



Universidade de Brasília - UnB
Instituto de Geociências - IG

**PROPOSTA METODOLÓGICA PARA DELIMITAÇÃO DE
PERÍMETROS DE PROTEÇÃO DE CAPTAÇÕES DE ÁGUAS
SUBTERRÂNEAS: APLICAÇÃO NO DISTRITO FEDERAL**

Karina Andrade Medeiros

Dissertação de Mestrado nº 126

Orientador: Profº. Drº. José Eloi Guimarães Campos

Brasília, Março de 2018.



Universidade de Brasília - UnB
Instituto de Geociências - IG

**PROPOSTA METODOLÓGICA PARA DELIMITAÇÃO DE
PERÍMETROS DE PROTEÇÃO DE CAPTAÇÕES DE ÁGUAS
SUBTERRÂNEAS: APLICAÇÃO NO DISTRITO FEDERAL**

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. **José Eloi Guimarães Campos**

Prof. Dr. **Reginaldo Antonio Bertolo** (USP - CEPAS)

Profa. Dra. **Adriana Chatack Carmelo** (UnB)

AGRADECIMENTOS

Ao professor orientador, José Eloi Guimarães Campos, pela presteza, apoio, dedicação e conhecimento transmitido ao longo da pesquisa;

Ao Departamento Nacional de Produção Mineral, pela disponibilidade de informações e pela oportunidade de afastamento para dedicação ao curso;

Ao Instituto de Geociências pela oportunidade de realização desse trabalho;

Aos professores do Instituto, pelo conhecimento oferecido na etapa de realização das disciplinas;

À professora Tatiana Gonçalves pelas informações transmitidas ao longo da pesquisa;

Aos colegas da Universidade de Brasília, pelo auxílio nas etapas de desenvolvimento do trabalho;

Aos colegas de trabalho do DNPM, Marina, Cristine, Thiers, Carla, Carlos, Osvaldo, Wagner e a todos os demais que de alguma forma contribuíram para elaboração dessa pesquisa;

Ao meu marido, Daniel Póvoas, pelo apoio, paciência e por tornar todas as coisas mais leves;

Aos meus pais, pela dedicação e apoio;

Às minhas irmãs, Amanda e Kelly e à minha prima Rachel, pelo companheirismo;

Aos meus amigos e familiares pelo incentivo e

Aos membros da comissão examinadora pela avaliação, críticas e sugestões no texto.

Dedico este trabalho à minha mãe, Maria Solimar e à memória do meu pai, José Extáquio, por me proporcionarem uma educação digna e de qualidade.

RESUMO

O aproveitamento comercial das fontes de água mineral e potável de mesa, cujo uso se destine ao envase, balneário e estância hidromineral, depende, entre outros aspectos, da definição de perímetros de proteção da fonte, conforme estabelece a Portaria nº 231, de 31 de julho de 1998, do Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM. O citado dispositivo legal tem por objetivo assegurar a qualidade das águas subterrâneas classificadas como recurso mineral em território nacional e estabelecer limites de restrição de atividades que possam afetar seu aproveitamento.

As diferentes ocorrências dos sistemas aquíferos originam condições diversificadas nos modelos de fluxo subterrâneo que influenciam na entrada e percolação dos fluidos contaminantes. O conhecimento sobre essas informações é importante e necessário para a adequada delimitação de áreas de proteção, que eventualmente é feita de forma ineficaz, com fundamento científico escasso, o que torna sua confiabilidade questionável. O presente trabalho propõe uma metodologia para delimitação de perímetros de proteção de captação de água subterrânea a partir dos critérios técnicos hidrogeológicos e foi aplicada em três áreas no Distrito Federal, Brasil.

As áreas de estudo são representadas por dois poços e uma nascente que possuem processo minerário no DNPM para envasamento de água mineral. Estas captações estão localizadas na bacia hidrográfica do rio São Bartolomeu. Nas áreas estudadas ocorrem rochas atribuídas aos Grupos Paranoá e Canastra, sendo identificadas as seguintes classes de solo: Latossolo, Cambissolo, Gleissolo, Neossolo Quartzarênico, Nitossolo e Plintossolo. O tipo de aquífero presente nas áreas é fraturado, coberto por mantos de intemperismo e com espessura e propriedades físicas/hidrodinâmicas muito variáveis.

A metodologia foi desenvolvida e aplicada mais especificamente para a zona de contribuição (ZC) e foi fundamentada a partir da integração de informações básicas: limite da bacia hidrográfica, mapeamento de vulnerabilidade e análise de lineamentos estruturais.

Os resultados mostraram que a metodologia foi apropriada e eficaz nos locais estudados, principalmente por abranger contornos que englobam as áreas de recarga. A ZC da Área 1 apresentou uma extensão de 39 ha, com dimensões maiores a montante da captação, alcançando distâncias do poço de até 600 metros em função do grau de vulnerabilidade e dos lineamentos estruturais. O polígono gerado na Área 2 apresentou uma área de 42 ha, com maior dimensão a montante da captação. Compreendeu uma ampla proteção na área de recarga, com distância até o poço de aproximadamente 600 metros e que se prolongou até o limite da bacia hidrográfica. O limite da zona de contribuição da Área 3 resultou em um polígono de 76 ha, com distância a montante da captação de 750 metros, que englobou também grande parte da área de recarga.

A determinação das áreas de proteção a partir da metodologia proposta foi mais adequada comparada aos perímetros previamente definidos na etapa de pesquisa mineral. Adicionalmente pode ser aplicado de maneira simples e com ferramentas acessíveis em outros estudos cujo propósito seja proteger poços e nascentes.

ABSTRACT

The commercial use of mineral water for bottling and hydro-mineral resorts purposes, depends, among other aspects, on the definition of protection perimeters for springs and wells, according to Brazil's National Department of Mineral Production (DNPM) Ordinance number 231, from July 31th, 1998. The goal of this regulation is to ensure groundwater quality in national territory by restricting activities that may affect its use.

Aquifer systems types result in different conditions of groundwater flow models that may influence infiltration and percolation of contaminating fluids. This information is important and necessary to delineate wellhead protection areas, which are sometimes outlined inefficiently with scarce scientific basis, which makes its reliability questionable. This research purposes a methodology to delimit wellhead protection areas based on hydrogeologic technical criteria. It was applied in three areas in the Federal District, Brazil.

The study areas comprise two wells and one spring that have mineral rights registered in DNPM for mineral water bottling and are located in the São Bartolomeu river watershed. In these areas occur rock types attributed to the Paranoá and Canastra Groups and the following soil types were identified: Ferralsols, Cambisols, Gleysols, Arenosols, Nitisols and Plinthosols. The aquifer observed in the areas is fractured and covered by weathering mantles with variable thickness and physical / hydrodynamic properties.

The methodology was developed and applied to set the Zone of Contribution (ZOC) and was based on the integration of some basic information: watershed boundaries, vulnerability mapping and structural lineaments analysis.

The results showed that the proposed methodology was appropriate and effective to the selected areas, mainly because it covered important extensions of the recharge area. The ZOC of Area 1 showed an extension of 39 hectares, with larger dimensions upstream catchment, reaching distances up to 600 meters from the well, according to vulnerability rate and structural lineaments. The polygon defined for Area 2 comprises 42 hectares with larger dimension upstream catchment. It resulted in a vast protection to the recharge area, with a distance of about 600 meters from the well and extended until watershed limit. The ZOC boundary of Area 3 resulted in a 76 hectares polygon, with distance upstream from catchment of 750 meters that also included a major part of the recharge area.

Determination of wellhead protection areas using the proposed methodology was more adequate when compared to perimeters previously defined during mineral research. Additionally, the method requires accessible tools and can be simply applied in other studies that aim to determine protection areas for wells and springs.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO	v
ABSTRACT	vi
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xii
LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES	xiii
CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Apresentação e Justificativas	1
1.2. Objetivos	3
1.3. Materiais e Métodos	4
CAPÍTULO 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1. Proteção das Águas Subterrâneas	5
2.2. Perímetros de Proteção de Poços/Nascentes	8
2.3. Legislação e Aplicação de Perímetros de Proteção no Brasil	10
2.4. Legislação e Aplicação de Perímetros de Proteção em outros Países	11
2.4.1. França	11
2.4.2. Estados Unidos	12
2.4.3. Alemanha	13
2.4.4. Itália	13
2.4.5. Portugal	14
2.5. Métodos para Definição de Perímetros de Proteção	15
2.5.1. Raio Arbitrário Fixo (RAF)	16
2.5.2. Raio Calculado Fixo (RCF)	16
2.5.3. Formas Variáveis Simplificadas (FVS)	17
2.5.4. Modelos Analíticos (MA)	18
2.5.5. Mapeamento Hidrogeológico (MH)	18
2.5.6. Modelos Numéricos (MN)	19
CAPÍTULO 3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	20

3.1. Localização e Vias de Acesso.....	20
3.2. Clima	20
3.3. Hidrografia.....	24
3.4. Uso e Ocupação do Solo e Cobertura Vegetal	26
3.4.1. Uso e Ocupação do Solo	26
3.4.2. Vegetação.....	27
3.5. Solos	29
3.6. Geomorfologia.....	38
3.7. Geologia.....	39
3.8. Hidrogeologia	46
CAPÍTULO 4. CRITÉRIOS PARA DELIMITAÇÃO DE ÁREAS DE PROTEÇÃO DE CAPTAÇÃO	49
Neste capítulo, será feita inicialmente uma abordagem dos conceitos básicos sobre o tema e posteriormente uma análise sobre os critérios que serão considerados nesta pesquisa.....	49
4.1. Conceitos	49
4.2. Critérios	52
4.2.1. Direção de Fluxo	53
4.2.2. Declividade	55
4.2.3. Parâmetros hidrodinâmicos: porosidade, permeabilidade e condutividade Hidráulica	55
4.2.4. Solo	57
4.2.5. Nível Freático.....	58
4.2.6. Geologia.....	59
4.2.7. Lineamentos	61
4.2.8. Recarga	62
4.2.9. Aquífero Confinado	62
4.3. Fontes de Contaminação.....	63
CAPÍTULO 5. PROPOSTA METODOLÓGICA PARA DELIMITAÇÃO DE PERÍMETRO DE PROTEÇÃO DE CAPTAÇÃO	65
5.1. Zona de Influência	66

5.2. Zona de Transporte	67
5.3. Zona de Contribuição	69
5.3.1. Delimitação da Bacia Hidrográfica.....	70
5.3.2. Confecção do Mapa de Vulnerabilidade	71
5.3.3. Delimitação da Área de Proteção.....	76
5.3.4. Considerações Importantes	78
5.4. Restrições de Uso	79
5.4.1. Atividades Agrícolas.....	79
5.4.2. Atividades Industriais	80
5.4.3. Atividades de Mineração	81
5.4.4. Atividades Urbanas	81
5.5. Aquisição e Processamento dos Dados.....	85
CAPÍTULO 6. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA NO DISTRITO FEDERAL	86
6.1. Delimitação da Bacia Hidrográfica	86
6.2. Coleta de Dados.....	87
6.3. Mapa de Vulnerabilidade.....	91
6.4. Extração de Lineamentos.....	91
6.5. Área de Proteção.....	92
6.5.1. Área 1 - Chácara Dom Bosco	95
6.5.2. Área 2 - Água Mineral Hydrate	98
6.5.3. Área 3 - Água Mineral Ibiá.....	101
CAPÍTULO 7. ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO	105
7.1. Área 1 - Chácara Dom Bosco	105
7.2. Área 2 - Água Mineral Hydrate	106
7.3. Área 3 - Água Mineral Ibiá.....	109
7.4. Recomendações Sobre Gestão.....	111
CAPÍTULO 8. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	114
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	116
ANEXO I. Portaria nº 231, de 31 de julho de 1998	

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Proporção de água subterrânea para abastecimento entre países europeus. Fonte: (EEA, 1999).....	6
Figura 2.2. Abastecimento nas sedes urbanas por tipo de manancial no Brasil. Fonte: ANA (Agência Nacional das Águas, 2010).	6
Figura 2.3. Consumo de água mineral engarrafada no Brasil (milhões de litros). Fonte: DNPM. .	7
Figura 2.4. Esquema das zonas de proteção (contribuição, transporte e influência), conforme portaria nº 231, de 31 de julho de 1998 do DNPM.	9
Figura 2.5. Esquema de procedimentos para determinar área de proteção pelo método de Forma Variável Simplificada (FVS). (Fonte: USEPA, 1993).	18
Figura 3. 1. Localização e vias de acesso da Área 1.	21
Figura 3. 2. Localização e vias de acesso da Área 2.	22
Figura 3. 3. Localização e vias de acesso da Área 3.	23
Figura 3. 4. A) Precipitação pluvial acumulada mensal (mm). B) Temperaturas mínimas, médias e máximas (°C). Estação Brasília. Fonte: INMET.	24
Figura 3. 5. Mapa de solos da Área 1. Adaptado de Embrapa (1978).	30
Figura 3. 6. Mapa de solos da Área 2. Adaptado de Embrapa (1978).	31
Figura 3. 7. Mapa de solos da Área 3. Adaptado de Embrapa (1978).	32
Figura 3. 8. A) Perfil de Latossolo Vermelho. B) Latossolo Vermelho- Amarelo.	33
Figura 3. 9. Perfis de Cambissolo Háplico. No primeiro caso o saprolito é observado a partir de 40 cm e no segundo caso há rochividade representada por grandes blocos líticos.....	34
Figura 3. 10. A) Perfil de Gleissolo Háplico da Área 3; B) Gleissolo em campo de murunduns.	35
Figura 3. 11. Perfis de Plintossolo Pétrico.	36
Figura 3. 12. Perfil de Nitossolo Vermelho.	37
Figura 3. 13. Perfis de Neossolo Quartzarênico.	38
Figura 3. 14. Distribuição dos empurrões e cavalgamentos regionais associados à geologia regional em que o Distrito Federal. Fonte: Modificado de Faria, 1995.	40
Figura 3. 15. Coluna estratigráfica do Grupo Paranoá. Em destaque estão as unidades presentes nas áreas de estudo.	41
Figura 3. 16. Mapa e perfil geológico da Área 1, adaptado de Campos & Freitas-Silva (1998). ..	42
Figura 3. 17. Mapa e perfil geológico da Área 2, adaptado de Campos & Freitas-Silva (1998). ..	43
Figura 3. 18. Mapa e perfil geológico da Área 3, adaptado de Campos & Freitas-Silva (1998). ..	44

Figura 3. 19. A) Afloramento de Quartzito fraturado e B) Bloco de quartzito silicificado presentes na área 2.	45
Figura 3. 20. Metarritmitos com dobras em chevron apertadas presentes na Área 1.....	46
Figura 4.1. Esboço esquemático de dispositivo utilizado por Darcy. Fonte: (Feitosa & Manoel Filho, 2000).	50
Figura 4.2. Sistemas de fluxo hidrogeológico local, intermediário e regional. (Fonte: Tóth, 1963 apud Fetter, 2000).	54
Figura 5.1. Fluxograma das três etapas para definição da zona de contribuição.	70
Figura 5.2. Esquema de integração mapas para elaboração do mapa de vulnerabilidade.....	72
Figura 6.1. Contorno das bacias hidrográficas das Áreas 1, 2 e 3 (na ordem).....	88
Figura 6.2. Mapa de vulnerabilidade das Áreas 1, 2 e 3 (nessa ordem).....	93
Figura 6.3. Mapa de lineamentos estruturais das Áreas 1, 2 e 3 (nessa ordem).....	94
Figura 6.4. Processo de construção do poço da Área 1.....	95
Figura 6.5. Mapa integrado e etapas de elaboração da zona de contribuição da área 1.....	97
Figura 6.6. Mapa com os três perímetros de proteção (ZI, ZT e ZC) da Área 1.....	98
Figura 6.7. Localização da fonte de água mineral Hydrate.....	99
Figura 6.8. Mapa integrado da Área 2 com zona de contribuição definida.	100
Figura 6.9. Mapa com os três perímetros de proteção (ZI, ZT e ZC) da Área 2.....	101
Figura 6.10. Localização da fonte da água mineral Ibiá, incluindo panorama de sua zona de proteção.	102
Figura 6.11. Mapa integrado e etapas de elaboração da zona de contribuição da Área 3.....	103
Figura 6.12. Mapa com os três perímetros de proteção (ZI, ZT e ZC) da Área 3.....	104
Figura 7.1. Limite da zona de contribuição da Área 1.	106
Figura 7.2. Limites das zonas de contribuição da Água Mineral Hydrate e pela metodologia proposta.	108
Figura 7.3. Limites das zonas de contribuição da Água Mineral Ibiá e pela metodologia proposta.	110

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Critérios para elaboração das zonas de proteção para cada sistema aquífero, conforme Decreto Lei nº 382 de 1999 (Portugal).....	15
Tabela 2.2. Avaliação dos métodos de delimitação das zonas de captura das fontes de água subterrânea. Fonte: Foster <i>et al.</i> (2006).....	16
Tabela 3.1. Subdivisões da Bacia do São Bartolomeu. Campos & Freitas-Silva (1998).....	25
Tabela 3.2. Classificação dos Domínios aquíferos do Distrito Federal. Fonte: Adaptado de Campos & Freitas-Silva (1998) e Campos & Cunha (2015).....	47
Tabela 4.1. Diferenças hidráulicas entre aquífero fraturado e poroso. Fonte: Modificado de Hirata (1994).	52
Tabela 4.2. Variação dos valores de porosidade (n) de acordo com o material geológico. Fonte: Davis (1969) apud Freeze & Cherry (1979).....	57
Tabela 4.3. Variação de valores de permeabilidade e condutividade hidráulica em sedimentos inconsolidados. Fonte: Freeze & Cherry (1979).	58
Tabela 5.1. Proposta de distâncias (raio) da captação para definição da zona de influência.	67
Tabela 5.2. Intervalos de declividade e o índice atribuído.	73
Tabela 5.3. Variação da condutividade hidráulica.	74
Tabela 5.4. Variação da porosidade efetiva em solos.	74
Tabela 5.5. Variações do nível estático e índices associados.....	74
Tabela 5.6. Variação da porosidade efetiva em rocha.....	75
Tabela 5.7. Variação do Índice de Fraturamento Interconectado – IFI.....	75
Tabela 5.8. Classes de vulnerabilidade e soma de índices.	76
Tabela 5.9. Distâncias mínimas de demarcação da área de proteção de acordo com o grau de vulnerabilidade.	77
Tabela 5.10. Distâncias a partir da ponta do lineamento a montante da captação em função da extensão do lineamento.	78
Tabela 5.11. Potencial de geração de carga contaminante para diferentes tipos de atividade industrial.....	81
Tabela 5.12. Atividades potencialmente poluidoras e restrições de uso.	84

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIações

ADASA - Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal

ANA - Agência Nacional das Águas

ANM – Agência Nacional de Mineração

ANVISA - Agência Nacional de Vigilância Sanitária

DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

EPA - *Environmental Protection Agency*

FDA - *Food and Drug Administration*

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

MDT - Modelo Digital de Terreno

OTA - *Office of Technical Assistance*

POSH - *Pollutant Origin, Surcharge Hydraulically*

SIG - Sistema de Informação Geográfica

SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission*

TERRACAP - Companhia Imobiliária de Brasília

USGS - *United States Geological Survey*

WHPA - *Wellhead Protection Areas*

ZC - Zona de Contribuição

ZEE - Zoneamento Ecológico Econômico

ZI - Zona de Influência

ZT - Zona de Transporte

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

1.1. Apresentação e Justificativas

A água subterrânea corresponde a cerca de 98% de toda a água doce disponível não congelada no planeta. A sua abundância, qualidade e confiabilidade fez com que a extração desse recurso aumentasse ao longo dos últimos 50 anos. Globalmente, a captação de águas subterrâneas tem aumentado de 1% a 2% por ano (WWAP, 2012). Ressalta-se ainda que mais da metade da população mundial depende desse recurso para consumo (Tushaar *et al.*, 2007). A água subterrânea pode se destinar a diversos fins, como uso doméstico, abastecimento público, comercialização, irrigação, indústria, energia e turismo. O crescimento populacional, as modificações do uso da terra e a aceleração da indústria são alguns fatores que têm colocado em risco sua qualidade. Algumas das principais fontes de contaminação dos aquíferos estão relacionadas a: atividades agrícolas, atividades industriais, atividades de mineração, esgotos, resíduos sólidos, postos de combustível e cemitérios.

A questão da qualidade da água subterrânea, principalmente quando destinada ao consumo humano tem se tornado cada vez mais importante na gestão dos recursos hídricos, especialmente em função de sua dependência, que já representa, em diversos países, a principal fonte de água potável. Além disso, devem-se considerar as dificuldades e custos elevados nos processos de remediação de áreas contaminadas. Dessa forma, as entidades governamentais tendem a buscar instrumentos efetivos para auxiliar no seu controle. Assim, medidas de proteção são adotadas em todo o mundo e podem envolver ações relativas ao sistema aquífero como um todo, como a proteção da fonte de captação.

No Brasil, a Política Nacional dos Recursos Hídricos, instituída pela lei nº 9.433/ 1997, consiste em um importante instrumento legal que orienta a gestão das águas no país e dispõe, dentre outros aspectos, sobre a criação de áreas sujeitas a restrição de uso, com vistas à proteção dos recursos hídricos.

A água subterrânea pode ser designada como recurso hídrico, que é regulamentada por leis estaduais, e como recurso mineral, cujas leis são regidas no âmbito federal. Dessa forma, o aproveitamento comercial das fontes de água mineral e potável de mesa, tanto por meio da implantação de poços de captação ou nascentes naturais, em que seu uso se destine a envase, balneário e estância hidromineral necessita da concessão da União Federal, segundo legislação regida pelo Código de Águas e suas regulamentações, e também depende da definição de perímetros de proteção da fonte, conforme estabelece a Portaria nº 231, de 31 de julho de 1998, do Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM. O citado dispositivo legal tem por objetivo

assegurar a qualidade das águas como recurso mineral em território nacional e estabelecer limites de restrição de ocupação e uso que possam afetar seu aproveitamento, visto que essas áreas estão vulneráveis a contaminação devido às atividades desenvolvidas nas localidades circunvizinhas, que podem comprometer a qualidade da água.

Apesar de a Portaria nº 231 estar em vigor, o que ocorre na prática é que parte dessas áreas de proteção ainda é utilizada e ocupada de maneira inadequada, especialmente em função de fatores econômicos. O agravante acontece, sobretudo, porque as instalações de captação (poços e casas de proteção) se situam geralmente próximo aos centros de consumo. Nesse sentido, é necessário estabelecer as áreas de proteção, de forma que essas indiquem quais atividades são possíveis e aceitáveis, fazendo com que seja viável uma negociação entre o desenvolvimento socioeconômico e a proteção dos aquíferos. Para garantir a proteção dos aquíferos contra a contaminação é imprescindível restringir o uso do solo, a emissão de efluentes e as práticas de despejo de resíduos (Foster *et al.*, 2006).

As diversas formas de ocorrência dos sistemas aquíferos permitem estabelecer diferentes graus de vulnerabilidade à contaminação, a depender de suas características naturais. O estudo dessas características tem papel essencial na determinação de áreas de proteção e nas restrições de uso do solo. Atualmente, a definição dos perímetros de proteção das captações é realizada de diversas formas, a escolha do procedimento a ser utilizado dependerá de muitos fatores, dentre os quais: recursos e informações disponíveis e o custo. Entretanto, muitas vezes as técnicas utilizadas adotam critérios técnicos pouco eficazes, com fundamento científico escasso, o que torna sua confiabilidade questionável.

O presente trabalho pretende propor e aplicar uma metodologia para delimitação de perímetros de proteção conforme estabelece a legislação vigente, em três localidades do Distrito Federal, considerando a integração de parâmetros hidrogeológicos importantes, de forma que os resultados e o conhecimento obtidos possam auxiliar na definição das áreas de proteção e na gestão dos recursos hídricos para minimizar os usos do solo e os riscos de contaminação.

De acordo com Cordova & Makin (1995), a extensão e a forma dos perímetros de proteção dependem de fatores hidrogeológicos, legais, políticos e econômicos, e a filosofia que envolve seu tamanho é que o perímetro de proteção deva ser de dimensão gerenciável e ambientalmente útil. Portanto, a premissa inicial é que a metodologia proposta seja praticável, que utilize dados com maior disponibilidade de aquisição e que ao mesmo tempo seja funcional, realista e economicamente/financeiramente viável.

As premissas da metodologia proposta estão detalhadas:

- Disponibilidade de dados: a ideia é que para aplicação da metodologia proposta, o conjunto de dados necessários seja de fácil aquisição a partir de pesquisa bibliográfica ou de fácil obtenção em

trabalhos de campo na área de estudo. Por exemplo, mapas de solo são produzidos por órgãos de pesquisa e são disponibilizados por diferentes meios. Caso a escala não seja adequada, é possível com facilidade, detalhar os perfis de solos na área e produzir um mapa com as características necessárias para o estudo de determinação de perímetros de proteção de captações.

- Funcionalidade da metodologia proposta: idealmente, as áreas de proteção deveriam incluir toda a bacia hidrogeológica na qual a captação está inserida. Entretanto, na maior parte dos casos, esta área é muito ampla, o que inviabiliza a possibilidade de restrição de usos em toda a área. Assim, a ideia é que a metodologia proposta seja realista, baseado em critérios técnicos.

- Viabilidade técnica: a metodologia proposta deverá ser aplicada por técnicos que trabalham na área de geologia e hidrogeologia e não necessariamente por profissionais de áreas de pesquisa acadêmica. Desta forma, não é recomendável a utilização de algoritmos complexos ou *softwares* de elevado custo e com poucos usuários para efeitos de aplicação do método, sob o risco de não se alcançar o propósito que é de ter fácil aplicabilidade.

- Viabilidade financeira: a metodologia proposta não deve ser de elevado custo ao limite de não limitar sua aplicação. Por exemplo, a confecção de um mapa potenciométrico com elevado grau de confiança demanda a instalação de dezenas de poços de monitoramento, o que pode inviabilizar o uso desta ferramenta para a determinação de áreas de proteção. Assim, a metodologia considera que o custo não deve ser um limitante para a implementação de áreas de proteção.

Por fim, ainda se referindo ao conceito de áreas de proteção de captações, deve-se ter em mente que nos perímetros definidos é esperado que alguma atividade possa ser desenvolvida. Porém, o princípio é que nas áreas de proteção deve haver restrições para desenvolvimento de certas atividades com maior potencial de geração de efluentes e conseqüentemente maior risco de contaminação dos aquíferos.

1.2. Objetivos

Os principais objetivos desta pesquisa são:

1. Propor uma metodologia para delimitação de perímetro de proteção de poços ou nascentes para captação de água mineral e potável de mesa;
2. Aplicar a metodologia proposta em três áreas no Distrito Federal;
3. Analisar os resultados obtidos e
4. Recomendar medidas de gestão.

1.3. Materiais e Métodos

Os métodos e materiais utilizados na elaboração da proposta metodológica para delimitação de áreas de proteção de captação estão resumidos nas seguintes etapas:

1. Revisões bibliográficas e referenciais teóricos sobre conceitos, legislação, aplicações, métodos e critérios. Os principais materiais consultados foram artigos, livros, leis e trabalhos científicos em geral;
2. Análise e determinação dos critérios técnicos que influenciam na confecção de áreas de proteção;
3. Elaboração da proposta para determinação de perímetros de proteção de captação de águas subterrâneas (poços ou nascentes);
4. Aplicação da proposta metodológica em captações existentes no Distrito Federal, que possuem processo minerário junto ao DNPM para envasamento de água mineral. Para isso foram utilizados mapas técnicos do Distrito Federal, incluindo mapa geológico, mapa de relevo, mapa de solos e mapa hidrogeológico, bem com dados obtidos na etapa de revisão bibliográfica. O *software* utilizado para integração das informações foi o *ArcGis 10.2* e o *Google Earth*;
5. Comparação da metodologia proposta com as previamente definidas nos respectivos processos;
6. Análise e discussão da metodologia proposta e
7. Recomendações de ações de gestão.

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Proteção das Águas Subterrâneas

A importância da preservação da qualidade das águas subterrâneas, tanto para o consumo humano como para seus diversos usos, tem se tornado cada vez mais relevante, principalmente em função do aumento da demanda por esse recurso e do crescimento dos riscos envolvidos nos processos de contaminação.

Apesar das águas subterrâneas serem mais protegidas que as superficiais, essas estão em risco de contaminação devido, principalmente, à infiltração da água da chuva em excesso na superfície do solo, que quando em contato com material contaminante acumulado pela atividade humana, chega ao lençol freático e coloca em risco sua qualidade. Esse processo se intensifica com a indução por bombeamento do poço, que direciona o fluxo e interfere na velocidade de percolação dos fluidos. Destaca-se que a maior vulnerabilidade à contaminação está concentrada em aquíferos livres, quando a zona vadosa é pouco espessa e o nível freático é raso (Foster *et al.*, 2006).

As fontes de contaminação das águas subterrâneas podem ter diversas origens, as mais comuns estão relacionadas as atividades humanas, principalmente por meio de usos industriais, domésticos e agrícolas. Além disso, podem ser provenientes da construção do próprio poço, que quando feito de maneira inadequada, permite a entrada de água superficial poluída (Foster *et al.*, 2006) ou de poços abandonados não obstruídos. A contaminação ocorre também de forma natural, quando a descarga é criada pela atividade humana, como por exemplo a intrusão salina do mar em aquíferos costeiros ou a lixiviação de minerais dissolvidos (Feitosa & Manoel, 2000), ou ainda pela dissolução de minerais em função da natureza do material geológico. O potencial de contaminação da água subterrânea vai depender da carga contaminante e da vulnerabilidade intrínseca do aquífero. Avaliar os riscos e as fontes de contaminação do aquífero é importante para a definição de ações necessárias para sua proteção (Foster *et al.*, 2006).

A necessidade de proteger a água subterrânea é fundamentada, sobretudo, por sua dependência para o consumo humano, que já representa para diversas localidades, a principal fonte de água potável. Quando poluída, seu consumo pode causar diversos danos à saúde, como por exemplo, hepatite e desintetria por meio da ingestão de água contaminada por resíduos de fossas sépticas. Dados publicados mostram a proporção de água subterrânea para abastecimento entre alguns países europeus (Figura 2.1). Além do sistema público de abastecimento, as águas minerais comercializadas em todo o mundo são oriundas diretamente dos aquíferos.

