



UNIVERSIDADE  
ESTADUAL DE LONDRINA

---

LUCAS FRANCISCO RODRIGUES TOGNATO

**PROPOSTA METODOLÓGICA DE GESTÃO DAS ÁGUAS  
SUBTERRÂNEAS NA ÁREA URBANA DE LONDRINA-PR A  
PARTIR DA APLICAÇÃO DO PLUGIN FREEWAT**

LUCAS FRANCISCO RODRIGUES TOGNATO

**PROPOSTA METODOLÓGICA DE GESTÃO DAS ÁGUAS  
SUBTERRÂNEAS NA ÁREA URBANA DE LONDRINA-PR A  
PARTIR DA APLICAÇÃO DO PLUGIN FREEWAT**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geografia.

Orientador: Prof. Dr. André Celligoi

Londrina  
2022

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de  
Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UEL**

Tognato, Lucas Francisco Rodrigues.

PROPOSTA METODOLÓGICA DE GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NA ÁREA  
URBANA DE LONDRINA-PR A PARTIR DA APLICAÇÃO DO  
PLUGIN FREEWAT / Lucas Francisco Rodrigues Tognato. - Londrina, 2022.  
86 f. : il.

Orientador: André Celligoi.  
Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de  
Ciências Exatas, Programa de Pós-Graduação em Geografia, 2022.  
Inclui bibliografia.

1. Água Subterrânea - Tese. 2. Gestão Ambiental - Tese. 3. Geoprocessamento - Tese. 4.  
Geografia - Tese. I. Celligoi, André. II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de  
Ciências Exatas. Programa de Pós-Graduação em Geografia. III. Título.

LUCAS FRANCISCO RODRIGUES TOGNATO

**PROPOSTA METODOLÓGICA DE GESTÃO DAS ÁGUAS  
SUBTERRÂNEAS NA ÁREA URBANA DE LONDRINA-PR A  
PARTIR DA APLICAÇÃO DO PLUGIN FREEWAT**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geografia.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Orientador: Prof. Dr. André Celligoi  
Universidade Estadual de Londrina – UEL

---

Prof. Dr. José Paulo Peccinini Pinese  
Universidade Estadual de Londrina – UEL

---

Prof. Dr. Emerson Galvani  
Universidade de São Paulo - USP

Londrina, 24 de junho de 2022.

## DEDICATÓRIA

*“Dedico este trabalho à Deus, pois Ele é nosso  
Pai misericordioso que nos ama  
incondicionalmente.  
À minha Família, base do meu crescimento  
enquanto pessoa.  
À Débora, meu amor, companheira, amiga e  
bênção.  
Às pessoas que podem ter a vida transformada  
para melhor em algum aspecto, pois é disso  
que se trata este trabalho: vida.  
Reina o Senhor!”*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à Deus por tudo nessa vida, pois é somente por sua bênção e graça que cheguei até aqui, afinal sem Ele nada é possível.

Agradeço à minha Família, especialmente aos meus pais (Maria Izabel Rodrigues Tognato e Nilson Francisco Tognato) que me apoiaram e me deram todo o suporte necessário, me incentivando sempre, para que pudesse alcançar este momento único em minha vida. Aos demais familiares, sem exceção, agradeço por acreditar em mim e por me dar forças para continuar, vocês todos são muito importantes em minha caminhada.

Agradeço ao meu Orientador, André Celligoi, pela sua atenção e paciência, pelas riquíssimas orientações, por todo o conhecimento adquirido, pelo desenvolvimento científico proporcionado e também pelo crescimento como pessoa que tive. Sou muito grato, Professor!

Agradeço ao amigo Hermam Vargas Silva, que colaborou muito para a realização desta pesquisa, praticamente um coorientador... Seus conhecimentos e dicas fizeram toda a diferença. Sou grato à você, Hermam!

Aos demais professores do curso de Mestrado em Geografia da Universidade Estadual de Londrina, agradeço por terem contribuído, direta ou indiretamente, para a minha formação e para a realização deste trabalho. Os conhecimentos transmitidos por vocês são essenciais para uma vida consciente, tanto pessoal quanto profissional.

Agradeço à minha namorada Débora Pereira Molinari, pelo apoio, carinho, companheirismo e paciência ao longo da elaboração do trabalho em questão. Você é minha bênção enviada por Deus, uma mulher iluminada. Gratidão, Amor!

Agradeço aos amigos do período que cursei o Mestrado em Geografia na Universidade Estadual de Maringá enquanto aluno especial, Bronislau Max Miguel Prestes, Gabriel Henrique Sorato da Silva, Mateus Grochoski Felini, por sua amizade fiel e incentivo constante, vocês fazem parte desta história com certeza. Também sou muito grato aos amigos que fiz no decorrer do curso em Londrina, especialmente os de minha turma: Ariel Pereira da Silva Oliveira, João Paulo Pelizer Pucca, Matheus Di Osti Romagnolli, Rodrigo Aguilar Cantero, Sérgio Augusto Pereira. Vocês foram fundamentais em todo o meu processo de formação e de realização deste trabalho. Sou muito grato à vocês, meus amigos!

Agradeço à Prefeitura do Município de Mandaguari, especialmente à toda equipe da Secretaria Municipal de Desenvolvimento Econômico, Meio Ambiente e Turismo que sempre me apoiou no desenvolvimento da pesquisa em apreço: Aureliano Aparecido de Lima, Beatrys do Nascimento Serpa dos Santos, Eduardo Abílio Elias Rifa Nunes, Felipe Henrique Paiva Carnelos, Heloisa Midori Nabeshima, Juliana Rossi Parra, Kevin Pereira Macário, Luiz Rodrigues Júnior, Marcela Jesus da Rocha, Paulo Antônio Conte, Reginaldo Targino Cancini, Renato de Mattos, Ricardo Antônio Fernandes Benedetti Pedroni, Tayná Miranda Toná,, Thainara da Costa Siqueira. Vocês contribuíram muito nessa jornada!

Na tentativa de agradecer àqueles que sem sombra de dúvidas foram primordiais na construção do presente trabalho, posso ter esquecido de algum nome, já que são muitas as pessoas que contribuíram comigo. Portanto, agradeço a você também que é parte constituinte de tal trabalho!

*“De fato, é Javé quem dá a sabedoria, e  
da sua boca vêm o conhecimento e o  
entendimento” (Provérbios, 2:6).*

*“Quem madruga para o bem alcançará favor,  
mas quem busca o mal será vítima do mal”  
(Provérbios, 11:27)*

*“Um problema não se resolve observando-o,  
mas, sim, buscando sua solução”  
(Autor desconhecido)*

*“Quem aceita a disciplina caminha para a vida;  
quem despreza a correção se extravia”  
(Provérbios, 10:17)*

*“A verdadeira medida de um homem  
não se vê na forma como se comporta  
em momentos de conforto e conveniência,  
mas em como se mantém em tempos de  
controvérsia e desafio” (Martin Luther King Jr.)*

## RESUMO

TOGNATO, Lucas Francisco Rodrigues. **Proposta Metodológica de Gestão das Águas Subterrâneas da Área Urbana de Londrina-PR a partir da aplicação do plugin FREEWAT.** 2022. 86 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Centro de Ciências Exatas, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2022.

Este trabalho está pautado na relevância da água para a vida, recurso que apesar disso é pouco compreendido pela população, sobretudo quanto aos processos subterrâneos, uma vez que estes ocorrem abaixo da superfície e, por isso, não são vistos pelas pessoas, dificultando o entendimento acerca do assunto. Deste modo, o presente estudo buscou compreender a dinâmica hidrogeológica da área urbana de Londrina-PR e, com isso, gerenciá-la através da proposição de um modelo político-administrativo de gestão do recurso hídrico subterrâneo a partir da aplicação do plugin FREEWAT. Por meio de levantamento bibliográfico, foi revisado o arcabouço legal referente à gestão político-administrativa das águas subterrâneas nos níveis hierárquicos federal, estadual e municipal, dando-se destaque para a municipalidade londrinense. Também foram levantados dados em órgãos oficiais, tanto relativos ao meio físico-geográfico quanto especificamente às águas subterrâneas, as quais são captadas através de poços tubulares profundos. Estes dados foram processados no software Quantum GIS versão 2.18.21 Las Palmas aplicando o plugin em questão, gerando um modelo da dinâmica hidrogeológica para a área de estudo e, para além disso, simulando cenários futuros passíveis de serem concretizados. Em face do processamento elaborado, fez-se a proposição de um modelo de gestão político-administrativa sobre as águas subterrâneas da área urbana de Londrina através da criação de um Sistema Municipal de Monitoramento de Recursos Hídricos Subterrâneos. Os modelos hidrogeológicos gerados indicaram o controle do nível piezométrico na área investigada pela hidrografia e topografia, tanto que os principais padrões de fluxo verificados têm direcionamento nordeste e sudeste, acompanhando a hipsometria urbana e as bacias hidrográficas dos ribeirões Cafezal, Cambé, Jacutinga e Lindóia. Os cenários simulados apresentam a influência sofrida pelo nível piezométrico a partir da retirada d'água por poços, apontando uma diminuição na carga hidráulica do aquífero nas regiões central e noroeste da área de estudo. Contudo, apesar de tal diminuição, os cenários exibem a manutenção da superfície piezométrica em toda a área de estudo, denotando a possibilidade da continuidade de exploração das águas subterrâneas nos demais setores da urbe londrinense. Para tanto, cabe ressaltar que a proteção das áreas de recarga quais sejam, bem como o desenvolvimento de políticas públicas e ações técnico-práticas de gestão e qualificação ambiental, são medidas de extrema importância para evitar o rebaixamento no nível d'água, haja vista a impermeabilização e a captação hídrica subterrânea desregrada presentes no meio urbano que atuam como um obstáculos ao abastecimento do aquífero.

**Palavras-chave:** água subterrânea; gestão ambiental; geoprocessamento; geografia.

## ABSTRACT

TOGNATO, Lucas Francisco Rodrigues. **Methodological Proposal for the Management of Groundwater in the Urban Area of Londrina-PR from the application of the plugin FREEWAT.** 2022. 86 p. Dissertation (Master's in Geography) – Exact Sciences Center, State University of Londrina, Londrina, 2022.

This work is based on the relevance of water for life, a resource that is nevertheless little understood by the population, especially regarding underground processes, since these occur below the surface and, therefore, are not seen by people, making it difficult to understand about the subject. Thus, this study sought to understand the hydrogeological dynamics of the urban area of Londrina-PR and, therefore, manage it through the proposition of a political-administrative model for managing the groundwater resource from the application of the FREEWAT plugin. Through a bibliographical survey, the legal framework regarding the political-administrative management of groundwater at the federal, state and municipal hierarchical levels was revised, with emphasis on the municipality of Londrina. Data were also collected from official agencies, both relating to the physical-geographical environment and specifically to groundwater, which are collected through wells. These data were processed in the Quantum GIS software version 2.18.21 Las Palmas, applying the plugin in question, generating a model of the hydrogeological dynamics for the study area and, in addition, simulating future scenarios that could be implemented. In view of the elaborated processing, a political-administrative management model was proposed for groundwater in the urban area of Londrina, through the creation of a Municipal System for Monitoring Groundwater Resources. The hydrogeological models generated indicated the control of the piezometric level in the área investigated by hydrography and topography, so that the main flow patterns verified have a northeast and southeast direction, following the urban hypsometry and the hydrographic basins of the Cafezal, Cambé, Jacutinga and Lindóia streams. The simulated scenarios show the influence of the piezometric level from the withdrawal of water by wells, pointing to a decrease in the hydraulic load of the aquifer in the central and northwestern regions of the study area. However, despite such a decrease, the scenarios show the maintenance of the piezometric surface throughout the study area, denoting the possibility of continued exploitation of groundwater in other sectors at the Londrina city. Therefore, it is worth noting that the protection of the recharge areas, as well as the development of public policies and technical-practical actions of environmental management and qualification, are extremely important measures to avoid the lowering of the water level, given the waterproofing and unruly groundwater collection present in the urban environment that act as obstacles to the supply of the aquifer.

**Key words:** groundwater; environmental management; geoprocessing; geography.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1 –</b>	Ciclo Hidrológico .....	15
<b>Figura 2 –</b>	Organograma: Matriz e Funcionamento do SINGREH.....	19
<b>Figura 3 –</b>	Organograma: Matriz e Funcionamento do SEGRH .....	20
<b>Figura 4 –</b>	Método de Diferenças Finitas (a) e Método de Elementos Finitos (b) .....	29
<b>Figura 5 –</b>	Condição de Contorno de Carga Especificada .....	30
<b>Figura 6 –</b>	Condição de Contorno de Fluxo Especificado .....	30
<b>Figura 7 –</b>	Condição de Fluxo Dependente da Carga .....	31
<b>Figura 8 –</b>	Procedimento aplicado para atualizar termo-fonte de fluxo, dependendo da política de resposta ao déficit selecionada pelo usuário .....	35
<b>Figura 9 –</b>	Resumo do abastecimento e demanda hídrica, bem como método de ação com cenários deficitários .....	36
<b>Figura 10 –</b>	Mapa de Localização da Área Urbana de Londrina – PR .....	39
<b>Figura 11 –</b>	Mapa de Geológico da Área Urbana de Londrina – PR .....	41
<b>Figura 12 –</b>	Mapa de Hipsométrico da Área Urbana de Londrina – PR .....	43
<b>Figura 13 –</b>	Mapa Hidrográfico da Área Urbana de Londrina – PR .....	44
<b>Figura 14 –</b>	Gráfico do Balanço Hídrico do Município de Londrina – PR .....	45
<b>Figura 15 –</b>	Classificação Climática do Estado do Paraná .....	46
<b>Figura 16 –</b>	Mapa de Pedológico da Área Urbana de Londrina – PR.....	47
<b>Figura 17 –</b>	Esquema estrutural e textural do SASG.....	49
<b>Figura 18 –</b>	Localização dos poços tubulares profundos na área de estudo....	51
<b>Figura 19 –</b>	Fluxograma de Entrada de Dados .....	54
<b>Figura 20 –</b>	Modelo Hidrogeológico Conceitual.....	57
<b>Figura 21 –</b>	Domínio Simulado .....	59
<b>Figura 22 –</b>	Proposta de Sistema Municipal de Monitoramento de Recursos Hídricos Subterrâneos.....	61
<b>Figura 23 –</b>	Estrutura Organizacional da Secretaria Municipal do Ambiente de Londrina .....	63
<b>Figura 24 –</b>	Potociometria em regime permanente .....	64
<b>Figura 25 –</b>	Gráfico do Balanço hídrico simulado em Regime permanente .....	66
<b>Figura 26 –</b>	Áreas de Recarga .....	67

<b>Figura 27</b> – Potenciometria no primeiro cenário.....	68
<b>Figura 28</b> – Gráfico do Balanço hídrico simulado no Primeiro Cenário .....	69
<b>Figura 29</b> – Diferença Hidráulica entre primeiro cenário e regime permanente.....	70
<b>Figura 30</b> – Potenciometria no segundo cenário .....	71
<b>Figura 31</b> – Gráfico do Balanço hídrico simulado no Segundo Cenário .....	72
<b>Figura 32</b> – Diferença Hidráulica entre segundo e primeiro cenários.....	73
<b>Figura 33</b> – Potenciometria no terceiro cenário.....	74
<b>Figura 34</b> – Gráfico do Balanço hídrico simulado no Terceiro Cenário .....	75
<b>Figura 35</b> – Diferença Hidráulica entre terceiro e segundo cenários.....	76

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1 -</b>	Balanço Hídrico do Município de Londrina – PR.....	45
<b>Tabela 2 -</b>	Balanço hídrico simulado em regime permanente .....	65
<b>Tabela 3 -</b>	Balanço hídrico simulado no primeiro cenário.....	68
<b>Tabela 4 -</b>	Balanço hídrico simulado no segundo cenário.....	71
<b>Tabela 5 -</b>	Balanço hídrico simulado no terceiro cenário.....	74
<b>Tabela 6 -</b>	Balanço hídrico total simulado .....	76

## **LISTA DE QUADROS**

<b>Quadro 1 - Competências Municipais relacionadas às Águas .....</b>	<b>22</b>
<b>Quadro 2 - Competências do Município de Londrina relacionadas às Águas Subterrâneas.....</b>	<b>25</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
APA	Áreas de Proteção Ambiental
ART	Anotação de Responsabilidade Técnica
BDMEP	Banco de Dados Meteorológicos
BH	Bacia Hidrográfica
CERH	Conselhos Estaduais de Recursos Hídricos
CF	Constituição Federal
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
CONSEMMA	Conselho Municipal do Meio Ambiente
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
IAT	Instituto Água e Terra
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ID	Identificador
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
FREEWAT	Free and Open Source Software Tools for Water Resources Management
FTP	File Transfer Protocol
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDF	Método de Diferenças Finitas
MEF	Método dos Elementos Finitos
MINEROPAR	Minerais do Paraná S/A
MODFLOW	Flow Model
ONU	Organização das Nações Unidas
OWHM	One Water Hydrologic Model
PERH	Política Estadual de Recursos Hídricos
PLERH	Plano Estadual de Recursos Hídricos
PML	Prefeitura do Município de Londrina
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
PR	Paraná
QGIS	Quantum GIS
RML	Região Metropolitana de Londrina

SAG	Sistema Aquífero Guarani
SASG	Sistema Aquífero Serra Geral
SEDEST	Secretaria de Estado do Desenvolvimento Sustentável e do Turismo
SEGRH	Sistema Estadual de Gerenciamento de Recursos Hídricos
SEMA	Secretaria Municipal do Ambiente
SIAGAS	Sistema de Informações de Águas Subterrâneas
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SIGLON	Sistema de Informação Geográfica de Londrina
SINGREH	Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos
SINIR	Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos
SNVS	Sistema Nacional de Vigilância Sanitária
SRQA	Secretaria de Recursos Hídricos e Qualidade Ambiental
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SUDERSHA	Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental
TOPODATA	Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil
UDH	Unidade de Demanda Hídrica
USGS	United States Geological Survey

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>18</b>
2.1	PANORAMA ATUAL DA GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS .....	18
2.1.1	Contexto Federal .....	18
2.1.2	Contexto Estadual .....	19
2.1.3	Contexto Municipal .....	21
2.1.3.1	O contexto de Londrina-PR .....	23
2.2	MODELAGEM .....	27
2.2.1	Ferramenta proposta: o plugin FREEWAT .....	31
2.2.1.1	Aplicabilidade do FREEWAT .....	32
2.2.1.2	Conceituação da gestão hídrica no FREEWAT .....	32
2.2.1.3	Implementação no FREEWAT .....	36
<b>3</b>	<b>ÁREA DE ESTUDO .....</b>	<b>39</b>
3.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA .....	40
3.1.1	Geologia .....	40
3.1.2	Geomorfologia.....	42
3.1.3	Hidrografia.....	43
3.1.4	Clima .....	44
3.1.5	Aspectos Pedológicos .....	46
3.1.6	Hidrogeologia .....	47
3.1.7	Poços .....	49
<b>4</b>	<b>PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....</b>	<b>51</b>
4.1	LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO.....	51
4.2	LEVANTAMENTO DE DADOS EM ÓRGÃOS OFICIAIS .....	52
4.3	PROCESSAMENTO DOS DADOS DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS .....	53
4.4	O MODELO LONDRINENSE .....	56
4.4.1	Modelo Hidrogeológico Conceitual .....	56
4.4.2	Discretização do Modelo .....	57
4.4.3	Propriedades Hidráulicas .....	58

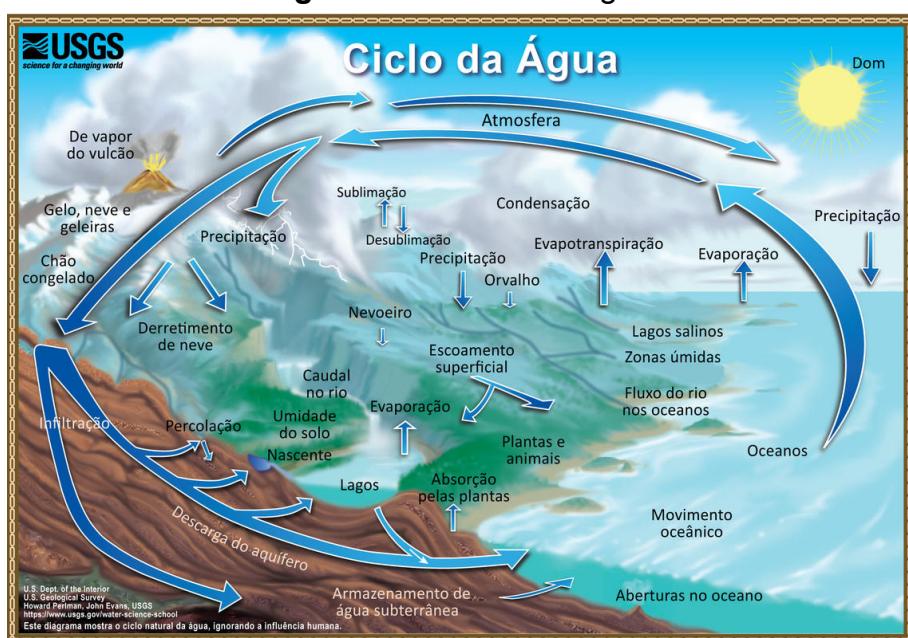
4.4.4	Condições de Contorno e Condições Iniciais .....	59
4.5	PROPOSIÇÃO DE MODELO ALTERNATIVO DE GESTÃO POLÍTICO-ADMINISTRATIVA DOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS .....	59
4.5.1	Modelo de Gestão Municipal com o Uso do FREEWAT.....	60
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>63</b>
5.1	SIMULAÇÃO DA SUPERFÍCIE POTENCIOMÉTRICA E DE FLUXO .....	63
5.2	CENÁRIOS SIMULADOS .....	65
5.2.1	Primeiro Cenário.....	66
5.2.2	Segundo Cenário.....	68
5.2.3	Terceiro Cenário.....	71
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>76</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>79</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Considerando a relevância da água para a vida, e que sua gestão demanda responsabilidade e qualidade tanto em superfície como no subterrâneo, esta pesquisa debruça o olhar para a dinâmica deste recurso ambiental no meio subterrâneo, considerado uma das principais fontes de tal recurso e que, apesar disso, é pouco compreendido pela população. Esta ideia a respeito do nível de compreensão popular sobre tal dinâmica está associada à “invisibilidade” do recurso hídrico aos olhos leigos, uma vez que os processos ocorrem abaixo da superfície e, por isso, não são vistos pelas pessoas, o que dificulta o entendimento acerca do assunto. Por outro lado, há lacunas na educação ambiental que trata do tema e, mesmo que existam políticas públicas que visem um estímulo ao contato entre conhecimento científico e população, o Ciclo da Água não é tão claro para a população em geral naquilo que se refere às águas subterrâneas.

A respeito do ciclo hidrológico, Lopes (2007) o define como “um conjunto de fases que representam os diversos caminhos através dos quais a água circula na natureza”. Tal ciclo envolve processos como “evaporação, precipitação, interceptação, transpiração, infiltração, percolação, escoamento superficial, etc” (LIMA, 2008). A Figura 1 sintetiza graficamente o ciclo da água.

**Figura 1 - Ciclo Hidrológico**



**Fonte:** USGS (*United States Geological Survey*). Disponível em: <[https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/o-ciclo-d-gua-water-cycle-portuguese?qt-science\\_center\\_objects=0#qt-science\\_center\\_objects](https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/o-ciclo-d-gua-water-cycle-portuguese?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects)>. Acesso em: 10/06/2021. \*Na figura onde se lê “Dessublimação” e “Dom”, leia-se “Deposição” e “Sol”, respectivamente.

Considerando tal dinâmica e sua relação intrínseca junto aos outros elementos físico-geográficos da paisagem, pode se compreendê-la a partir de uma perspectiva integradora na qual:

“É necessário estudar não somente partes e processos isoladamente, mas também resolver os decisivos problemas encontrados na organização e na ordem que os unifica, resultante da interação dinâmica das partes, tornando o comportamento das partes diferentes quando estudado isoladamente e quando tratado no todo” (BERTALANFFY, 1973).

Este tipo de abordagem integradora é denominada análise sistêmica, na qual se destaca a Teoria Geral dos Sistemas (TGS) criada por Bertalanffy na década de 1970, onde o sistema aberto é valorizado em detrimento do sistema fechado, pois o primeiro:

“[...] é tido como uma teoria interdisciplinar, constituído, essencialmente, pelos organismos vivos, cuja condição é manter um contínuo fluxo de entrada e saída de energia [...]” (OTTO, DE MORAIS, 2019).

Por outro lado, o segundo é justamente o estudo isolado das partes, consistindo num obstáculo à integração dos aspectos componentes da paisagem. Para estas autoras o ciclo da água ocorre somente em função de trocas de matéria e energia, sendo apropriado considerá-lo como “um sistema aberto e não fechado” uma vez que tais trocas “ocorrem a todo tempo” (OTTO, DE MORAIS, 2019).

Com isso, Otto e de Moraes (2019), definem o princípio geral da análise sistêmica como:

“uma visão integradora e dinâmica dos elementos que compõe o todo, formando uma unidade, dessa forma, os fenômenos que se manifestam no espaço podem se interagir, convergindo na manutenção do sistema, ou na alteração e modificação do mesmo”.

Nesse ponto, tal abordagem se confunde com o objeto da Geografia ao considerar a integração e dinamismo entre os elementos da paisagem, denotando a importância da mesma para determinada ciência.

A partir dessa relação surge o geossistema, baseado na ligação natureza-sociedade e, segundo Sotchava (1977, *apud* OTTO, DE MORAIS, 2019), com o intuito de estudar “as conexões entre eles; não se deve restringir à morfologia da paisagem e suas subdivisões, mas, de preferência, projetar-se para o estudo de sua dinâmica, estrutura funcional, conexões, etc” .

Aí está a relevância deste trabalho, pois, ao lançar mão da abordagem geossistêmica para compreender a dinâmica da água subterrânea e a interação da sociedade nesta dinâmica, comunica o funcionamento desta para a população em geral de modo claro e consistente.

Desta forma, a identificação da dinâmica hidrogeológica se faz necessária e, para além disso, a proposição de um modelo de gestão sobre o uso deste recurso ambiental essencial à vida. Nesse sentido nota-se a contribuição do *FREEWAT*, uma vez que este *plugin* permite tal identificação bem como a elaboração de projeções futuras diversas sobre o uso da água subterrânea, servindo como uma ferramenta valiosa à gestão de determinado recurso.

Portanto, a pesquisa busca compreender a dinâmica hidrogeológica da área urbana de Londrina-PR e, com isso, gerenciar as águas subterrâneas a partir da aplicação do *plugin* *FREEWAT* no intuito de estimular o desenvolvimento da qualidade ambiental relacionada à matéria. Mais especificamente, objetiva: identificar as características fundamentais da Hidrogeologia da Área Urbana de Londrina-PR, bem como sua relação com os demais Elementos do Meio Físico da paisagem; desenvolver um modelo de representação da dinâmica hidrogeológica a partir da aplicação do *plugin* *FREEWAT* no *software QGIS* versão 2.18.21 *Las Palmas*; e, Propor um Modelo de Gestão Político-Administrativa sobre tal dinâmica.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Tendo em vista a definição e importância do supracitado recurso ambiental, faz-se necessário um olhar sobre a gestão do mesmo, bem como, num direcionamento aos objetivos desta pesquisa, sobre a dinâmica das modelagens, especialmente em relação ao *plugin* proposto.

### 2.1 PANORAMA ATUAL DA GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS

#### 2.1.1 Contexto Federal

No Brasil, a gestão dos recursos hídricos se faz de modo democrático e participativo, envolvendo as três esferas político-administrativas (federal, estadual e municipal) juntamente com os mais diversos setores da sociedade no intuito de executar uma gestão integrada de tais recursos, a partir de decisões compartilhadas e descentralizadas entre os entes envolvidos.

