de Sistemas de Implementações de Projetos de Recuperação da Qualidade dos Corpos D'água. Prefeitura de Rio Claro/SP. Voume II- Recursos Hídricos.

FITTS, C. R. Groundwater Science, 2a edição, Academic Press, London, 672 f, 2013.

IG/CETESB/DAEE. IG/SMA. INSTITUTO GEOLÓGICO/SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE. COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL – CETESB, DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA – DAEE/SERH. Mapeamento da Vulnerabilidade e risco de Poluição das Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo. São Paulo, 2 v. 1997.

KOEPPEN, Wilhelm. **Climatologia: con un estudio de los climas de la tierra**. 1948.

KRUMBEIN, William Christian; DACEY, Michael F. Markov chains and embedded Markov chains in geology. **Journal of the International Association for Mathematical Geology**, v. 1, n. 1, p. 79-96, 1969.

MILANI, E. J. Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozoica do Gondwana sul-oriental. Programa de Pós-graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Tese de Doutorado, 255p., 1997

MILANI, E. J.; FACCINI, U. F.; SCHERER, C. M. S.; ARAÚJO, L. M.; CUPERTINO, J. A. Sequences and stratigraphic hierarchy of the Paraná Basin (Ordovician to Cretaceous), Southern Brazil. Boletim IG-USP, São Paulo, p. 125-173. nov. (Série Científica, n. 29). 1998.

MILANI, E. J.; MELO, J. H. G.; SOUZA, P. A.; FERNANDES, L.A.; FRANÇA, A. B. Baciado Paraná. Boletim de Geociências da Petrobrás, v. 15, n.2, p.265-287, 2007.

MORAES REGO, OLIVA, Andresa. Estudo hidrofaciológico do aquífero Rio Claro no município de Rio Claro-SP. 2006.

OLIVA, A. **Estudo Hidrofaciológico do Aquífero Rio Claro no Município de Rio Claro** – SP. (Tese de Doutorado), Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro (SP). 196 p., 2006.

PENTEADO, M. M. Geomorfologia do setor centro-ocidental da Depressão Periférica Paulista. Universidade de S. Paulo, Instituto de Geografia, 1976.

PERINOTTO, J. A. J., ETCHEBEHERE, M. L. C., ZAINÉ, J. E., & SAAD, A. R. Nova contribuição ao conhecimento da Formação Rio Claro (T) na Folha Rio Claro (SP). Geociências, p. 297-306, 2006.

SÃO PAULO. Plano Estadual de Recursos Hídricos. GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO – CONSELHO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS – Comitê Coordenador do Plano Estadual de Recursos Hídricos. 2004/2007.

SIQUEIRA, L. F. S. Tectônica deformadora em sinéclises intracratônicas: a origem do Alto Estrutural de Pitanga, Bacia do Paraná, SP. Dissertação de Mestrado de Pós-graduação em Geociências, Universidade de São Paulo. 2011.

SMA. 2014. Secretaria do Meio Ambiente. Governo do Estado de São Paulo. Caderno de Educação Ambiental. As águas subterrâneas do Estado de São Paulo. 3ª edição. 2014.

SOARES, Paulo Cesar; LANDIM, Paulo Milton Barbosa. Depósitos cenozóicos na região centro sul do Brasil. **Notícia Geomorfológica**, v. 16, n. 31, p. 17-39, 1976.

STRADIOTO, Marcia Regina; TERAMOTO, Elias Hideo; CHANG, Hung Kiang. Nitrato em águas subterrâneas do estado de São Paulo. **Revista do Instituto Geológico**, v. 40, n. 3, p. 1-12, 2020.

TERAMOTO, E. H.; CHANG, H. K. Field data and numerical simulation of btex concentration trends under water table fluctuations: Example of a jet fuel-contaminated site in Brazil. *Journal of Contaminant Hydrology*, v. 198, p. 37-47, 2017. Disponível em: <10.1016/j.jconhyd.2017.01.002>. Acesso em: 01 mar. 2017.

TERAMOTO, E. H.; *et al.* Probabilistic Backward Location To Identification Of Multi-Source Nitrate Contamination. *Journal of Contaminant Hydrology*. São Paulo State University. 2020.

WANG, Herbert F.; ANDERSON, Mary P. Introduction to groundwater modeling: finite difference and finite element methods. Academic Press, 1995.

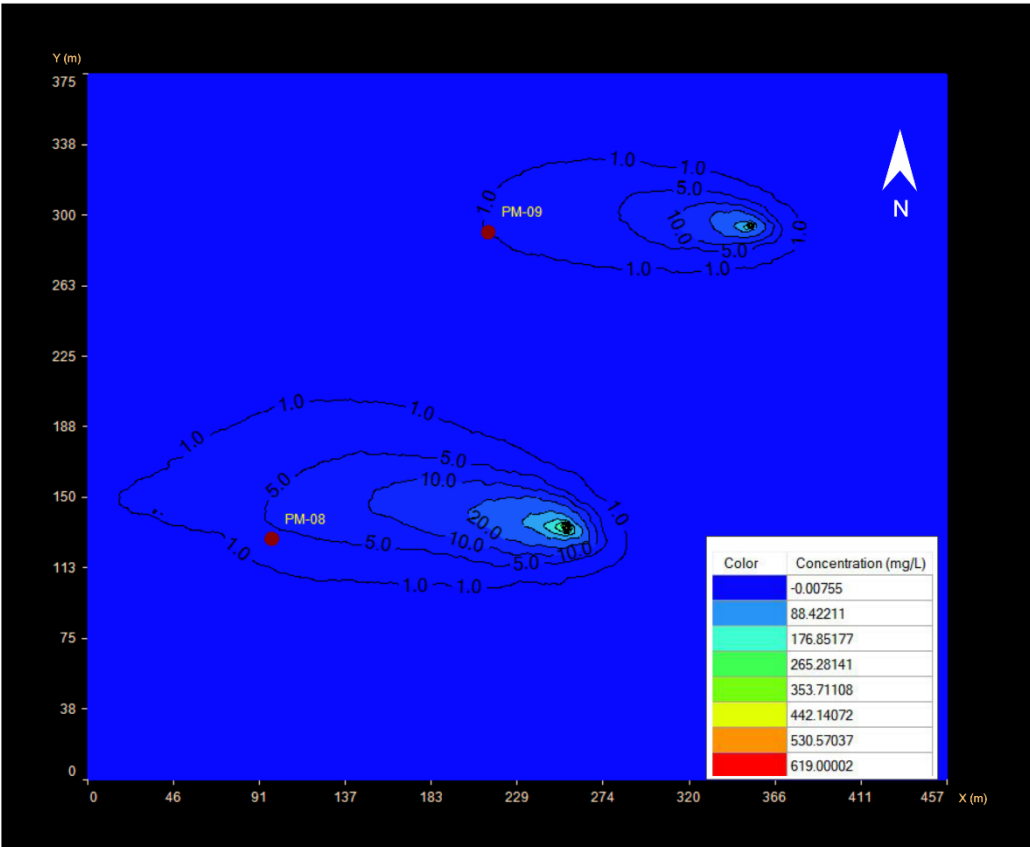
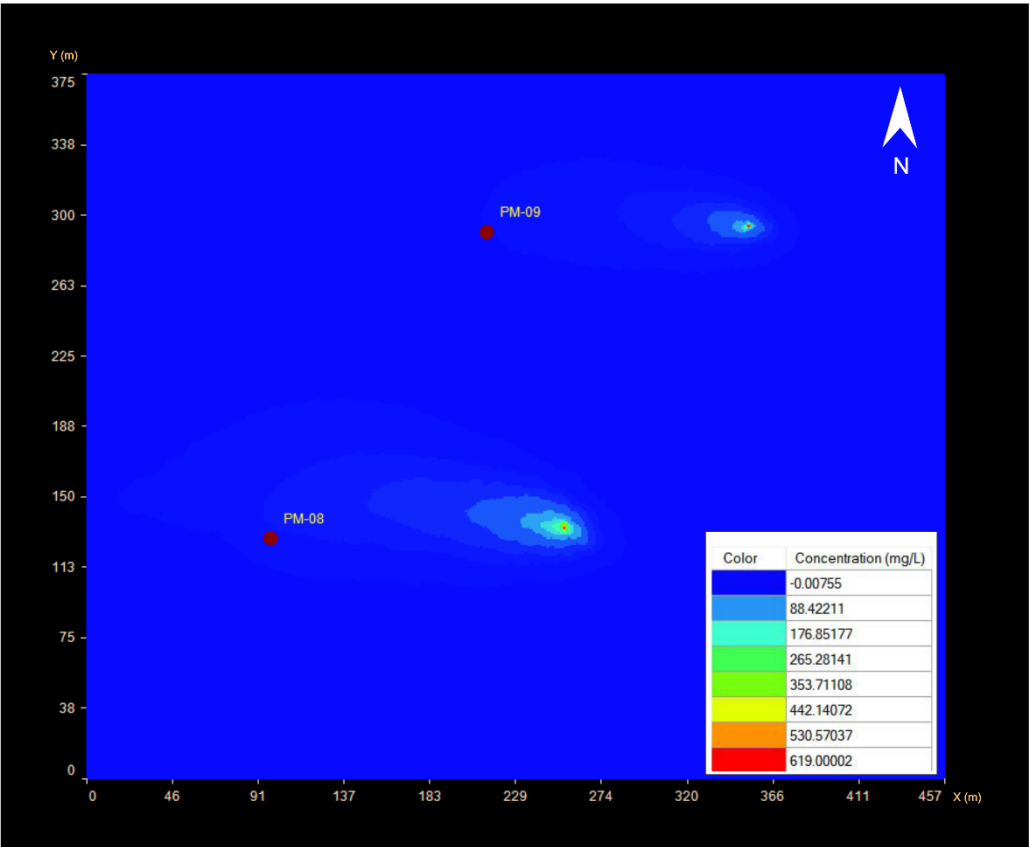
ZAINE, José Eduardo. Geologia da Formação Rio Claro na folha Rio Claro (SP). 1994.

ZALÁN, P. V. *et al.* Tectônica e sedimentação da Bacia do Paraná. Simpósio Sul- Brasileiro de Geologia, v. 3, n. 1987, p. 441-473, 1987.

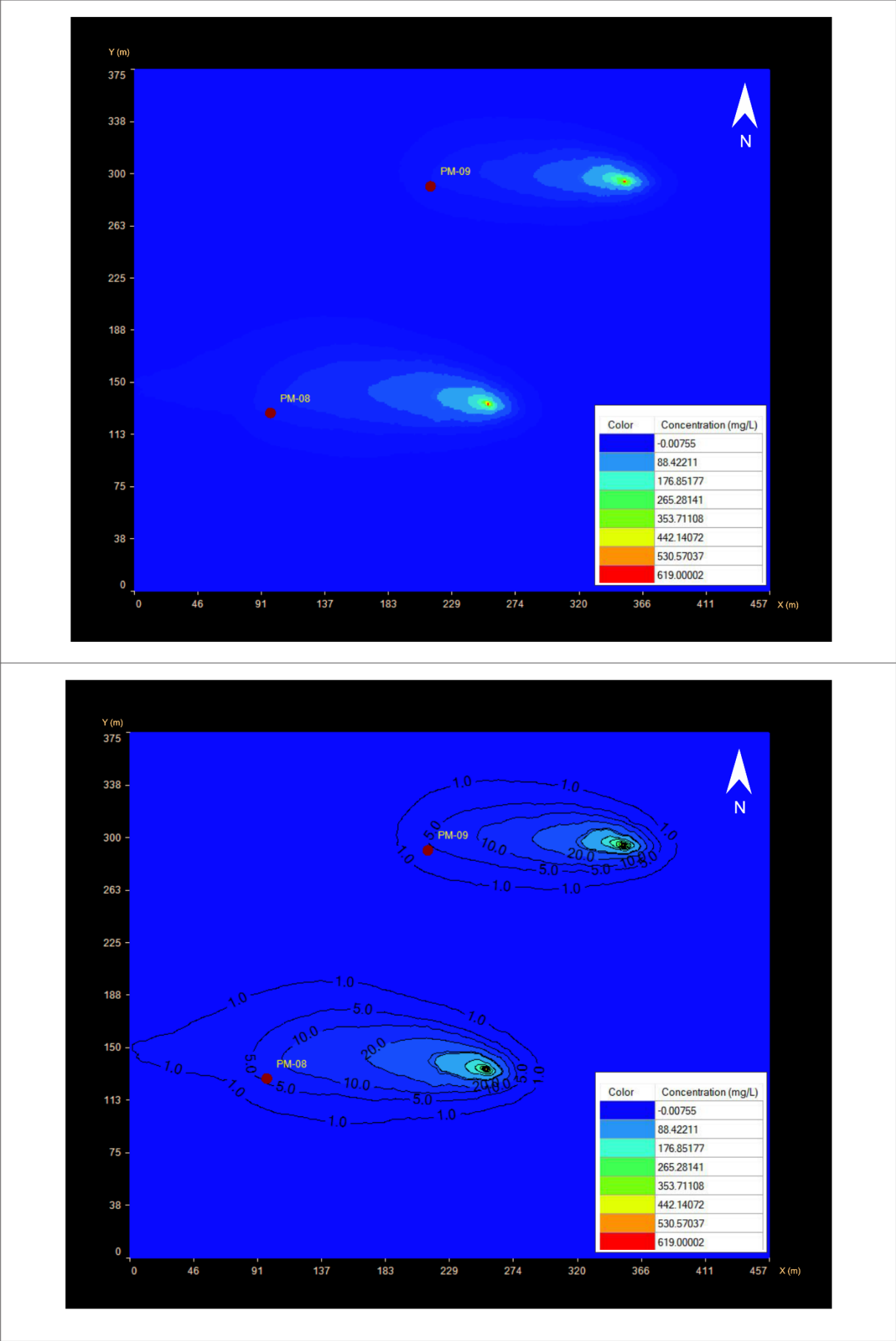
ZALÁN, P. V. Evolução fanerozóica das bacias sedimentares brasileiras. Geologia do Continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. São Paulo, Beca, p. 595-613, 2004.

APÊNDICE I – CENÁRIOS (EM PLANTA)

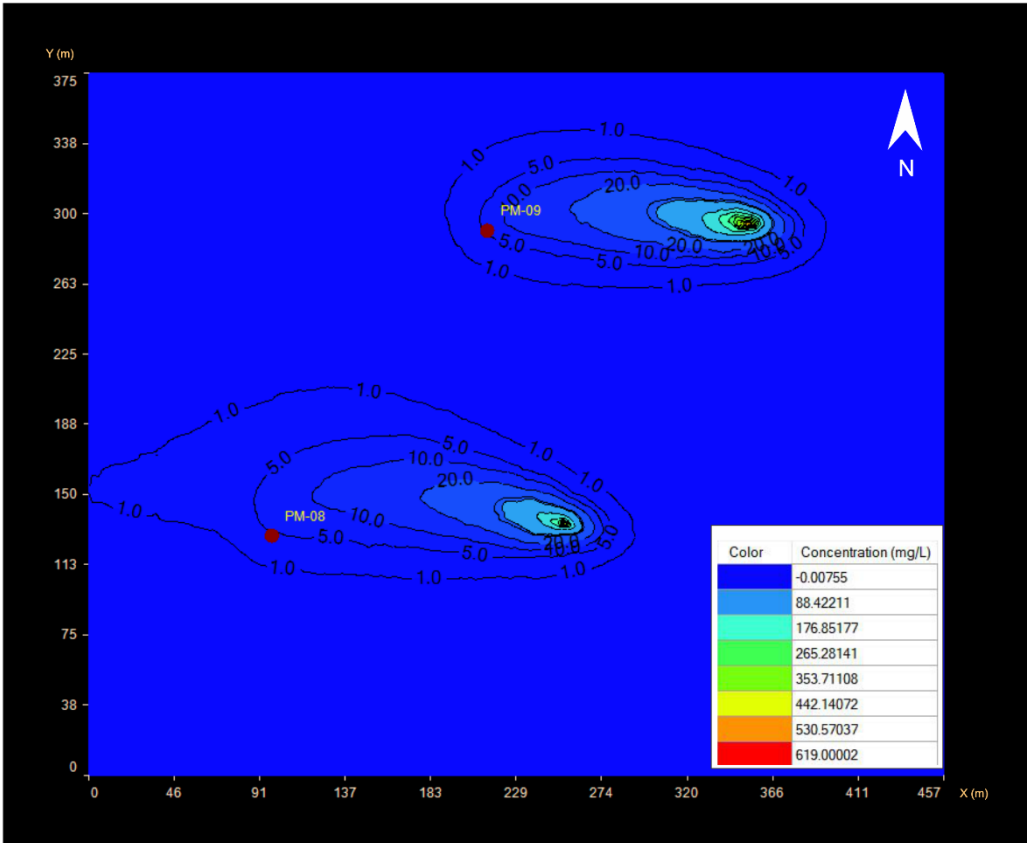
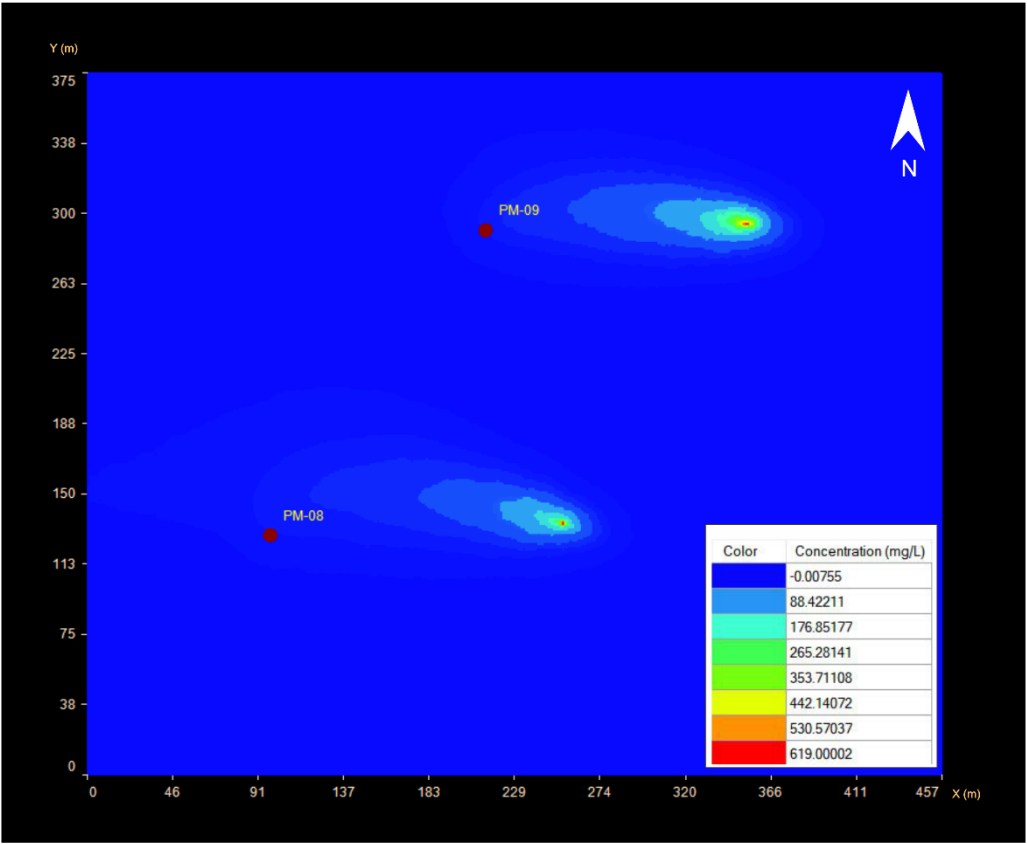
Cenário 01



