

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

AMANDA BOTELHO CARDOSO

**ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL DE SÓLIDOS TOTAIS DISSOLVIDOS, NITRATO
E CLORETO TOTAL NO AQUÍFERO BAURU (2007-2009)**

**Ilha Solteira
2021**

AMANDA BOTELHO CARDOSO

**ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL DE SÓLIDOS TOTAIS DISSOLVIDOS, NITRATO
E CLORETO TOTAL NO AQUÍFERO BAURU (2007-2009)**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira –
Unesp como parte dos requisitos para
obtenção do título de Engenheira Civil.

Prof. Dr. César Gustavo da Rocha Lima
Orientador

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

C268a Cardoso, Amanda Botelho.
Análise espaço-temporal de sólidos totais dissolvidos, nitrato e cloreto total no Aquífero Bauru (2007-2009) / Amanda Botelho Cardoso. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2021
54 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil)-
Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2021

Orientador: César Gustavo da Rocha Lima
Inclui bibliografia

1. Geoestatística. 2. Águas subterrâneas . 3. Sólidos dissolvidos totais. 4. Cloreto . 5. Nitrato.

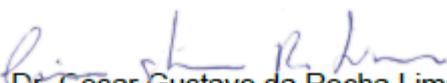

Raiane da Silva Santos

Aluno: AMANDA BOTELHO CARDOSO

Título: “ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL DE SÓLIDOS TOTAIS DISSOLVIDOS, NITRATO E CLORETO TOTAL NO AQUÍFERO BAURU (2007-2009)”.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado como parte dos requisitos para obtenção do grau de Engenheiro Civil, junto ao Curso de Graduação em Engenharia Civil, da Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de Ilha Solteira.

COMISSÃO EXAMINADORA


Prof. Dr. Cesar Gustavo da Rocha Lima

UNESP – Campus de Ilha Solteira (Orientador)



Prof. Dr. José Augusto de Lollo

UNESP – Campus de Ilha Solteira



Amanda de Moraes Ricardi

Mestre em Engenharia Civil - UNESP – Campus de Ilha Solteira

Ilha Solteira

22 de Julho de 2021

DEDICATÓRIA

Dedico à minha família pelo amor e suporte para dar o meu melhor e acreditar em mim mesma. E a Deus por me fortalecer todos os dias e por me guiar nesta jornada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à UNESP por disponibilizar um ensino de excelência para me formar como profissional e pelo suporte e dedicação dos professores e colaboradores da faculdade. À família que mesmo a distância se fazia presente e que me deu todo o suporte para que eu entrasse na universidade e chegasse até aqui, valorizando sempre o estudo e conhecimento como ferramenta de crescimento intelectual e humano. Aos amigos, que tornaram essa jornada mais leve e cheia de memórias incríveis, em especial às amigas das Rep Label, que se tornaram minhas irmãs e me acolheram em diversos momentos. Ao grupo PET – Engenharia Civil por contribuir de forma única em meu crescimento acadêmico e pessoal, em especial à professora Luzenira pela dedicação ao grupo e amizade sincera. Aos colegas de classe que sempre estiveram disponíveis para estudos em grupo. E ao professor César por compartilhar seus conhecimentos e pelo suporte no decorrer do estudo.

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”.

(Martin Luther King Jr.)

RESUMO

Por milênios, o desafio das civilizações era o manejo da água e uso de suas potencialidades, mas atualmente o grande desafio é a conservação e recuperação da quantidade e, principalmente, qualidade da água. Dados da Companhia Ambiental Paulista (CETESB) apontam que 39% dos municípios brasileiros são abastecidos por águas subterrâneas e 14% possuem sistemas de abastecimento misto. Ainda indica que o estado de São Paulo possui mais da metade de seus municípios abastecidos somente por águas subterrâneas. O Sistema Aquífero Bauru (SAB) é um dos sistemas mais utilizados para abastecimento no estado de São Paulo e, devido a sua formação característica subsuperficial, possui vulnerabilidade a contaminação por atividades agrícolas, esgotos sanitários, etc. A CETESB realiza o monitoramento do SAB através de poços de coleta, o qual fornece importantes informações do sistema, porém pontuais. Assim, para o monitoramento espaço-temporal a geoestatística é uma ferramenta que possibilita analisar a variabilidade e correlações entre diversos parâmetros. O presente estudo utilizou dados de 75 poços de monitoramento da CETESB, no triênio 2007-2009, e objetivou avaliar a variabilidade espacial e temporal das concentrações de sólidos dissolvidos totais (SDT), nitrato (N-NO₃) e cloreto (Cl⁻) no SAB. A avaliação dos dados consistiu na análise estatística descritiva, de correlação linear e semivariográfica e, por fim, a produção de mapas das estimativas de concentrações, por krigagem. Os resultados indicaram elevada correlação linear entre os parâmetros, principalmente entre o nitrato e o cloreto ($R^2 = 0,810$) e SDT e cloreto ($R^2 = 0,734$). E, pela geoestatística, bons resultados também foram observados, uma vez que todos os parâmetros apresentaram dependência espacial, independente do período analisado, visíveis pelos ajustes semivariográficos e mapas bem delineados da variabilidade espacial. Foram verificadas apenas as concentrações de nitrato acima do limite de potabilidade estabelecido pelo Ministério da Saúde – as quais corroboraram com trabalhos realizados anteriormente no SAB.

Palavras-chave: *águas subterrâneas, cloreto, geoestatística, nitrato, sólidos dissolvidos totais.*

ABSTRACT

For millennia, the challenge of civilizations was the management of water and the use of its potential, but currently the great challenge is the conservation and recovery of the quantity and, mainly, quality of water. Data from Companhia Ambiental Paulista (CETESB) shows that 39% of Brazilian municipalities are supplied by underground water and 14% have mixed supply systems. It also indicates that the state of São Paulo has more than half of its municipalities supplied only by groundwater. The Bauru Aquifer System (BAS) is one of the most used systems for water supply in the state of São Paulo and, due to its characteristic subsurface formation, it is vulnerable to contamination by agricultural activities, sanitary sewage, etc. CETESB monitors the BAS through collection wells, which provide important system information, however punctual. Thus for spatiotemporal monitoring, geostatistics is a tool that makes it possible to analyze the variability and correlations between different parameters. The present study used data from 75 CETESB monitoring wells, in the 2007-2009 triennium, and aimed to evaluate the spatial and temporal variability of the concentrations of total dissolved solids (TDS), nitrate (N-NO₃) and chloride (Cl⁻) in the BAS. Data evaluation consisted of descriptive statistical analysis, linear and semivariographic correlation and, finally, the production of maps of concentration estimates, by kriging. The results indicated a high linear correlation between the parameters, mainly between nitrate and chloride ($R^2 = 0.810$) and BAS and chloride ($R^2 = 0.734$). And, by geostatistics, good results were also observed, since all parameters showed spatial dependence, regardless of the period analyzed, visible by semivariographic adjustments and well-delineated maps of spatial variability. Only nitrate concentrations above the potability limit established by the Ministry of Health were verified – which corroborated with previous work carried out at the BAS.

Keywords: groundwater, chloride, geostatistics, nitrate, total dissolved solids.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição de água no planeta.....	16
Figura 2 – Distribuição espacial das vazões específicas do território brasileiro.....	17
Figura 3 - Mapa das Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo	20
Figura 4 - Tempo de circulação de água subterrânea.....	22
Figura 5 - Aquífero Bauru	22
Figura 6 - Uso e ocupação do solo do Estado de São Paulo	23
Figura 7 - Localização dos Pontos de Monitoramento	32
Figura 8 - Curva de regressão entre Nitrato e Cloreto no Sistema Aquífero Bauru...38	
Figura 9 - Curva de regressão entre SDT e Cloreto no Sistema Aquífero Bauru.39	
Figura 10 - Curva de regressão entre SDT e Nitrato no Sistema Aquífero Bauru.39	
Figura 11 – Semivariogramas ajustados para o SDT no Sistema Aquífero Bauru. ...42	
Figura 12 - Semivariogramas ajustados para o Nitrato no Sistema Aquífero Bauru. 43	
Figura 13 - Semivariogramas ajustados para o Cloreto no Sistema Aquífero Bauru.44	
Figura 14 – Mapa de Krigagem da concentração de SDT no Aquífero Bauru.....45	
Figura 15 – Mapa de Krigagem da concentração de Nitrato no Aquífero Bauru.46	
Figura 16 - Mapa de Krigagem da concentração de Cloreto no Aquífero Bauru.47	

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Padrão de aceitação para consumo humano.....	25
Tabela 2 - Análise estatística descritiva dos dados de SDT, Nitrato e Cloreto no Sistema Aquífero Bauru.	35
Tabela 3 – Matriz de correlação entre SDT, Nitrato e Cloreto no Sistema Aquífero Bauru.....	37
Tabela 4 – Parâmetros semivariográficos para SDT, Nitrato e Cloreto no Aquífero Bauru.....	40

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Recursos Hídricos no Brasil por região.	18
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

CNRH – Conselho Nacional de Recursos Hídricos

DAAE – Departamento de Águas e Energia Elétrica

IDH – Índice de desenvolvimento humano

NBR – Norma Brasileira

ONU – Organização das Nações Unidas

SAB – Sistema Aquífero Bauru

SDT – Sólidos Dissolvidos Totais

VC – Validação Cruzada

VMP – Valor máximo permitido

UNESCO – Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1. A universalidade da água	13
2.2. Distribuição de água no planeta	15
2.3. Águas subterrâneas: potencialidades e riscos	19
2.4. Parâmetros de qualidade da água	24
2.5. Geoestatística.....	26
2.6. Trabalhos Correlatos	28
3. OBJETIVO	31
4. MATERIAIS E MÉTODOS	32
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
6. CONCLUSÃO	49
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50

1. INTRODUÇÃO

Quando se pensa em recursos hídricos, a princípio se fala dos recursos mais visíveis como os rios, lagos, lagoas e oceanos. Entretanto, as maiores reservas de água doce exploráveis do planeta são subterrâneas. Nesse sentido, se faz necessário que a preservação das águas subterrâneas seja abordada de forma minuciosamente técnica, com o apoio de processos científicos e políticos, respeitando sempre as peculiaridades de cada região e visando o seu uso ambientalmente sustentável.

Segundo dados da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2007), aproximadamente 16% dos domicílios brasileiros utilizam exclusivamente água subterrânea e 77,8% usam rede de abastecimento de água, das quais uma parte significativa é alimentada por água subterrânea. Porém, esse valor vem aumentando e, por outro lado, apresenta uma configuração diferente em cada Estado e Região do país. Por exemplo, só no Estado de São Paulo, 71,6% das cidades são abastecidas, total ou parcialmente, por fontes subterrâneas (ANA, 2007).

Neste contexto, o Aquífero Bauru representa uma das principais fontes de abastecimento humano no Estado de São Paulo, tendo em vista a sua grande extensão e a quantidade de cidades que ele abastece.

Este crescente uso fez com que o Aquífero Bauru tenha sido objeto de estudo de vários pesquisadores, os quais tem demonstrado grande preocupação com seu estado de conservação. Considerando a sua formação geológica e as atividades antrópicas que ocorrem em sua região de formação, o SAB está mais vulnerável a ações antrópicas e contaminação.

Conforme é reconhecido na Resolução CONAMA nº 396/2008, uma vez que o aquífero é contaminado, sua recuperação é lenta e onerosa. Dessa forma é necessário que sua exploração e dados quantitativos e qualitativos sejam monitorados constantemente para garantir que, se necessário, áreas de proteção e outras medidas sejam definidas a tempo.

Para o monitoramento do SAB, a CETESB atualmente conta com dados de aproximadamente 75 poços tubulares profundos. Tais poços de captação de águas subterrâneas possibilitam a coleta de amostras de água e, a partir daí, conhecer toda composição físico-química e a qualidade da água em determinado

ponto do aquífero.

Porém, apenas os dados fornecidos por tais poços não permitem o entendimento e a visualização espacial dos parâmetros de qualidade da água e, conseqüentemente, não permite que medidas de proteção sejam tomadas assertivamente.

Nesse sentido, a geoestatística se apresenta como uma ferramenta interessante que vem sendo aplicada em diversos trabalhos ambientais e que permite mapear a distribuição espaço-temporal dos parâmetros para, então, conhecer-se melhor as condições de preservação do Aquífero Bauru.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. A universalidade da água

A água fez e faz parte de toda a história de evolução da humanidade, tendo importância desde a nutrição humana até o desenvolvimento de tecnologias. Segundo Coelho e Havens (2015), a água foi matéria prima para as grandes revoluções tecnológicas da humanidade, como a Revolução Agrícola e a Revolução Industrial. No decorrer dessas revoluções e durante o desenvolvimento da humanidade, a água tornou-se protagonista em temas relacionados à saúde, transporte, tecnologias e grandes obras, além de energia e lazer, tornando-se um elemento estratégico economicamente.

Segundo a Declaração Universal dos Direitos da Água, “o direito à água é um dos direitos fundamentais do ser humano: o direito à vida, tal qual é estipulado no artigo 30 da Declaração Universal dos Direitos do Homem” (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2000).

Nesse contexto, segundo o relatório da Conferência Pan-Americana de Saúde e Ambiente no Desenvolvimento Humano Sustentável (COPASAD),

“[...] atualmente cerca de 30% da população brasileira abastece-se de água proveniente de fontes inseguras, sendo que boa parte daqueles atendidos por rede pública nem sempre recebe água com qualidade adequada e em quantidade suficiente.” (COPASAD, 1995).

A Lei nº 9.433/1997 (BRASIL, 1997), também conhecida como Lei das Águas, determina seis fundamentos para a Política Nacional de Recursos Hídricos. Onde a água é considerada um bem de domínio público e um recurso natural limitado, dotado de valor econômico.

A Lei das águas (Lei nº 9.433/1997) (BRASIL, 1997) também institui que a gestão dos recursos hídricos deve proporcionar os usos múltiplos das águas, de forma descentralizada e participativa, contando com a participação do Poder Público, dos usuários e das comunidades. Por fim, a lei também determina, entre as diretrizes gerais, a gestão sistemática dos recursos hídricos, sem dissociação dos aspectos de quantidade e qualidade.

Segundo Libânio *et al.* (2005), a disponibilidade de água não deve ser a principal variável para avaliar o bem-estar social e o desenvolvimento de um país, os quais possuem melhor correlação com serviços essenciais a população, tais como serviços de abastecimento de água e esgotamento sanitário. Segundo este autor, os dados quantitativos dizem respeito à potencialidade, mas não abrangem o conceito de disponibilidade, o qual impõe requisitos de qualidade e quantidade e está susceptível a ações antrópicas.

Ao se avaliar o bem-estar social, utiliza-se o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH), que abrange três dimensões básicas de desenvolvimento humano: educação, renda e longevidade. Esta última é um indicador de saúde e está correlacionado as condições de saneamento (LIBÂNIO *et al.*, 2005).

Outra questão, ao se tratar de consumo de água, é o uso da expressão “*Virtual Water*” a qual diz respeito ao volume da água que está embutido na fabricação de certos produtos, especialmente as commodities agrícolas. Sua complexidade está na estimativa do volume de água, a qual considera toda a cadeia de produção e envolve o conceito de “pegada ecológica” (CARMO *et al.*, 2007). Nesse contexto, Coelho e Havens (2015) afirmam que um país como o Brasil que exporta commodities minerais e agrícolas é, acima de tudo, um grande exportador de água.

Segundo Hoekstra (2003), a decisão por importar certo produto não é apenas uma decisão política e econômica, pois ao avaliar-se o consumo de água utilizado em sua fabricação, tal decisão também se torna uma alternativa para a gestão de recursos hídricos. Logo, ocorre a redução do déficit hídrico nos países importadores, uma vez que um volume de água equivalente deixa de ser suprido localmente e torna-se disponível para outras necessidades. Coelho e Havens (2015) exemplificam países que enfrentam escassez de água como o Egito, a Espanha e a Itália, os quais já estão optando por um modelo econômico que implica em menores gastos de água.