Na Constituição Federal de 1988, está previsto que é de competência exclusiva da União legislar sobre águas (Inciso IV, Artigo 22), ainda que as águas superficiais e subterrâneas sejam consideradas bens dos Estados (Inciso I, Artigo 26). Com isso, a União estabelece normas gerais para os recursos hídricos enquanto os Estados regulamentam normas específicas, uma vez que o mesmo diploma legal atribui aos Estados, Distrito Federal e Municípios, em conjunto com a União, a competência comum (Artigo 23) e concorrente (Artigo 24) sobre a elaboração de legislações relativas à proteção do meio ambiente.

Para tanto, no âmbito federal foi instituída a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) pela Lei Federal nº 9.433/1997 (Lei das Águas) e, com ela, o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH), caracterizado como o conjunto de órgãos e colegiados que concebe e implementa a PNRH (vide Figura 2). Cabe ressaltar que a unidade territorial de gestão dos recursos hídricos é a Bacia Hidrográfica.

Tal sistema tem como principais objetivos: Coordenar a gestão integrada das águas; Arbitrar administrativamente os conflitos relacionados aos recursos hídricos; Planejar, regular e controlar o uso, bem como a recuperação dos corpos d'água; e, Promover a cobrança pelo uso da água. Além disso, é composto pelo Conselho

Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), pela Secretaria de Recursos Hídricos e Qualidade Ambiental (SRQA), pela Agência Nacional de Águas (ANA), pelos Conselhos Estaduais de Recursos Hídricos (CERH), pelos Órgãos Gestores de Recursos Hídricos Estaduais (Entidades Estaduais), pelos Comitês de Bacia Hidrográfica e pelas Agências de Água.

**Figura 2 – Organograma: Matriz e Funcionamento do SINGREH**



**Fonte:** O que é SINGREH?. Adaptado de ANA, 2020.

### 2.1.2 Contexto Estadual

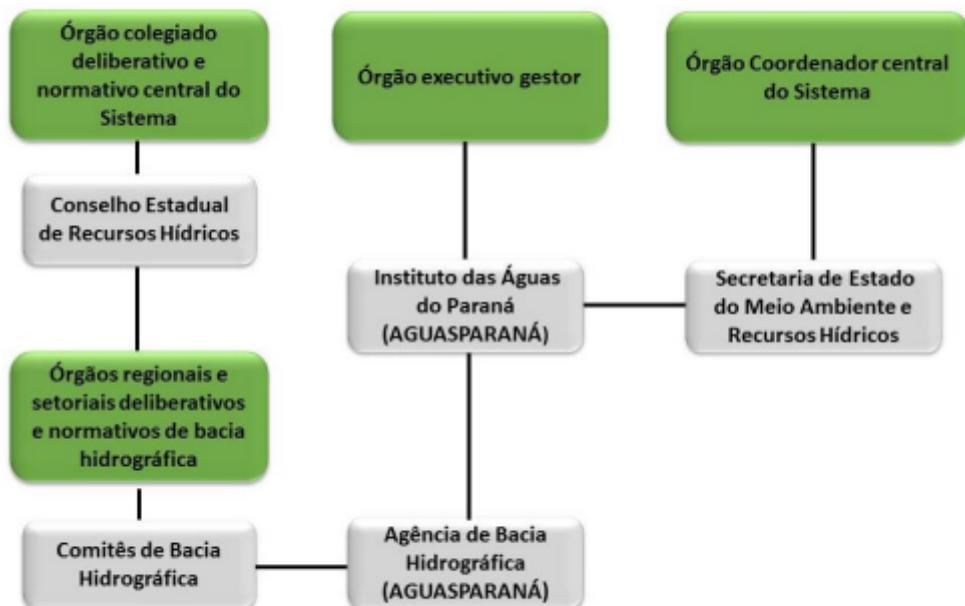
Em relação ao Estado do Paraná, tendo em vista o caráter duplo da dominialidade dividida pela União e Estados sobre os recursos hídricos (superficiais e subterrâneos), existem marcos legais que suplementam aqueles estabelecidos no âmbito federal, de maneira a parametrizar as ações em território paranaense.

Há uma Política Estadual de Recursos Hídricos (PERH), instituída pela Lei Estadual nº 12.726/1999, e um Sistema Estadual de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SEGRH), criado pelo mesmo diploma legal, que regulamentam e implementam, respectivamente, a gestão dos referidos recursos no Estado.

O SEGRH, exibido na Figura 3, de forma semelhante ao SINGREH, é constituído pelo Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CERH/PR), pela Secretaria de Estado do Desenvolvimento Sustentável e do Turismo (SEDEST), pelo Instituto das Águas do Paraná (ÁGUAS PARANÁ, atualmente integrante do Instituto Água e Terra - IAT), pelos Comitês de Bacia Hidrográfica e pelas Gerências de Bacia Hidrográfica.

**Figura 3 – Organograma: Matriz e Funcionamento do SEGRH**

*Sistema Estadual de Gerenciamento de Recursos Hídricos do estado do Paraná*



**Fonte:** Leis Estaduais nº 12.726/1999 e nº 16.242/2009. Adaptado de PROGESTÃO, 2017.

Como um dos instrumentos norteadores da PERH, o Plano Estadual de Recursos Hídricos (PLERH; PARANÁ, 2009) encontra-se em fase de consolidação, com a implementação dos programas organizados em ações instrumentais propostos na elaboração do referido plano, sendo eles: Ações Estratégicas de Base; Ferramentas de apoio a tomada de decisão; Aplicação, ampliação e consolidação da base de conhecimentos especializados do órgão gestor de recursos hídricos; Programa de Capacitação para a Gestão de Recursos Hídricos; Programa Integrado de Comunicação; e, Proposta de Programas voltados aos Recursos Hídricos. Os principais objetivos do PLERH (PARANÁ, 2009) são: Articulação do PLERH com outros níveis e instâncias de planejamento; Estruturação do SEGRH; e, Definição de diretrizes para aplicação dos instrumentos da PERH.

### 2.1.3 Contexto Municipal

Tendo em vista as competências elencadas anteriormente para União e Estados, cabe ao município, conforme a Constituição Federal, agir sobre os recursos hídricos de modo a “proteger o meio ambiente e combater a poluição em qualquer de suas formas” (Inciso VI, Art. 23), além de “registrar, acompanhar e fiscalizar as concessões de direitos de pesquisa e exploração de recursos hídricos e minerais em seus territórios” (Inciso XI, Art. 23), monitorando, no mínimo, a sua utilização de fato.

Sendo assim, como forma efetiva de agir sobre seu território quanto à gestão dos recursos hídricos, em especial os subterrâneos, a municipalidade deve exercer as suas competências (Quadro 1) administrativas, comuns-exclusivas, e legislativas, exclusivas-supletivas, através de instrumentos eficazes, como por exemplo o Plano Diretor e o respectivo Zoneamento Ambiental.

## Quadro 1 – Competências Municipais relacionadas às Águas

Competência do Município	Base Legal
Proteger o meio ambiente e combater a poluição em qualquer de suas formas.	Inciso VI, Art. 23 da CF; Lei Federal Complementar nº 140/2011.
Fiscalizar o cumprimento das normas ambientais por meio dos órgãos ambientais municipais.	Inciso VI, Art. 23 da CF; Inciso VI, Art. 6º da Lei Federal nº 6.938/1981; § 3º, Art. 17 da Lei Federal Complementar nº 140/2011.
Organizar e prestar os serviços públicos de interesse local, nos quais se inclui os serviços de saneamento: abastecimento de água, esgotamento sanitário, limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos, drenagem e manejo de águas pluviais urbanas.	Inciso V, Artigo 30 da CF; Lei Federal nº 11.445/2007.
Promover o ordenamento territorial, mediante planejamento e controle do uso, do parcelamento e da ocupação do solo urbano; Utilizar todos os instrumentos previstos na Lei Federal nº 10.257/2002, com especial ênfase ao plano diretor e ao zoneamento ambiental, bem como definir espaços territoriais protegidos.	Inciso VIII, Art. 30 e Art. 182 da CF; Incisos IX e X, Art. 9º da Lei Federal Complementar nº 140/2011.
Executar e fazer cumprir no município as políticas nacionais, estaduais e municipais relacionadas à proteção do meio ambiente, exercendo a gestão dos recursos ambientais no âmbito de suas atribuições.	Incisos I, II e III, Art. 9º da Lei Federal Complementar nº 140/2011.
Promover a integração de programas e ações de órgãos e entidades da administração pública federal, estadual e municipal, relacionados à proteção e à gestão ambiental no município.	Inciso IV, Art. 9º da Lei Federal Complementar nº 140/2011.
Promover o desenvolvimento de estudos e pesquisas direcionados à proteção e à gestão ambiental, divulgando os resultados obtidos.	Inciso VI, Art. 9º da Lei Federal Complementar nº 140/2011.
Organizar e manter o Sistema Municipal de Informações sobre Meio Ambiente e prestar informações aos demais entes.	Incisos VII e VIII, Art. 9º da Lei Federal Complementar nº 140/2011.
Promover e orientar a educação e conscientização pública para a proteção do meio ambiente.	Inciso XI, Art. 9º da Lei Federal Complementar nº 140/2011.
Promover o licenciamento ambiental das atividades ou empreendimentos: de impacto ambiental de âmbito local, conforme tipologia definida pelo respectivo Conselho Estadual de Meio Ambiente, considerados os critérios de porte, potencial poluidor e natureza da atividade; ou, localizados em unidades de conservação instituídas pelo Município, exceto em Áreas de Proteção Ambiental (APAs).	Inciso XIV, Art. 9º da Lei Federal Complementar nº 140/2011.
Participar da composição dos Comitês de Bacia Hidrográfica onde está situado totalmente ou em parte.	Inciso III, Art. 39 da Lei Federal nº 9.433/1997.
Promover a integração das políticas locais de saneamento básico, de uso, ocupação e conservação do solo e de meio ambiente com as políticas federal e estadual de recursos hídricos.	Art. 31 da Lei Federal nº 9.433/1997.
Formular a política pública de saneamento básico e prestar diretamente ou por delegação os serviços de saneamento, definindo o ente responsável pela regulação e fiscalização, bem como os seus procedimentos.	Art. 9º da Lei Federal nº 11.445/2007.
Elaborar os planos de saneamento básico de forma compatível com os planos de bacias hidrográficas nas quais estão inseridos e com o plano diretor municipal.	§ 3º, Art. 19 da Lei Federal nº 11.445/2007.
Realizar a gestão integrada dos resíduos sólidos gerados no seu respectivo território.	Art. 10 da Lei Federal nº 12.305/2010.
Contribuir de forma conjunta com a União e Estados para a manutenção e organização do Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos (Sinir), fornecendo as informações necessárias sobre os resíduos sob sua esfera de competência.	Art. 12 da Lei Federal nº 12.305/2010.
Elaborar os planos municipais de gestão integrada de resíduos sólidos.	Art. 18 da Lei Federal nº 12.305/2010.
Fornecer no âmbito de sua competência, mediante convênio, as informações solicitadas pela coordenação do Sistema Nacional de Vigilância Sanitária (SNVS).	§ 3º, Art. 2º da Lei Federal nº 9.782/1999.
Exercer a vigilância da qualidade da água, em articulação com os responsáveis pelo controle da qualidade da água para consumo humano; Ispelcionar a qualidade da água no sistema ou solução alternativa coletiva de abastecimento de água.	Incisos I e III, Art. 12, Anexo XX da Portaria MS de Consolidação nº 5/2017.
Garantir informações à população sobre a qualidade da água para consumo humano e os riscos à saúde associados.	Incisos V e VI, Art. 12, Anexo XX da Portaria MS de Consolidação nº 5/2017.
Executar as diretrizes de vigilância da qualidade da água para consumo humano definidas no âmbito nacional e estadual.	Inciso VIII, Art. 12, Anexo XX da Portaria MS de Consolidação nº 5/2017.

**Fonte:** A competência do município na gestão das águas subterrâneas e a contribuição da hidrogeologia urbana. (Comunicação Pessoal)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Informações fornecidas por Hermam Vargas Silva, em 08/10/2020.

Competências:

- Administrativa comum, em matéria ambiental, a qual permite que tenham ações destinadas a proteger o meio ambiente e combater a poluição em qualquer de suas formas; preservar as florestas, a fauna e a flora; promover a melhoria das condições de saneamento básico; registrar, acompanhar e fiscalizar as concessões de direitos de pesquisa e exploração de recursos hídricos e minerais em seus territórios (vide incisos VI, VII IX e XI do art. 23 da CF);
- Administrativa exclusiva, para organizar e prestar os serviços públicos de interesse local [...] e promover o ordenamento territorial, mediante planejamento e controle do uso, do parcelamento e da ocupação do solo urbano (vide incisos V e IX do art. 30 da CF);
- Legislativa exclusiva em assuntos de interesse local (inciso I do art. 30 da CF).
- Legislativa supletiva que permite aos municípios suplementar a legislação federal e estadual (inciso II do art. 30 da CF).

Ainda que as águas subterrâneas sejam bens do Estado, quando do seu uso em solo urbano há a prerrogativa de um regramento por parte do ente municipal sobre tal atividade, pois se trata do seu território, mesmo que este regramento esteja mais associado ao acompanhamento e fiscalização da utilização do que com a deliberação, neste caso específico.

Portanto, o município pode ser considerado ente de destaque na gestão dos recursos hídricos subterrâneos, sobretudo quanto ao monitoramento do uso destes, atuando nas dimensões ambiental, de saneamento básico e vigilância sanitária.

#### 2.1.3.1 O Contexto de Londrina-PR

No caso específico do município de Londrina, Estado do Paraná, a gestão dos recursos hídricos subterrâneos é executada pela estrutura estadual, especialmente pelo IAT, considerando a competência legal do Estado para lidar com tal matéria.

Na estrutura do âmbito municipal existem alguns entes relativos àquela preconizada pela PNRH para um sistema de gestão dos recursos hídricos, a saber: Secretaria Municipal do Ambiente (SEMA) e Conselho Municipal do Meio Ambiente (CONSEMMA). Porém, a municipalidade atua de forma meramente permissiva, emitindo num primeiro momento alvará de perfuração e, após a regulamentação do licenciamento ambiental de atividades de impacto local (Lei Ordinária Municipal nº 10.849/2009) e a publicação do novo marco legal do saneamento básico (Lei Federal nº 14.026/2020), num segundo momento autorização ambiental para perfuração (em substituição ao alvará), em ambos os casos mediante concessão de outorga prévia pelo órgão competente (anteriormente a SUDERHSA, atualmente o IAT) e ART (Anotação de Responsabilidade Técnica) do Projeto do Poço.

Embora a competência legal para a gestão do recurso hídrico subterrâneo seja estadual (como visto anteriormente), há que se levar em conta que, quando do período anterior à Lei Federal nº 14.026/2020, havia uma restrição por parte do município à perfuração de poços para captação de águas subterrâneas na área urbana. Isto em função do disposto no artigo 45 da Lei Federal nº 11.445/2007 (Política Nacional de Saneamento Básico), o qual estabelecia a conexão de “toda edificação urbana permanente [...] às redes públicas de abastecimento de água e esgotamento sanitário disponíveis”. Posteriormente à publicação do novo marco legal do saneamento básico, essa restrição caiu devido à possibilidade de utilização das águas subterrâneas por parte de edificações não-residenciais ou condomínios regidos pela Lei Federal nº 4.591/1964.

Considerando essa configuração da estrutura de gestão, assume-se que há a necessidade, no âmbito local, de criação e implementação dos entes faltantes, visando satisfazer as demandas locais com uma organização que dê uma resposta célere e adequada à realidade local (observando os aspectos ambiental, econômico e social), tendo em vista a relevância do município em questão.

Não obstante, Londrina possui alguns elementos legais/legislativos que abrem margem para atuação municipal sobre o tema águas subterrâneas (Quadro 2), contudo cabe ressaltar que são elementos que demandam maior complementação e/ou desenvolvimento para proporcionar a efetiva atuação da municipalidade

**Quadro 2 - Competências do Município de Londrina relacionadas às Águas Subterrâneas**

Competência	Base Legal
A Política Municipal Ambiental articula-se às diversas políticas públicas de gestão e proteção ambiental, de áreas verdes, de recursos hídricos, de saneamento básico, de drenagem urbana e de coleta e destinação de resíduos sólidos.	Art. 112 da Lei Ordinária Municipal nº 10.637/2008.
A capacidade de sustentação ambiental.	Inciso II, Art. 80 da Lei Ordinária Municipal nº 10.637/2008.
Monitoramento de águas subterrâneas visando à manutenção dos recursos hídricos para as atuais e futuras gerações, exigindo o cumprimento da legislação.	Inciso XVII, Artigo 6º da Lei Ordinária Municipal nº 10.967/2010.
O Poder público e a sociedade, em todos os seus segmentos, são responsáveis pela preservação e conservação dos recursos hídricos.	Inciso II, Art. 82 da Lei Ordinária Municipal nº 11.471/2012.
Compatibilizar e controlar os usos efetivos e potenciais da água tanto qualitativos, quanto quantitativamente.	Inciso IV, Art. 84 da Lei Ordinária Municipal nº 11.471/2012.
A captação de água superficial ou subterrânea, seu tratamento, transporte e distribuição deverão atender aos requisitos estabelecidos pela legislação específica, sem prejuízo às demais exigências legais.	Art. 89 da Lei Ordinária Municipal nº 11.471/2012.
Os responsáveis por atividades efetivas ou potencialmente poluidoras e por captação, tratamento, transporte e distribuição de água ficam obrigados a implementar programas de monitoramento de efluentes e da qualidade ambiental, em suas áreas de influência, previamente estabelecidos ou aprovados pela SEMA.	Art. 90 da Lei Ordinária Municipal nº 11.471/2012.
Os técnicos da SEMA terão acesso a todas as fases do monitoramento a que se refere o caput deste artigo, incluídos os procedimentos laboratoriais.	§ 4º, Art. 90 da Lei Ordinária Municipal nº 11.471/2012.
Será permitida a construção de poços tubulares profundos para abastecimento, desde que concedida a outorga pela Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental - SUDERSHA e o alvará de perfuração emitido pela SEMA.	Art. 100 da Lei Ordinária Municipal nº 11.471/2012
Os estudos, os projetos e a execução da perfuração de poços deverão apresentar Anotação de Responsabilidade Técnica (ART), em todas as suas fases, e ser aprovados pelos órgãos federais, estaduais e municipais competentes.	Art. 101 da Lei Ordinária Municipal nº 11.471/2012
Os responsáveis pela operação de poços no Município de Londrina ficam obrigados a realizar análise físicoquímica e bacteriológica da água, no mínimo, semestralmente, e informar o seu resultado aos consumidores e em observância à legislação pertinente.	§ 2º, Art. 101 da Lei Ordinária Municipal nº 11.471/2012
Os poços que estiverem em desconformidade com o padrão de potabilidade, previstos na legislação específica, serão interditados pela SEMA.	Art. 102 da Lei Ordinária Municipal nº 11.471/2012
O fechamento dos poços será de ônus e responsabilidade dos seus proprietários, que deverão lacrá-los e monitorá-los de acordo com as condições estabelecidas pela SEMA, sob pena de multa.	Art. 103 da Lei Ordinária Municipal nº 11.471/2012
Qualquer projeto de implantação de indústria, agroindústria, loteamento, serviço, perfuração de poços, construção de lagos e outros, seja na área urbana ou rural, a ser realizado nas bacias de mananciais de abastecimento da cidade de Londrina, deverá ser previamente aprovado pela SEMA.	Art. 105 da Lei Ordinária Municipal nº 11.471/2012
Na gestão dos recursos hídricos, a SEMA, em conjunto com a Autarquia Municipal de Saúde, deverá desenvolver programas de monitoramento da qualidade das águas.	Art. 109 da Lei Ordinária Municipal nº 11.471/2012
O Município deverá efetuar o cadastramento de todas as captações de água para irrigação ou abastecimento urbano e industrial, discriminando as condições de uso.	Art. 110 da Lei Ordinária Municipal nº 11.471/2012

**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Tratando-se da Lei Orgânica do município de Londrina, nota-se, no Inciso I do art. 5º (tal qual o disposto no Inciso I do art. 30 da Constituição Federal de 1988), que é competência municipal legislar sobre assuntos de interesse local e, no que diz respeito aos recursos hídricos, sobretudo subterrâneos (definidos como assunto de interesse local pela Política Municipal de Saneamento Básico), o que se verifica é uma negligência sobre determinado tema, haja vista a escassez de diplomas legais normatizando/regulamentando tal conteúdo.

Entretanto, esta escassez se depara com a existência de uma base legal inicial minimamente fundamentada, a qual dá (ou ao menos deveria dar) suporte para a regulamentação de fato das águas subterrâneas no território londrinense. Essa base legal está estipulada no Plano Diretor Participativo do Município de Londrina (Lei Ordinária Municipal nº 10.637/2008), mais especificamente no Capítulo IV que aborda a Política Municipal Ambiental, o qual traz em seu 112º artigo a articulação junto a diversas políticas públicas de gestão e proteção ambiental dos recursos hídricos.

Ao debruçar o olhar sobre tal política ambiental londrinense, nota-se que este diploma legal estabelece, naquilo que se refere aos recursos hídricos, como um dos seus princípios:

“a garantia da existência e o desenvolvimento das condições básicas de produção, regularização, disponibilização e conservação de recursos hídricos necessários ao atendimento da população e das atividades econômicas do Município” (LONDRINA, Inciso VI, Art. 113, LEI nº 10.637/2008).

Neste sentido, os recursos hídricos são tratados de forma ampla, abrindo margem para ações diferenciadas sobre suas tipologias, superficiais e subterrâneas. Com isso, na tentativa de direcionar as ações acerca destes recursos, nas diretrizes desta política estão contidos a instituição e aprimoramento da gestão integrada dos recursos hídricos no âmbito municipal, bem como:

“articular a gestão da demanda e da oferta de água, particularmente daquela destinada ao abastecimento da população, por meio da adoção de instrumentos para a sustentação econômica da sua produção nos mananciais” (LONDRINA, Inciso X, Art. 114, LEI nº 10.637/2008).

Porém, ainda assim a abordagem segue abrangente e não determina especificamente a matéria relativa às águas subterrâneas. Por outro lado, a sustentação, mesmo que especificada como econômica, da produção de água nos mananciais através de instrumentos de articulação entre demanda e oferta sugere,

no mínimo, um regramento sobre tal recurso hídrico. Somada a esta dimensão econômica de sustentação está a ambiental, devendo ser considerada na regulação do uso e intensidade de ocupação do solo, de acordo com o inciso II do artigo 80 do Plano Diretor.

Seguindo esta perspectiva, entende-se que na escala do município o sistema de gestão dos recursos hídricos deva estar orientado à executar ações de monitoramento, tendo em vista a relação de proximidade com os pontos de captação de águas subterrâneas (poços tubulares profundos) pois é no território municipal que estes estão localizados. A própria Política Municipal de Saneamento Básico (Lei Ordinária Municipal nº 10.967/2010) traz, no inciso XVII do artigo 6º, a conotação de interesse local sobre o monitoramento das águas subterrâneas. Ademais, este mesmo diploma legal define a gestão eficiente dos recursos hídricos de modo integrado às infraestruturas e serviços de saneamento básico como um dos princípios fundamentais ao estabelecimento de tal política pública.

Inclusive, no próprio Código Ambiental Municipal (Lei Ordinária Municipal nº 11.471/2012), mais especificamente no Capítulo II, do Título IV - Da Proteção Ambiental, que trata dos Recursos Hídricos, existe a previsão de uma gestão sobre os poços tubulares profundos, os quais somente poderão ser construídos conforme concessão de outorga pela Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (SUDERHSA), bem como alvará de perfuração expedido pela Secretaria Municipal do Ambiente (SEMA). Cabe ressaltar a substituição da SUDERHSA pelo ÁGUASPARANÁ e a absorção deste último pelo IAT.

Destarte, a base legal municipal existente apresenta um caráter genérico e mais associado ao registro do que com a gestão propriamente dita. Com isso, a gestão dos recursos hídricos, em especial os subterrâneos, fica a cargo do nível estadual já que a estrutura prevista pelo SINGREH e a legislação pertinente assim o fazem, embora seja necessária a complementação para o devido funcionamento de tal sistema no quesito municipal, quiçá através da criação de um Sistema Municipal de Monitoramento dos Recursos Hídricos Subterrâneos.

## 2.2 MODELAGEM

Sobre o processo de modelagem em si, Safre (2018) apresenta as seguintes etapas:

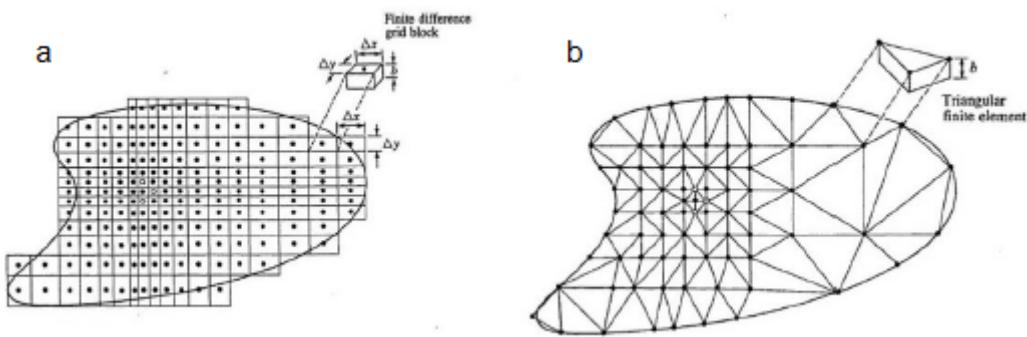
“(i) definição dos objetivos; (ii) análise do processo natural estudado; (iii) elaboração de um modelo conceitual reunindo todas as informações do meio físico e hidrogeológico; (iv) escolha de um código computacional; (v) descrição dos fenômenos físicos de acordo com as equações matemáticas do código (condições de contorno e condições iniciais);(vi) calibração do modelo; (vii) simulação do fluxo da água subterrânea através da aproximação numérica das equações; e (viii) geração de resultados e prognósticos”

Considerando este percurso procedural, a pesquisa se fundamentará metodologicamente nas premissas de autores como Wang e Anderson (1982), Freeze e Cherry (2017), dentre outros, que tratam dos cálculos matemáticos que, por sua vez, visam representar a realidade estudada, bem como nos próprios manuais e tutoriais do *plugin FREEWAT*, os quais indicam como elaborar um modelo conceitual de uma determinada área para, então, aplicar um código computacional que empregue as fórmulas matemáticas de representação da realidade sobre tal modelo.

No tocante às fórmulas matemáticas relativas às águas subterrâneas, de acordo com Anderson e Woessner (1992), indiretamente elas simulam o fluxo através de uma equação principal que represente os processos físicos que ocorrem no sistema, concomitantemente com cálculos que descrevem cargas ou fluxos no decorrer dos limites do modelo, conhecidos como condições de contorno. Para Safre (2018), estes modelos matemáticos podem ser divididos em analíticos, que proporcionam resolução precisa à questão proposta, e em numéricos, os quais possibilitam uma resposta estimada.

Por trabalhar com os dados de maneira mais próxima do real, os modelos numéricos são mais utilizados e, dentre eles, os mais recorrentes são Método de Diferenças Finitas (MDF) e o Método dos Elementos Finitos (MEF), nos quais a equação fundamental é discretizada nas variáveis de espaço X, Y e Z. A diferença entre eles está contida no espaço que recebe a discretização dos cálculos empregados, sendo que no caso do primeiro é um ponto central de uma dada área enquanto que no segundo é uma área entre pontos que formam seu contorno e de outras várias áreas, como apresentado na Figura 4.

**Figura 4 –** Método de Diferenças Finitas (a) e Método de Elementos Finitos (b)



**Fonte:** Wang e Anderson, 1982.

Não obstante, ao passo que se define um modelo matemático para empregar os cálculos e/ou equações que buscam representar a realidade, se inicia, também, a construção do modelo conceitual da área estudada. O modelo conceitual resume as características reais a partir de concepções teóricas, de modo a simplificar as unidades hidrogeológicas conforme semelhanças, ou ainda dividí-las de acordo com suas diferenças, com vistas a possibilitar uma análise facilitada sobre a realidade.