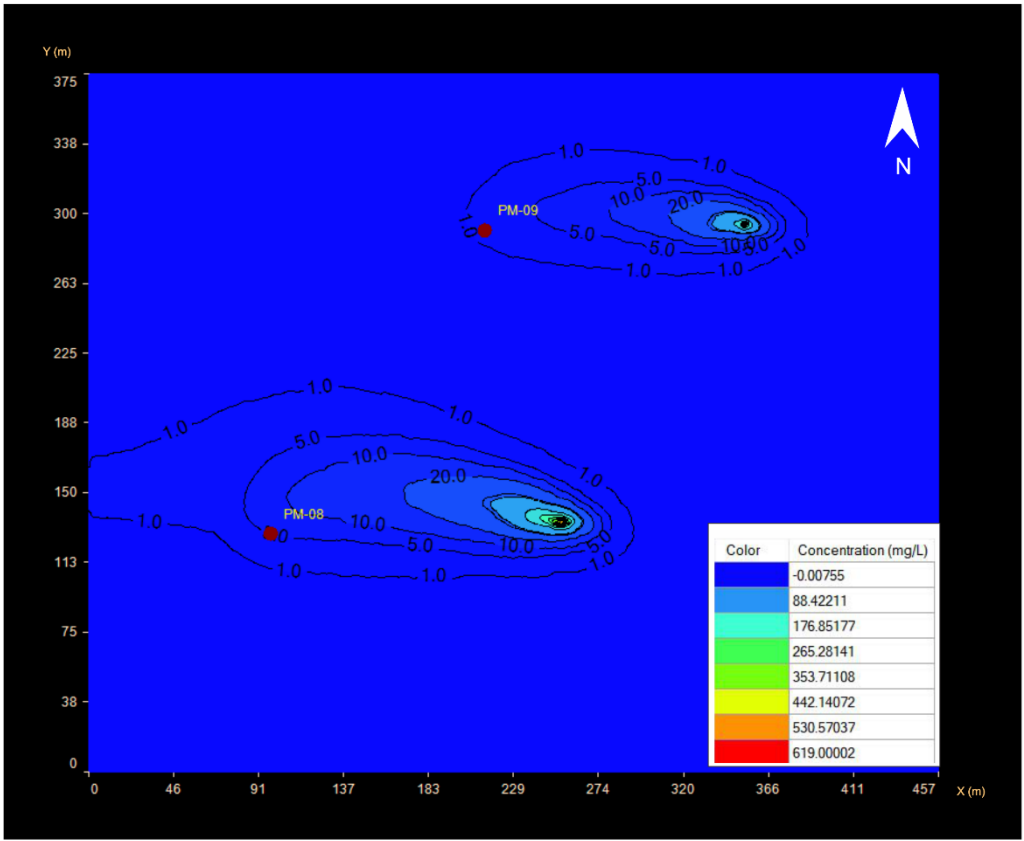
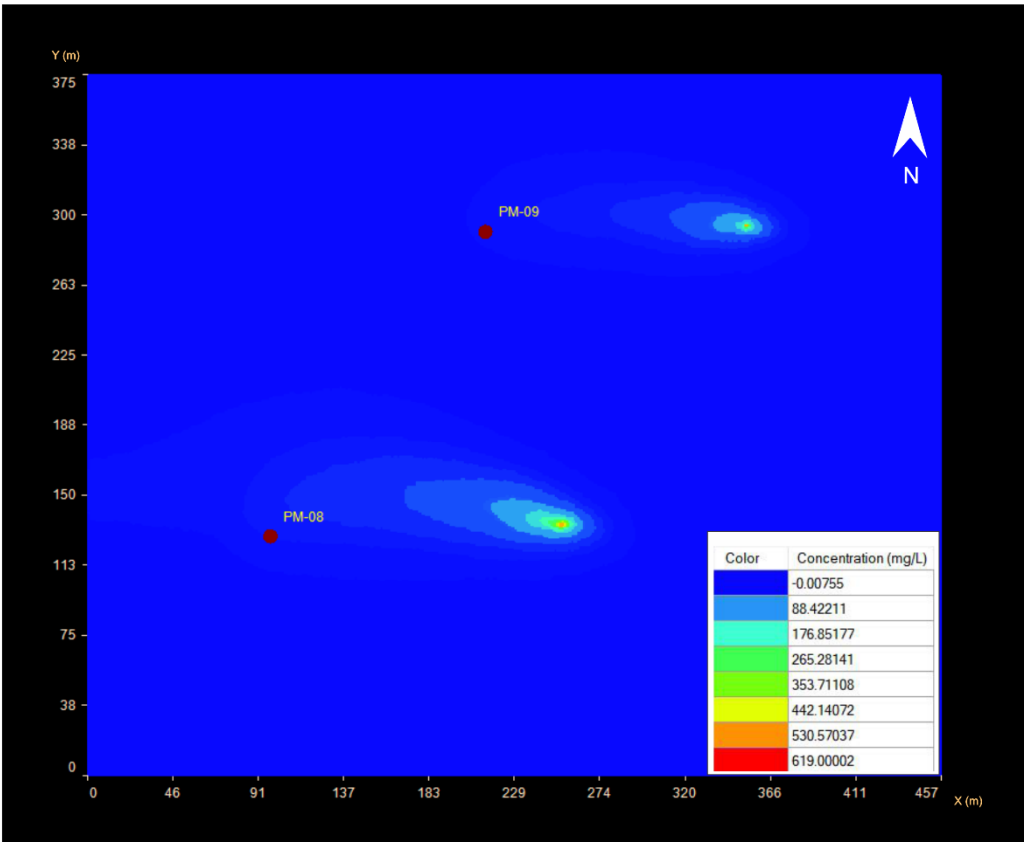
Cenário 02



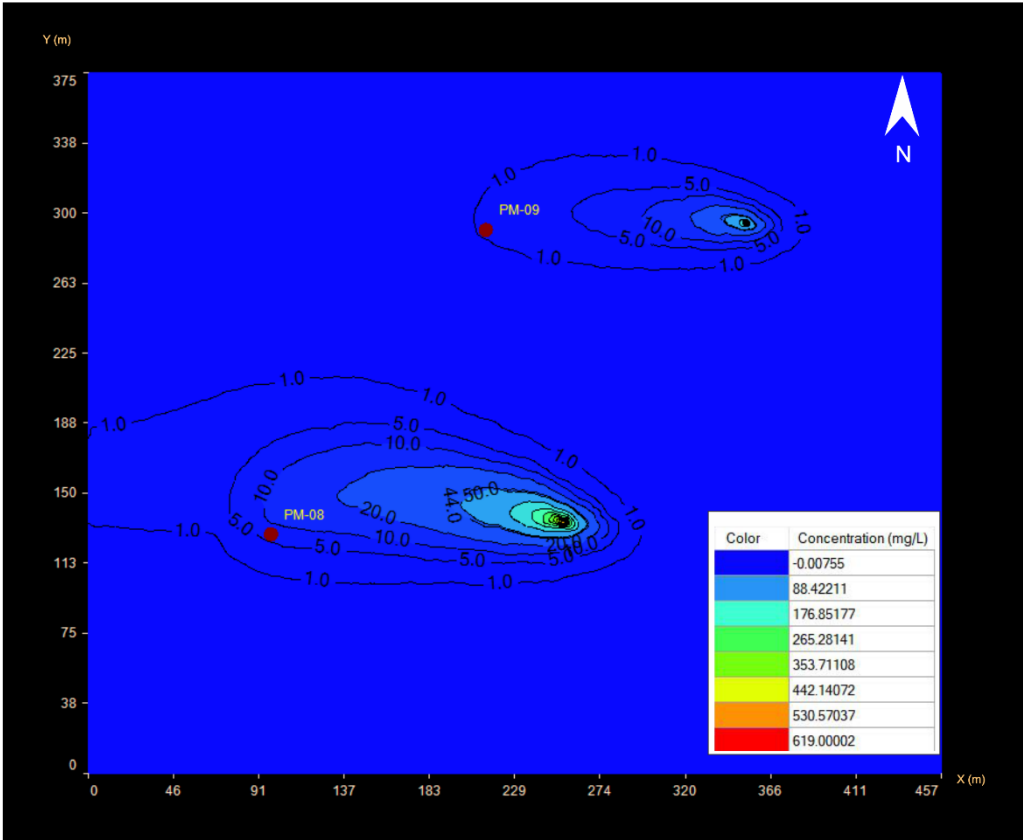
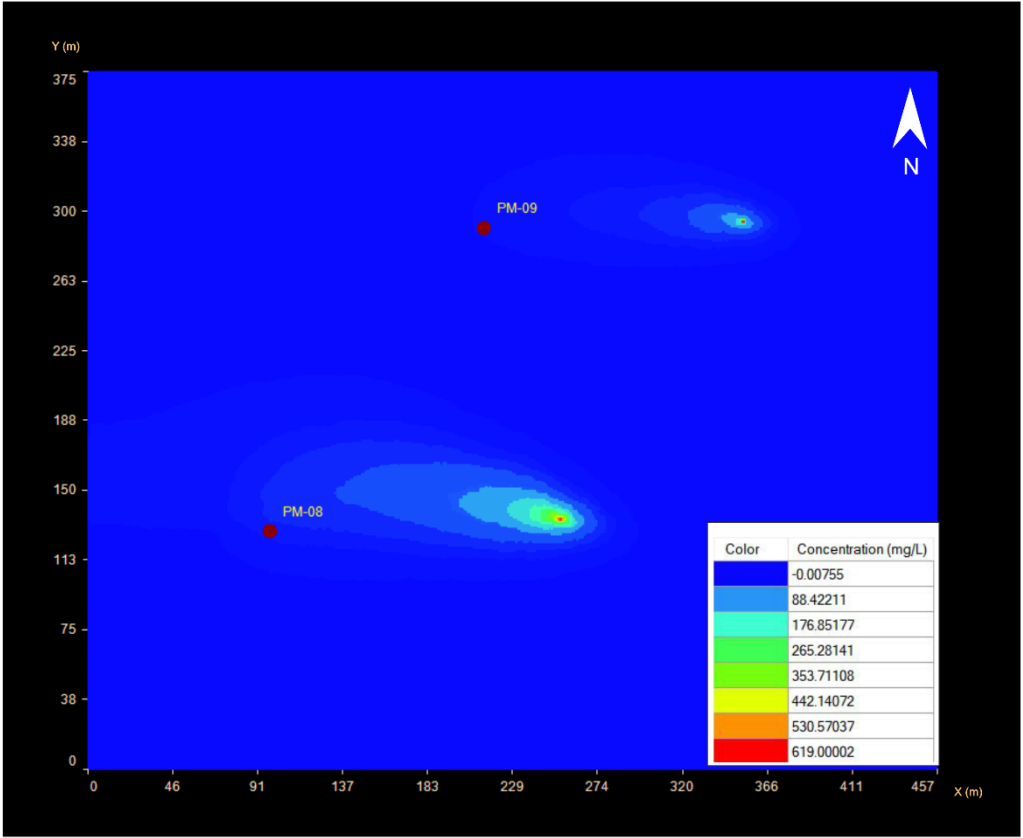
Cenário 03



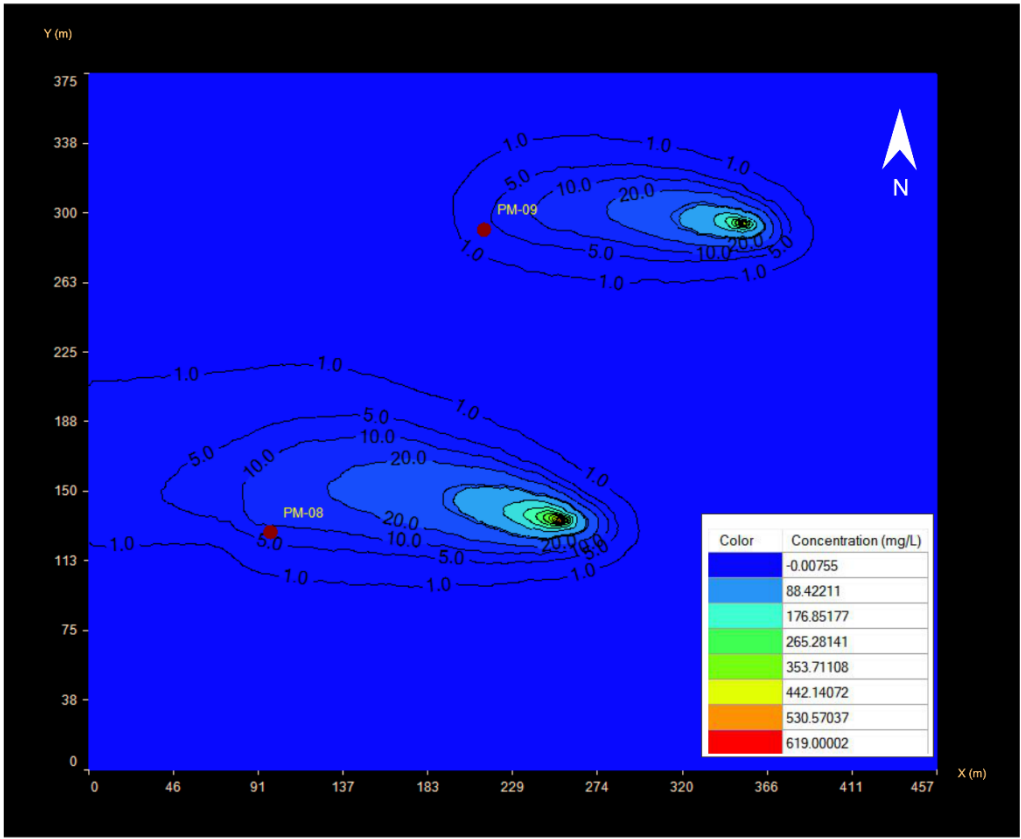
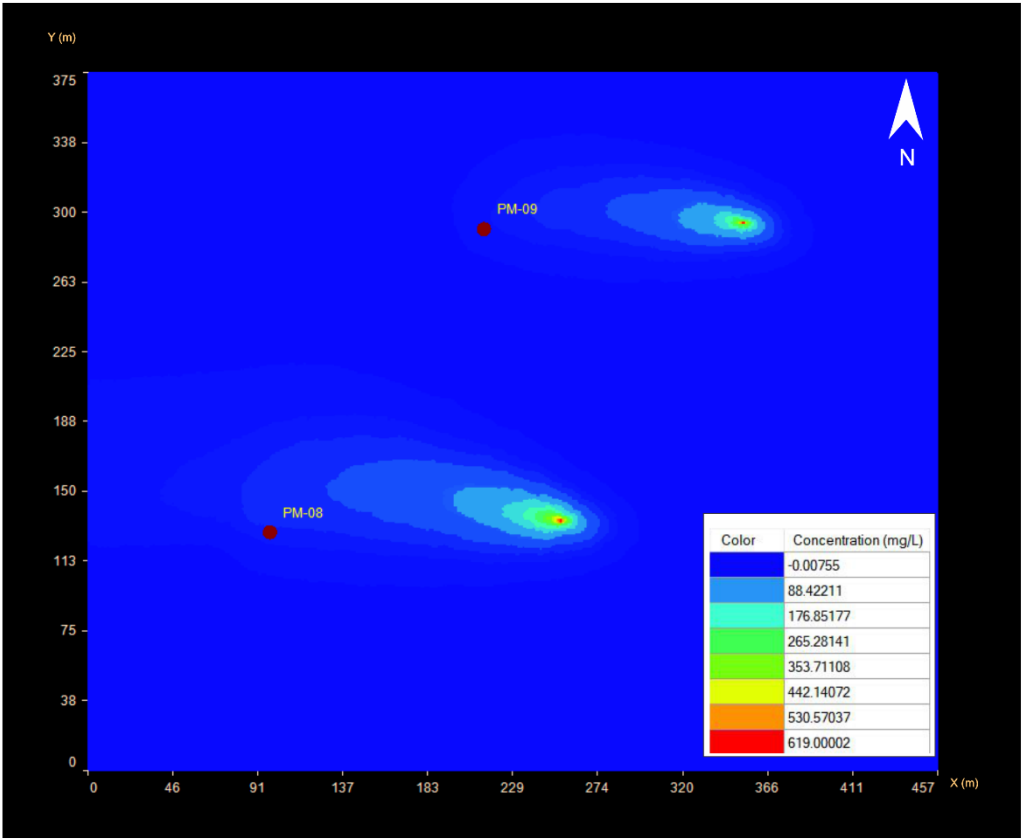
Cenário 04



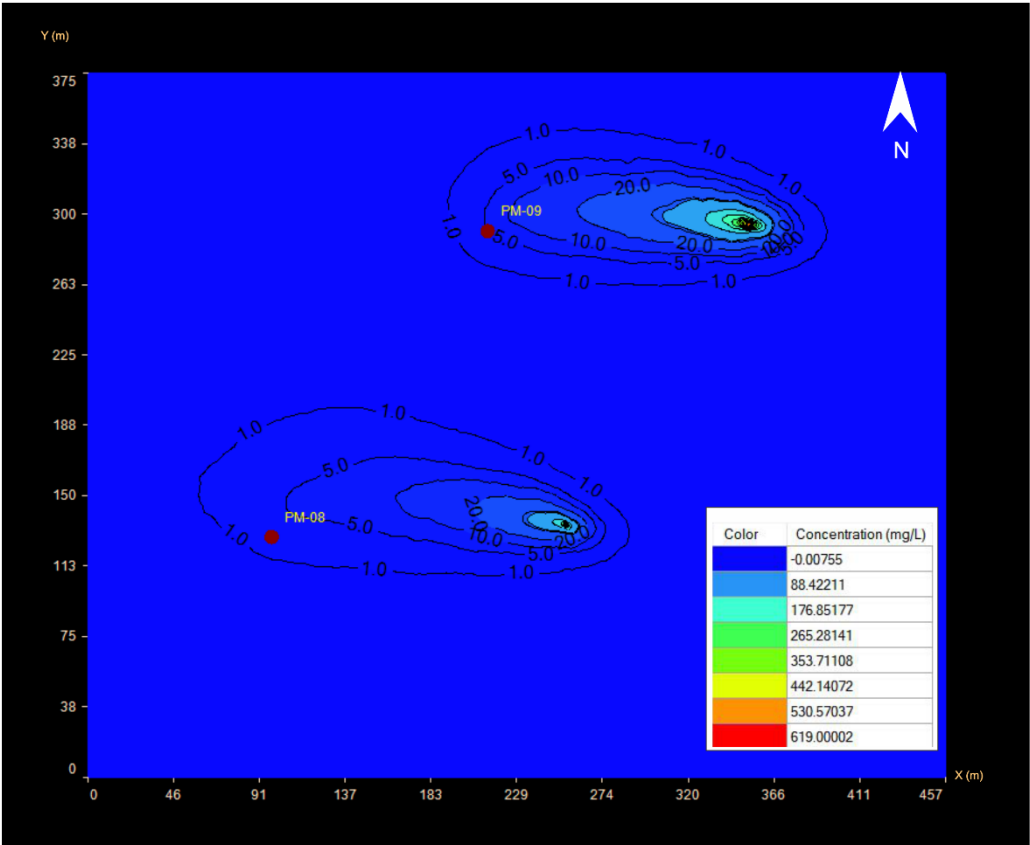
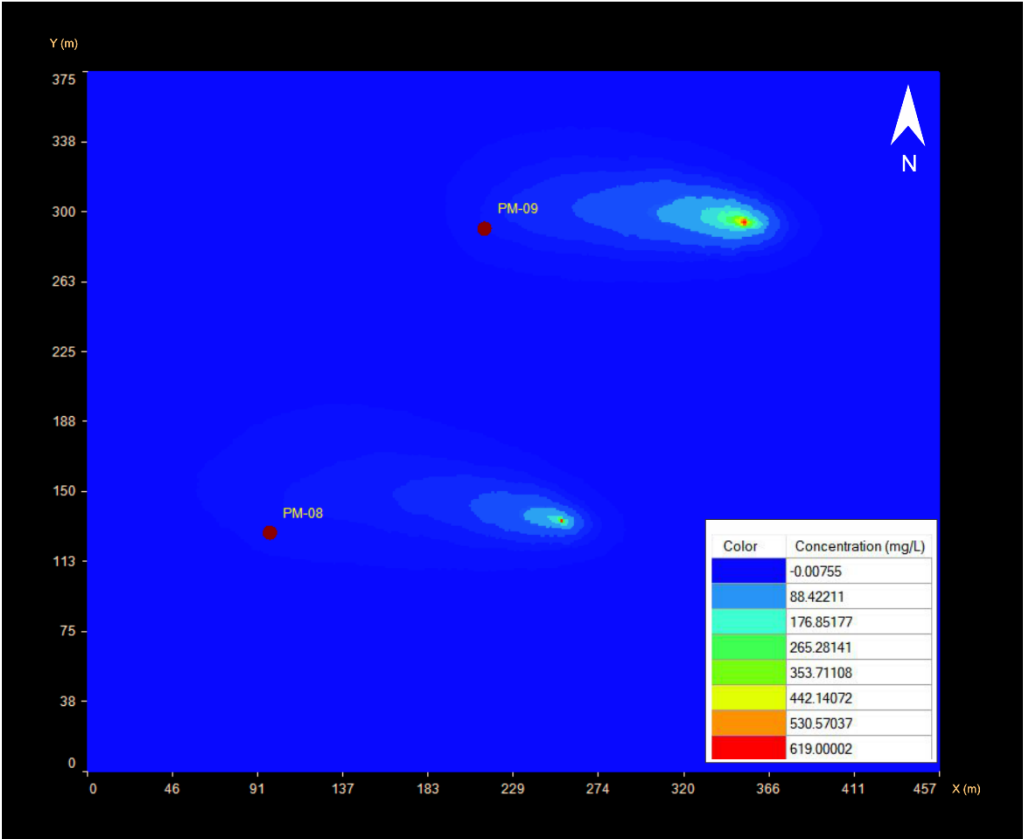
Cenário 05