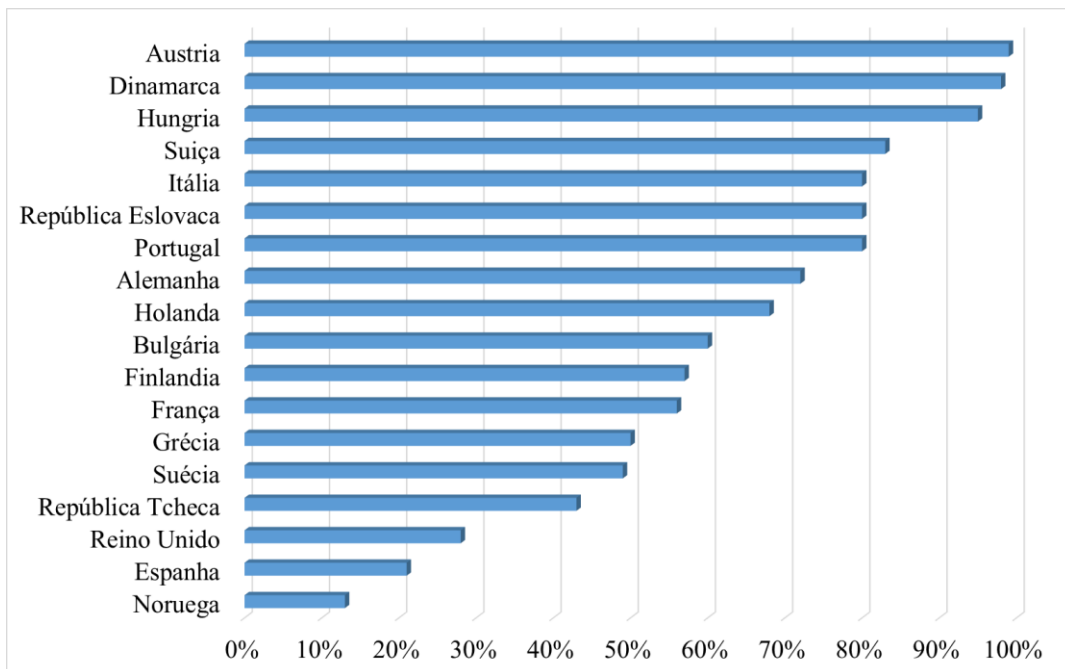


Figura 2.1. Proporção de água subterrânea para abastecimento entre países europeus. Fonte: (EEA, 1999).

No Brasil, os dados da Agência Nacional da Água (ANA) indicam que 37% dos municípios brasileiros dependem exclusivamente de mananciais subterrâneos, 47% de mananciais superficiais e 14% fazem uso misto (Figura 2.2). As regiões Norte e Sul são as que dependem mais da água subterrânea para abastecimento.

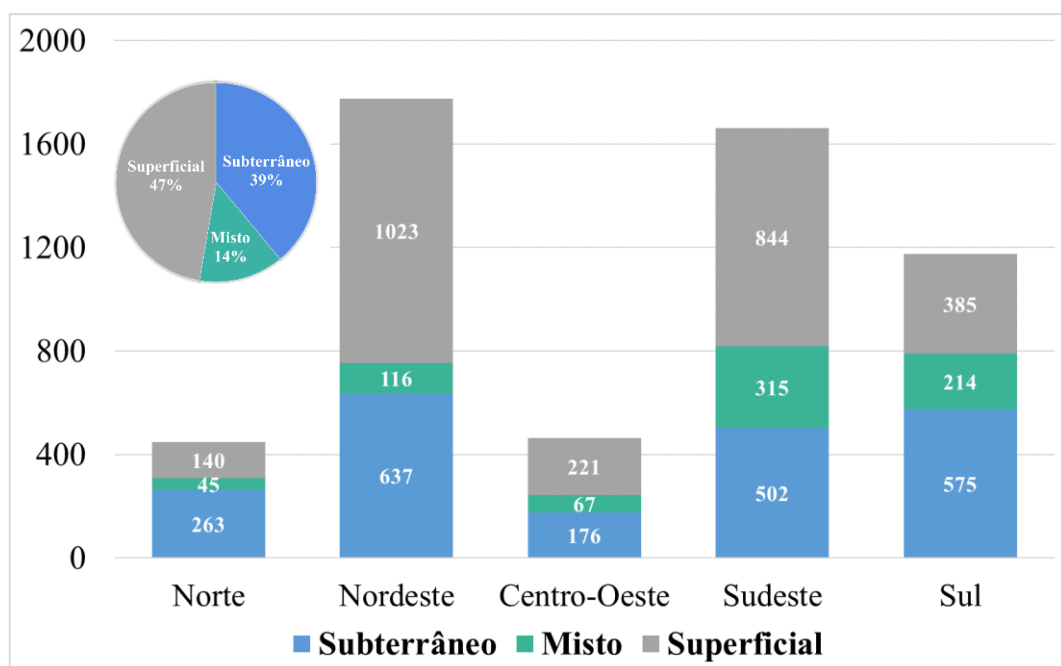


Figura 2.2. Abastecimento nas sedes urbanas por tipo de manancial no Brasil. Fonte: ANA (Agência Nacional das Águas, 2010).

Em relação ao consumo de água mineral engarrafada no Brasil, os dados do DNPM, evidenciam crescimento considerável nos últimos anos, com aumento de cerca de 20% entre 2010 e 2014 (Figura 2.3).

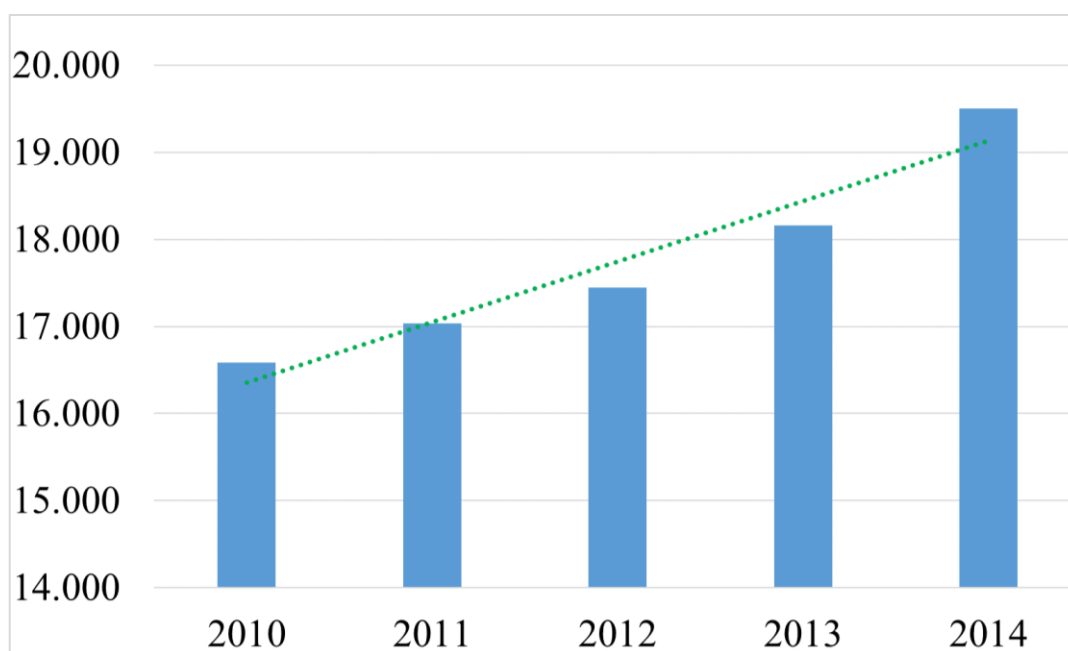


Figura 2.3. Consumo de água mineral engarrafada no Brasil (milhões de litros). Fonte: DNPM.

Bertolo *et al.* (2007) realizaram análises químicas de trezentas e três marcas de águas minerais envasadas no Brasil, que representava à época quase 50% das concessões de lavra válidas no país. Os resultados dos dados hidroquímicos indicaram que cerca de 1/3 dessas águas eram provenientes de aquíferos com elevada vulnerabilidade natural à contaminação, e que 1/4, embora quimicamente potáveis, apresentaram alguma alteração em sua composição química resultante de atividades antrópicas, como efluentes domésticos e/ou fertilizantes inorgânicos e orgânicos, evidenciada, sobretudo, pela concentração de nitrato.

Constata-se o crescente uso das águas subterrâneas como fonte de abastecimento e comercialização de água mineral, assim como a elevada exposição à contaminação, portanto, a implementação e o uso de medidas de proteção para a preservação de sua qualidade são fundamentais, uma vez que, depois de contaminada, o custo para sua remediação é elevado.

Diversas são as medidas de proteção das águas subterrâneas adotadas em todo o mundo, podendo envolver ações relativas ao sistema aquífero como um todo, como a proteção da fonte de captação (poço ou nascente). Alguns exemplos de ações, incluem: mapeamento de áreas de risco, análise de vulnerabilidade à contaminação de aquífero, gestão de outorga e uso, controle de poluentes, políticas de conscientização e delimitação de perímetros de proteção de captação.

2.2. Perímetros de Proteção de Poços/Nascentes

Os perímetros de proteção de captação são áreas ao redor dos poços ou nascentes, cujo objetivo é restringir certos tipos de usos dentro do limite do perímetro, visando prevenir a contaminação da água subterrânea causada por atividades antrópicas nos locais próximos à captação.

Em geral, o grau de restrição de uso diminui à medida que se aumenta a distância da fonte de captação. O tipo e a quantidade de zonas variam em cada país, a configuração mais comum inclui três zonas. A portaria nº 231, de 31 de julho de 1998 do DNPM faz a seguinte distinção:

1. *Zona de Influência (ZI)*: está relacionada ao cone de rebaixamento do poço, ou no caso de uma nascente à um afloramento da superfície piezométrica ou freática, equivalente a um dreno;
2. *Zona de Transporte ou Captura (ZT)*: está entre a área de recarga e ponto de captação. É determinada pelo tempo de trânsito que um contaminante leva para atingir o ponto de captação, isso vai depender das características hidráulicas do aquífero, dos gradientes hidráulicos e do tipo de contaminante;
3. *Zona de Contribuição (ZC)*: corresponde à área de recarga associada ao ponto de captação, delimitada pelas linhas de fluxo que convergem a esse ponto.

A Figura 2.4 mostra um esquema de definição das três principais zonas de proteção.

O conceito de zona de proteção de poços ou nascentes tem sido utilizado em diversos países que desenvolvem e praticam políticas para prevenção da contaminação das águas subterrâneas.

As primeiras aplicações das áreas de proteção tiveram início em 1930 em países europeus, porém as leis e regulamentações mais relevantes foram desenvolvidas a partir da metade do século XX (Carvalho & Hirata, 2012). Nos Estados Unidos, somente em 1974, foi criada uma lei federal, nomeada de “*The Safe Drinking Water Act (SDWA)*” que define padrões para a qualidade da água potável e implementa técnicas e programas para garantir a segurança da água potável, como o uso de áreas de proteção em todos os estados.

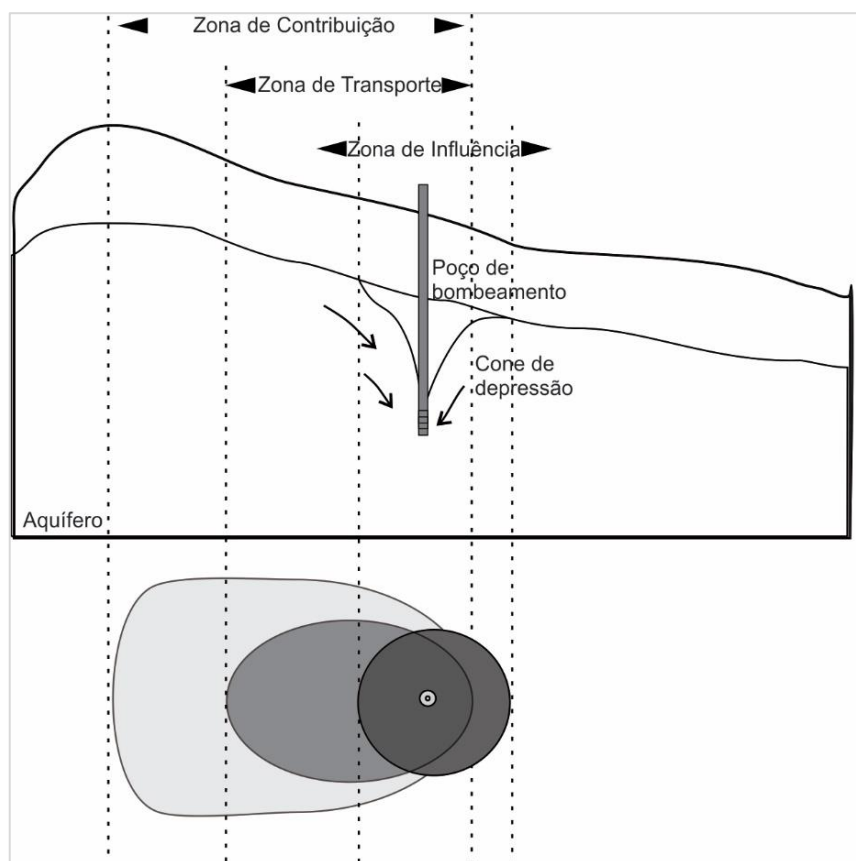


Figura 2.4. Esquema das zonas de proteção (contribuição, transporte e influência), conforme portaria nº 231, de 31 de julho de 1998 do DNPM.

Desde 1958, a Organização Mundial de Saúde tem desenvolvido diversas publicações com o objetivo de estabelecer padrões internacionais e diretrizes para qualidade da água potável, levando em consideração fatores socioculturais, ambientais e as particularidades de cada país. Em 2006, foi publicado o livro *“Protecting Groundwater for Health”*, que auxilia a proteção de águas subterrâneas e estabelece orientações quanto a elaboração de áreas de proteção. Foster *et al.* (2006) elaboraram o guia *“Groundwater Quality Protection: A Guide for Water Service Companies, Municipal Authorities and Environment Agencies”*, cuja iniciativa partiu do Banco Mundial, e tinha como objetivo mostrar as necessidades de proteção do manancial subterrâneo na região da América Latina e Caribe.

No ano 2000, o Parlamento Europeu e do Conselho estabeleceu, por meio da Diretiva 2000/60/CE, um quadro de ação comunitária no campo de política da água, denominado de *“Water Framework Directive”*. Esta diretiva determina que os Estados-Membros devem garantir a proteção de todas as massas de água destinadas à captação de água para consumo humano, podendo criar, portanto, zonas de proteção. Dessa forma, os países membros da União Europeia são responsáveis pela elaboração de normas que garantam a proteção das águas subterrâneas destinadas ao consumo humano. Atualmente, a maioria dessas normas é regida por leis nacionais.

2.3. Legislação e Aplicação de Perímetros de Proteção no Brasil

O Código das Águas, de 1934, foi uma das primeiras medidas legais sobre recursos hídricos subterrâneos no Brasil, que ainda está vigente, apesar de ter sido alterado por leis posteriores. O Código das Águas Minerais foi instituído no Brasil pelo decreto-lei n.º 7.841, de 1945, e define as águas minerais como “aquelas provenientes de fontes naturais ou de fontes artificialmente captadas que possuam composição química ou propriedades físicas ou físico-químicas distintas das águas comuns, com características que lhes confirmam uma ação medicamentosa”. As águas potáveis de mesa são classificadas como aquelas que preenchem condições de potabilidade. O código também estabelece as características de composição e propriedades para classificação da água subterrânea como água mineral. O Regulamento do Código de Mineração classifica oito tipos de jazidas para efeito de regulamento, dentre elas estão inclusas jazidas de água mineral, portanto, deve seguir o regime de exploração e aproveitamento que consta no referido dispositivo legal, sendo o Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM, autarquia vinculada ao Ministério de Minas e Energia, o órgão responsável pela Autorização de Pesquisa da área, assim como a aprovação do Relatório Final de Pesquisa e do Plano de Aproveitamento Econômico. A Concessão de Lavra é concedida pelo Ministério de Minas e Energia por meio de uma portaria específica. Conforme o Código de Águas Minerais, cabe ao DNPM também a fiscalização das águas minerais, termiais, gasosas e potáveis de mesa, engarrafadas ou destinadas a fins balneários e a classificação das fontes de águas minerais. Compete à Agência Nacional de Vigilância Sanitária – ANVISA, a definição dos padrões de identidade e qualidade das águas minerais e a fiscalização das águas utilizadas em insumos alimentícios.

Em 1988, a Constituição Federal incluiu as águas subterrâneas como bens dos Estados e do Distrito Federal, porém determinou que os recursos minerais são bens da União, incluindo assim as águas minerais. Dessa forma, as águas subterrâneas designadas como recursos hídricos são regulamentadas por leis estaduais, enquanto que as classificadas como recurso mineral são regulamentadas por leis no âmbito federal.

Os instrumentos legais relativos às áreas de proteção de poços ou nascentes para águas destinadas ao abastecimento público dependerão da organização administrativa de cada estado. No Distrito Federal, o art. 8º, inciso VII, da Lei nº 2725/2001, estabelece a delimitação de áreas de proteção, devendo ser sujeitas à restrição de uso. Esta lei foi regulamentada pelo Decreto nº 22.358/2001, que dispõe sobre a outorga de direito de uso de água subterrânea no território do Distrito Federal. Em São Paulo, os processos para definição dos perímetros de proteção de águas subterrâneas para abastecimento público são mais específicos, sendo regidos pelo Decreto Estadual nº 32.955/91, que regulamenta a Lei Estadual nº 6.134/88.

Quando a água subterrânea é aproveitada para fins comerciais em que seu uso se destine a envase, balneário e estância hidromineral, é necessária uma concessão da União Federal, segundo legislação regida pelo Código de Mineração e suas regulamentações e pelo Código das Águas Minerais, e depende, portanto, da definição de perímetros de proteção, conforme estabelece a Portaria n.º 231, de 31 de julho de 1998, do Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM (Anexo 1).

Ao fim da elaboração dessa pesquisa foi publicada a Lei nº 13.575, de 26 de dezembro de 2017, que criou a Agência Nacional de Mineração (ANM) e extinguiu o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). Porém, como a ANM ainda está em processo de implementação e estruturação, neste trabalho será utilizado o termo DNPM.

A delimitação dos perímetros de proteção deve ser feita pelos titulares de Alvará de Pesquisa das águas classificadas como minerais ou potáveis de mesa e devem ser definidos e instalados nas adjacências das captações. Para a determinação dessas áreas, de acordo com a citada Portaria, três diferentes zonas devem ser elaboradas: a zona de influência (ZI), a zona de transporte (ZT) e a zona de contribuição (ZC).

2.4. Legislação e Aplicação de Perímetros de Proteção em outros Países

Diversos países têm desenvolvido e implementado políticas para prevenir a poluição da água subterrânea, que envolve a determinação das áreas de proteção e o controle de atividades potencialmente poluidoras.

2.4.1. França

Na França, os elementos legais para a proteção das captações das águas subterrâneas destinadas ao consumo humano são antigos. O estabelecimento de zonas de proteção de captação existe desde 1902, de acordo com a lei de 15 de fevereiro. Em 1964, foi criada a lei relativa a propriedade e a repartição das águas e a luta contra à poluição. Em 1992, foi publicada a lei da água, com o objetivo de assegurar a gestão equilibrada dos recursos hídricos. O Decreto nº 2.007-49, de 11 de janeiro de 2007 dispõe sobre a segurança da água destinada ao consumo humano e inclui as águas minerais. Essas leis estabelecem a elaboração obrigatória de perímetro de proteção de captação de água subterrânea. Outros dispositivos legais foram elaborados no país a fim de garantir que o uso nas áreas de proteção fosse respeitado.

De acordo com o artigo L1321 1 e 2 do Código de Saúde Pública, toda a água destinada a

consumo humano deve ser protegida por meio de áreas de proteção, que são divididas em três zonas:

- Perímetro de proteção imediato: é uma área a algumas dezenas de metros do ponto de captação. Visa garantir a segurança das instalações de amostragem contra todas as formas de desgaste e evitar derrames ou vazamentos de substâncias poluentes próximo ao local de captação.

- Perímetro de proteção próximo: tem o objetivo de proteger a água subterrânea contra qualquer tipo de poluição que possam prejudicar sua qualidade. Esta área deve ser elaborada de forma a garantir o desaparecimento de bactérias durante a sua migração para a captação. Algumas atividades e instalações podem ser restringidas ou proibidas caso possa prejudicar a qualidade da água.

- Perímetro de proteção remoto: é também chamado de zona de vigilância. Visa proteger o recurso hídrico subterrâneo de qualquer poluição pontual ou difusa que possa afetar a qualidade da água a longas distâncias. Essa área é utilizada para assegurar que em caso de perigo iminente haja tempo e espaço suficientes para se intervir e tomar medidas adequadas.

2.4.2. Estados Unidos

A principal lei dos Estados Unidos aplicada à proteção de água potável subterrânea e suas fontes é a “*Safe Drinking Water Act (SDWA)*”. Trata-se de uma lei federal aprovada em 1974 e alterada nos anos de em 1986, 1996 e 2016. Ela determina, que cada estado elabore um perímetro de proteção de poço, comumente conhecido no país como “*Wellhead Protection Areas (WHPA)*”. Assim, após a promulgação da lei, cada estado foi responsável em um período de três anos, por apresentar um programa estadual de áreas de proteção de poços. Deste modo, cada estado possui padrões específicos para elaboração das áreas de proteção. Em 1987, a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) publicou o “*Guidelines for Delineation of Wellhead Protection Areas (WHPA)*”, que estabelece critérios técnicos e os métodos para a elaboração das áreas de proteção, cabendo a cada estado a determinação dessas áreas de acordo com o contexto hidrogeológico e ambiente específico. Neste documento são descritas 3 diferentes zonas de proteção para aquífero poroso: zona de influência (ZI) relacionada ao cone de depressão; zona de contribuição (ZC), que representa todo o sistema de fluxo que fornece água para o poço; e a zona de transporte (ZT), relacionada ao tempo que o contaminante leva para chegar até o poço.

A “*Environmental Protection Agency (EPA)*” é a agência responsável por regular e implementar as normas da lei SDWA no caso das águas destinadas ao abastecimento público. Para as águas potáveis que são engarrafadas (podendo ser ou não água classificada como mineral), a agência responsável por fazer essa regulação é a “*Food and Drug Administration (FDA)*” as duas agências são responsáveis pela segurança da água destinada ao consumo humano.

2.4.3. Alemanha

O estabelecimento de zonas de proteção na Alemanha teve início em 1957, por meio da Lei de Gestão da Água (*Wasserhaushaltsgesetz, WHG*), cuja última revisão ocorreu em 2009. O citado instrumento legal dispõe sobre a proteção e utilização das águas superficiais e subterrâneas. Posterior a lei, cada estado foi responsável por elaborar suas próprias normas de proteção dos recursos hídricos. A Associação Técnica e Científica Alemã de Gás e Água (*Deutscher Vereinigung des Gas- und Wasserfaches - DVGW*) é a organização responsável pela criação de regulamentos técnicos para gestão da água. Em 1953, a DVGW publicou um guia técnico para elaboração de zonas de proteção, denominado de código de prática W101, que foi editado e revisado em 1961, 1975, 1995 e em 2006. De acordo com o referido guia, três zonas de proteção são definidas, a saber:

I. Zona de faixa de detecção: tem como objetivo proteger a captação de qualquer tipo de qualquer poluição no seu entorno. Deve ser feita a uma distância de pelo menos 10 metros do poço e não menos que 20 metros na direção a montante de uma nascente. Em caso de aquíferos cársticos não pode ter menos de 30 metros.

II. Zona de proteção próxima: é definida pelo tempo de trânsito, que deve ser de 50 dias e ter mais que 100 metros para poços ou nascentes. O objetivo é a proteção contra constituintes microbiológicos patogênicos e contra contaminação do próprio poço.

III. Zona de proteção externa: abrange toda zona de contribuição relativa à área de captação. Objetiva a proteção contra a contaminação a longas distâncias, tais como substâncias radioativas ou produtos químicos que não são facilmente degradáveis.

Para cada tipo de aquífero, o guia propõe subdivisões das zonas, distâncias e o tempo de trânsito. Após a delimitação das áreas, é necessário restringir e controlar as atividades potencialmente poluidoras.

2.4.4. Itália

Na Itália, foi criado o Decreto Legislativo nº 152, em 2006, que dispõe sobre três zonas de proteção: zona de segurança absoluta (raio de 10 metros), zona de respeito (tempo de 60, 180 ou 365 dias, a depender das condições de perigo à contaminação) e zona de proteção (definida por meio de uma abordagem hidrogeológica).

Na zona de respeito, o decreto relaciona uma lista de atividades que são proibidas, por exemplo: acumulação e aplicação de fertilizantes, dispersão de lama e águas residuais, construção de cemitérios e aberturas de alguns poços.

2.4.5. Portugal

Em Portugal, a elaboração de perímetros de proteção das águas destinadas para abastecimento e para exploração de recurso hidromineral são regidas por leis distintas. O Decreto Lei nº 90 de 1990, por meio do Art. 12º estabelece a fixação de perímetros de proteção com a finalidade de garantir a disponibilidade e características da água, bem como condições para sua boa exploração. É necessária a elaboração de três áreas, assim denominadas: zona imediata, zona intermédia e zona alargada. Os artigos 42.º a 44.º do referido decreto lei determinam proibições ou condicionantes de exercício de certas atividades.

Para as águas destinadas a abastecimento público, as áreas de proteção são regidas pelo Decreto Lei nº 382 de 1999, sendo mais específica quanto as normas e critérios para a delimitação de perímetros de proteção de captações de águas subterrâneas. Assim como nas águas para exploração hidromineral, são determinadas três zonas de proteção:

- Zona de proteção imediata: proteção direta das instalações de captação, sendo proibida qualquer atividade;
- Zona de proteção intermediária: exterior à zona de proteção imediata, local onde deve ser levado em conta as condições geológicas e estruturais do sistema aquífero. As atividades e instalações que possam causar algum tipo de poluição (por infiltração de poluente, mudança de fluxo ou favorecimento de infiltração) devem ser proibidas.
- Zona de proteção alargada: exterior à zona de proteção intermediária. Visa proteger contra poluentes persistentes, onde são considerados a natureza dos terrenos, a natureza e quantidade de poluentes, assim como seu modo de emissão.

O perímetro de proteção poderá não incluir as zonas de proteção intermédia ou a zona de proteção alargada onde a captação de águas subterrâneas ocorra em aquíferos cujo risco de poluição seja reduzido, desde que demonstrado por estudos hidrogeológicos.

Na zona de proteção imediata é proibida qualquer instalação ou atividade, com exceção as que têm por finalidade a conservação, manutenção e melhor exploração da captação. Na zona de proteção intermediária alguns usos do solo são interditados ou condicionados, como por exemplo: uso agrícola, pecuário, edificações, estradas, cemitérios, fossas de esgoto, postos de abastecimento e combustível, oficinas e serviços de automóveis, depósito de materiais radioativos, entre outros. Na zona de proteção alargada algumas atividades também são proibidas ou podem ter seu uso condicionado, a saber: utilização de pesticidas móveis, coletores de águas residuais, fossas de esgoto, cemitérios, pedreiras e explorações mineiras, depósito de sucatas e transporte de hidrocarbonetos, de materiais radioativos e de outras substâncias perigosas.

O Decreto Lei determina o tamanho do raio (em metros) para cada zona de proteção

considerando o tipo de sistema aquífero e admite que a captação é o único elemento drenante do aquífero, onde convergem todas as linhas de fluxo, e que não existam direções privilegiadas de fluxo, conforme ilustrado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1. Critérios para elaboração das zonas de proteção para cada sistema aquífero, conforme Decreto Lei nº 382 de 1999 (Portugal).

Tipo	Sistema aquífero	Zona de Proteção		
		Imediata Raio (m)	Intermediária, r é o maior valor entre:	Alargada, r é o maior valor entre:
1	Confinado poroso	20	40 m e r1 (t=50 dias)	350 m e r1 (t=3500 dias)
2	Livre poroso	40	60 m e r2 (t=50 dias)	500 m e r2 (t=3500 dias)
3	Semiconfinado poroso	30	50 m e r3 (t=50 dias)	400 m e r3 (t=3500 dias)
4	Cárstico	60	280 m e r4 (t=50 dias)	2400 m e r4 (t=3500 dias)
5	Faturado	60	140 m e r5 (t=50 dias)	1200 m e r5 (t=3500 dias)
6	Pouco fraturado ou alterado	40	60 m e r6 (t=50 dias)	500m e r6 (t=3500 dias)



2.5. Métodos para Definição de Perímetros de Proteção

A definição das zonas de proteção pode ser realizada utilizando desde métodos simples, onde se requer pouca informação, até os mais complexos, que exigem diversos dados sobre o ambiente hidrogeológico. Os métodos utilizados envolvem uma ampla variedade de conceitos e princípios, dentre eles, destacam-se: distância, limite de rebaixamento, tempo de trânsito do contaminante, capacidade de assimilação e limites de fluxo (Schmoll *et al.*, 2006).

A escolha do método a ser aplicado dependerá de diversos fatores como as características do local, o tempo de execução, os dados disponíveis, a experiência do usuário, entre outros aspectos. Essas áreas de proteção podem ser modificadas ao longo do tempo, já que o regime da água subterrânea é um sistema dinâmico e sua alteração pode envolver o surgimento de novos dados hidrogeológicos (Foster *et al.*, 2006).

A Agência de Proteção Ambiental Americana (U.S.EPA), por meio do Documento de Diretrizes de Proteção da EPA, reconhece alguns métodos que podem ser utilizados para definição de zonas de proteção. A confiabilidade e os custos de cada método aumentam de acordo com sua complexidade (Tabela 2.2).

Tabela 2.2. Avaliação dos métodos de delimitação das zonas de captura das fontes de água subterrânea. Fonte: Foster et al. (2006).