Sobre tal modelo conceitual são aplicadas condições, iniciais e de contorno. As primeiras dizem respeito aos “valores das cargas no instante inicial do modelo” (SAFRE, 2018). E as últimas se referem à especificação da carga hidráulica ou do fluxo nos limites do modelo conceitual, determinando, para Safre (2018), “onde a água entra e sai do sistema”.

Especificamente em relação às condições de contorno, três se destacam, sendo:

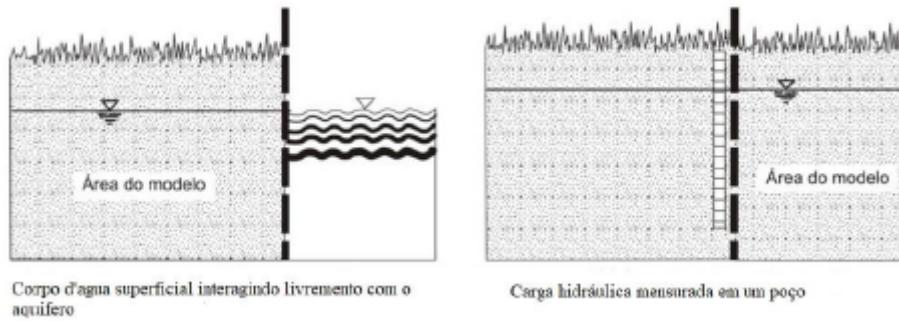
**Tipo I (Condição de Dirichlet):** Contorno de carga hidráulica especificada (Figura 5), por exemplo:

$$h = \text{constante}$$

Conforme Safre (2018):

“Nessa condição de contorno a carga é especificada ou constante no limite do modelo, servindo de referência para a solução. Geralmente, são utilizados rios ou lagos, de carga conhecida, que possuam conectividade hidráulica com o aquífero”.

**Figura 5 –** Condição de Contorno de Carga Especificada



**Fonte:** Adaptado de Safre, 2018.

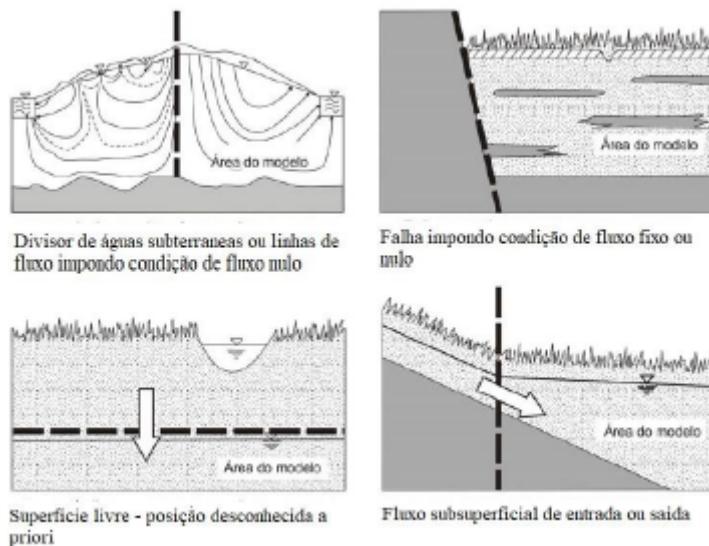
Deve-se, porém, ter cuidado com a afirmação desse contorno ser uma fonte hídrica inesgotável para o sistema.

**Tipo II (Condição de Neumann):** Contorno de fluxo especificado (Figura 6):

Safre (2018), afirma que:

“Esse tipo de condição de contorno é útil, quando o fluxo entre a superfície e as águas subterrâneas é conhecido. O fluxo pode ser nulo ou não. O exemplo mais utilizado é a condição de contorno de fluxo nulo, em que é atribuído que o fluxo é igual a zero na fronteira do domínio. Esse tipo de contorno é comum em áreas de divisores de água subterrâneos”.

**Figura 6 –** Condição de Contorno de Fluxo Especificado



**Fonte:** Adaptado de Safre, 2018.

Ao se utilizar o fluxo nulo em todo o limite do modelo, é necessário indicar uma carga para balizar a resoluções do modelo.

**Tipo III (Condição de Cauchy):** Condição de fluxo dependente da carga hidráulica (Figura 7), expresso matematicamente por:

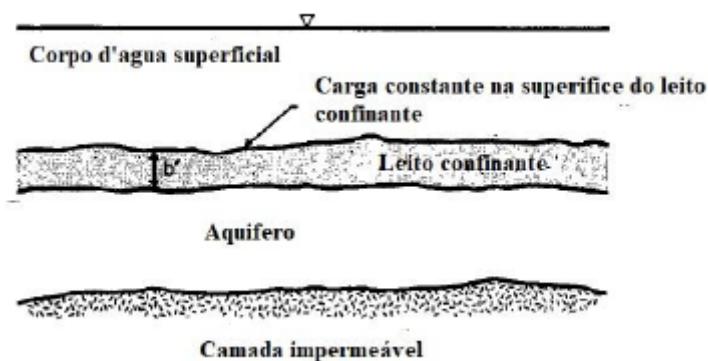
$$\frac{dh}{dn} + ch = \text{constante}$$

onde **c** também é uma constante.

Para Safre (2018):

“Um exemplo desse tipo de contorno é a superfície de um aquífero coberto por um leito semiconfinante que, por sua vez, está coberta por um corpo d’água superficial [...]. A carga, no corpo d’água superficial permanece constante, sendo o fluxo que passa através da camada semiconfinante expresso pela Lei de Darcy”.

**Figura 7 – Condição de Fluxo Dependente da Carga**



**Fonte:** Adaptado de Safre, 2018.

Neste tipo de condição, a carga hidráulica e o fluxo são razões inversamente proporcionais, pois conforme um aumenta o outro diminui, e vice-versa.

### 2.2.1 Ferramenta proposta: o *plugin FREEWAT*

Quanto ao *FREEWAT*, o *plugin* é, para Rossetto *et al* (2015, *apud* SAFRE, 2018):

“um ambiente de modelagem de código aberto e domínio público, para simulação da quantidade e qualidade da água em águas superficiais e subterrâneas com um módulo integrado de gerenciamento e planejamento de água”.

Este *plugin* é combinado às funcionalidades do geoprocessamento, permitindo a integração, manipulação e pós processamento de dados de entrada e saída do modelo, baseando-se nos códigos de simulação do fluxo de água subterrânea da família *MODFLOW* (MCDONALD; HARBAUGH, 1988) do *United States Geological Survey (USGS)* e possuindo a versão integrada *MODFLOW One Water Hydrologic Model - MODFLOW-OWHM* (HANSON *et al*, 2014).

### 2.2.1.1 Aplicabilidade do *FREEWAT*

O uso combinado da água é a junção do uso e gestão dos recursos hídricos, superficiais e subterrâneos, para atender à demanda de água necessária e minimizar os danos potenciais à quantidade ou qualidade do recurso. Portanto, para obter uma representação eficaz do uso combinado da água superficial e subterrânea, é necessário integrar métodos de simulação com cálculos de demanda de água subterrânea, superficial, urbana e agrícola. Além disso, esses modelos devem levar em conta os casos em que não há abastecimento de água suficiente para atender a demanda total de água e propor possíveis estratégias de gestão para lidar com esse problema.

Assim sendo, o *plugin* *FREEWAT* simula problemas de gestão de água aplicando o código *MODFLOW-OWHM* (*One-Water Hydrologic Flow Model*; HANSON *et al*, 2014), que pode ser usado também para incluir o cálculo específico da demanda de água proveniente de ambientes rurais e áreas plantadas. O *FREEWAT* inclui recursos para lidar com a gestão de recursos hídricos. Seu objetivo específico é explorar o resultado de uma simulação numérica para resolver problemas de controle e otimização do fornecimento de água. Isso pode ser obtido com sucesso aumentando os resultados da simulação com base em células da grade, para obter balanços de demanda e uso de água, com foco em uma (ou mais) zona(s) do domínio do modelo.

### 2.2.1.2 Conceituação da Gestão Hídrica no *FREEWAT*

O conceito básico do código de simulação de fluxo hídrico *MODFLOW-OWHM*, empregado pelo *FREEWAT*, é a Unidade de Demanda Hídrica (UDH), nomeadamente qualquer “entidade” consumidora de água (zona urbana,

zona industrial, quintas, zonas rurais, zonas de vegetação natural, etc.). Em cada UDH, o usuário pode associar uma ou mais fontes (ou seja, termos de demanda ou abastecimento), variando no tempo. Ao final da simulação, um balanço específico para cada UDH é produzido, além do balanço global para todo o modelo. Portanto, o usuário pode analisar um balanço de UDH, bem como uma comparação entre diferentes UDHs. Do ponto de vista da modelagem, uma UDH é uma sub-região do modelo, formada por um grupo de células da primeira camada do modelo (camada superior). Assim, toda a grade é dividida em uma ou mais UDH, atribuindo à cada célula um ID UDH (ou seja, cada célula está associada a um único e apenas um Identificador de Unidade de Demanda Hídrica).

Para cada UDH, uma demanda total de água é inserida ou calculada, com a possibilidade de contabilizar várias maneiras de definir diferentes termos de demanda hídrica, a saber: demanda por usos do solo; demanda urbana e industrial como “suprimentos negativos”; e, Requerimento de Demanda Total (considerando os déficits de entradas naturais e captação artificial, bem como as perdas por ineficiência).

Em cada período de estresse, o código tenta satisfazer o Requerimento de Demanda Total com um ou mais termos de demanda hídrica em cada UDH, priorizando a transferência de água de/para uma UDH por vários tipos de fontes (sem simular o processo de transporte), as entregas semi e/ou totalmente encaminhadas de águas superficiais (através da especificação de pontos de desvio do canal principal e/ou uma rede de encaminhamento de fluxo) e o bombeamento de água subterrânea (poços) necessária.

No *plugin*, o usuário tem a possibilidade de especificar cotas de águas, superficiais ou subterrâneas, para cada UDH de modo a representar as restrições sobre a água. Tais cotas podem ser introduzidas em um modelo como outorgas por período de estresse, apresentadas em unidades de volume num determinado tempo, geralmente  $m^3/s$ .

Além disso, cada UDH pode conter qualquer tipo de limite físico ou de governança, podendo ser um limite administrativo ou uma outorga por exemplo, os quais são úteis para a avaliação dos limites de abastecimento de água subterrânea, como aqueles impostos pelo desenvolvimento de um plano de gestão de bacia ou análise de sustentabilidade. Exemplos de efeitos secundários que geram estes outros limites são a subsidência de terra, a intrusão de água do mar, a manutenção

de ecossistemas dependentes de água subterrânea ou esquemas de adaptação para mudanças climáticas e a variabilidade climática.

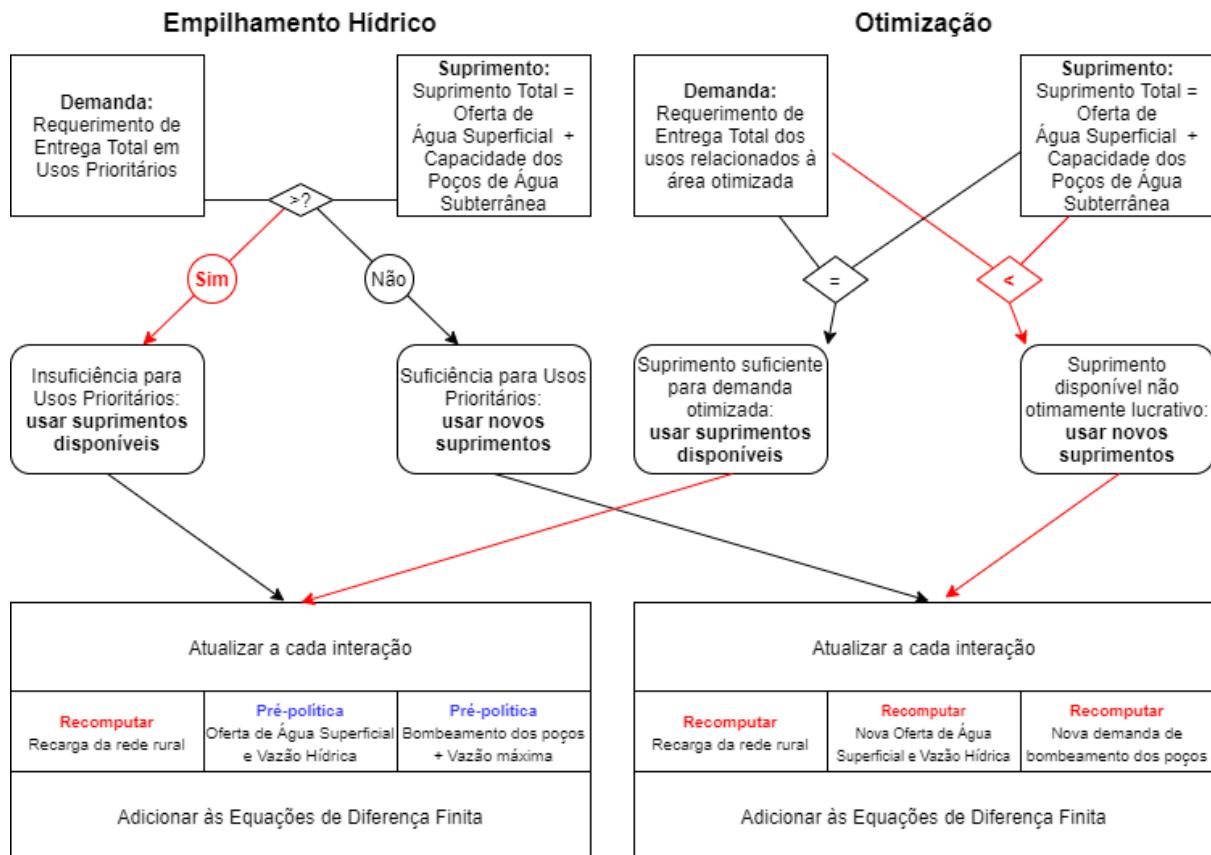
Uma vez que a demanda e o abastecimento de água tenham sido calculados (para cada período de estresse), levando em consideração as possíveis restrições no fornecimento de água, superficial ou subterrânea, o código compara os dois termos.

Se a demanda for maior que o abastecimento, então essa UDH está em um cenário deficitário. Nesse caso, o código permite ao usuário estimar as distribuições ótimas dos componentes da oferta para fazer frente a esse déficit ao aplicar dois métodos de otimização diferentes:

1. Usos Prioritários: o usuário classifica prioritariamente os usos e o abastecimento de água é distribuído de acordo com tal classificação.
2. Otimização Econômica: o usuário define os custos de abastecimento de água e os lucros relacionados à tal utilização. O abastecimento de água é distribuído conforme o ranking de rentabilidade estabelecido pela relação custo-benefício para cada uso e em cada célula.

Na Figura 8, um fluxo de trabalho descreve como o código procede em caso de cenário deficitário, quando uma das duas opções de otimização é ativada.

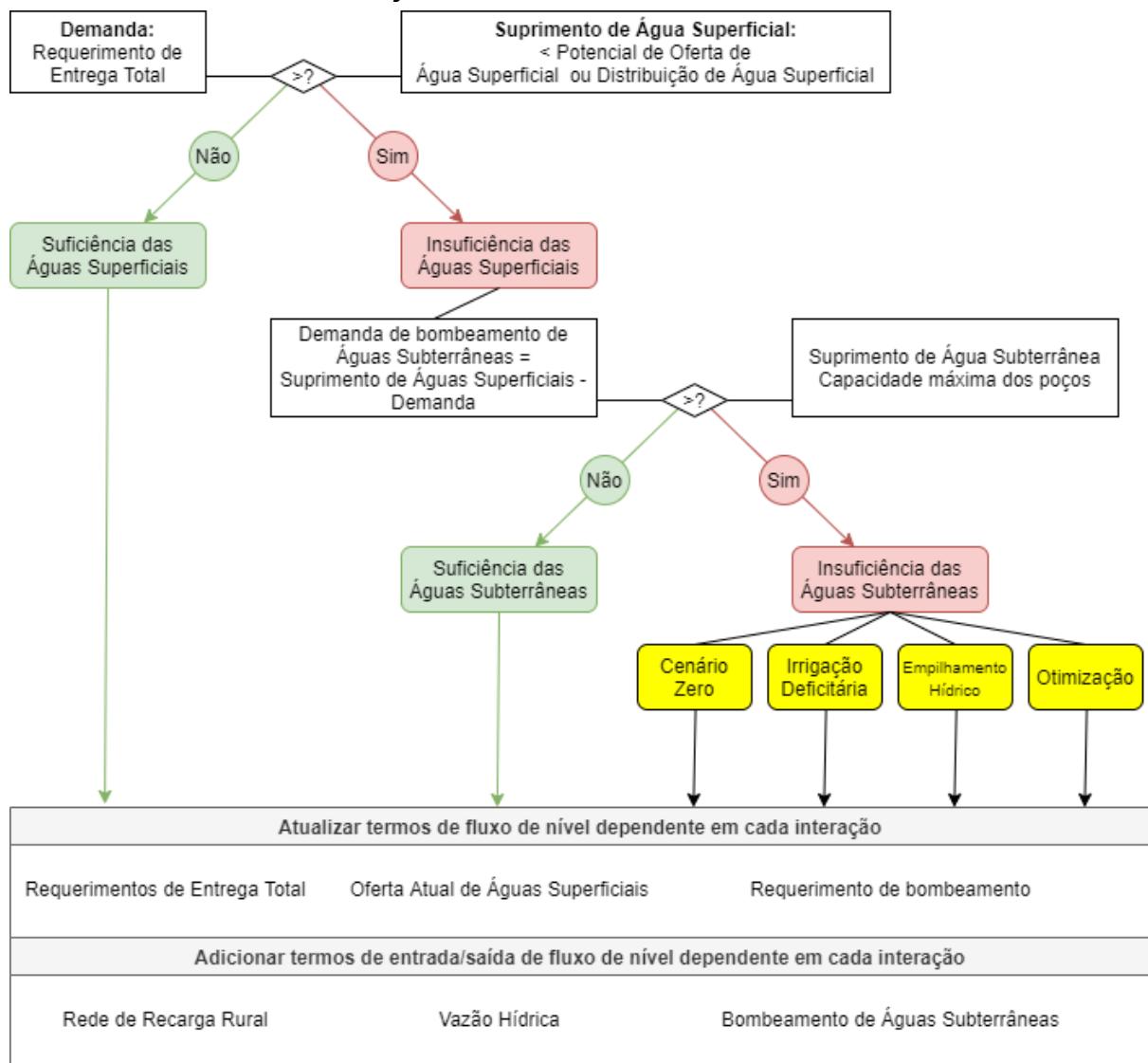
**Figura 8** - Procedimento aplicado para atualizar termo-fonte de fluxo, dependendo da política de resposta ao déficit selecionada pelo usuário



**Fonte:** Adaptado de Borsi *et al* (2019).

Um resumo da demanda e oferta de água, juntamente com a especificação de possíveis cenários de déficit, é apresentado na Figura 9.

**Figura 9 - Resumo do abastecimento e demanda hídrica, bem como método de ação com cenários deficitários**



**Fonte:** Adaptado de Borsi *et al.* (2019).

### 2.2.1.3 Implementação no FREEWAT

Os recursos de gerenciamento de água do *FREEWAT* podem ser aplicados após a configuração e execução do modelo hidrogeológico. Para isso, o usuário deve ter confiança no modelo, nos valores dos parâmetros (potencialmente determinados/analisados por meio das ferramentas de sensibilidade e calibração) e na consistência do modelo de balanço de água. Além disso, são necessárias as seguintes etapas:

1. Definir a classificação do domínio do modelo em UDHs.
2. Definir as propriedades para cada UDHs (eficiência, custos de abastecimento de água, cotas de água, etc.)

3. Ligar os poços à UDHs, incluindo para cada poço o valor máximo para a taxa de bombeamento.
4. Conectar desvios de oleoduto à UDHs (se houver).
5. Definir os solos e a distribuição de usos na grade superior do modelo.
6. Definir as propriedades dos solos, para cada solo definido na etapa anterior.
7. Definir as propriedades dos usos, para cada um definido na etapa anterior (coeficientes de eficiência de perdas de evapotranspiração, lucros da utilização, coeficiente de uso, etc).
8. Definir dados de precipitação e evapotranspiração de referência.
9. Selecionar as opções do modelo e executar.
10. Analisar o balanço das UDHs plotando os resultados impressos nos arquivos de saída *MODFLOW-OHWM* (*FREEWAT*> Pós-processamento> Plotar balanços para UDH).

A aplicação do *MODFLOW-OHWM* foi testada em vários modelos de gestão hídrica, conforme a seguir:

- Hansons *et al.* (2010) analisaram a simulação de um sistema de armazenamento e recuperação de aquífero e sistema de distribuição de água costeira relacionado com o escoamento local.
- Faunt (2009), relata a aplicação no Sistema Aquífero do Vale Central na Califórnia (EUA), onde o Programa de Recursos de Água Subterrânea do Departamento de Pesquisas Geológicas dos EUA (USGS) conduziu um estudo sobre a disponibilidade de água subterrânea, acoplando o uso à longo prazo de dados de monitoramento de água subterrânea (entre outubro de 1961 e setembro de 2003) com modelos de água subterrânea.
- Schmid *et al.* (2006) estudaram um caso hipotético de gestão de água em áreas urbanas e rurais, em um vale aluvial ligeiramente inclinado de oeste para leste. O modelo inclui duas unidades de água (rural e urbana), com três tipos de usos (vegetação urbana, pomar e pastagem) e três tipos de solo (silte, argila siltosa e franco-arenosa). É identificada uma única unidade hidroestratigráfica de superfície basal plana (0 m.s.n.m.): uma unidade arenosa, com espessura variável entre 277 m e 300 m, hospedando um aquífero freático poroso. O modelo é atravessado por um canal principal de superfície que fornece água ao distrito de irrigação através de um canal de

irrigação e por meio de um medidor. Como outra fonte de água doce, a água subterrânea é bombeada através de 10 poços verticais, 4 dos quais fornecem água para o distrito de irrigação, enquanto 6 se dedicam a satisfazer a demanda de água da área urbana. A simulação é executada em condições transitórias ao longo de um ano (365 dias).

O objetivo deste modelo é aplicar estratégias de otimização para atender a demanda de água das duas unidades de água. Em particular, os objetivos específicos do estudo de modelagem são:

1. Investigar as relações entre as águas subterrâneas e superficiais em termos de balanço hídrico.
2. Investigar a possibilidade de satisfazer totalmente, ou não, as necessidades hídricas de ambas as unidades.
3. Avaliar o efeito da utilização combinada de águas subterrâneas e superficiais em ambas as unidades, a fim de evitar o desequilíbrio e/ou o esgotamento dos recursos subterrâneos.

Como conclusão, pode-se afirmar o seguinte sobre tal estudo:

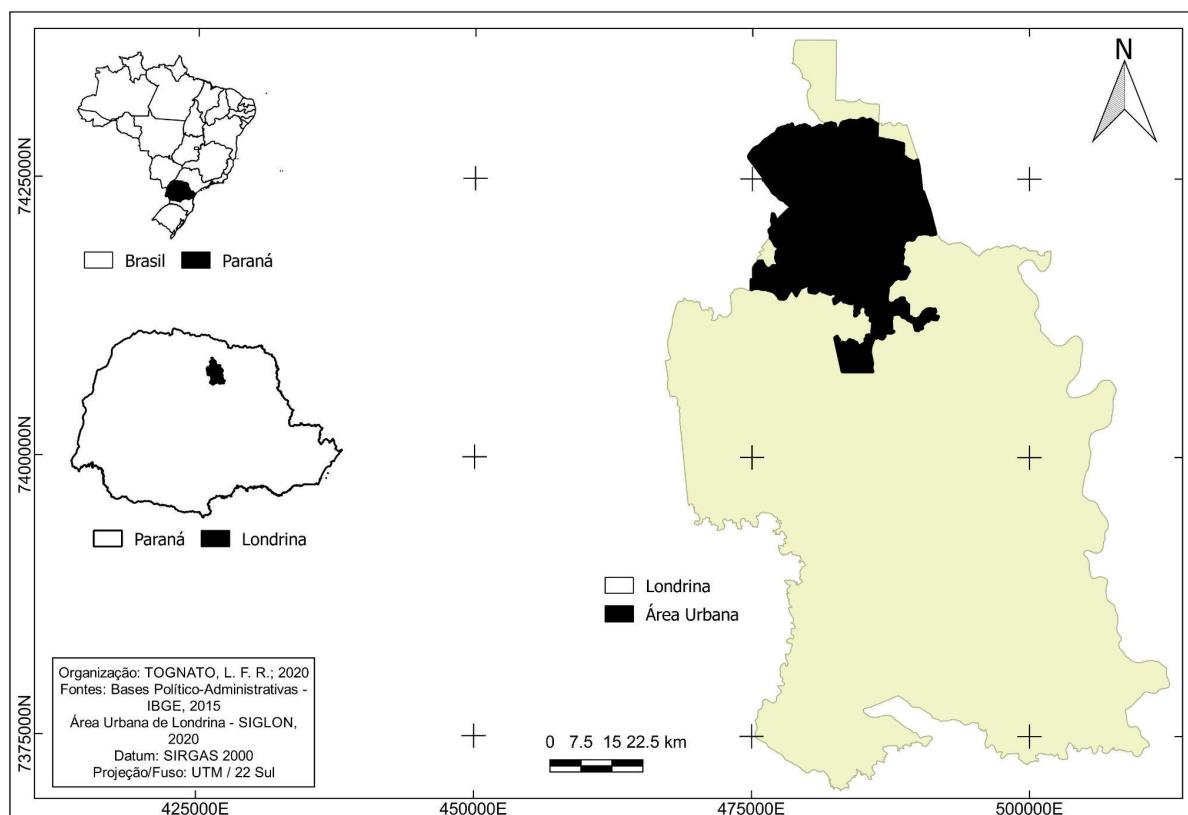
- Na área urbana, o bombeamento de água subterrânea não atende plenamente a demanda de água em determinados períodos (especificamente em períodos secos), resultando em um cenário deficitário.
- Na área rural, o abastecimento de água fornecido pelo bombeamento de água subterrânea através de poços atende a demanda de água, desde que a água subterrânea seja a única fonte disponível de água doce.
- Ativar um ponto de desvio do canal de superfície principal para o distrito de irrigação permite satisfazer as necessidades de irrigação da área rural. Nesse caso, não há necessidade de captar água subterrânea, levando a uma exploração sustentável do aquífero.

Portanto, este exemplo simples mostra como diferentes cenários de Gestão Hídrica podem ser simulados dentro do *FREEWAT*, considerando um modelo de referência comum e incluindo/excluindo fontes de água e/ou direitos de água (outorgas) para cada Unidade de Demanda Hídrica definida no domínio do modelo.

### 3 ÁREA DE ESTUDO

Como área de estudo, optou-se pelo enfoque na área urbana de Londrina-PR, apresentada na Figura 10, por conta do quantitativo populacional de 580.870 mil habitantes conforme IBGE (2021) que, associado às ofertas de serviços na urbe londrinense, a configura como um grande centro estadual. Isto torna a demanda por recursos hídricos notadamente elevada, na ordem de 293,68 litros de água por habitante por dia ( $0,293 \text{ m}^3/\text{hab./ano}$ ) conforme Larini e Santos (2015), superando a indicação de 110 litros diários por habitante feita pela Organização das Nações Unidas (ONU).

**Figura 10 – Mapa de Localização da Área Urbana de Londrina - PR**



**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Naquilo que se refere às águas subterrâneas, Larini e Santos (2015) apontam que 311 poços tubulares profundos utilizam o meio subterrâneo como fonte de captação de água para abastecimento humano, representando 11,83% do abastecimento público de Londrina e quase 50% da totalidade dos poços da Região Metropolitana de Londrina (RML).