Portanto, ao se tratar de monitoramento dos recursos hídricos e desenvolvimento humano, a simples razão recurso/população não é a única variável a ser considerada (LIBÂNIO *et al.*, 2005). Logo, a qualidade de água e o comércio

de água virtual também são fatores a serem considerados e explicitam a complexidade da “disponibilidade hídrica”.

Coelho e Havens (2015) ainda defendem que ao contrário das antigas civilizações, as quais buscavam dominar a água, o atual desafio é a conservação e recuperação da quantidade e, principalmente, qualidade da água, a fim de se garantir o direito fundamental de seu acesso às futuras gerações. Nesse sentido, temos que a manutenção dos recursos hídricos, envolve questões políticas, econômicas, ambientais e sociais.

2.2. Distribuição de água no planeta

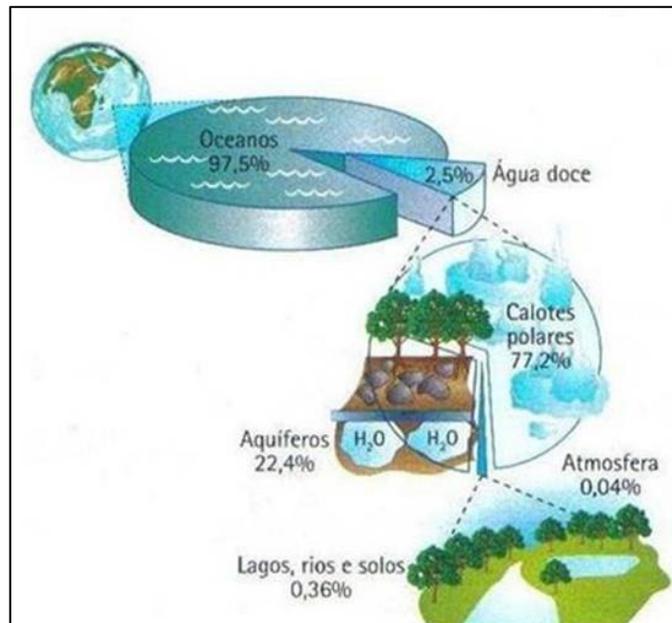
De acordo com Villela e Mattos (1975), o ciclo hidrológico é definido pela circulação da água presente nos oceanos, continentes e atmosfera de forma aleatória, tal circulação é alimentada pela força da gravidade e pelas energias solar e eólica. Dessa forma, analisando o ciclo hidrológico global como um sistema fechado, o volume total de água na Terra não aumenta nem diminui.

Aproximadamente, 70% da superfície da Terra são cobertos por água, o que é equivalente a um volume de quase 1,5 milhão de quilômetros cúbicos (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2009). Entretanto, as águas não estão distribuídas de forma uniforme no Planeta. Cerca de 97,5% de toda água que disponível está nos mares, enquanto que apenas 2,5% são águas doces, de acordo com o Ministério do Meio Ambiente (2000).

A grande maioria das reservas de águas doces são quase inexploráveis e estão armazenadas sob a forma de geleiras que aprisionam 68,7% de toda a água doce disponível. Além disso, outra parcela significativa (30,9%) das águas doces está nos aquíferos e nos solos congelados das florestas boreais (permafrost) (COELHO e HAVENS, 2015).

Na figura 1, é possível visualizar um esboço da distribuição de água no planeta. Observa-se que a maior parte da água doce é inexplorável, presente em calotas polares, ou de difícil acesso, como em aquíferos.

Figura 1 - Distribuição de água no planeta.



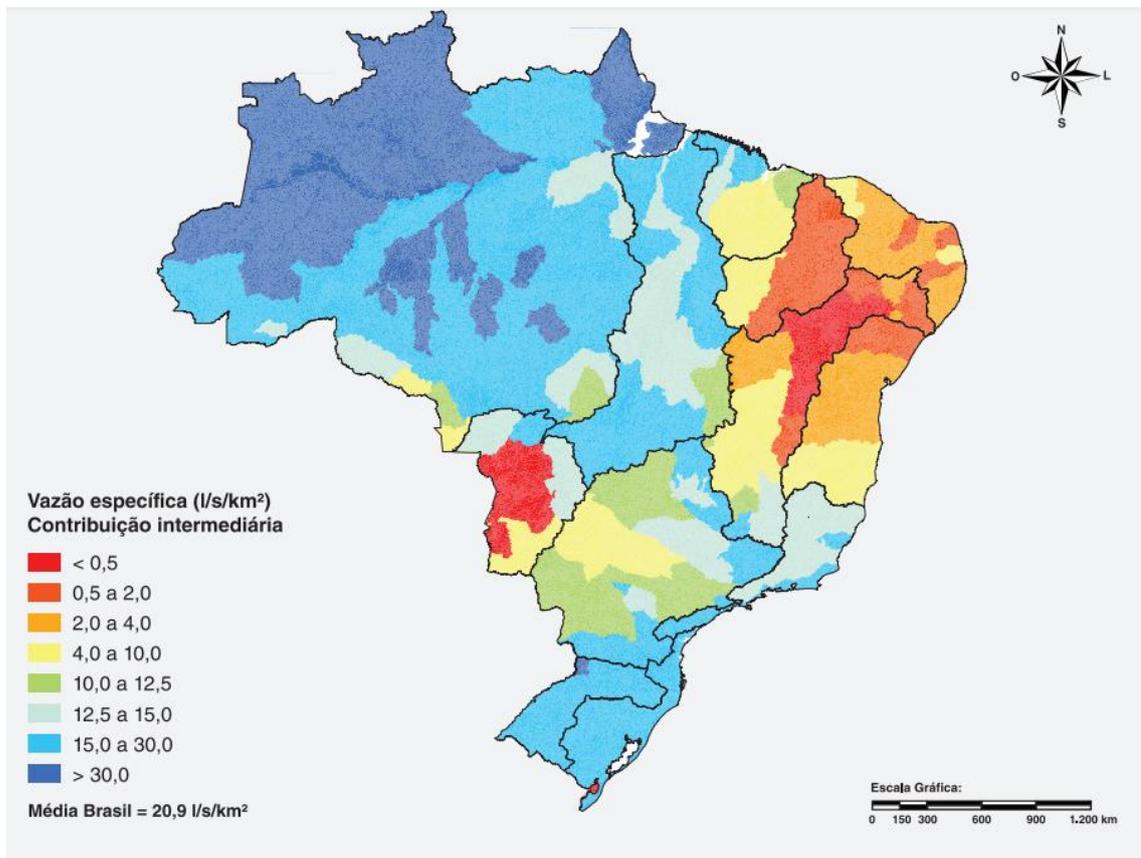
Fonte: Falkenmark; Lean & Hinrichsen (1994).

Segundo o Programa Hidrológico Internacional da Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (Unesco), na América do Sul encontra-se 26% do total de água doce disponível no planeta e apenas 6% da população mundial, enquanto o continente asiático possui 36% do total de água e abriga 60% da população mundial (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2009).

De acordo com o Ministério do Meio Ambiente (2009), o Brasil possui uma das maiores disponibilidades hídricas de água doce do mundo, sendo um país privilegiado, pois abriga 13,7% da água doce do mundo. Entretanto, tais recursos não estão distribuídos uniformemente. O Ministério do Meio Ambiente (2009) também afirma que mais de 73% da água doce disponível no país encontra-se na bacia Amazônica, que é habitada por menos de 5% da população. De acordo com Lima (1999), citado pelo Ministério do Meio Ambiente (2009), apenas 27% dos recursos hídricos brasileiros estão disponíveis para as demais regiões, onde residem 95% da população do país.

A figura 2 abaixo apresenta a distribuição espacial das vazões específicas do território brasileiro, dividindo-o pelas suas principais regiões hidrográficas. O Aquífero Bauru está localizado na região da bacia do Paraná, a qual engloba estados como São Paulo, Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso do Sul e Paraná.

Figura 2 – Distribuição espacial das vazões específicas do território brasileiro.

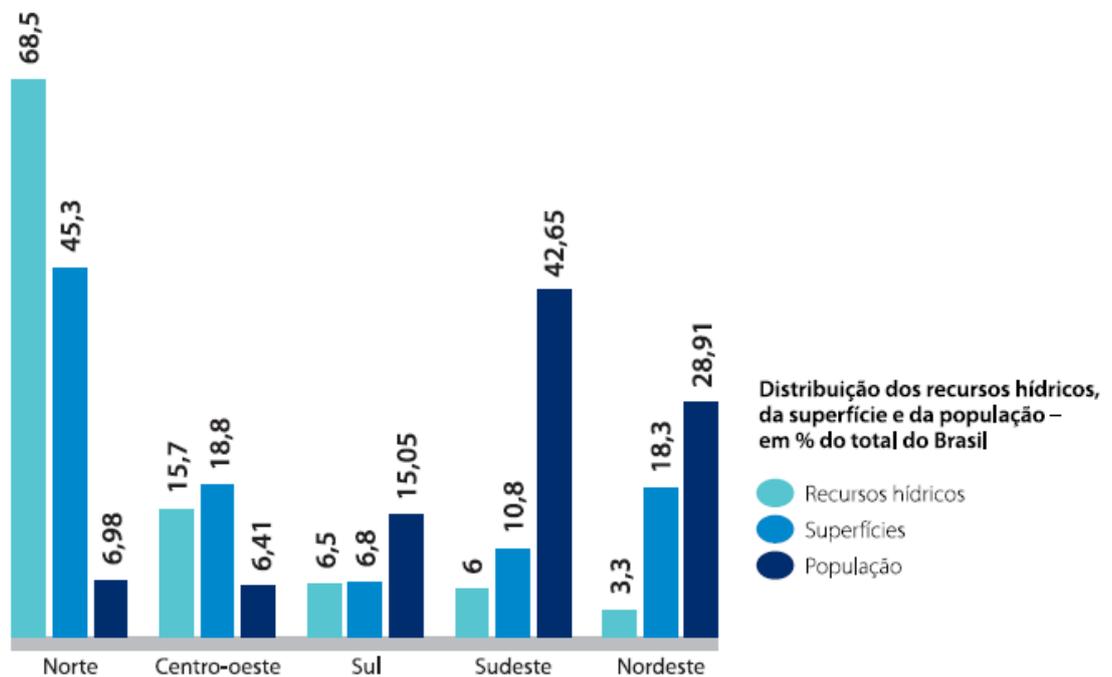


Fonte: ANA, 2009.

É possível observar através da figura acima que o Brasil possui uma grande reserva de água doce em termos mundiais. Entretanto, sua distribuição é bastante heterogênea, com regiões de bastante disponibilidade hídrica e regiões de escassez, como a Região Amazônica e a do semiárido brasileiro, respectivamente.

Os dados presentes no gráfico 1 apresentam a distribuição de água no Brasil por regiões e a densidade demográfica de cada uma delas. Logo, é possível observar o que os autores citados anteriormente afirmam, isto é, as regiões mais habitadas são as que possuem menor disponibilidade hídrica.

Gráfico 1 - Recursos Hídricos no Brasil por região.



Fonte: Brasil, 2009.

Nesse contexto, já existem inúmeras áreas caracterizadas por déficit na oferta de água no Brasil. Por exemplo, as duas maiores cidades do país, São Paulo e Rio de Janeiro, já sofrem com limitações severas na oferta de água (COELHO e HAVENS, 2015).

Segundo Coelho e Havens (2015), atualmente, na maioria dos países da Europa, do oriente próximo, Ásia Central, no México e na Austrália há também uma considerável limitação na disponibilidade.

Em média, a quantidade mínima que uma pessoa necessita por dia é 40 litros de água. Entretanto, o consumo diário de água varia de acordo com a disponibilidade do local, com nível de desenvolvimento do país e com o nível de renda das pessoas (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2009). Dados da Organização das Nações Unidas indicam algumas discrepâncias mundiais, por exemplo, um europeu que tem em seu território 8% da água doce no mundo, consome em média 150 litros de água por dia, ao passo que um indiano consome 25 litros por dia.

Segundo estimativas da UNESCO, se continuarmos com o ritmo atual de crescimento demográfico e não estabelecermos um consumo sustentável da água, em 2025 o consumo humano pode chegar a 90%, restando apenas 10% para os outros seres vivos do planeta (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2009).

Dessa forma, apesar de todo o crescimento socioeconômico que ocorre em todo o planeta, as pressões que esse desenvolvimento gera sobre o meio ambiente apontam para diversos riscos à humanidade. Isso significa, aumento de condições extremas e diminuição da disponibilidade de água de qualidade. Assim, Jacobi e Grandisoli (2017) defendem a promoção da sustentabilidade levando em conta, pelo menos, três eixos: a realidade dos limites ecológicos da Terra, a promoção da justiça social e a viabilidade política.

2.3. Águas subterrâneas: potencialidades e riscos

De acordo com Rebouças *et al.* (2002), um aquífero pode ser definido como sendo uma formação geológica existente em subsuperfície, constituída essencialmente por rochas permeáveis, cujos poros, fraturas ou falhas são preenchidos por água ou outro fluido que permita a transmissão.

Á água subterrânea está intimamente ligada à água superficial, uma vez que sua ocorrência vem da precipitação e infiltração (CLEARY, 1989). Além disso, a água subterrânea contribui para a vazão de rios e, portanto, possui papel fundamental no ciclo hidrológico.

Como exemplo, cita-se a formação Bauru que, em geral, tem a função de reservatório regulador do escoamento da rede fluvial formada pelos rios Paranapanema, Tietê, Grande e Paraná, além das malhas de afluentes na área de afloramento do aquífero (CETESB, 2007).

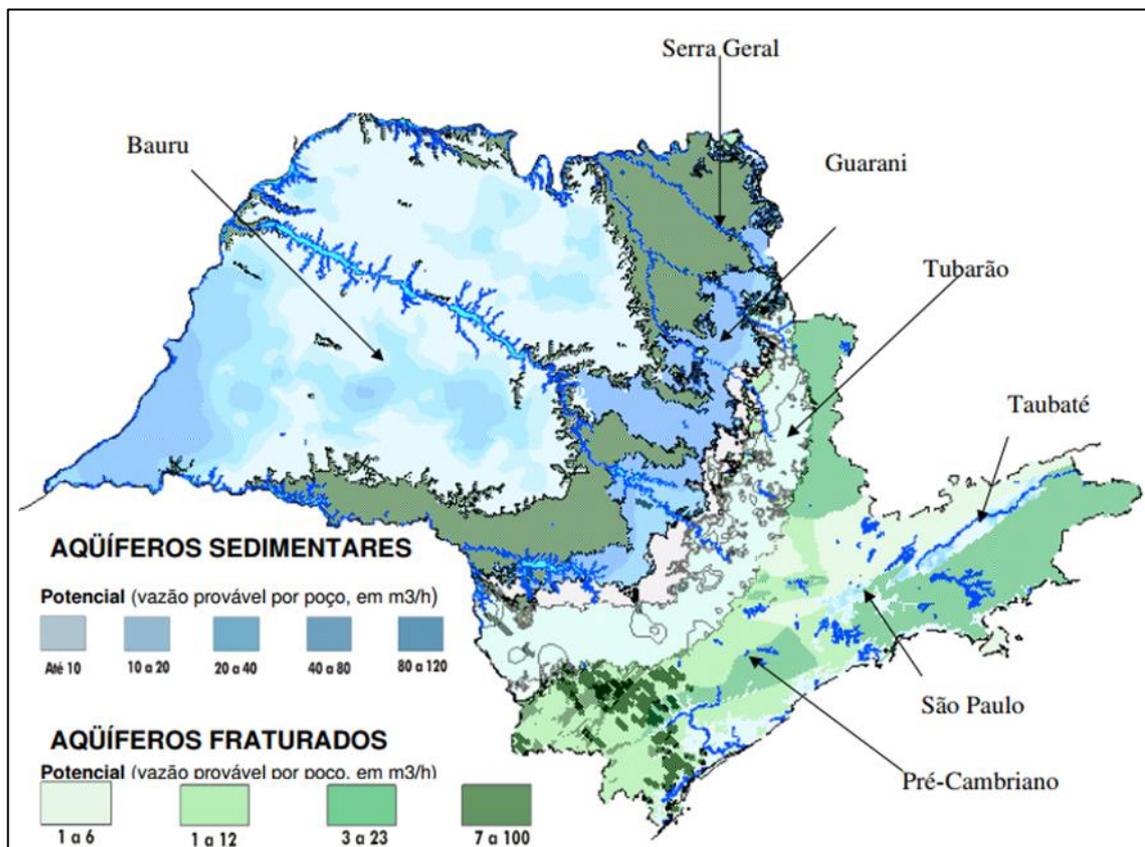
De acordo com ANA (2010), considerando todos os diferentes tipos de domínios no Brasil, as reservas renováveis de águas subterrâneas no País atingem cerca de 42,3 mil m³/s, ou 24% do escoamento médio dos rios em território nacional e 46% da disponibilidade hídrica superficial.