Método	Custo	Confiabilidade
Raio Arbitrário Fixo/Calculado	 Baixo Alto	 Menor Maior
Formas Variáveis Simplificadas		
Modelos Analíticos Hidrogeológicos		
Mapeamento Hidrogeológico		
Modelos Numéricos de Fluxo da Água Subterrânea (com rotinas de caminhamento de partículas para a definição do fluxo)		

2.5.1. Raio Arbitrário Fixo (RAF)

Consiste no método mais simples e de maior fragilidade. É executado por meio da escolha arbitrária de um raio, no qual é determinada uma circunferência ao redor do ponto de captação. Pode ser utilizado em todos os tipos de aquíferos. Para sua determinação, é importante que haja informações sobre as características hidrogeológicas do local, de forma que permita a proteção adequada da captação. Como não há critérios técnicos em sua definição, a possibilidade de falhas utilizando este método é elevada, o que pode resultar em excesso de proteção ou área de proteção da fonte menor que a necessária. Sua vantagem está na sua simplicidade, rapidez, baixo custo e necessidade de poucos dados.

2.5.2. Raio Calculado Fixo (RCF)

Este é um método relativamente simples, sua definição consiste na elaboração de áreas circulares ao redor da fonte. O método de raio calculado fixo usa o conceito de tempo de trânsito até a captação, que indica qual a distância necessária para o contaminante alcançar o poço em um determinado tempo.

A definição do raio é medida por meio de uma equação volumétrica, em que são necessários dados de vazões de bombeamento, comprimento da seção filtrante (*screened-interval*), porosidade do aquífero e o tempo de trânsito selecionado. A Equação (2.1) aplicada para a definição do raio é:

$$r_{min} = FS \sqrt{\frac{Q \cdot t}{n \cdot H \cdot \pi}} \quad (2.1)$$

Onde r_{min} = raio do perímetro de proteção para as zonas 2 e 3 (metros); Q = Volume anual médio de bombeamento (m^3/ano); t = tempo de trânsito, que de acordo com o documento de Diretrizes de Proteção de Poços da EPA, é de 2 anos para zona 2 e 5 anos para zona 3; n = porosidade do aquífero; H = seção filtrante de bombeamento da água do aquífero; $\pi = 3.1416$; FS = fator de segurança, que é de 1,3 quando todos os valores são conhecidos e de 1,5 quando um ou mais valores não são conhecidos. Este método não leva em consideração alguns critérios técnicos importantes, além de não avaliar as heterogeneidades do aquífero.

2.5.3. Formas Variáveis Simplificadas (FVS)

Este método consiste em um conjunto de formas, que representa uma variedade de condições hidrogeológicas e de bombeamento. O cálculo das formas variáveis é feito medindo-se a distância do gradiente descendente e da extensão lateral dos limites de fluxo subterrâneo de água em torno de um poço de bombeamento de acordo com equações analíticas, tais com o as equações de fluxo uniforme. O método FVS pode ser utilizado quando é possível determinar estimativas razoáveis da condutividade e gradientes hidráulicos.

Para delimitar uma área de proteção de poços utilizando o método de formas variáveis simplificadas são necessários alguns procedimentos: 1) Traçar um círculo em torno da nascente usando o método do raio calculado fixo; 2) Desenhar uma linha central a partir do poço na direção do gradiente de fluxo para determinar a distância de trânsito a partir do poço (z), segundo a Equação (2.2).

$$z = \frac{Ki}{n} t \quad (2.2)$$

Onde: n = porosidade; K = condutividade hidráulica; I = gradiente hidráulico e t = tempo de trânsito; 3) Traçar uma linha perpendicular no centro da linha central, que será chamada de A-A'; 4) Traçar duas linhas tangentes ao círculo (calculado anteriormente pelo método do raio calculado fixo) e paralelas à linha central através do poço. Nos pontos de intersecção dessas duas com A-A' medir a distância $z/4$, que pode ser denominada de B e B'; 5) Traçar as linhas tangentes a partir de B e B' até o círculo; 6) Usando o poço como ponto central, fazer um arco a partir de B até B'. Os procedimentos citados são exemplificados na Figura 2.5.

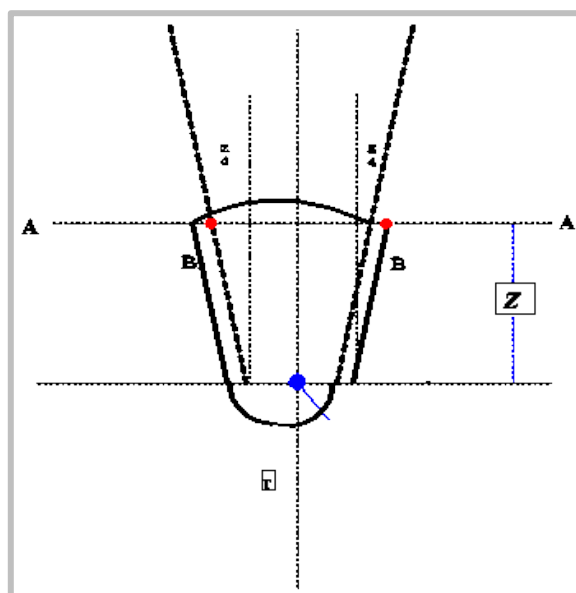


Figura 2.5. Esquema de procedimentos para determinar área de proteção pelo método de Forma Variável Simplificada (FVS). (Fonte: USEPA, 1993).

Esse método não representa de forma adequada aquíferos muito heterogêneos e não leva em consideração limites hidrológicos, como canais de irrigação, lagos ou drenagens superficiais.

2.5.4. Modelos Analíticos (MA)

Os modelos analíticos se baseiam no uso de equações hidrogeológicas analíticas que visam simular o fluxo da água subterrânea e o transporte de poluentes. As equações são geralmente simples, mas requerem o uso de diversos parâmetros hidrogeológicos, que normalmente são considerados homogêneos em toda a zona saturada do aquífero. Diversos *softwares* foram desenvolvidos pela EPA, que usam essas equações para simular o fluxo hidráulico subterrâneo.

2.5.5. Mapeamento Hidrogeológico (MH)

O mapeamento hidrogeológico consiste no método que pode ser utilizado em aquíferos porosos, cársticos e fraturados. Ele se baseia nas características físicas e hidrológicas que controlam o fluxo de água subterrânea. Os limites de fluxo podem incluir contatos, estruturas geológicas e características topográficas. Recursos hidrológicos, como rios, canais e lagos também podem controlar os limites do sistema de fluxo.

A análise de vulnerabilidade de aquífero à contaminação também pode ser considerada uma técnica no método de mapeamento hidrogeológico, pois identifica áreas particularmente vulneráveis à contaminação de águas subterrâneas. Tais áreas incluem rochas expostas, solos permeáveis, zonas de falhas, zonas de fratura e características cársticas, como cavidades de solução e dolinas. O mapeamento de vulnerabilidade não produz necessariamente uma zona de

contribuição (ZC) para o poço, porém sua combinação com o mapeamento do sistema de fluxo pode ser um excelente método para avaliar a susceptibilidade de regiões específicas dentro dos limites do sistema de fluxo à contaminação da água subterrânea. O mapeamento hidrogeológico é considerado efetivo para regiões onde a geologia é variável, como em rochas fraturas e onde os limites geológicos e estruturais são próximos à área de captação.

2.5.6. Modelos Numéricos (MN)

Os modelos numéricos permitem que as condições intrínsecas do subsolo e as características hidrológicas sejam representadas com um grau razoável de precisão. Utilizam modelos matemáticos para a simulação de fluxo por meio de *softwares*. Pode ser usado para qualquer meio hidrogeológico. Este método permite que o aquífero seja dividido em muitas zonas com porosidade variável, espessura saturada e transmissividade nas direções x, y e z. A principal vantagem deste método é que pode ser aplicado a um aquífero heterogêneo e com condições de contorno complexas, porém pode ser muito caro e necessita de muitos parâmetros para sua aplicação. Dois dos principais *softwares* utilizados atualmente incluem o MODFLOW (McDonald & Harbaugh, 1988) e o FEFLOW (Diersch, 2014).

CAPÍTULO 3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1. Localização e Vias de Acesso

As três áreas de estudo são representadas por captações existentes no Distrito Federal, que possuem processo minerário junto ao DNPM para envasamento de água mineral. As três áreas estão localizadas no Distrito Federal, Brasil, todas na bacia hidrográfica do rio São Bartolomeu. A Área 1 situa-se na Chácara Dom Bosco, no Núcleo Rural Capão da Erva, está próxima ao condomínio Mansões Entre Lagos, a aproximadamente de 15 km da cidade do Paranoá. Tem cerca de 5 km de extensão na direção Leste-Oeste e 3,5 km na direção Norte-Sul. O acesso é feito a partir da DF 250. A Área 2 fica no Setor Habitacional Jardim Botânico, próximo a diversos condomínios residenciais, como o Condomínio Jardins do Lago e Solar de Brasília. O acesso a área é pela DF 001. Apresenta a mesma extensão da área 1. A Área 3 está localizada na Borda sul da Área Alfa (área de realização de instruções militares da Marinha do Brasil). O acesso é feito a partir da BR-040 e da DF-495. A área apresenta cerca de 9 km de comprimento na direção Leste-Oeste e 7 km no sentido Norte-Sul. Está situada a 30 km de Brasília (Figuras 3.1 a 3.3).

3.2. Clima

O clima do Distrito Federal é classificado como tropical, sendo caracterizado por forte sazonalidade, com períodos de chuvas no verão, geralmente entre os meses de outubro a abril e períodos de seca, no inverno, que se estende de maio a setembro.

As Normais Climatológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) apresentam uma série histórica contínua de 30 anos (1961-1990) para todo o país. Para a estação Brasília, a série histórica é de 27 anos, uma vez que a estação somente começou a operar em 1963. De acordo com os dados da fonte citada, a temperatura média anual é de 20,6°C, com valores mais elevados nos meses de setembro e outubro e os mais baixos são registradas entre junho e julho. A média anual da umidade relativa do ar é de 67,6%, com menores valores nos meses de agosto (49%) e setembro (53%), podendo alcançar 10% nos horários mais quentes das tardes dos meses de agosto e setembro.

A precipitação média anual é de cerca de 1500 mm. Os meses de maior precipitação são novembro, dezembro, janeiro e fevereiro, enquanto que os meses com chuvas mais reduzidas se distribuem entre junho e agosto (Figura 3.4).

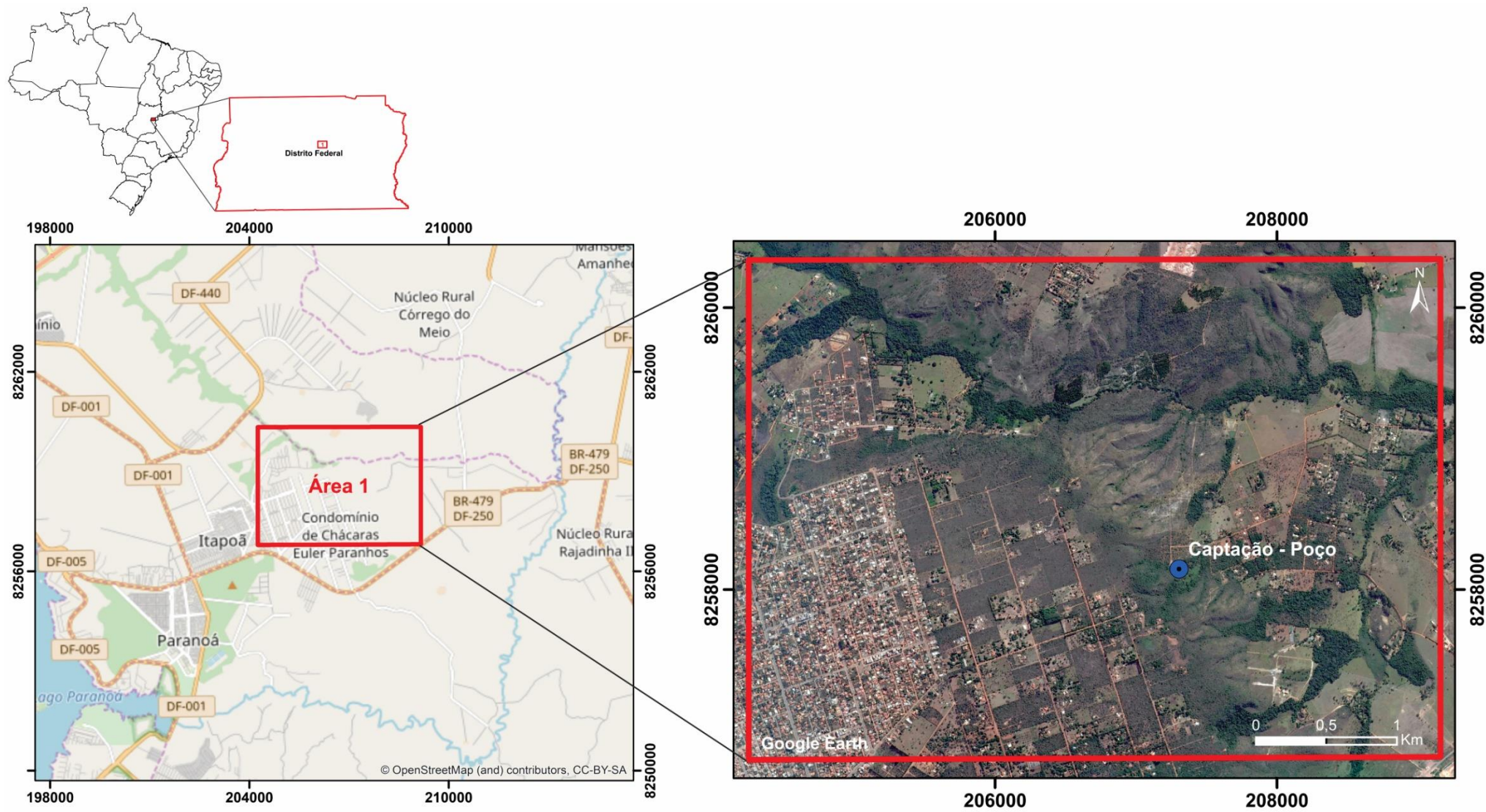


Figura 3. 1. Localização e vias de acesso da Área 1.

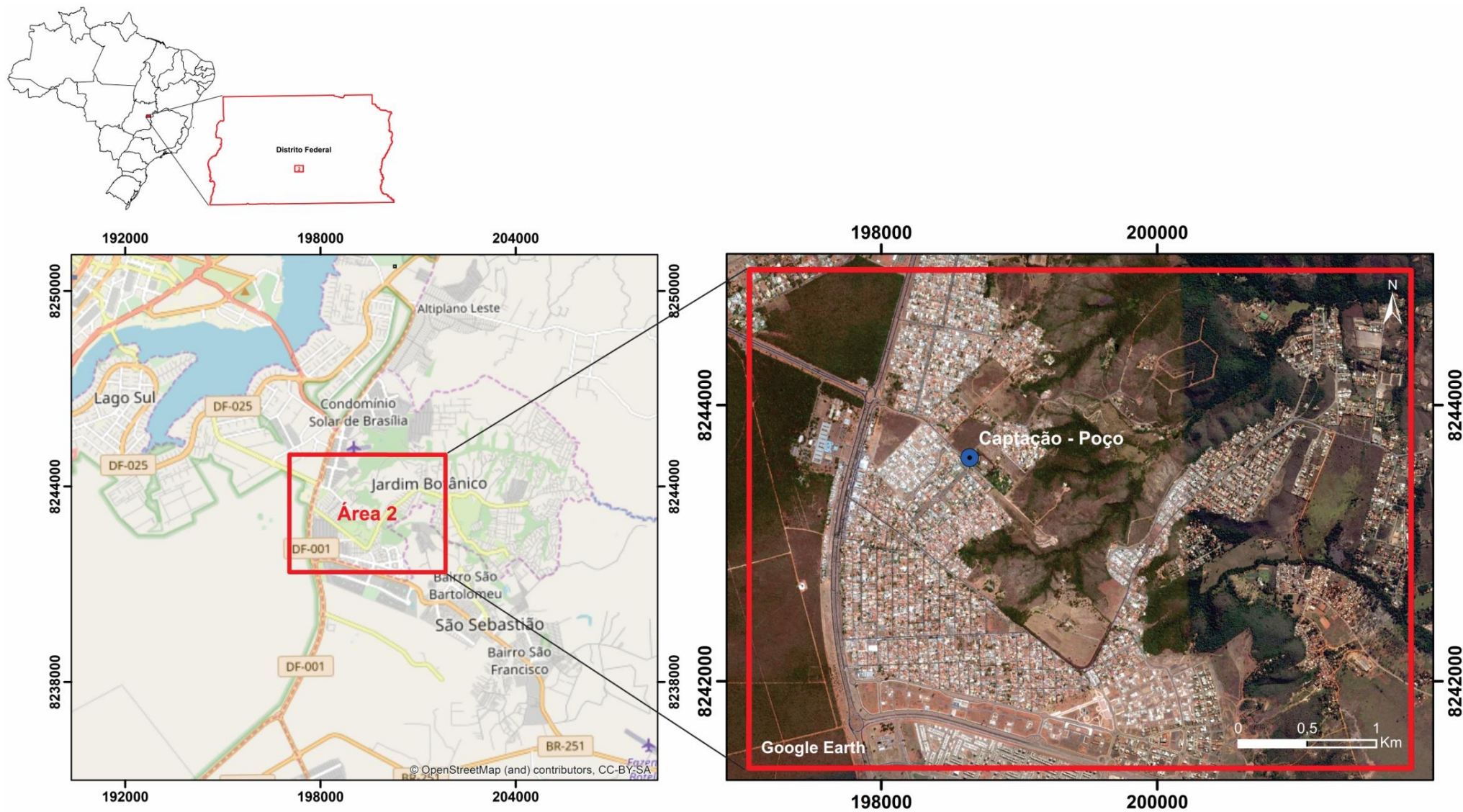


Figura 3. 2. Localização e vias de acesso da Área 2.

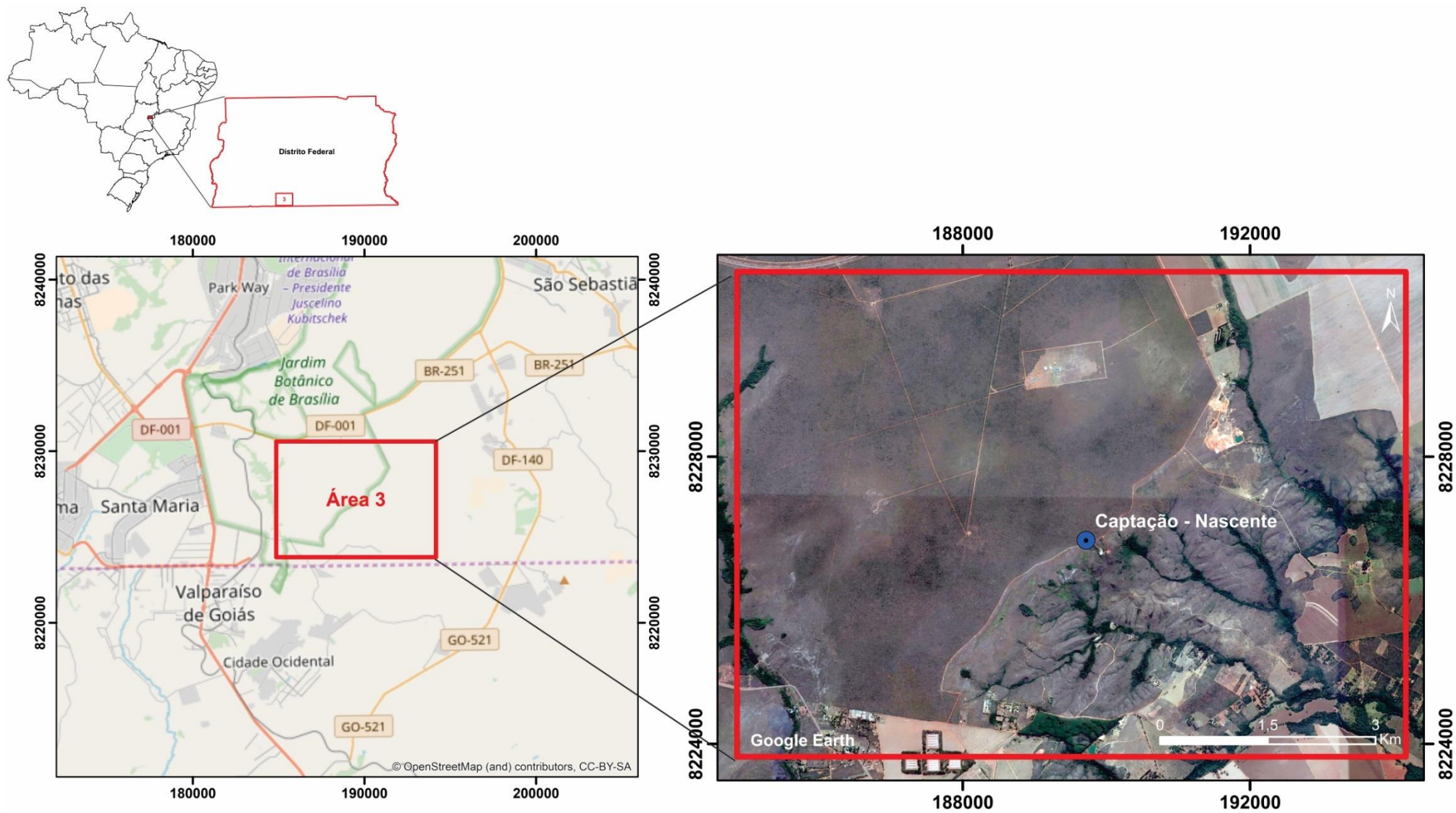


Figura 3. 3. Localização e vias de acesso da Área 3.

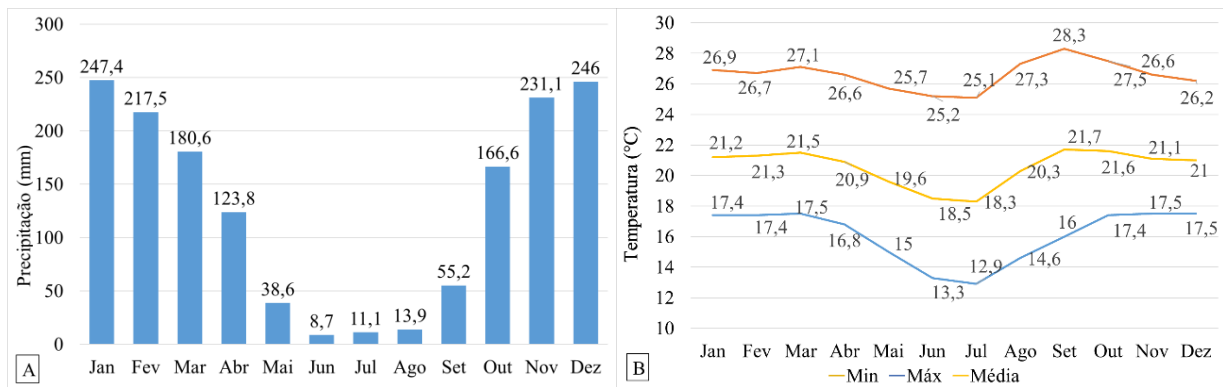


Figura 3. 4. A) Precipitação pluviométrica acumulada mensal (mm). B) Temperaturas mínimas, médias e máximas (°C). Estação Brasília. Fonte: INMET.

De acordo com estimativas de Coimbra (1987) *apud* Campos & Freitas-Silva (1998), em média, apenas 12% da precipitação total que infiltra na zona vadosa realmente alcança a zona saturada. Ocorre *déficit* hídrico entre maio e setembro e *superávit* nos meses de outubro a abril, sendo a evapotranspiração real de cerca de 900 mm anuais.

3.3. Hidrografia

A área do Distrito Federal está inserida em três regiões hidrográficas brasileiras: Paraná, São Francisco e Araguaia-Tocantins, com a maior contribuição para a Bacia do Paraná. De acordo com o mapa das unidades hidrográficas do Distrito Federal, elaborado em 1994 pela extinta SEMATEC, essas três grandes bacias foram subdivididas em sete bacias hidrográficas (São Bartolomeu, Lago Paranoá, Descoberto, Maranhão, Preto, Corumbá e São Marcos). O Distrito Federal é caracterizado por apresentar cursos d'água de drenagem de área de planalto, onde são comuns desníveis e vales encaixados (Campos & Freitas-Silva, 1998).

As três áreas de estudo estão localizadas na Bacia do Rio São Bartolomeu, destacada por ser a unidade hidrográfica com a maior área no Distrito Federal, com cerca de 1500 km², abrangendo quase 30% de todo o território, sendo o Rio São Bartolomeu o principal curso d'água desta bacia, cortando o Distrito Federal na direção Norte-Sul. Este rio é caracterizado como de planalto, seu perfil pode variar de alta declividade na cabeceira até áreas de inundação (ZEE-DF, 2011).

No geral, a Bacia do Rio São Bartolomeu apresenta elevada densidade de drenagem, com as de terceira ou quarta ordem intermitentes. Como afluentes de maior importância estão o Ribeirão Sobradinho, Mestre D'Armas e os rios Paranoá e Pipiripau. Na bacia estão situadas parte das regiões administrativas de Itapoã, Sobradinho, Planaltina, Paranoá, São Sebastião e Santa Maria, além de outras habitações como os condomínios do Grande Colorado, Entre Lagos e Jardim

Botânico. A Bacia do Rio São Bartolomeu, no Distrito Federal, é subdividida em três microbacias: Alto (ao norte), Médio (no centro) e Baixo São Bartolomeu (ao sul), que, por sua vez, são subdivididas em sub-bacias (Tabela 3.1).

Tabela 3.1. Subdivisões da Bacia do São Bartolomeu. Campos & Freitas-Silva (1998).

Bacia	Sub-Bacia
ALTO SÃO BARTOLOMEU	Ribeirão Pipiripau
	Ribeirão Mestre D'Armas
	Córrego Quinze
	Córrego do meio
	Ribeirão Sobradinho
	Córrego Fazendinha
	Córrego Rajadinha
	Córrego Rajadinha de Baixo
MÉDIO SÃO BARTOLOMEU	Córrego Capão da Onça
	Rio Paranoá
	Córrego Tapera
	Ribeirão Taboca
	Córrego divisa
	Córrego Açude
	Ribeirão Papuda
	Córrego Colméia
	Córrego Gavião
BAIXO SÃO BARTOLOMEU	Córrego Taquari Amarelo
	Ribeirão Cachoeirinha
	Ribeirão Santana
	Ribeirão Maria Pereira
	Ribeirão Saia Velha

A poligonal de estudo denominada Área 1 está localizada no Alto São Bartolomeu e inserida na sub-bacia Ribeirão Sobradinho, formada pelo Ribeirão Sobradinho, com a contribuição de diversas nascentes, sendo alguns dos principais córregos: Paranoazinho, Capão Grande, Brejo do Lobo, Açude, Indaiá, Forquilha, Capão da Erva e Grota D'água. Toda descarga hídrica da bacia converge para o Rio São Bartolomeu. As maiores altitudes alcançam 1140 m. O padrão de drenagem é predominantemente radial.

A Área 2 situa-se no Médio São Bartolomeu, está inserida em cotas mais elevadas (~1130m) da sub-bacia Ribeirão Taboca. Os principais cursos d'água são o Ribeirão Taboca e o Córrego Taboquinha. A bacia está basicamente toda recoberta por Cambissolos delgados e ocorrem quartzitos médios e metarritmitos argilosos do Grupo Paranoá e filitos com presença de

lentes de quartzito do Grupo Canastra.

A Área 3 está localizada no Baixo São Bartolomeu, na sub-bacia Maria Pereira. As porções mais elevadas da bacia são sustentadas pelos quartzitos da Formação Ribeirão Contagem, do Grupo Paranoá. Na porção onde afloram os metarritmitos, encontram-se inúmeras nascentes, com contribuição para os córregos Tamanduá e Fundo e o Ribeirão Maria Pereira. O local da captação está em uma nascente de fratura e no contato das formações Ribeirão Contagem e Córrego do Sansão. Toda a área de recarga que contribui para a nascente de captação Ibiá está inserida dentro de uma área militar com ampla preservação ambiental.

3.4. Uso e Ocupação do Solo e Cobertura Vegetal

O uso do solo e a vegetação influenciam diretamente no ciclo hidrológico das áreas estudadas. Os padrões naturais da vegetação atuam na prevenção de processos erosivos, no aumento da infiltração e na preservação de importantes áreas de recarga, enquanto que os diversos usos dos solos, como as áreas destinadas à atividade agropecuária, ao parcelamento do solo e à ocupação urbana contribuem para a compactação e impermeabilização do solo, reduzindo a infiltração e conseqüentemente a recarga natural dos reservatórios subterrâneos. Além disso, são responsáveis por alterações na disponibilidade e na qualidade das águas subterrâneas do Distrito Federal.

3.4.1. Uso e Ocupação do Solo

O uso e ocupação do solo no Distrito Federal apresentaram mudança expressiva de padrão após a inauguração de Brasília, inicialmente com foco na região do Plano Piloto. Posteriormente a ampliação da urbanização se intensificou em função do crescimento desordenado de cidades satélites e da propagação de loteamentos irregulares, com tendência de ocupações não planejadas. A ampliação das atividades agropecuárias, principalmente a partir dos anos 90, também foram bastante significativas. Diante da necessidade de controlar a ocupação e uso desordenado do solo, por meio do seu uso racional e a fim de minimizar os conseqüentes impactos causados, as entidades ambientais desenvolveram ao longo dos anos algumas medidas para controle ambiental. Uma delas foi o Plano Diretor de Ordenamento Territorial do Distrito Federal (PDOT) que definiu por meio da Lei Complementar nº 854 de 15 de outubro de 2012 - PDOT/2012, que o Distrito Federal pode ser dividido em 3 Macrozonas:

- ✓ Macrozona de Proteção Integral;
- ✓ Macrozona Urbana: é subdividida em áreas consolidadas, de expansão e qualificação, de uso controlado, de contenção urbana e zonas de conjunto tombado;

- ✓ Macrozona Rural: é subdividida de acordo com seu uso, que pode ser controlado e diversificado.