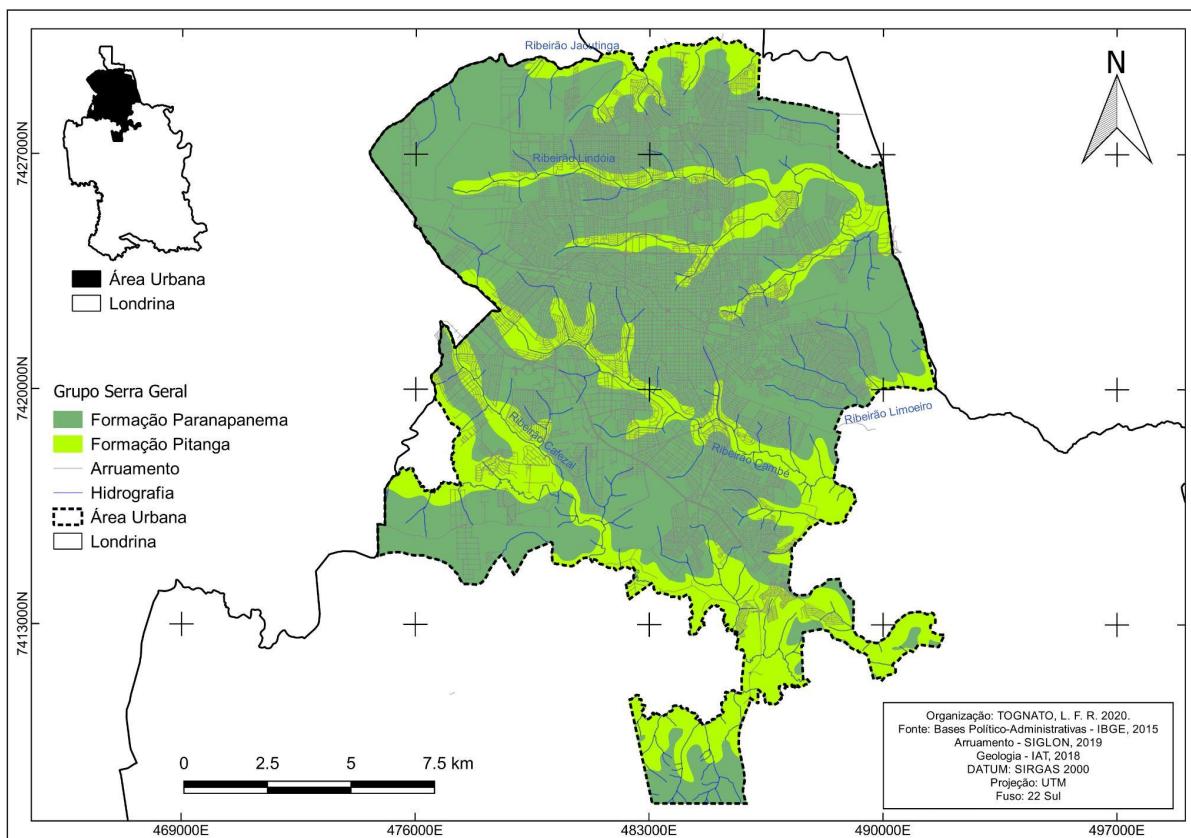
### 3.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

A Área Urbana de Londrina, de aproximadamente 222.780,61 km<sup>2</sup>, é caracterizada no quesito físico-geográfico por estar assentada sobre a litologia basáltica (a qual se tratará especificamente mais adiante), por compreender os domínios fitogeográficos Floresta Estacional Semidecidual (Montana e Submontana) e Floresta Ombrófila Mista (Montana), por estar inserida na Bacia Hidrográfica do Rio Tibagi e por apresentar a Classificação Climática Cfa segundo Köppen (NITSCHE *et al*, 2019).

#### 3.1.1 Geologia

A geologia da área de estudo (Figura 11) é composta por basaltos, pertencentes ao Grupo Serra Geral (ITCG, 2018), sendo identificadas duas formações litológicas, que estão inseridas no Subgrupo Serra Geral Centro-Norte e integram o grupo supracitado, a saber: Formação Paranapanema (SBKSGCNPP) e Formação Pitanga (SBKSGCNPI).

**Figura 11 – Mapa Geológico da Área Urbana de Londrina - PR**



**Fonte:** Elaborado pelo autor.

A primeira, conforme ITCG (2018), é composta por:

“Derrames tabulares espessos, de basaltos e andesibasaltos subalcalinos e secundariamente traquibasaltos alcalinos do Tipo 1 CN (LSi-LZr-LTi-LP), enriquecidos em elementos compatíveis, que podem hospedar pegmatitos básicos, com raras e delgadas intercalações de basaltos, andesibasaltos subalcalinos do Tipo 3 (LSi-LZr-HTi-LP). Raras intercalações de depósitos vulcanoclásticos maficos e/ou sedimentares vulcanogênicos. Diques e sills de rochas básicas com a mesma tipologia geoquímica”.

Em relação a segunda formação, ITCG (2018) a define como:

“Derrames de basaltos, andesibasaltos, traquibasaltos e traquiandesitos basálticos, do Tipo 4 (LSi-LZr-HTi-HP), que são enriquecidos em elementos incompatíveis, com intercalações de basaltos, andesi-basaltos, andesitos, traquiandesitos basálticos e traquiandesitos do Tipo 2 (LSi-LZr-LTi-HP) e basaltos e andesibasaltos do Tipo 3 (LSi-LZr-HTi-LP); simples, tabulares, espessos e com textura fanerítica, ou compostos por conjuntos de lobos ou de derrames delgados de textura hipohialina ou por conjuntos de lobos delgados do Tipo S. Frequentes intercalações de depósitos vulcanoclásticos maficos com até 12 m de espessura e de depósitos sedimentares vulcanogênicos. Localmente são descritas rochas piroclásticas básicas de composição mugearítica e hawaítica. Derrames de riolacitos, dacitos e traquidacitos do Tipo 14 (HSi-HZr-LTi-HP), riolitos, dacitos e traquidacitos do Tipo 13 (HSi-HZr-LTi-LP) com raros e delgados derrames de dacitos e traquidacitos do Tipo 10 (HSi-LZr-LTi-HP), posicionados sobre basaltos hipohialinos ou sobre arenitos da Formação Botucatu. Feições de injeção de lavas ácidas nesses substratos são frequentes. Diques e sills de rochas básicas (predominantes) e de ácidas (raros)”.

Geralmente identificadas na forma de derrames, as profundidades e/ou espessuras variam entre 900 e 1000 metros, havendo exceções identificadas por Piccirillo e Melfi (1988).

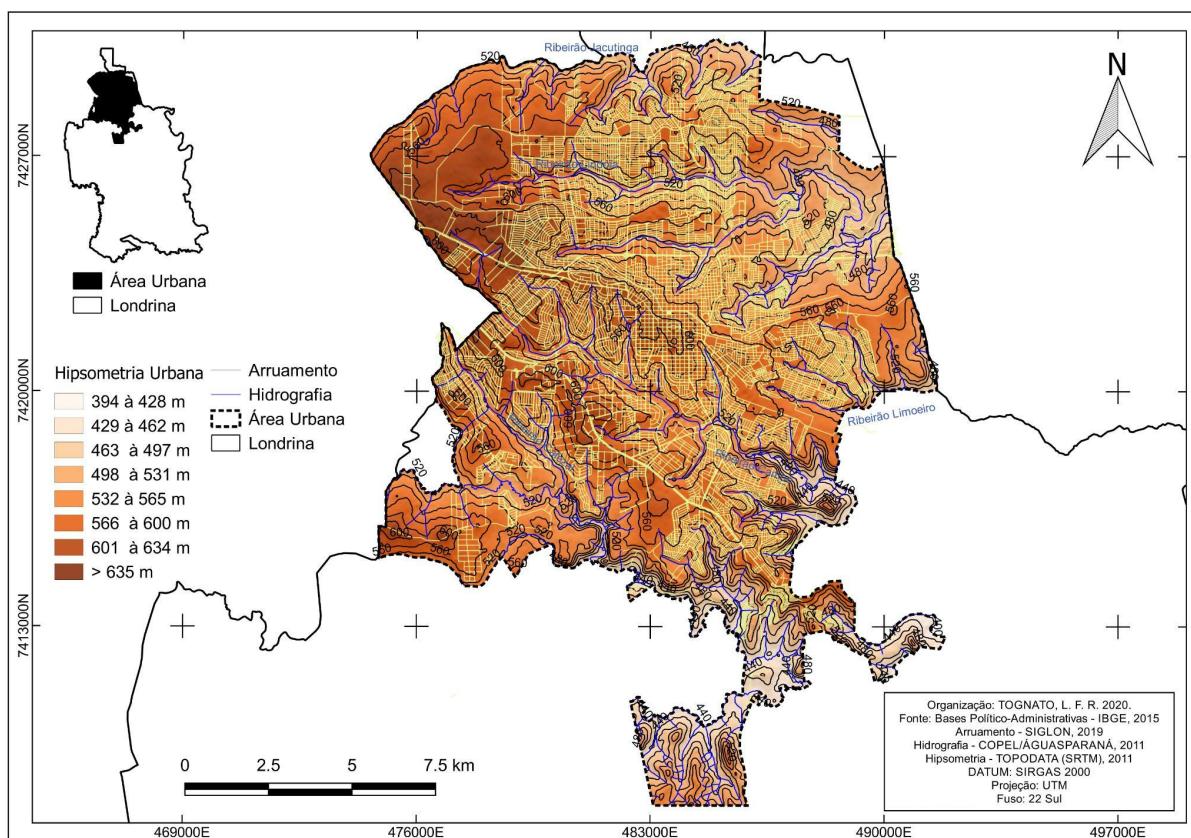
Uma característica marcante dessa formação rochosa são as falhas/fraturas que a compõem, seja nas porções amigdaloidais/vesiculares ou naquelas maciças, possuindo um direcionamento geral N-S, N-W, N-E, N-E e E-W na área em questão. Esta característica é notada em outros aspectos, haja vista que “tais estruturas são responsáveis pela orientação de toda rede de drenagens do município, além de alojar aquíferos” (PINESE; GUIMARÃES, 2018).

### 3.1.2 Geomorfologia

Sobre a geomorfologia de Londrina, conforme MINEROPAR (2006), o município está inserido na sub-unidade morfoescultural denominada “Planalto de Londrina”, a qual pertence à unidade morfoescultural “Terceiro Planalto Paranaense” que, por sua vez, integra a Unidade Morfoestrutural “Bacia Sedimentar do Paraná”.

Hipsometricamente, a área urbana londrinense porta uma variação entre 394 e 635 metros de altitude (Figura 12), variação esta que se dá no sentido W-E, dos maiores valores para os menores, estando associada às drenagens pertencentes ao baixo curso do Rio Tibagi que modelam o relevo da região.

**Figura 12 – Mapa Hipsométrico da Área Urbana de Londrina - PR**



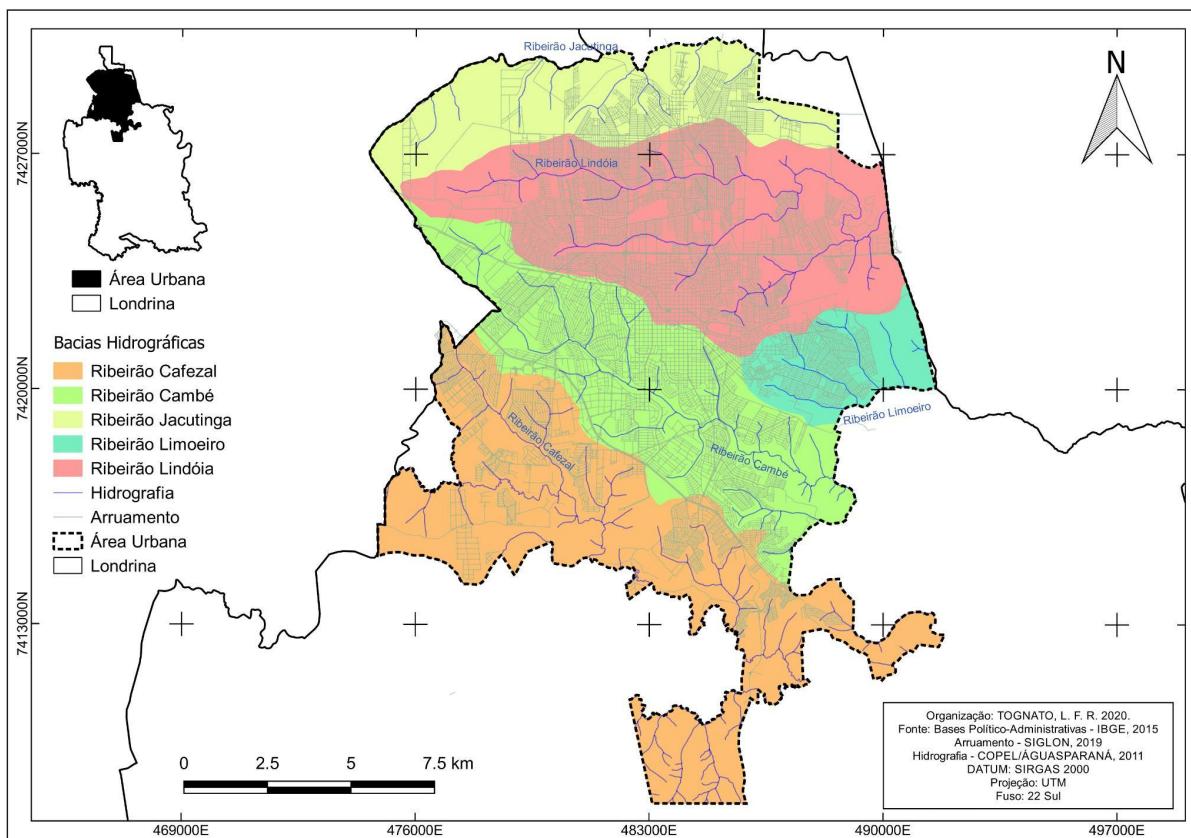
**Fonte:** Elaborado pelo autor.

### 3.1.3 Hidrografia

No que diz respeito ao tema hidrográfico, a área urbana de Londrina é formada por 5 bacias hidrográficas (SANTOS, 2012) a saber: BH Ribeirão Cafezal; BH Ribeirão Cambé; BH Ribeirão Jacutinga; BH Ribeirão Limoeiro; e, BH Ribeirão Lindóia (Figura 13). Destas destaca-se o Ribeirão Cafezal, da bacia homônima, curso d'água que tem participação em 40% do abastecimento público do município. O restante é captado diretamente do Rio Tibagi, que se situa a leste da área urbana.

A drenagem, segundo Barros *et al* (2011), é integrada por cursos d'água perenes e bem distribuídos, possui um padrão dendrítico, se direciona no sentido W-E em razão do relevo e litologia locais, além de desaguar no Rio Tibagi.

**Figura 13 – Mapa Hidrográfico da Área Urbana de Londrina - PR**



**Fonte:** Elaborado pelo autor.

### 3.1.4 Clima

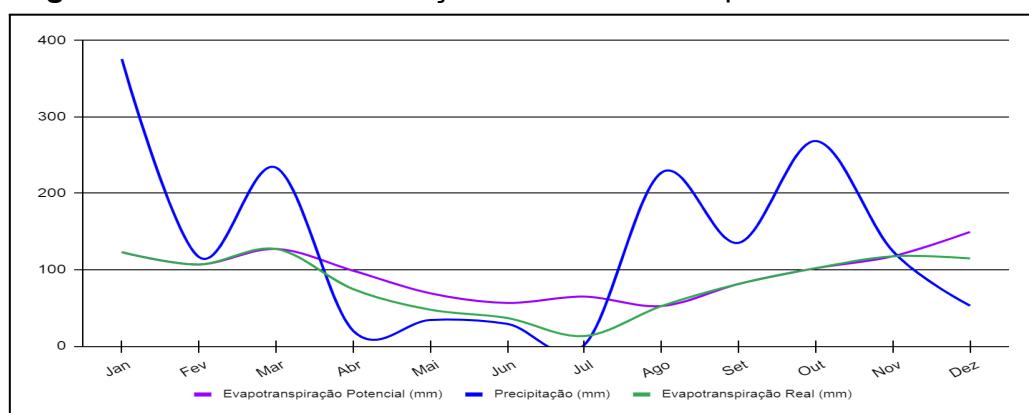
Em relação ao elemento climático, de acordo com o Instituto Nacional de Meteorologia (2021), a área em questão possui uma média total anual pluviométrica de 134,97 mm e uma soma total anual pluviométrica de 1.619,7 mm, sendo janeiro o mês mais chuvoso (375,7 mm) e julho o menos chuvoso (1,8 mm). Outra característica importante é a temperatura média anual do ar, a qual registra o valor de 22,4° C. Dezembro é o mês mais quente (26° C) enquanto agosto é o mais frio (17,9° C), segundo dados apresentados na Tabela 1 (INMET, 2021). Cabe ressaltar que os dados são referentes ao ano de 2018, tendo em vista a compatibilização com os dados dos poços tubulares utilizados (que são os mais atuais e datam do mesmo período) além de que, em determinado ano, o conjunto de dados utilizados para a caracterização do balanço hídrico está completo.

**Tabela 1 – Balanço Hídrico do Município de Londrina - PR**

Meses	Temperatur a (°C)	Evapotranspiração Potencial (mm)	Precipitação (mm)	P-ETP	Evapotranspiração Real (mm)	Excesso	Déficit	Escoamento
<b>Jan</b>	24,0	123,05	375,7	252,65	123,05	252,65	0	18,94
<b>Fev</b>	24,0	106,94	116,6	9,66	106,94	9,66	0	89,72
<b>Mar</b>	25,2	127,29	233,7	106,41	127,29	106,41	0	73,76
<b>Abr</b>	23,6	98,80	20,3	-78,50	74,69	0	-78,50	69,64
<b>Mai</b>	20,3	69,23	34,3	-34,93	47,75	0	-34,93	97,02
<b>Jun</b>	19,2	56,58	29,2	-27,38	36,90	0	-27,38	95,42
<b>Jul</b>	20,0	64,94	1,8	-63,14	13,25	0	-63,14	60,18
<b>Ago</b>	17,9	52,57	227,3	174,73	52,57	174,73	0	30,09
<b>Set</b>	21,4	81,51	135,2	53,69	81,51	53,69	0	56
<b>Out</b>	22,6	102,09	268,5	166,41	102,09	166,41	0	62,6
<b>Nov</b>	24,0	117,68	124,2	6,52	117,68	6,52	0	82,5
<b>Dez</b>	26,0	149,50	52,9	-96,60	114,84	0,00	-96,60	129,71
<b>Média</b>	22,4	95,85	134,975	39,13	83,21	64,17	-25,05	72,13
<b>Soma</b>	--	1150,19	1619,7	469,51	998,56	770,07	-300,55	865,58

Fonte: INMET (2021).

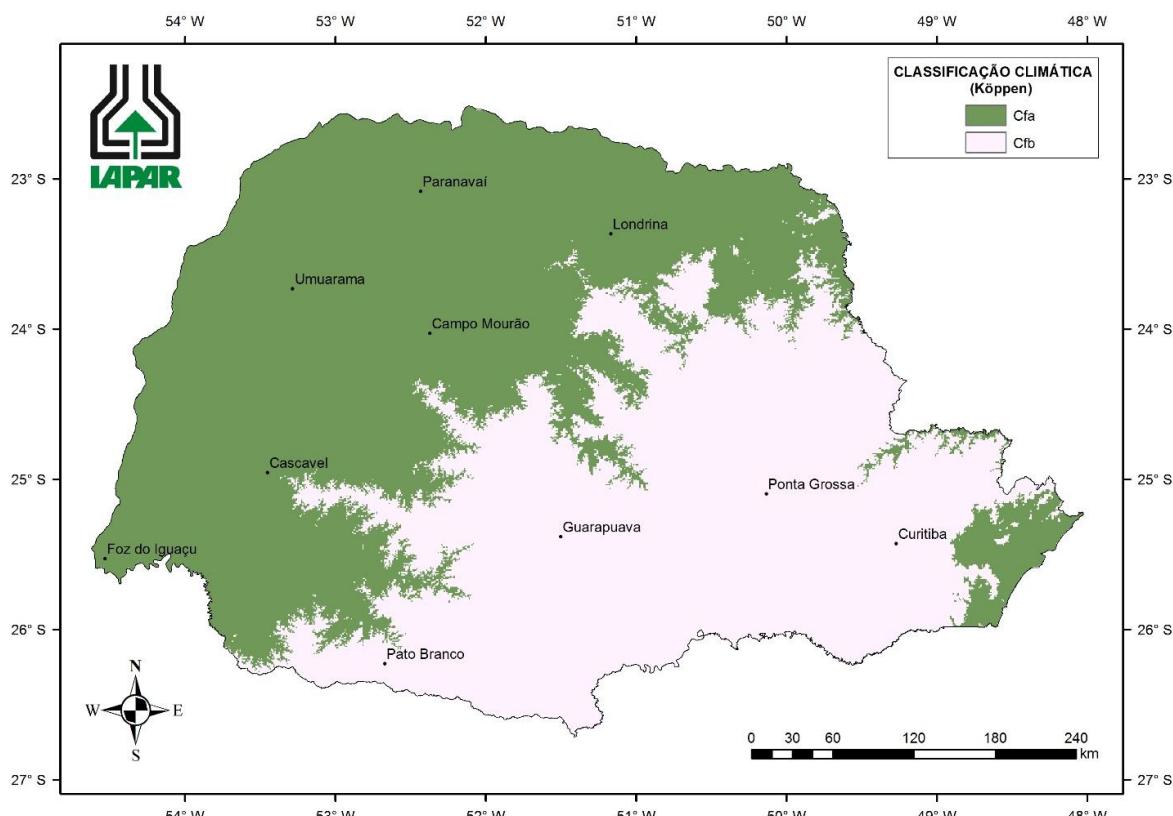
Com base na Tabela 1, nota-se que o verão (dez-jan-fev) é a estação climática mais chuvosa, enquanto que o outono registra os maiores excessos, como evidenciado pela Figura 14. Por outro lado, o inverno apresenta as menores quantidades precipitadas, tanto que julho é o mês com menor precipitação registrada no período (1,8 mm), além de que no quesito déficit hídrico a primavera se destaca das demais estações, isto é, o sistema apresentou mais saída de água do que entrada entre março e abril.

**Figura 14 – Gráfico do Balanço Hídrico do Município de Londrina - PR**

Fonte: INMET(2021).

Essa caracterização está intimamente ligada à Classificação Climática elaborada por Köppen (Figura 15), a qual define o município de Londrina como clima mesotérmico, apresentando “temperatura média no mês mais quente acima de 22 °C, com verões quentes, e temperatura média no mês mais frio inferior a 18 °C”, além de precipitação, superior a 1.500 mm, distribuída no decurso do ano (NITSCHE *et al*, 2019).

**Figura 15 – Classificação Climática do Estado do Paraná**



**Fonte:** Adaptado de Nitsche *et al* (2019).

### 3.1.5 Aspectos Pedológicos

No que tange aos solos identificados no município, estes são oriundos da alteração das rochas, comentadas anteriormente, provocada pela ação intempérica, sendo esta impulsionada pelo clima local juntamente de outros fatores como, por exemplo, relevo, tempo cronológico e ação biológica.

Considerando isto, o território urbano possui cerca de 56% de sua área composto por Nitossolo Vermelho Eutroférrego típico, seguido pelo Latossolo Vermelho Eutroférrego típico (aproximadamente 24%), os quais apresentam profundidade variável, textura argilosa (70% argila, 15% silte e 15% areia),

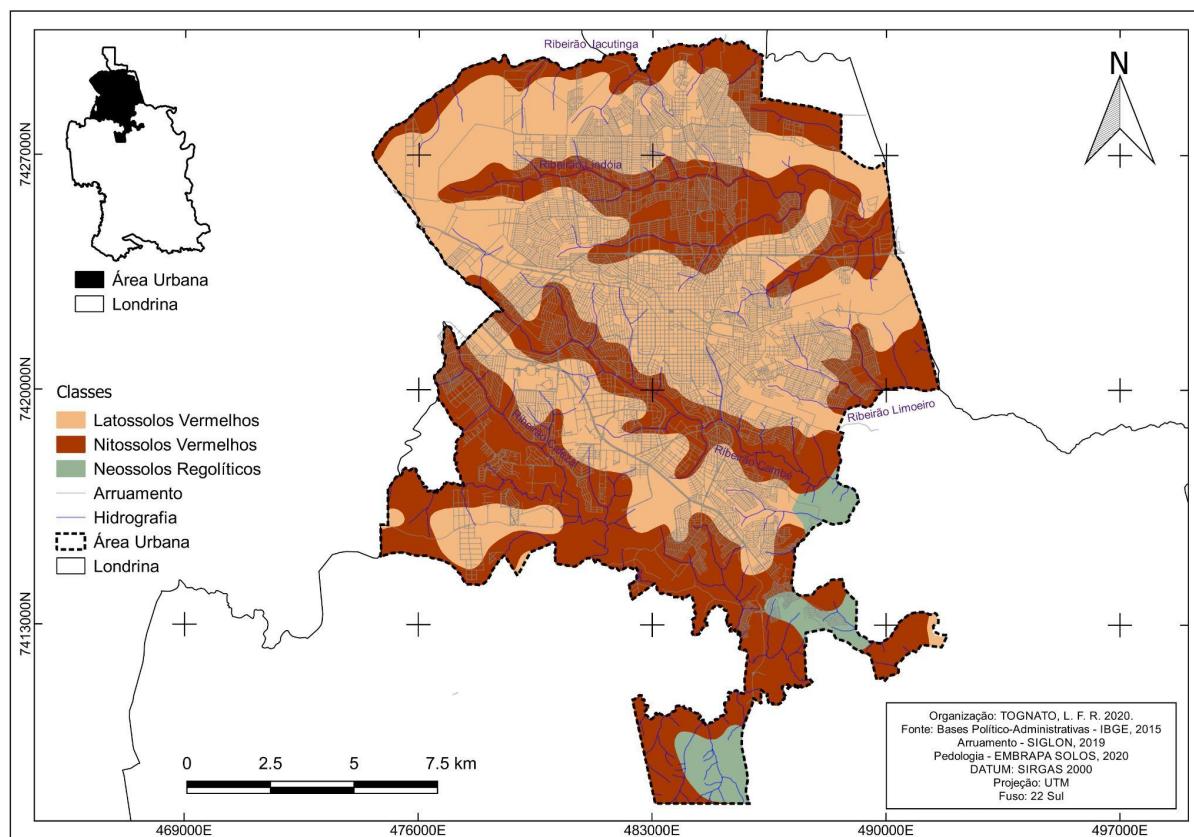
porosidade total de 63% e, aliado à isso, uma condutividade hidráulica que pode variar entre  $3,7 \times 10^{-6}$  e  $7,3 \times 10^{-6}$  m/s (PINESE; GUIMARÃES, 2018).

Inclusive, tais autores, apontam que a variação pedológica municipal está associada, também, ao relevo, pois:

“Em geral, as cotas altimétricas mais elevadas (>550m) se constituem em relevos planos com camada de solos mais espessa, a qual irá progressivamente se adelgaçar em direção ao vale e a medida que a declividade aumenta, a camada se torna muito rasa com alta concentração de matações e blocos dispersos, onde predomina solos rasos”. (PINESE; GUIMARÃES, 2018).

Com isso, percebe-se a ocorrência de dois principais tipos de solos e se identifica a associação de solos rasos (como o Neossolo Litólico Eutrófico chernossólico e o Chernossolo Argilúvico Férrico saprolítico, que somados correspondem à quase 2% da área urbana) ligados às maiores declividades, como demonstrado na Figura 16.

**Figura 16 – Mapa de Pedológico da Área Urbana de Londrina - PR**



**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Um dos fatores que dá importância aos solos está essencialmente ligado à sua permeabilidade, tendo em vista que essa característica vai proporcionar

variações nos tipos pedológicos e, consequentemente, na dinâmica hídrica local. Isto é, se o solo for menos permeável a água tende a escoar e, por isso, sair mais rápido do sistema, enquanto que se o tipo pedológico for mais permeável ocorrerá mais infiltração e, assim, maior abastecimento hídrico no sistema.