O aquífero Bauru faz parte do domínio poroso, o qual detém aquíferos expressivos em termos de produtividade (ANA, 2010). Dados da CETESB (2007)

indicam que no Estado de São Paulo, o aquífero Bauru ocupa aproximadamente 42% da área do Estado, com uma espessura média de 75m, chegando até 300m no planalto Residual de Marília.

A figura 3 apresenta o mapa das águas subterrâneas do Estado de São Paulo, na qual o Sistema Aquífero Bauru se destaca por atingir quase metade do território do Estado.

Figura 3 - Mapa das Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo.



Fonte: CETESB (2007).

Além de ser menos vulnerável às flutuações pluviométricas, a água subterrânea, em sua maioria, possui um alto padrão de qualidade, uma vez que durante o processo de infiltração o solo retém grande parte das impurezas. Esse processo natural simplifica o tratamento necessário para adequação aos padrões de potabilidade, o que justifica o seu crescente uso para abastecimento humano.

Nesse contexto, segundo dados da CETESB (2007), 39% dos municípios brasileiros são abastecidos por águas subterrâneas e 14% possuem sistemas de abastecimento misto. E, ainda de acordo com a CETESB (2007), em São Paulo, no

Paraná e no Rio Grande do Sul, mais da metade dos municípios são abastecidas somente por águas subterrâneas. Além disso, há vários outros estados que seguem um padrão semelhante a este, devido à existência de aquíferos com elevado potencial hídrico.

Entretanto, é importante considerar que existem considerações a serem feitas para a exploração racional destes mananciais subterrâneos. A Resolução nº 22 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos – CNRH (BRASIL, 2002) estabelece que:

“Os Planos de Recursos Hídricos devem promover a caracterização dos aquíferos e definir as inter-relações de cada aquífero com os demais corpos hídricos superficiais e subterrâneos e com o meio ambiente, visando a gestão sistêmica, integrada e participativa das águas.”

Segundo Cleary (1989), uma alta velocidade para água subterrânea está na ordem de 1 m/dia, enquanto que para um rio rápido tem-se uma velocidade na ordem de 1 m/s. Esse fato evidencia que a recarga de um aquífero é muito menor que a de um rio, o que significa um alto tempo de residência da água e uma menor vulnerabilidade a estímulos. Entretanto, em caso de contaminação, isto significa maior dificuldade de recuperação.

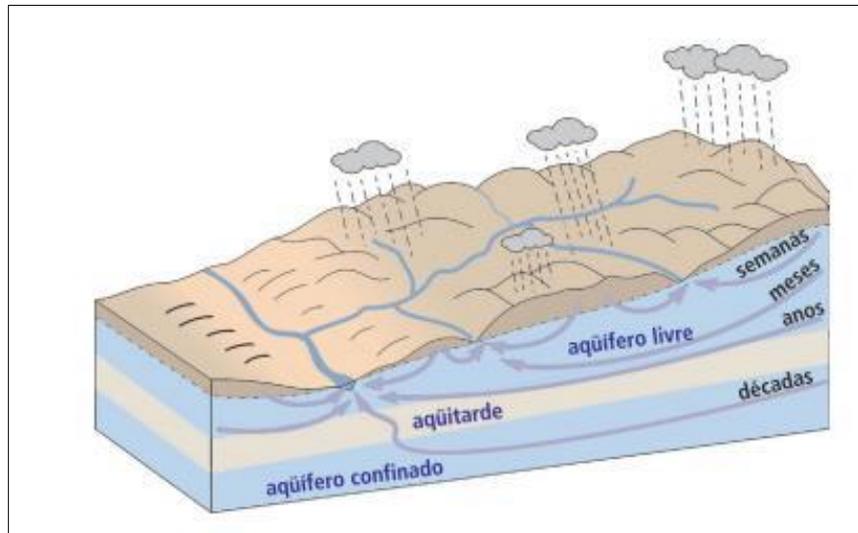
O potencial de poluição da água subterrânea depende de diversos fatores como quantidade e forma de lançamento do poluente no solo, além de características do próprio aquífero como tipologia (livre a confinado), profundidade do nível d'água e características dos estratos acima da zona saturada (argila a cascalho) (CETESB, 2007).

No caso do Aquífero Bauru, a reposição de suas águas ocorre em toda a sua extensão devido ao seu comportamento de aquífero livre, o que faz com o que a perfuração de poços seja facilitada. Entretanto, os aquíferos com tais características recebem recarga direta das águas que caem no solo e infiltram, em subsuperfície, tornando-o vulnerável à contaminação por poluentes (IRITANI e EZAKI, 2012).

Abaixo, por meio da figura 4, é possível ver o tempo de circulação de água subterrânea de acordo com o tipo de formação geológica subterrânea. Portanto, um aquífero livre possui uma recarga mais rápida que um aquífero confinado. E, em seguida, temos a

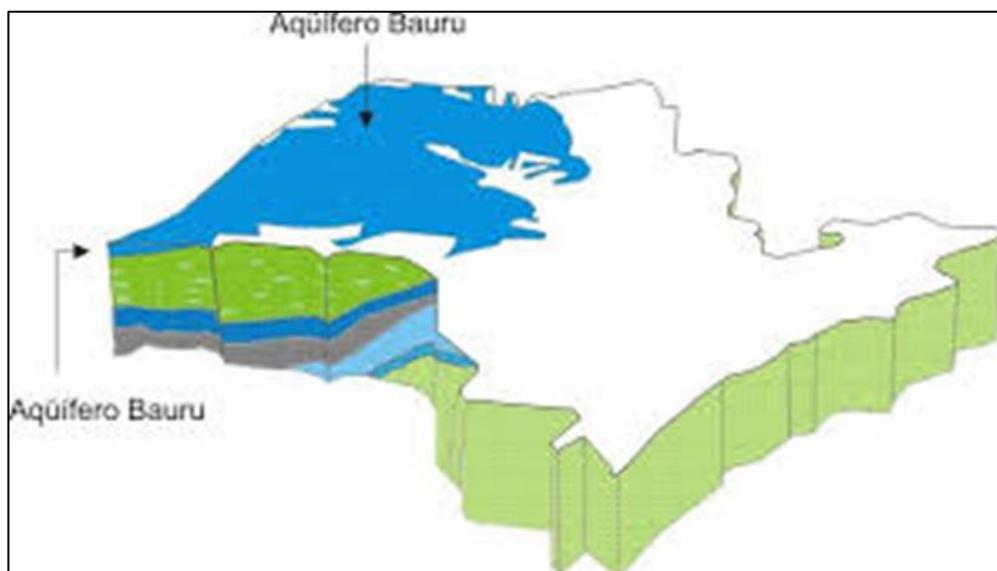
figura 5, complementando, então, que o Aquífero Bauru possui um comportamento livre, com tempo de circulação de água que varia de semanas a anos.

Figura 4 - Tempo de circulação de água subterrânea.



Fonte: Iritani e Ezaki (2012).

Figura 5 - Aquífero Bauru.



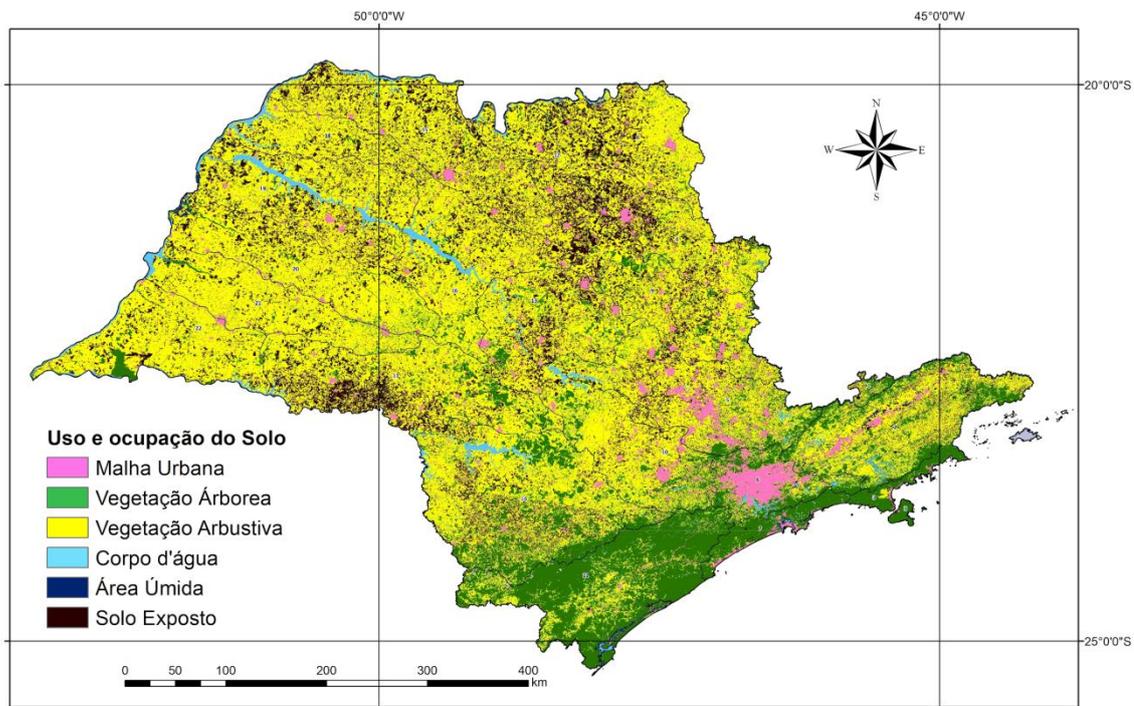
Fonte: Iritani & Ezaki (2008).

Dessa forma, o aquífero Bauru por ser mais extenso superficialmente e vulnerável, apresenta tendência de aumento nas concentrações de nitrato verificadas em poços tubulares, uma vez que sendo um aquífero freático, a recarga é feita diretamente pela precipitação pluvial, a qual carrega consigo o nitrato

presente no solo. O nitrato é um indicador de poluição difusa subterrânea e sua origem está relacionada a atividades agrícolas e esgotos sanitários (CETESB, 2007)

Diante desta vulnerabilidade do aquífero, a preservação das águas subterrâneas, principalmente de aquíferos com as mesmas características que o SAB, deve estar associada ao estudo de uso e ocupação do solo (FABIANOVICZ E SILVA JÚNIOR, 2007). No caso do Aquífero Bauru, por exemplo, o uso predominante do solo é para a agropecuária, conforme figura 6 a seguir, a qual indica a vegetação arbustiva como principal tipo de uso do solo nesta região, com bastante pontos de solo exposto.

Figura 6 - Uso e ocupação do solo do Estado de São Paulo



Fonte: Mapbiomas (2019).

Infelizmente, no Brasil ainda não existe uma legislação federal específica em relação à poluição de água subterrânea (CLEARLY, 1989). E, até hoje, a legislação não revelou grandes evoluções. Segundo Pontes et al. (2007), apesar de ser possível identificar alguns avanços em relação às normas, os resultados ainda são bastante incipientes. Fabianovicz e Silva Júnior (2007), também demonstram uma preocupação em relação à legislação aplicada às águas subterrâneas, defendendo ainda a urgência de realização de estudos detalhados sobre aquíferos para a

obtenção de informações mais completas, as quais serão base para definição de políticas públicas e dos planos de gerenciamento que tratam do tema.

Nesse contexto, a Constituição Federal de 1988 disciplinou que as águas subterrâneas são tidas como bens dos Estados, para que estes a gerenciem por meio de instrumentos legais. Entretanto, até hoje, apenas o Distrito Federal e 11 Estados promulgaram leis sobre este assunto (OLIVEIRA e FERNANDES, 2018).

2.4. Parâmetros de qualidade da água

A qualidade da água é definida como o resultado do conjunto de características físicas, químicas, biológicas e organolépticas, cujo padrão deve estar relacionado com o seu uso para um fim específico (ABNT/NBR 9896/1993) (CETESB, 2007).

Segundo o Ministério da Saúde (2006), em muitos locais do país não há equipes capazes de realizar o monitoramento de qualidade da água, do manancial ao sistema de distribuição, como também possuem dificuldades em cumprir as exigências da Portaria nº36/1990 do Ministério da Saúde.

As características físicas, químicas e biológicas da água no corpo hídrico estão associadas a uma série de processos que são condicionados por duas características intrínsecas do corpo hídrico: capacidade de dissolução e capacidade de transporte (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2006).

Segundo a CETESB (2007), quando se trata de água subterrânea, esta tende a aumentar as concentrações de substâncias dissolvidas à medida que percola as diferentes formações geológicas. Além disso, outras condições como clima, composição da água de recarga e tempo de contato entre a água e o meio físico influenciam nas concentrações de cada substância (CETESB, 2007).

Os padrões de qualidade da água se diferem quanto a sua finalidade de consumo. Este pode ser abastecimento humano, uso industrial, irrigação, geração de energia, aquicultura, recreação, paisagismo, entre outros. E, ainda, o controle de qualidade da água nos mananciais também tem importância para a preservação da fauna e da flora local, uma vez que estes também dependem de tais fontes.

No contexto de uso industrial, a água pode ser tanto matéria-prima, incorporada ao produto final, como fazer parte de qualquer etapa no processo de produção – como fluido de aquecimento e/ou refrigeração, processos de limpeza. No caso de indústrias alimentícias e farmacêuticas, por exemplo, a água deve ter um elevado grau de pureza e seus padrões de qualidade podem ser mais restritivos que os padrões para consumo humano (MIERZWA e HESPANHOL, 2005).

Para uso em irrigação, os padrões de qualidade variam de acordo com o tipo de cultura, dessa forma, para culturas ingeridas cruas, é preciso que a água tenha um alto grau de qualidade, e no caso de plantas arbóreas, ou alimentos consumidos descascados ou cozidos, os padrões de qualidade são menos restritivos, mas ainda devem garantir a saúde do consumidor (MIERZWA e HESPANHOL, 2005).

Em relação aos padrões de qualidade para consumo humano, a Portaria nº 518/2004 “Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências”. Dessa forma, a tabela 1 a seguir apresenta o padrão de aceitação para consumo humano exigido por esta portaria.

Tabela 1 - Padrão de aceitação para consumo humano.