O polígono referente a Área 1 está inserido em zonas rurais de uso controlado e em zonas urbanas de expansão e qualificação e zonas urbanas de uso controlado. Estão presentes alguns condomínios residenciais em expansão, como o Condomínio Mansões Entre Lagos, já consolidado e o Condomínio Euler Paranhos, ainda com poucas habitações, ambos sem planejamento urbano, o que pode acarretar na infiltração de esgotos sem tratamento nos mananciais subterrâneos. O Condomínio Euler Paranhos está a montante da captação, fazendo parte da área de recarga da bacia. Estão presentes também algumas chácaras e áreas de plantio.

A Área 2 está inserida em uma extensa zona urbana de uso controlado e de contenção urbana, que é representada sobretudo por condomínios localizados no Setor Habitacional Jardim botânico. Esses locais, na maior parte dos casos, não apresentam planejamento urbano, estando isentos de rede de esgoto, onde são utilizados sistemas de saneamento *in situ*, incluindo fossas sépticas e sumidouro ou fossas e valas de infiltração. Deste modo, os efluentes domésticos não tratados advindos dos condomínios são a principal fonte de contaminação da área de captação de água para envasamento denominada Água Mineral Natural Hydrate.

Os limites da Área 3 estão inseridos na macrozona rural, mais precisamente na de uso controlado. Existem algumas poucas habitações ao sul da área e regiões de agropecuária na porção nordeste, próximas a uma área de extração de areia. A área de recarga da bacia faz parte de uma poligonal de área militar completamente preservada, com vegetação nativa constituída pela formação savânica. Portanto, trata-se de um local, que até o momento, é caracterizado pela ausência de fontes de contaminação, estando a área de recarga protegida.

As áreas de estudo estão localizadas em uma região que sofreu forte ampliação da ocupação devido ao crescimento de centros urbanos, relacionados às regiões administrativas de Sobradinho, São Sebastião e diversos condomínios, assim como a ocupação agropecuária. Isso acarretou na deterioração da qualidade da água no alto curso da bacia. Verifica-se, portanto, uma forte pressão no uso de importantes zonas de recarga de aquíferos que alimentam as bacias.

3.4.2. Vegetação

Toda a cobertura vegetal do Distrito Federal faz parte da Província Florística do Cerrado, que corresponde ao bioma com a segunda maior extensão do país. A variação vegetacional do cerrado é bastante extensa, com presença de formações florestais, formações savânicas e formações campestres (Ribeiro & Walter, 2008).

As formações florestais são pouco representativas no Distrito Federal, englobando espécies arbóreas com formação de dossel, sendo classificadas em:

Mata de Galeria e Mata Ciliar: estão associadas a rios e córregos, sendo que a mata de galeria ocorre em cursos d'água menores e estreitos, como em fundo de vale, por exemplo, enquanto que a mata ciliar ocorre em rios mais largos e maiores. As matas de galeria podem ser inundáveis e não inundáveis, dependendo da topografia e nível freático.

Mata Seca: é representada por uma formação vegetal mais fechada. Não está associada a cursos d'água, porém sua formação depende da ocorrência de solos rasos e com fertilidade acima daquela observada nos domínios do Cerrado.

Cerradão: são caracterizados pela presença de árvores mais altas, com ocorrência em solos profundos e bem drenados.

As formações savânicas podem ser encontradas nas áreas mais preservadas do Distrito Federal. São caracterizadas por regiões com árvores e arbustos distribuídos sobre gramíneas e sem dossel contínuo. São classificadas como:

Cerrado *sensu stricto*: é formado por árvores de porte baixo, são inclinadas, tortuosas e apresentam ramificações irregulares e retorcidas. Pode ser subdividido em: cerrado denso, cerrado típico, cerrado ralo e cerrado rupestre. Os três primeiros se caracterizam pelo maior volume e aglomeração das árvores, o cerrado rupestre se caracteriza por ocorrer em solos rasos onde há afloramentos. O cerrado *sensu stricto* está mais comumente associado à presença de Latossolo Vermelho e Vermelho-Amarelo.

Parque de Cerrado: esta classe é caracterizada pela ocorrência de árvores em pequenas elevações de terreno, chamados de murundus. Está associada à presença de solos argilosos, que são melhor drenados nos murundus.

Palmeiral: existe o predomínio de uma única espécie de palmeira arbórea que ocorre em solos bem drenados, podendo os buritizais ocorrer em solos mal drenados.

Veredas: a presença de buritis é a principal característica das veredas, que ocorrem agrupadas com outras espécies. São diferentes dos buritizais por não formar dossel. Pode ocorrer em solos secos, úmidos e saturados (brejo onde ocorrem os buritis).

As formações campestres são áreas onde as espécies herbáceas e arbustivas predominam, são classificadas em:

Campo Limpo: há poucos arbustos e subarbustos (menos de 10%), com predominância de gramíneas e nenhuma árvore. Está presente, sobretudo, em solos arenosos e ocorre comumente em encosta de chapadas.

Campo Sujo: nesta fitofisionomia, a presença de arbustos e subarbustos é evidente. Está associado à ocorrência de solos rasos como Neossolos Litólicos, Cambissolos e Plintosso Pétrico. O campo limpo e campo sujo podem ser classificados como secos e úmidos, a depender da profundidade do lençol freático. Ambos podem ocorrer em murundus (pequenas elevações de terreno).

Campo Rupestre: ocorre em elevadas altitudes, com predominância de solos rasos e afloramento de rochas, essas características o difere do campo sujo e campo limpo, além de sua composição florística, que apresenta elevado endemismo.

3.5. Solos

Os solos presentes nas áreas de estudo foram caracterizados como: Latossolo, Cambissolo, Gleissolo, Neossolo Quartzarênico, Nitossolo e Plintossolo. Há ampla predominância de ocorrência de Latossolo Vermelho, Latossolo Vermelho-Amarelo e Cambissolo.

Para elaboração dos mapas de solos de cada área, foram realizados trabalhos de campo, juntamente com auxílio e uso do mapeamento de solos do Distrito Federal, realizado pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), apresentado na escala de 1:100.000. A escala de trabalho de campo foi de 1:25.000 e 1:50.000. A superfície do terreno foi obtida a partir de imagem SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) (Farr & Kobrick, 2000).

Os mapas podem ser visualizados na Figura 3.5 a 3.7. As classes de solos foram definidas conforme a 3ª edição do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 2013).

LATOSSOLO (LV e LVA)

É tipo de solo predominante nas áreas de estudo, sendo observados tanto o Latossolo Vermelho (LV), como o Vermelho-Amarelo (LVA), que se diferem apenas pela cor nos primeiros 100 cm do horizonte B. Os Latossolos apresentam elevado grau de intemperização, sendo geralmente profundos, bem drenados e permeáveis. Sua textura apresenta variações entre argilosa, média, muito argilosa ou arenosa. Estes solos ocorrem predominantemente em relevos planos a suave ondulado, portanto apresenta baixa susceptibilidade a erosão (Figura 3.8).

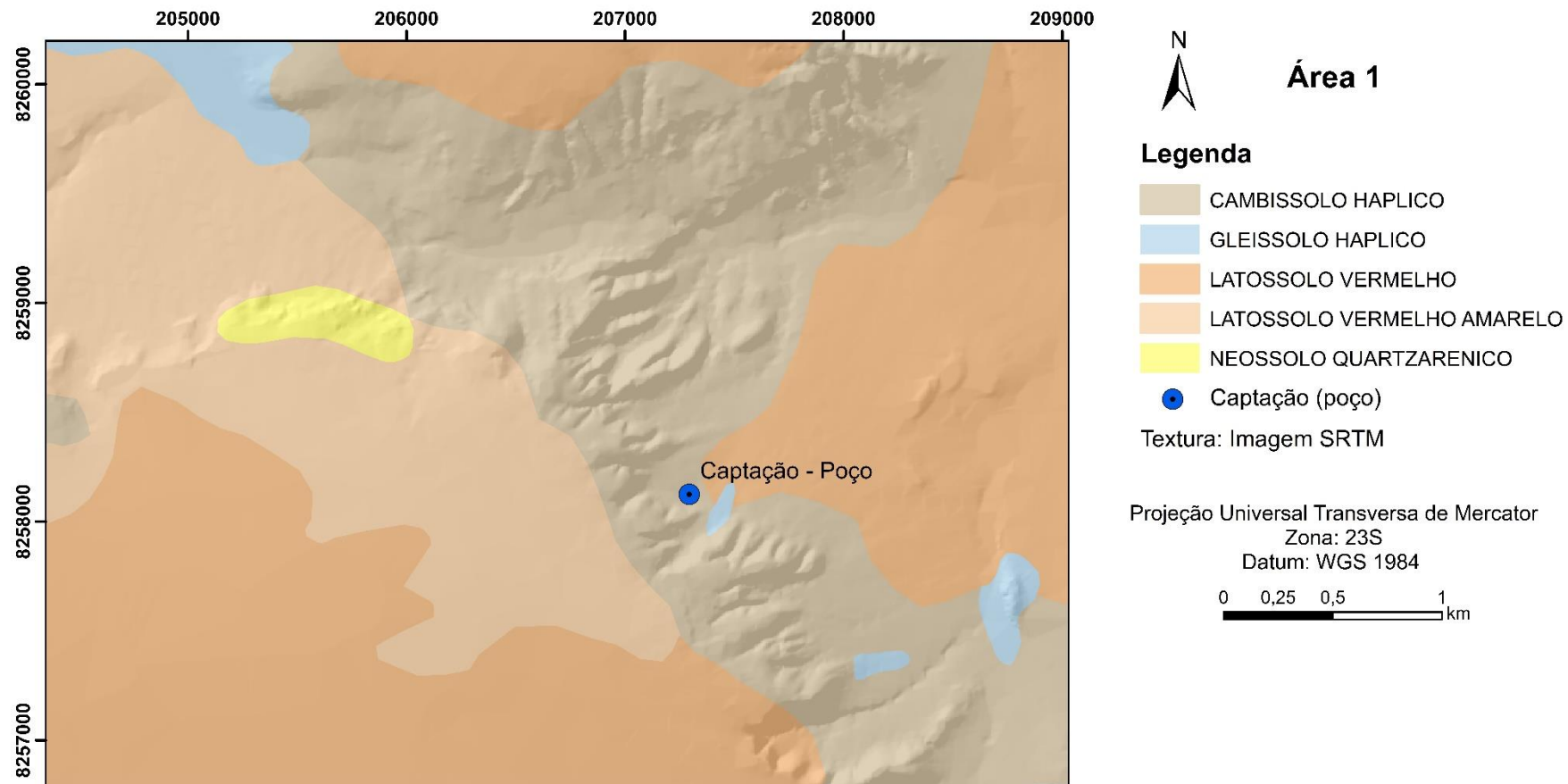


Figura 3. 5. Mapa de solos da Área 1. Adaptado de Embrapa (1978).

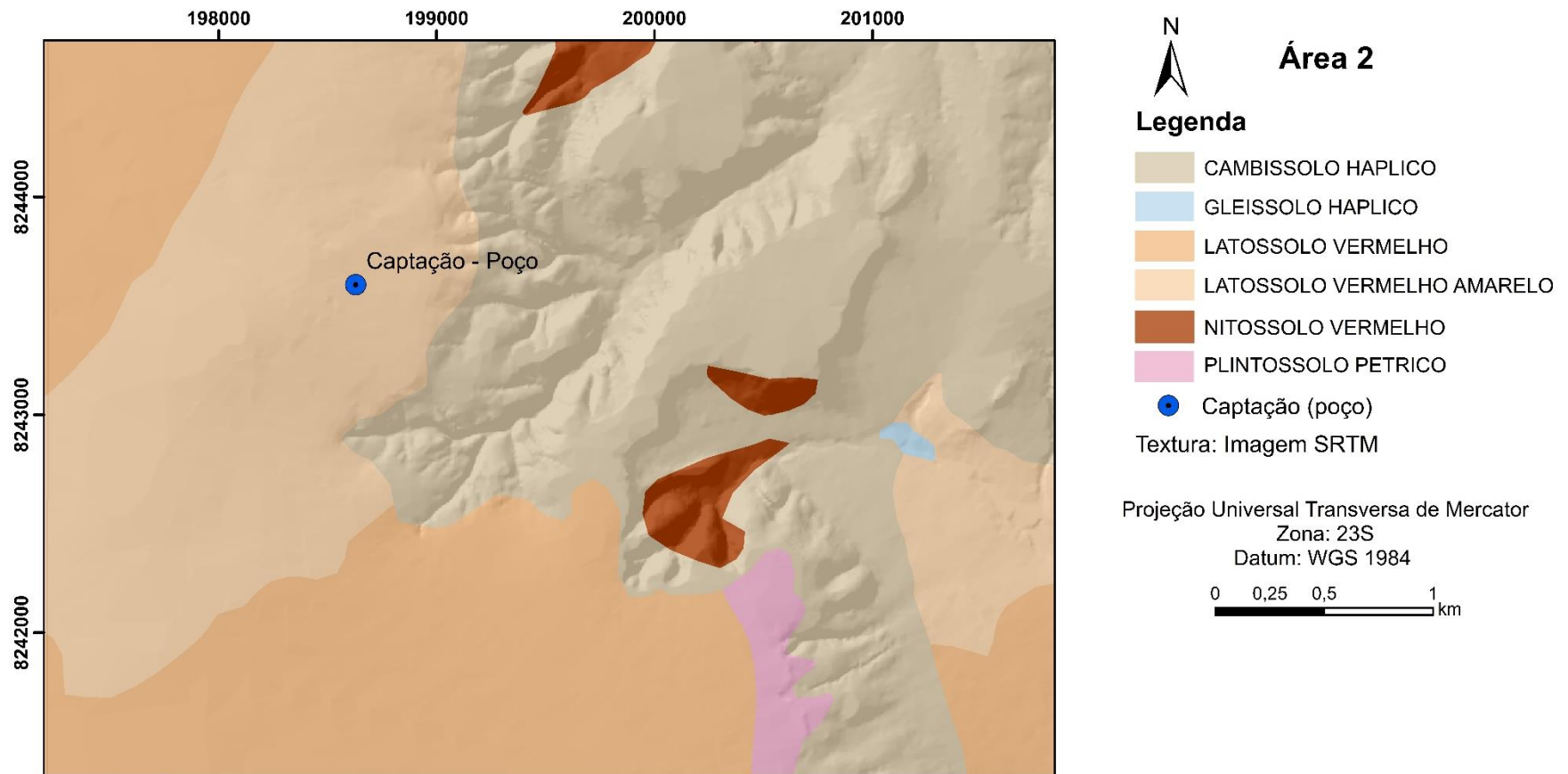


Figura 3. 6. Mapa de solos da Área 2. Adaptado de Embrapa (1978).

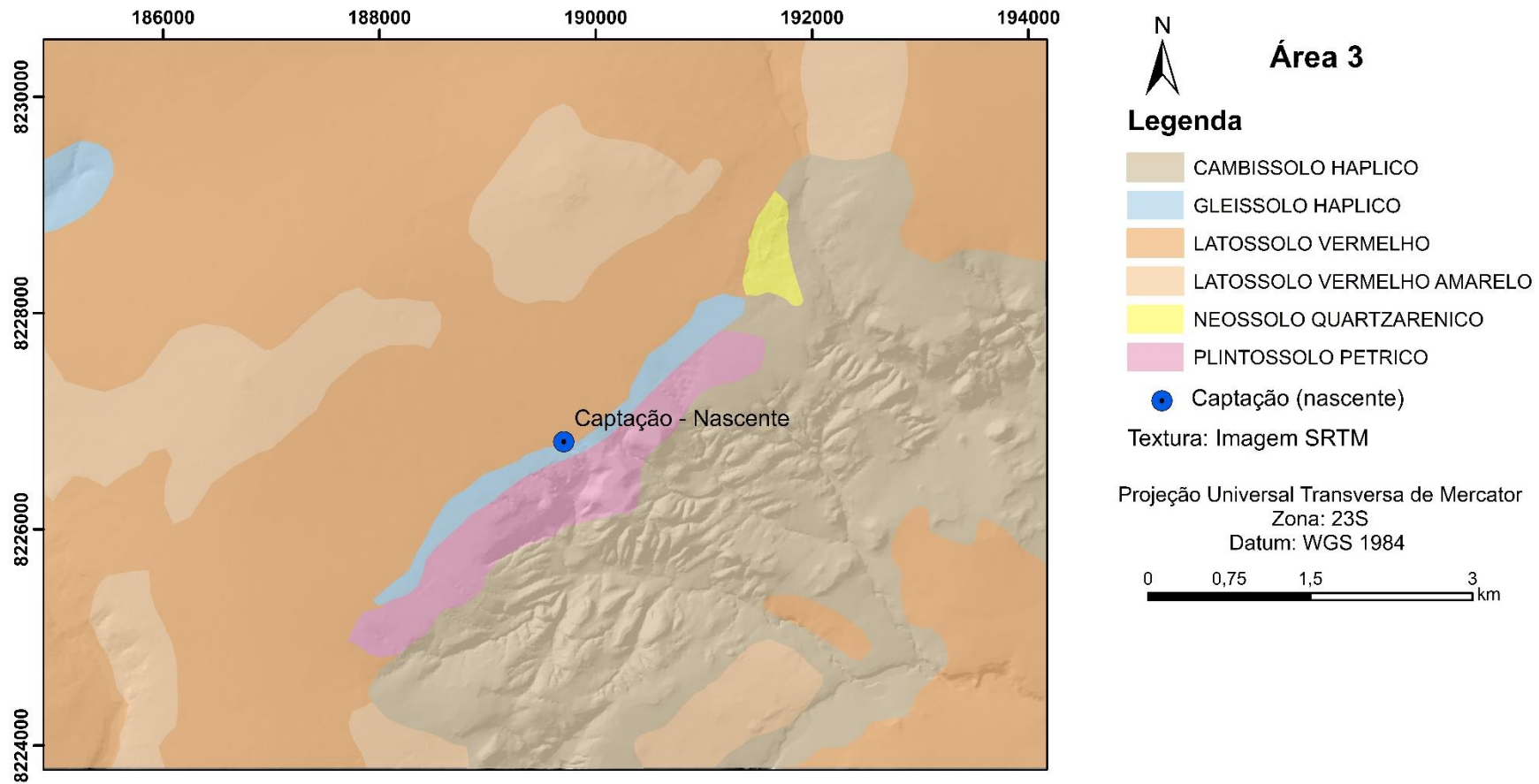


Figura 3. 7. Mapa de solos da Área 3. Adaptado de Embrapa (1978).



Figura 3. 8. A) Perfil de Latossolo Vermelho. B) Latossolo Vermelho- Amarelo.

De acordo com dados de Fiori *et al.* (2010), a condutividade hidráulica destes solos na superfície é da ordem de grandeza de 10^{-5} e 10^{-6} m/s. Em maiores profundidades, os valores variam entre 10^{-6} a 10^{-7} m/s, em ambos os casos a predominância de valores de condutividade hidráulica está na ordem de grandeza de 10^{-6} . Há uma tendência de redução da condutividade com o aumento da profundidade, isso pode ocasionar escoamento da água em subsuperfície.

Os Latossolos ocorrem com frequência nas três áreas de estudo, sobretudo em terrenos planos, por isso são mais favoráveis ao uso e ocupação, havendo maior densidade urbana e agrícola nessas áreas.

CAMBISSOLO HÁPLICO (CX)

São solos pouco desenvolvidos, com horizonte B incipiente, geralmente são rasos, porém o horizonte C pode alcançar vários metros quando desenvolvido de rochas pelíticas. Apresentam textura siltico-argilosa, argilosa, comumente é cascalhento e não raramente exibem fase rochosa. São distróficos e apenas localmente eutróficos. São encontrados em áreas com maior declividade, com relevo ondulado a forte ondulado, por isso apresentam elevada susceptibilidade à erosão (Figura 3.9).

Segundo Fiori *et al.* (2010), a condutividade hidráulica desses solos apresenta valores na ordem de grandeza de 10^{-5} e 10^{-6} m/s em superfície, com redução em profundidade, apresentando valores de K mais frequente da ordem de 10^{-7} m/s.

Nas áreas de estudo, os Cambissolos ocorrem em terrenos com maior declividade, estão associados à presença de diversas nascentes e comumente estão em contato com os Latossolos, Nitossolos e com faixas estreitas de Gleissolos. Devido as suas características, especialmente quanto à ocorrência em elevadas declividades, o uso e ocupação nessa classe de solo é limitada, com exceção em alguns locais da Área 2.



Figura 3. 9. Perfis de Cambissolo Háplico. No primeiro caso o saprolito é observado a partir de 40 cm e no segundo caso há rochividade representada por grandes blocos líticos.

GLEISSOLO HÁPLICO (GX)

No Distrito Federal, os gleissolos são classificados no segundo e terceiro níveis categóricos como Gleissolo Háplico distrófico e Gleissolo Melânico distrófico. Caracterizam-se como solos hidromórficos, distróficos, pouco drenados e plásticos. Apresentam textura muito argilosa com estrutura granular no horizonte superficial e são ricos em matéria orgânica. Essa classe ocorre em relevo plano e suave ondulado, comumente em horizontes húmicos. Geralmente estão nas adjacências das nascentes, drenagens e pequenos córregos, por isso na maior parte das vezes são saturados. Encontram-se localmente associados a campo de murunduns (pequenas elevações de relevo) (Figura 3.10).

Os Gleissolos ocorrem nas três áreas de estudo, apresentam textura muito argilosa e em alguns locais apresentam nível freático rebaixado, podendo ser chamado de “paleogleissolos” em função da mudança do caráter saturado em função da mudança dos padrões de uso de clima nas

últimas décadas. Em diversos locais estão associados a campo de murunduns e áreas com buritis. Em função de suas características, apresenta baixa densidade de uso e ocupação.



Figura 3. 10. A) Perfil de Gleissolo Háptico da Área 3; B) Gleissolo em campo de murunduns.

PLINTOSSOLO PÉTRICO (FF)

Essa classe de solos apresenta horizonte plíntico com caráter concrecionário ou litoplíntico, sendo distrófico e álico (Figura 3.11). Sua textura é variável, no horizonte plíntico apresenta textura franco arenosa ou mais fina, podendo apresentar mudança textural abrupta. Ocorre em relevos suave ondulados ou borda de chapadas, porém é comum ocorrerem em áreas de maiores declividades. São solos relativamente mal drenados, formado em condições cuja percolação de água é restrita com relativa variação sazonal do nível d'água freática.

Pode ser visto nas três áreas de estudo, porém na Área 1 não foi mapeado por estar presente apenas na forma de pequenas manchas localizadas, associadas ao Cambissolo Háptico. Não há ocupação sobre estes terrenos.

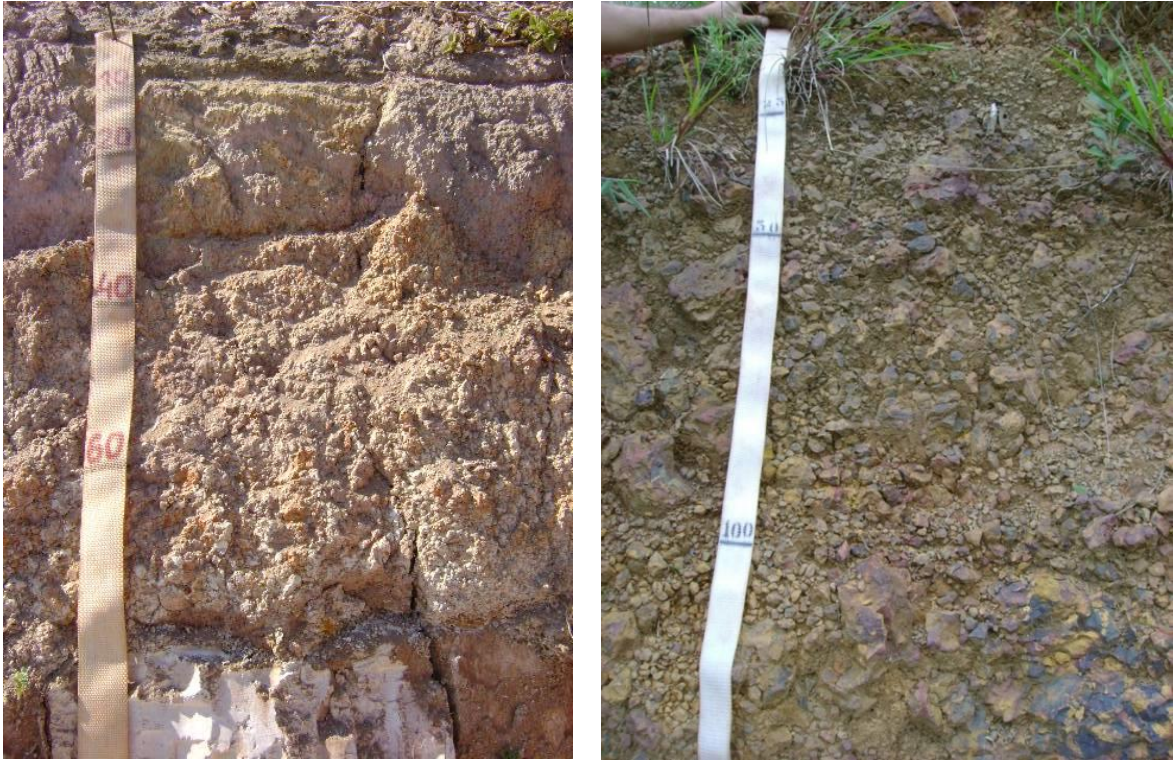


Figura 3. 11. Perfis de Plintossolo Pétrico.

NITOSSOLO VERMELHO (NV)

São solos com textura argilosa a muito argilosa e estrutura granular comum, são profundos e bem drenados (Figura 3.12). Apresentam condutividade hidráulica moderada a alta, na ordem de grandeza de 10^{-5} e 10^{-6} m/s, com redução em profundidade, semelhante aos latossolos. São caracterizados por ocorrer em relevo ondulado a suave ondulado.

Ocorre apenas na Área de estudo 2 em contato com latossolo vermelho e não há ocupação nesses terrenos.



Figura 3. 12. Perfil de Nitossolo Vermelho.

NEOSSOLO QUARTZARÊNICO (RQ)

Estes solos eram anteriormente denominados de areias quartzosas. São solos pouco espessos, podendo ser ou não hidromórficos, distróficos, sem estruturação e pouco evoluídos (Figura 3.13). Apresentam textura arenosa, podendo ter frações de areia fina e grossa. Ocorrem em regiões de relevo plano e estão relacionados à presença de quartzitos da Formação Ribeirão Contagem em bordas de chapada, e neste caso, podem apresentar nível d'água profundo. São bastante susceptíveis a erosão, formando, por vezes, extensos processos erosivos lineares.

São solos muito permeáveis, apresentando condutividade hidráulica, segundo Fiori *et al.* (2010), na ordem de grandeza de 10^{-5} m/s em superfície e 10^{-6} m/s em profundidade.

O Neossolo Quartzarênico está presente nas Áreas 1 e 3, estando em contato lateral com Latossolo e Cambissolo. Devido às suas características, não existe ocupação nesses terrenos, exceto no caso de uma área de extração de areia presente na Área 3.

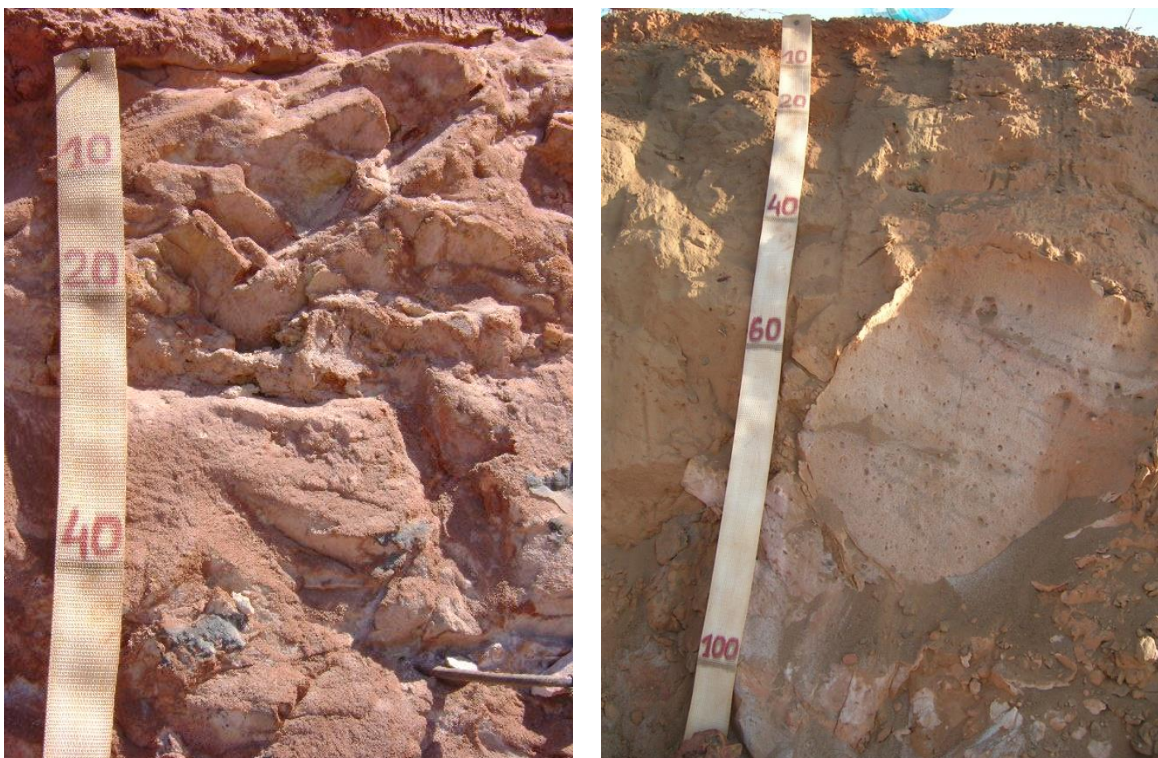


Figura 3. 13. Perfis de Neossolo Quartzarênico.

3.6. Geomorfologia

O Distrito Federal está localizado no Planalto Central do Brasil e inserido no Domínio Morfoclimático do Cerrado, cujo resultado das suas características geomorfológicas seriam decorrentes de uma interação entre regimes climáticos, fatores litológicos, edáficos e bióticos (Ab'Saber, 1977 *apud* ZEE-DF, 2011).