### 3.1.6 Hidrogeologia

Primeiramente, antes de caracterizar a hidrogeologia da área de estudo, é necessário compreender que as águas subterrâneas são aquelas que estão armazenadas e/ou em circulação no meio subterrâneo, partindo da subsuperfície terrestre, sendo comumente encontradas na zona saturada dos solos e em formações rochosas saturadas (FREEZE; CHERRY, 2017). Para tais autores, estas formações rochosas saturadas recebem o nome de aquífero por terem a propriedade de “transmitir quantidades significativas de água sob gradientes hidráulicos comuns”.

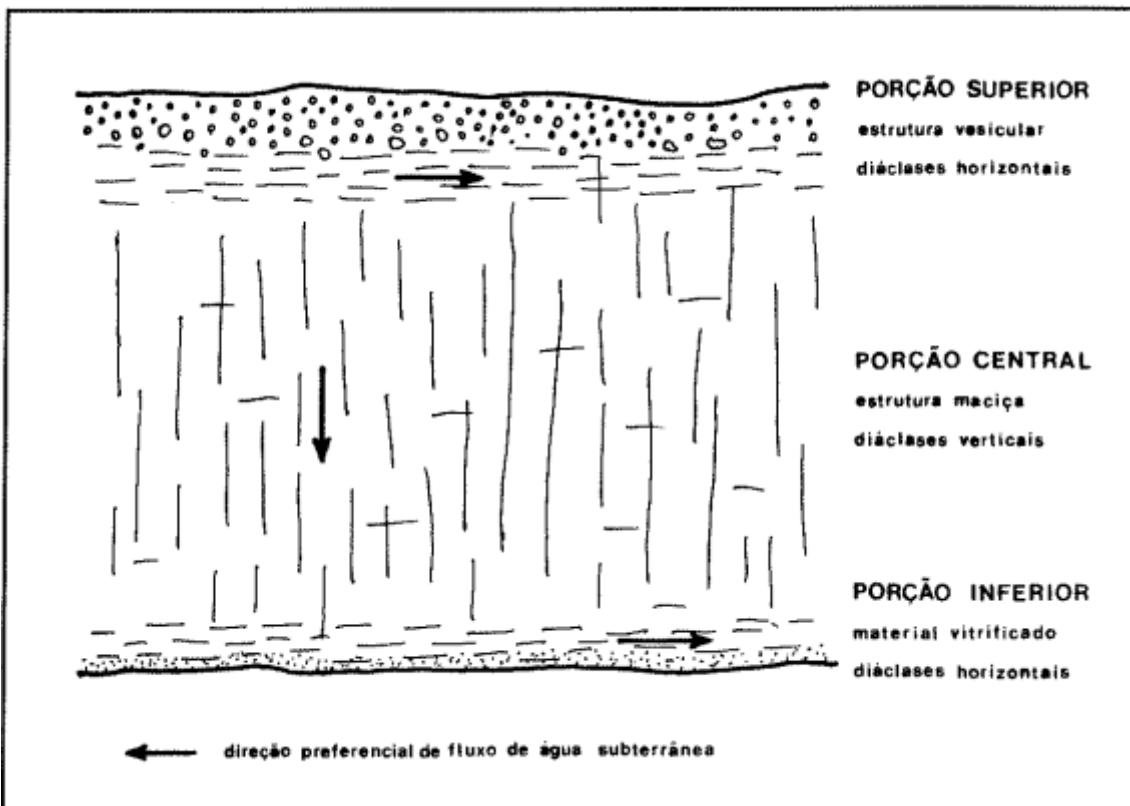
Deste modo, Celligoi (1993) identificou duas formas de ocorrência das águas subterrâneas na área de estudo, sendo elas:

“o aquífero freático, que se relaciona à zona saturada da camada do solo e rocha alterada, e as zonas aquíferas alojadas nas rochas basálticas da Formação Serra Geral (Sistema Aquífero Serra Geral - SASG), cuja porosidade é dada pelos sistemas de fraturas/falhas indicadas pelo controle estrutural”.

Dentre elas, o foco do presente trabalho se voltará ao Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) por conta da relação direta com os poços tubulares profundos, uma vez que é o ambiente onde estão localizados exclusivamente e do qual utilizam recursos para o suprimento de parte da demanda hídrica da área de estudo.

Considerando a forma de armazenamento e circulação da água no SASG, é fundamental compreender como ocorrem tais estruturas na litologia descrita no item 3.1.1, para além de seu direcionamento geral já exposto. Associadas aos derrames basálticos, estes possuem características estruturais e texturais específicas, condicionando o fluxo hidrogeológico nas falhas e/ou fraturas (Figura 17).

**Figura 17 - Esquema estrutural e textural do SASG**



**Fonte:** Adaptado de Celligoi, 1993.

Na porção superior, Leinz (1949), argumenta que há “presença de estruturas amigdaloidais e/ou vesiculares de diâmetros variáveis” e sua gênese está relacionada com a “desgaseificação da lava”. Ainda nesta porção, são identificadas diâclases (falhas e/ou fraturas) horizontais geradas pela “contração magmática” (LEINZ, 1949).

A porção central é constituída de um maciço de “textura macro e microcristalinas”, com as falhas e/ou fraturas apresentando sentido vertical em razão do resfriamento lento do magma (LEINZ, 1949).

Leinz (1949), aponta que a porção inferior é formada por “rocha vítreia e microcristalina, rica em diâclases horizontais”, oriundas do rápido esfriamento da lava ao interagir com o embasamento.

Sobre tais estruturas e texturas, Rebouças e Fraga (1988, *apud* GASTMANS *et al* 2016) formularam um modelo de fluxo hidrogeológico onde as amígdalas e/ou vesículas da porção superior são responsáveis por reservar a água e, quando estão conectadas pelas falhas e/ou fraturas horizontais, por uma permeabilidade alta. Na porção central, o fluxo das águas subterrâneas abastece a porção inferior no contato subjacente a partir do contato adjacente com a porção superior, ocorrendo

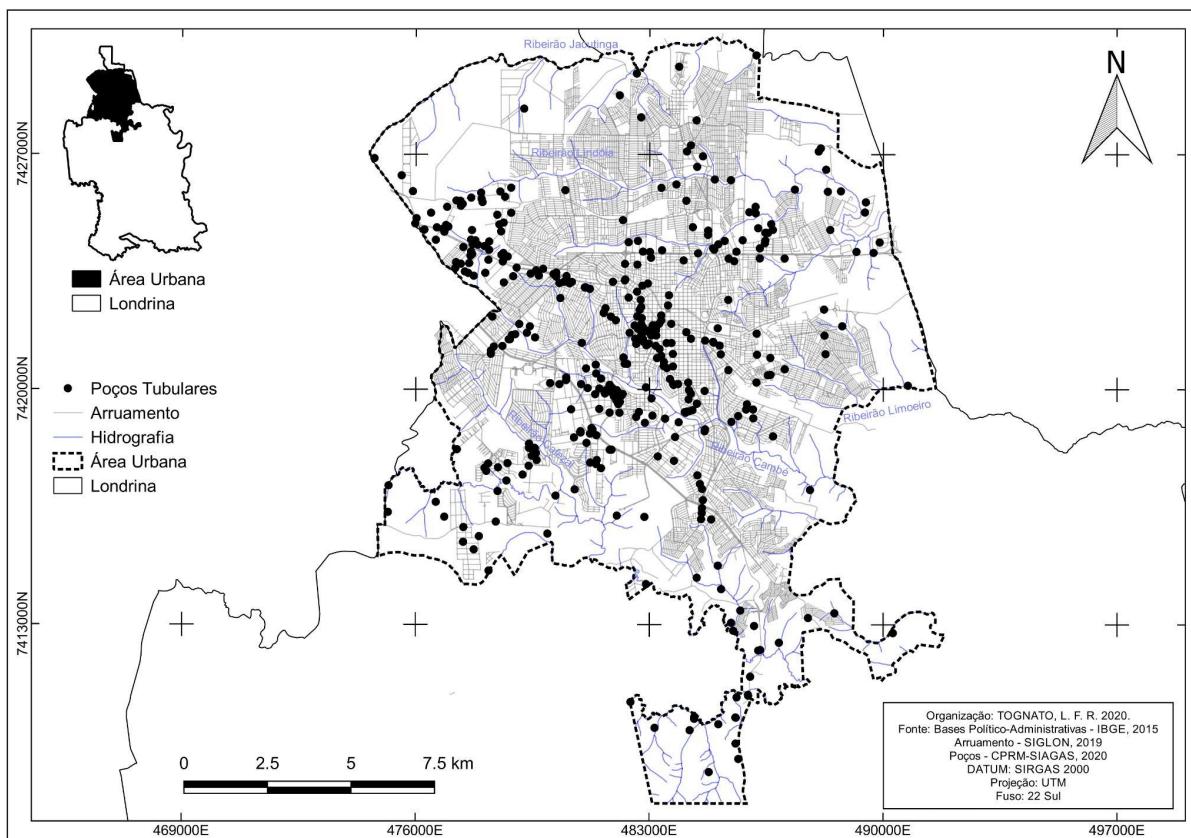
no sentido vertical e com uma baixa circulação (PETERLINI *et al*, 2020; GASTMANS *et al* 2016).

Com isto, este sistema aquífero é definido como anisotrópico e heterogêneo justamente pelas suas características litológico-estruturais, isto é, a forma como resguarda e transmite água em seu interior é descontínua e hidráulicamente variável em função das falhas/fraturas que o compõem (SANTOS; ARANTES, 2020).

### 3.1.7 Poços

Tendo em mente a relação da hidrogeologia com os poços tubulares profundos no âmbito do abastecimento hídrico humano, sua localização é informação importante no processo de compreensão da dinâmica hidrogeológica. Os poços presentes na área de estudo estão apresentados na Figura 18.

**Figura 18** - Localização dos poços tubulares profundos na área de estudo



**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Convém esclarecer que os poços utilizados nesta pesquisa estão localizados exclusivamente no SASG e não em qualquer outro sistema aquífero.

## 4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para o desenvolvimento deste estudo, quanto a sua natureza, serão utilizadas as abordagens qualitativa e quantitativa no sentido de contribuir para um maior entendimento dos dados a serem obtidos e analisados, pois, como defende Creswell (2007), a junção de ambos os métodos de pesquisa é essencial para “expandir o entendimento de um método para outro, para convergir ou confirmar resultados de diferentes fontes de dados”.

A fim de atingir os objetivos propostos, foram realizados os seguintes procedimentos:

- a) Levantamento bibliográfico;
- b) Levantamento de Dados em órgãos oficiais;
- c) Processamento dos Dados de Águas Subterrâneas, no *plugin FREEWAT* do software QGIS versão 2.18.21 *Las Palmas*;
- d) Proposição de Modelo Alternativo de Gestão Político-Administrativa dos Recursos Hídricos Subterrâneos.

### 4.1 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

No que diz respeito ao levantamento bibliográfico (item a), foram utilizadas, principalmente, as bases de pesquisa do *Google Acadêmico*, do *Leis Municipais*, do *Periódicos CAPES* e do *ScienceDirect*. Na primeira base foram utilizados os termos de pesquisa Águas Subterrâneas, *FREEWAT* e Hidrogeologia em Londrina, dos quais se obteve um quantitativo da ordem de 18.200, 595 e 946, respectivamente. Em relação à segunda, se pesquisaram diplomas legais afetos ao tema no âmbito municipal, empregando as palavras Recursos Hídricos, Águas Subterrâneas e Poços para as quais se alcançaram 13, 7 e 27 como resultado. No tocante à terceira base de pesquisa, buscaram-se bibliografias a partir dos termos Hidrogeologia, Gestão Hidrogeológica e *FREEWAT*, resultando em mais de 50 por termo. Por fim, a última plataforma de pesquisa apresentou 81.294, 16 e 329.119 bibliografias para os termos *Groundwater Management*, *FREEWAT* e *Environmental Public Management*.

#### 4.2 LEVANTAMENTO DE DADOS EM ÓRGÃOS OFICIAIS

Sobre os dados levantados em órgãos oficiais (item b), tendo em vista o tema abordado, focou-se a pesquisa naqueles com maior relação ao assunto e, com isso, maior probabilidade de obtenção das informações necessárias a serem trabalhadas, sendo eles: Instituto Água e Terra (IAT); Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS, da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, CPRM, atualmente denominada Serviço Geológico do Brasil); Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE); Banco de Dados Meteorológicos (BDMEP) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET); Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil (TOPODATA) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE); e, a Prefeitura do Município de Londrina (PML).

Do IAT, foi obtido um arquivo .xls, através do sistema *ftp* (*File Transfer Protocol* - Protocolo de Transferência de Arquivo), com dados de 532 poços para a área total do município e 413 poços para a área urbana. Contudo, foram identificadas diversas informações faltantes neste cadastro, inviabilizando a sua utilização nesta pesquisa.

Diante desta situação, buscou-se apoio na base de dados do SIAGAS-CPRM da qual se obteve um arquivo .xls contendo dados de 324 poços na área municipal e, destes, 240 poços na área urbana londrinense. Tais dados datam do ano de 2018, sendo o registro mais atualizado disponível na base em questão. Este cadastro apresentou as informações necessárias para a devida execução dos procedimentos no *plugin* utilizado, como por exemplo localização, profundidade total do poço, nível estático, nível dinâmico e vazão máxima de teste. Ainda assim, dentre os poços inseridos na área de estudo, 5 apresentaram coordenadas geográficas idênticas à algum outro poço cadastrado, estando relacionados com a manutenção, no cadastro, da informação de poços com a outorga vencida ou de poços que haviam sido encerrados e foram reativados sob novo processo.

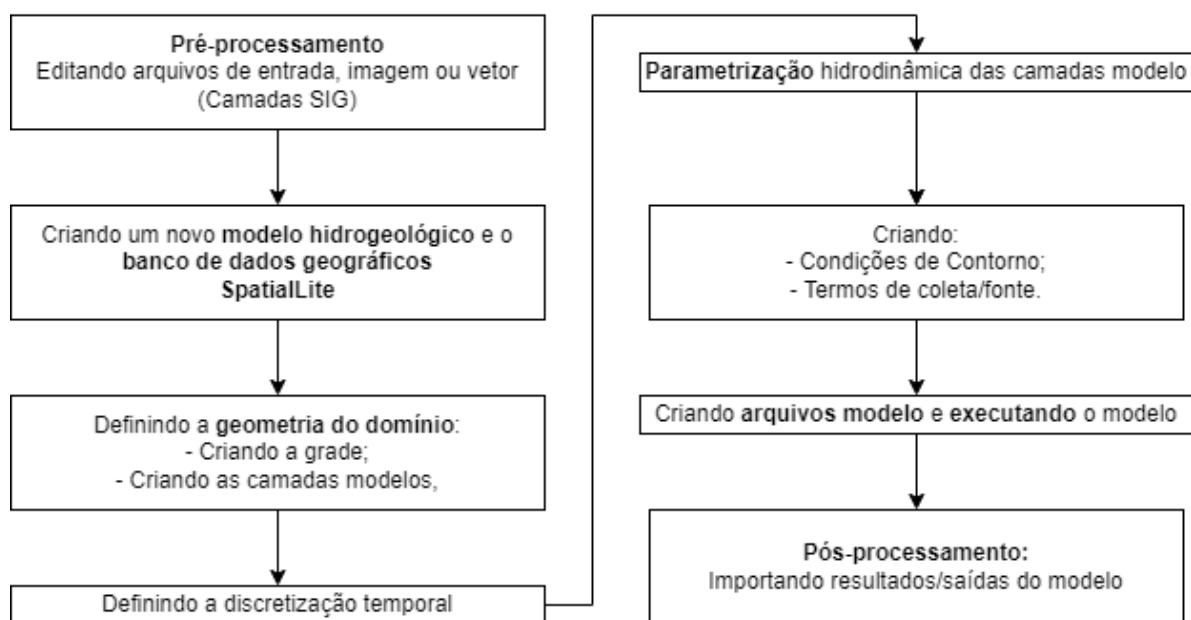
Destarte, são notáveis as diferenças entre os cadastros federal e estadual, sendo que o primeiro apresenta informação com maior qualidade enquanto o segundo a disponibiliza em maior quantidade. Contudo, o ponto de convergência entre eles, e que merece destacada atenção, é a existência de algumas informações inconsistentes, as quais podem gerar questionamentos sobre a confiabilidade de tais bancos de dados oficiais face à realidade confrontada.

Do IBGE foram baixados arquivos no formato *shapefile* (.shp) relativos às bases político-administrativas utilizadas nas produções cartográficas, com exceção do Perímetro Urbano de Londrina que foi obtido do Portal SIGLON (Sistema de Informação Geográfica de Londrina) existente no site da Prefeitura Municipal de Londrina. Outras bases de dados empregadas foram o Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil (TOPODATA, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE), da qual se obteve um arquivo *raster* proveniente do projeto SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) para fins hipsométricos, e o Banco de Dados Meteorológicos (BDMEP, do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET), da qual se coletou um arquivo no formato tabular (.xls) aplicado na caracterização climática. Cabe ressaltar que os dados climáticos são referentes ao ano de 2018, tendo em vista a compatibilização com os dados dos poços tubulares utilizados (que são os mais atuais e datam do mesmo período)

#### 4.3 PROCESSAMENTO DOS DADOS DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

No que tange ao processamento dos dados obtidos (item c), primeiramente se fez necessário preparar os dados oficiais cartograficamente para, então, aplicar o processo de modelagem de tais dados a partir dos manuais e tutoriais do *FREEWAT*, inserindo-os de acordo com a sequência apresentada na Figura 19.

**Figura 19 - Fluxograma de Entrada de Dados**



**Fonte:** Adaptado de Borsi *et al.* (2019).

Para tanto, a tabela de dados dos Poços Tubulares Profundos de Londrina-PR, obtida do SIAGAS-CPRM, foi salva no formato *.csv* e aberta no QGIS como arquivo "Camada de Texto Delimitado" no formato *.shp* sob a geometria de pontos.

Utilizou-se um algoritmo, *Add raster values to feature*, para assumir no *shape* dos poços o valor altimétrico do *raster* da hipsometria. Feito isto, foi executada a subtração, na Tabela de Atributos do *shape* dos poços, do valor da coluna da profundidade do nível estático em relação ao valor da coluna da cota altimétrica da boca dos poços. Assim, ficou estabelecida uma coluna com o valor do nível estático em metros sobre o nível do mar. O mesmo procedimento foi executado para o nível dinâmico.

Com isso, procedeu-se à elaboração de *krigagem* ordinária sobre os valores dos níveis estáticos e dinâmicos, utilizando o algoritmo *Ordinary kriging*. A respeito da *krigagem* ordinária, esta é classificada, por Câmara e Medeiros (1998), como um método de interpolação que:

"[...] é uma técnica utilizada para a estimativa do valor de um atributo em locais não amostrados, a partir de pontos amostrados na mesma área ou região. A interpolação espacial converte dados de observações pontuais em campos contínuos, produzindo padrões espaciais que podem ser comparados com outras entidades espaciais contínuas. O raciocínio que está na base da interpolação é que, em média, os valores do atributo tendem a ser similares em locais mais próximos do que em locais mais afastados. Esse conceito também fundamenta a base das relações espaciais entre fenômenos geográficos, utilizando a correlação espacial como meio de diferença dos atributos estimados (CÂMARA E MEDEIROS, 1998, *apud* JAKOB E YOUNG, 2006)

Para Jakob e Young (2006), a *krigagem* depende de “modelos matemáticos e estatísticos, assim como da noção de autocorrelação” onde “a informação dos locais espaciais permite o cálculo das distâncias entre as observações e modelar a autocorrelação como uma função da distância”.

Com isso, tais autores definem este método como “o melhor estimador não viciado”, ao considerar somente a “predição criada por médias ponderadas”, produzindo “a melhor estimativa linear não-viciada dos dados de um atributo em um local não amostrado” (JAKOB E YOUNG, 2006).

No tocante, especificamente, à *krigagem* ordinária, Jakob e Young (2006) argumentam que a média é “constante e desconhecida”, podendo ser utilizada sobre “dados que parecem terem tendência” uma vez que dispõe de “tratamentos específicos para retirar a tendência e anisotropia”.

A partir dessa *krigagem* elaborada foram geradas isolinhas, com intervalos de 10 e 40 metros (secundárias e principais, respectivamente). Também foram geradas setas relativas ao direcionamento do fluxo das águas subterrâneas estimado na *krigagem*, utilizando o algoritmo *Gradient vectors from surface*.

Desta maneira, iniciou-se o processo de modelagem instruído pelos manuais e tutoriais do *FREEWAT* (BORSI *et al*, 2019). O primeiro passo foi a criação de uma pasta com arquivos à utilizar (.shp e/ou .csv). Em seguida, a criação do projeto no *QGIS* e, nele, a criação do Modelo no *FREEWAT*, prosseguindo com a criação da Grade e das Camadas do Modelo no próprio *plugin*.

Na sequência, foram gerados centróides dos polígonos da camada que representa a litologia do Modelo Conceitual (camada "basalto") e, nos centróides, adicionados os valores do *raster* de *krigagem* ordinária do nível estático utilizando o algoritmo *Add raster values to feature*. Assim, fez-se a união do resultado com a camada "basalto" e atualização do valor da coluna "STRT", na camada "basalto", por meio da expressão "to\_string" na Calculadora de Campo.

Aplicou-se a seleção das células do Modelo Conceitual por onde corre a hidrografia, utilizando o algoritmo Selecionar pela localização e, a partir disso, a atualização dos valores da coluna "STRT" das células selecionadas para "-1", indicando o "Specified Head". Nas células onde ocorrem poços, os valores da coluna "STRT" foram atualizados para "1", indicando o "Variable Head". Inclusive, foi elaborada uma numeração dos 240 poços conforme a data de perfuração, partindo do mais antigo para o mais recente.

Foi desenvolvida uma outra camada para representar os poços, "pocos\_well", na qual consta a informação das vazões máximas de teste de cada poço para cada célula da camada. Contudo, foi necessário executar cálculo de conversão dos valores, de  $m^3/hr$  para  $m^3/s$  (divisão do valor da célula por 3600), devido os valores originais da tabela do SIAGAS-CPRM estarem na primeira unidade ( $m^3/hr$ ) e o *plugin* trabalhar com a segunda unidade ( $m^3/s$ ).

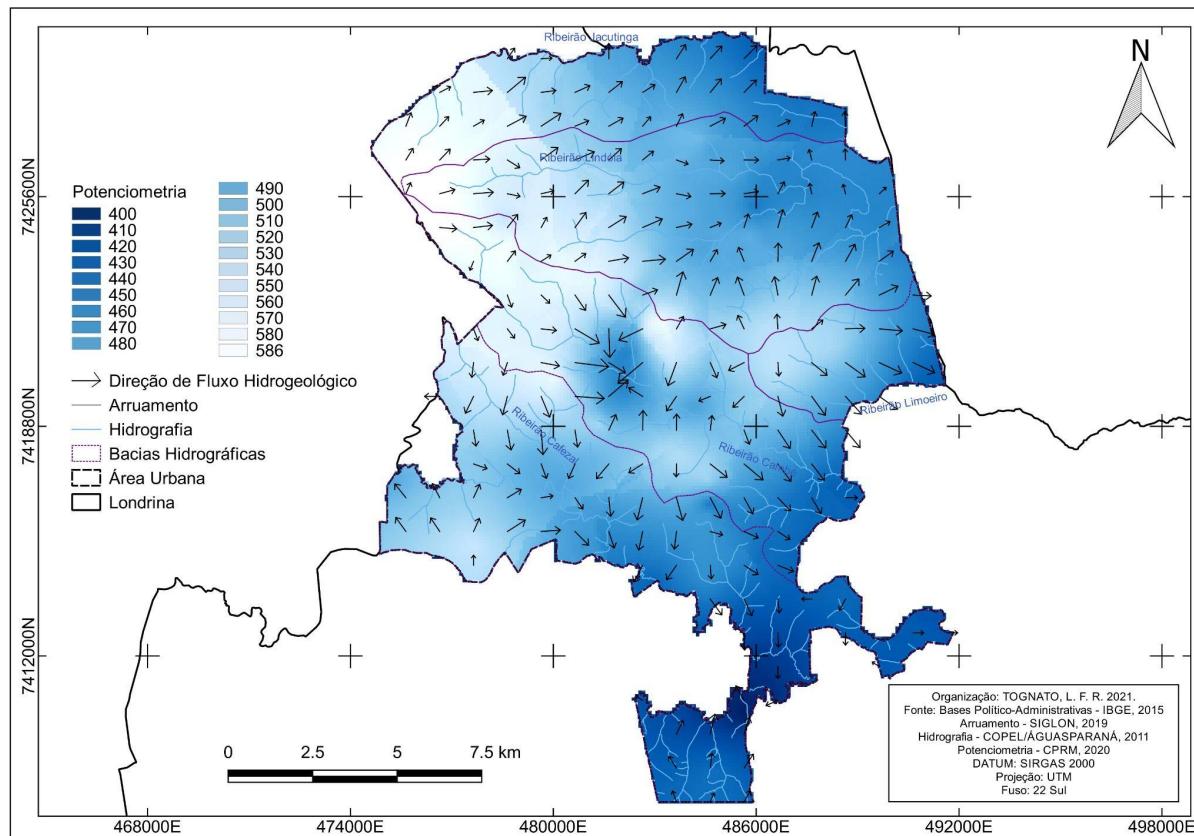
Deste modo, foi produzido um segundo modelo com a retirada de água do aquífero pelos poços e, a partir dele, executada a subtração do Segundo Modelo (Condição Alterada) pelo Primeiro Modelo (Condição Natural). Os períodos de estresse empregados foram de 01 (um) dia para a condição natural e 01 (um), 05 (cinco) e 10 (dez) anos para a condição alterada.

## 4.4 O MODELO LONDRINENSE

### 4.4.1 Modelo Hidrogeológico Conceitual

Esse modelo (Figura 20) foi gerado a partir de dados da profundidade do nível estático, espessura média da camada geológica, condutividade hidráulica média e o modelo digital de elevação (MDE).

**Figura 20 - Modelo Hidrogeológico Conceitual**



**Fonte:** Elaborado pelo autor.

As seguintes hipóteses foram admitidas no modelo conceitual adotado neste trabalho:

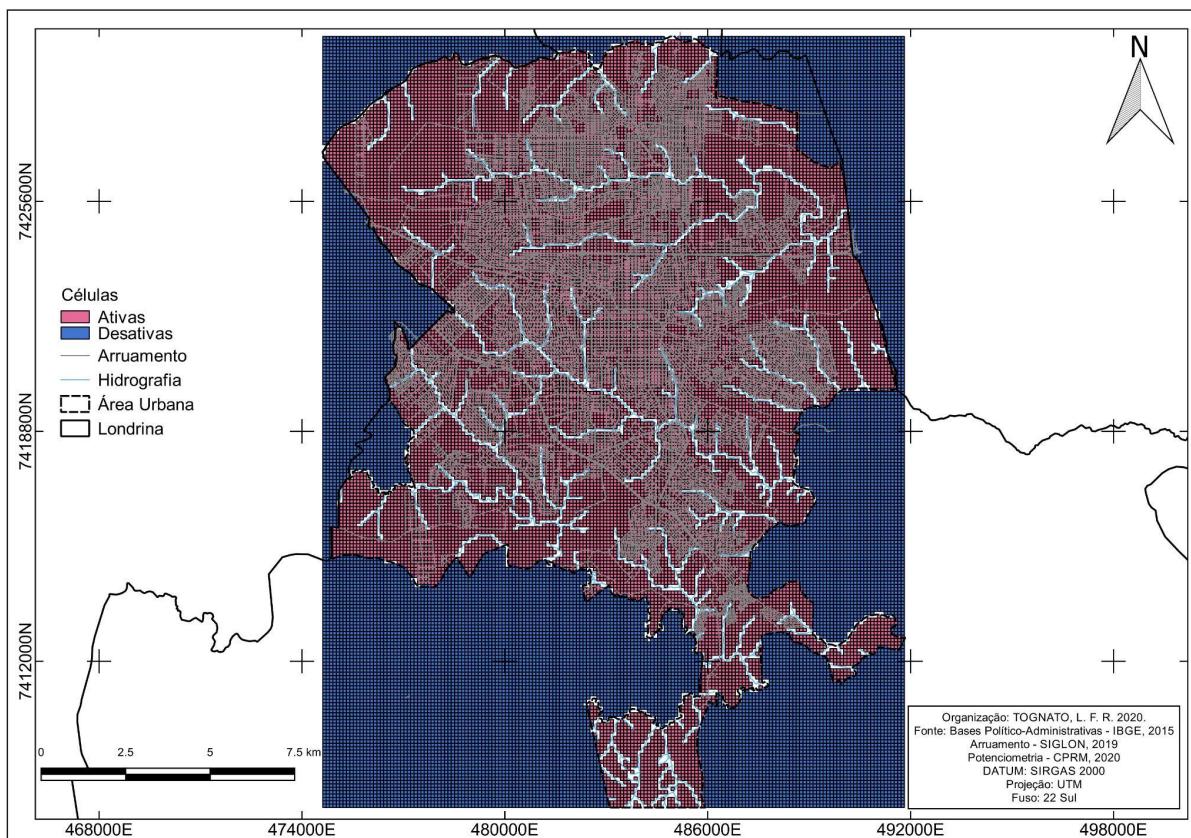
- 1) Heterogeneidade e anisotropia litológica. O domínio é composto por uma unidade litológica com comportamento anisotrópico e heterogêneo de condutividade hidráulica (Grupo Serra Geral).
- 2) Os fraturamentos existentes no basalto caracterizam uma condição de conectividade hidráulica com o Sistema Aquífero Guarani (SAG) desconhecida, representando, dessa maneira, condições de contorno de fluxo nulo na parte inferior do modelo.