Parâmetro	Unidade	VMP⁽¹⁾
Alumínio	mg/L	0,2
Amônia (como NH ₃)	mg/L	1,5
Cloreto	mg/L	250
Cor Aparente	uH ⁽²⁾	15
Dureza	mg/L	500
Etilbenzeno	mg/L	0,2
Ferro	mg/L	0,3
Manganês	mg/L	0,1
Monoclorobenzeno	mg/L	0,12
Odor	-	Não Objetável ⁽³⁾
Gosto	-	Não Objetável ⁽³⁾
Sódio	mg/L	200
Sólidos Dissolvidos Totais	mg/L	1000
Sulfato	mg/L	250
Sulfeto de Hidrogênio	mg/L	0,05
Surfactantes	mg/L	0,5
Tolueno	mg/L	0,17
Turbidez	UT ⁽⁴⁾	5
Zinco	mg/L	5
Xileno	mg/L	0,3

Fonte: BRASIL, 2004.

Notas: (1) Valor Máximo Permitido.
(2) Unidade Hazen (mg Pt-Co/L).

(3) Critério de referência.
(4) Unidade de turbidez.

Em relação aos parâmetros acima, este trabalho avalia especificamente as concentrações de cloreto, nitrato e sólidos dissolvidos totais. A escolha dos parâmetros foi feita conforme a Resolução Conama nº 396/2008, a qual dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências.

O nitrato é o contaminante mais frequente em aquíferos de todo o mundo, cujas principais fontes antrópicas difusas são: aplicação de fertilizantes orgânicos e sintéticos nitrogenados, utilização de fossas sépticas ou negras, vazamentos das redes coletoras de esgoto e a influência de rios contaminados na zona de captação de poços (REYNOLDS-VARGAS, 2006). Assim, segundo Varnier et al. (2010), o nitrato é utilizado mundialmente como indicador de poluição das águas subterrâneas, em virtude da sua alta mobilidade, podendo atingir extensas áreas.

Segundo Lima *et al.* (2014), concentrações altas de cloretos podem limitar o uso da água em razão do sabor e pelo efeito laxativo que eles podem provocar. Além disso, a presença de íons cloreto também podem refletir problemas relacionados à poluição, por isso constituem um bom indicador de contaminação para fontes que, de maneira inadequada, recebem esgotos domésticos e para mananciais próximos a aterros sanitários e lixões (LIMA *et al.*, 2014).

E, finalmente, segundo o Ministério da Saúde (2006), a entrada de sólidos na água pode ocorrer de forma natural (processos erosivos, organismos e detritos orgânicos) ou antropogênica (lançamento de lixo e esgotos). Assim, os sólidos dissolvidos totais refletem a influência de lançamento de esgotos e, ainda, diz respeito à qualidade organoléptica da água (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2006).

2.5. Geoestatística

Apesar da relevância da água subterrânea para o abastecimento humano e economia, principalmente, existe uma carência relacionada aos dados relativos às águas subterrâneas, devido à maior dificuldade técnica e financeira em extraí-los em comparação aos dados de águas superficiais. A maior parte dos estudos de

qualidade da água subterrânea publicados recentemente tem caráter mais localizado (ZOBY, 2008).

De acordo com Cleary (1989), a maioria das agências estaduais e federais não possuem recursos financeiros suficientes para criar e manter uma rede de poços de monitoramento e, além disso, tais poços ainda possuem limitações quanto à representatividade dos dados, uma vez que a geologia raramente é homogênea.

Dessa forma, o atual contexto de crescimento da urbanização e das atividades industriais e agrícolas implica em maior degradação dos mananciais. Logo, é fundamental estabelecer um programa de monitoramento hídrico quali-quantitativo que auxilie em um desenvolvimento sustentável.

Para atender a essa necessidade, a geoestatística se apresenta como uma ferramenta poderosa que permite o monitoramento de toda uma área de um aquífero a partir de dados pontuais (poços de monitoramento, por exemplo). Dessa forma, a geoestatística se apresenta como uma solução tanto técnica quanto econômica.

A geoestatística surgiu na África do Sul, quando o engenheiro de minas Daniel G. Krige e o estatístico H. S. Sichel desenvolveram empiricamente uma técnica própria de estimativa para o cálculo de reservas minerais, a qual serviu de base para os estudos de G. Matheron (1963) na França que deram origem a Teoria das Variáveis Regionalizadas (LANDIM, 2006).

Segundo Vieira (2000), “Quando uma propriedade varia de um local para outro com algum grau de organização ou continuidade, expresso pela dependência espacial, a estatística clássica deve ser abandonada e dar lugar a uma estatística relativamente nova: a geoestatística.[...]”.

Para se determinar se existe dependência espacial entre as amostras e, então, determinar ou não o uso da geoestatística, utiliza-se o semivariograma que expressa tal relação entre os dados. Então, confirmando-se tal dependência é possível estimar valores da propriedade em estudo para os locais não amostrados dentro do campo, sem tendenciosidade e com variância mínima, pelo método denominado krigagem (VIEIRA, 2000).

Na mineração, por exemplo, durante o planejamento mineiro era feita a estimativa de reservas, a qual era realizada por meio de blocos (áreas) formados pela coleta de amostras pontuais, ou seja, com volumes menores que os blocos. Então, era avaliada a dependência espacial de tais amostras em relação ao teor médio do bloco sendo que o peso da influência de cada amostra era inversamente proporcional à sua distância ao bloco (LANDIM, 2006).

De acordo com Vieira (2000), em um contexto onde há duas variáveis medidas em um mesmo campo, com todos os pontos da amostragem iguais (ou parte), é possível correlacionar tais variáveis e avaliar o grau de semelhança de variação entre elas no espaço através do semivariograma cruzado. Então, se o grau de semelhança for significativo, utiliza-se a cokrigagem (VIEIRA, 2000). Tal ferramenta pode ser muito vantajosa quando há maior dificuldade de se obter uma das variáveis, assim a variável mais difícil de ser obtida pode ser retirada com menor frequência em relação a variável mais fácil. Finalmente, Boezio et al. (2006) articula que comparativamente a outros métodos, a sua principal vantagem é a consideração da correlação espacial conjunta entre variáveis.

A partir de tais métodos, é possível gerar mapas de contorno com alta precisão, construídos através de isolinhas, as quais representam medidas interpoladas de valores iguais. Isso é possível, pois as interpolações permitem gerar uma densidade espacial dos dados muito maior que as disponíveis antes (VIEIRA, 2000).

Historicamente, a geoestatística já foi aplicada em diversos campos, surgindo na mineração sobre a qual existe o livro clássico de Journel e Huijbregts (1978) e as obras em português de Valente (1982) e Yamamoto (2001) e, então, partindo para a hidrologia, agricultura de precisão, cartografia, climatologia, geologia ambiental, geotecnia, entre outros (LANDIM, 2006).

2.6. Trabalhos Correlatos

Diante do exposto, a principal ferramenta de estudo deste trabalho, a geoestatística, está cada vez mais sendo aplicada em diversos campos, evidenciando sua flexibilidade a diversos contextos e, também, suas vantagens e nível de acurácia. Sua grande utilidade em recursos naturais, por exemplo, se deve

ao fato de que tais ocorrências apresentam continuidade espacial e, muitas vezes, apresentam dificuldade e/ou carência de dados que podem ser supridos por variáveis secundárias através da geoestatística.

Boezio et al. (2006) aplicaram geoestatística para o mapeamento do nível de água subterrânea e gerenciamento de recursos hídricos. O trabalho de Boezio et al. (2006), trata da realidade de mineração subterrânea, a qual pode afetar diretamente no ciclo hidrológico, especificamente na circulação da água de infiltração. Esta interferência poderia implicar em alterações no nível d'água, o qual é de grande importância em programas de monitoramento em água subterrânea. Dessa forma, os autores associaram os dados relativos a leituras em piezômetros com densas informações topográficas através da cokrigagem colocada para o mapeamento do nível d'água.

O uso da geoestatística feita por Russo (2009), também ocorreu no contexto de gerenciamento de recursos hídricos visando o planejamento, controle e prevenção da qualidade das águas subterrâneas e criação de perímetros de proteção para as mesmas. Assim, o trabalho utilizou-se da geoestatística para auxiliar na análise da vulnerabilidade de aquíferos.

Andrade et al. (2012) se dedicou ao estudo de um parâmetro associado a qualidade de águas subterrâneas utilizando a geoestatística. Dessa forma, o parâmetro abordado pelos autores foi a condutividade elétrica (CE), na região semiárida de Pernambuco. Andrade et al. (2012) justificam que o parâmetro escolhido é uma das variáveis mais utilizadas para avaliar a concentração de sais solúveis na água de irrigação e no solo para, então, saber-se o perigo que esta água oferece, em termos de salinização do solo.

O trabalho de Campos (2003) aplicou geoestatística para estudar a contaminação das águas subterrâneas na Amazônia através da caracterização preliminar da condutividade elétrica, seguida da análise de nitrato e cloreto, visto que tais parâmetros são bons indicativos de contaminação e possuem elevada correlação. Tal estudo foi justificado pelo baixo índice de saneamento básico na região norte e, devido a isso, ocorre a disseminação de fossas, as quais nem sempre são sépticas ou estão dentro das normas construtivas vigentes.

Neste mesmo contexto, Cagnon (2003) realizou um estudo para determinar a origem e o entendimento do comportamento geoquímico do nitrato no Aquífero Adamantina. Dessa forma, ao final do estudo, constata-se que as maiores concentrações de nitrato ocorrem na zona rasa (ZR) do aquífero as quais evoluíram para a zona intermediária (ZI) com diminuição nas concentrações de sódio, cloreto e nitrato, reforçando a ideia de origem antrópica e superficial para tais compostos (principalmente o sistema de saneamento in situ do tipo fossas negras).

A pesquisa de Godoy (2004) também fez uso da geoestatística e constatou teores de Nitrato acima de 10 mg/L na área urbana de Presidente Prudente – SP. Estes poços contaminados estavam localizados dentro de uma área já efetivamente urbanizada desde 1962 e, através do estudo do histórico da evolução da implantação da infraestrutura de esgoto na cidade, reforçou-se a hipótese de contaminação por lixiviação de fossas.

Varnier et al (2009) fez uso das ferramentas da geoestatística para avaliar os padrões de ocupação urbana e contaminação por nitrato nas águas do SAB, na região centro-oeste do Estado de São Paulo (em três cidades: Bauru, Marília e Presidente Prudente). Dessa forma, o objetivo do estudo consistiu em propor uma avaliação do incremento deste parâmetro a partir dos padrões de ocupação do terreno. Os resultados do estudo indicaram que as maiores concentrações se encontram nas áreas com ocupação urbana maior.

O trabalho de Lima et al. (2020) utilizou a geoestatística para mapear concentrações Bário, Crômio Total e Vanádio no aquífero Bauru analisando-os de acordo com os parâmetros para consumo humano. Os métodos e resultados do trabalho de Lima et al (2020) corroboram com este trabalho através dos métodos de análise e dos resultados encontrados, os quais indicam valores acima do máximo permitido na região de Presidente Prudente.

Por fim, observa-se que a geoestatística pode ser uma ferramenta muito útil e interessante, de elevado potencial no auxílio à análise dos recursos hídricos subterrâneos contribuindo para o planejamento do uso racionalizado destes recursos e, também, para a sua manutenção e proteção.

3. OBJETIVO

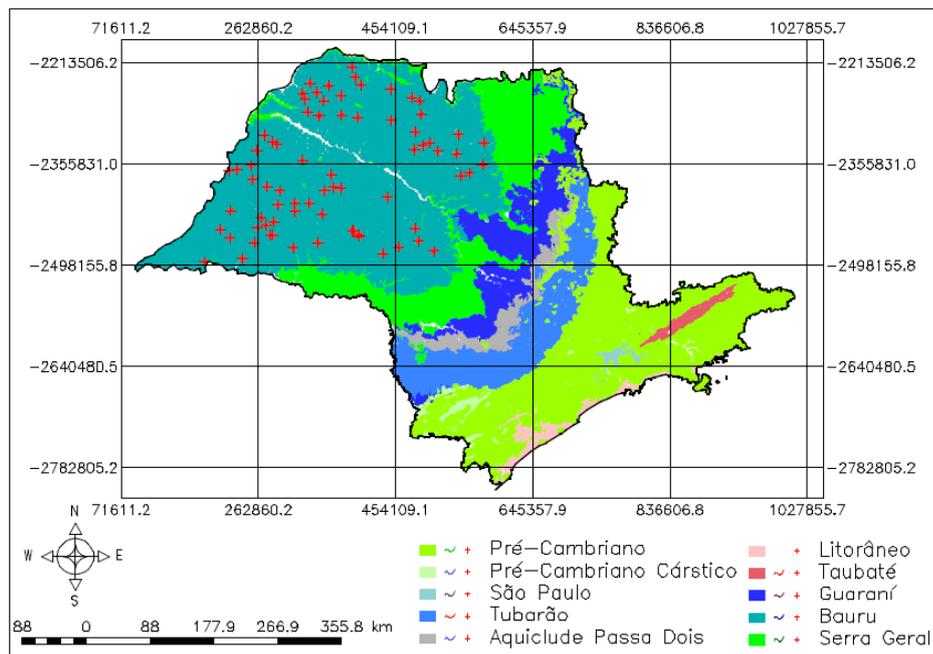
Estudar e caracterizar a variabilidade espaço-temporal de sólidos dissolvidos totais, nitrato e cloreto total das águas subterrâneas do aquífero Bauru no estado de São Paulo (2007-2009) e gerar mapas evolutivos das alterações sazonais de tais parâmetros pesquisados.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho de conclusão de curso foi conduzido com base nos dados de parâmetros da qualidade de águas subterrâneas da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2010) para área de cobertura do Sistema Aquífero Bauru (SAB).

As amostragens são representativas de uma área de estudo que compreende predominantemente a região oeste do Estado de São Paulo, representando aproximadamente 42% da área do Estado (Figura 7). Foram avaliados dados de 75 pontos amostrais (poços) referentes aos postos de coletas da CETESB (CETESB, 2010), cada um com avaliações individuais, semestrais, entre os anos de 2007-2009. Houve alguns períodos em que alguns pontos de análise apresentavam falha de dados, possivelmente em função de algum problema de coleta de dados.

Figura 7 - Localização dos Pontos de Monitoramento.



Fonte: CETESB (2010).

Os critérios de seleção dos poços tubulares, segundo a CETESB (2010), consistiram principalmente em possuir licença de outorga do DAEE e construção de acordo com as normas vigentes dentre estes, dentre os quais foram escolhidos preferencialmente os poços utilizados para abastecimento público de água, os que possuíam o nível d'água mais próximo da superfície e aqueles instalados a montante de fontes potenciais de poluição.

Foram selecionados alguns parâmetros de qualidade de águas conforme a Resolução Conama nº 396/2008, os quais são Nitrogênio Nitrato (N-NO₃), Cloreto (Cl-) e Sólidos Dissolvidos Totais (SDT). Em cada ano os parâmetros foram coletados em dois períodos distintos, sendo eles: a) primeiro semestre (março-abril: final das chuvas) e, b) segundo semestre (setembro-outubro: final do período seco).

Dessa forma, para melhor visualização/organização dos dados, a identificação destes foi feita utilizando o número 1 ou 2, que representam o primeiro e o segundo semestre, respectivamente, seguido do ano de coleta (Exemplo: SDT_1_2007; SDT_2_2007).

Para cada parâmetro estudado foi efetuada a análise estatística descritiva clássica, e posteriormente construiu-se a matriz de correlação de Pearson com a finalidade de avaliar as interações, duas a duas, entre os parâmetros para eleger candidatos à modelagem de regressões de interesse. Para ambas as análises utilizaram-se da planilha de cálculos do software Microsoft Excel (2010).