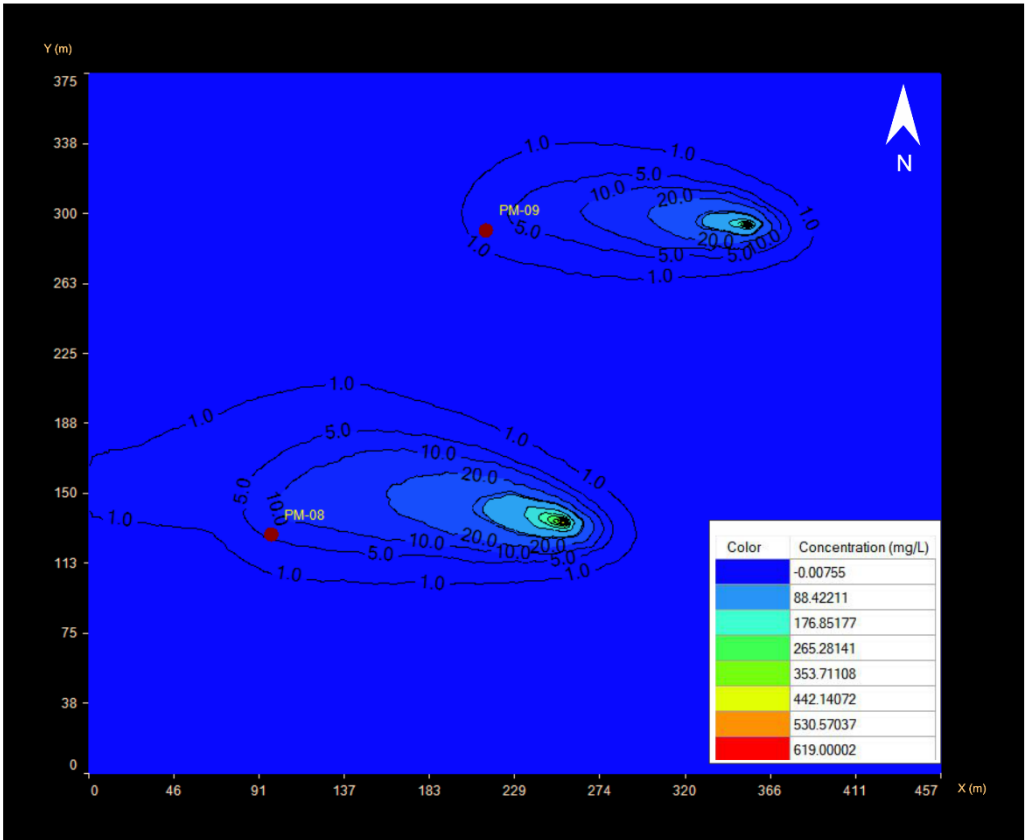
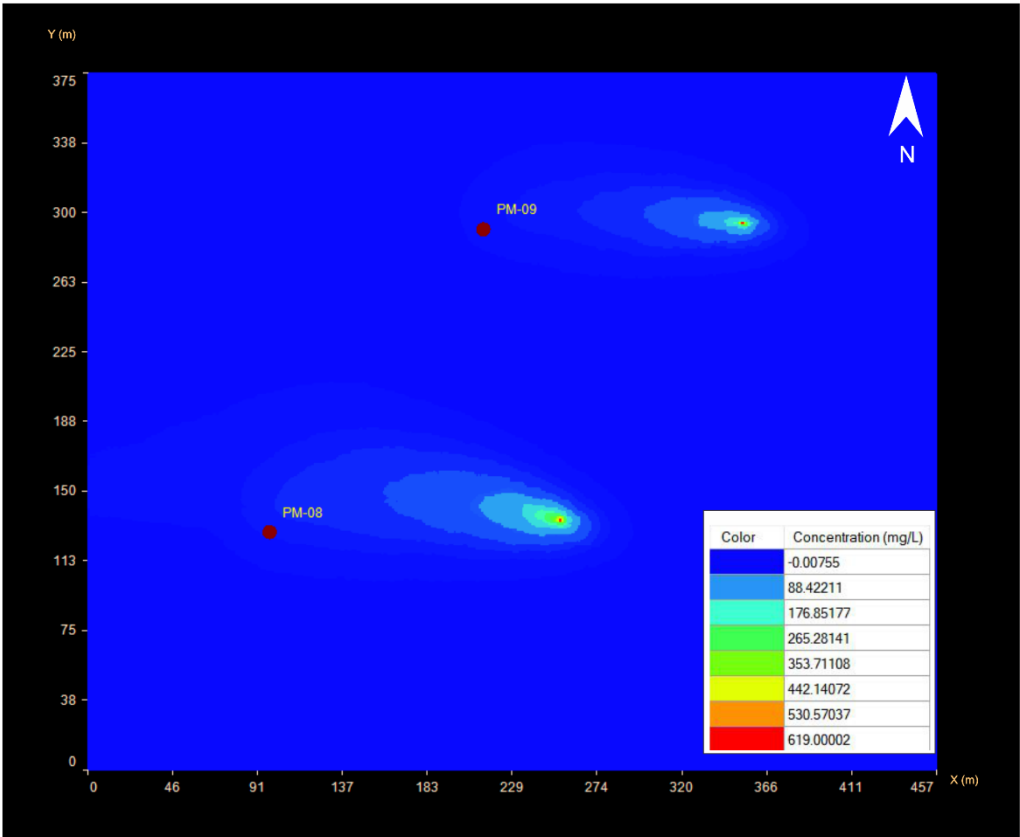
Cenário 06



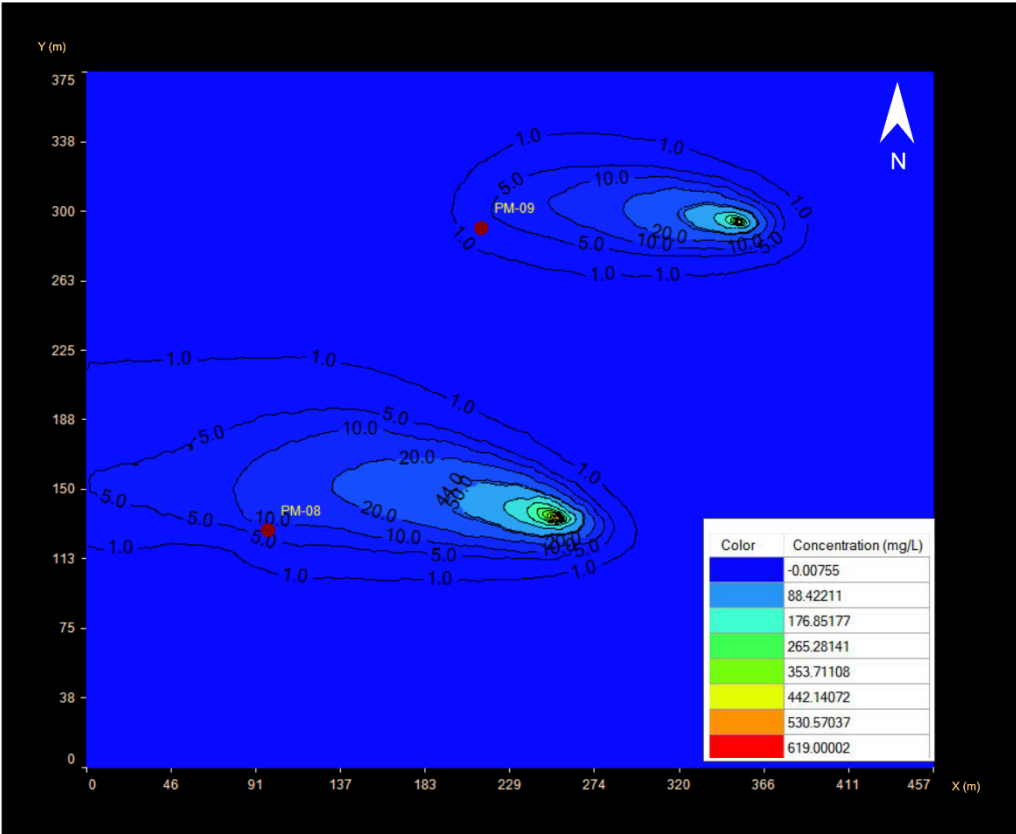
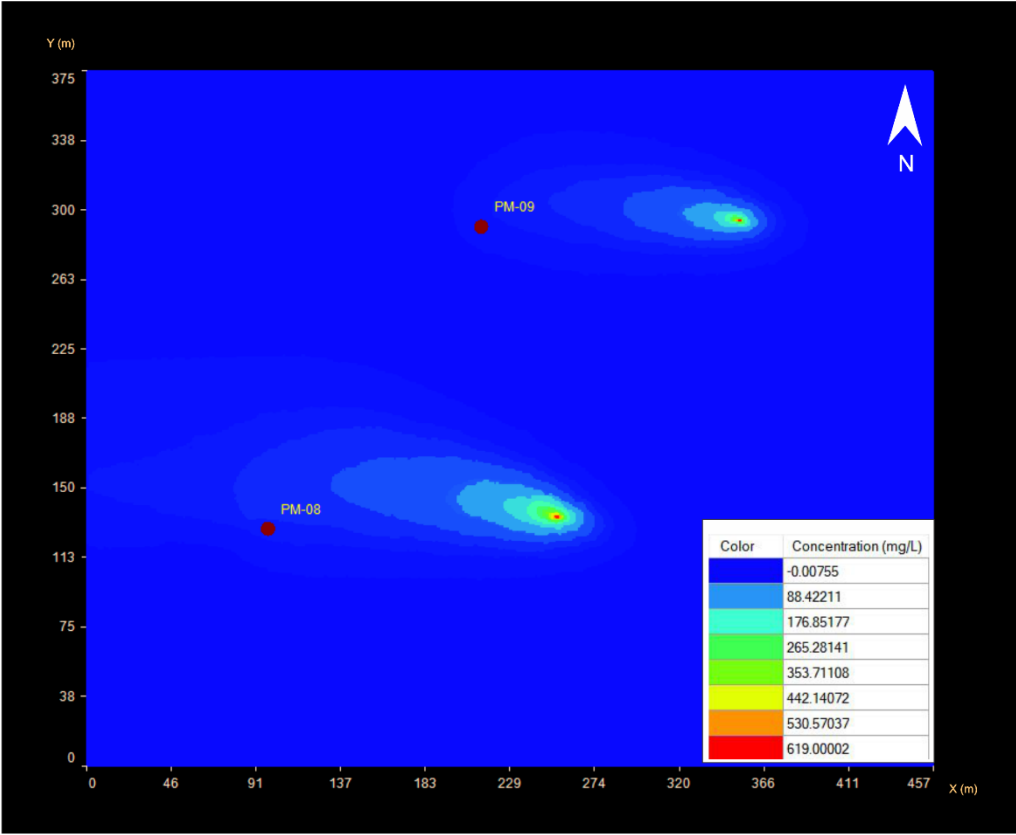
Cenário 07



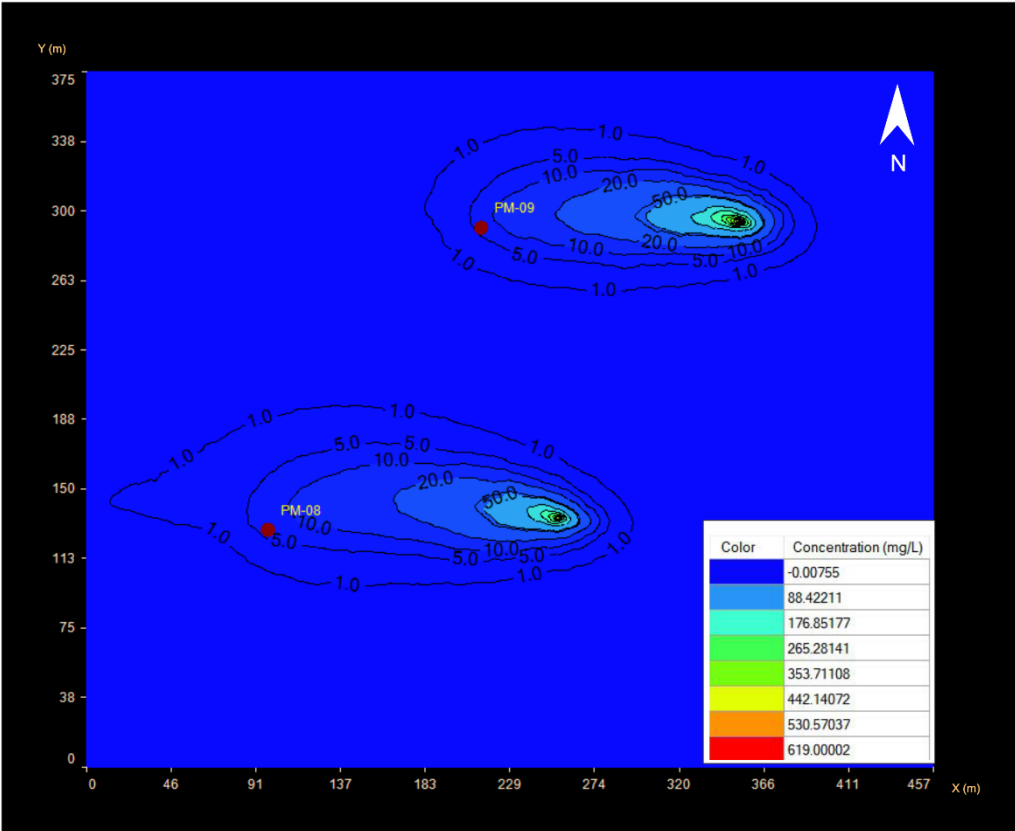
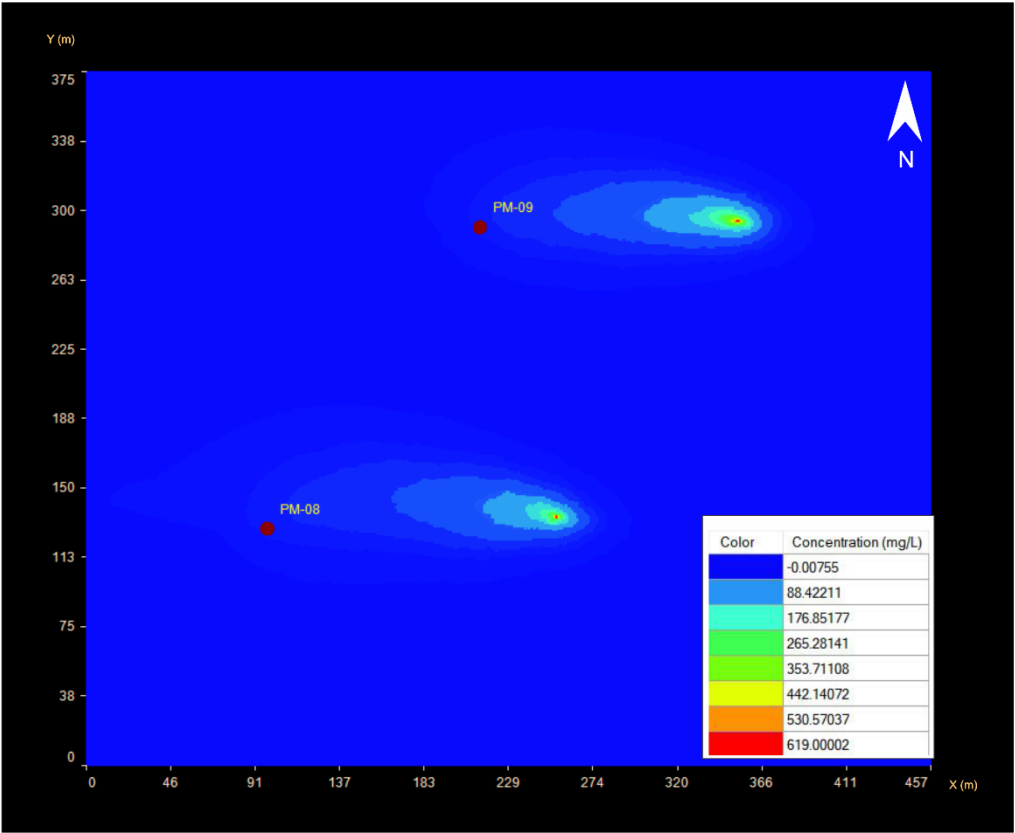
Cenário 08