- 3) Para delimitação das fronteiras do domínio foi utilizado o limite da área urbana de Londrina, sobre a qual se assumiu uma condição de contorno de fluxo existente. Contudo, os limites marcados por cursos hídricos foram tomados como condição de contorno de fluxo dependente do nível piezométrico do interior do modelo nas imediações de tal hidrografia.
- 4) A espessura média do modelo foi fixada em 800 m, estando à 599 m de altitude na parte superior e à 201 m abaixo do nível do mar na parte inferior. A variação da potenciometria, 400 m de altitude nas menores potenciometrias até 586 m nas maiores, foi obtida pelos dados de profundidade dos poços do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) do Serviço Geológico Brasileiro (antiga Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM) juntamente com os dados do *Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM)*.
- 5) O aquífero foi representado como confinado em toda sua extensão por conta de suas características de anisotropia e heterogeneidade, sendo admitido como harmônico para simular a dinâmica hidrogeológica em seu interior. Vale elucidar que o aquífero tem por uma de suas características ser livre, contudo esta não foi empregada na modelagem.
- 6) Os fluxos de entrada foram simulados a partir do nível estático, enquanto os fluxos de saída foram representados pelos poços tubulares profundos e pelos cursos hídricos presentes no domínio.

#### 4.4.2 Discretização do Modelo

O domínio ativo possui uma área de 222.780,61 km<sup>2</sup>. Um grid de diferenças finitas foi criado, com células de 100 x 100 m, gerando um total de 39.216 células (Figura 21) das quais 22.295 são ativas e as demais, localizadas fora do domínio, desativas.

**Figura 21 - Domínio Simulado**



**Fonte:** Elaborado pelo autor.

O domínio foi discretizado verticalmente através de uma única camada com espessura fixa, representando o SASG. A topografia foi obtida utilizando o modelo digital de elevação *SRTM*. Para estimar a espessura da camada de basalto foram utilizados dados médios de profundidade total obtidos a partir da literatura disponível.

Uma camada *shapefile* de pontos foi criada para armazenar os dados dos poços (SIAGAS-CPRM) e estimar o valor do nível estático em locais não amostrados através do procedimento de *krigagem* ordinária, criando uma camada *raster* com valores variando de 400 m de altitude nas menores potenciometrias a 586 m nas maiores.

#### 4.4.3 Propriedades Hidráulicas

A camada “basalto” representa o SASG (Sistema Aquífero Serra Geral), para a qual foi adotado um valor médio de condutividade hidráulica de  $1,00 \times 10^{-3}$  m/s (86,4 m/d), conforme La Vigna *et al* (2016). Esse valor será adotado devido às

características litológicas semelhantes, em função da inexistência de dados específicos para tal formação geológica.

#### 4.4.4 Condições de Contorno e Condições Iniciais

Na simulação das características hidrodinâmicas da área de estudo, foram selecionados elementos como os limites político-administrativos da área urbana e os cursos hídricos localizados no interior do domínio. Os limites da área urbana foram representados como condições de contorno de fluxo existente e os cursos hídricos foram simulados como condições de contorno de fluxo dependente da carga no interior do domínio. O contato inferior do SASG com o SAG também foi representado como fluxo vertical nulo por conta da relação hidrogeológica entre ambos ser indeterminada.

### 4.5 PROPOSIÇÃO DE MODELO ALTERNATIVO DE GESTÃO POLÍTICO-ADMINISTRATIVA DOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS

Naquilo que se refere à proposta metodológica de gestão das águas subterrâneas na área urbana de Londrina, buscou-se apontar uma alternativa ao atual modelo de modo que a municipalidade participe, ativamente, junto à União e ao Estado no gerenciamento de determinado recurso ambiental.

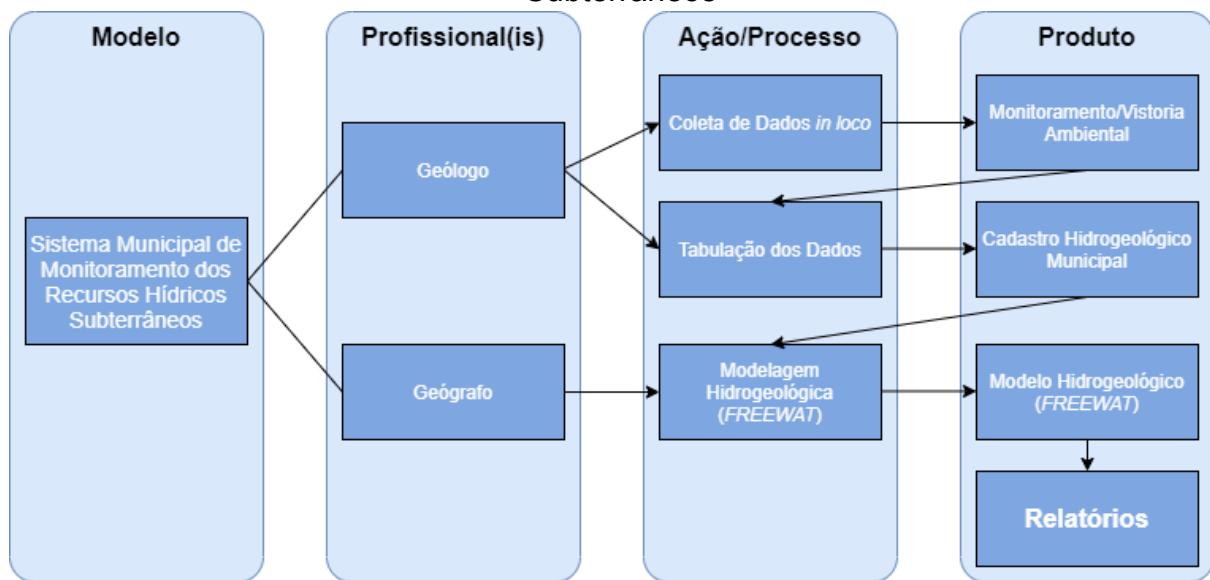
Assim sendo, propôs-se a criação de um Sistema Municipal de Monitoramento dos Recursos Hídricos Subterrâneos, composto de um quadro técnico habilitado que realize ações e/ou processos de ordem técnico-prática, empregando o *plugin FREEWAT* como ferramenta de gestão, gerando produtos fundamentais para a colaboração com os entes federativos responsáveis pelo controle de tal recurso e, com isso, podendo resultar numa fonte de receita à administração municipal.

#### 4.5.1 Modelo de Gestão Municipal com o Uso do *FREEWAT*

Considerando que a competência para legislar especificamente sobre as águas subterrâneas pertence às esferas político-administrativas federal e estadual, cabe ao nível municipal, de modo suplementar, regulamentar o monitoramento de seu uso a partir de instrumentos instituídos, como o Plano Diretor e respectivo Zoneamento Ambiental, bem como de diplomas legais essenciais ao tema.

Assim sendo, propõe-se a criação de um Sistema Municipal de Monitoramento dos Recursos Hídricos Subterrâneos (Figura 22), totalmente integrado às esferas federal e estadual de gestão de tais recursos.

**Figura 22** - Proposta de Sistema Municipal de Monitoramento de Recursos Hídricos Subterrâneos



**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Visando o funcionamento eficaz/eficiente do modelo/sistema proposto, se faz necessário a composição de um quadro técnico habilitado para tratar das questões ambientais envolvidas no processo. Assim sendo, indica-se: um geólogo para o trato das informações hidrogeológicas, desde a coleta, passando pela sistematização e chegando às análises das informações obtidas em campo; e, um geógrafo para a representação cartográfica georreferenciada, considerando as regulamentações e normativas legais ambientais de todos os níveis políticos, das informações coletadas, sistematizadas e analisadas pelo geólogo.

Quanto à atuação do geólogo, naquilo que se refere aos dados a serem coletados, algumas informações são essenciais neste nível de monitoramento proposto na esfera municipal. Aponta-se a relevância da obtenção de dados sobre

os Parâmetros Físico-Químicos e Bacteriológicos, definidos pela Instrução Normativa SUDERHSA-DEOF nº 001/2006, a partir da coleta e análise de amostras de água subterrânea. Outro aspecto considerável é o conjunto de dados acerca do Perfil Geológico-Construtivo do Poço, o qual deve conter, no mínimo: ano de perfuração; capacidade específica; coordenadas geográficas; cota da boca do poço; níveis dinâmico e estático; profundidade total; vazão máxima de teste; e, vazão outorgada.

Essa ação de coleta de dados é importante de ser ressaltada, pois se caracteriza como um monitoramento e/ou vistoria da qualidade de um recurso ambiental, além do embasamento fatídico para a verificação do cumprimento das exigências legais (em todos os níveis hierárquicos) sobre zoneamento (ambiental e econômico) e vigilância sanitária. Deste modo, tal ação pode resultar numa fonte de receita à administração municipal pela colaboração com os entes federativos responsáveis pelo controle de determinado recurso, sendo que a União recolhe os impostos, o Estado emite a outorga e o Município auxilia na gestão do recurso hídrico subterrâneo. Com isso, qualifica-se a questão ambiental em Londrina.

A sistematização dos dados coletados num Cadastro Hidrogeológico Municipal é imprescindível, tendo em vista o volume de dados e as possibilidades de utilizações futuras que os permeiam, sobretudo quanto à execução/elaboração do modelo hidrogeológico.

No que tange à atividade do geógrafo, o pré-processamento dos dados coletados num Sistema de Informações Geográficas (SIG) é fundamental, visando o georreferenciamento das informações e, principalmente, a integração posterior com o *FREEWAT* para a devida modelagem. Feito este procedimento, empreende-se a geração de modelos baseados nas informações obtidas do levantamento de campo para representar a dinâmica hidrogeológica londrinense em diversos cenários, com o intuito de auxiliar na gestão do recurso ambiental monitorado.

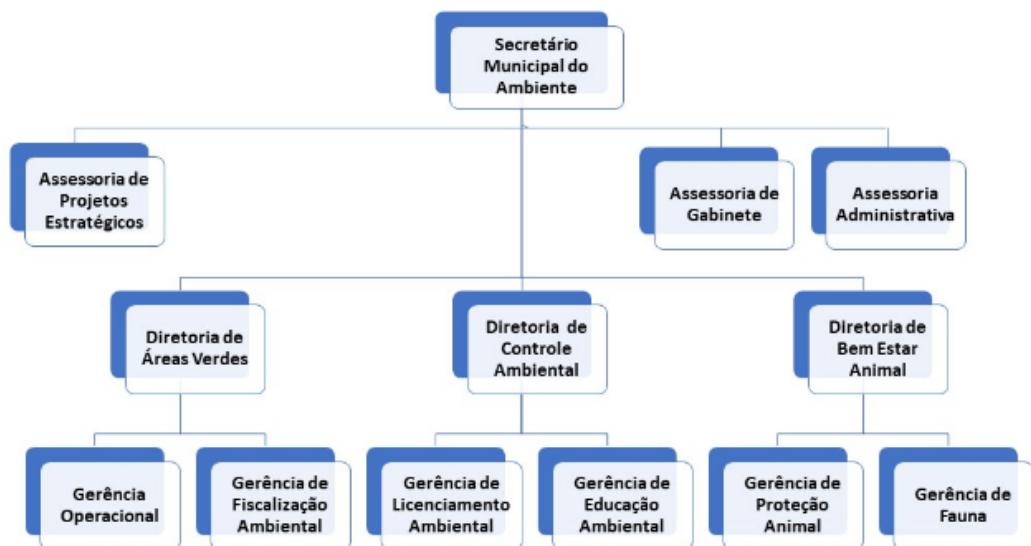
A modelagem e/ou modelo hidrogeológico se configura ao mesmo tempo como ferramenta e produto, haja vista a capacidade de embasar decisões e ações a partir dos cenários projetados ao passo em que permite a visualização de tais projeções sobre a dinâmica natural abordada.

Destarte, a interação entre estes dois profissionais, geólogo e geógrafo, deve resultar na elaboração periódica de relatórios oficiais sobre as condições do recurso hídrico monitorado, os quais serão endereçados aos órgãos competentes, quais

sejam: Comitês e Gerências de Bacias Hidrográficas nas quais o município está inserido (Tibagi e Paranapanema); e/ou, Departamento/Instância competente do IAT.

Tal sistema pode ser diretamente vinculado à Gerência de Fiscalização Ambiental, haja vista as ações de monitoramento/vistoria demandadas, integrante da Diretoria de Áreas Verdes da Secretaria Municipal do Ambiente da Prefeitura Municipal de Londrina, ou, ainda, ser vinculado à Gerência de Licenciamento Ambiental da Diretoria de Controle Ambiental (vide Figura 23), considerando as competências de cada gerência definidas no Regimento Interno da Secretaria.

**Figura 23 - Estrutura Organizacional da Secretaria Municipal do Ambiente de Londrina**



**Fonte:** Estrutura, SEMA. Adaptado de PML, 2020.

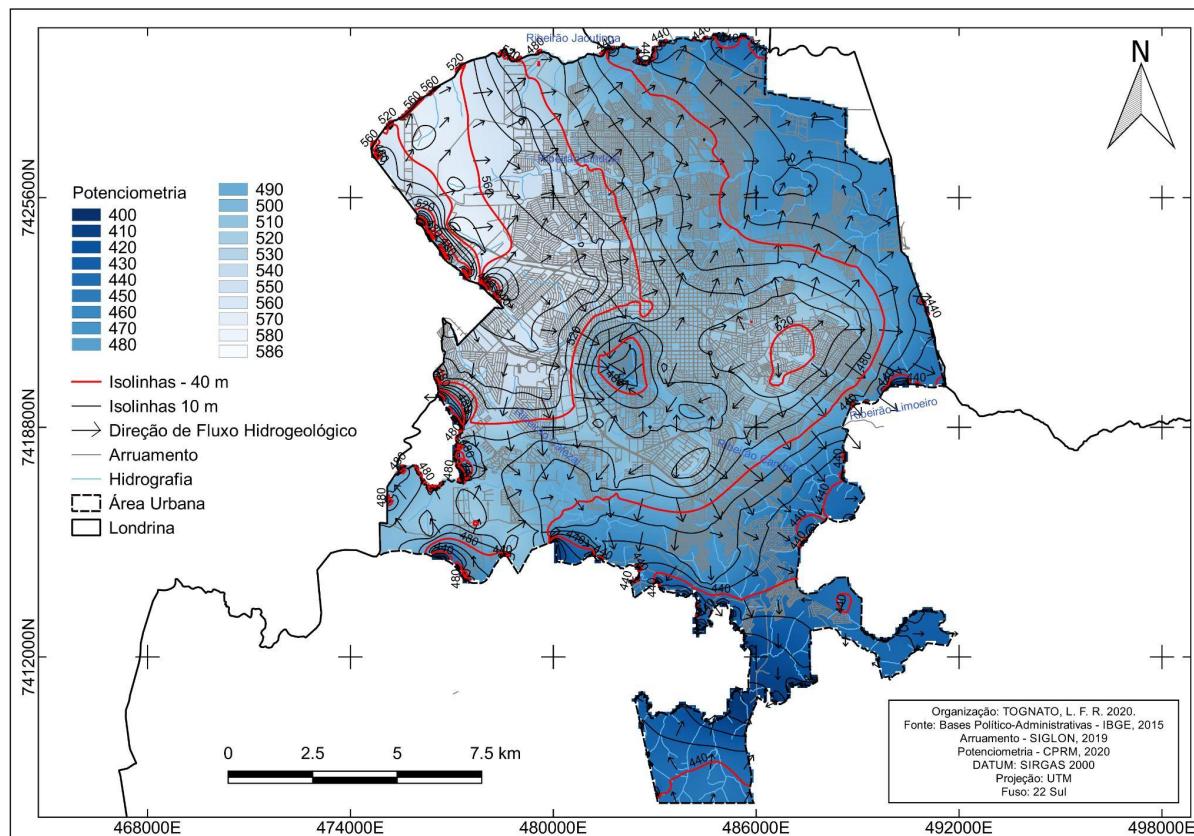
Para auxiliar na efetivação das ações do sistema proposto, o *plugin FREEWAT* surge como uma ferramenta em potencial, contribuindo significativamente no tocante à modelagem da dinâmica hidrogeológica e, consequentemente, na gestão dos recursos hídricos que permeiam tal dinâmica, tanto os superficiais quanto os subterrâneos (especialmente os últimos). No tópico subsequente serão apresentadas as aplicabilidades deste *plugin*.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 SIMULAÇÃO DA SUPERFÍCIE POTENCIOMÉTRICA E DE FLUXO

Identifica-se que a superfície potenciométrica (Figura 24), simulada pelo modelo em regime permanente, sofre forte influência da hidrografia local. As linhas de fluxo estabelecidas foram condicionadas pelo relevo, apresentando similaridade com a topografia do terreno.

**Figura 24 - Potenciometria em regime permanente**



**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Os corpos d'água superficiais se configuraram como os principais responsáveis pelo transporte de água na área de estudo, ao passo em que os poços tubulares profundos representam a maior retirada hídrica do modelo simulado. Cabe ressaltar que as falhas e fraturas são o meio de transporte hídrico no âmbito hidrogeológico da litologia em questão, contudo determinar tal transporte se caracteriza como um desafio a ser solucionado em pesquisas futuras.

Como os cursos hídricos fluem sobre os lineamentos de basalto e as contribuições nas margens destes dependem de fraturas, todo o volume de água é

drenado em direção à tais cursos, acompanhando a topografia e contribuindo para o montante de vazão da hidrografia.

Dois padrões principais de fluxo foram observados, sendo: um padrão no sentido Nordeste, compreendido no setor centro-norte da área urbana de Londrina, caracterizando descarga nas Bacias Hidrográficas dos Ribeirões Jacutinga e Lindóia; e, outro padrão com direção Sudeste, localizado no setor centro-sul, representando o escoamento na direção das Bacias Hidrográficas dos Ribeirões Cafetal e Cambé.

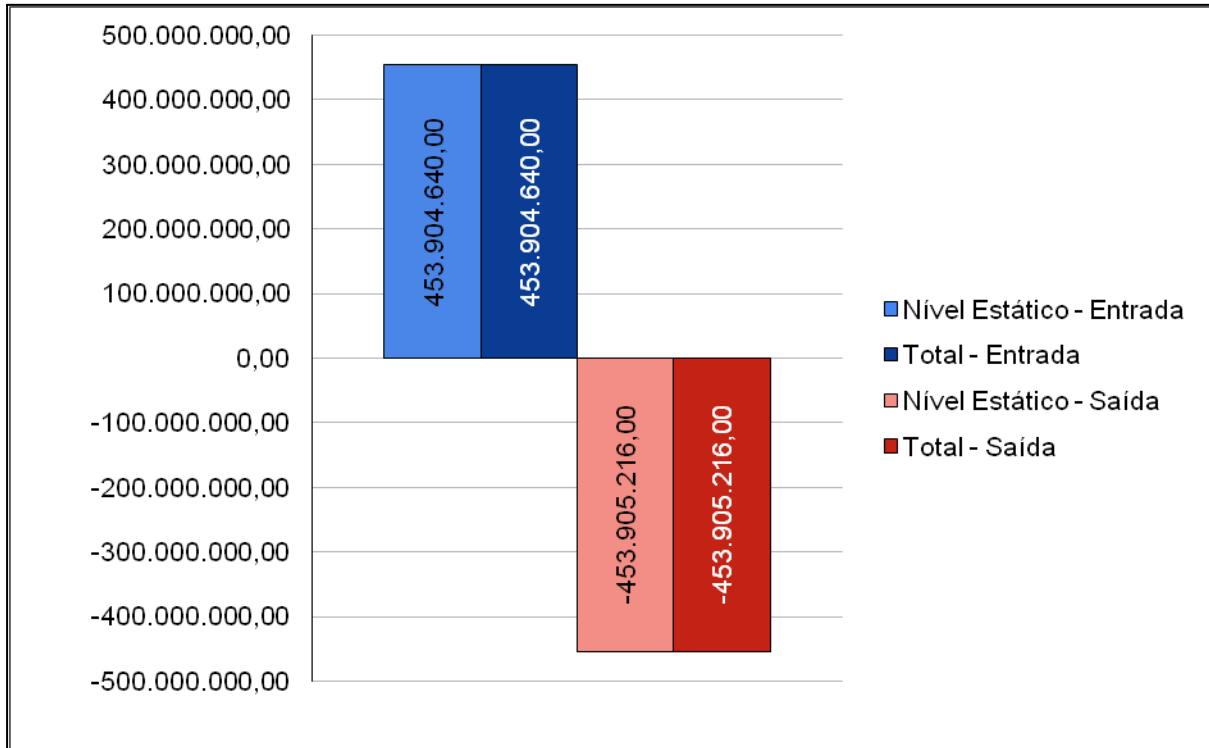
**Tabela 2** - Balanço hídrico simulado em regime permanente

Fonte	Entrada (m <sup>3</sup> ) (10 <sup>-6</sup> )	Saída (m <sup>3</sup> ) (10 <sup>-6</sup> )
Nível Estático	45,3905	45,3905
Poços	0,00	0,00
Total	45,3904	45,3905

**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Conforme Tabela 2, o fluxo total de entrada foi de 453.904.640,00 m<sup>3</sup> representado pelo nível estático, ao passo em que o fluxo de saída simulado pelo modelo matemático totaliza uma vazão de 453.905.216,00 m<sup>3</sup> (Figura 25). A discrepância percentual no balanço hídrico foi abaixo de 0,1%, em que a diferença entre entrada e saída totalizaram 576,00 m<sup>3</sup>, pois, segundo a lei de conservação de massa, o fluxo de entrada deve ser igual ao fluxo de saída.

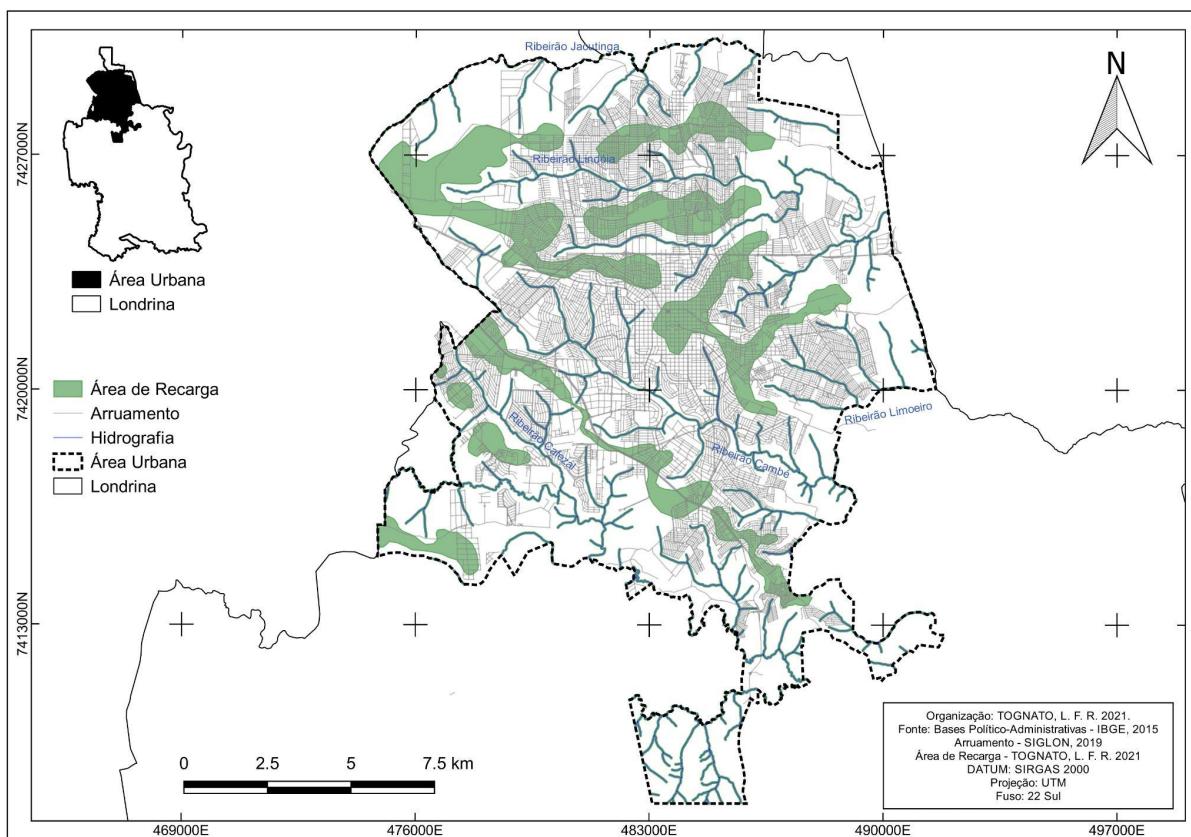
**Figura 25 – Gráfico do Balanço hídrico simulado em Regime permanente**



**Fonte:** Elaborado pelo autor.

A proteção das áreas de recarga (Figura 26), quais sejam - espiões e topos não impermeabilizados e/ou cursos hídricos com respectivas áreas de preservação permanente - , é de extrema importância para evitar o rebaixamento no nível d'água na área de estudo, haja vista a impermeabilização presente no meio urbano que atua como um obstáculo ao abastecimento do aquífero. Tais áreas estão intimamente associadas à relação geologia-pedologia, representada pelos contatos Formação Paranapanema-Latossolos, situados nos espiões e topos, e Formação Pitanga-Nitossolos, localizados sob os cursos hídricos e sobre falhas e/ou fraturas.

**Figura 26 - Áreas de Recarga**



**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Para além da simulação da dinâmica hidrogeológica em condições naturais, sem retirada d'água por atividade humana, procedeu-se à simulação de cenários com a retirada hídrica por poços em diferentes intervalos de tempo, conforme a seguir.