No âmbito da geoestatística, para cada parâmetro foi analisada a dependência espacial pelo cálculo do semivariograma, utilizando-se do software **Gamma Design Software GS+™ 7.0**. A análise espacial será realizada pelo uso do programa geoestatístico Gamma Design Software 7.0 - GS+ (ROBERTSON, 2004). Assim, isoladamente para cada atributo, foi analisada sua dependência espacial pelo cálculo do semivariograma simples, tendo como base a pressuposição de estacionariedade da hipótese intrínseca (MATHERON, 1963; GUIMARÃES, 2004) conforme expressão abaixo:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(X_i) - Z(X_i + h)]^2 \quad (1)$$

onde: N(h) é o número de pares experimentais de observações $Z_{(x_i)}$ e $Z_{(x_i+h)}$ separados por uma distância h.

Os ajustes dos semivariogramas foram efetuados observando a seleção inicial de: a) a menor soma dos quadrados dos desvios (SQD); b) o maior coeficiente de determinação espacial (R^2) e c) o maior avaliador da dependência espacial (ADE)

, onde: a) $ADE \leq 25\%$ = variável fracamente dependente; b) $25\% < ADE \leq 75\%$ = variável moderadamente dependente, e c) $ADE > 75\%$ = variável altamente dependente (ROBERTSON, 2004).

Para atestar a eficiência das estimativas por krigagem ordinária adotou-se como critério final de aceitação, ou não, do ajuste semivariográfico, o maior coeficiente de correlação (r) entre valores observados e estimados da validação cruzada (VC).

O processo de validação cruzada foi utilizado para a verificação da confiabilidade do modelo matemático ajustado. O modelo escolhido (esf ou gaussiano) será aquele que melhor estimar os valores observados, ou seja, aquele que produzir uma equação de regressão linear entre os valores observados, em função dos valores estimados, o mais próximo da bissetriz (intercepto igual a zero e coeficiente angular = 1) (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989).

Após essa etapa, foi realizada a interpolação por krigagem uma vez que esta técnica se trata de um estimador linear não enviesado (SILVA et al., 2008). No processo de krigagem, as estimativas foram feitas a partir da seguinte equação (FARIA, 2013):

$$z^*(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(x_i) \quad (2)$$

sendo z^* , o valor a ser estimado no ponto não amostrado x_0 ; N , o número de valores medidos $z_{(x_i)}$ envolvidos na estimativa e λ_i os pesos associados a cada valor medido $z_{(x_i)}$. Em seguida, foi realizada a confecção e edição final dos mapas de cada parâmetro.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com os padrões definidos pelo Ministério da Saúde (BRASIL, 2004), as concentrações de sólidos dissolvidos totais no SAB (Tabela 2) ocorrem dentro dos limites de potabilidade (< 1000mg/L), sendo o maior valor observado 438 mg/L. Os valores médios variam entre 140,89 mg/L a 173,24 mg/L durante todo o período. De acordo com a classificação sugerida por Pimentel-Gomes e Garcia (2002), para a avaliação do coeficiente de variação (CV), as concentrações de SDT apresentam variabilidade muito alta (> 30%) fato este que justifica o estudo do comportamento espacial deste atributo.

Tabela 2 - Análise estatística descritiva dos dados de SDT, Nitrato e Cloreto no Sistema Aquífero Bauru.

Atributo ^(a)	Medidas estatísticas descritivas						
	Média	Valor		Desvio Padrão	Variação (%)	Coeficiente	
		Mínimo	Máximo			Curtose	Assimetria
<i>Sólidos Dissolvidos Totais</i>							
<i>SDT_1_2007</i>	168,36	52	438	67,70	40,21	3,47	1,41
<i>SDT_2_2007</i>	159,98	64	394	58,45	36,53	3,50	1,31
<i>SDT_1_2008</i>	173,24	50	428	71,08	41,03	2,03	1,10
<i>SDT_2_2008</i>	140,89	8	314	54,32	38,55	2,02	0,70
<i>SDT_1_2009</i>	151,67	18	364	56,88	37,50	2,51	0,92
<i>SDT_2_2009</i>	160,50	50	420	62,86	39,16	4,78	1,76
<i>Nitrato</i>							
<i>Nit_1_2007</i>	4,101	0,19	18,70	3,72	90,90	2,71	1,36
<i>Nit_2_2007</i>	2,925	0,19	20,00	3,57	122,28	7,99	2,38
<i>Nit_1_2008</i>	3,198	0,19	19,00	3,49	109,36	6,36	2,10
<i>Nit_2_2008</i>	2,778	0,09	17,00	3,16	113,81	6,14	2,05
<i>Nit_1_2009</i>	2,954	0,09	14,00	2,95	100,10	1,96	1,32
<i>Nit_2_2009</i>	3,443	0,09	18,80	3,59	104,50	4,50	1,73
<i>Cloreto</i>							
<i>Clo_1_2007</i>	3,767	0,1	35,7	5,30	71,00	22,15	4,16
<i>Clo_2_2007</i>	4,035	0,1	37,0	5,50	73,30	22,40	4,14
<i>Clo_1_2008</i>	5,210	0,1	39,0	6,50	80,06	12,49	3,03
<i>Clo_2_2008</i>	3,998	0,2	36,0	5,47	73,01	20,67	4,02
<i>Clo_1_2009</i>	4,676	0,3	33,0	5,88	79,40	9,75	2,83
<i>Clo_2_2009</i>	3,986	0,4	32,0	5,18	76,82	14,77	3,34

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os dados de Nitrato (Tabela 2) apresentaram valores médios abaixo do limite permitido que é de 10 mg/L em todos os períodos avaliados. Entretanto, os valores máximos observados estão acima deste limite, chegando a 20 mg/L no primeiro

semestre de 2007, o que indica a existência de contaminação pontual em alguns poços (como por exemplo no poço de monitoramento do município de Andradina). Os trabalhos de Godoy (2004); e Varnier et al. (2010) também verificam a presença de Nitrato acima dos padrões de potabilidade nas águas do SAB, em alguns pontos.

A variabilidade das concentrações de Nitrato é indicada como muito alta de acordo com a classificação sugerida por Pimentel-Gomes e Garcia (2002). Tal variabilidade pode ser atribuída: a) à grande área amostral de coleta de dados e b) às distintas características geológicas e ambientais existentes em todo o SAB e, ainda, c) possíveis alterações pontuais de caráter operacional, pois alguns pontos apresentaram valores discrepantes que estavam próximos ou acima do valor máximo permitido (VMP) (como os seguintes: BA0127 – São José do Rio Preto; BA0059 – Jales; BA0006 – Andradina; BA0090 – Parapuã; BA0052 – Inúbia Paulista).

O cloreto ocorre em baixas concentrações nas águas do SAB (Tabela 2), com valor máximo de 39 mg/L observado no primeiro semestre de 2008. De acordo com dados do Ministério da Saúde (BRASIL, 2006), tornam-se mais perceptíveis as alterações no sabor por causa da presença de cloreto na água, quando tal parâmetro se apresenta em concentrações superiores a 250,0 mg/L, valor este, considerado limite para abastecimento humano. A variabilidade dos dados de cloreto também é muito alta (>30%), também de acordo com a classificação sugerida por Pimentel-Gomes e Garcia (2002).

Com a finalidade de avaliar as interações entre os parâmetros estudados, na Tabela 3 é apresentada a matriz de correlação para os dados SDT, N-NO₃ e Cl⁻.

Através da tabela 3 é possível notar que as correlações entre os próprios parâmetros (SDT vs SDT; Nit vs Nit; Cl⁻ vs Cl⁻) foi muito positiva, para cada semestre em relação ao semestre subsequente, dessa forma a variação sazonal parece não ter exercido muita influência nas interações entre os parâmetros ao longo de todo o período avaliado.

Tabela 3 – Matriz de correlação entre SDT, Nitrato e Cloreto no Sistema Aquífero Bauru.

Parâmetro	Coeficiente de Correlação																	
	SDT 2007/1	SDT 2007/2	SDT 2008/1	SDT 2008/2	SDT 2009/1	SDT 2009/2	Nit 2007/1	Nit 2007/2	Nit 2008/1	Nit 2008/2	Nit 2009/1	Nit 2009/2	Clo 2007/1	Clo 2007/2	Clo 2008/1	Clo 2008/2	Clo 2009/1	
SDT 2007/2	0,774																	
SDT 2008/1	0,815	0,869																
SDT 2008/2	0,627	0,700	0,621															
SDT 2009/1	0,774	0,872	0,780	0,709														
SDT 2009/2	0,834	0,862	0,825	0,768	0,914													
Nit 2007/1	0,682	0,578	0,607	0,393	0,509	0,612												
Nit 2007/2	0,456	0,521	0,434	0,395	0,487	0,554	0,638											
Nit 2008/1	0,424	0,443	0,478	0,260	0,392	0,479	0,614	0,900										
Nit 2008/2	0,460	0,454	0,391	0,347	0,462	0,561	0,638	0,935	0,866									
Nit 2009/1	0,430	0,481	0,360	0,337	0,517	0,552	0,584	0,923	0,814	0,920								
Nit 2009/2	0,466	0,503	0,461	0,318	0,491	0,601	0,643	0,932	0,901	0,948	0,917							
Clo 2007/1	0,680	0,655	0,584	0,417	0,653	0,710	0,604	0,746	0,679	0,774	0,688	0,773						
Clo 2007/2	0,639	0,705	0,614	0,456	0,659	0,710	0,618	0,833	0,759	0,813	0,765	0,826	0,960					
Clo 2008/1	0,612	0,642	0,646	0,357	0,609	0,686	0,578	0,703	0,741	0,736	0,669	0,790	0,870	0,898				
Clo 2008/2	0,607	0,601	0,533	0,343	0,571	0,613	0,531	0,740	0,711	0,779	0,702	0,756	0,922	0,911	0,852			
Clo 2009/1	0,560	0,607	0,456	0,377	0,603	0,612	0,475	0,676	0,590	0,722	0,738	0,693	0,842	0,850	0,837	0,879		
Clo 2009/2	0,631	0,639	0,598	0,368	0,595	0,686	0,621	0,761	0,726	0,813	0,735	0,827	0,928	0,930	0,964	0,936	0,891	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota-se que a variação sazonal não se apresentou como um fator significativo no comportamento dos dados e que as correlações elevadas entre os próprios parâmetros era uma tendência esperada, pois se trata dos mesmos parâmetros. Portanto, para os pontos amostrados com concentrações mais elevadas, as causas podem estar ligadas às ações antrópicas/externas, pois os pontos com menores valores variaram, mas continuaram reduzidos.

As correlações entre parâmetros diferentes também foram positivas, principalmente entre N-NO_3 vs Cl^- (Tabela 3), ou seja, observou-se elevadas concentrações de N-NO_3 e Cl^- nos mesmos pontos. Dessa forma, as elevadas concentrações de ambos os parâmetros podem estar ligadas as mesmas origens. Esta hipótese também é considerada por outros autores (VARNIER et al., 2010; CAMPOS, 2003; CAGNON, 2003) que constataram tal ocorrência.

A partir dos valores de correlação entre os parâmetros, escolheram-se os mais elevados e, então, os gráficos de dispersão a seguir foram produzidos representando estas interações.

O modelo ajustado aos dados da interação entre cloreto e nitrato (Figura 8) denotou um $R^2 = 0,810$, ou seja, indicando que 81% da variabilidade dos dados de nitrato podem ser estatisticamente explicados por meio da variabilidade do cloreto no aquífero Bauru. Também foi ajustado um modelo para a interação entre os dados de SDT e Cloreto ($R^2 = 0,734$) (Figura 9), assim como para SDT e Nitrato ($R^2 = 0,523$) (Figura 10).

Figura 8 - Curva de regressão entre Nitrato e Cloreto no Sistema Aquífero Bauru.

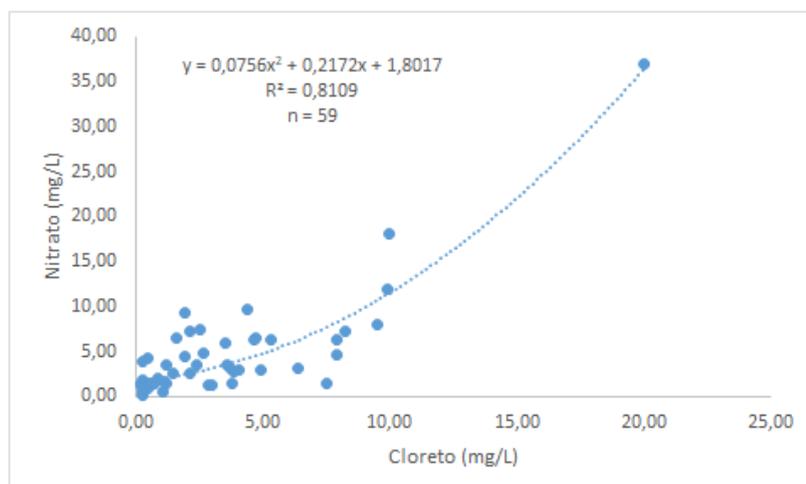
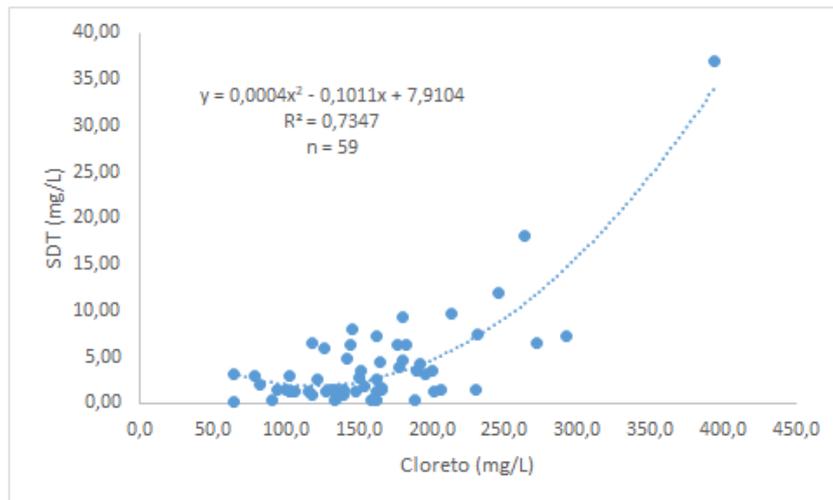
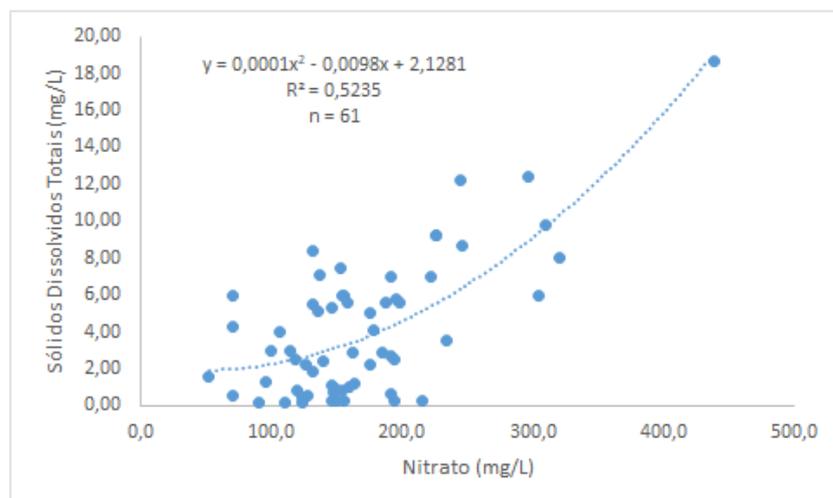


Figura 9 - Curva de regressão entre SDT e Cloreto no Sistema Aquífero Bauru.



Fonte: Elaborado pela autor.

Figura 10 - Curva de regressão entre SDT e Nitrato no Sistema Aquífero Bauru.



Fonte: Elaborado pela autor.