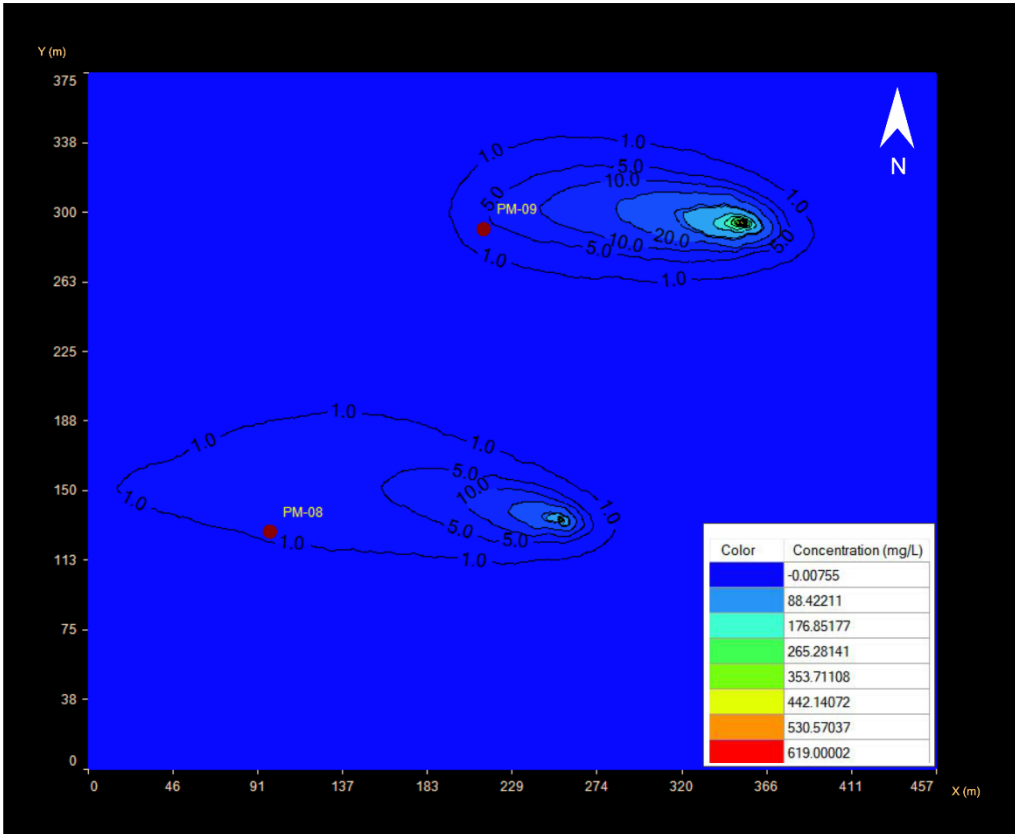
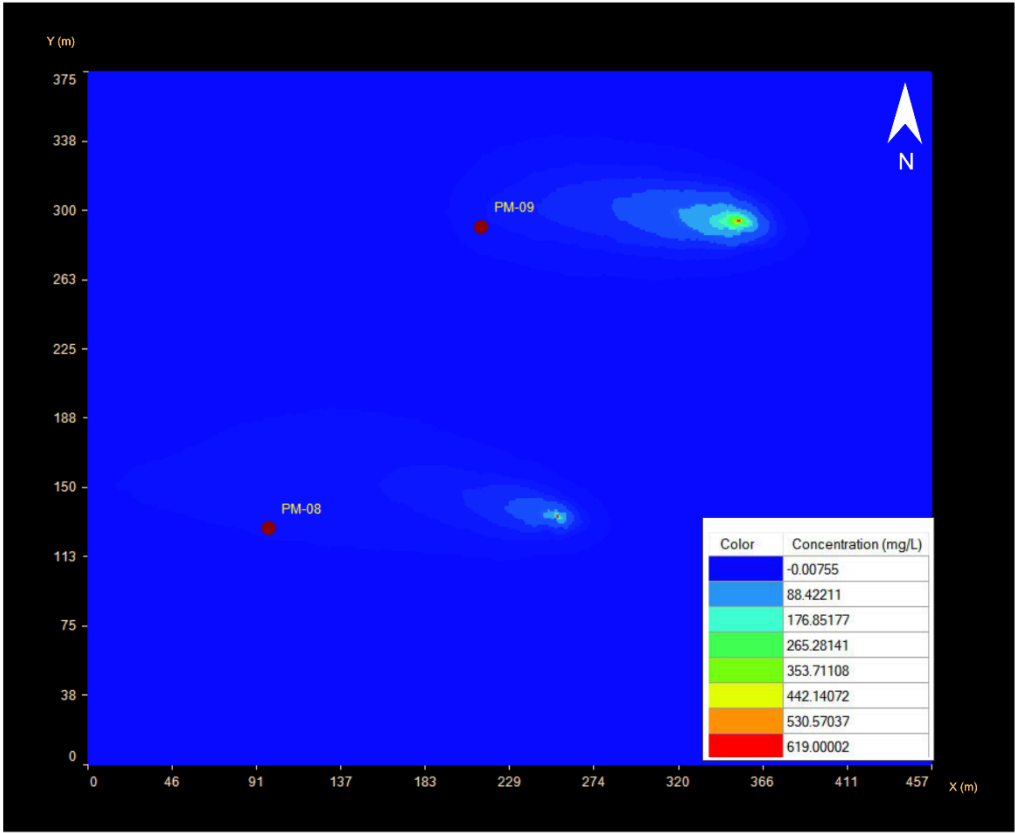
Cenário 09



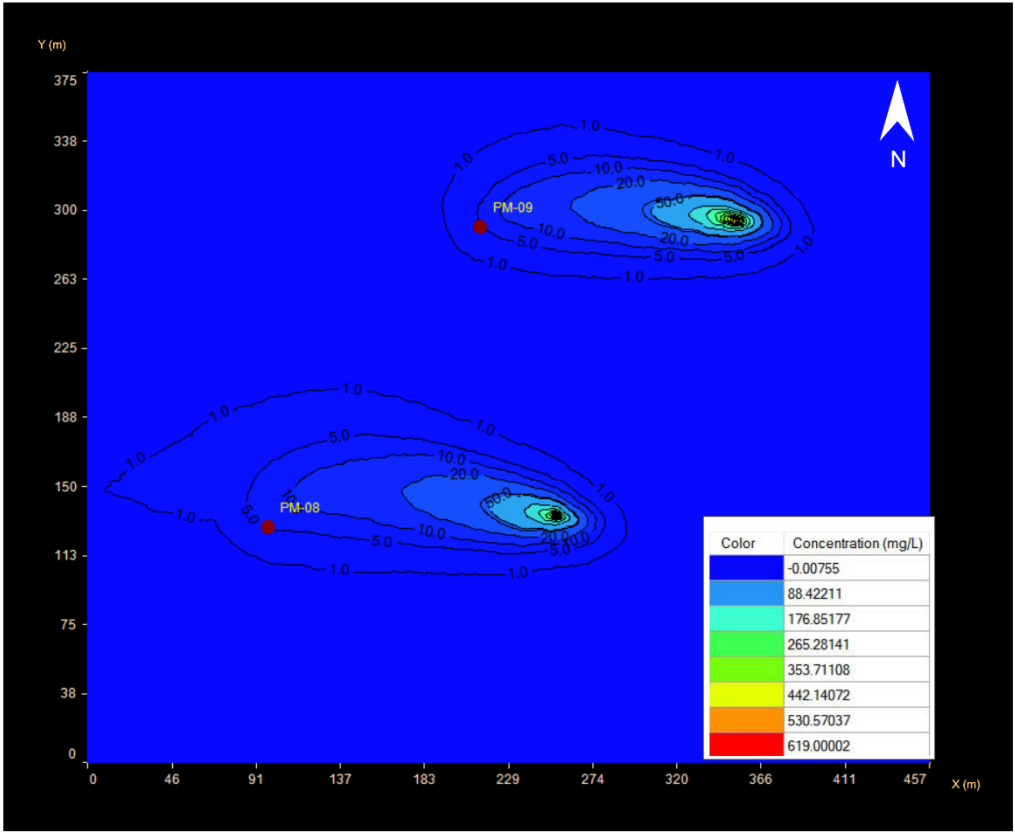
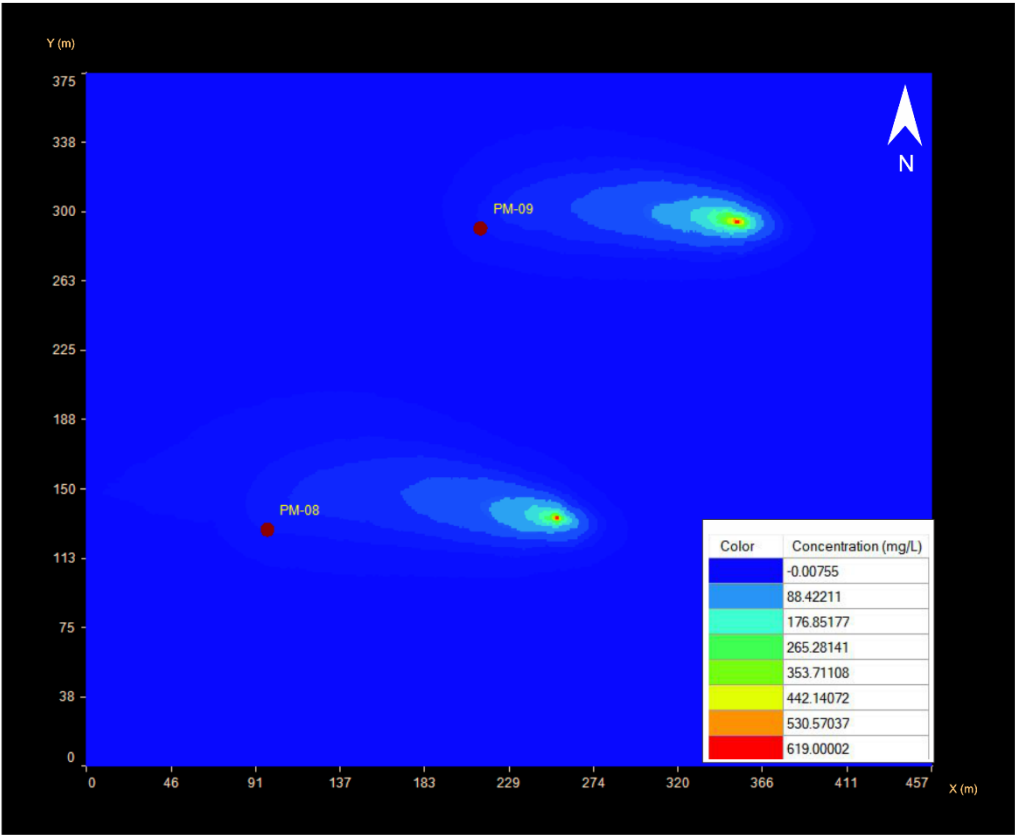
Cenário 10



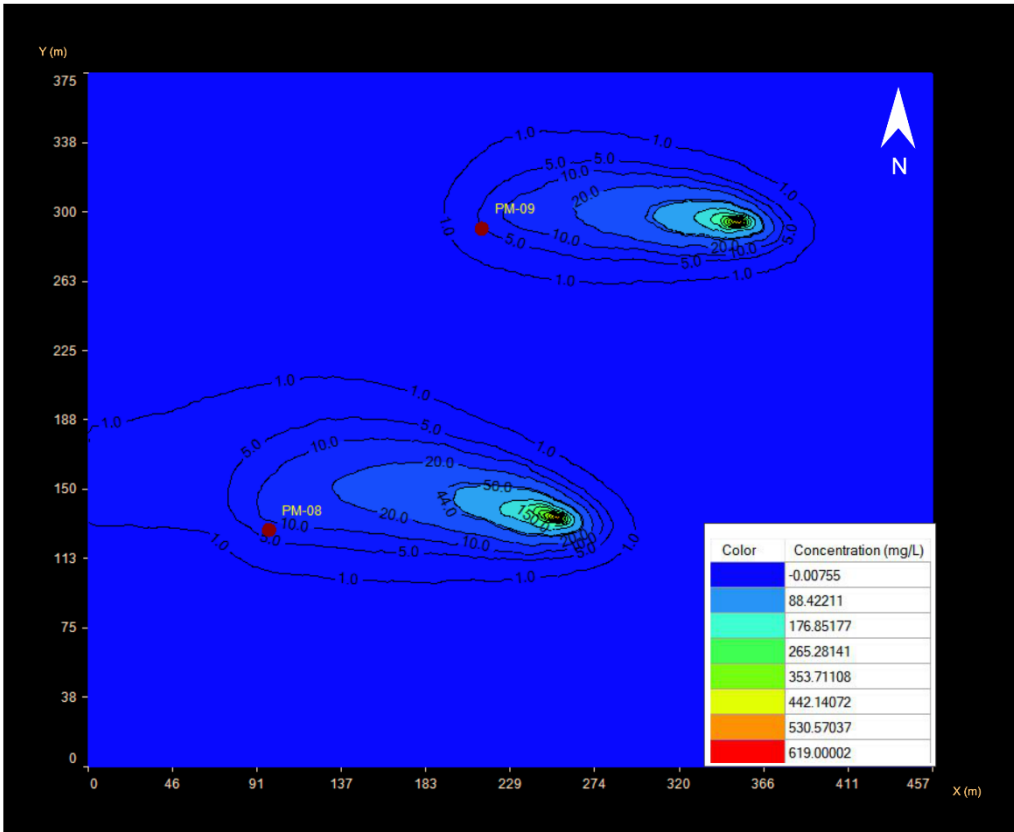
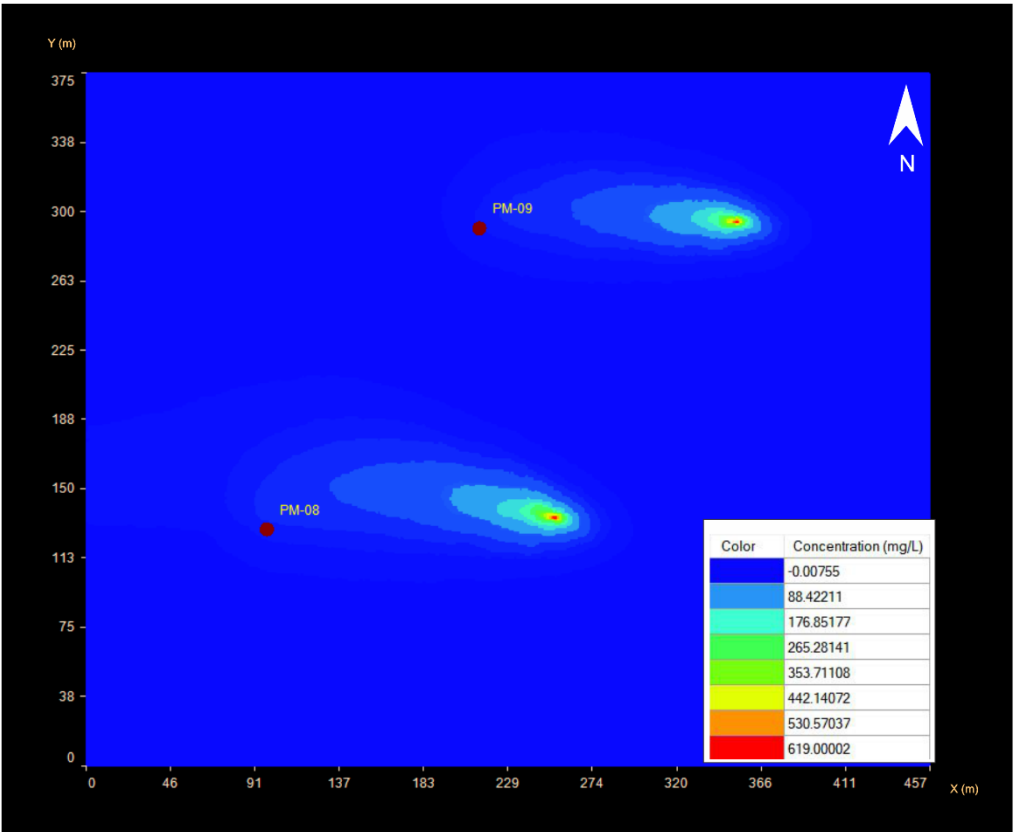
Cenário 11



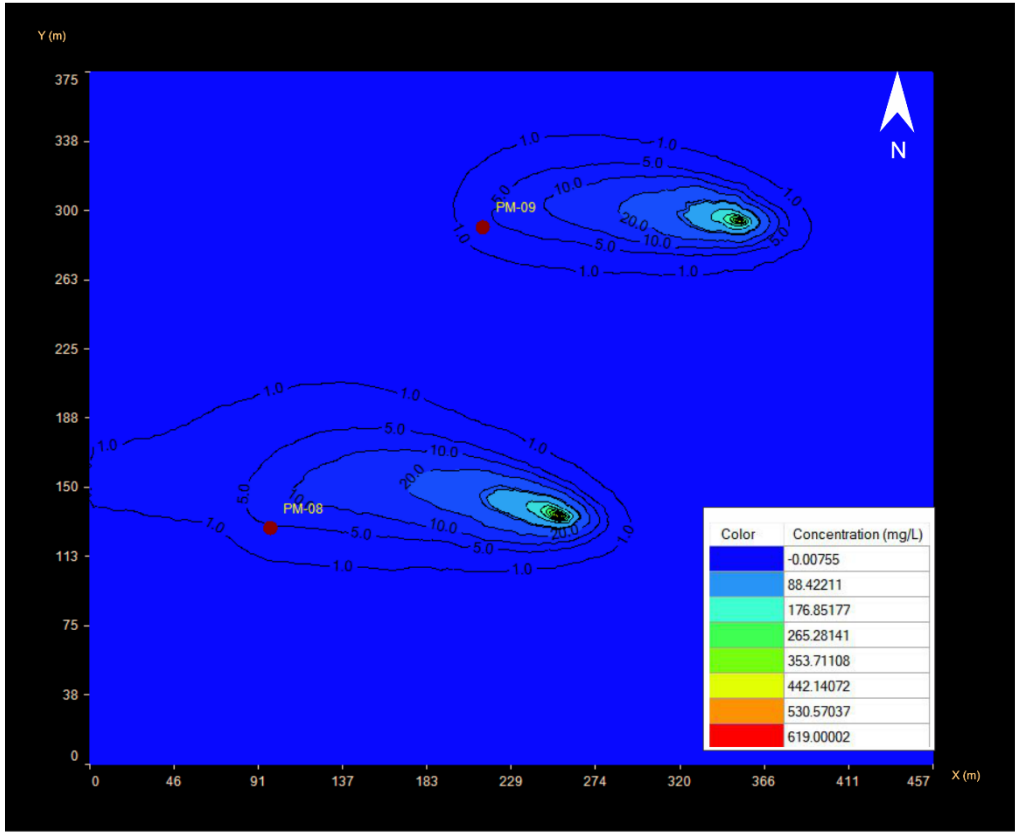
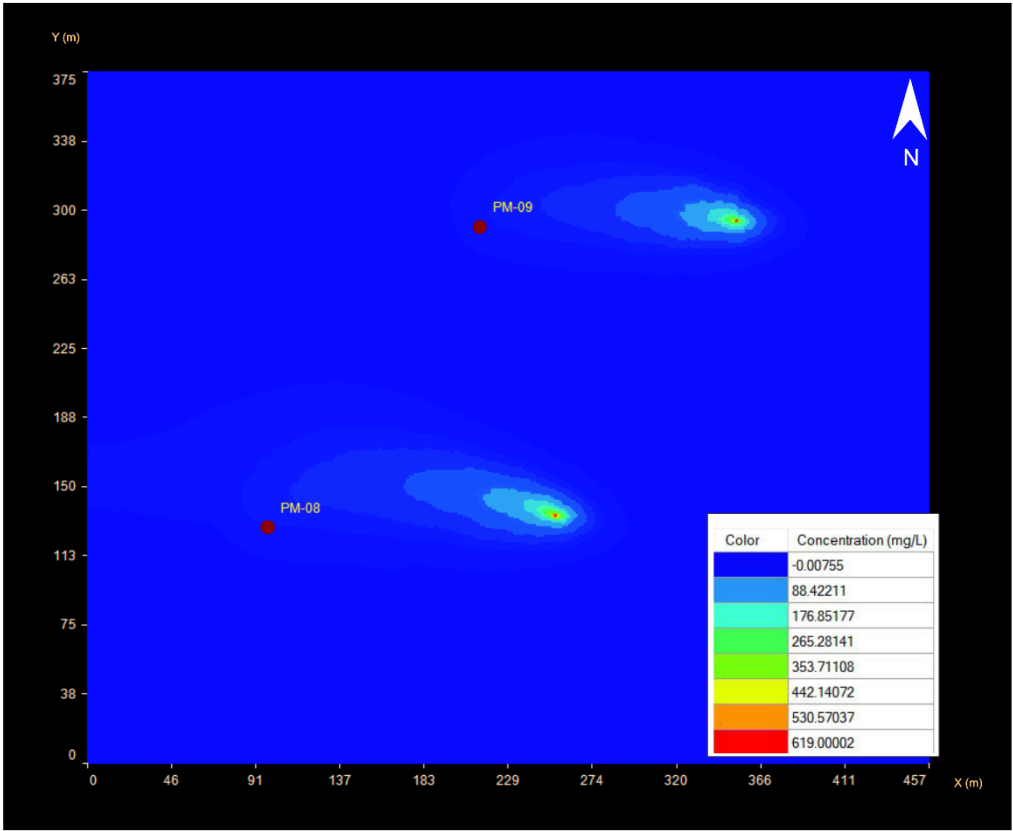
Cenário 12