A partir das propostas de Novaes Pinto (1994 a,b) e Martins & Baptista (1998), são considerados cinco compartimentos geomorfológicos no Distrito Federal:

Plano Elevado: caracterizado pelo relevo plano a suave ondulado, com declividades menores que 10% e cotas superiores a 1.110 metros. Há predominância de Latossolos e apresenta baixa densidade de drenagem.

Plano Intermediário: apresenta padrão de relevo plano a suave ondulado, com declividades inferiores a 12% e cotas entre 950 e 1.050m. É predominante a ocorrência de Latossolos e apresenta baixa densidade de drenagem.

Vale Dissecado: possui relevo ondulado a forte ondulado, com declividades maiores que 20% e cotas inferiores a 800 metros. Predominam os Cambissolos e apresenta alta densidade de drenagem.

Rebordo: o padrão de relevo é ondulado, com declividades entre 10% e 20% e cotas entre 950 e 1.100 metros. Há predominância de Cambissolos e a densidade de drenagem é moderada.

Rampa Íngreme: mostra relevo forte ondulado a escarpado, com declividades superiores a 25% e

cotas entre 800 e 1.110 metros. São predominantes os Latossolos e apresentam elevada densidade de drenagem.

Na Área 1 há ocorrência de plano elevado na porção sudoeste da área, com predominância de Latossolo Vermelho e Vermelho-Amarelo. Ocorre também rebordo na porção central, na faixa de ocorrência dos Cambissolos e Plano Intermediário na porção nordeste, onde ocorrem os Latossolos.

Na Área 2 podem ser visualizadas áreas de Rampa Íngreme, com ocorrência de escarpas e Vale Dissecado nas porções central e leste da área, onde ocorrem predominantemente o Cambissolo. O Plano Elevado está na porção oeste, relacionado à ocorrência de Latossolo.

Na Área 3 há predominância de Plano Elevado, com baixas declividades, associado a ocorrência dos Latossolos. Na porção sudeste da área ocorre Rampa Íngreme e Vale Dissecado, onde estão presentes com mais frequência os Cambissolos.

3.7. Geologia

No contexto geológico regional, o Distrito Federal está situado na porção central da Faixa Neoproterozoica de dobramentos e empurrões Brasília, cuja estruturação está ligada à tectônica compressiva do Ciclo Brasileiro, representada pela formação de dobras, lineações, foliações, falhamentos reversos, empurrões, nappes, faixas transcorrentes e falhas normais. Os conjuntos litológicos que compõem o contexto geológico do Distrito Federal são classificados em quatro grupos distintos: Paranoá, Canastra, Bambuí e Araxá, que ocupam respectivamente 65%, 15%, 15% e 5% da área total do território do DF. Os contatos das unidades são tectônicos, formados durante a evolução do ciclo brasileiro e representados por cavalgamentos regionais com vergência para leste, em direção ao Cráton do São Francisco (Campos & Freitas-Silva 1998) (Figura 3.14).

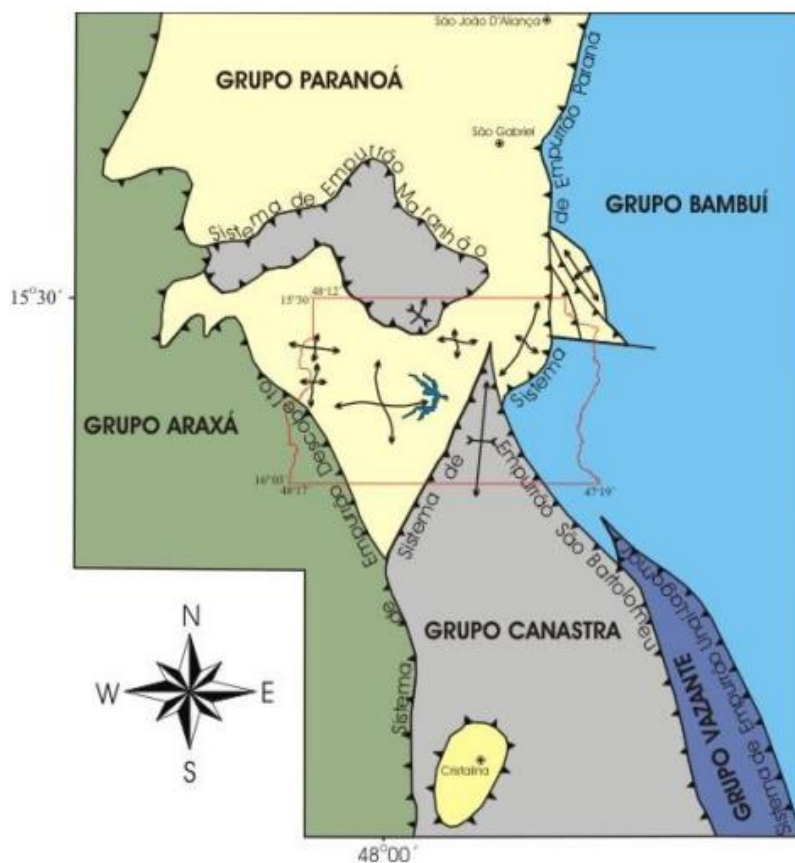


Figura 3. 14. Distribuição dos empurrões e cavalgamentos regionais associados à geologia regional em que o Distrito Federal. Fonte: Modificado de Faria, 1995.

A estratigrafia do Distrito Federal é complexa devido à sua estruturação e à sua posição na Faixa Brasília (ocorre na porção central tanto), que inclui importantes falhas de empurrão, sucessivos cavalgamentos, interferência de fases ortogonais de dobramentos e variações espessuras de conjuntos litológicos, isso gera dificuldade em estabelecer o empilhamento original. Além disso, os solos, por vezes espessos, mascaram os afloramentos rochosos em extensas áreas, o que dificulta ainda mais os trabalhos que visam o detalhamento estratigráfico. A ordem deposicional da base para o topo, é representada pelos grupos Canastra, Paranoá, Araxá e Bambuí. (Campos & Freitas-Silva, 1998).

Nas áreas de estudo ocorrem litologias atribuídas aos grupos Paranoá (metarritmito arenoso, quartzito médio e metarritmitos argilosos) e Canastra (filitos e mármore). A Figura 3.15 mostra a coluna estratigráfica do Grupo Paranoá. Os lineamentos aparentes traçados pelas linhas de drenagem e relevo são mais evidentes nos Metarritmitos Argilosos do Grupo Paranoá e nos filitos do Grupo Canastra. O padrão predominante de cisalhamento é na direção NE-SW e NS, com fraturas de alto ângulo. Os lineamentos apresentam tamanho variável, com predominância de traçados pequenos, com cerca de 300 metros, podendo alcançar pouco mais de 2 km. Os mapas e perfis geológicos das áreas podem ser vistos nas Figuras 3.16 a 3.18.

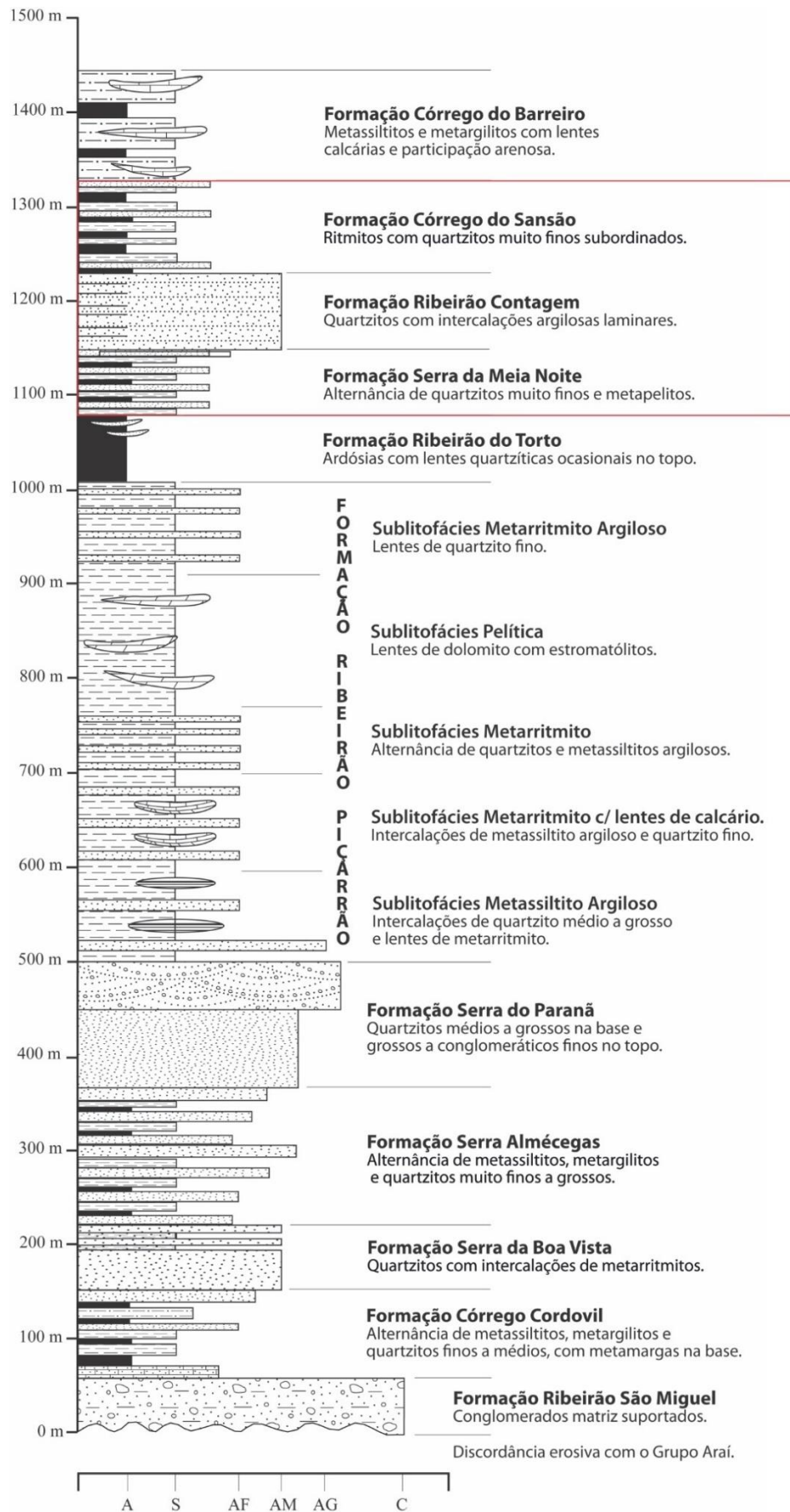


Figura 3. 15. Coluna estratigráfica do Grupo Paranoá. Em destaque estão as unidades presentes nas áreas de estudo.

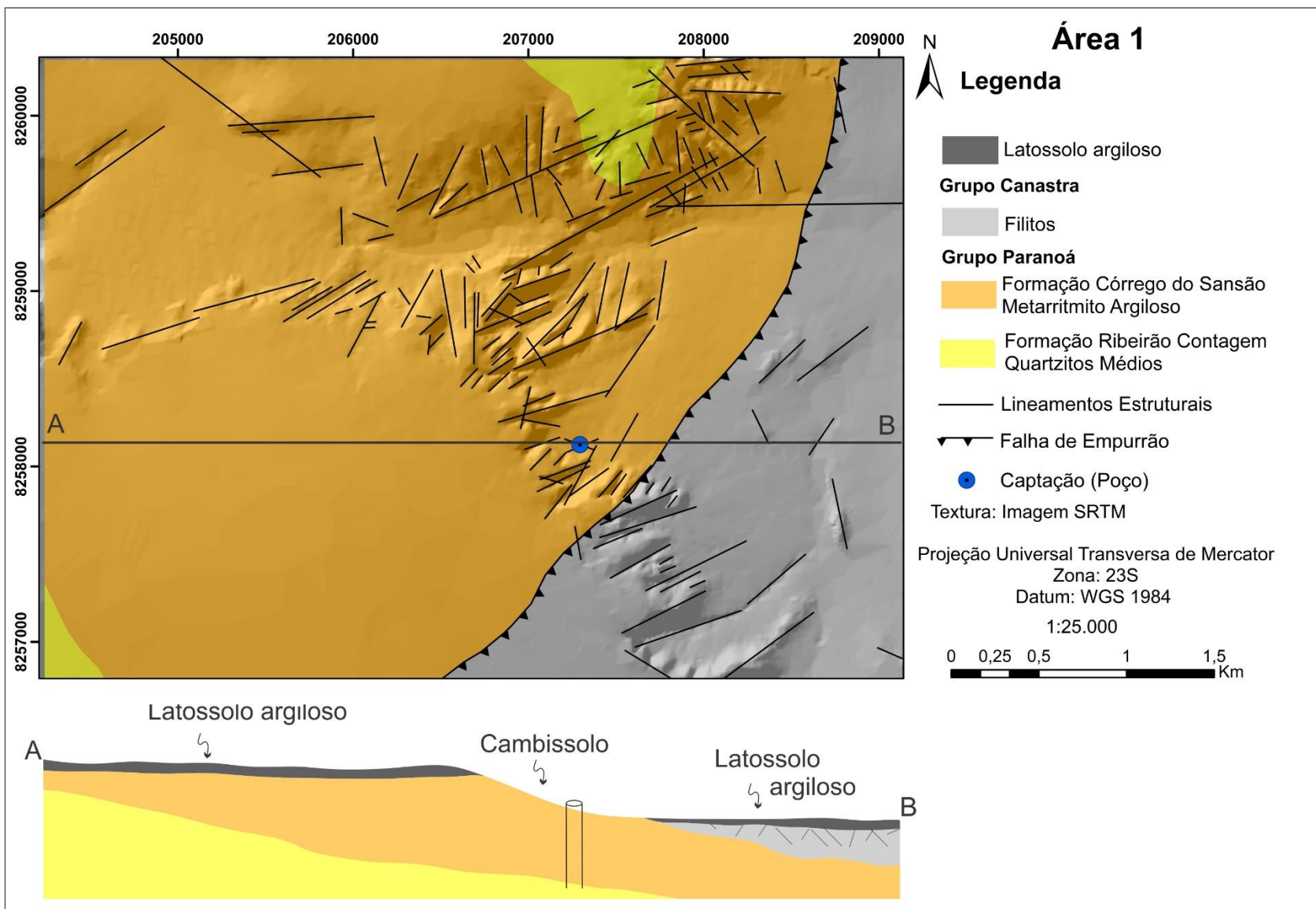


Figura 3. 16. Mapa e perfil geológico da Área 1, adaptado de Campos & Freitas-Silva (1998).

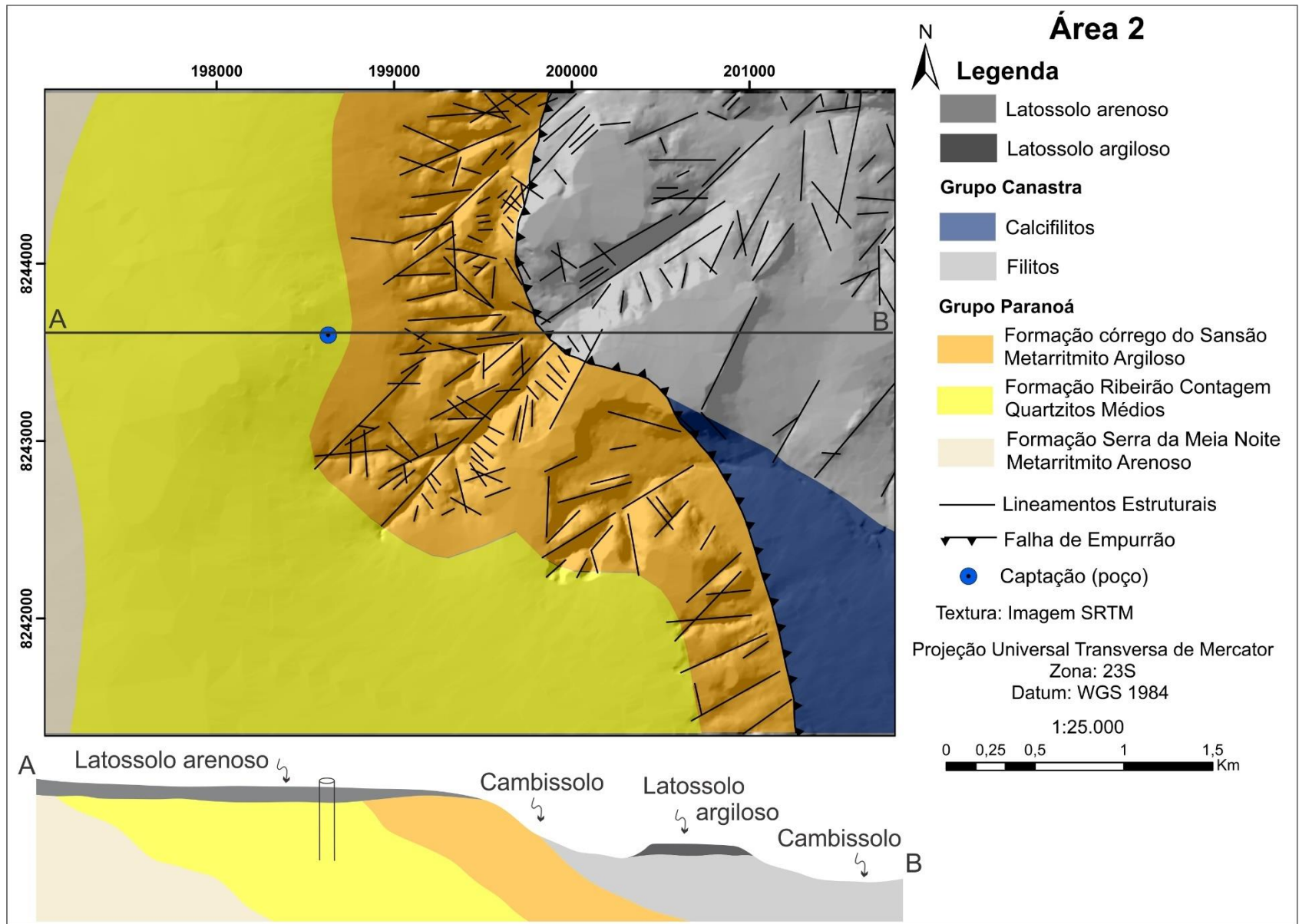


Figura 3. 17. Mapa e perfil geológico da Área 2, adaptado de Campos & Freitas-Silva (1998).

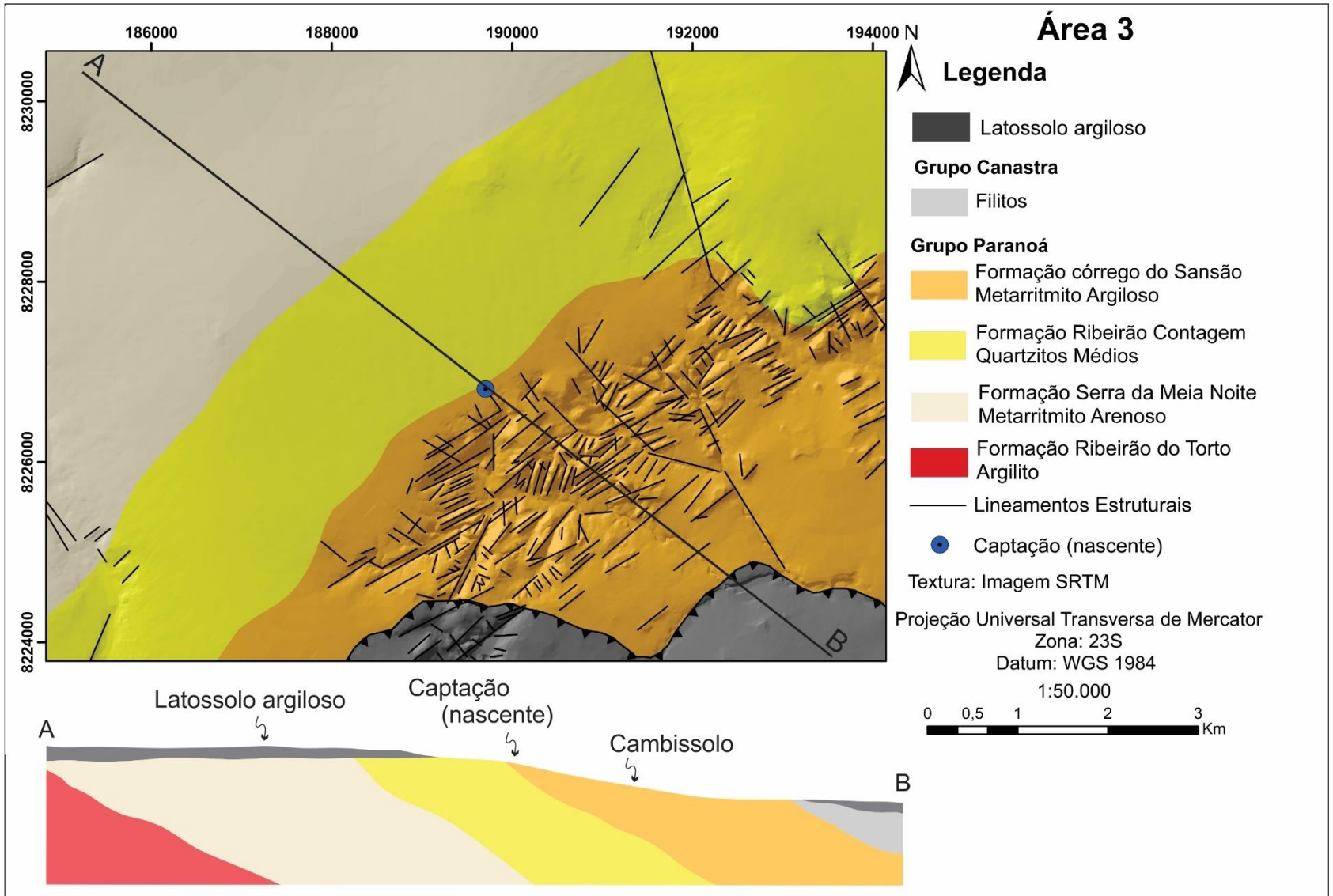


Figura 3. 18. Mapa e perfil geológico da Área 3, adaptado de Campos & Freitas-Silva (1998).

Grupo Paranoá (Meso/Neoproterozoico)

No Distrito Federal, o Grupo Paranoá é formado por sete unidades litoestratigráficas, da base para o topo: Formações Serra do Paranã, Ribeirão Piçarrão, Ribeirão do Torto, Serra da Meia Noite, Ribeirão Contagem, Córrego do Sansão e Córrego do Barreiro. Nas áreas de estudo há ocorrência das Formações Serra da Meia Noite, Ribeirão Contagem e Córrego do Sansão.

Formação Serra da Meia Noite - Metarritmito Arenoso

Esta unidade é formada por metarritmito arenoso, que se encontra intercalado com camadas de quartzitos finos e materiais pelíticos (metassiltito e ardósia). Sua espessura pode alcançar 90 metros. A Formação Serra da Meia Noite está presente nas Áreas 2 e 3.

Formação Ribeirão Contagem - Quartzito Médio

É composta por quartzitos de cor branca, apresenta granulação média a fina, são silicificados, bem selecionados, puros e bastante fraturados. Apresentam espessura de até 100 metros no Distrito Federal. Esta unidade pode ser observada nas três áreas de estudo (Figura 3.17).



Figura 3. 19. A) Afloramento de *Quartzito fraturado* e B) *Bloco de quartzito silicificado* presentes na área 2.

Formação Córrego do Sansão - Metarritmitos Argilosos

São metarritmitos argilosos, que apresentam camadas centimétricas a decimétricas de quartzitos e metassiltitos finamente estratificados e dobrados (Figura 3.18). Esta unidade pode apresentar espessuras que variam de 100 a 150 metros. Está presente nas três áreas de estudo.



Figura 3. 20. Metarritmitos com dobras em chevron apertadas presentes na Área 1.

Grupo Canastra (Meso/Neoproterozóico)

O Grupo Canastra está presente em grande extensão da bacia do Rio São Bartolomeu. É formado por uma variação de filitos, sendo mais comuns quartzo clorita filitos e sericita filitos e menos comumente ocorrem calcifilitos e mármore. Rochas atribuídas ao Grupo Canastra podem ser observadas nas Áreas 1 e 2.

3.8. Hidrogeologia

No contexto regional, o Distrito Federal está inserido na Província Hidrogeológica do Escudo Central, que é caracterizada pela presença de aquíferos fraturados cobertos por mantos de intemperismo, com espessura variável de restrita até muito grande, apresentando propriedades físicas e hidrodinâmicas muito variáveis (Campos, 2004).

Em função dos tipos de solos presentes e de sua textura, estrutura e espessura os aquíferos freáticos e os profundos podem apresentar diferentes características com relação a sua recarga e padrão de circulação geral das águas subterrâneas.

De acordo com Campos & Freitas-Silva (1998), a hidrogeologia no Distrito Federal pode ser classificada em dois grandes grupos de aquíferos, o Domínio Aquífero Intergranular e o Domínio Aquífero Fraturado. Esses domínios são divididos em sistemas que em alguns casos são subdivididos em subsistemas, conforme informações da Tabela 3.2.

Tabela 3.2. Classificação dos Domínios aquíferos do Distrito Federal. Fonte: Adaptado de Campos & Freitas-Silva (1998) e Campos & Cunha (2015).

Domínio	Sistema	Subsistema	Vazão Média (L/h)	Litologia/Solo Predominante	Espessura
Poroso	P₁	–	<800	Latossolos arenosos e Neossolos quartzarenicos	>5m
	P₂	–	<500	Latossolos argilosos	>5m
	P₃	–	<500	Plintossolos e Argissolos	>5m
	P₄	–	<300	Cambissolo e Neossolo litólico	<1m
Fraturado	Paranoá	S/A	12.500	Metassiltitos	150 m
		A	4.500	Ardósias	100 m
		R ₃ /Q ₃	12.000	Quartzitos e metarritmitos arenosos	150 m
		R ₄	6.500	Metarritmitos argilosos	120 m
		PPC	9.000	metassiltitos e lentes de mármore	150 m
	Canastra	F	7.500	Filitos micáceos	150 m
		F/Q/M	33.000	Calcifilitos, quartzitos e mármore	150 m
	Bambuí	–	6.000	Siltitos e arcóseos	140 m
	Araxá	–	3.500	Mica xistos	100 m

Domínio Intergranular (Aquíferos Rasos)

Nos aquíferos porosos ou intergranulares, a água do reservatório ocupa os espaços entre os poros dos grãos ou entre os minerais constituintes das rochas, solo ou saprolito. No Distrito Federal, devido à ausência de rochas sedimentares com espaços intersticiais, este domínio é representado essencialmente pelos solos e saprolitos. São aquíferos rasos e comumente homogêneos, cuja espessura saturada e a condutividade hidráulica são controladas pela geologia e geomorfologia do substrato. Podem ser livres e/ou suspensos e apresentam ampla continuidade lateral, com espessura podendo variar de poucos metros até cerca de 80 metros, porém a predominância é de espessuras entre 15 e 25 metros. A profundidade do nível freático é controlada pela hipsometria e pelas feições gerais dos solos, sendo a vazão até 800 litros/hora. Esse domínio, é caracterizado por representar a transição entre a zona vadosa e saturada do aquífero. O Domínio Aquífero Intergranular foi dividido em quatro sistemas: P₁, P₂, P₃ e P₄, (Campos & Freitas-Silva, 1998; Campos, 2004), conforme a Tabela 3.2.

Domínio Fraturado (Aquíferos Profundos)

No domínio fraturado, a água do reservatório é ocupada pelos espaços entre os planos de fratura, micro fraturas, diaclases, juntas, zonas de cisalhamento e falhas. São aquíferos livres ou confinados, intensamente anisotrópicos e heterogêneos, com extensão lateral variável. Os parâmetros hidrodinâmicos vão depender do tipo de rocha e podem ser bastante variáveis para um mesmo tipo litológico. A densidade das discontinuidades da rocha é o principal fator que controla a condutividade hidráulica. Sua profundidade está limitada a cerca de 180 metros, em raras exceções podem exceder essa profundidade, havendo uma tendência de selamento dos planos abertos devido à pressão litostática. A maior parte dos poços apresentam vazões entre 5.000 e 12.000 litros/hora, porém podem variar de poços secos até valores superiores a 100.000 litros/hora. Os poços secos ou de vazões muito baixas são controlados pela presença de material pelítico (metassiltitos e ardósias), enquanto que as maiores vazões estão relacionadas à maior ocorrência de quartzitos. O domínio poroso funciona como um filtro natural da zona fraturada, que age protegendo a qualidade das águas mais profundas.

A recarga ocorre por meio dos fluxos verticais e laterais da água da chuva, sendo a morfologia da paisagem o principal fator que controla as áreas de recarga regionais. Esse sistema foi subdividido em quatro sistemas: Paranoá, Canastra, Bambuí e Araxá. O sistema Paranoá foi subdividido em S/A, A, R₃/Q₃, R₄ e PPC e o sistema Canastra foi subdividido em F e FQM (Tabela 3.2) (Campos & Freitas-Silva, 1998; Campos, 2004).

No contexto local, a maior parte da Área 1 está inserida no sistema P₁ do domínio poroso, onde ocorrem predominantemente Latossolos, apresentando grandes espessuras e alta condutividade hidráulica. Existem também locais relacionados à presença de Cambissolos do sistema P₄, cujo potencial hídrico é baixo. A presença de Latossolos nas principais áreas de recarga da captação permite inferir um elevado potencial de contaminação, porém são solos espessos, possibilitando que a exposição à contaminação seja moderada. No domínio fraturado, a área está inserida mais amplamente no Subsistema R₄, relacionado à ocorrência de metarritmitos argilosos do Grupo Paranoá, com vazão média de 6.500 Litros/hora.

No domínio poroso, a Área 2 abrange predominantemente o Sistemas P₁, onde está inserida a área de captação e a maior parte da área de recarga natural e o Sistema P₄. No domínio fraturado ocorre o Subsistema R₃/Q₃ do Grupo Paranoá, onde está localizada a área de captação, com presença de quartzitos e metarritmitos arenosos e vazões médias de 12.000 litros/horas. Ocorre também os subsistemas R₄ (Metarritmitos argilosos do Sistema Paranoá), F (filitos micáceos) e F/Q/M (calcifilitos, quartzitos e mármoreos do Sistema Canastra).