A Tabela 4 a seguir apresenta os parâmetros resultantes dos ajustes semivariográficos obtidos para os dados de SDT, Cl⁻ e N-NO₃ do SAB durante todo o triênio de 2007 a 2009. Os resultados indicaram a dependência espacial de todos os parâmetros estudados e durante todo o período. Dessa forma, foi possível a confecção dos mapas de estimativas por krigagem para todos os semestres.

Tabela 4 – Parâmetros semivariográficos para SDT, Nitrato e Cloreto no Aquífero Bauru.

Parâmetros ^(a)	Dados dos Ajustes Semivariográficos									
	Modelo ^(b)	C ₀	C ₀ +C	A (m)	R ²	SQR ^(c)	ADE ^(d)	Validação Cruzada		
							%	a	B	r
<i>γ(h) simples do SDT</i>										
<i>SDT_1_2007</i>	Esf	300,0	5201,0	90200,00	0,759	7,8 x 10 ⁶	94,2	21,51	0,863	0,525
<i>SDT_2_2007</i>	Esf	642,0	3765,0	74400,00	0,821	1,3 x 10 ⁶	82,9	15,14	0,903	0,505
<i>SDT_1_2008</i>	Esf	170,0	5509,0	72700,00	0,842	3,4 x 10 ⁶	96,9	47,71	0,708	0,503
<i>SDT_2_2008</i>	Esf	1002,0	3118,0	111100,0	0,698	1,9 x 10 ⁶	67,9	-6,85	1,033	0,506
<i>SDT_1_2009</i>	Esf	90,0	3835,0	72500,00	0,832	1,8 x 10 ⁶	97,7	68,24	0,544	0,360
<i>SDT_2_2009</i>	Esf	600,0	3862,0	68242,00	0,802	2,4 x 10 ⁶	84,5	30,77	0,776	0,514
<i>γ(h) simples da Nitrato</i>										
<i>Nit_1_2007</i>	Esf	3,75	11,01	113000,0	0,801	12,9	65,9	0,42	0,869	0,531
<i>Nit_2_2007</i>	Esf	0,01	9,19	54300,00	0,904	5,14	99,9	0,27	0,869	0,515
<i>Nit_1_2008</i>	Gau	3,08	8,51	67203,57	0,823	7,24	63,8	0,310	0,869	0,500
<i>Nit_2_2008</i>	Esf	1,30	8,49	71700,00	0,849	7,14	84,7	0,44	0,812	0,484
<i>Nit_1_2009</i>	Esf	0,01	6,35	43500,00	0,868	2,28	99,8	1,35	0,478	0,221
<i>Nit_2_2009</i>	Esf	0,66	11,28	70100,00	0,893	9,75	94,1	0,63	0,764	0,491
<i>γ(h) simples do Cloreto</i>										
<i>Clo_1_2007</i>	Gau	0,056	0,850	40876,49	0,798	9,49 x 10 ⁻²	93,4	0,97	0,748	0,440
<i>Clo_2_2007</i>	Esf	0,122	0,838	49500,00	0,625	1,41 x 10 ⁻¹	85,4	0,30	0,978	0,514
<i>Clo_1_2008</i>	Esf	0,001	1,418	53700,00	0,754	3,50 x 10 ⁻¹	99,9	0,39	1,015	0,566
<i>Clo_2_2008</i>	Gau	0,047	1,168	53347,16	0,816	2,31 x 10 ⁻¹	96,0	0,77	0,844	0,626
<i>Clo_1_2009</i>	Esf	0,132	1,248	57500,00	0,800	1,56 x 10 ⁻¹	89,4	0,97	0,904	0,453
<i>Clo_2_2009</i>	Esf	0,105	1,1640	79500,00	0,946	4,26 x 10 ⁻²	91,0	-0,03	1,112	0,677

(a) Parâmetros onde: SDT = Sólidos Dissolvidos Totais, NIT = Nitrato e CLO = Cloreto, seguidos respectivamente do ano e semestre de análise; (b) Ajuste semivariográfico, onde: Gau: gaussiano, esf: esférico; (c) SQR: Soma dos Quadrados dos Resíduos; (d) ADE: Avaliador da Dependência Espacial.

Os ajustes referentes aos dados de Sólidos Totais Dissolvidos (Tabela 4) foram do tipo esférico em todo o período analisado com coeficientes de determinação espacial (r^2) compreendidos entre 0,698 a 0,842 e alcances entre 68.242 m e 111.100 m.

Em relação às concentrações de N-NO₃ (tabela 4), os ajustes semivariográficos foram do tipo esférico para quase todos os semestres (2007/1; 2007/2; 2008/2; 2009/1; 2009/2), sendo do tipo gaussiano apenas para os dados do primeiro semestre de 2008. Os valores de alcance variaram entre 43500 m a 113000 m e coeficientes de r^2 entre 0,801 a 0,904.

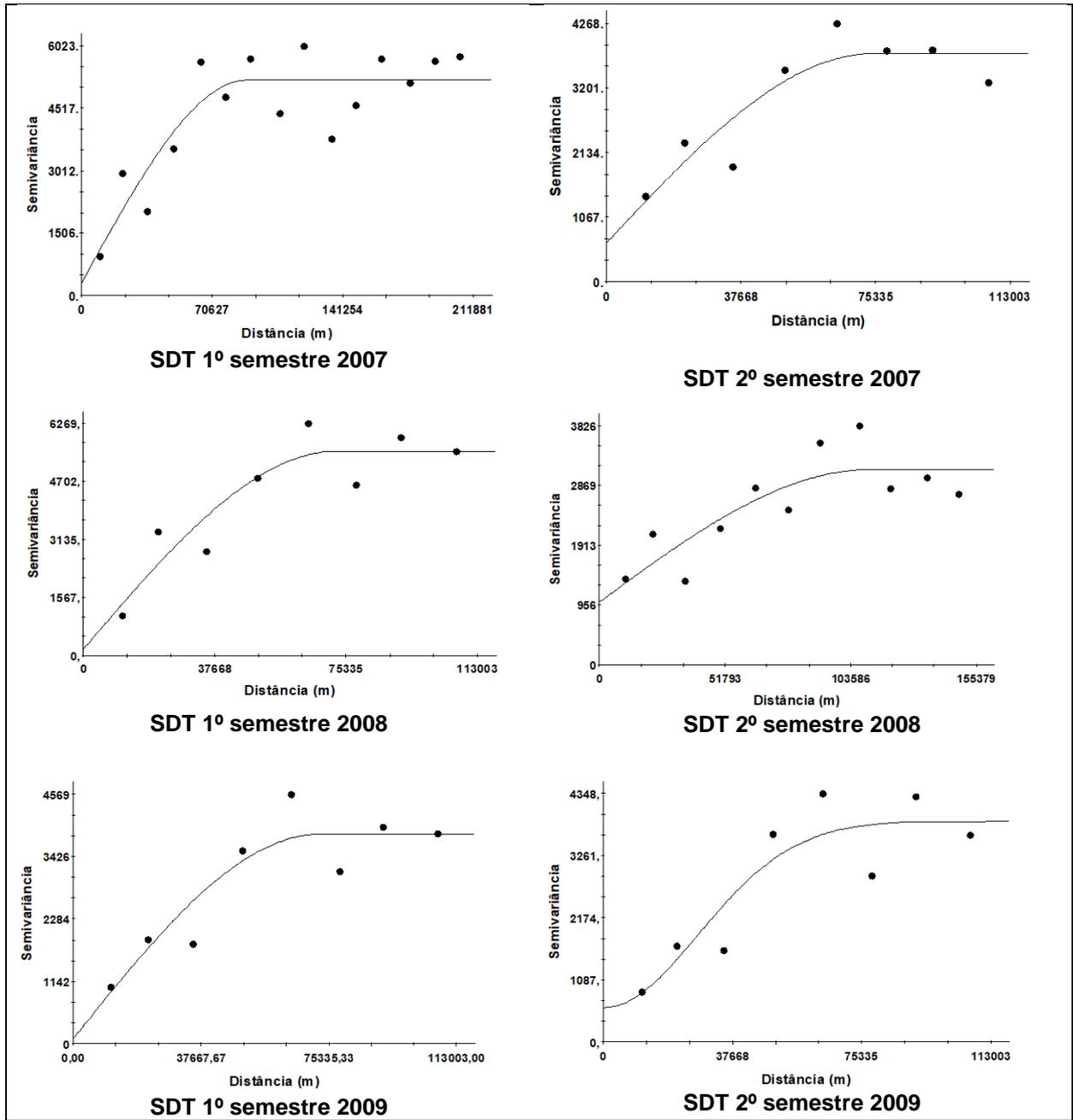
Os resultados para os parâmetros semivariográficos do cloreto (tabela 4) apresentaram r^2 variando entre 0,625 a 0,946 com alcances que estão entre 40876

m a 79500 m. Os modelos de ajustes foram do tipo esférico (2007/2; 2008/1; 2009/1; 2009/2) e gaussiano (2007/1; 2008/2).

A validação cruzada (VC) revela o desempenho do melhor ajuste encontrado para cada parâmetro, bem como avalia a eficácia das krigagens geradas (MOLIN et al., 2015). Os valores de coeficiente de correlação (r) (tabela 4) dos sólidos dissolvidos totais estão entre 0,360 e 0,525, os quais são satisfatórios pelo tamanho da área estudada e pela quantidade de dados disponíveis. Os resultados obtidos para o Nitrato também foram muito satisfatórios, variando de 0,221 a 0,531, assim como para o Cloreto que ficou compreendido entre 0,440 e 0,677.

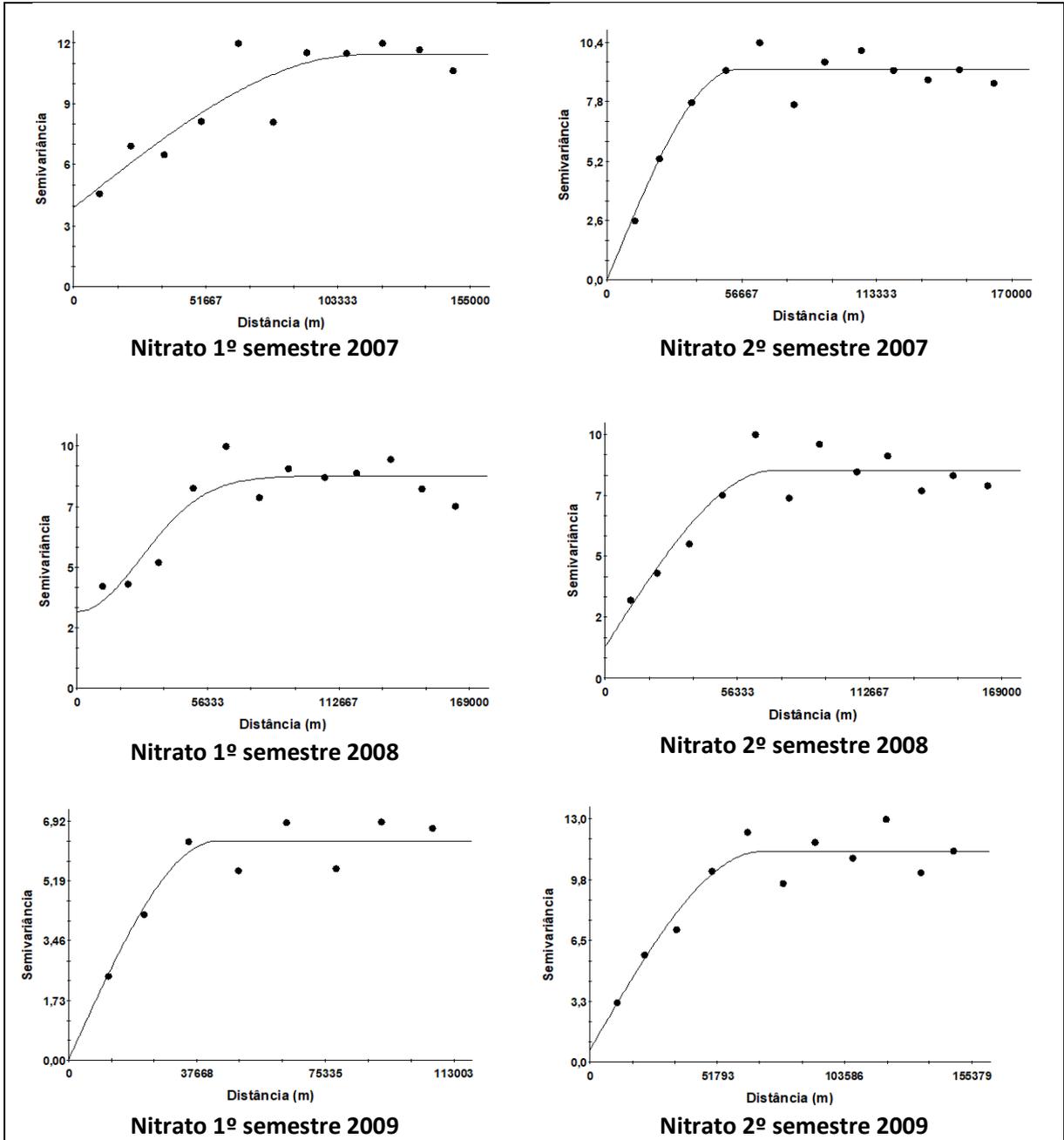
Como forma de conferência do desempenho dos ajustes semivariográficos, são apresentados nas Figuras 11, 12 e 13, os semivariogramas dos parâmetros analisados.

Figura 11 – Semivariogramas ajustados para o SDT no Sistema Aquífero Bauru.



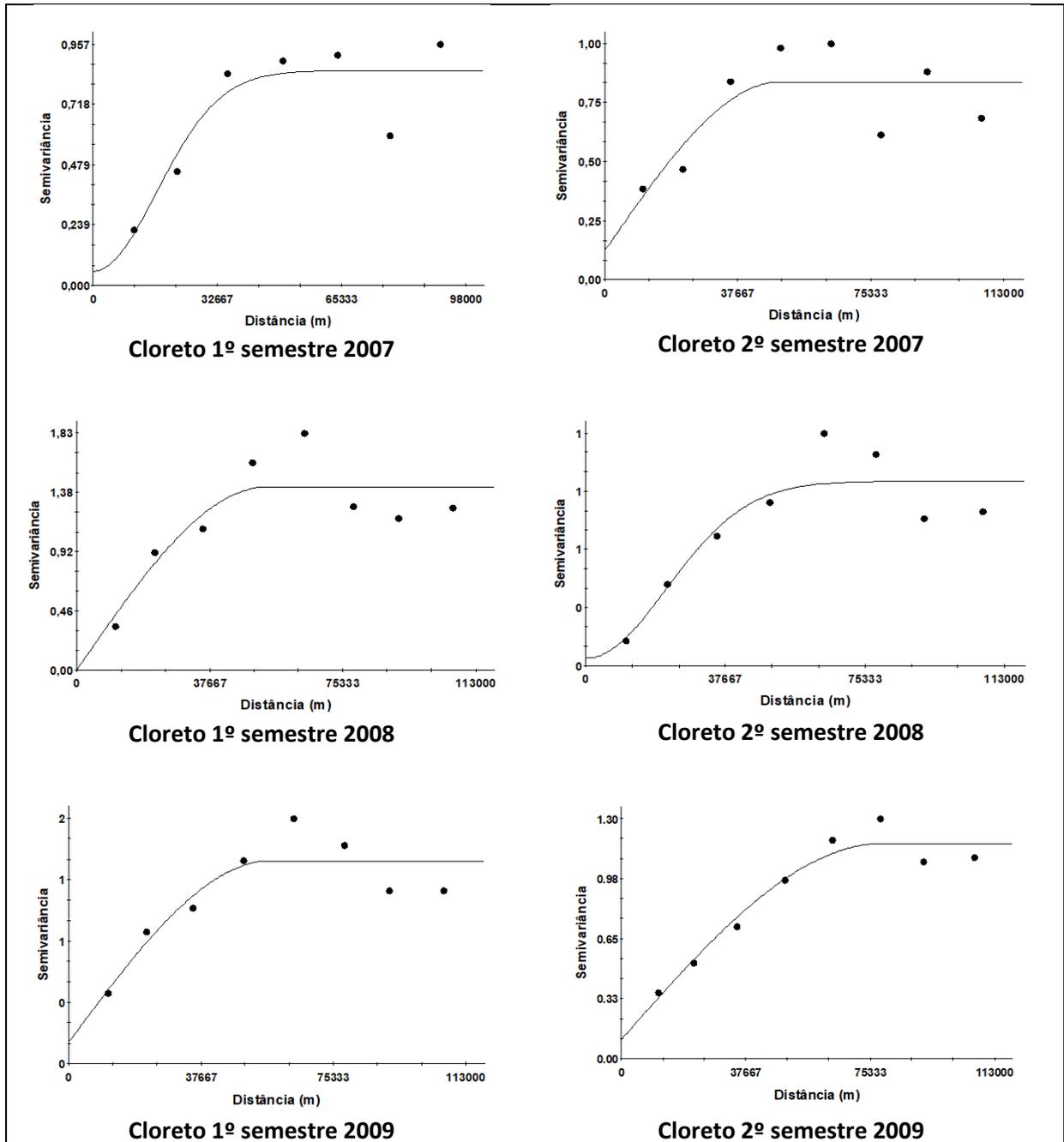
Fonte : Elaborado pelo autor.