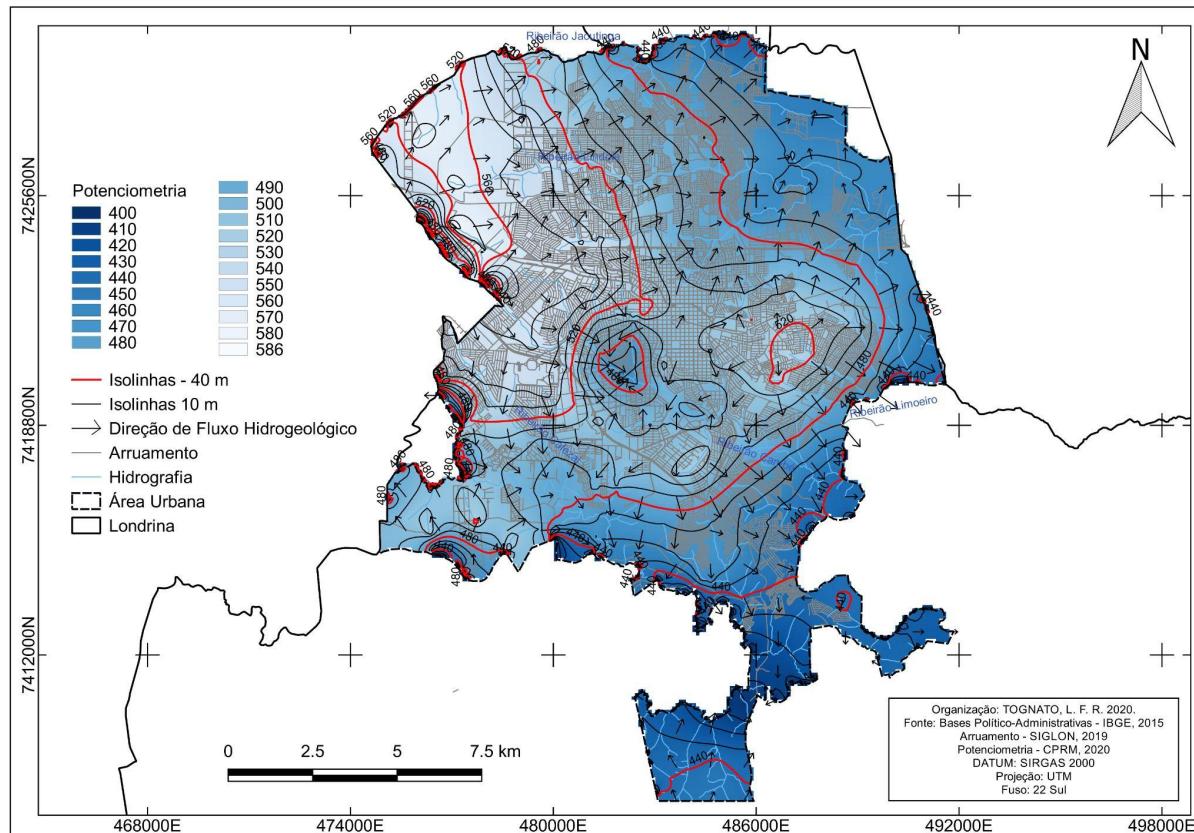
## 5.2 CENÁRIOS SIMULADOS

A partir da simulação em condições naturais, foram realizadas três simulações sobre a área total do domínio, a saber: a primeira com um ano de retirada d'água pelos poços tubulares profundos; a segunda com cinco anos de retirada; e a terceira com 10 anos de retirada.

### 5.2.1 Primeiro Cenário

No primeiro cenário simulado (Figura 27), com um ano de retirada d'água pelos poços, o *plugin* modelou uma superfície potenciométrica semelhante àquela simulada em condições naturais.

**Figura 27 - Potociometria no primeiro cenário**



**Fonte:** Elaborado pelo autor.

A alteração ficou aparente nos valores do balanço volumétrico apresentados na Tabela 3, onde o fluxo total de entrada foi da ordem de 166.140.674.048,00 m<sup>3</sup> enquanto o fluxo de saída corresponde à 166.140.805.120,00 m<sup>3</sup>.

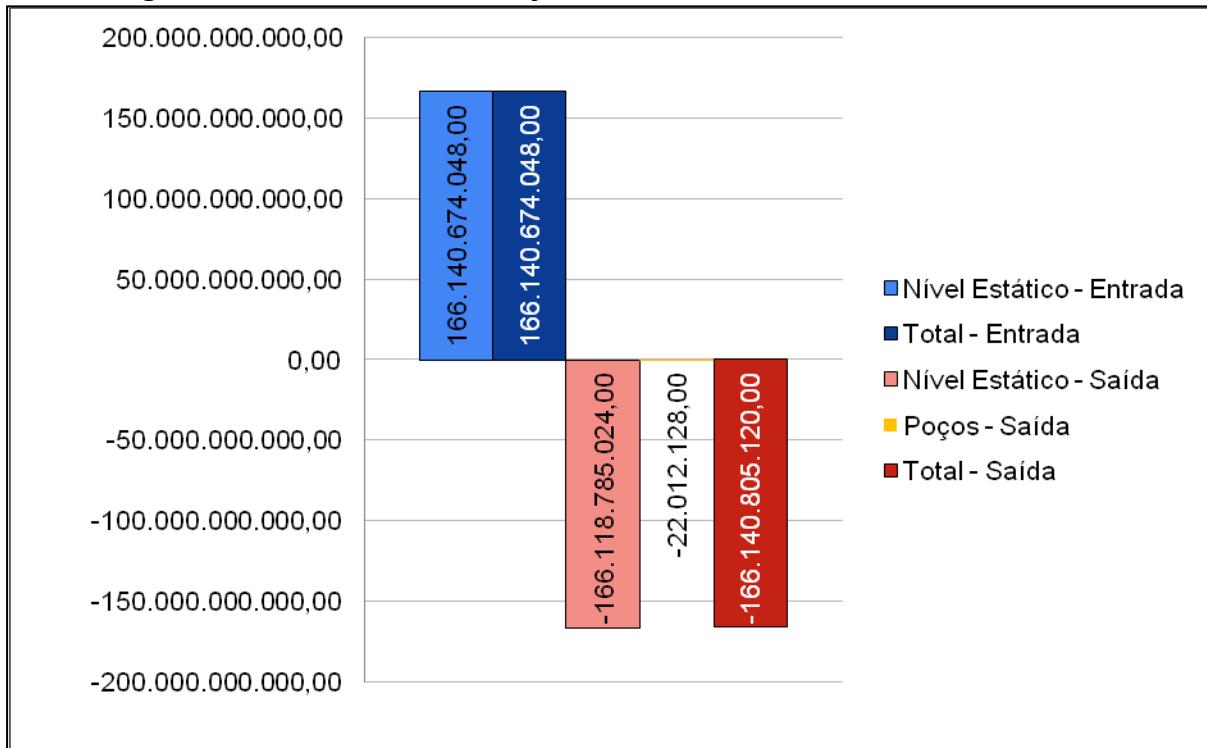
**Tabela 3 - Balanço hídrico simulado no primeiro cenário**

Fonte	Entrada (m <sup>3</sup> ) (10 <sup>-6</sup> )	Saída (m <sup>3</sup> ) (10 <sup>-6</sup> )
Nível Estático	166.140,6740	166.118,7850
Poços	0,00	2,2012
Total	166.140,6740	166.140,8051

**Fonte:** Elaborado pelo autor.

No que se refere aos resultados simulados no primeiro cenário comparados aos das condições naturais, houve um aumento nos valores tanto de entrada quanto de saída, de acordo com a Figura 28, neste último caso considerando a ação dos poços. Também se verifica a manutenção das principais direções de fluxo.

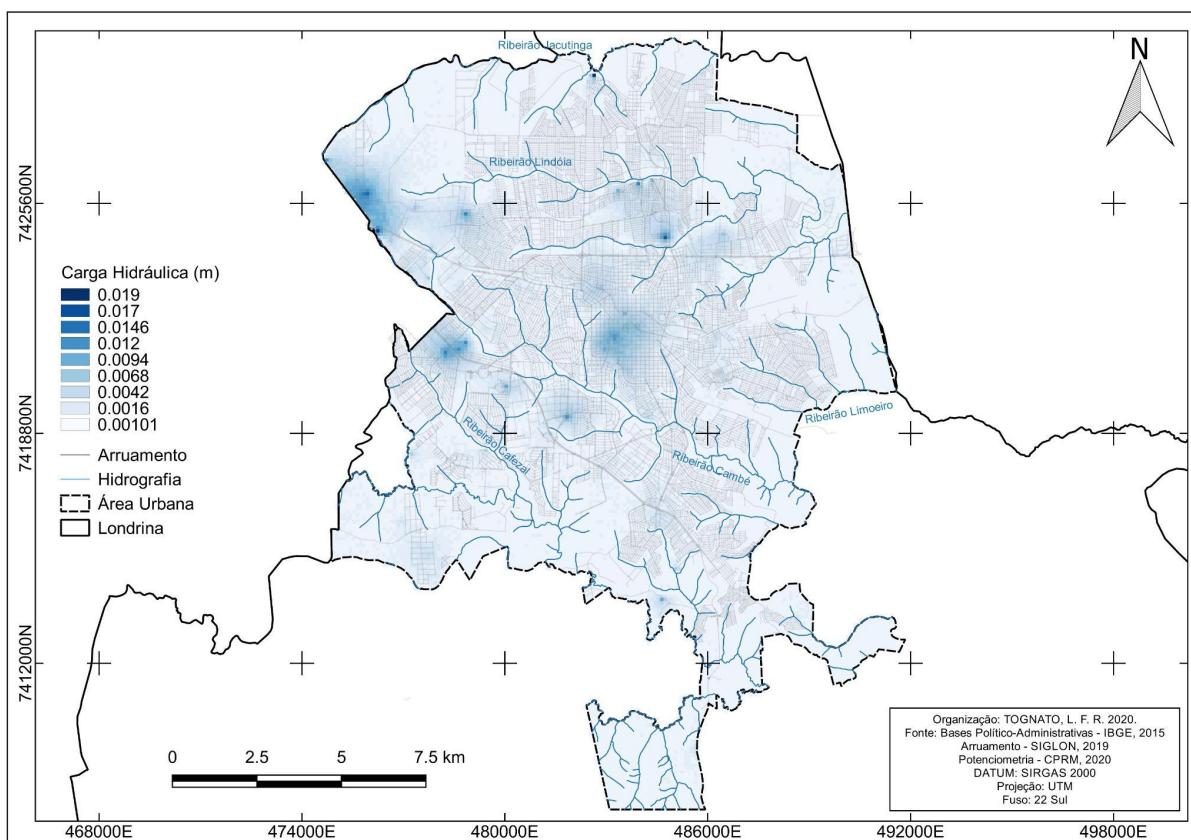
**Figura 28 – Gráfico do Balanço hídrico simulado no Primeiro Cenário**



**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Com isso, calculou-se a diferença entre as cargas hidráulicas encontradas em condições naturais e as cargas hidráulicas simuladas com a ação dos poços num intervalo de tempo de um ano (Figura 29), utilizando a ferramenta Calculadora *Raster* do QG/S. Identificou-se redução no comportamento do potencial hidráulico do aquífero, evidenciada pela diminuição na carga hidráulica na ordem de 0,019 m nas regiões central e noroeste do domínio.

**Figura 29** - Diferença Hidráulica entre primeiro cenário e regime permanente

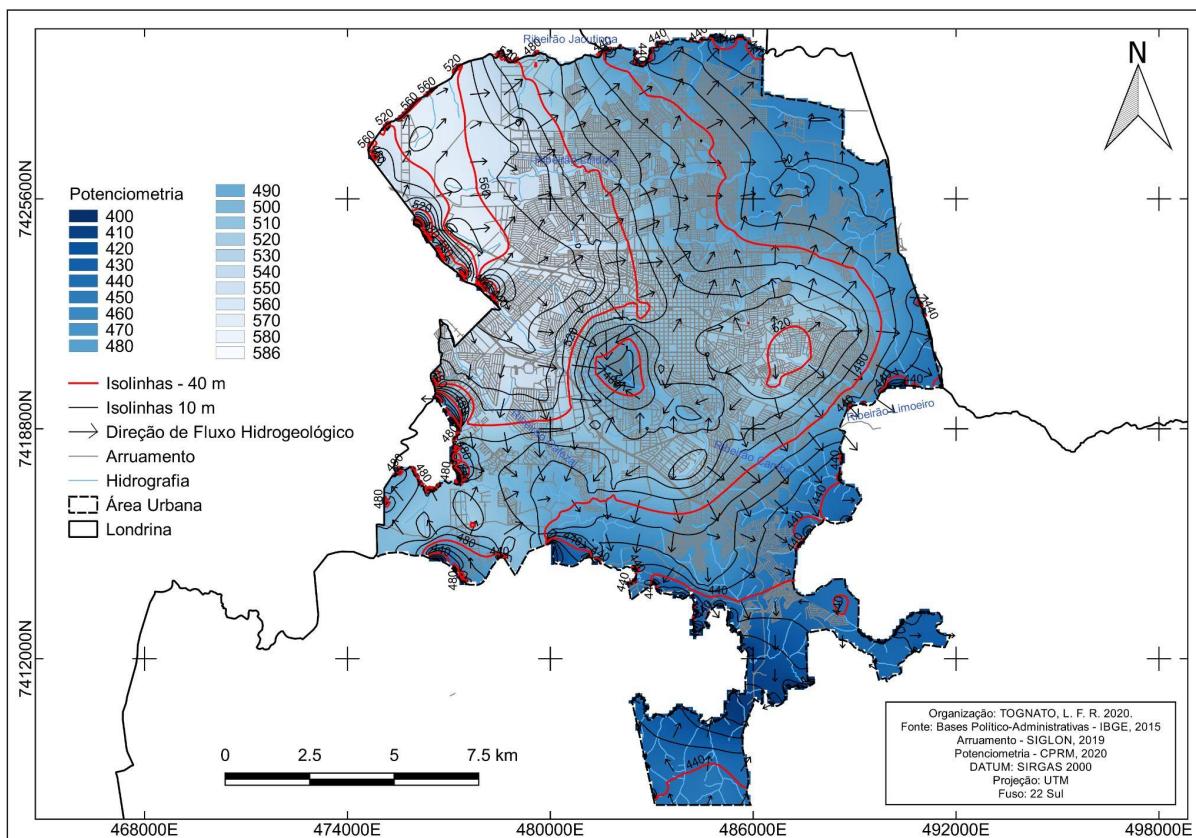


**Fonte:** Elaborado pelo autor.

### 5.2.2 Segundo Cenário

O segundo cenário simulado (Figura 30), levou em consideração um intervalo de tempo de cinco anos na retirada d'água pelos poços tubulares profundos. Tal qual no primeiro cenário, a superfície potenciométrica não sofreu alterações perceptíveis.

**Figura 30 - Potociometria no segundo cenário**



**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Assim como no primeiro cenário, notou-se alteração nos valores do balanço volumétrico (Tabela 4), sendo 994.574.598.144,00 m<sup>3</sup> referentes ao fluxo total de entrada e 994.575.187.968,00 m<sup>3</sup> relativos ao fluxo de saída.

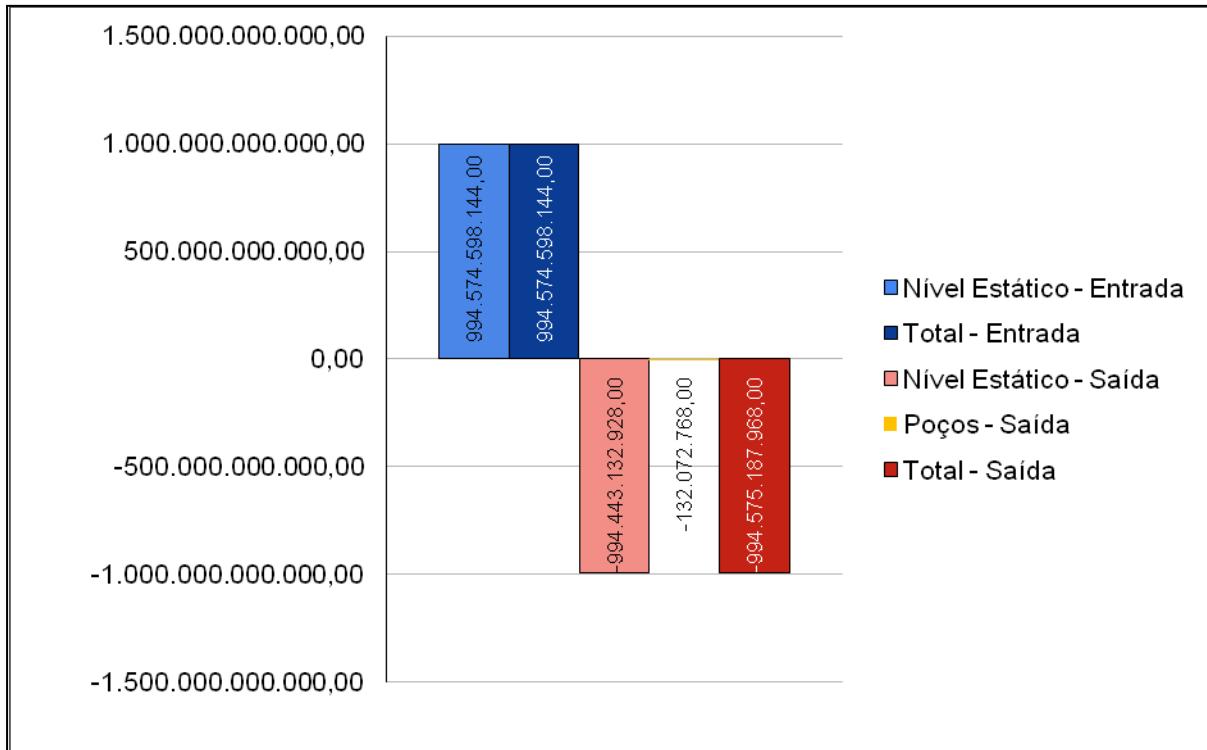
**Tabela 4 - Balanço hídrico simulado no segundo cenário**

Fonte	Entrada (m <sup>3</sup> ) (10 <sup>-6</sup> )	Saída (m <sup>3</sup> ) (10 <sup>-6</sup> )
Nível Estático	994.574,5981	994.443,1329
Poços	0,00	13,2072
Total	994.574,5981	994.575,1879

**Fonte:** Elaborado pelo autor.

O mesmo se constatou no que tange ao comparativo entre os resultados do primeiro cenário e do segundo cenário (Figura 31), mantendo-se tanto o aumento dos valores de entrada e de saída quanto as principais direções de fluxo.

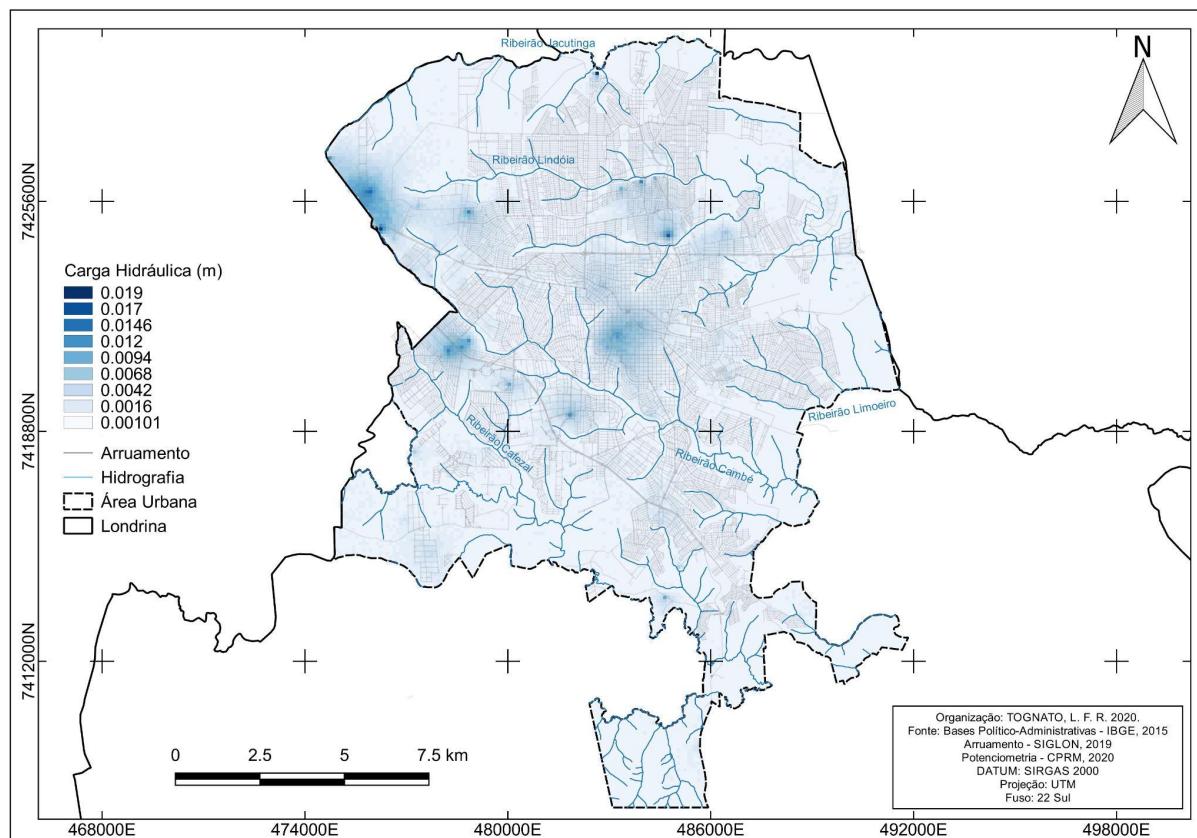
**Figura 31** – Gráfico do Balanço hídrico simulado no Segundo Cenário



**Fonte:** Elaborado pelo autor.

De forma semelhante ao cenário anterior, foi calculada a diferença entre as cargas hidráulicas (Figura 32) encontradas no primeiro cenário e no segundo cenário (ação dos poços no intervalo de tempo de cinco anos), a partir da qual foi possível observar a diminuição na carga hidráulica, nas mesmas regiões central e noroeste do domínio, num quantitativo de 0,019 m.

**Figura 32 - Diferença Hidráulica entre segundo e primeiro cenários**

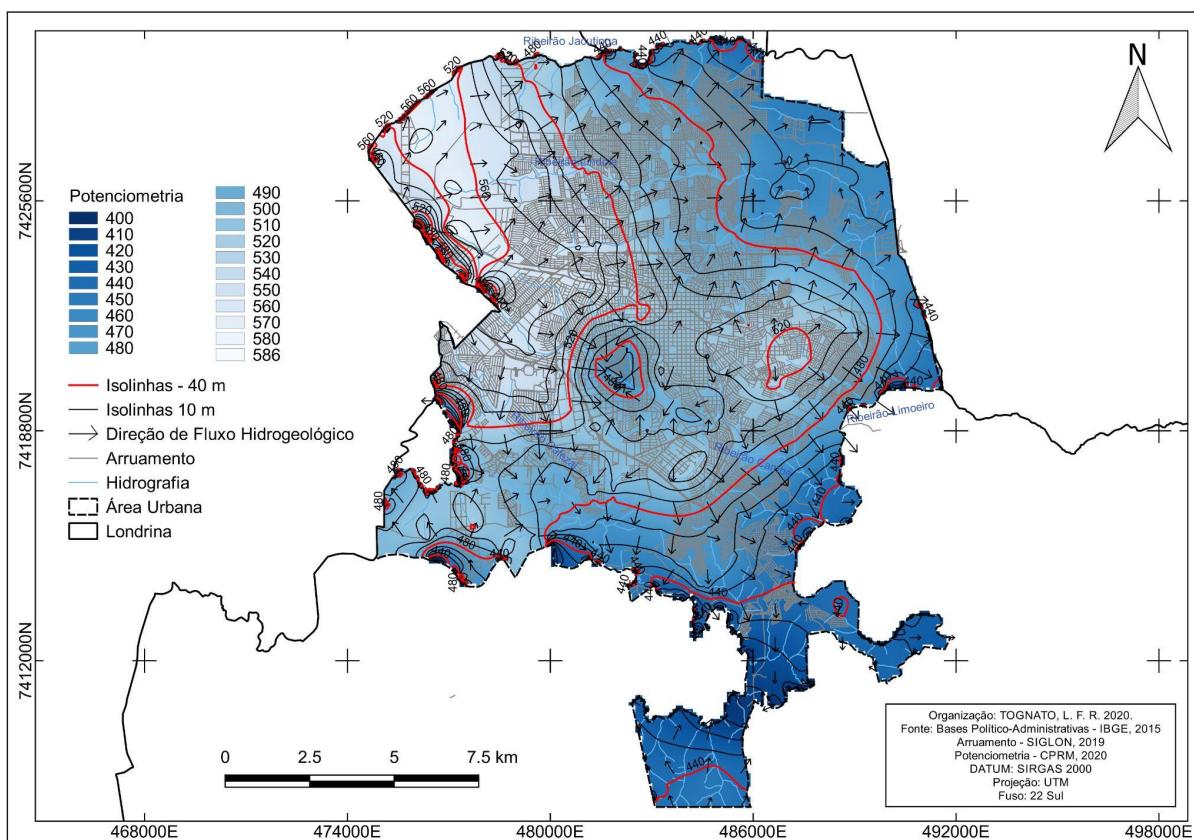


**Fonte:** Elaborado pelo autor.

### 5.2.3 Terceiro Cenário

A Figura 33 apresenta o terceiro cenário simulado, que considerou o intervalo de tempo de dez anos na retirada d'água pelos poços. A superfície potenciométrica não apresentou modificações visíveis, assim como nos demais cenários simulados.

**Figura 33 - Potociometria no terceiro cenário**



**Fonte:** Elaborado pelo autor.

A Tabela 5 evidencia os valores do balanço volumétrico do terceiro cenário, dos quais  $2,6514 \times 10^{12} \text{ m}^3$  representam o fluxo total de entrada e  $2.651.401.572.864,00 \text{ m}^3$  correspondem ao fluxo de saída.

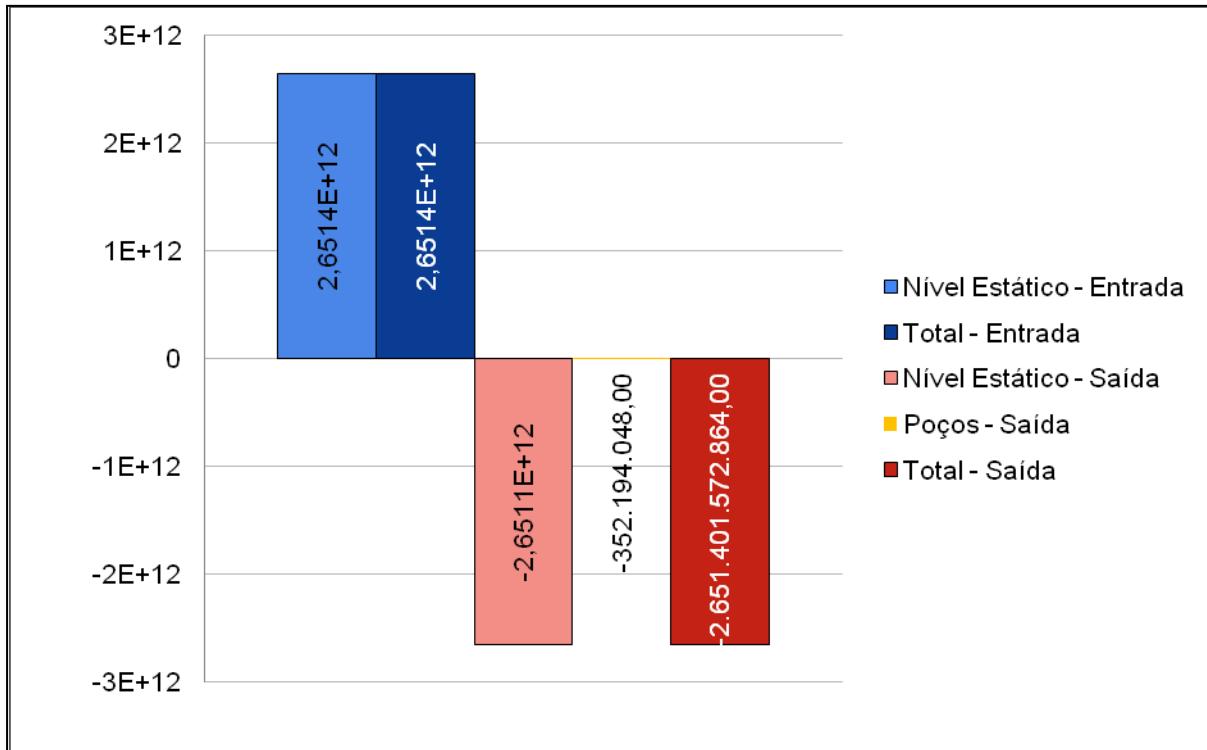
**Tabela 5 - Balanço hídrico simulado no terceiro cenário**

Fonte	Entrada ( $\text{m}^3$ ) ( $10^{-6}$ )	Saída ( $\text{m}^3$ ) ( $10^{-6}$ )
Nível Estático	$2,6514 \times 10^{12}$	$2,6511 \times 10^{12}$
Poços	0,00	35,2194
Total	$2,6514 \times 10^{12}$	$2.651.401,5728$

**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Semelhante aos cenários anteriores, o comparativo entre os resultados do segundo e terceiro cenários (Figura 34), manteve as principais direções de fluxo e o aumento dos valores de entrada e de saída do modelo simulado.