O sistema do domínio poroso predominante da Área 3 é o P₁, relacionado à ocorrência de Latossolos e onde está inserida a área de recarga natural. Mais restritamente ocorrem os sistemas P₃ e P₄. No domínio fraturado, podem ser vistos na área os subsistemas R₃/Q₃, R₄.

CAPÍTULO 4. CRITÉRIOS PARA DELIMITAÇÃO DE ÁREAS DE PROTEÇÃO DE CAPTAÇÃO

A determinação de zonas de proteção de poços ou nascentes dependerá, sobretudo, das características da zona vadosa e dos padrões do fluxo subterrâneo, que irão influenciar no movimento da água nos vazios da rocha (poros intergranulares, fissuras e cavidades de dissolução). A água subterrânea pode se movimentar em diferentes ambientes, cuja complexidade hidrogeológica é bastante variável. Assim, uma série de critérios deve ser analisada, envolvendo diversos conceitos e princípios e que estão relacionados aos parâmetros que influenciam na proteção na zona vadosa e no fluxo subterrâneo do ponto de recarga até o poço, nascente ou até seu ponto de descarga. A partir da análise desses critérios, é possível sugerir os ambientes cujo transporte de poluentes é mais favorável e onde o potencial de poluição é maior dentro do sistema.

É importante destacar que a zona não saturada é a porção do aquífero em que a função de filtro, depuração e proteção são desempenhadas. Nesta região do aquífero (zona vadosa ou zona de aeração) há inúmeros processos de atenuação natural, de retardo, de degradação de cargas contaminantes, de eliminação de patógenos e outros componentes, o que deve elevar sua importância nos estudos de determinação de zonas de proteção. Por outro lado, no momento em que cargas contaminantes alcançam a zona saturada a proteção é mínima, sendo que nesta região do aquífero se dá a migração da contaminação em direção à captação. Assim, deve-se ter em mente que os estudos visando à proteção dos aquíferos e das captações devem considerar aspectos das zonas não saturada e saturada dos aquíferos.

Neste capítulo, será feita inicialmente uma abordagem dos conceitos básicos sobre o tema e posteriormente uma análise sobre os critérios que serão considerados nesta pesquisa.

4.1. Conceitos

Zonas de Proteção

Conforme já mencionado, as zonas de proteção de captação consistem em áreas adjacentes a poços ou nascentes, cujo objetivo é restringir a ocupação e os tipos de uso do solo. Trata-se de uma medida preventiva para minimizar os riscos de contaminação e, as quais podem ser divididas em três zonas. A zona de influência é mais próxima à fonte e está associada à área do cone de depressão (rebaixamento da superfície potenciométrica) para poços em bombeamento e à área equivalente a um dreno para nascentes naturais. Nesta área, as restrições de uso são extremas. A zona de transporte pode ser chamada também de zona de captura, é determinada de acordo com o tempo de trânsito que um contaminante leva para chegar até o ponto de captação, sendo geralmente

aplicado o prazo de 50 dias, que corresponde ao tempo de proteção microbiológica para erradicação a maioria dos vírus e bactérias patogênicos. Nesta zona, as restrições de uso comumente são elevadas. A zona de contribuição é a mais externa, corresponde a região entre a área de recarga e o ponto de captação, dependendo do fluxo subterrâneo, das características hidráulicas do meio aquífero e dos gradientes hidráulicos. As restrições de uso são moderadas.

Lei de Darcy

Em meios isotrópicos, o princípio das condições de fluxo subterrâneo obedece a Lei de Darcy, definida em 1856 pelo engenheiro hidráulico Henry Darcy, por meio de um experimento do comportamento do escoamento de água em filtros de areia (Figura 4.1).

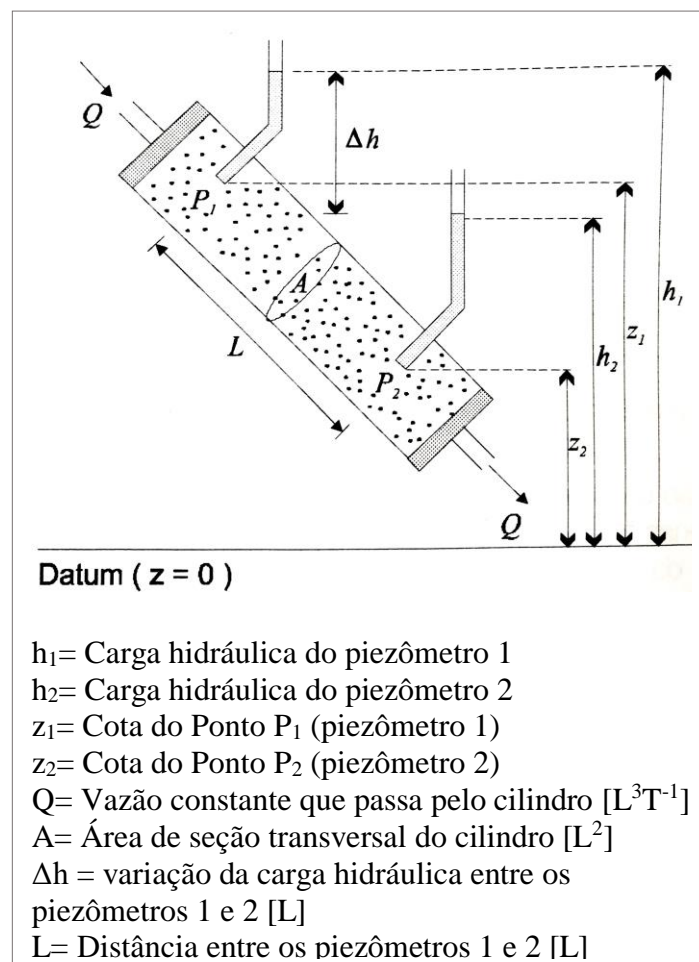


Figura 4.1. Esboço esquemático de dispositivo utilizado por Darcy. Fonte: (Feitosa & Manoel Filho, 2000).

A Equação da lei de Darcy, pode ser escrita conforme a Equação (4.1).

$$Q = \frac{KA(h_1-h_2)}{L} \quad (4.1)$$

Onde:

K = Coeficiente de proporcionalidade, denominado de condutividade hidráulica [L/T], que depende das características do meio poroso e das propriedades do fluido. A diferença de cargas hidráulicas ($h_1 - h_2$) é dividida pelo comprimento.

A velocidade de Darcy, que pode ser chamada de velocidade aparente ou descarga específica pode ser definida como a vazão (Q) por unidade de área (A) (Equação 4.2).

$$q = \frac{Q}{A} \quad (4.2)$$

Trata-se de uma velocidade aparente, não a velocidade real do fluxo, uma vez que a área (A) representa a área total (vazios e parte sólida). Assim, para se determinar a velocidade verdadeira é preciso considerar a área correspondente aos poros, sendo obtida por meio da porosidade efetiva (ne) de um dado material. Dessa forma, a velocidade real de escoamento pelos poros pode ser calculada conforme a Equação (4.3).

$$v = \frac{Q}{ne A} \quad (4.3)$$

Grupos de Aquíferos

Em meios isotrópicos, no caso de aquíferos intergranulares, os padrões de fluxo subterrâneo obedecem a Lei de Darcy, entretanto em meios anisotrópicos, como em aquíferos fissurais e cársticos, onde a água é armazenada em espaços entre fraturas, juntas ou aberturas de dissolução, o entendimento do fluxo subterrâneo é bem mais complexo, dificultando uma abordagem matemática, devido principalmente a heterogeneidade do meio e sua consequente imprevisibilidade.

Hirata (1994), especifica as diferenças básicas hidráulicas em aquíferos fraturados e porosos quanto à aplicação de áreas de proteção, conforme Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Diferenças hidráulicas entre aquífero fraturado e poroso. Fonte: Modificado de Hirata (1994).

Características do Aquífero	Meio Poroso	Meio Fraturado
Porosidade	Porosidade primária	Porosidade secundária
Tipo de fluxo	Vagaroso, laminar	De laminar turbulento
Velocidade de fluxo	Tendência de ser mais lenta	Tendência de ser mais rápida (função do gradiente)
Isotropia	Mais isotrópico	Menos isotrópico
Homogeneidade	Mais homogêneo	Menos homogêneo

Os aquíferos podem ser distinguidos em função de suas diversas características, sendo definidos como:

Aquífero intergranular - também denominado de sedimentar, clástico ou poroso, está associado às rochas sedimentares consolidadas. Neste meio, a água fica armazenada no espaço entre os grãos, assim, a condutividade hidráulica vai depender principalmente da textura dos materiais que compõe a rocha, da diagênese, do grau de selecionamento e orientação do material de arcabouço. Além dos arenitos e conglomerados, nesta classe, também podem incluir os aquíferos inconsolidados, representados por cobertura de solos, aluviões ou dunas.

Aquífero fraturado - são também denominados de cristalinos, estão associados às rochas ígneas e metamórficas, onde há ausência ou restrição de espaços intergranulares. Portanto, neste meio, a água fica armazenada nos espaços associados a fissuras, fraturas, juntas e falhas, cuja condutividade hidráulica vai ser controlada pela densidade, abertura, interconexão e tamanho desses espaços.

Aquífero Cárstico - são representados pela ocorrência de rochas carbonáticas, como calcário, dolomitos, margas e mármore. A água fica armazenada nos espaços formados pela dissolução dessas rochas, como cavernas, canais e dolinas. Podem ser fissuro-cársticos, quando o movimento da água ocorre também em meio fraturado.

4.2. Critérios

O comportamento hidráulico no meio subterrâneo dependerá das propriedades físicas da rocha, do fluido e de fatores externos antrópicos ou naturais. Assim, para cada ambiente

hidrogeológico é necessário que seja dado um tratamento diferente quanto a definição de áreas de proteção. Os principais critérios que interferem nos padrões de fluxo subterrâneo são descritos a seguir.

4.2.1. Direção de Fluxo

Existem algumas maneiras de definir ou prever a direção de fluxo subterrâneo, uma delas é através da delimitação da bacia hidrográfica que corresponde “a área de captação natural da água da precipitação que faz convergir os escoamentos para um único ponto de saída, seu exutório” (Tucci, 1993). É também a unidade territorial de implementação do gerenciamento de recursos hídricos, de acordo com a Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. A delimitação da bacia ou sub-bacia hidrográfica é tratada como um procedimento muito comum nas análises hidrológicas e ambientais. Dessa forma, sua delimitação pode ser o primeiro parâmetro a ser verificado na elaboração de uma área de proteção, pois o limite correspondente a bacia irá influenciar na caracterização das direções do fluxo subterrâneo e também as áreas de recarga potenciais, que corresponde ao principal local a ser protegido.

Do ponto de vista técnico mais rigoroso, seria mais adequado considerar a bacia hidrogeológica ao invés da bacia hidrográfica (Arraes, 2008). Entretanto, a complexidade de sua determinação dificultaria a aplicação nos estudos de delimitação de áreas de proteção. Assim, considera-se a bacia hidrográfica como limite inicial para a determinação das zonas de proteção.

De acordo com Tóth (1963), podem ocorrer três diferentes sistemas de fluxo em uma bacia hidrográfica: local, intermediário e regional. O sistema de fluxo subterrâneo local tem sua área de recarga em um alto topográfico e sua área de descarga em um baixo topográfico. No sistema intermediário, pode haver um ou mais altos e baixos topográficos dentro da bacia, apresentando nela sistemas locais. No fluxo regional, a área de recarga ocupa o limite divisor da bacia e a área de descarga fica no seu baixo topográfico (Figura 4.2).

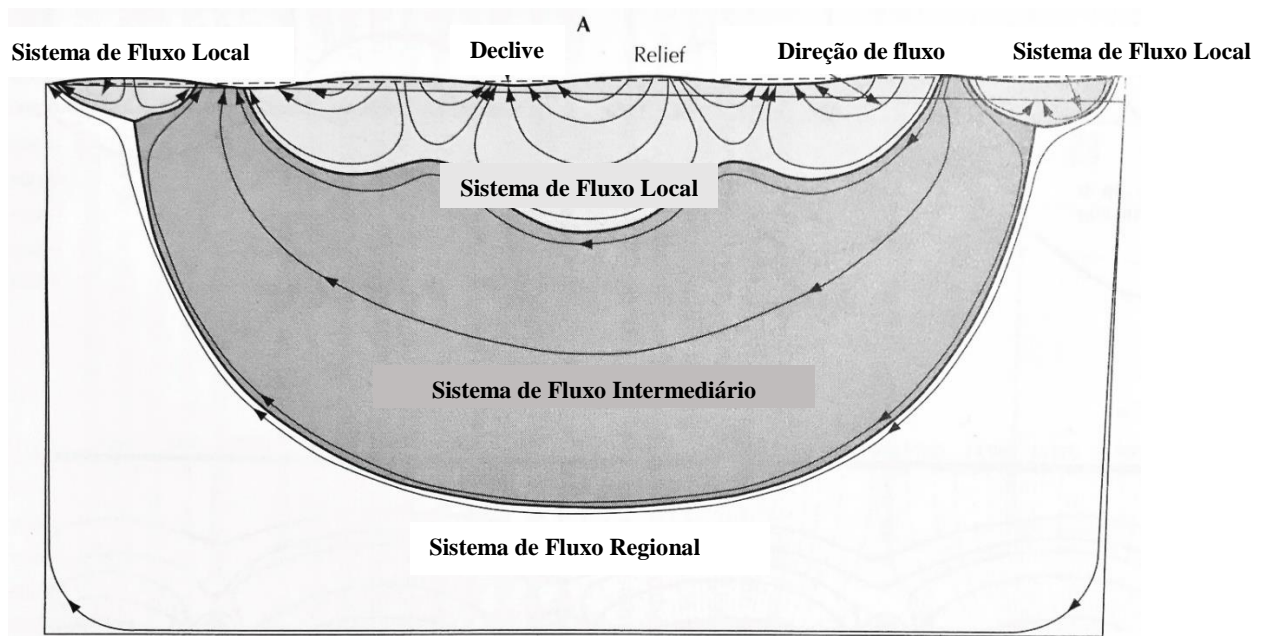


Figura 4.2. Sistemas de fluxo hidrogeológico local, intermediário e regional. (Fonte: Tóth, 1963 apud Fetter, 2000).

Segundo Freeze & Cherry (1979), o controle primário de caracterização do fluxo subterrâneo em poços é a topografia e a geometria da bacia. A importância do controle topográfico é refletida no grande número de poços em vales marcados por esforços tectônicos. De acordo com Meyboom (1966) & Toth (1966) apud Freeze & Chery (1979), dos indicadores de mapeamento de áreas de recarga e descarga, a topografia é o indicador mais simples, onde se assume que as áreas de descarga são topograficamente mais baixas enquanto as áreas de recarga são topograficamente mais altas.

De acordo com Fetter (2000), alguns estudos de campo conduzidos em regiões úmidas, mostraram que o nível freático em aquíferos livres geralmente apresentam a mesma configuração dos níveis topográficos vistos em superfície, uma vez que a recarga ocorrendo em áreas topográficas elevadas apresenta uma energia potencial maior que em regiões topograficamente mais baixas. Evidente que isso não é uma regra, visto que o fluxo subterrâneo depende das forças da gravidade e da pressão. A diferença de carga hidráulica entre dois pontos, por exemplo, pode causar um fluxo ascendente. Entretanto, como a topografia controla o processo de fluxo em aquíferos livres, é possível assumir este entendimento como base inicial para delimitação de uma área de proteção.

De maneira simplificada, o sistema de fluxo subterrâneo e o mapeamento das áreas de recarga e descarga podem ser facilmente definidos a partir de informações topográficas da bacia. O limite da bacia hidrográfica pode ser obtido a partir de um mapa planialtimétrico ou utilizado imagem orbital do sistema SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) (Farr & Kobrick, 2000).

Conforme mencionado, a definição da bacia hidrogeológica seria o procedimento mais recomendado, porém ela não é tão facilmente demarcada como a bacia hidrográfica. Isso acontece por fatores como: impossibilidade de observação na superfície do terreno; pode haver variação dos sistemas de fluxo subterrâneo; os divisores hidrogeológicos podem mudar devido às condições de sobre-exploração do aquífero; o nível freático muitas vezes não acompanha a superfície do terreno e pode haver assimetria entre os limites hidrográfico e hidrogeológico (Winter *et al.*, 2003 *apud* Arraes, 2008).

4.2.2. Declividade

A declividade consiste na inclinação da superfície do solo em relação a um plano horizontal. É um dos parâmetros que vai influenciar nos níveis de escoamento superficial e subsuperficial da água da chuva e, deste modo, na disponibilidade de água que infiltra no solo. Alguns trabalhos evidenciam a relação entre a declividade e o escoamento superficial (Cerdeira, 1995; Johnson & Loaiciga, 2017). Essa infiltração, é responsável pela entrada da água precipitada, que quando em quantidade suficiente, poderá ser transportada até a zona saturada do aquífero junto com possíveis contaminantes.

Em terrenos com padrão de relevo plano ou suave ondulado, por exemplo, a água vai infiltrar com mais facilidade, pois a taxa de escoamento superficial é baixa. No caso de terrenos mais inclinados, há uma menor resistência ao escoamento, fazendo com que a infiltração seja restrita. Morbidelli, *et al.* (2015), por meio de um experimento, concluiu que uma maior interferência entre a declividade e escoamento superficial começa a ocorrer em inclinações entre 5° e 10°. Neste mesmo intervalo, quanto mais se aumenta a inclinação, maior é o fluxo superficial e menor é o fluxo em profundidade. Assim, quanto maior a declividade, menor é a possibilidade de contaminação dentro da área de recarga.

A análise da declividade de um terreno deve ser feita a partir da elaboração de mapa de declividade utilizando um Modelo Digital de Terreno (MDT), que pode ser expresso em porcentagem ou grau de inclinação.

4.2.3. Parâmetros hidrodinâmicos: porosidade, permeabilidade e condutividade

Hidráulica

A porosidade é definida como os espaços vazios entre os materiais que compõe o aquífero, ou seja, é a razão entre o volume de espaços vazios e o volume total, que geralmente é representado em porcentagem. Este espaço pode estar entre os grãos (porosidade primária) ou nas fraturas e/ou

aberturas de dissolução (porosidade secundária). A permeabilidade consiste na facilidade em que a água se movimentada nos espaços vazios e no tamanho das aberturas através do qual os fluidos se movem. Uma rocha pode ser bastante porosa, mas se os espaços entre os poros não estiverem conectados ou forem muito pequenos, impedindo o fluxo de água, ela não é permeável. Um sedimento argiloso geralmente é bastante poroso, porém seus poros são tão pequenos que impedem que a água se movimente, ficando presa por forças capilares. A condutividade hidráulica pode ser considerada como o potencial de fluxo através do meio subterrâneo. É uma constante de proporcionalidade da Lei de Darcy para ambientes homogêneos e isotrópicos, representada pelo símbolo K e expressa em unidade de comprimento por unidade tempo, como por exemplo, m/s ou mm/dia (Fetter, 2000; Feitosa & Manoel Filho, 2000).

O parâmetro intermediário entre porosidade e condutividade hidráulica é a porosidade efetiva, que também é expressa em porcentagem e considera apenas os poros que estão efetivamente livres, e exclui os espaços onde a água não flui livremente, portanto, consiste na razão entre o volume de vazios interconectados ou efetivos e o volume total do solo (Bear & Verrujit, 1990). O parâmetro equivalente a porosidade efetiva para aplicação em sistemas aquíferos fraturados é o Índice de Fraturamento Interconectado, proposto por Campos & Freitas-Silva (1998), cujos valores de índices de fraturas interconectadas são definidos com base na comparação com rochas similares que sofreram processo tectônico similar, por medidas de aberturas de fraturas em afloramentos, pelo comportamento reológico dos diferentes materiais que compõem as rochas e a partir das vazões médias de cada aquífero.

Todos esses parâmetros vão variar em função de diversos fatores, como forma, arranjo e tamanho do grão em meios porosos. Em meios fraturados e/ou cársticos vão variar de acordo com a interconexão, densidade e tamanho das fraturas ou aberturas de dissolução.

Na definição de áreas de proteção, é importante a utilização de dados de maior confiabilidade e acessibilidade na área de estudo.

Em meio poroso e fraturado, Davis (1969) *apud* Freeze & Cherry (1979), propõe valores de porosidade, para diferentes materiais geológicos (Tabela 4.2). No entanto, o grau de permeabilidade das rochas pode mudar muito em função do seu estado de fissuração, com variações horizontais e verticais, devido à presença de níveis rochosos fraturados e carstificados em diferentes alturas estratigráficas que se cruzam de várias maneiras (Cherubini, 2008).

Tabela 4.2. Variação dos valores de porosidade (n) de acordo com o material geológico. Fonte: Davis (1969) apud Freeze & Cherry (1979).

Depósitos inconsolidados	n (%)
Cascalho	25-40
Areia	25-50
Silte	35-50
Argila	40-70
Rochas	n (%)
Basalto fraturado	5-50
Calcário carstificado	5-50
Arenito	5-30
Calcário, dolomito	0-20
Xisto	0-10
Rocha cristalina fraturada	0-10
Rocha cristalina compacta	0-5

4.2.4. Solo

O conhecimento sobre as propriedades do solo tem grande importância na elaboração de mapas de vulnerabilidade e áreas de proteção de captação, pois corresponde ao próprio aquífero, no caso de poços rasos e também pode representar a primeira barreira de proteção para poços profundos. Suas características serão importantes para a determinação da quantidade da água precipitada na área de recarga que é capaz de infiltrar e chegar até a zona saturada e como consequência levar algum contaminante durante seu transporte. O potencial de poluição do solo geralmente é afetado pelo tipo de argila e argilomineral (se expansível ou não), pelo tamanho e forma do grão e pela quantidade de matéria orgânica presente (Aller *et al.*, 1987). Características como permeabilidade e profundidade do solo devem ser analisadas em conjunto. Os valores de condutividade hidráulica referente aos principais materiais presentes no solo podem ser visualizados na Tabela 4.3. Para o caso de sistema em climas tropicais, a estruturação dos solos é um fator muito importante, embora, em geral não se seja considerado nos estudos de vulnerabilidade. A estruturação pode ampliar a condutividade hidráulica de solos com textura argilosa a muito argilosa e alguns tipos de estruturas podem conter contaminantes químicos por adsorção na micro porosidade interna aos agregados.

Tabela 4.3. Variação de valores de permeabilidade e condutividade hidráulica em sedimentos inconsolidados.
 Fonte: Freeze & Cherry (1979).

Material	Permeabilidade	Condutividade
	Intrinseca (darcys)	hidráulica (m/s)
Argila	$10^{-6} - 10^{-3}$	$10^{-12} - 10^{-8}$
Silte, silte arenoso, areia argilosa	$10^{-3} - 10^{-1}$	$10^{-8} - 10^{-6}$
Areia siltosa, areia fina	$10^{-2} - 1$	$10^{-7} - 10^{-5}$
Areia bem selecionada	$1 - 10^2$	$10^{-5} - 10^{-3}$
Cascalho bem selecionado	$10 - 10^3$	$10^{-4} - 10^{-2}$

4.2.5. Nível Freático

Os aquíferos são divididos em dois segmentos, que inclui a zona vadosa (mais rasa), que é a porção onde os espaços vazios do material são preenchidos por água e ar e a zona saturada (mais profunda), que está localizada abaixo da zona vadosa e possui todos os seus espaços preenchidos por água. Assim, na zona vadosa a função de filtro é desempenhada, enquanto que na zona saturada a função armazenadora é a mais importante (ADASA, 2007). O conceito de nível freático pode ser entendido como a superfície abaixo do nível do solo onde todos os espaços dos poros são preenchidos por água, no caso de aquíferos livres. Sua altura pode ser permanente ou variar sazonalmente. Informação sobre a profundidade até o nível freático (aquíferos livres) ou a profundidade do primeiro nível principal de água subterrânea (aquíferos confinados) dentro da bacia hidrográfica é essencial para a geração de mapas de vulnerabilidade e na elaboração de áreas de proteção, pois esse parâmetro vai influenciar no tempo que o material contaminante leva para alcançar a zona saturada do aquífero. Assim, quanto mais profundo o nível freático dos poços, menos suscetíveis estão à contaminação a partir da superfície do terreno. Para definição de áreas de proteção, pode-se trabalhar com o conceito de nível estático, que consiste no nível da água no poço quando este não está sendo bombeado. Os dados sobre nível estático geralmente são pontuais e mais facilmente obtidos a partir de poços de monitoração ou de captação e podem variar bastante em função do ambiente geológico. Desse modo, é importante que seja feita uma espacialização desses dados para geração de mapas de vulnerabilidade e, posteriormente de áreas de proteção. Quando existe um conhecimento pedológico mais detalhado dentro da área de estudo, as informações sobre nível freático podem ser estimadas em função do tipo de solo.

4.2.6. Geologia

O conhecimento sobre a natureza da matriz da rocha desempenha um papel importante no movimento da água e dos contaminantes através dos espaços presentes na rocha e nos sedimentos. Informações sobre a permeabilidade primária e secundária dos materiais serão imprescindíveis para determinação do potencial de contaminação da água subterrânea. As rochas sedimentares, por exemplo, em regra, irão apresentar maior condutividade hidráulica, enquanto as rochas ígneas e metamórficas irão apresentar condutividade hidráulica ligada a estruturas secundárias. Uma breve análise sobre as propriedades dos principais materiais geológicos é apresentada a seguir.

Sedimentos Inconsolidados

Na classe de sedimentos inconsolidados, os mais importantes são os depósitos aluviais, eólicos e os coluviões. Esses depósitos apresentam algumas vantagens em relação ao seu aproveitamento. Por serem pouco consolidados, tendem a exibir elevada porosidade e permeabilidade, são pouco profundos, são fáceis de perfurar e estão em locais favoráveis à recarga (Feitosa & Manoel Filho, 2000).

Os aluviões são depósitos fluviais formado por processos físicos em drenagens e planícies de inundação. São compostos por partículas de cascalho, areia, silte e argila. Devido ao descolamento das drenagens, às variações na velocidade deposicional e à variabilidade de textura, os aluviões apresentam propriedades hidráulicas na maior parte das vezes heterogêneas, por isso, sua permeabilidade pode variar bastante (Freeze & Cherry, 1979).

Os depósitos eólicos são formados pelo processo de transporte de materiais pela ação do vento. Podem apresentar em sua composição areia ou silte. No caso de depósitos inconsolidados de areia, estes são caracterizados pela ausência de silte e argila e por possuírem grãos de tamanho médio e forma arredondada, por isso apresentam condutividade hidráulica elevada. Comparado aos aluviões, os depósitos eólicos são mais uniformes, podendo ser caracterizados como homogêneos e isotrópicos.

Os coluviões consistem em depósitos formados a partir de processos erosivos, no pé de encostas de morros e elevações. Sua composição depende, portanto, do tipo de rocha presente nas áreas mais elevadas. Geralmente são homogêneos, com espessura variável, sendo maiores no sopé das elevações e diminuindo progressivamente quando se afasta das elevações.

Rochas Sedimentares

Arenito: os arenitos podem apresentar elevada porosidade e permeabilidade, formando aquíferos regionais com grande quantidade de água potável, porém podem ter baixa porosidade em função da compactação e da cimentação de materiais entre os grãos, como sílica, calcita e argilas. De acordo com Freeze & Cherry (1979), testes de permeabilidade em amostras de arenito indicam que localmente a condutividade hidráulica pode apresentar variações da ordem de 10 a 100 vezes. Estudos realizados mostraram também que a porosidade dos arenitos diminui sistematicamente com a profundidade. Destaca-se que as formações areníticas podem se originar de ambientes fluviais, eólicos, deltaicos e marinhos. O conhecimento sobre a origem e os ambientes deposicionais dos arenitos é importante na análise da distribuição da permeabilidade (Freeze & Cherry, 1979). Estudos sobre evolução diagenética a que os arenitos foram submetidos são igualmente importantes.

Calcário: as rochas carbonáticas (calcário, dolomito, marga, mármore) são rochas caracterizadas por apresentar um tipo especial de porosidade secundária, formada pela presença de fraturas ou planos de acamamento, na qual a água circula entre essas estruturas e dissolve a calcita e a dolomita presentes, produzindo vazios no subsolo. A condutividade hidráulica nos dolomitos e calcários não alterados é baixa, com valores geralmente menores que 10^{-7} m/s, porém quando estão fraturados podem apresentar valores elevados, facilitando a percolação de fluidos e formando grandes vazios subterrâneos, como grandes cavernas.

Rochas Ígneas e Metamórficas

No geral, as rochas cristalinas, com exceção as rochas vulcânicas, quando não estão alteradas ou fraturadas apresentam porosidade primária muito baixa, raramente é maior que 2%. Os espaços intercristalinos não são interconectados, fazendo com que sua permeabilidade também seja extremamente baixa (Freeze & Cherry, 1979). Entretanto, quando fraturadas, podem apresentar porosidade secundária muito elevada. As rochas cristalinas se caracterizam pela forte heterogeneidade e anisotropia, com parâmetros hidrodinâmicos variáveis, por isso é importante a análise do grau de fraturamento a fim de se identificar as áreas que estão mais vulneráveis à contaminação de poluentes.

Metassedimentos: análises de amostras de metassedimentos (quartzito, micaxisto, filito e metagrauvaca) preservados e pouco fraturados indicaram valores de permeabilidade primária muito baixos, entre 10^{-11} e 10^{-13} m/s (Stuart *et al.*, 1954 *apud* Freeze & Cherry, 1979). Nessas

rochas, os espaços intercrystalinos são mínimos, além de não serem interconectados. Assim, o grau de fraturamento será determinante na análise da permeabilidade.

Xisto: o xisto constitui a rocha mais comum na formação de aquífero, apresentando porosidade primária baixa, na maior parte dos casos menor que 2%. Testes realizados mostram que os valores de condutividades hidráulica são raramente maiores que 10^{-9} m/s e estão mais comumente entre 10^{-12} e 10^{-10} m/s (Peterson, 1954; Young *et al.*, 1964; Davis, 1969; Moran *et al.*, 1976 *apud* Freeze & Cherry, 1979). Os xistos podem apresentar porosidade secundária quando estão fraturados.