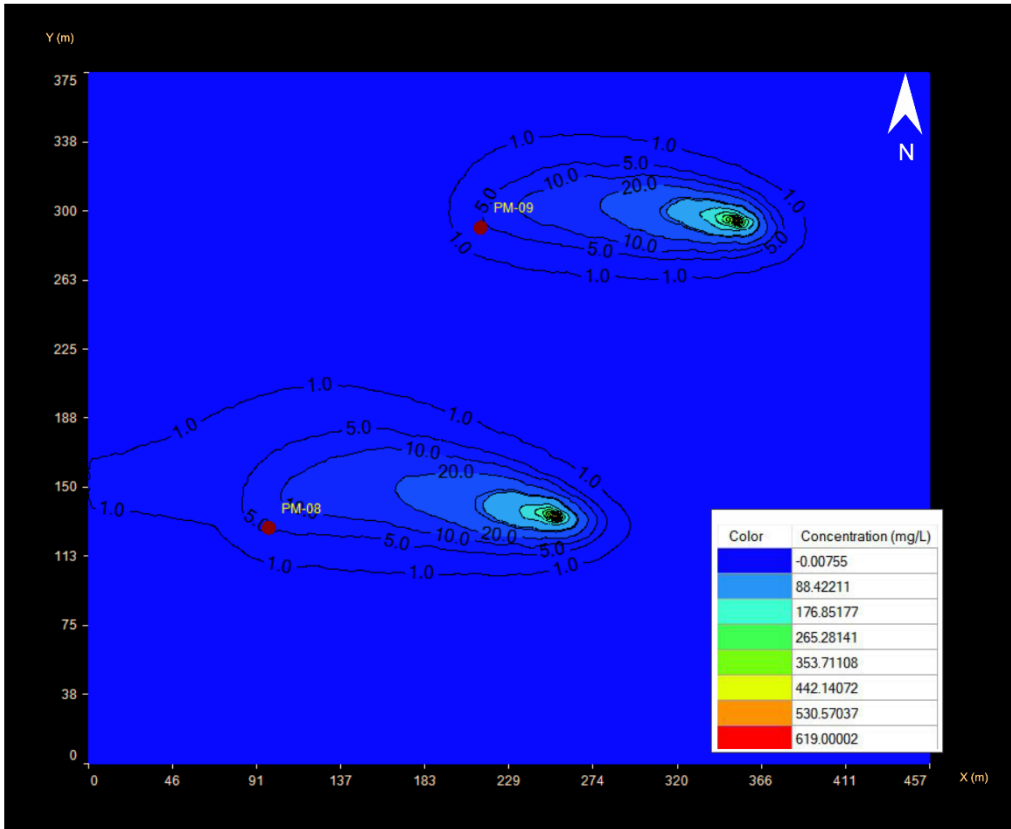
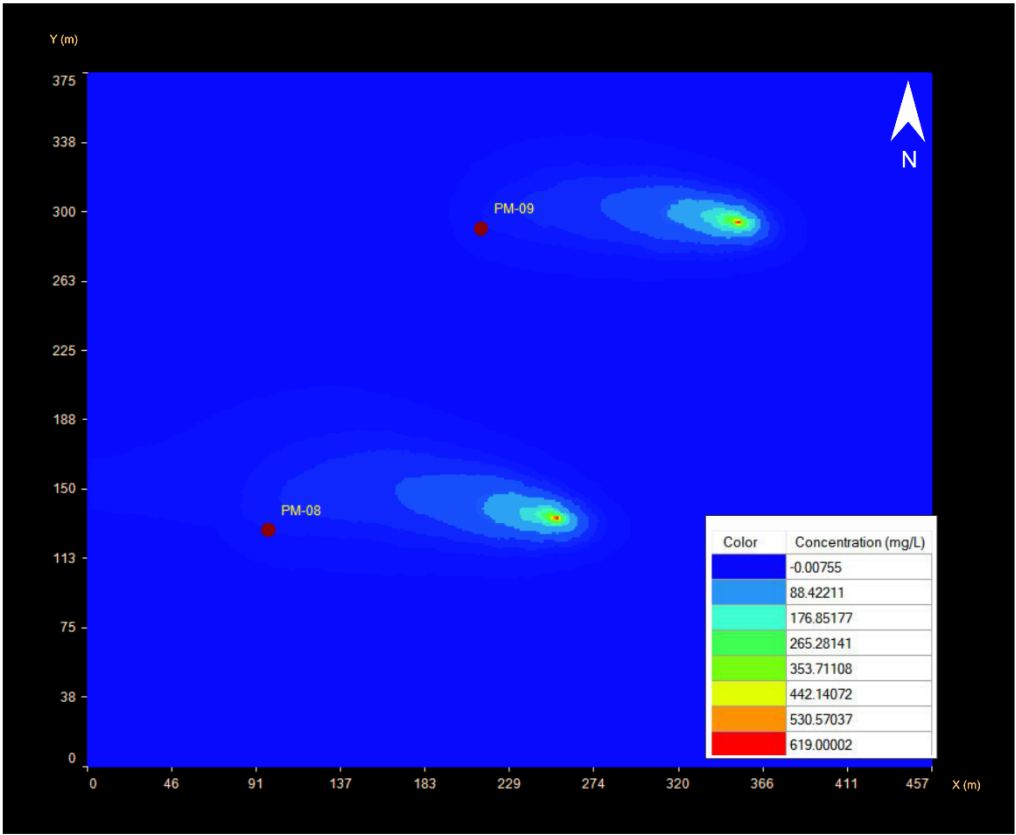
Cenário 13



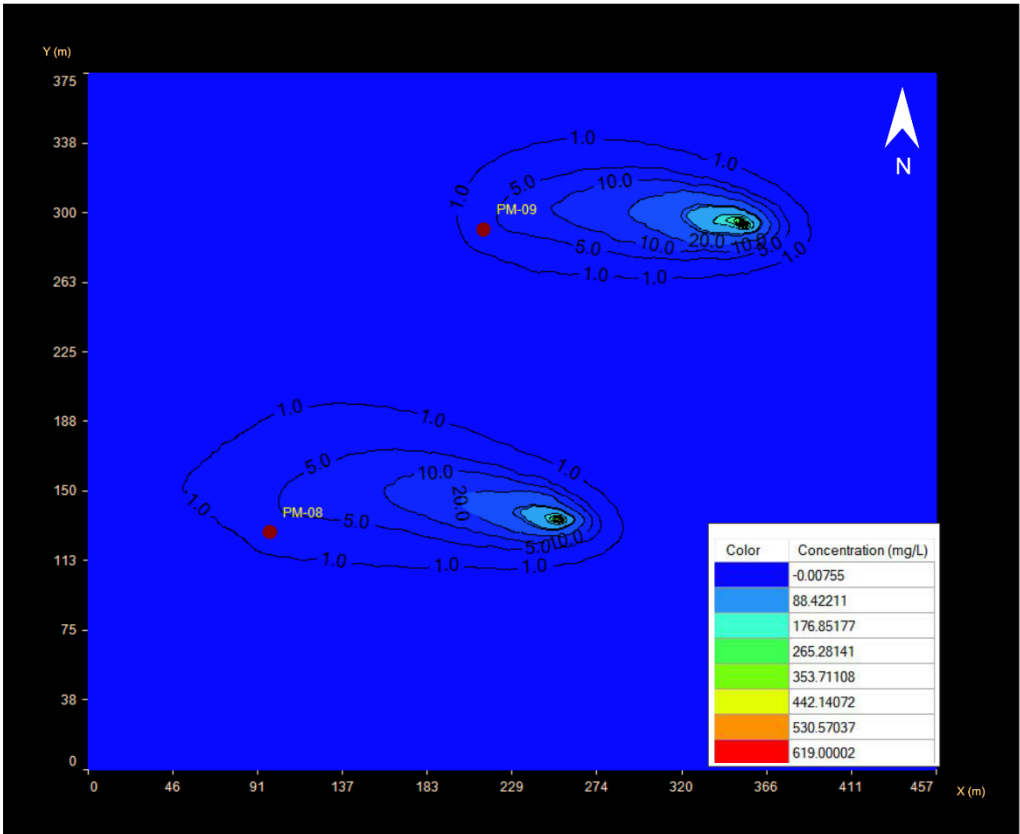
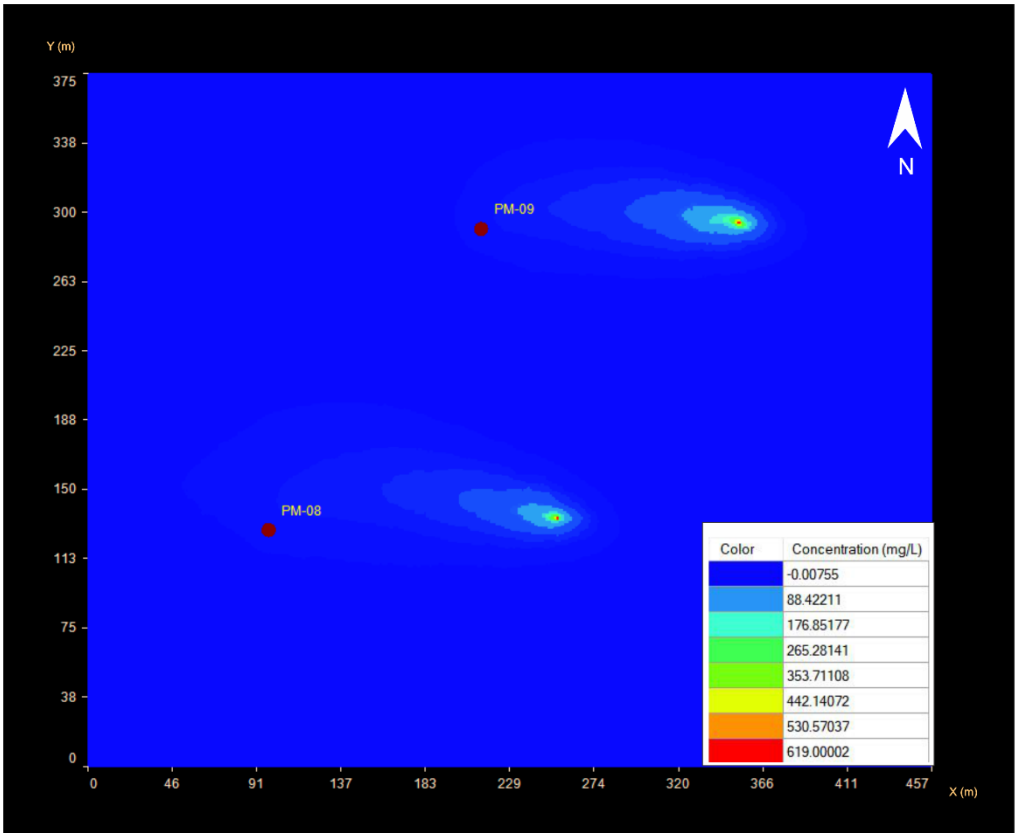
Cenário 14



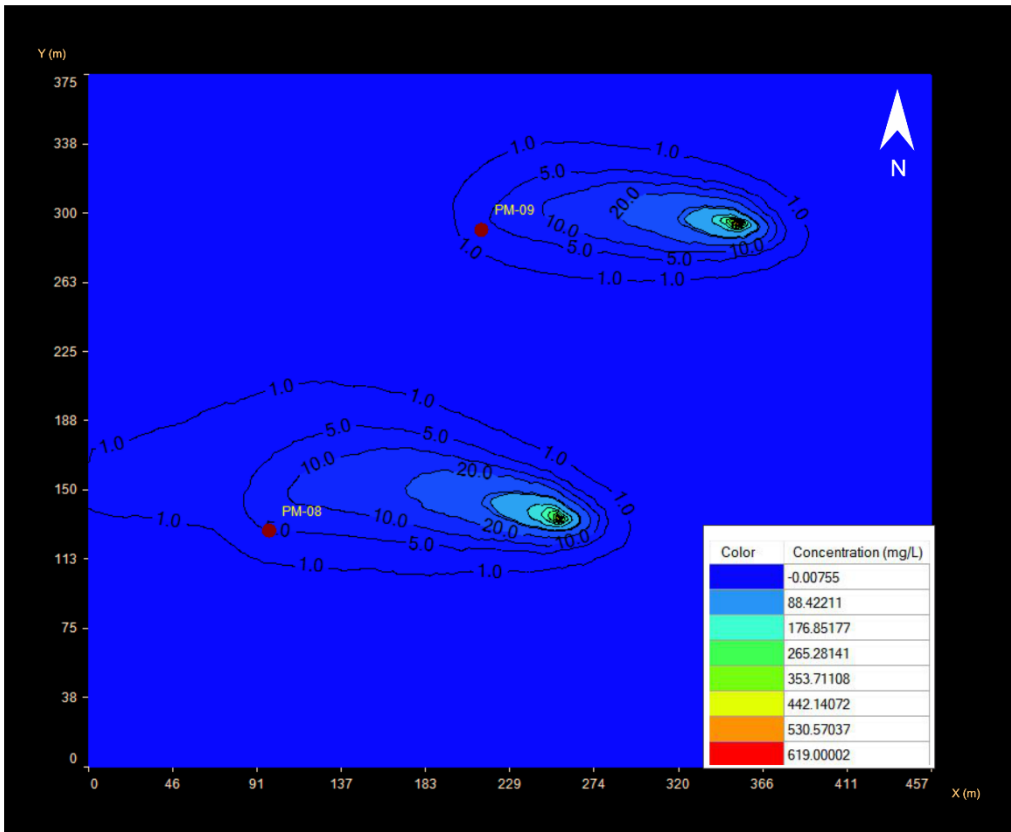
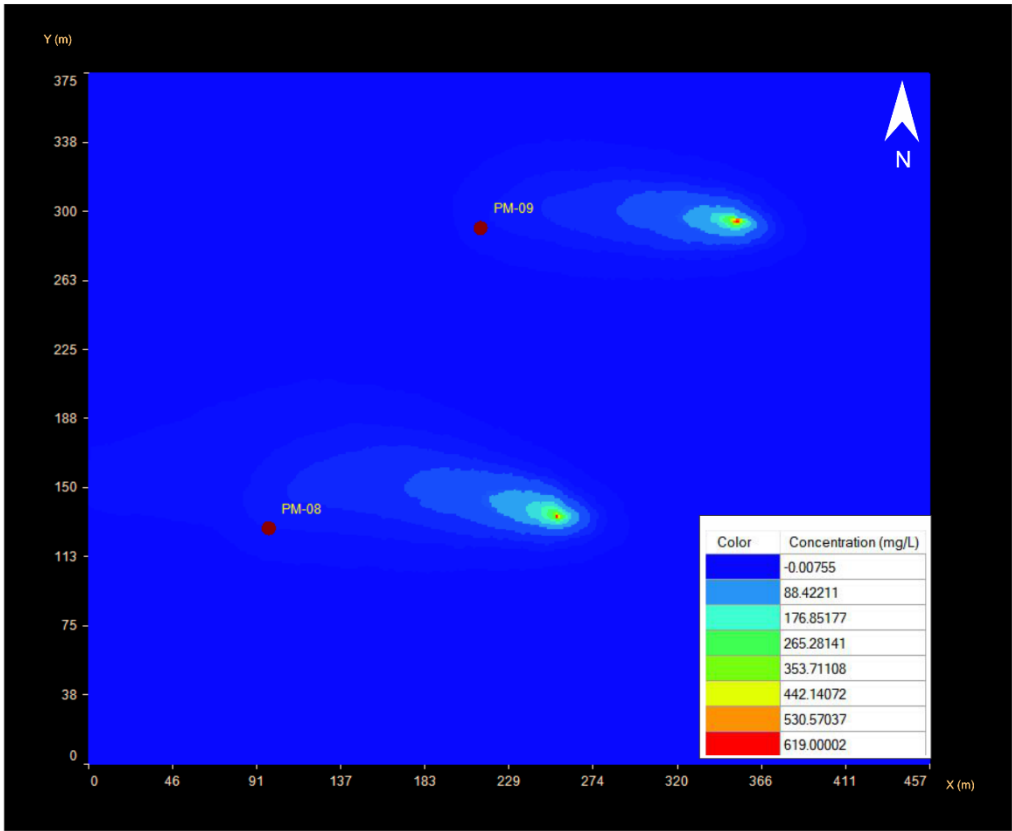
Cenário 15



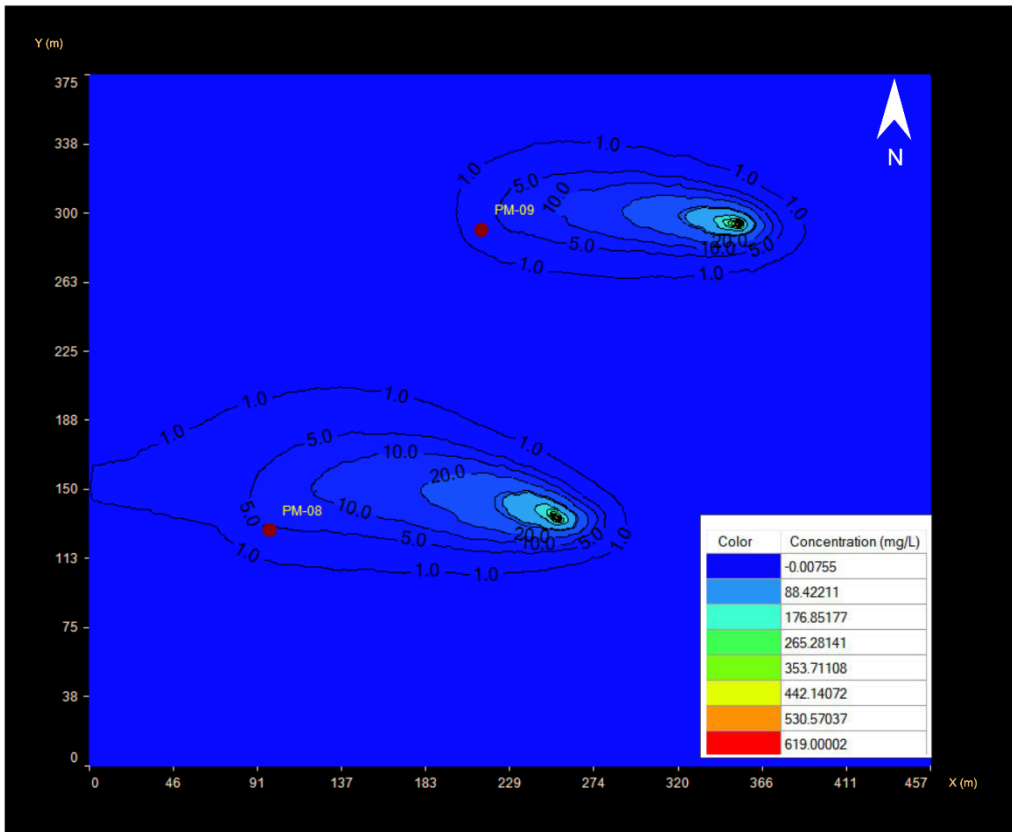
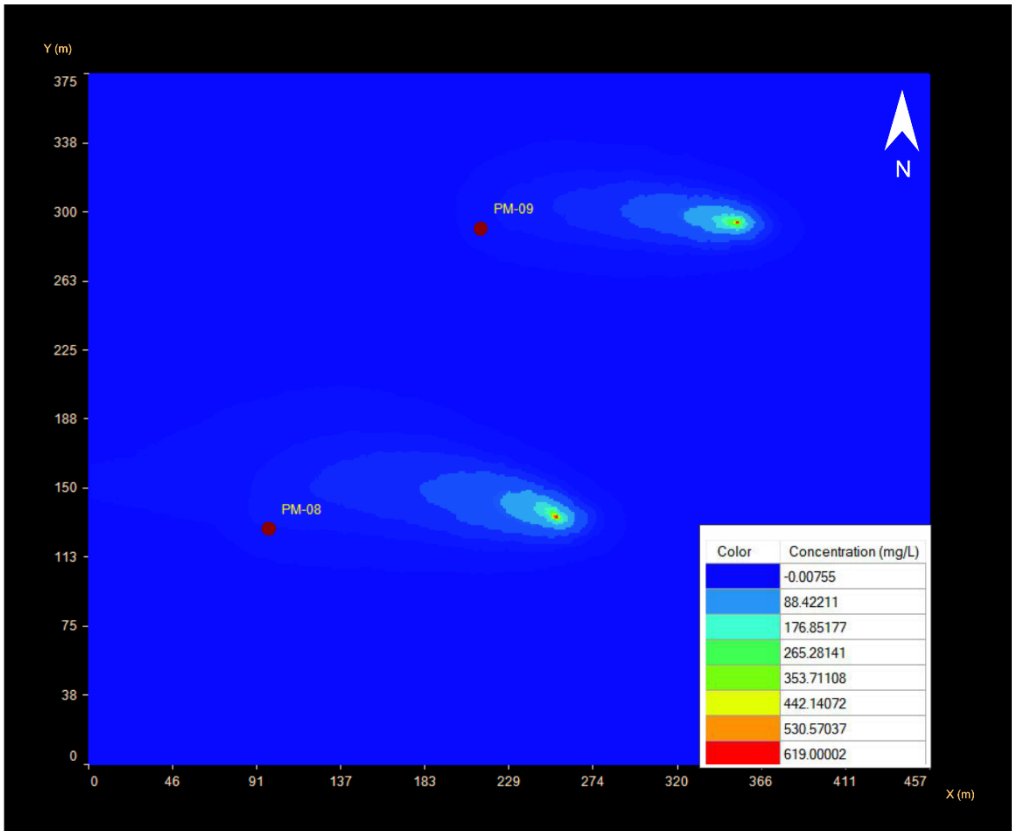
Cenário 16