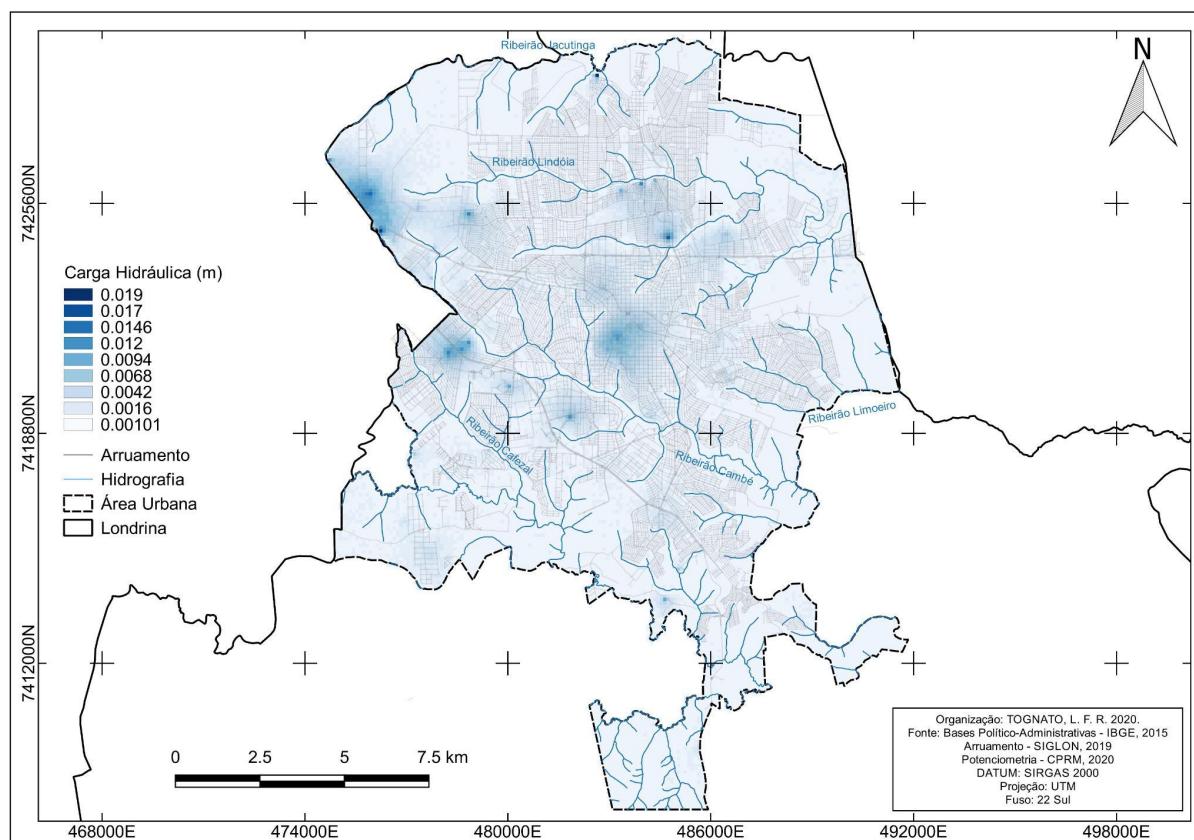
**Figura 34** – Gráfico do Balanço hídrico simulado no Terceiro Cenário



**Fonte:** Elaborado pelo autor.

A diferença entre as cargas hidráulicas encontradas no segundo e terceiro cenários (Figura 35) revelou a manutenção da diminuição na carga hidráulica do modelo, especialmente nas mesmas regiões central e noroeste do domínio, mantendo-se o quantitativo de 0,019 m.

**Figura 35 - Diferença Hidráulica entre terceiro e segundo cenários**



**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Os valores totais dos balanços hídricos simulados, em regime permanente e nos primeiro, segundo e terceiro cenários, estão apresentados na Tabela 6.

**Tabela 6 - Balanço hídrico total simulado**

Períodos		Fonte		
		Nível Estático	Poços	Total
Regime permanente	<b>Entrada (m<sup>3</sup>)</b> (10 <sup>-6</sup> )	45,3904	0	45,3904
	<b>Saída (m<sup>3</sup>)</b> (10 <sup>-6</sup> )	45,3905	0	45,3905
Primeiro cenário	<b>Entrada (m<sup>3</sup>)</b> (10 <sup>-6</sup> )	166.140,6740	0	166.140,6740
	<b>Saída (m<sup>3</sup>)</b> (10 <sup>-6</sup> )	166.118,7850	2,2012	166.140,8051
Segundo cenário	<b>Entrada (m<sup>3</sup>)</b> (10 <sup>-6</sup> )	994.574,5981	0	994.574,5981
	<b>Saída (m<sup>3</sup>)</b> (10 <sup>-6</sup> )	994.443,1329	13,2072	994.575,1879
Terceiro cenário	<b>Entrada (m<sup>3</sup>)</b>	$2,6514 \times 10^{12}$	0	$2,6514 \times 10^{12}$

---

<b>Saída (m<sup>3</sup>)</b>	$2,6511 \times 10^{12}$	$35,2194 \times 10^6$	$2.651.401,5728 \times 10^6$
------------------------------	-------------------------	-----------------------	------------------------------

**Fonte:** Elaborado pelo autor.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo em vista a relevância da água para a vida, e que sua gestão demanda responsabilidade e qualidade tanto em superfície como no subterrâneo, esta pesquisa debruçou o olhar para a dinâmica deste recurso ambiental no meio subterrâneo, buscando compreender a dinâmica hidrogeológica da área urbana de Londrina-PR e, com isso, gerenciar as águas subterrâneas a partir da aplicação do *plugin FREEWAT*.

De modo complementar, foram identificadas as características fundamentais da hidrogeologia da área urbana de Londrina-PR, bem como sua relação com os demais elementos do meio físico da paisagem.

A partir desta identificação, procedeu-se ao desenvolvimento de um modelo de representação da dinâmica hidrogeológica na área de estudo a partir da aplicação do *plugin FREEWAT* no *software QGIS*. Tal *plugin* foi empregado para simular modelos da dinâmica hidrogeológica em condições naturais e alteradas, sendo que as condições alteradas dizem respeito à retirada d'água do Sistema Aquífero Serra Geral através de poços tubulares profundos.

Os modelos gerados indicaram o controle do nível piezométrico na área urbana de Londrina-PR por meio da hidrografia e da topografia, tanto que os principais padrões de fluxo verificados têm direcionamento nordeste e sudeste, acompanhando a hipsometria urbana e as bacias hidrográficas dos ribeirões Cafezal, Cambé, Jacutinga e Lindóia. Com isso, a proteção das áreas de recarga, quais sejam - espiões e topos não impermeabilizados e/ou cursos hídricos com respectivas áreas de preservação permanente - , é de extrema importância para evitar o rebaixamento no nível d'água na área de estudo, haja vista a impermeabilização presente no meio urbano que atua como um obstáculo ao abastecimento do aquífero. Tais áreas estão intimamente associadas à relação geologia-pedologia, representada pelos contatos Formação Paranapanema-Latossolos, situados nos espiões e topos, e Formação Pitanga-Nitossolos, localizados sob os cursos hídricos e sobre falhas e/ou fraturas.

Os cenários simulados apresentam a influência sofrida pelo nível piezométrico a partir da retirada d'água por poços, apontando uma diminuição na carga hidráulica do aquífero nas regiões central e noroeste da área de estudo, inspirando atenção. Supõe-se que tais níveis de redução estejam associados à

localização das indústrias no setor noroeste e ao adensamento urbano no setor central da área urbana de Londrina-PR, podendo, inclusive, gerar lineamentos e/ou novos direcionamentos de fluxo. Contudo, apesar de tal diminuição, os cenários exibem a manutenção da superfície piezométrica em toda a área de estudo, denotando a possibilidade da continuidade de exploração das águas subterrâneas nos demais setores da urbe londrinense.

Merece destaque o desempenho do *FREEWAT*, *plugin* caracterizado como ferramenta valiosa no processo de modelagem da dinâmica hidrogeológica uma vez que, ao estar inserido no *QGIS*, permite a integração, manipulação e pós processamento de dados georreferenciados para simulação da quantidade e qualidade da água, tanto superficiais como subterrâneas, num Sistema de Informações Geográficas.

Considerando os modelos gerados, propôs-se um modelo de gestão político-administrativa sobre tal dinâmica, de modo que a municipalidade exerça as suas competências legais através de instrumentos eficazes, como por exemplo o Plano Diretor e o respectivo Zoneamento Ambiental, e de ações práticas sobre o assunto. Isto porque, ainda que as águas subterrâneas sejam bens do Estado, quando do seu uso em solo urbano há a prerrogativa de um regramento por parte do ente municipal sobre tal atividade, uma vez que se trata do seu território, mesmo que este regramento esteja mais associado ao acompanhamento e fiscalização da utilização do que com a deliberação, neste caso específico.

Portanto, o município pode ser considerado ente de destaque na gestão dos recursos hídricos subterrâneos, sobretudo quanto ao monitoramento do uso destes, atuando nas dimensões ambiental, de saneamento básico e vigilância sanitária. No caso específico do município de Londrina-PR, a base legal municipal existente toma um caráter genérico e mais associado ao registro do que com a gestão propriamente dita. Com isso, a gestão dos recursos hídricos, em especial os subterrâneos, fica a cargo do nível estadual uma vez que a estrutura prevista pelo SINGREH e a legislação pertinente assim o fazem, embora seja necessária a complementação para o devido funcionamento de tal sistema no quesito municipal. Daí a proposição da criação de um Sistema Municipal de Monitoramento dos Recursos Hídricos Subterrâneos.

Para este sistema se sugere a composição por um quadro técnico habilitado (dotado de, no mínimo, um geógrafo e um geólogo) que realize ações e/ou

processos de ordem técnico-prática, empregando o *plugin FREEWAT* como ferramenta de gestão, gerando produtos fundamentais para a colaboração com os entes federativos responsáveis pelo controle de tal recurso, podendo resultar numa fonte de receita à administração municipal e, com isso, qualificando a questão ambiental na área de estudo.

Enfim, este trabalho buscou elucidar algumas questões de cunho hidrogeológico e político-administrativo sobre as águas subterrâneas na área urbana de Londrina-PR, bem como embasar e/ou nortear discussões acerca de investigações futuras sobre o domínio modelado no que tange às incertezas não solucionadas por esta pesquisa. O intuito é de que este estudo traga contributos relativos à questão ambiental, à tomada de decisões e elaboração de políticas públicas por agentes públicos e, sobretudo, à sociedade, especialmente a partir do compartilhamento dos resultados aqui atingidos/identificados/obtidos, ainda que estes estejam assentados sob o prisma do ponto de vista de dois aspectos da realidade, o geográfico e o geológico.

## 7 REFERÊNCIAS

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **O PROGESTÃO NO PARANÁ: Síntese do Primeiro Ciclo do Programa (2013-2016)**. Agosto/2017. Disponível em: <[http://progestao.ana.gov.br/portal/progestao/mapa/pr/progestao\\_pr\\_2015.pdf](http://progestao.ana.gov.br/portal/progestao/mapa/pr/progestao_pr_2015.pdf)>. Acesso em: 23 out. 2020.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **O que é o SINGREH?**. Disponível em: <<https://www.ana.gov.br/aguas-no-brasil/sistema-de-gerenciamento-de-recursos-hidricos/o-que-e-o-singreh>>. Acesso em: 26 out. 2020.

ANDERSON, M. P.; WOESSNER, W. W. **Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport**. London: Academic Press, 1992. 381p.

BARROS, M. V. F. B.; BARROS, O. N.; POLIDORO, M.; PEREIRA, A. C. F. **Atlas Digital da Região Metropolitana de Londrina**. ISBN: 9788598054100. Publicação online. Grupo IMAP&P - Imagens, Paisagens & Personagens. Universidade Estadual de Londrina. 2011.

BERTALANFFY L. O significado da Teoria Geral dos Sistemas. In: BERTALANFFY, L. A teoria geral dos sistemas. Petrópolis: Vozes, 1973, p. 52-81.

BORSI, I.; FOGLIA, L.; CANNATA, M.; VÁZQUEZ-SUÑÉ, E.; MEHL, S.; DE FILIPPIS, G.; CRIOLLO, R.; GHETTA, M.; CARDOSO, M.; VELASCO, V.; NEUMANN, J.; TOEGL, A.; SERRANO, A.; RIERA, C.; ROSSETTO, R. **FREEWAT User Manual, Volume 0 – Reference Manual**, version 1.2.0, November 14th, 2019.

BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil, de 05 de outubro de 1988**. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/constituicao/constituicacomilado.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicacomilado.htm)> Acesso em: 03 out. 2020.

BRASIL. **Lei Federal nº 9.433, de 08 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. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l9433.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9433.htm)> Acesso em: 06 out. 2020.

CÂMARA, G.; MEDEIROS, J. S. Princípios básicos em geoprocessamento. In: ASSAD, E. D.; SANO, E. E. (Ed.). Sistemas de informações geográficas: aplicações na agricultura. 2. ed. ver. ampl. Brasília, DF: Embrapa-SPI: Embrapa-CPAC, pp.3-11, 1998.

CELLIGOI, A. **Recursos Hídricos subterrâneos da Formação Serra Geral em Londrina - PR**. Dissertação de mestrado. São Paulo - IG – USP, 83 p., 1993.

CRESWELL, J. W. **Projeto de pesquisa: métodos qualitativo, quantitativo e misto.** Tradução Luciana de Oliveira da Rocha. - 2. ed. Porto Alegre: Artmed, 2007.

ESTEVES, C. J. O. A Aplicação dos Instrumentos da Política Nacional e Estadual de Recursos Hídricos no Paraná: Sistematização de Informações e Abordagem Panorâmica. **Caderno IPARDES - Estudos e Pesquisas.** Curitiba: v. 7, n. 1, p. 20-60. ja./jul./2017. Disponível em: <<http://www.aguasparana.pr.gov.br/arquivos/File/BACIAS/IPARDES-2017-situacao-gh-pr.pdf>>. Acesso em: 27 out. 2020.

FREEZE, A. R.; CHERRY, J. A. **Águas Subterrâneas.** Tradução de Everton de Oliveira ... [et al.]; Everton de Oliveira (Coord.). São Paulo (SP): Edição Instituto Água Sustentável, 2017.

GASTMANS, D. et al. **Geochemical evolution of groundwater in a basaltic aquifer based on chemical and stable isotopic data: Case study from the Northeastern portion of Serra Geral Aquifer, São Paulo state (Brazil).** Journal of Hydrology, v. 535, p. 598-611. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/172594>>. Acesso em: 10 fev. 2022.

HANSON R.T., BOYCE S.E., SCHMID W., HUGHES J.D., MEHL S.M., LEAKE S.A., MADDOCK T., NISWONGER R.G. **One-water Hydrologic Flow Model (MODFLOW-OWHM).** Techniques of Groundwater of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey, Book 6, Chapter A51. Washington: US Government Printing Office, 2014. 120p.

IAT - INSTITUTO ÁGUA E TERRA. **Plano Estadual de Recurso Hídricos.** Disponível em: <<http://www.iat.pr.gov.br/Pagina/Plano-Estadual-de-Recursos-Hidricos-do-Parana-PLERHPR>>. Acesso em: 25 out. 2020.

IAT - INSTITUTO ÁGUA E TERRA. **Plano Estadual de Recurso Hídricos - Resumo Executivo.** Disponível em: <[http://www.iat.pr.gov.br/sites/agua-terra/arquivos\\_restritos/files/documento/2020-03/resumo\\_executivo\\_plerh.pdf](http://www.iat.pr.gov.br/sites/agua-terra/arquivos_restritos/files/documento/2020-03/resumo_executivo_plerh.pdf)>. Acesso em: 25 out. 2020.

IAT - INSTITUTO ÁGUA E TERRA. **Política Estadual de Recurso Hídricos.** Disponível em: <<http://www.iat.pr.gov.br/Pagina/Politica-Estadual-de-Recursos-Hidricos>>. Acesso em: 25 out. 2020.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Estimativas da população residente para os municípios e para as unidades da federação brasileiros com data de referência em 1º de julho de 2021. **Diário Oficial da União [República Federativa do Brasil],** Brasília, DF, 26 ago. 2021. p. 119. Disponível em: <[https://ftp.ibge.gov.br/Estimativas\\_de\\_Populacao/Estimativas\\_2021/estimativa\\_dou\\_2021.pdf](https://ftp.ibge.gov.br/Estimativas_de_Populacao/Estimativas_2021/estimativa_dou_2021.pdf)> Acesso em: 30 ago. 2021.

INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Banco de Dados Meteorológicos do INMET**. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/#> Acesso em: 10 nov. 2021.

ITCG - INSTITUTO DE TERRAS, CARTOGRAFIA E GEOLOGIA DO PARANÁ. **Mapa Geológico do Grupo Serra Geral no Estado do Paraná – Nota Explicativa**. Curitiba: ITCG, 2018. 316 p.

JAKOB, A. A. E.; YOUNG, A. F. O uso de métodos de interpolação espacial de dados nas análises sociodemográficas. **Anais do XV Encontro Nacional de Estudos Populacionais**, Belo Horizonte (MG). Associação Brasileira de Estudos Populacionais (ABEP), pp. 22, 2006.

LARINI, M. M. ; SANTOS, M. M. **Região Metropolitana de Londrina - PR e a gestão dos recursos hídricos: comparativo da utilização das águas subterrâneas e dos mananciais superficiais para o abastecimento público**. Ciência Geográfica, v. XIX, p. 24-39, 2015.

LA VIGNA, F.; HILL, M.C.; ROSSETTO, R.; MAZZA, R. **Parameterization, sensitivity analysis, and inversion: an investigation using groundwater modeling of the surface-mined Tivoli-Guidonia basin (Metropolitan City of Rome, Italy)**. Hydrogeol. J. 24, 1423–1441, 2016.

LEINZ, V. **Contribuição à geologia dos derrames basálticos do sul do Brasil**. Bol. Fac. Filos. Ciências e Letas, USP. (Geol. 5) São Paulo. 103 p. 1949. Disponível em: <<https://www.google.com/url?q=https://www.revistas.usp.br/bffcluspgeologia/article/view/121703/118596&sa=D&source=docs&ust=1657880873440232&usg=AOvVaw21VXGw0MPTyu-bQ8BxHC0I>>. Acesso em: 24 jun. 2022.

LIMA, W.P. **Hidrologia Florestal Aplicada ao Manejo de Bacias Hidrográficas**. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2.ed., p. 245, 2008.

LONDRINA. **Decreto Municipal nº 797, de 26 de junho de 2019**. Aprova o Regimento Interno da Secretaria Municipal do Ambiente. Disponível em: <<http://repositorio.londrina.pr.gov.br/index.php/menu-ambiente/35213-regimento-interno-da-sema/file>> Acesso em: 05 nov. 2020.

LONDRINA. **Estrutura, Secretaria Municipal do Ambiente**. Disponível em: <<https://portal.londrina.pr.gov.br/menu-oculto-ambiente/estrutura-ambiente>> Acesso em: 05 nov. 2020.

LONDRINA. **Lei Orgânica do Município de Londrina, Estado do Paraná, de 05 de abril de 1990**. Disponível em: <<https://leismunicipais.com.br/a1/lei-organica-londrina-pr>> Acesso em: 10 out. 2020.

LONDRINA. **Lei Ordinária Municipal nº 10.637, de 24 de dezembro de 2008**. Institui as Diretrizes do Plano Diretor Participativo do Município de Londrina - PDPML e dá outras providências. Disponível em: <<https://leismunicipais.com.br/a/pr/l/londrina/lei-ordinaria/2008/1064/10637/lei-ordinaria-municipal-nº-10-637-de-24-de-dezembro-de-2008>> Acesso em: 10 out. 2020.

ria-n-10637-2008-institui-as-diretrizes-do-plano-diretor-participativo-do-municipio-de-londrina-pdpml-e-da-outras-providencias?q=10637%2F2008> Acesso em: 10 out. 2020.

**LONDRINA. Lei Ordinária Municipal nº 10.967, de 26 de julho de 2010.** Dispõe sobre a Política Municipal de Saneamento Básico, Cria o Conselho Municipal de Saneamento e o Fundo Municipal de Saneamento e dá outras providências. Disponível em:

<<https://leismunicipais.com.br/a/pr/l/londrina/lei-ordinaria/2010/1097/10967/lei-ordinaria-n-10967-2010-dispoe-sobre-a-politica-municipal-de-saneamento-basico-cria-o-conselho-municipal-de-saneamento-e-o-fundo-municipal-de-saneamento-e-da-outras-providencias?q=10967%2F2010>> Acesso em: 10 out. 2020.

**LONDRINA. Lei Ordinária Municipal nº 11.471, de 05 de janeiro de 2012.** Institui o Código Ambiental do Município de Londrina. Disponível em: <<https://leismunicipais.com.br/a/pr/l/londrina/lei-ordinaria/2012/1148/11471/lei-ordinaria-n-11471-2012-institui-o-codigo-ambiental-do-municipio-de-londrina?q=11471%2F2012>> Acesso em: 10 out. 2020.

LOPES, L.R.; VITAL, A.R.T.; FRANKEN, W.K.; FERREIRA, S.J.F.; MARQUES FILHO, A.O.; FAJARDO, J.D.V.; OLIVEIRA, J.A.D. Interceptação e ciclagem de nutrientes em Floresta de Encosta na Amazônia Central. **Anais do I Simpósio de Recursos Hídricos do Norte e Centro-Oeste**, Cuiabá. Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), pp. 1-12, 2007.

McDONALD, M.G., HARBAUGH, B.R. **A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model**. Techniques of Groundwater of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey. Book 6, Chapter A1. Washington: US Government Printing Office, 1988. 539p.

MINERAIS DO PARANÁ S/A (MINEROPAR). **Atlas Geomorfológico do Estado do Paraná**. SEIC do Estado do Paraná. Curitiba. 2006.

NITSCHE, P. R.; CARAMORI, P. H.; RICCE, W. S.; PINTO, L. F. D. **Atlas Climático do Estado do Paraná**. Londrina (PR): Instituto Agronômico do Paraná - IAPAR, 2019. 210 p. Disponível em: <<http://www.idrparana.pr.gov.br/Pagina/Atlas-Climatico>> Acesso em: 05 dez. 2020

OTTO, C. S.; DE MORAIS, E. M. B. Reflexões sobre a Análise Sistêmica na Geografia tendo o tema Água como Referência. **Para Onde!?**, Porto Alegre, RS, v. 12, n. 2, p. 271-280, nov. 2019. ISSN 1982-0003. Disponível em: <<https://seer.ufrgs.br/paraonde/article/view/97560>>. Acesso em: 08 nov. 2021.

**PARANÁ. Lei Estadual nº 12.726, de 26 de novembro de 1999.** Institui a Política Estadual de Recursos Hídricos e adota outras providências. Disponível em: <<https://www.legislacao.pr.gov.br/legislacao/pesquisarAto.do?action=exibir&codAto=5849>> Acesso em: 06 out. 2020.

**PARANÁ. Resolução nº 061 do Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CERH/PR), de 09 de dezembro de 2009.** Aprova o Plano Estadual de Recursos

Hídricos e dá outras providências. Disponível em:  
[https://www.sedest.pr.gov.br/sites/default/arquivos\\_restritos/files/migrados/File/CERH/Resolucoes%20CERH/2009/resolucao\\_61\\_aprova\\_plerh\\_pr.pdf](https://www.sedest.pr.gov.br/sites/default/arquivos_restritos/files/migrados/File/CERH/Resolucoes%20CERH/2009/resolucao_61_aprova_plerh_pr.pdf) Acesso em: 10 out. 2020.

PETERLINI, G.; PINESE, J. P. P.; CELLIGOI, A. **Fatores geológicos e pedológicos que influenciam na produtividade hídrica do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) na região Norte do estado do Paraná**. Caminhos de Geografia. Uberlândia-MG, v. 21, n. 78, p. 173–191, Dez/2020.

PICCIRILLO E.M., COMIN-CHIARAMONTI, MELFI A.J., STOLFA D., BELLINI G., MARQUES L.S., GIARETTA A., NARDY A.J.R., PINESE J.P.P., Raposo M.I.B., ROISENBERG A.. Petrochemistry of Continental Flood Basalt-Rhyolite Suites and Related Intrusives from the Paraná Basin (Brazil). In: E.M. Piccirillo and A.J. Melfi (eds.) The Mesozoic Flood Volcanism of the Paraná Basin: Petrogenetic and Geophysical Aspects. São Paulo, Instituto Astronômico e Geofísico – Universidade de São Paulo. p. 107-156. 1988.

PICCIRILLO, E.M.; MELFI, A.J. **The Mesozoic Flood Volcanism of the Paraná Basin: Petrogenetic and and Geophysical Aspects**, E.M. Piccirillo and A.J. Melfi Editors, IAG-USP, São Paulo, Brazil, 600pp. 1988.

PINESE, J.P.P.; GUIMARÃES, D.V. Principais Elementos do Meio Físico no Município de Londrina, Paraná, Brasil. In: CUNHA, L.; YAMAKI, H. (orgs.). Paisagem e Território. Londrina: UEL, 2018. 151 p

PREFEITURA MUNICIPAL DE LONDRINA (PML). Plano Diretor Participativo Municipal de LONDRINA, **Cap.3 Aspectos Ambientais**, 2008. Secretaria de Planejamento. Londrina, 2008. 99 Slides. Disponível em:  
[http://www1.londrina.pr.gov.br/dados/images/stories/Storage/ippul/apresentacao\\_produto\\_03.pps](http://www1.londrina.pr.gov.br/dados/images/stories/Storage/ippul/apresentacao_produto_03.pps). Acesso em 20 de jun de 2020.

ROSSETTO R., BORSI I., FOGLIA L. FREEWAT: FREE and open source software tools for WATer resource management. Roma, Rendiconti Online, **Società Geologica Italiana** v.35, p. 252-255, 2015.

SAFRE, A. L. S. Simulação numérica do fluxo das águas subterrâneas na Estação Ecológica de Santa Bárbara/SP. **Dissertação (Mestrado)**, Universidade Estadual Paulista Faculdade de Ciências Agronômicas. Botucatu: 2018, 104 p.

SANTOS, F. N. **Caracterização ambiental da microbacia do córrego Barreiro – Londrina - PR**. 2012. Monografia (Bacharelado em Geografia) – Universidade Estadual de Londrina. 2012.

SANTOS, M. M.; ARANTES, M. R. L. **Investigação Hidrogeológica: Um Estudo de Caso para Verificação de Surgências de Água em Área de Expansão Urbana**. Bol. geogr., Maringá, v. 38, n. 1, p. 120-139, 2020

SOTCHAVA, V. B. **O estudo de Geossistemas.** Métodos em questão. IG-USP. São Paulo, n.16, 1977, p. 1-52.

SCHMID, W.; HANSON, R.T.; MADDOCK, T.; LEAKE, S.A. **User Guide for the Farm Process (FMP1) for the U.S. Geological Survey's Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model, MODFLOW-2000.** U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, 2006.

SCHMID, W.; HANSON, R.T. **The Farm Process Version 2 (FMP2) for MODFLOW 2005 - Modifications and Upgrades to FMP1.** U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, 2009.

SIAGAS - SISTEMA DE INFORMAÇÕES DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. **Pesquisa Geral.** Disponível em: <<http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/apresentacao.php>>. Acesso em: 20 abr. 2020.

WANG, H. F.; ANDERSON, M. P. **Introduction to Groundwater Modelling: Finite Diference and Finite Element Methods.** San Diego, California, USA: Academic Press Limited, 1982. 237 p.