Granito/gnaiss: análises de amostras de sondagem realizadas em granitos não fraturados, apresentaram valores de permeabilidade na ordem de 10^{-11} m/s, indicando que essas rochas, quando não fraturadas são impermeáveis no que diz respeito a questões relacionadas ao aproveitamento da água subterrânea. Assim, a análise da permeabilidade vai depender do seu grau de fraturamento.

Basalto: em hidrogeologia, as rochas vulcânicas se diferem das demais rochas cristalinas, pois apresentam características que lhe conferem porosidade e permeabilidade primárias originadas do rápido resfriamento do magma e do escape de gases, que causam juntas de resfriamento, vesículas, condutos de gases e espaços porosos, como bolhas (Freeze & Cherry, 1979). Em larga escala, a permeabilidade dos basaltos é bastante anisotrópica e quando essas rochas contêm vesículas e fraturas sua permeabilidade pode ser elevada, dependendo também do grau de preenchimento das estruturas. Quando são densos e não fraturados geralmente apresentam baixa permeabilidade, podendo atuar até como aquíferos regionais.

4.2.7. Lineamentos

No domínio de aquíferos fraturados (cristalino), onde predominam rochas ígneas e metamórficas, a presença de espaços intergranulares é muito reduzida ou inexistente. Assim, nesse domínio, a água flui e/ou fica armazenada nos espaços entre fraturas, falhas, juntas e aberturas de dissolução. Dessa forma, o tempo e a rota que a água vai fazer da área de recarga até o poço ou nascente vai depender fortemente do grau de fraturamento.

Nas últimas décadas, a quantidade de pesquisas sobre transporte e fluxo subterrâneo em meios porosos foi bem superior se comparado aos meios fraturados, principalmente em função de sua complexidade. O estudo detalhado das discontinuidades das rochas pode ser muito difícil devido à presença de características muito específicas, como, por exemplo, no caso de aquífero cárstico-fissural onde as zonas de abertura são extensas e irregulares ou em rochas provenientes de derrames vulcânicos, onde existem feições muito particulares. Porém, a maioria dos sistemas

de rocha fraturada consistem em blocos delimitados por descontinuidades como fraturas, juntas e zonas de cisalhamento. Essas fraturas podem estar abertas, mineralizadas e/ou deformadas. Os principais fatores que afetam o fluxo de água subterrânea através da rocha fraturada são: densidade de fratura, orientação, interconexão, abertura e comprimento (Witherspoon, *et al.* 1987).

A análise sobre o nível de fraturamento das rochas pode ser feito em diferentes escalas de trabalho, como em campo, em poços ou por sensoriamento remoto, porém, muitas vezes, a coleta de informações detalhadas sobre o grau de fraturamento não são tecnicamente ou economicamente viáveis quando se deseja elaborar áreas de proteção à contaminação. Assim, a análise de feições lineares do terreno utilizando imagens de sensoriamento remoto, considerando o número, tamanho, densidade, interconexão e orientação dos lineamentos por unidade de área pode ser a ferramenta mais adequada para esta finalidade. A presença de lineamentos, sobretudo os mais extensos, irão limitar o tamanho e a forma da área de proteção.

4.2.8. Recarga

A recarga consiste na parcela de água proveniente de fontes externas ao reservatório e que infiltra no meio alcançando a zona saturada do aquífero. Quando natural, é representada por água das chuvas, sendo denominada de recarga direta, podendo ser também originada de corpos de água superficiais, como rio e lagos, ou drenagem subterrâneas. Alterações antrópicas nas áreas de recarga, como impermeabilização do solo e desmatamento afetam esse processo de recarga natural. A recarga pode ocorrer também de forma artificial, por meio de influência antrópica.

Um aspecto importante quanto à prevenção da poluição da água subterrânea é identificação das áreas de recarga dos aquíferos (Fetter, 2000). Assim, os limites da área de recarga correspondem ao local que deve ser protegido, principalmente quando o solo apresentar características mais susceptíveis à contaminação. O parâmetro recarga limita o tamanho de uma área de proteção ou pode definir um novo formato em função das condições de contorno. A zona de contribuição (ZC) objetiva a proteção de contaminantes mais persistentes, que pode representar, como exemplo em outros países, toda área de recarga que é direcionada ao poço de captação (Hirata, 1994).

4.2.9. Aquífero Confinado

Devido à presença de camadas de baixa condutividade hidráulica (aquitardes), os aquíferos confinados são menos vulneráveis. A área de recarga pode estar a milhares de metros, dificultando possíveis contaminações. Há situações em que existem falhas, fraturas, camadas permeáveis de

areia e poços tubulares abandonados na camada confinante e que permitem o fluxo preferencial. Pode ocorrer também em função do rebaixamento de níveis devido ao bombeamento de poços, a reversão do fluxo das águas subterrâneas (Hirata, 1994), ou em alguns casos os aquíferos confinados. Para elaboração de áreas de proteção, é importante o conhecimento do grau de confinamento, podendo ser de difícil definição.

4.3. Fontes de Contaminação

Na natureza, os padrões de fluxo da água subterrânea estão se ajustando continuamente às mudanças naturais e principalmente humanas no ambiente hidrológico. A introdução de um novo poço em um aquífero, por exemplo, pode causar mudanças temporais na taxa e direção do fluxo de água subterrânea na vizinhança do poço que requerem apenas alguns meses ou anos para se aproximar de um novo estado estacionário (USGS, 1998). Assim, além dos parâmetros naturais que influenciam o fluxo da água no meio subterrâneo, é importante que, quando possível, seja feita uma análise sobre as interferências humanas que possam contribuir para possíveis alterações no fluxo subterrâneo e as fontes de contaminação e cargas contaminantes que as atividades humanas tendem a gerar.

Portanto, é importante e necessário o conhecimento das cargas contaminantes, pois elas estão relacionadas com o grau de toxicidade. As fontes de contaminação podem ser difusas, nesses casos não são geradas plumas de contaminação claramente definidas, mas normalmente afetam uma área extensa do aquífero, um exemplo são áreas residenciais urbanas sem rede de esgoto. As fontes de contaminação podem ser também pontuais, que geralmente produzem plumas de contaminação bem definidas e mais concentradas, o que facilita sua identificação, como exemplos podem ser citadas as atividades industriais e os postos de combustível. Quando as atividades poluentes de origem pontual são pequenas e múltiplas, acabam representando, no final, uma fonte difusa no que diz respeito à identificação e ao controle (Foster *et al.*, 2006).

Para a delimitação de áreas de proteção, é importante que seja feita uma análise sobre as principais fontes de contaminação da região para a definição das restrições de uso, que vai depender do tipo de contaminante e dos impactos causados pelas atividades humanas. Em 1984, o escritório de avaliação tecnológica dos Estados Unidos (OTA), listou algumas de fontes de contaminação de água subterrânea (Fetter, 2008), conforme se segue:

- ✓ Fossas e tanques sépticos: descarga de água residual doméstica no subsolo acima do nível freático;

- ✓ Poços de injeção: consiste na descarga de águas residuais ou outros líquidos no subsolo por meio de poços de injeção profundos;
- ✓ Aplicação na terra (despejo de resíduos): água residual tratada ou não tratada que é usada para irrigação ou lamas de estações de tratamento de águas residuais que são usadas no solo como fertilizante;
- ✓ Aterros;
- ✓ Despejo aberto;
- ✓ Despejo residencial;
- ✓ Represamento em superfície;
- ✓ Resíduos de mineração;
- ✓ Estoque de materiais;
- ✓ Cemitérios;
- ✓ Enterro de animais;
- ✓ Tanques de armazenamento acima do solo;
- ✓ Tanques de armazenamento subterrâneo;
- ✓ Contentores;
- ✓ Locais abertos de incineração e detonação;
- ✓ Locais de eliminação de resíduos radioativos;
- ✓ Tubulações;
- ✓ Transporte e transferência de material;
- ✓ Irrigação;
- ✓ Aplicação de pesticida;
- ✓ Aplicação de fertilizante;
- ✓ Efluentes de animais de criação;
- ✓ Aplicação de sal para desidratação de estradas (evitar congelamento);
- ✓ Amaciadores de água doméstica;
- ✓ Escoamento urbano;
- ✓ Percolação de poluentes atmosféricos;
- ✓ Drenagem de mina;
- ✓ Poços de produção construídos sem respeitar as normas;
- ✓ Poços de monitoramento e perfurações de exploração mineral ou de projetos de construção;
- ✓ Interação entre água subterrânea e superficial;
- ✓ Lixiviação natural e
- ✓ Intrusão salina.

CAPÍTULO 5. PROPOSTA METODOLÓGICA PARA DELIMITAÇÃO DE PERÍMETRO DE PROTEÇÃO DE CAPTAÇÃO

O objetivo principal deste trabalho é a proposição de uma metodologia para delimitação de perímetro de proteção de poços ou nascentes. A partir do entendimento dos parâmetros que auxiliam na sua determinação, que foram abordados no capítulo 4, foi possível desenvolver uma proposta que compreende os principais critérios técnicos dos sistemas aquíferos explorados e que ao mesmo tempo seja aplicada por meio de procedimentos simples e de forma eficaz. Além disso, a pesquisa sobre alguns métodos já existentes e sobre as leis e aplicação das áreas de proteção no Brasil e em outros países (Capítulo 2) auxiliou no delineamento deste objetivo. Cabe ressaltar que a fixação de uma área de proteção destinada à exploração de água mineral deve levar em consideração aspectos econômicos, sociais e ambientais, uma vez que é um procedimento que restringe o uso do solo por vezes em áreas economicamente importantes. Por isso, é aceitável que as áreas não sejam tão extensas e nem muito reduzidas, mas que tenham um rigor suficiente para assegurar a qualidade das águas minerais para consumo humano. Em regiões mais populosas, pode acontecer da área onde se pretende fazer a captação já estar inserida dentro de uma zona urbanizada ou com outro tipo de uso. Nesses casos, não é possível proibir uma ocupação já existente. Portanto, é importante uma análise sobre a viabilidade da construção de poços em áreas já ocupadas e das fontes de contaminação e os riscos envolvidos, visto que não é razoável localizar captações onde existem intensas pressões sobre o uso do solo.

Diante do exposto e a partir das informações adquiridas durante a pesquisa, foi desenvolvida uma proposta abrangente e com processos detalhados. A nova metodologia foi elaborada mais especificamente para a zona de contribuição (ZC), que consiste em toda área de recarga associada ao ponto de captação, correspondendo à zona mais ampla e complexa. Para as zonas de influência e de transporte (ZI e ZT), foram sugeridas propostas para o seu desenvolvimento, além de outros já existentes. A metodologia proposta neste trabalho está mais focada na proteção de aquíferos livres, visto que são os que exigem maiores precauções em termos de contaminação, porém pode ser aplicada e adaptada para diferentes graus de confinamento. Portanto, este capítulo aborda as etapas de elaboração das áreas de proteção para cada zona. No capítulo seguinte, a metodologia será aplicada em três áreas no Distrito Federal.

5.1. Zona de Influência

O perímetro mais próximo da captação é denominado de zona de influência, que consiste em toda área do rebaixamento da superfície potenciométrica do poço quando ele está sendo bombeado. No caso de uma fonte ou nascente natural é importante observar a flutuação dos níveis freáticos nas proximidades do ponto de exudação da água. Nessa zona são permitidas apenas atividades inerentes à captação, devendo ser proibidas quaisquer edificações e severas restrições de atividades agrícolas ou usos potencialmente poluidores precisam ser vedados. Essa zona não deve ser confundida com a casa de proteção sanitária, cuja recomendação é que seja feita dentro em um raio mínimo de 10 metros, que neste caso deve ser cercada para impedir o acesso de pessoas não autorizadas e animais.

A delimitação dessa área consiste em calcular a influência do efeito do bombeamento em um poço, que quando se torna nula, corresponde à distância limite do cone de rebaixamento. Em aquíferos mais homogêneos e isotrópicos, o rebaixamento é na forma de um funil e o fluxo é praticamente o mesmo em todas as direções, podendo ser calculado por meio de equações matemáticas. Portanto, para o cálculo da zona de influência, alguns métodos são sugeridos, dependendo do tipo de aquífero:

- ✓ Aquífero livre: método de Neuman (1972);
- ✓ Aquífero confinado: método de Theis (1935) e
- ✓ Aquífero semiconfinado: método de Walton (1970).

É importante destacar que o limite do cone de rebaixamento em aquíferos heterogêneos e anisotrópicos, como nos aquíferos fraturados, pode ser muito variável em função das características que favorecem e/ou direcionam o fluxo, por isso, as equações matemáticas podem se tornar falhas, além de exigirem diversos dados hidrodinâmicos. Dependendo das características hidrodinâmicas do aquífero, os cones de rebaixamento são muito extensos e rasos, gerando zonas de influência em escala quilométrica, que podem se estender além dos limites de posse da área. Por se tratar de uma zona com total restrição de uso, não é funcional e realista, em algumas situações, levar em consideração todo o cone de rebaixamento, já que não é viável restringir áreas com dezenas de quilômetros, principalmente quando o empreendedor não é proprietário do terreno.

A zona de influência é muito sensível, sobretudo se tratando de contaminação vertical. Por isso, a profundidade do nível estático é um parâmetro importante na definição dessa área, além das características da zona vadosa, que representa toda a porção do perfil solo onde o contaminante

tende a ser atenuado. Foi proposta de forma alternativa uma matriz de classificação da distância (d) mínima do limite da ZI até a captação de acordo com os parâmetros citados (Tabela 5.1), na qual se considera que quanto mais raso e maior a porosidade efetiva da zona vadosa, maior será a distância da captação. Os valores de raio propostos para a zona de influência foram baseados nas distâncias usualmente praticadas para esta zona. São distâncias também compatíveis com as praticadas internacionalmente, sendo, por vezes, maiores do que as aplicadas nos estudos de pesquisa mineral. A partir desta diretriz se considera que a zona de influência alcance os objetivos para os quais é proposta e também seja facilitada sua implantação de forma efetiva e não apenas como instrumento para cumprir as exigências do órgão de controle.

Tabela 5.1. Proposta de distâncias (raio) da captação para definição da zona de influência.

		Profundidade do nível estático			
		< 1m	1 – 5m	5 – 10m	>10m
Porosidade efetiva na zona vadosa	>12%	r = 70 m	r = 60 m	r = 50 m	r = 45 m
	6 – 12%	r = 60 m	r = 45 m	r = 40 m	r = 30 m
	<6%	r = 50 m	r = 40 m	r = 30 m	r = 20m

Para aquífero totalmente confinado, é sugerida uma distância mínima de 20 metros, enquanto que para aquífero semiconfinado, essa distância é definida em função do grau de confinamento, do nível estático e da zona vadosa.

Durante o teste de bombeamento o nível freático varia (compondo o nível dinâmico) e também varia sazonalmente ao longo do ano em função das variações climáticas, por isso, na análise para fins de proteção da fonte, considera-se sempre a situação mais crítica, ou seja, o valor de nível estático mais raso. Quando se tratar de nascente, podem ser realizadas sondagens manuais para caracterizar o nível estático ou considerar uma distância de 70 metros, visto que as nascentes exigem maior proteção.

5.2. Zona de Transporte

A zona de transporte consiste em uma zona intermediária entre a área de captação e a área de recarga e abrange a proteção contra patógenos. É determinada pelo tempo de trânsito que o contaminante leva para atingir um ponto de captação. Tanto a zona de transporte como a de

contribuição compreendem a proteção de contaminantes mais persistentes. Suas dimensões irão depender das características hidrogeológicas da área. As legislações aplicadas em outros países consideram diferentes tempos de trânsito para definição do limite dessa área (Capítulo 2). Como a determinação da zona de transporte depende do tempo de trânsito, sua definição pode ser feita a partir de equações matemáticas, que incluem dados sobre vazão, porosidade efetiva e espessura da zona saturada.

Os focos de bactérias, vírus e parasitas patogênicos possuem um tempo de sobrevivência na água subterrânea, que em geral é de 2 a 3 meses, porém foram observados períodos de até 5 anos em condições favoráveis (Romero, 1970 *apud* Matos, 2001). Geralmente, o tempo de trânsito para que os focos sejam eliminados costuma variar de 50 a 250 dias, sendo esses valores mais frequentemente usados como padrão (Frind *et al.*, 2002).

O cálculo do raio a partir de um determinado tempo (t) é feito utilizando a Equação (5.1).

$$r = FS \sqrt{\frac{Q.t}{\pi.n.e.b}} \quad (5.1)$$

Sendo:

r = Distância mínima (metros) a partir de um tempo t;

t = tempo de trânsito (dias) (sugestão de tempo de trânsito de pelo menos 100 dias)

Q = Taxa de bombeamento média anual (m³/dia);

π = 3,1416;

ne = Porosidade efetiva do aquífero e

b = Espessura da zona saturada (metros)

FS = Fator de segurança (que é de 1,3 quando todos os valores são conhecidos e de 1,5 quando um ou mais valores não são conhecidos).

O citado método é denominado de Raio Calculado Fixo (RCF) (Capítulo 2), que determina a distância circular para o contaminante chegar até a captação em um determinado tempo, possui simples aplicação e utiliza dados que são facilmente obtidos. Ele considera que não existem direções preferenciais de fluxo e admite que as linhas de fluxo convergem de forma homogênea na direção do poço. Assim, este método apresenta melhores resultados em meio poroso (homogêneo e isotrópico) e com restrito gradiente hidráulico, porém pode ser usado em aquíferos fraturados quando existem dados sobre o índice de fraturamento, considerando o ambiente se comporta como meio poroso. Recomenda-se que o tempo (t) seja de pelo menos 100 dias para qualquer tipo de aquífero, uma vez que tempos menores, muitas vezes resultaram em distâncias

reduzidas da captação, menores que 50 metros, o que pode não ser razoável devido à possíveis incertezas sobre o conhecimento do meio que poderiam alterar o fluxo, além disso, o tempo sugerido está em conformidade com a prática utilizada em muitos países.

Considerando que grande parte dos aquíferos, mesmo em meio poroso, não é homogêneo e isotrópico, foi proposto que a zona de transporte poderá também ser delimitada a partir da redução percentual da zona de contribuição, visto que dessa forma é aproveitada a análise hidrogeológica já realizada para a elaboração da zona de contribuição. Para determinar essa redução, deve ser realizada primeiramente uma análise sobre a distância que um contaminante leva para chegar a captação a partir de um tempo (t) de 100 dias, que está no limite de eliminação das cargas de vírus e bactérias. A redução da zona de contribuição tem que gerar uma distância igual ou superior ao resultado obtido a partir de um tempo de trânsito aplicado de 100 dias, sendo que esta redução deve ser de no máximo de 75%. Caso a redução percentual escolhida seja de 75%, uma área de 100 m², seria reduzida para 25m², com os limites do polígono encurtados na mesma proporção.

5.3. Zona de Contribuição

A zona de contribuição corresponde, na maior parte das vezes, ao perímetro de proteção mais amplo e externo, pois inclui toda a área de recarga associada ao ponto de captação. Em alguns casos, a ZC pode ser muito extensa e abranger mais de um poço dentro da bacia hidrográfica. Sua geometria vai ser bastante variável quanto a forma e ao tamanho, pois vai depender das condições de contorno e das propriedades hidráulicas do aquífero. Destaca-se que em aquíferos confinados, a área de recarga pode estar localizada a uma longa distância da nascente ou poço de captação.

A metodologia proposta foi pensada no sentido de integrar os elementos referentes aos métodos para elaboração de zonas de proteção já existentes. Para definição da zona de contribuição, a metodologia foi dividida em três etapas principais (Figura 5.1). Se inicia com a delimitação da bacia hidrográfica, em seguida é feita a coleta de dados da área de estudo de acordo com o tipo de captação para a confecção de um mapa de vulnerabilidade à contaminação e então é delimitada a área de proteção a partir das regras indicadas.

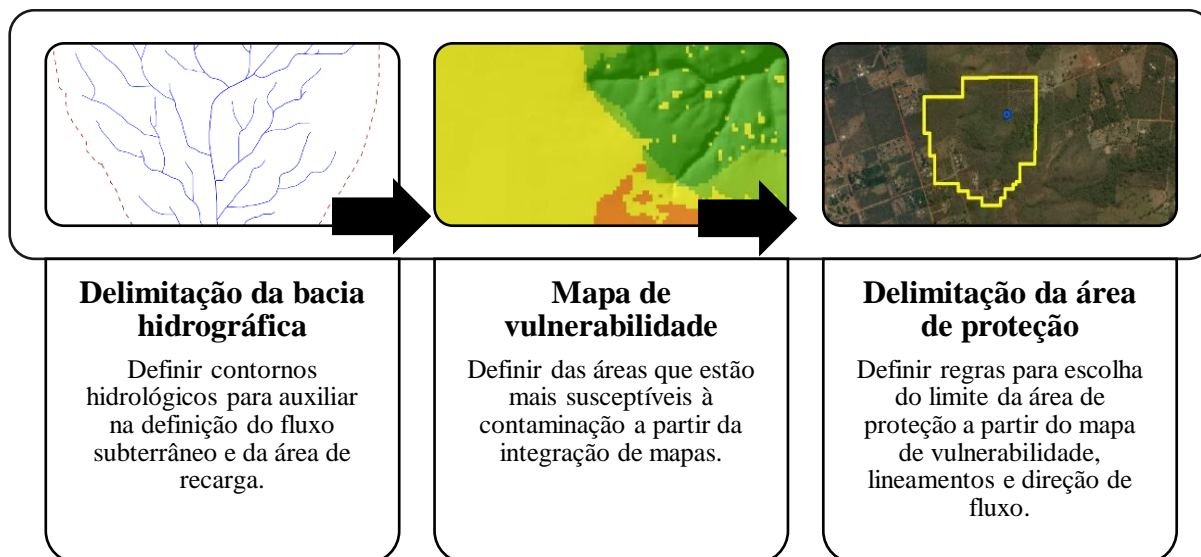


Figura 5.1. Fluxograma das três etapas para definição da zona de contribuição.

5.3.1. Delimitação da Bacia Hidrográfica

A delimitação de uma bacia hidrográfica local a partir de um ponto do exutório definido a jusante da captação, será o primeiro processo na elaboração da área de proteção, pois o seu limite junto com as linhas de drenagem e as curvas de nível irão auxiliar na caracterização das direções preferencias de fluxo subterrâneo e na localização da área de recarga, que corresponde ao principal local a ser protegido. Conceitualmente, o fluxo que converge para captação engloba toda a área da bacia hidrográfica, porém, pode não ser prático proteger uma bacia hidrográfica inteira (Chow *et al.*, 2016). Assim, uma das alternativas para reduzir essa área, é verificar quais as porções dentro da bacia hidrográfica que estão mais susceptíveis à contaminação. É importante que seja feita também uma análise sobre as interferências antrópicas próximas ao local que possam interferir de alguma forma no fluxo subterrâneo.

A utilização do Sistema de Informação Geográfica (SIG) para a delimitação de bacias hidrográficas tem se mostrado uma ferramenta bastante eficaz. Para tanto, são necessários dados provenientes da análise do terreno a partir de Modelo Digital de Terreno (MDT), que pode ser obtido por meio de dados SRTM. Deve ser incluída a localização exata da captação, se estiver no limite ou próximo ao limite de duas bacias, incorpora-se a sub-bacia adjacente. As etapas de processamento em ambiente SIG utilizando as informações do MDT para definição do limite da bacia hidrográfica e das linhas de drenagem, pode ser feita através do programa *ArcHydro* inserido no *software ArcGis*.

5.3.2. Confeção do Mapa de Vulnerabilidade

Após a delimitação do perímetro que corresponde a bacia hidrográfica, já é possível obter uma área equivalente ao limite da zona de recarga e das direções de fluxo que convergem para captação, porém, esse processo pode resultar em uma área muito extensa, por vezes com dezenas ou centenas de quilômetros, o que torna inviável, em termos práticos, a proteção completa da bacia hidrográfica a montante da captação. Assim, com o objetivo de reduzir esse limite, foi proposta a elaboração de um mapa de vulnerabilidade à contaminação, que irá incorporar importantes parâmetros hidrogeológicos.

O mapa de vulnerabilidade à contaminação tem a função de representar áreas de sensibilidade de um aquífero diante dos efeitos de uma carga contaminante a ele imposta (Foster *et al.*, 2006). Entende-se que a carga contaminante pode ser alteada ou controlada, porém neste estudo, o conceito de vulnerabilidade vai depender essencialmente dos aspectos hidrogeológicos naturais, sendo independente da ocupação (fontes de poluição) do terreno.

De acordo com Misstear & Daly (2000), a vulnerabilidade de um aquífero à contaminação pode depender de muitos fatores, incluindo lixiviação da camada superficial do solo, a permeabilidade e espessura do subsolo, a presença de uma zona não saturada, o tipo de aquífero, o potencial de recarga e a forma da área de recarga.

Para confecção do mapa de vulnerabilidade foram utilizados e adaptados os conceitos de métodos de vulnerabilidade do aquífero à contaminação, como o DRASTIC (Aller *et al.*, 1987) e GOD (Foster, 1987), que dependem da combinação de parâmetros para geração do produto final. Assim, o mapa de vulnerabilidade foi elaborado a partir da integração de dados baseados nos parâmetros intrínsecos da zona vadosa e dos padrões do fluxo subterrâneo. Nesse sentido, o objetivo desta etapa é agrupar informações hidrogeológicas por meio de mapas. Esse agrupamento é feito a partir da soma dos parâmetros escolhidos (Figura 5.2), sendo que para cada um é dado um índice correspondente ao grau de vulnerabilidade. Nesta metodologia, a escolha dos critérios se baseou na importância, qualidade e na facilidade de obtenção dos dados. No capítulo 4 foi feita uma abordagem sobre cada parâmetro.

Os subsídios que serão utilizados na elaboração do mapa de vulnerabilidade da área de proteção vão depender das características do aquífero, caso apresente porosidade primária, secundária ou dupla porosidade e do tipo de captação. Foi sugerida a seguinte integração de mapas a depender do tipo de captação.

Captação rasa

- ✓ Mapa de solo (condutividade hidráulica ou porosidade efetiva)
- ✓ Mapa de Declividade
- ✓ Mapa de Profundidade do Nível Freático

Captação profunda

- ✓ Mapa de Solo
- ✓ Mapa de Declividade
- ✓ Mapa Hidrogeológico/Geológico (porosidade efetiva ou índice de fraturamento interconectado)

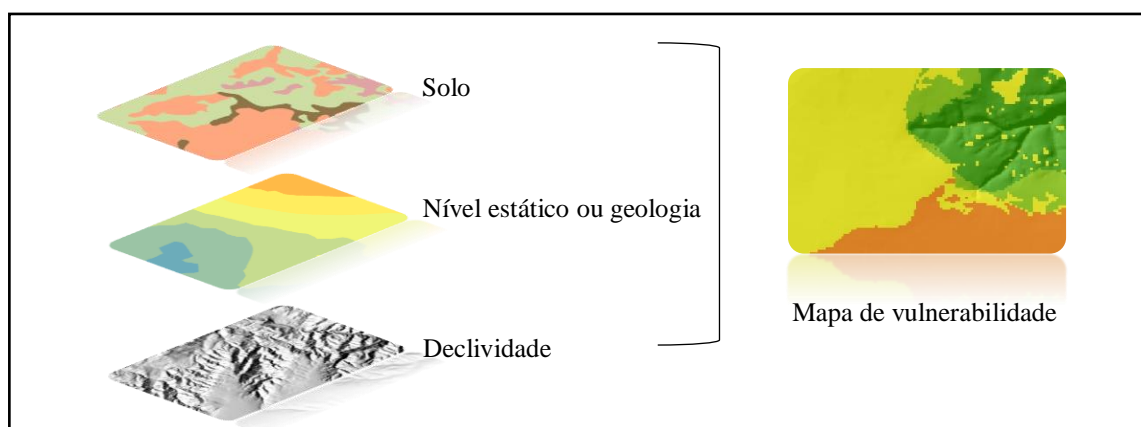


Figura 5.2. Esquema de integração mapas para elaboração do mapa de vulnerabilidade.

É recomendável que os mapas utilizados na integração das informações sejam feitos em escala de trabalho com maior detalhe possível, porém podem ser usados mapas em âmbito estadual ou regional. Nesta proposta, procura-se aproveitar ao máximo os dados já existentes e disponíveis, que devem ser complementados e confirmados em análises de campo para o refinamento dos dados.

A equação que representa o mapa de vulnerabilidade será a soma simples dos parâmetros mencionados, todos com o mesmo peso, exceto quando o aquífero apresenta dupla porosidade

$$MV \text{ (captação rasa)} = (\text{Solo} + \text{Declividade} + \text{Nível Estático})$$

$$MV \text{ (captação profunda)} = (\text{Solo} + \text{Declividade} + \text{Geologia/Hidrogeologia})$$

$$MV \text{ (aquífero dupla porosidade)} = (\text{Solo} + \text{Declividade} + \text{Porosidade Efetiva} * 0,5 + \text{índice de fraturamento interconectado} * 0,5)$$

Todos os parâmetros foram tratados com o mesmo grau de importância (mesmo peso) para que não fosse realçado nenhum critério, uma vez que dependendo do tipo de captação, o mapa de solos já ficará realçado, visto que as informações sobre topografia e o nível estático já são parcialmente condicionadas pelo tipo de solo.

Para cada parâmetro será atribuído um índice que pode variar de 1 (vulnerabilidade mínima) a 5 (vulnerabilidade máxima). Os detalhes sobre a escolha das classes e índices são a seguir apresentados.

Declividade

A declividade consiste na inclinação da superfície do solo em relação a um plano horizontal. Sua variação vai influenciar nos níveis de escoamento superficial e subsuperficial e, assim, na quantidade de água capaz de infiltrar no solo junto com um possível contaminante. Quando a declividade está entre 0% e 8%, o fluxo tende a ser laminar, por isso vai apresentar alta vulnerabilidade. Para declividades maiores que 8% o fluxo tende a ser linear, reduzindo assim os índices de vulnerabilidade. Quando a declividade é maior que 20%, a infiltração é muito reduzida, por isso o índice de vulnerabilidade é muito baixo (Tabela 5.2).

Tabela 5.2. Intervalos de declividade e o índice atribuído.