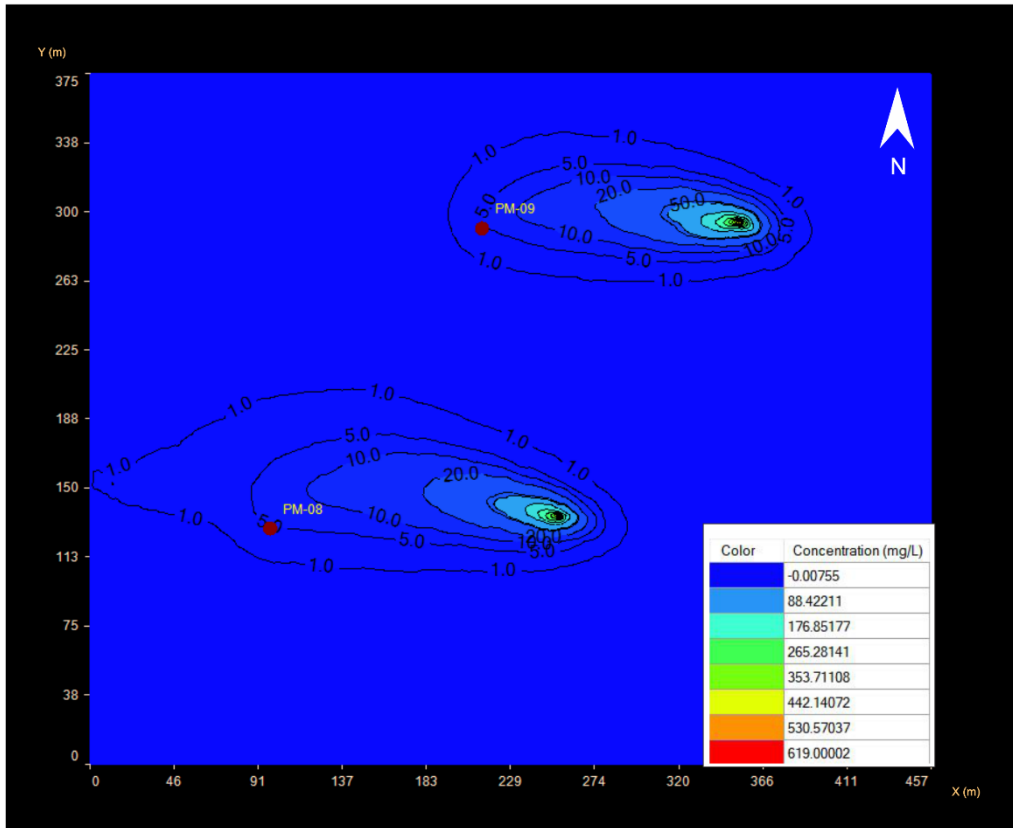
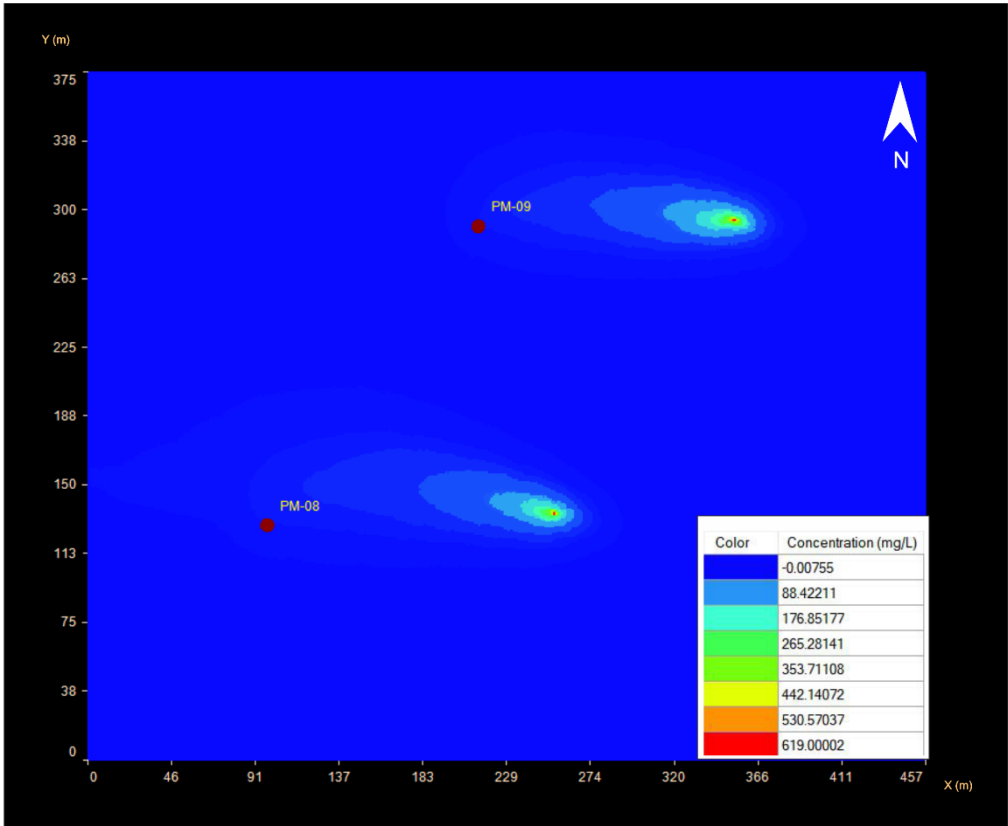
Cenário 17



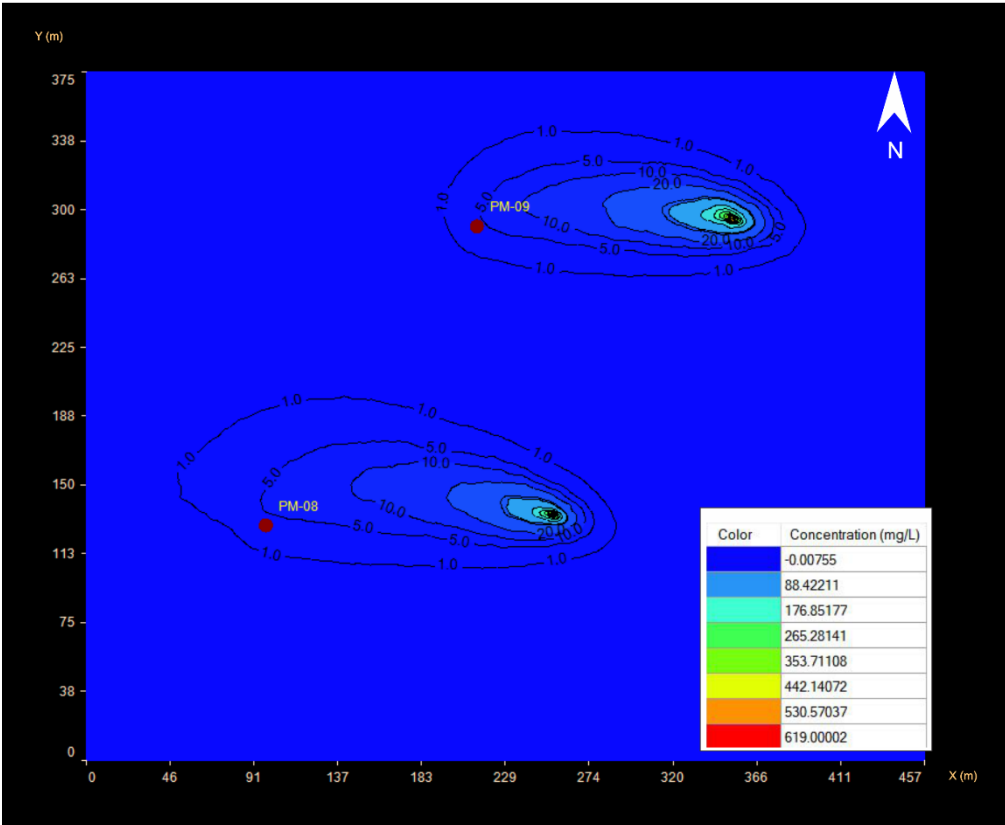
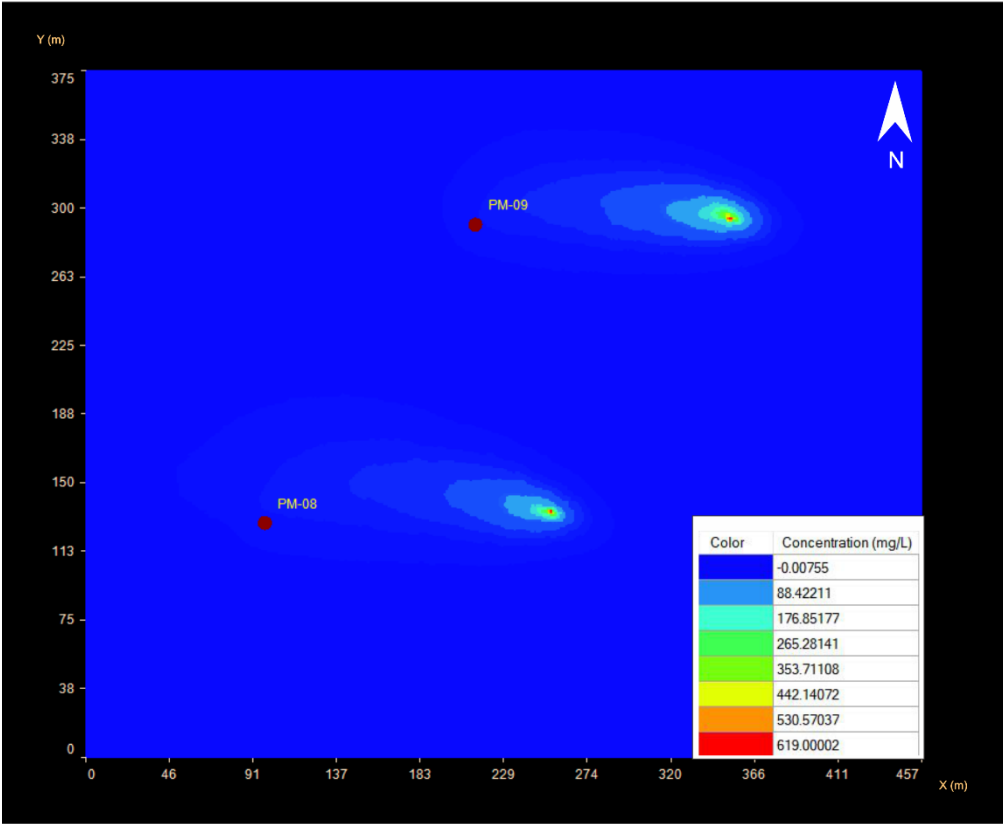
Cenário 18



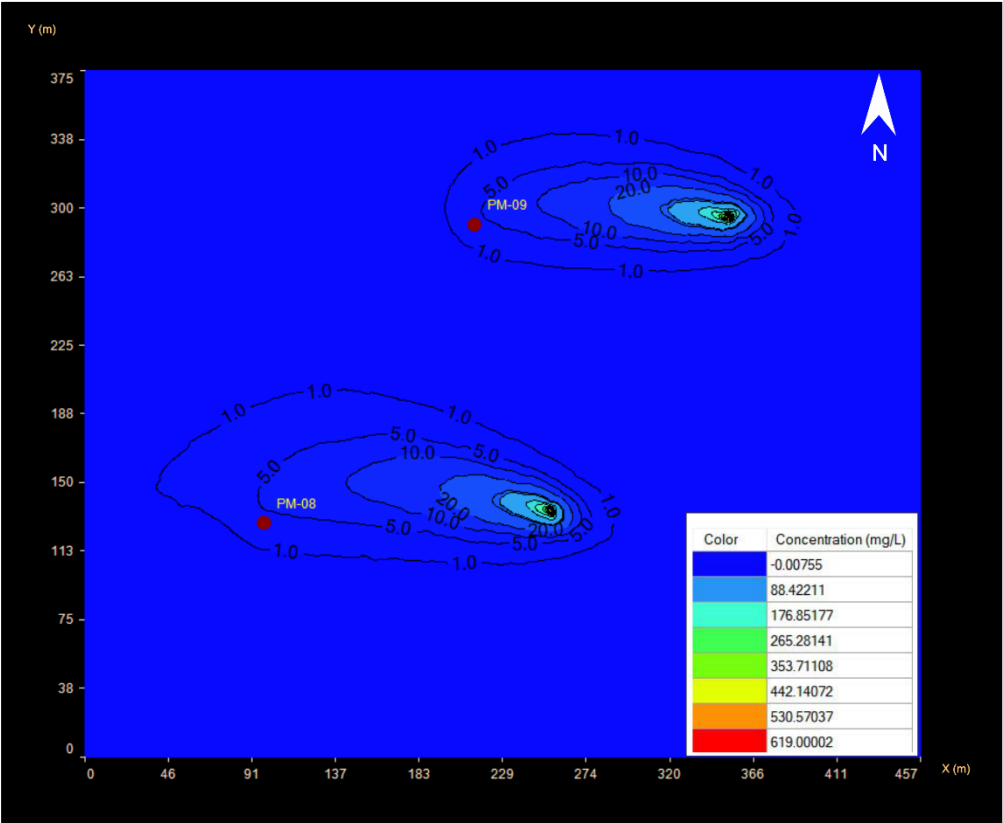
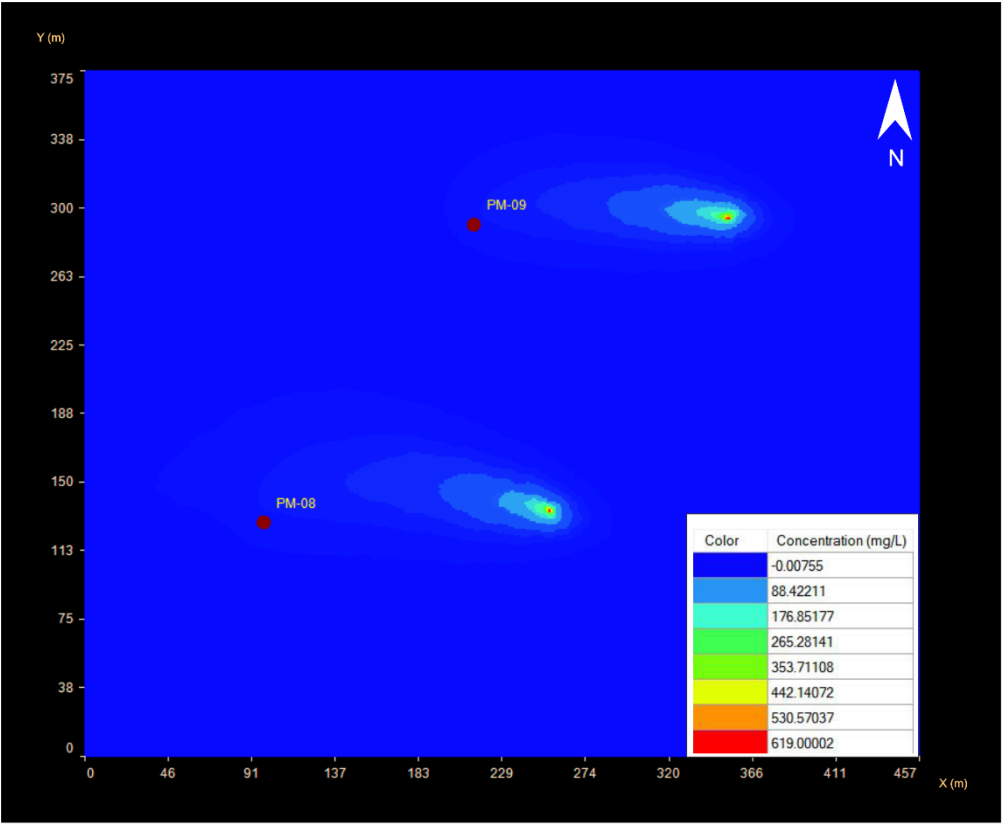
Cenário 19



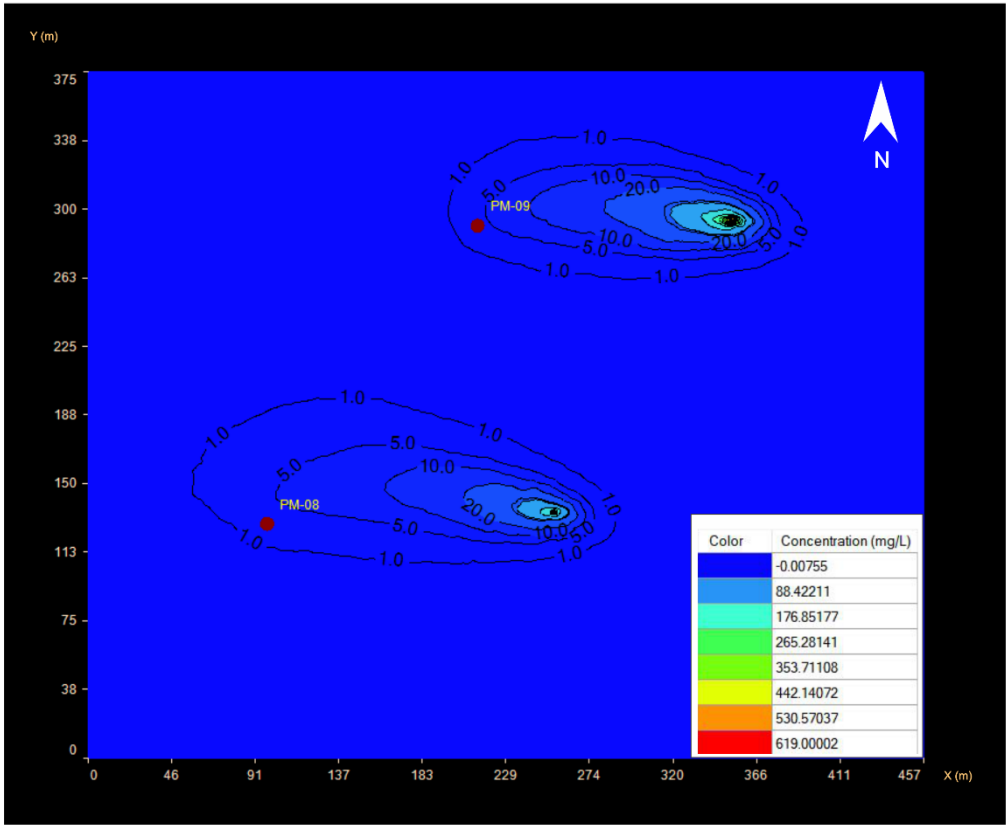
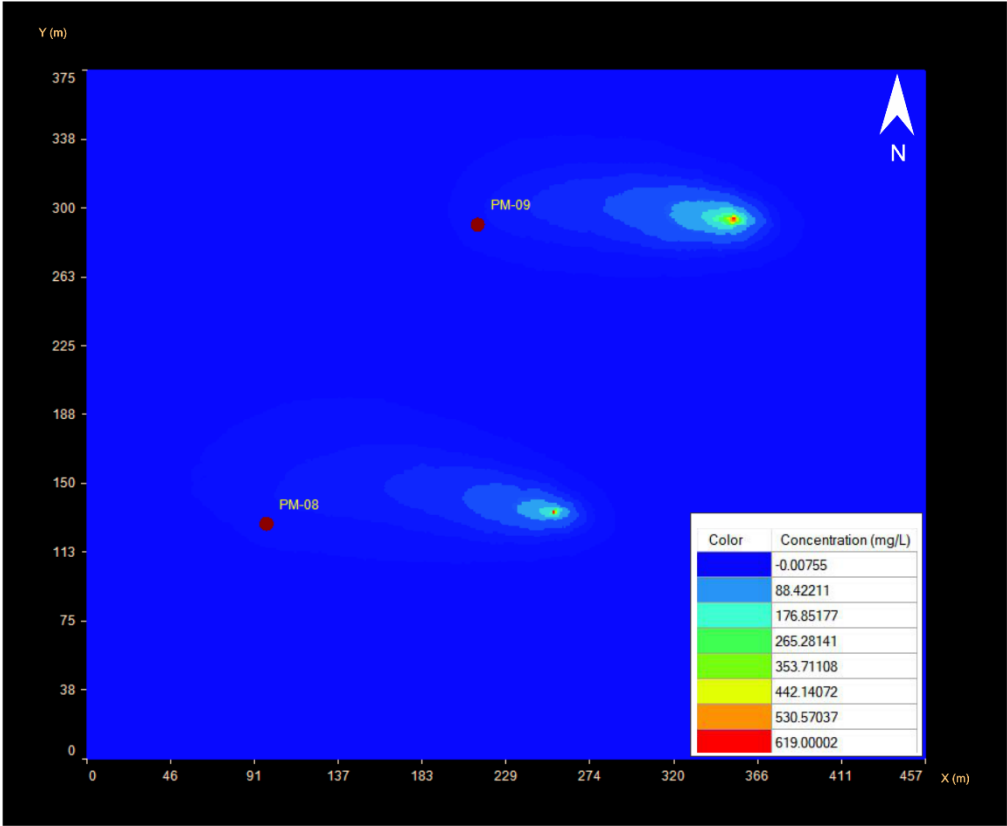
Cenário 20