Figura 12 - Semivariogramas ajustados para o Nitrato no Sistema Aquífero Bauru.



Fonte: Elaborado pelo autor.

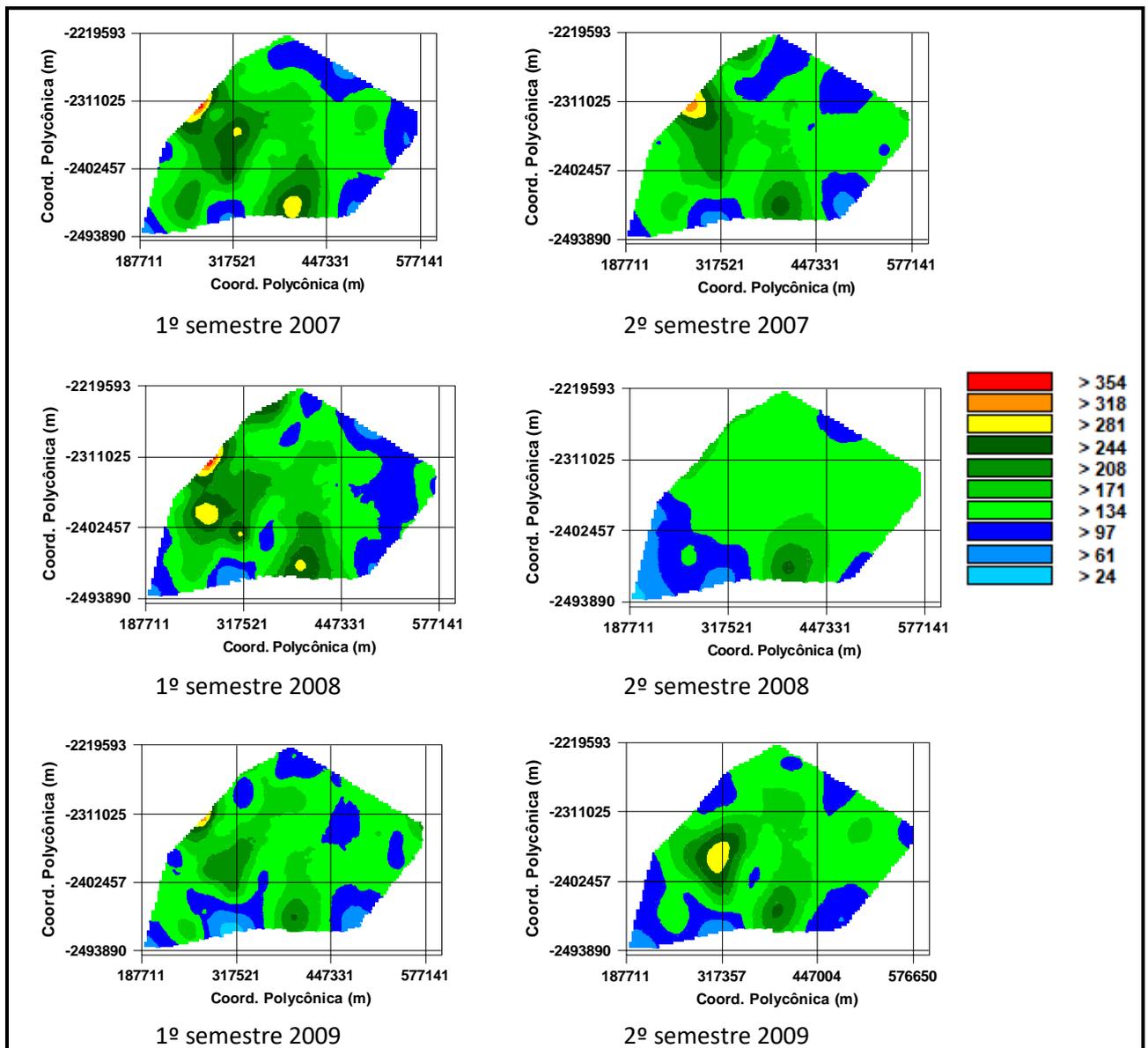
Figura 13 - Semivariogramas ajustados para o Cloreto no Sistema Aquífero Bauru.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir dos desempenhos semivariográficos (Figuras 11, 12 e 13), as figuras 14, 15 e 16 apresentam os mapas das estimativas dos SDT, do Nitrato e do Cloreto. Apenas em relação ao Nitrato é que ocorreram concentrações acima dos limites de potabilidade, entretanto os mapas de SDT e do Cloreto podem oferecer informações importantes em relação à área como um todo, auxiliando em tomadas de decisões e consumo racional deste manancial.

Figura 14 – Mapa de Krigagem da concentração de SDT no Aquífero Bauru.



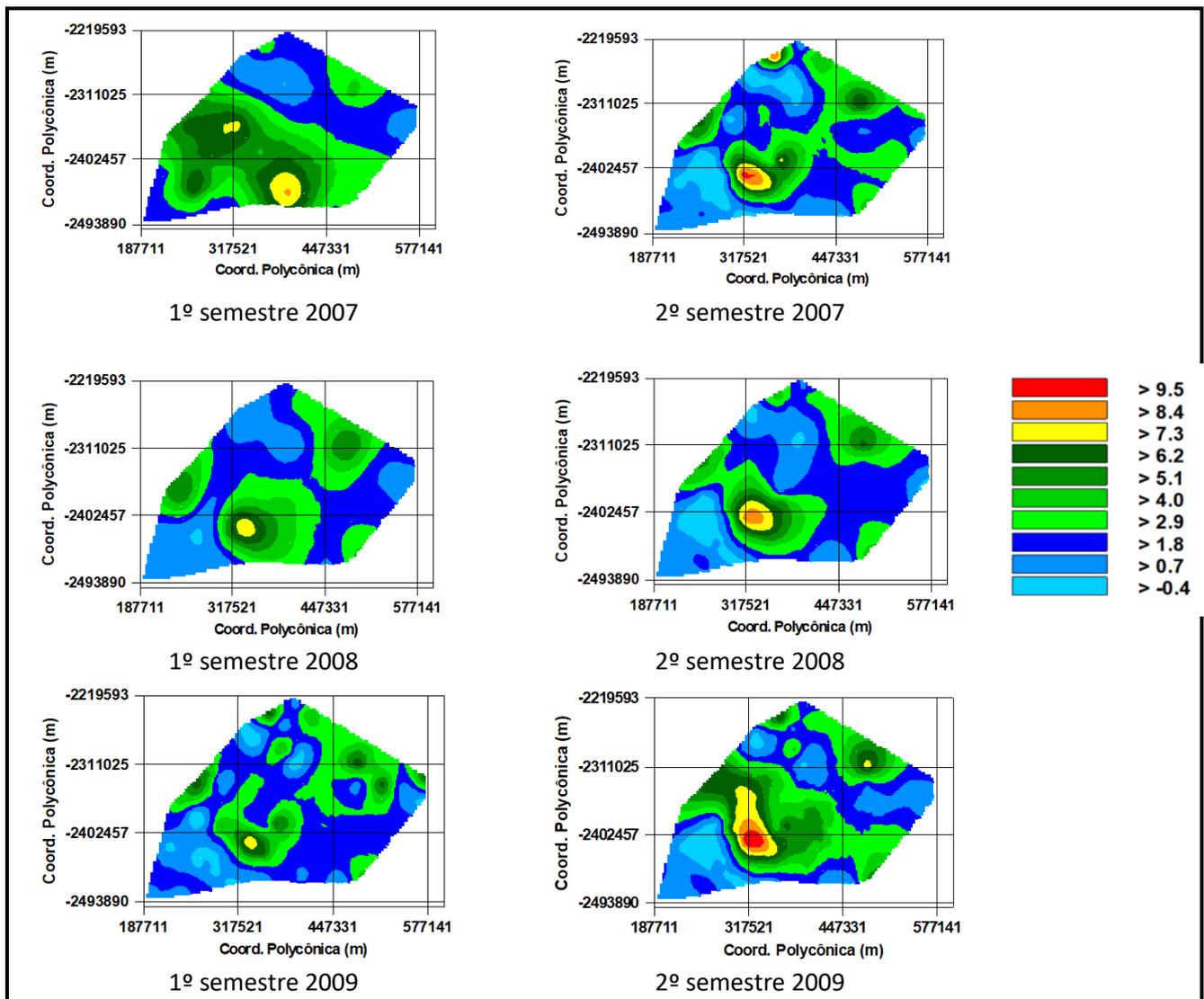
Fonte: Elaborado pelo autor.

Os mapas gerados por krigagem dos SDT (figura 14) indicam que as maiores concentrações ocorrem na região centro-oeste e noroeste do mapa, assim como as maiores variações espaciais. Assim, este fato indica a hipótese de contaminação, como por exemplo, por sistemas de esgotamento sanitário. Em relação à análise temporal, os primeiros semestres de 2007 e 2008 apresentaram maiores valores (na região administrativa de Andradina), mas estes não eram discrepantes em relação ao resto do período avaliado indicando pequena influência sazonal.

Os mapeamentos por krigagem do nitrato (figura 15) apresentam maiores áreas com concentrações elevadas ou concentrações que indicam possível alerta.

Em relação a estes valores, a Companhia Ambiental de São Paulo (CETESB, 2010) utiliza como indicador ambiental dois níveis de concentração de nitrato para as águas subterrâneas, onde: níveis superiores a 2,5 mg/L indicam alterações antrópicas, e níveis superiores a 5 mg/L apontam concentrações que demanda atenção e prevenção.

Figura 15 – Mapa de Krigagem da concentração de Nitrato no Aquífero Bauru.

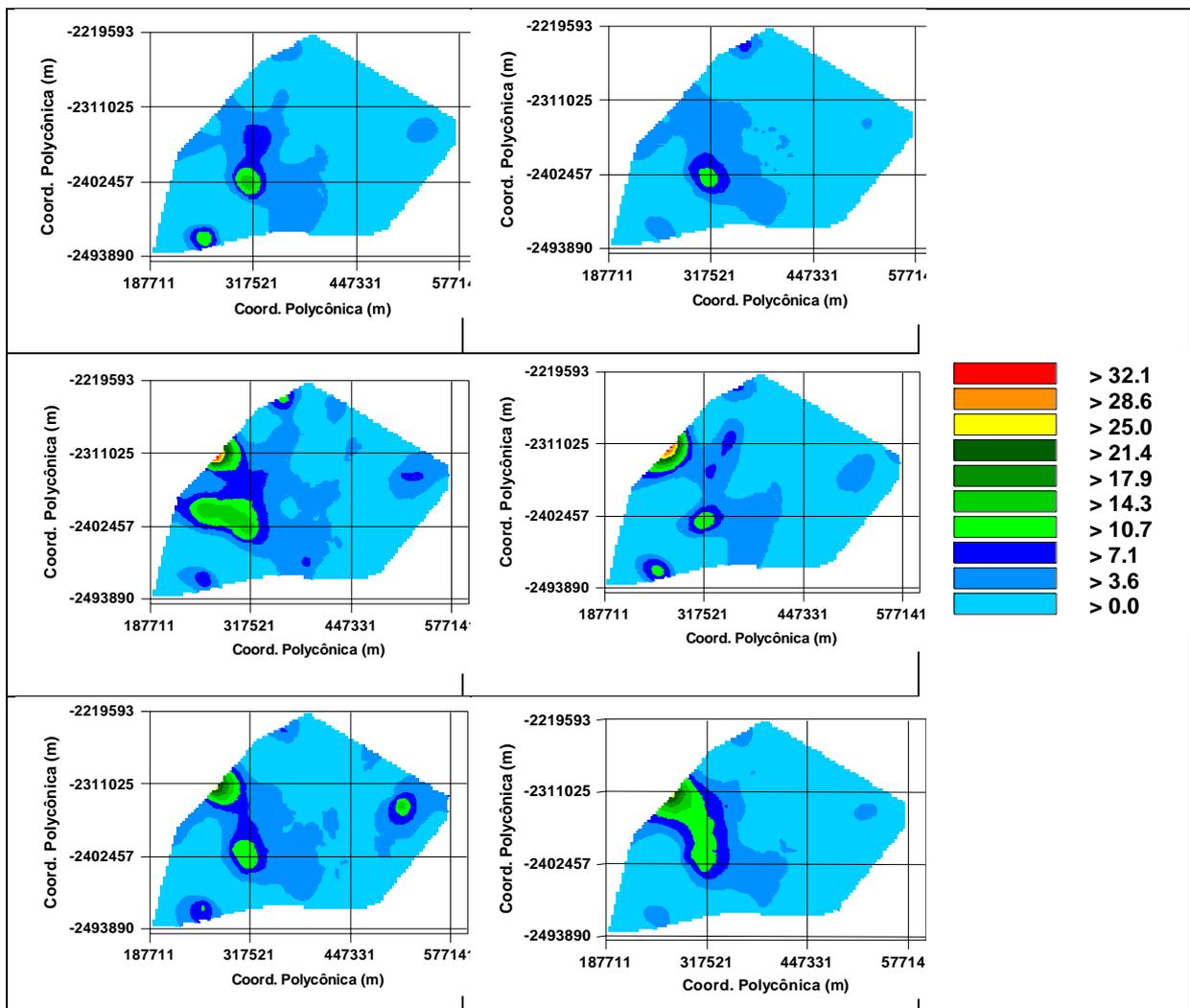


Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se que nos segundos semestres os valores na área centro-sul e centro oeste do mapa atingem maiores valores, talvez por influência da sazonalidade, ainda que não seja uma influência significativa. Uma vez que se trata de período sem chuvas, a concentração relativa do nitrato pode se elevar devido às características de formação do aquífero.

Os mapas feitos por krigagem do cloreto (Figura 16) não indicam concentrações superiores às recomendadas. As regiões em que ocorrem valores maiores tendem a ser nas porções centro-oeste e noroeste da área analisada e, em relação a análise temporal, não houve grandes influências sazonais. O primeiro semestre de 2008 foi o que apresentou maiores concentrações, confirmado pela média da análise descritiva (Tabela 1).

Figura 16 - Mapa de Krigagem da concentração de Cloreto no Aquífero Bauru.



Fonte: Elaborado pelo autor.