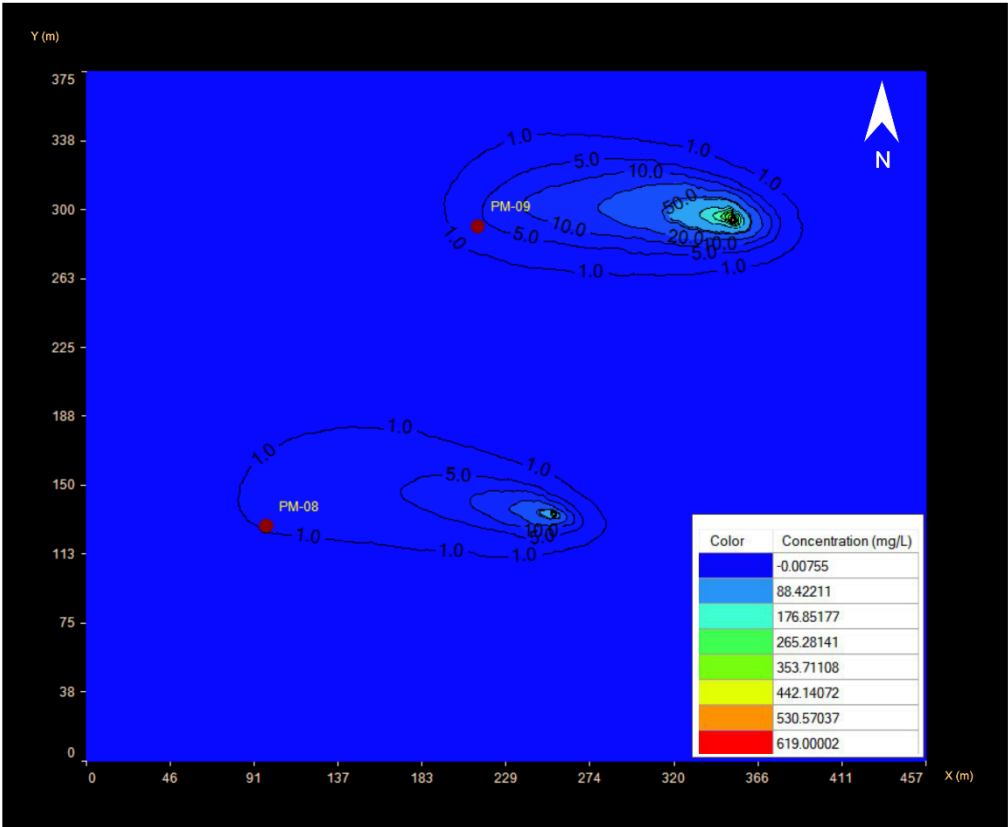
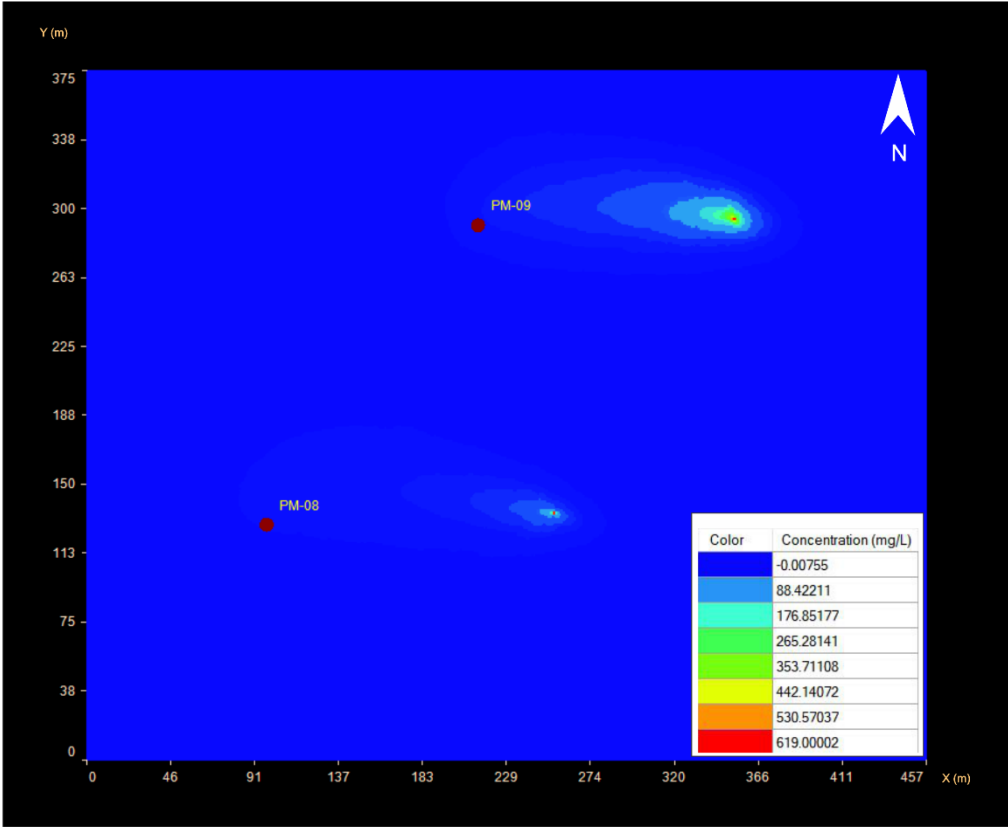
Cenário 21



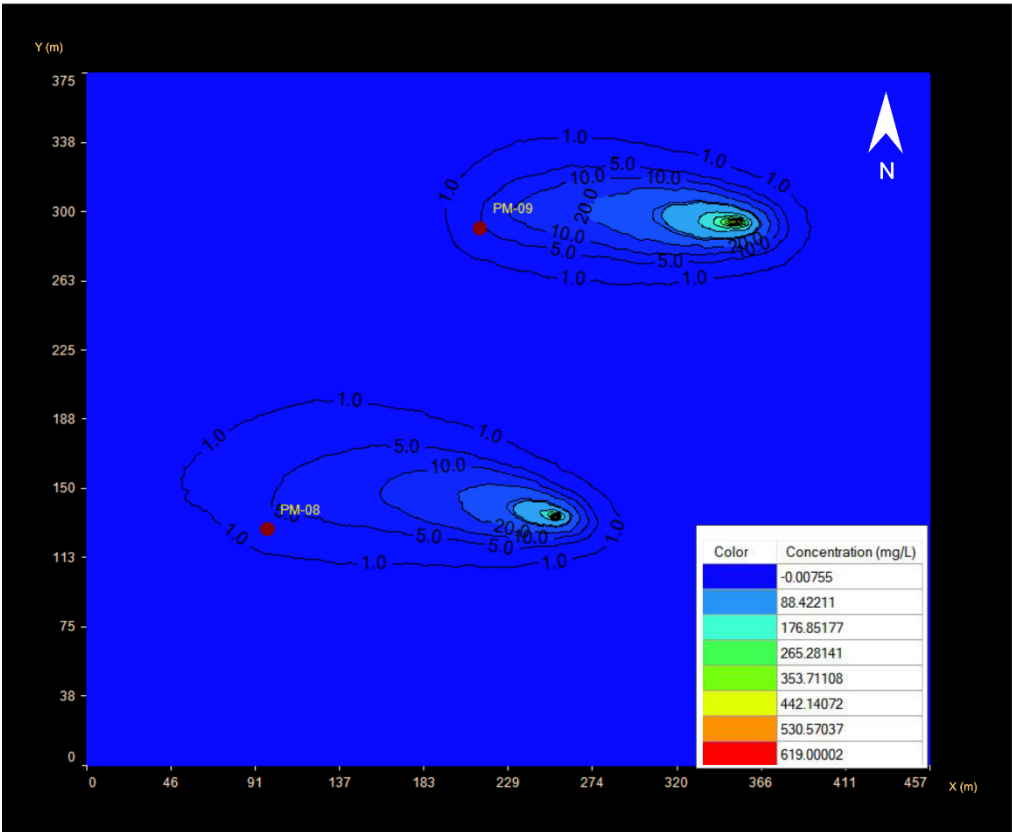
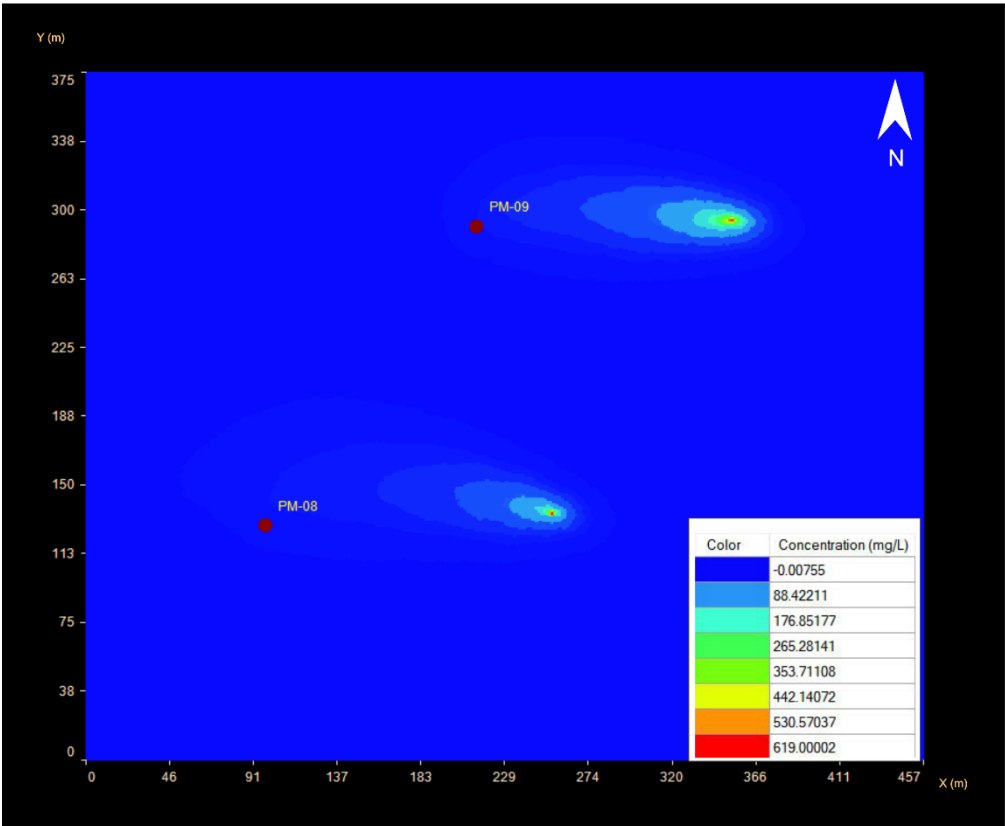
Cenário 22



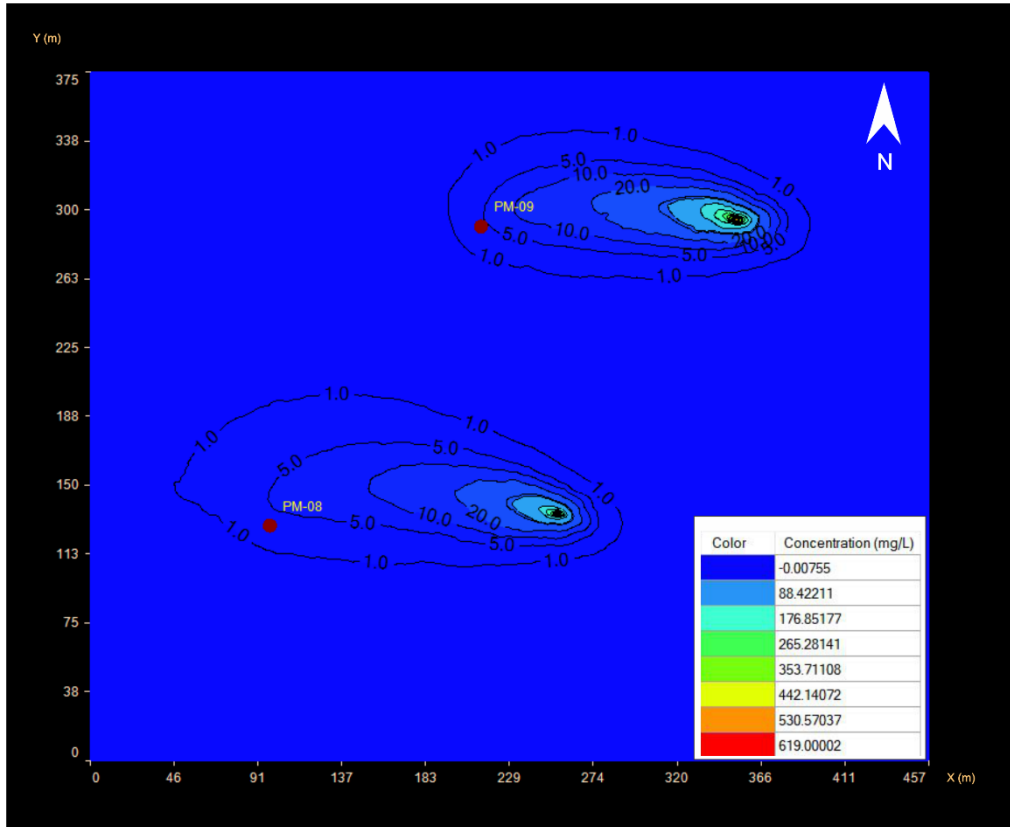
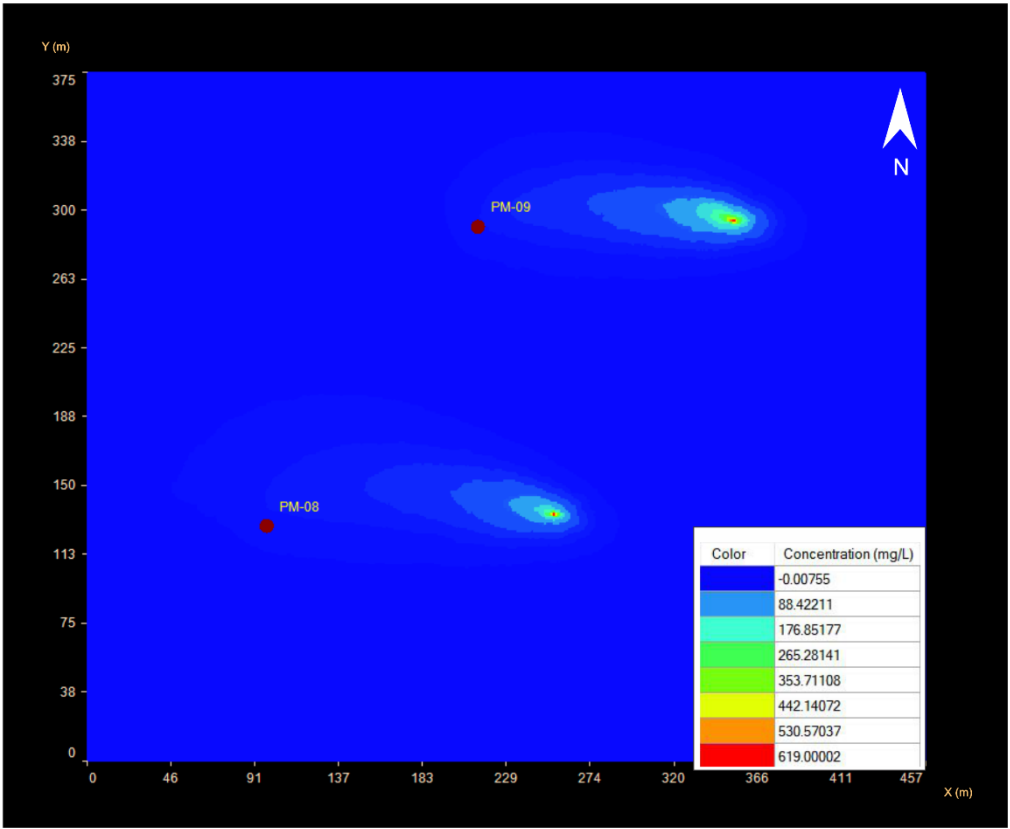
Cenário 23