É notório que os pontos de concentrações máximas do cloreto possuem certa semelhança com os valores máximos de nitrato, sendo estes nas regiões centro-oeste e centro-sul do mapa. Esta ocorrência reforça a hipótese que tais parâmetros possuem mesma causa. Os valores de SDT não excederam o limite máximo de potabilidade, mas as máximas concentrações ocorreram nas regiões onde também

houve maiores valores de nitrato e cloreto, indicando que este parâmetro pode ser influenciado pelas concentrações de nitrato e cloreto.

Finalmente é visto que a influência sazonal não é significativa em nenhum dos parâmetros, uma vez que as regiões com concentrações mais elevadas se mantêm elevadas, assim como as regiões de menores concentrações mantêm-se baixas nos mapas de SDT, nitrato e cloreto.

6. CONCLUSÕES

Analisando pela geoestatística, os três parâmetros estudados apresentam dependência espacial em todos os semestres avaliados (2007 a 2009), o que resultou em ajustes semivariográficos com elevados coeficientes de determinação espacial (r^2) e ótimos alcances. Além disso, os mapas gerados para a estimativa da variabilidade espacial são bem delineados para os três parâmetros.

Do ponto de vista temporal, não houve grandes influências sazonais e as maiores concentrações sempre ocorrem na região de Andradina, para SDT, e nas regiões de Andradina e Presidente Prudente, para Nitrato e Cloreto, além de Fernandópolis para o Nitrato. Isso pode indicar que a contaminação pela percolação de água no solo não seja fonte de contaminação. Em contrapartida, pela presença de concentração alta em locais pontuais, a contaminação pode advir de fossas sépticas ou negras, por exemplo.

Através das curvas de regressão houve também relevante correlação entre os dados no nitrato e do cloreto ($R^2 = 0,810$) e, também, entre os dados de SDT e Cloreto ($R^2 = 0,734$). Tal ocorrência possibilita a utilização dos dados do cloreto como co-variável, tanto no auxílio à geração de estimativas espaciais da concentração do nitrato quanto dos SDT, para as condições do SAB na área estudada.

Finalmente, tem-se que as altas concentrações de Nitrato, visíveis pelo mapeamento, indicam possíveis problemas com poluição corroborando com trabalhos realizados anteriormente. Desta forma, tais concentrações servem de alerta para o constante monitoramento deste parâmetro, tendo em vista sua alta mobilidade, o que representa um risco de contaminação de uma grande área do Sistema Aquífero Bauru.

Os mapas de krigagens gerados no presente estudo, apesar de bem delineados e dos seus bons ajustes semivariográficos, devem ser entendidos como estimativas de pequena escala, uma vez que a área estudada é muito grande e a quantidade de dados foi relativamente pequena.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO - ANA. Panorama do enquadramento dos corpos d'água do Brasil e Panorama da qualidade das águas subterrâneas no Brasil. 2007. Disponível em: <https://biblioteca.ana.gov.br/sophia_web/asp/prima-pdf.asp?codigoMidia=116630&ilIndexSrv=1&nomeArquivo=PanoramaDoEnquadramentoDosCorposDagua%2Epdf>. Acesso em: 27 jun. 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO - ANA. Conjuntura. Recursos Hídricos no Brasil. 202 pp. 2009. Disponível em: <<https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos>> Acesso em: 11 jul. 2021

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO - ANA. ATLAS: Abastecimento Urbano de Água. 2010. Disponível em: <<http://atlas.ana.gov.br/Atlas/forms/Download.aspx>>. Acesso em: 03 fev. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 9896: define os termos nos estudos, projetos, pesquisas e trabalhos em geral relacionados à poluição das águas. Rio de Janeiro, p. 94. 1993.

ANDRADE, T. S. et al. Variabilidade espaço-temporal da condutividade elétrica da água subterrânea na região semiárida de Pernambuco. **Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambient.**, v.16, p.496-504, 2012.

BOEZIO, M. N. M.; COSTA, J. F. C. L.; KOPPE, J. C. Cokrigagem colocada aplicada ao mapeamento do nível de água subterrânea. **Rem: Rev. Esc. Minas**, v.59, p. 159-164, 2006.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Diário Oficial da União - Seção 1 - 9/1/1997, Página 470.

BRASIL – MINISTÉRIO DA SAÚDE (Secretária de Vigilância em Saúde). Vigilância e Controle da Qualidade da Água para Consumo Humano. Brasília, 2006. 212 p. – **(Série B: Textos Básicos de Saúde)**.

BRASIL – MINISTÉRIO DA SAÚDE (Secretária de Vigilância em Saúde.). Portaria nº 518 de 25 de março de 2004. Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências. **Diário Oficial da União** – DF, nº59, de 26 de março de 2004, seção 1, p.266-270.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Água, um recurso cada vez mais ameaçado. Brasília: **MMA**. Brasília – DF, 2009. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/sedr_proecotur/_publicacao/140_publicacao09062009025910.pdf> Acesso em: 31 jan. 2019.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Recursos Hídricos. Declaração Universal dos Direitos da Água. Porto Seguro: **MMA/SRH**, 2000 (Histoire de L'eau, George Ifrah, Paris, 1992).

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional de Recursos Hídricos – CNRH. Resolução nº 22, de 24 de maio de 2002. Estabelece diretrizes para inserção das águas subterrâneas no instrumento Planos de Recursos Hídricos. Brasília – DF, 04 de julho de 2002.

CAGNON, F. A. Origem e hidroquímica do nitrato nas águas subterrâneas do Aquífero Adamantina em Urânia, SP. 2003. **Dissertação (Mestrado em Recursos Minerais e Hidrogeologia)** - Instituto de Geociências, USP, São Paulo, 2003.

CAMPOS, J. C. V. A problemática dos recursos hídricos subterrâneos na Amazônia na visão do serviço geológico do Brasil – CPRM. **Simpósio de Hidrogeologia do Sudeste**. 2003. Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23964/16017>>. Acesso em: 3 fev 2019.

CARMO, R. L. et al. Água Virtual, Escassez e Gestão: o Brasil como Grande Exportador de Água. **Ambiente & Sociedade**, v.10, p.83-96, 2007.

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (Secretaria do Meio Ambiente). **Hidrogeologia**. São Paulo, 2007.

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. Relatório de qualidade das águas subterrâneas no Estado de São Paulo 2007-2009. São Paulo: **CETESB**, 2010. 258p. (Série Relatórios).

CLEARLY, R. W. Águas Subterrâneas. São Paulo: USP, 1989. Disponível em: <http://www.clean.com.br/Menu_Artigos/clearly.pdf>. Acesso em: 03 fev. 2019.

COELHO, L. M. P.; HAVENS, K. Crise nas Águas: Educação, ciência e governança, juntas, evitando conflitos gerados por escassez e perda de qualidade das águas. 1. ed. Belo Horizonte: **Recóleo**, 2015.

CONFERÊNCIA PAN-AMERICANA SOBRE SAÚDE E AMBIENTE NO DESENVOLVIMENTO HUMANO SUSTENTÁVEL (COPASAD). Plano Nacional de Saúde e ambiente no desenvolvimento sustentável. **Brasília: Ministério da Saúde**. 1995. 104 p.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. Portaria nº 396, de 04/2008. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 7 abr. 2008, p.64-68.

FARIA, G.A. Uso de um sistema de informação geográfica para análise geoestatística em solos. 2013. 113f. **Dissertação (Mestrado em Estatística Experimental)**. Universidade Estadual Paulista.

FABIANOVICZ, R.; SILVA JUNIOR, G.C. Legislação e políticas de proteção de águas subterrâneas nos cenários nacional e internacional: tendências e resultados práticos. **Geociências**, v.26, n.1, 2007.

GODOY, M. C. T. F. et al. Contaminação das águas subterrâneas por nitrato em Presidente Prudente – SP, Brasil. **Revista do Instituto Adolfo Lutz**, v.63, p.208-214, 2004.

GUIMARÃES, E. C.; Geoestatística Básica e Aplicada. UFU/FAMAT. **Uberlândia-MG.** 78 p.2004.

HOEKSTRA, A. Y. Virtual Water Trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade. **The Netherlands: IHE Delft** (Value of Water Research Report Series, Number 12), 2003.

IRITANI, M.A.; EZAKI, S. As Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo. **Cadernos de Educação Ambiental**. São Paulo, Secretaria de Estado do Meio Ambiente (SMA), 2008. 104p.

IRITANI, M.A.; EZAKI, S. As Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo. **Cadernos de Educação Ambiental.3ª ed., 1ª Reimp.** São Paulo, Secretaria de Estado do Meio Ambiente (SMA), 2012. 104p.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. Applied geostatistics. **Nova York, Oxford University Press**, 561p. 1989.

JACOBI, P. R.; GRANDISOLI, E. Água e Sustentabilidade: desafios, perspectivas e soluções. 1.ed. São Paulo: **IEE-USP e Reconectta**, 2017.

LANDIM, P. M. B. Sobre Geoestatística e mapas. Departamento de Geologia Aplicada. Rio Claro: Unesp. Disponível em: <http://www.fca.unesp.br/Home/Instituicao/Departamentos/CienciadoSolo/gepag/t_didatica_2006_v02n01_p019-033_landim.pdf>. Acesso em: 05 fev. 2019.

LIBÂNIO, P. A. C.; CHERNICHARO, C. A. L.; NASCIMENTO, N. O. A Dimensão da Qualidade da Água: Avaliação da Relação entre Indicadores Sociais, de Disponibilidade Hídrica, de Saneamento e de Saúde Pública. **Eng. Sanit. Ambient.**, v.10, p.219-228, 2005.

LIMA, C.G. R; LOLLO, J. A.; BACANI, V. M.; COSTA, N.R. Variabilidade espaçotemporal das águas subterrâneas do aquífero Bauru impróprias para o consumo humano: concentrações de Bário, Crômio Total e Vanádio. **PESQUISAS EM GEOCIÊNCIAS (ONLINE)**, V.47, P.E096380 -, 2020.

LIMA, J. O.; FRANÇA A. M. M.; LOIOLA H. G. Implicações hidroquímicas da condutividade elétrica e do íon cloreto na qualidade das águas subterrâneas do semiárido cearense. **Revista Virtual de Química**, v.6, p.279-292, 2014.

MATHERON, G. Principles of Geostatistics. **Economic Geology**, 58, 1246-1266.1963

MIERZWA, J. C.; HESPANHOL, I. Água na Indústria: uso racional e reuso. 1ª Ed. São Paulo: **Oficina de Textos**, 2005.

MOLIN, J. P.; AMARAL, L. R.; COLAÇO, A.F. Agricultura de Precisão. 1 Ed. São Paulo: **Oficina de Textos**, 2015, 233p.

OLIVEIRA, L. C. S.; FERNANDES, E. Coletânea da Legislação de Águas Subterrâneas do Brasil – Volume 1: Região Sudeste. 1ª Ed. São Paulo: **Instituto Água Sustentável**, 2018. Disponível em: < <http://download.aguasustentavel.org.br/coletanea> >. Acessado em 06/02/2019.

PIMENTEL-GOMES, F. GARCIA, C. H. Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais: exposição com exemplos e orientações para uso de aplicativos. Piracicaba: **FEALQ**, 2002.

PONTES, C.H.C.; LASTORIA, G.; PEREIRA, J.S.; Panorama atual da legislação brasileira com referência à gestão da água subterrânea. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, XVII, 2007, São Paulo. **Anais**, São Paulo: ABRH.

Projeto MapBiomias – Coleção 5.0 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil, acessado em 10/08/2021 através do link: < [https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/?activeBaseMap=8&layersOpacity=70&activeModule=coverage&activeModuleContent=coverage%3Acoverage_main&activeYear=2019&mapPosition=-14.093957%2C-54.492188%2C4&baseParams\[territoryType\]=5&baseParams\[territories\]=96%3BBrazil%3B5%3BPa%3ADs%3B-33.75108381453708%3B-74.00459087362147%3B5.272709087891954%3B-34.7928849739999&baseParams\[activeClassesLevelsListItems\]=28%2C36%2C50%2C51%2C52%2C35%2C29%2C37%2C38%2C41%2C40%2C39%2C30%2C43%2C42%2C54%2C56%2C55%2C57%2C53%2C44%2C31%2C45%2C46%2C47%2C34%2C32%2C49%2C48%2C33](https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/?activeBaseMap=8&layersOpacity=70&activeModule=coverage&activeModuleContent=coverage%3Acoverage_main&activeYear=2019&mapPosition=-14.093957%2C-54.492188%2C4&baseParams[territoryType]=5&baseParams[territories]=96%3BBrazil%3B5%3BPa%3ADs%3B-33.75108381453708%3B-74.00459087362147%3B5.272709087891954%3B-34.7928849739999&baseParams[activeClassesLevelsListItems]=28%2C36%2C50%2C51%2C52%2C35%2C29%2C37%2C38%2C41%2C40%2C39%2C30%2C43%2C42%2C54%2C56%2C55%2C57%2C53%2C44%2C31%2C45%2C46%2C47%2C34%2C32%2C49%2C48%2C33) >

REBOUÇAS, A. C.; BRAGA, B. TUNDISI, J. G. Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação. 2. ed. São Paulo: **Escrituras**, 2002.

REYNOLDS-VARGAS, J.; FRAILE, J., HIRATA, R. Trends in nitrate concentrations and determination of their origin using stable isotopes (18O and 15N) in groundwater of the Western Central Valley, Costa Rica. **Journal of the Human Environment**, v.35, n.5, p.229-236, 2006.

ROBERTSON, G. P. GS+: geostatistics for the environmental sciences. (GS+ User's Guide). Plainwell, Gamma Desing Software, 2004.

RUSSO, A. S. Estimativa da vulnerabilidade de aquíferos utilizando sistemas de informação geográfica e geoestatística-UGRHI-PCJ. 2009. Dissertação (Mestrado em Hidrogeologia e Meio Ambiente) - **Instituto de Geociências**, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

SANTOS, R. S.; BARBOSA, J. J. **Template para produção de trabalhos acadêmicos na Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Unesp**. Ilha Solteira: Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia, Biblioteca, 2021. 40 p.

SÃO PAULO. Secretaria de Saneamento e Recursos Hídricos, Universidade Estadual Paulista. São Paulo. **Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo: Diretrizes de Utilização e Proteção**. São Paulo: DAEE/LEBAC, 2013.

SILVA, A. M. et al., Simulação da variabilidade espacial da erosão hídrica em uma sub-bacia hidrográfica de Latossolos no sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, n.5, p.2125-2134, 2008.

SILVA, F.P.; KIANG, C.H.; CAETANO-CHANG, M.R. Hidroestratigrafia do Grupo Bauru (K) no Estado de São Paulo. **Águas Subterrâneas**, v.19, n.2, p.19-36, 2005

VARNIER, C. et al. Nitrato nas águas subterrâneas do sistema aquífero Bauru, área urbana do município de Marília (SP). **Revista do Instituto Geológico**, São Paulo, v.31, n.1-2, p.1-21, 2010.

VARNIER, C.; GUERRA, S. P.; HIRATA, R. Metodologia de avaliação dos padrões de ocupação urbana e contaminação por nitrato nas águas subterrâneas do Sistema Aquífero Bauru, centro-oeste do estado de São Paulo. In: I CONGRESSO INTERNACIONAL DE MEIO AMBIENTE SUBTERRÂNEO, 1.,2009. **Anais**. São Paulo: ABAS, 8p.

VIEIRA, S. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F et al (Eds). **Tópicos Em Ciência Do Solo**, 1. Sociedade Brasileira De Ciência Do Solo. p.1-53, 2000.

VILLELA, M. S.; MATTOS, A. Hidrologia Aplicada. São Paulo: **MCGraw-Hill do Brasil**, 1975. 245p.

ZOBY, J. L. G. (2008). PANORAMA DA QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NO BRASIL. **Águas Subterrâneas**. Recuperado de <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23802>>. Acesso em: 03 fev. 2019.