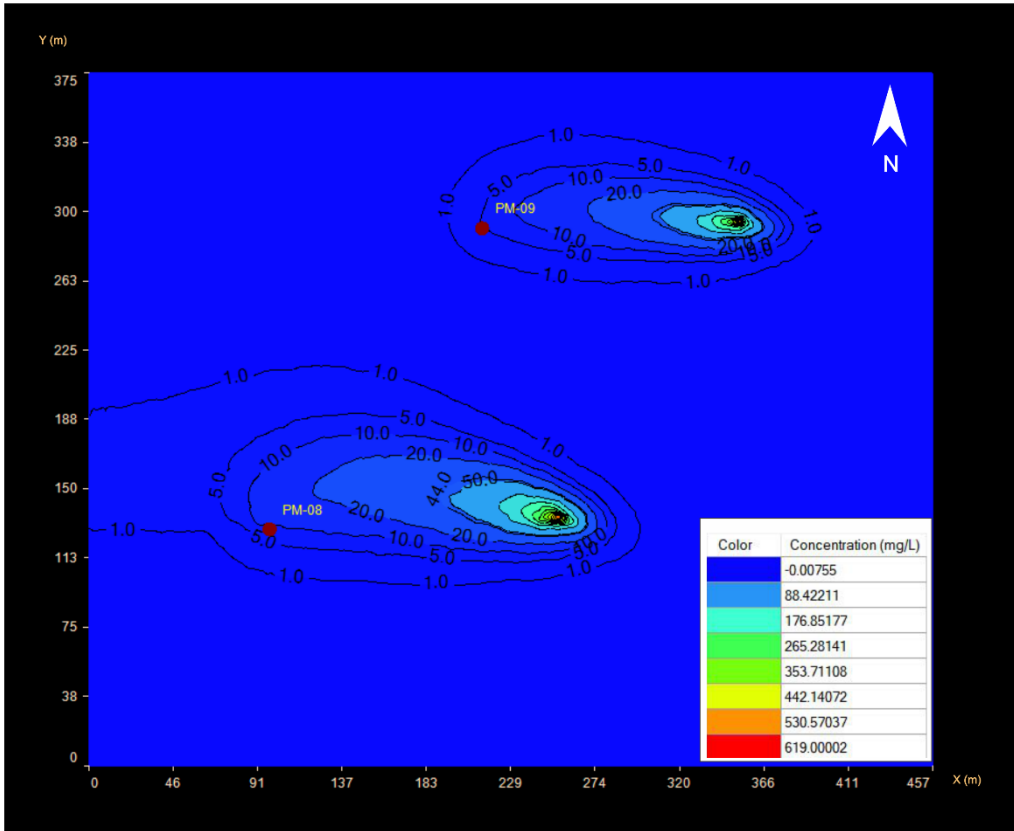
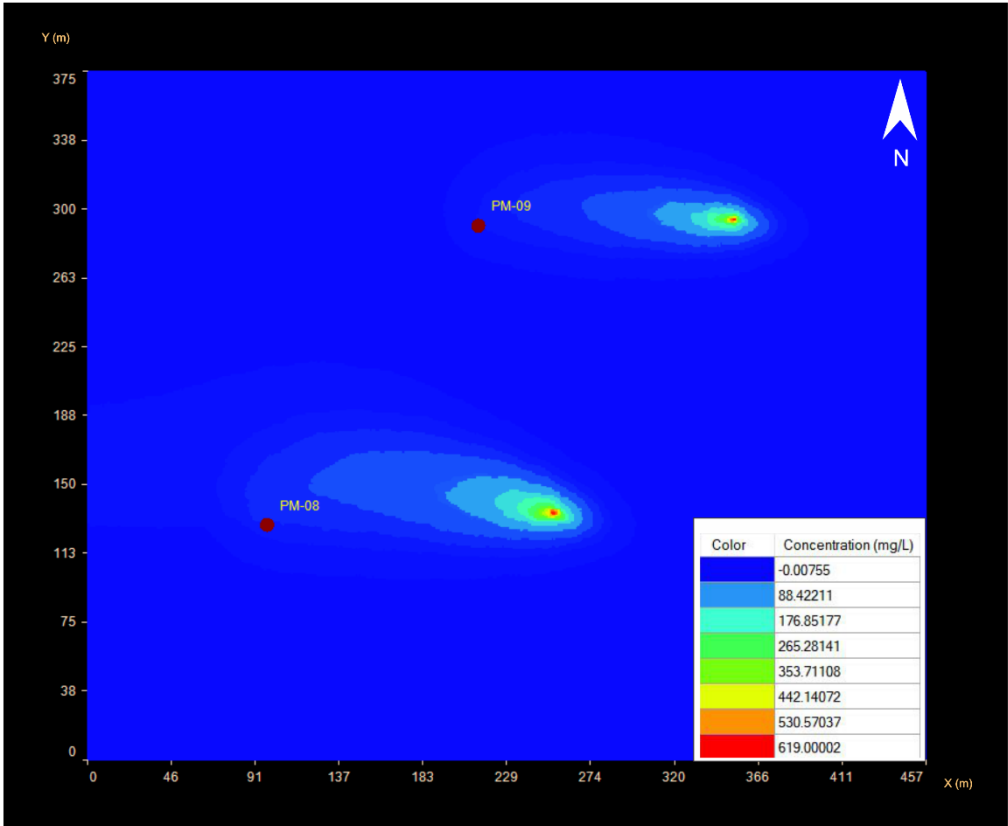
Cenário 24



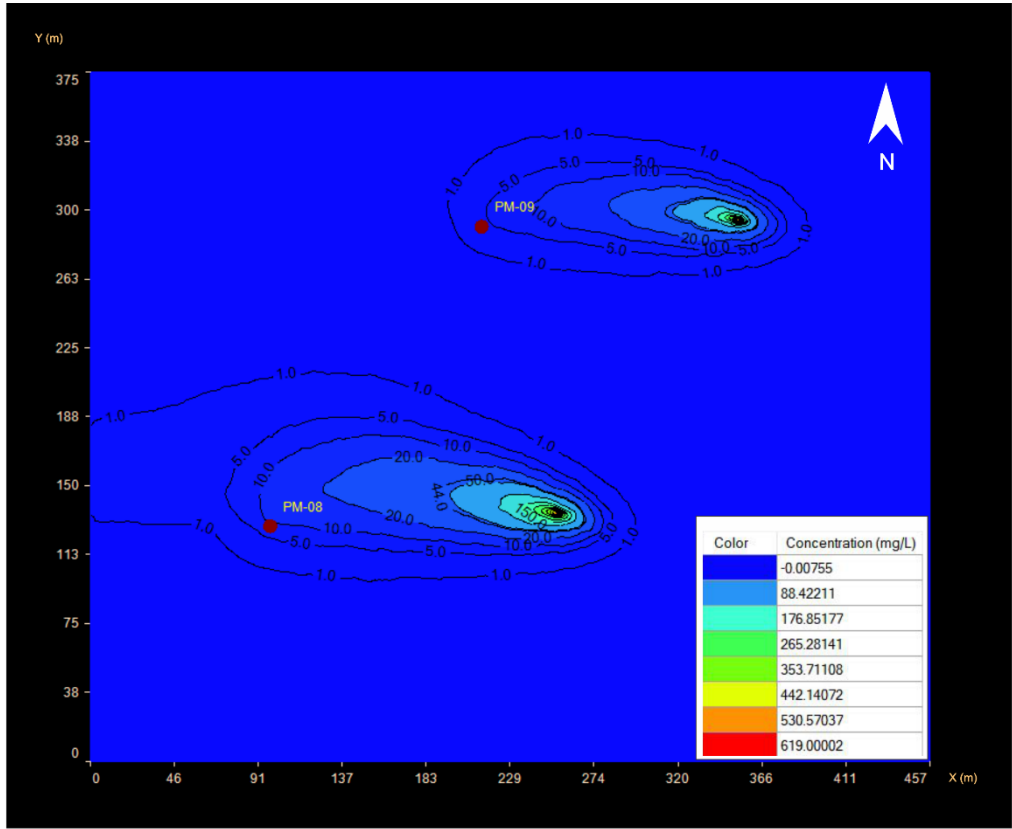
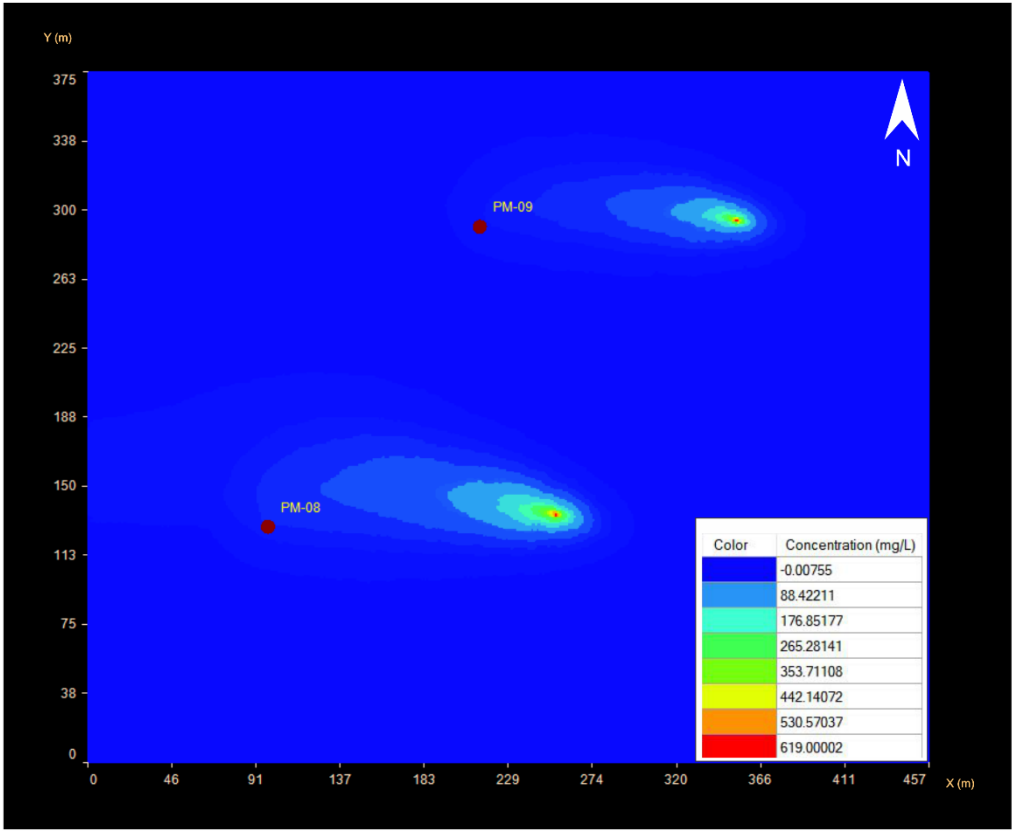
Cenário 25



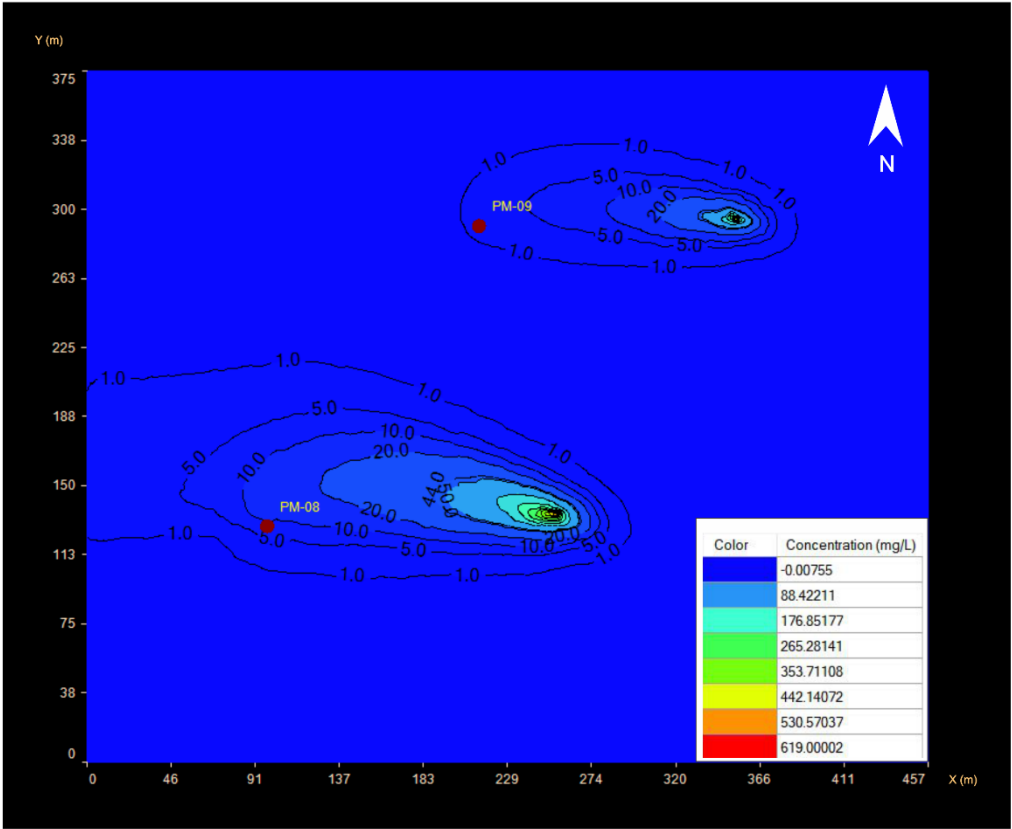
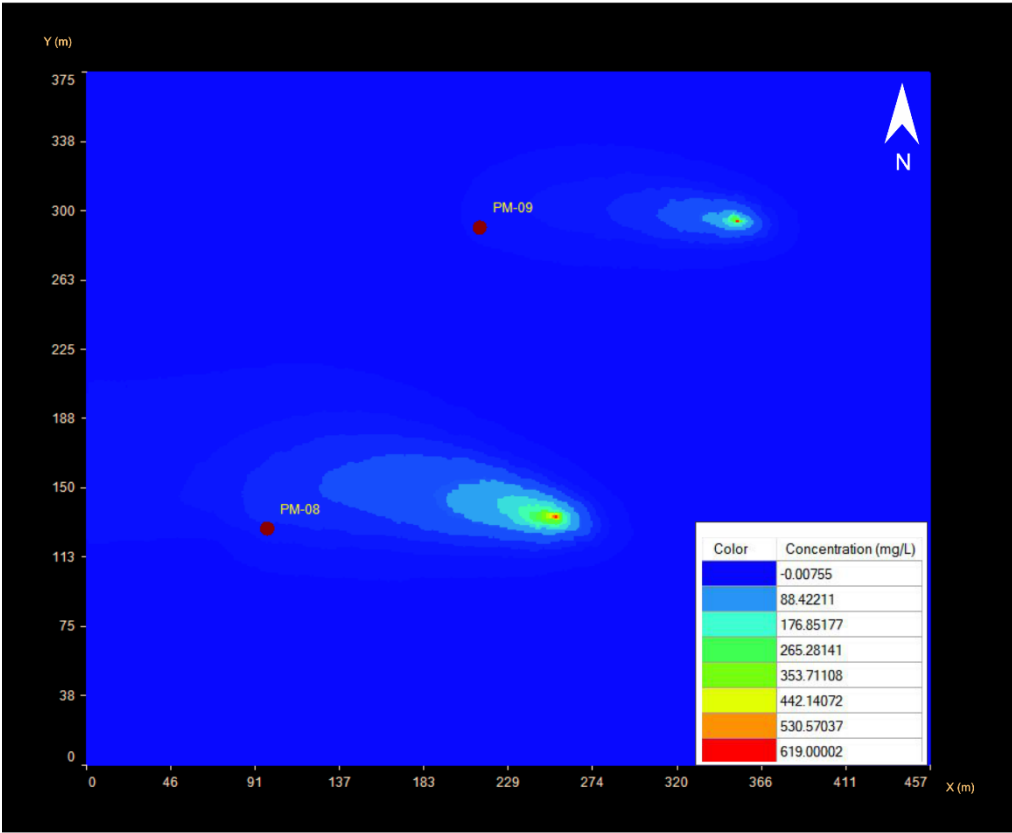
Cenário 26



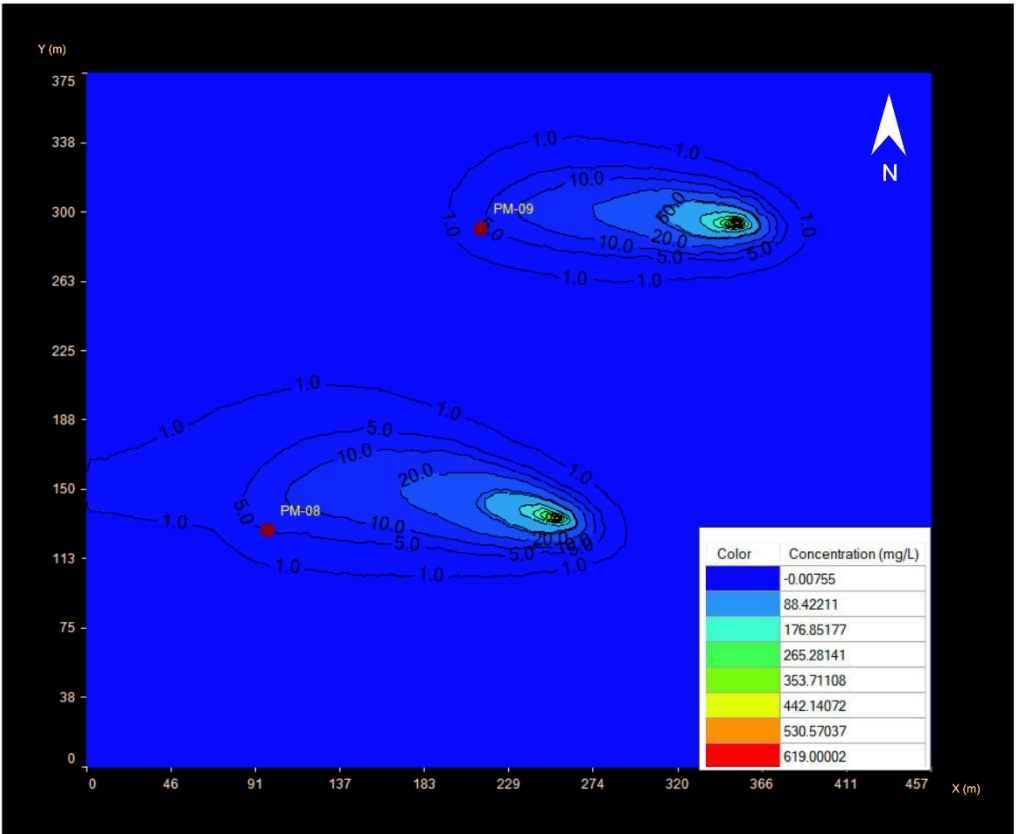
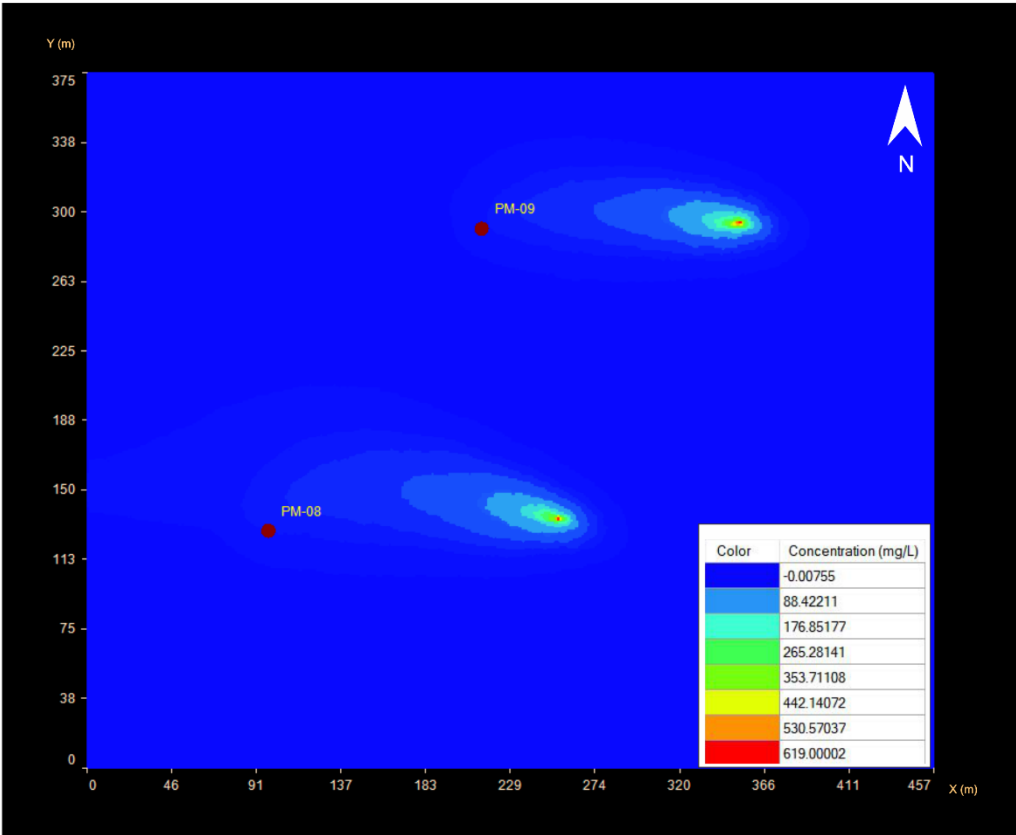
Cenário 27



Cenário 28



Cenário 29



Cenário 30