Declividade (%)	Índice
0 - 8%	5
8 - 20%	2
>20%	1

Solo

O solo corresponde ao próprio aquífero quando a captação é rasa e representa a camada filtrante de proteção para captações profundas. Suas características serão importantes para a determinação da quantidade da água precipitada que é capaz de infiltrar e chegar até a zona saturada e como consequência levar contaminantes durante seu transporte. Na avaliação do tipo de solo, serão verificadas as informações sobre condutividade hidráulica ou porosidade efetiva, podendo ser utilizado o dado de maior confiabilidade e de mais fácil aquisição na área de estudo, estrutura e espessura do solo. Assim, quanto maior forem os valores tanto de condutividade hidráulica como de porosidade efetiva, mais exposto à contaminação estará o solo (Tabela 5.3 e Tabela 5.4).

Tabela 5.3. Variação da condutividade hidráulica.

Condutividade Hidráulica (k) (m/s)	Índice
$< 10^{-8}$	1
$10^{-7} - 10^{-8}$ m/s	2
$10^{-6} - 10^{-7}$ m/s	3
$10^{-5} - 10^{-6}$ m/s	4
$>10^{-5}$	5

Tabela 5.4. Variação da porosidade efetiva em solos.

Porosidade Efetiva	Índice
$< 3\%$	1
3 - 7%	2
7 - 11%	3
10 - 15%	4
$>15\%$	5

Nível Estático

O nível estático é representado pela superfície abaixo do solo onde todos os espaços dos poros são preenchidos com água quando o poço não está sendo bombeado. Assim, quanto mais profundo for este nível em relação a superfície do solo, sobretudo em aquíferos livres, menor será o índice de vulnerabilidade (Tabela 5.5). Os dados sobre nível estático geralmente são pontuais, uma vez que são obtidos a partir de poços de monitoramento ou de captação. Dessa forma, a espacialização desses dados torna-se necessária para geração de mapas de vulnerabilidade. Havendo um conhecimento geológico mais detalhado dentro da área de estudo, as informações sobre nível freático/estático podem ser estimadas em função do tipo de solo.

Tabela 5.5. Variações do nível estático e índices associados.

Nível Estático (m)	Índice
$< 1\text{m}$	5
1 - 2,5 m	4
2,5 - 5m	3
5 - 10m	2
$>10\text{ m}$	1

Este parâmetro vai depender do tipo de aquífero que se está trabalhando:

Aquífero poroso: quando a rocha apresentar porosidade primária, como em arenitos não cimentados, por exemplo, utilizam-se dados sobre porosidade efetiva, que corresponde ao volume de poros efetivamente livres, pois não considera os poros não conectados. A vulnerabilidade será maior à medida que o volume de poros estiver efetivamente livre (Tabela 5.6).

Aquífero fraturado: quando o aquífero for fraturado, com porosidade primária praticamente nula, utiliza-se o Índice de Fraturamento Interconectado - IFI (Campos & Freitas-Silva, 1998). Este parâmetro é análogo a porosidade efetiva quando se pretende trabalhar em sistemas aquíferos fraturados, visto que a junção das fraturas poderá atuar como um sistema poroso equivalente. Assim, quanto maior o índice de fraturamento, maior o índice de vulnerabilidade (Tabela 5.7).

Tabela 5.6. Variação da porosidade efetiva em rocha.

Porosidade Efetiva	Índice
0 – 6%	1
6 – 12%	2
12 – 20%	3
20 – 25%	4
>25%	5

Tabela 5.7. Variação do Índice de Fraturamento Interconectado – IFI.

IFI	Índice
0 - 0,5%	1
0,5 - 1,0%	2
1,0 - 2,5 %	3
2,5 - 3,5 %	4
> 3,5%	5

Aquífero com dupla porosidade: quando o aquífero apresentar porosidade primária e secundária, utiliza-se tanto os dados de porosidade efetiva como os dados de índice de fraturamento interconectado. Faz-se uma média com os valores de cada parâmetro. Neste caso, serão utilizadas duas variáveis (IFI e Ne), portanto seus pesos serão multiplicados por 0,5. A equação será:

$$MVdp = (\text{Solo} + \text{Declividade} + \text{IFI} \times 0,5 + \text{Ne} \times 0,5)$$

Aquífero Cárstico: por se tratar de um tipo de aquífero muito anisotrópico e heterogêneo, a modelagem de fluxo é muito particular e necessita dados mais detalhados. Neste caso, não é razoável trabalhar com índices pré-definidos. A sugestão é que seja feito um estudo geofísico específico para interpretação da modelagem de fluxo.

A partir da integração das variáveis utilizadas em função do tipo de captação, é possível gerar um mapa de vulnerabilidade, que não vai necessariamente corresponder a uma zona de proteção, porém será útil na identificação de áreas mais susceptíveis à contaminação da água subterrânea.

Conforme a equação proposta, a vulnerabilidade é medida em uma escala de pontos que varia de 3 (vulnerabilidade mínima) a 15 (vulnerabilidade máxima). Dessa maneira, foram propostas classes de vulnerabilidade de acordo com a pontuação, que consiste na soma dos índices (Tabela 5.8).

Tabela 5.8. Classes de vulnerabilidade e soma de índices.

Classe de Vulnerabilidade	Soma de Índices
Vulnerabilidade muito alta	13 – 15
Vulnerabilidade alta	11– 13
Vulnerabilidade média	7 – 11
Vulnerabilidade baixa	5 – 7
Vulnerabilidade muito baixa	3 - 5

5.3.3. Delimitação da Área de Proteção

Com a integração da delimitação da bacia hidrográfica e do mapa de vulnerabilidade, será possível elaborar uma área proteção a partir de algumas regras propostas. Com os dados obtidos, o primeiro passo é fazer a sobreposição do ponto de captação, da área da bacia hidrográfica, do mapa de vulnerabilidade e do mapa de lineamentos (quando for o caso). Inicialmente, é feita uma previsão sobre o fluxo subterrâneo a partir do limite da bacia hidrográfica, das linhas de drenagem e das curvas de nível, com isso é possível identificar a área de recarga e os locais que merecem maior proteção. Em seguida, deve ser analisado o grau de vulnerabilidade à contaminação, onde foram propostas distâncias mínimas a montante da captação para os diferentes graus de vulnerabilidade (Tabela 5.9). A escolha das distâncias mínimas foram propostas baseadas em

cálculos utilizando o conceito de tempo de trânsito a partir dos parâmetros hidráulicos nos diferentes tipos de aquíferos e nas experiências internacionais. Assim, foram consideradas distâncias seguras para proteção a montante da captação.

Tabela 5.9. Distâncias mínimas de demarcação da área de proteção de acordo com o grau de vulnerabilidade.

Grau de vulnerabilidade	Distância mínima (a montante) entre a captação e o limite da área de proteção
Vulnerabilidade muito alta	1100 m
Vulnerabilidade alta	750 m
Vulnerabilidade média	500 m
Vulnerabilidade baixa	300 m
Vulnerabilidade muito baixa	200 m

A tabela apresentada é interpretada da seguinte forma: quando a vulnerabilidade for classificada como muito alta, a distância mínima entre o limite do perímetro de proteção e a captação é de 1100 metros a montante. Essa distância será o limite de demarcação da área de proteção (podendo apresentar variações que aumentem a área). Essa distância deve ser interpretada nos limites da zona de recarga dentro da bacia hidrográfica, e a regra será aplicada para as cinco classes de vulnerabilidade. A jusante da captação, o limite da área pode ser reduzido em 50% ou mais.

Se o aquífero for fraturado, o próximo passo é fazer a extração de lineamentos aparentes, que consiste no mapeamento e marcação de feições lineares (relevo e drenagem) que estão visíveis na imagem. A extração de lineamentos é essencial na geração de áreas de proteção em aquíferos fraturados, pois eles se comportam como condutos para o fluxo do contaminante. Assim, deverão ser verificados os lineamentos que possam alterar o fluxo ou que tenham alguma influência no poço/nascente, aqueles que atravessam a captação, que estão próximas a ela e onde há intersecção de feições lineares. A partir da análise desses lineamentos, a área de proteção previamente definida com o mapa de vulnerabilidade poderá ser aumentada. O acréscimo dessa área vai ocorrer de acordo com as regras propostas na Tabela 5.10. As distâncias foram sugeridas com base na representatividade dos lineamentos. Lineamentos longos tendem a representar zonas de fratura mais abertas e com movimento, por isso necessitam de maior proteção, enquanto lineamentos médios e pequenos são representados por fraturas médias e por planos de acamamento e foliações, por isso a proteção, nestes casos pode ser menor.

Tabela 5.10. Distâncias a partir da ponta do lineamento a montante da captação em função da extensão do lineamento.

Lineamento	Distância a partir da ponta do lineamento a montante
>2 km	1000 m
1 – 2 km	500 m
< 1 km	200 m

5.3.4. Considerações Importantes

Para o contorno da área de proteção devem ser considerados os seguintes aspectos:

- ✓ Se houver lineamento(s) próximo(s) a captação, mesmo que dentro de uma área de vulnerabilidade baixa, toda a extensão do lineamento precisa ser protegida, de acordo com a proposta apresentada na Tabela 5.10;
- ✓ Se na confecção do mapa de vulnerabilidade, a distância mínima ultrapassar o limite da bacia, delimitar a distância até o limite da área da bacia hidrográfica. A área de proteção poderá ultrapassar o limite da bacia hidrográfica quando houver lineamentos extensos ou quando houver poços conhecidos que estejam provocando inversão de fluxo;
- ✓ Havendo fontes de contaminação significativas em função de ocupações já existentes, deve ser feita uma análise sobre o grau de risco desses agentes poluentes e se há a necessidade de realocação do poço;
- ✓ No caso de poços onde a ocupação foi posterior a sua construção, é importante que seja feito um monitoramento frequente das atividades, além de uma análise periódica da qualidade da água que está sendo captada e que haja restrição quanto às novas ocupações. Cabendo também analisar a possibilidade econômica de realocação de poços;
- ✓ No estudo sobre área de proteção é recomendável a análise das principais e/ou possíveis fontes de poluição e
- ✓ É importante a avaliação sobre a existência de poços abandonados não obstruídos próximos à captação.

5.4. Restrições de Uso

Após a delimitação das três zonas (ZI, ZT e ZC), a definição das restrições de uso e ocupação tem que ser realizada, devendo ser mais rigorosa à medida que se aproxima da captação, portanto nas zonas de influência e transporte. Em relação à zona de contribuição, por ter na maior parte das vezes uma área extensa, sua restrição não deve ser tão limitada, tendo em vista os fatores sociais, econômicos e técnicos envolvidos. Inclusive, em alguns países, como na Alemanha, a zona de captura foi subdividida em duas classes, visando a inclusão de diferentes graus de restrição.

Conforme já estabelece a Portaria do DNPM nº 231/1998, na zona de influência deve haver severas restrições, sendo proibidas quaisquer edificações, atividades agrícolas ou outros usos considerados potencialmente poluidores. Nas zonas de contribuição e transporte devem ser estabelecidos os usos permitidos e proibidos basicamente em função da proximidade da captação, do tempo de degradação/atenuação do contaminante e do grau de potencial a poluição de cada atividade.

Quando a área ao redor da captação está próxima a locais ocupados por diferentes atividades, cujas fontes de contaminação são evidentes, é imprescindível que se façam alguns estudos, incluindo: análise de risco a contaminação; identificação e mapeamento dos principais usos do solo; análise dos planejamentos territoriais do município/cidade; identificação das fontes de poluição; monitoramento e cadastro das atividades potencialmente poluidoras; análise periódica (a cada ano) sobre a qualidade da água e, dependendo do caso, se existir elevado risco à contaminação ou mesmo se houver muita pressão quanto à ocupação do solo, verificar a possibilidade de realocação da captação.

As atividades humanas podem gerar diversas cargas contaminantes que são potencialmente poluidoras. Sua intensidade vai depender especialmente da quantidade e do tipo de substâncias que são despejadas no solo e de como a carga contaminante se comporta no meio aquífero. Diversos autores sugerem as restrições de uso para diferentes tipos de atividade ou enumeram as principais fontes de contaminação (Freeze & Cherry, 1979; Foster *et al.*, 2006; Fetter, 2008; Iritani & Ezaki, 2010).

Algumas atividades potencialmente poluidoras serão tratadas e descritas por categorias:

5.4.1. Atividades Agrícolas

O aumento da produção agrícola provocou uma expansão no uso de fertilizantes inorgânicos e pesticidas no solo, resultando no excesso de sais, de compostos nitrogenados,

potássio, fósforo e outros produtos que são mobilizados até a zona saturada em função do excesso de água no solo. Um dos tipos de contaminação mais comuns provocados por essa atividade é na forma de nitrato, que devido a sua elevada solubilidade e a sua forma aniônica, é muito móvel na água subterrânea (Freeze & Cherry, 1979), podendo atingir extensas áreas. Quanto aos pesticidas, seu comportamento em termos de volatilização, adsorção e fotodegradação vai ser controlado pela presença de matéria orgânica e argila no solo, umidade e pH (Weber & Weed, 1974 *apud* Hirata, 1994). O comportamento desses componentes em subsuperfície, bem como a ampla distribuição de sua aplicação faz com que esses tipos de contaminantes sejam de difícil detecção e análise. As práticas de irrigação também podem carregar elevadas quantidades de sais para os aquíferos, além de provocar excesso hídrico no ambiente, favorecendo a contaminação pela infiltração de material despejado no solo, devendo haver um controle das práticas de irrigação em áreas de proteção.

5.4.2. Atividades Industriais

A extrema quantidade de produtos químicos utilizados, a prática de depósito de efluentes, bem como a diversidade de técnicas e processos envolvidos nesse tipo de atividade faz com que ela seja a que acarreta maiores riscos para as águas subterrâneas. Sendo o grau de contaminação variável em função da mobilidade, solubilidade e persistência desses compostos químicos. As principais fontes de contaminação estão associadas aos seguintes aspectos e práticas: existência de diferentes tipos de atividades industriais e de distintas tecnologias; concentração de substâncias tóxicas nos efluentes; incertezas sobre a eficiência no tratamento de efluentes e na remoção de contaminantes; variedade de manuseio e disposição de matérias primas resíduos sólidos e líquidos; lançamento de gases tóxicos nos processos produtivos; vazamento de produtos e efluentes e; infiltração de água utilizada na limpeza de máquinas, peças e instalações (Hirata, 1994).

Cabe destacar que as cargas contaminantes não necessariamente dependem do porte da indústria, uma vez que grandes indústrias podem utilizar processos mais eficientes no controle de deposição de resíduos, por exemplo, enquanto que indústrias de menor porte podem adotar práticas não recomendadas. Assim, as cargas contaminantes vão depender principalmente do tipo de atividade industrial e das práticas utilizadas nos processos industriais. O método POSH (*Pollutant Origin, Surcharge Hydraulically*) classifica as atividades industriais quanto ao potencial de gerar carga contaminante no subsolo em três tipos: reduzido, moderado e elevado (Tabela 5.11). Assim, a análise dos citados aspectos auxiliam na definição de restrições de uso de atividades industriais nos limites das áreas de proteção.

Tabela 5.11. Potencial de geração de carga contaminante para diferentes tipos de atividade industrial.

Potencial de geração de carga contaminante	Tipo de atividade industrial	
Reduzido	Tipo 1	madeiras; manufaturas de alimentos e bebidas, destilarias de álcool e açúcar, processamento de materiais não metálicos
Moderado	Tipo 2	fábricas de borracha; fábricas de papel e celulose; indústrias têxteis, fábricas de fertilizantes, usinas elétricas, fábricas de detergentes e sabão.
Elevado	Tipo 3	oficinas de engenharia; refinarias de gás e petróleo; fábricas de produtos químicos, farmacêuticos, plásticos e pesticidas; curtumes; indústrias eletrônicas e processamento de metal.

5.4.3. Atividades de Mineração

A contaminação por esse tipo de atividade está associada principalmente a metais, não-metais solúveis e exploração de petróleo e gás. Essas substâncias envolvem processos de beneficiamento que geram resíduos tóxicos, além da percolação do material estéril. A contaminação por metais ocorre principalmente quando os limites máximos de potencialidade são excedidos. Alguns exemplos são: prata, cádmio, cromo, cobre, mercúrio, ferro, manganês e zinco, que ocorrem em concentrações muito baixas em águas subterrâneas naturais não contaminadas, com exceção do ferro (Feitosa & Manoel Filho, 2000). Substâncias minerais não metálicas e pouco solúveis, como os agregados para construção civil (areia, cascalho, saibro, rochas para calçamento, rochas britadas, etc) apresentam baixo potencial contaminante, sendo, neste caso, o maior risco associado ao desenvolvimento da mina por meio da remoção do solo, fazendo com que o nível freático fique exposto.

Nas atividades de mineração, é comum também contaminação associada aos sistemas de saneamento *in situ*, aos pátios de oficinas e ao armazenamento de combustível e óleo (Hirata, 1994). Alguns fatores sobre atividades de mineração devem ser analisados quanto às restrições de uso da terra como tipo de substância mineral e ocupações associadas à jazida. Os problemas associados à exploração de petróleo e gás envolvem derramamento e vazamento de petróleo por meio de tanques de aço enterrados, oleodutos, gasodutos ou derramamento em superfície.

5.4.4. Atividades Urbanas

Nesta categoria, estão incluídas atividades que de alguma forma estão relacionadas ao desenvolvimento urbano, como: edificações, estradas e ferrovias, obras de escavação, postos de

combustível e serviços, lixões, aterros sanitários, cemitérios, estações de tratamento de esgoto e água, resíduos sólidos, estacionamentos, oficinas de conserto de veículos, dentre outros. O potencial de geração de carga contaminante causada por essas atividades é bastante variável, a depender de cada tipo.

Edificações

As edificações são de variados tipos, alguns exemplos são: residências, comércios, escolas e hospitais. Os padrões de saneamento nessas ocupações podem receber ou não tratamento de esgoto. A preocupação maior se dá em centros urbanos não planejados, sem rede de esgoto, cujo lançamento do esgoto ocorre por meio de fossas e tanques, acarretando na contaminação da água subterrânea, especialmente por bactérias, vírus patogênicos, nitrato e sais (Hirata, 1994). Cabe destacar que a persistência desses componentes é variável em meios porosos, por exemplo, os vírus e bactérias penetram pequenas distâncias, pois tendem a ficar retidos no meio, porém em meios fraturados a distância alcançada é grande, chegando a vários quilômetros (Feitosa & Manoel Filho, 2000).

Estradas e Ferrovias

Essa atividade está relacionada aos acidentes no transporte de substâncias líquidas e sólidas potencialmente tóxicas, envolvendo principalmente caminhões e trens, que geram uma significativa carga contaminante no solo por derramamento. Na determinação das restrições de uso, as vias de acesso terrestre devem ser levadas em consideração, pois comumente cortam áreas de recarga de aquíferos. Carece que sejam verificadas as ocorrências de acidentes, a frequência do transporte de substâncias contaminantes, bem como as medidas de emergência normalmente adotados em caso de acidentes (Hirata, 1994; Foster *et al.*, 2006).

Postos de combustível

Em postos de combustível, há um elevado volume de hidrocarbonetos, que apresentam forte atenuação natural e são potencialmente poluentes. Eles ficam armazenados em tanques subterrâneos, com pouca ou nenhuma verificação de vazamentos. Tanques mais antigos podem estar sujeitos a vazamentos substanciais por estarem corroídos (Foster *et al.*, 2006). Dessa forma, esta atividade pode ser classificada com moderada a elevada carga contaminante, quando ocorre vazamentos, devendo ser verificado o padrão e a manutenção das instalações.

Oficinas mecânicas

Em áreas urbanas é comum encontrar pequenas atividades que oferecem serviços por meio do manuseio de produtos químicos tóxicos, como as oficinas mecânicas. O perigo neste tipo de instalação está associado à presença de solventes orgânicos, sintéticos e lubrificantes a base de hidrocarbonetos que são despejados no solo (Foster *et al.*, 2006).

Lixões e aterros sanitários

Essas atividades estão relacionadas ao depósito de resíduos sólidos que são armazenados em aterros ou lançados no solo. A sucessão de camadas de lixo enterrada em aterros ou expostas em lixões sujeitos ao excesso da água da chuva, desenvolvem o chorume, cujo o TDS (total de sólidos dissolvidos) é bastante alto, podendo conter ainda uma quantidade elevada de contaminantes orgânicos e inorgânicos (Freeze & Cherry, 1979). Devido à variedade de componentes nocivos presentes no chorume, essa atividade acarreta um alto risco de contaminação para as águas subterrâneas.

Cemitérios

Em núcleos urbanos é muito comum a existência de cemitérios, cuja carga contaminante está relacionada à presença de necrochorume, que consiste em uma solução rica em sais minerais e substâncias orgânicas degradáveis, contendo microrganismos patogênicos com índices de sobrevivência variáveis (Matos, 2001).

A partir da análise de algumas atividades potencialmente poluidoras das águas subterrâneas, foram sugeridas atividades econômicas e suas restrições nas três zonas de proteção (Tabela 5.12).

Tabela 5.12. Atividades potencialmente poluidoras e restrições de uso.

Atividades			
Agricultura e pecuária	ZI	ZT	ZC
Uso de fertilizantes inorgânicos	N	N	C
Aplicação de Herbicida/pesticida	N	N	C
Armazenamento de estrume	N	N	S
Despejo de Efluente agrícola	N	N	N
Enterro/Restos de animais	N	N	S
Criação de animais	N	N	C
Irrigação	N	C	C
Indústria e serviços	ZI	ZT	ZC
Indústria extrativa	N	N	N
Indústria de transformação	N	N	N
Aterro industrial	N	N	N
Despejo de efluente industrial	N	N	N
Incinerador	N	N	N
Usina termelétrica	N	N	N
Desengraxe de peças	N	N	C
Desenvolvimento urbano	ZI	ZT	ZC
Edificações com saneamento in situ	N	N	N
Edificações com tratamento de efluentes	N	N	S
Estradas e ferrovias	N	N	C
Obras de escavação	N	N	C
Posto de combustível e área de serviço de combustível	N	N	N
Lixões e aterros sanitários	N	N	N
Cemitérios	N	N	N
Estação de tratamento de esgoto	N	N	N
Estação de tratamento de água	N	N	C
Despejo de resíduos sólidos	N	N	N
Estacionamento	N	C	C
Oficina mecânica (conserto de veículos)	N	N	C
Mineração	ZI	ZT	ZC
Areia	N	N	C
Pedreiras	N	N	C
Metais	N	N	N
Não-metais solúveis	N	N	N
Exploração de petróleo e gás	N	N	N
Lagoas de efluentes	N	N	N
Outros	ZI	ZT	ZC
Tanques enterrados	N	N	N
Desmatamento	N	N	N
N - Atividade não permitida. C - Atividade condicionada, dependendo do tipo e extensão da atividade, do grau de potencial poluidor e em alguns casos quando autorizados pelo órgão ambiental e/ou obedeça às exigências específicas. S - Atividade permitida.			

5.5. Aquisição e Processamento dos Dados

Os dados necessários para aplicação da proposta metodológica podem ser obtidos a partir de diferentes meios, sendo sugeridas algumas fontes de informação.

Solos

Estudos em Campo (prioridade)
Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária)
IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística)
Universidades

Dados Hidrodinâmicos

Informações do próprio poço/nascente (vazão, nível estático, nível dinâmico e outros)
Ensaio de infiltração *in situ* (*open end hole* / anéis concêntricos)
Companhias de abastecimentos
Agências reguladoras estaduais
ANA (Agência Nacional das Águas)
Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária)
Universidades

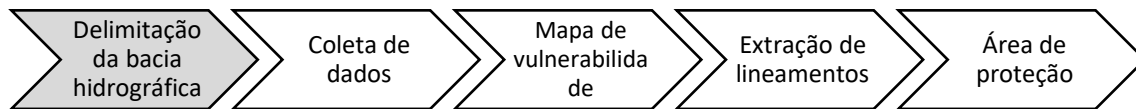
Geologia/hidrogeologia

Estudos em campo (prioridade)
Agências reguladoras estaduais
CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais / Serviço Geológico do Brasil)
Universidades

CAPÍTULO 6. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA NO DISTRITO FEDERAL

A metodologia proposta no capítulo anterior foi aplicada em três áreas no Distrito Federal. As etapas de processamento das informações estão detalhadas em seguida.

6.1. Delimitação da Bacia Hidrográfica

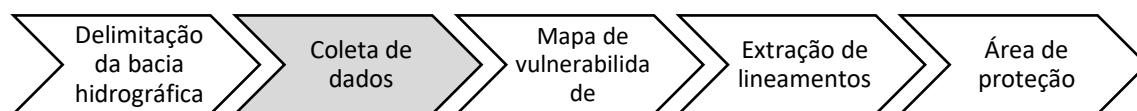


O primeiro procedimento realizado foi a demarcação do limite da bacia hidrográfica através do *software ArcGis 10.2* para previsão do fluxo subterrâneo e das áreas de recarga. Antes disso, foi feito um recorte da área de estudo. A delimitação da bacia hidrográfica em ambiente SIG (Sistema de Informação Geográfica) é feita a partir de dados provenientes da análise do terreno, portanto, foi utilizado o Modelo Digital de Terreno (MDT), neste caso, confeccionado a partir de dados SRTM, fornecido pela Companhia Imobiliária de Brasília (Terracap). A rede de drenagem e o limite da bacia hidrográfica cujo fluxo hidráulico converge para a captação foram realizados utilizando as ferramentas hidrológicas do *ArcHydro*, na seguinte sequência:

1. *Fill Sinks*
2. *Flow Direction;*
3. *Flow Accumulation;*
4. *Stream Definition;*
5. *Stream Segmentation;*
6. *Catchment Grid Delineation;*
7. *Catchment Polygon Processing;*
8. *Drainage Line Processing;*
9. *Adjoint Catchment Processing;*
10. *Drainage Point Processing;*
11. *Batch Point Generation;*
12. *Watershed Delineation*

A partir do Modelo Digital de Terreno (MDT), a primeira etapa consistiu na correção de erros das depressões fechadas que interrompem o escoamento na rede hidrográfica, essa correção foi feita com a ferramenta *Fill Sinks*. O próximo passo foi a determinação da direção de fluxo baseado nas direções de escoamento para cada uma das células do MDT corrigido, a ferramenta utilizada foi a *Flow Direction*. A partir do resultado da direção de fluxo foi possível determinar o fluxo acumulado utilizando o processo *Flow Accumulation*. A etapa posterior consistiu na elaboração das redes hidrográficas por meio das ferramentas *Stream Definition* e *Stream Segmentation*. Em seguida, a partir dos dados anteriores, foi feita a delimitação das sub bacias hidrográficas da área usando os processos *Catchment Grid Delineation* e *Catchment Polygon Processing*. O processamento feito em seguida foi o *Adjoint catchments*, que consiste na elaboração dos polígonos de bacias a montante de cada sub bacia. O próximo passo foi feito através da ferramenta *Drainage Point Processing*, que permitiu gerar os pontos de drenagem associados às bacias. Esses pontos auxiliaram no passo posterior, que consistiu na definição do ponto do exutório usando a ferramenta *Batch Point Generation*. Por fim, o último passo foi a geração do limite da bacia hidrográfica com a ferramenta *Batch Watershed Delineation* (Figura 6.1).

6.2. Coleta de Dados



Nas três áreas de estudo ocorrem captações cuja extração da água é feita no maciço rochoso, portanto são consideradas captações profundas em meio fraturado. Assim, os dados utilizados para confecção do mapa de vulnerabilidade foram:

- ✓ Mapa de solo
- ✓ Mapa de relevo
- ✓ Mapa geológico/hidrogeológico

Mapa de Solo: o mapa de solos utilizado foi o proposto pelo Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos da Embrapa (1978), com escala de 1:100.000. Foi feito um recorte para cada uma das áreas e algumas modificações foram realizadas em escala de maior detalhe a partir de informações verificadas em campo. Com o mapa de solos e baseado nos índices propostos na metodologia, foi apresentada uma tabela com os solos presentes na área e seus respectivos índices (Tabela 6.1).

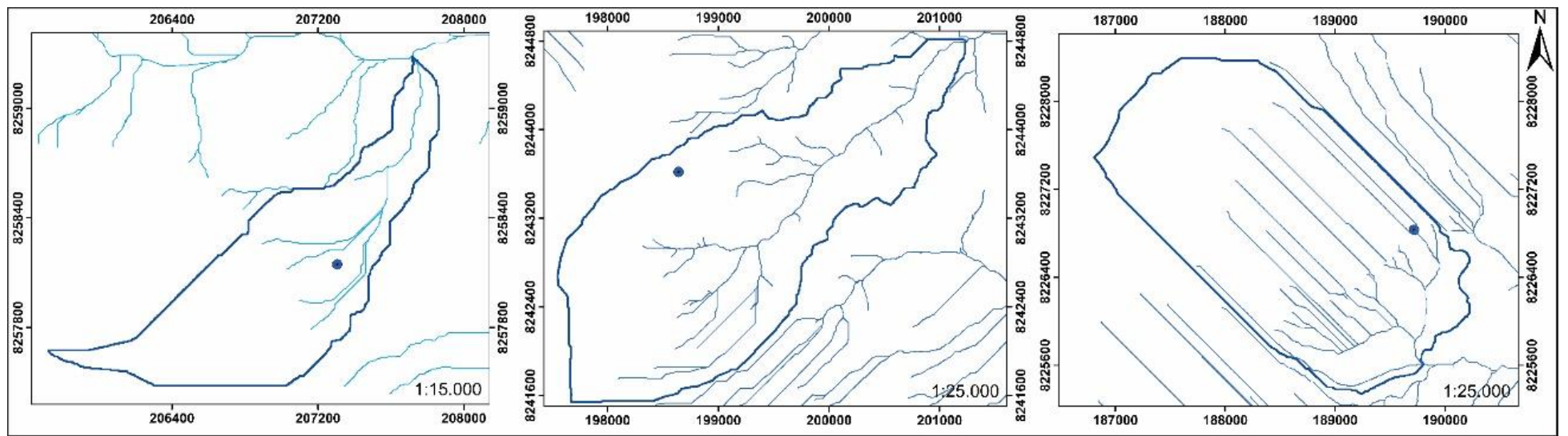


Figura 6.1. Contorno das bacias hidrográficas das Áreas 1, 2 e 3 (na ordem).

Tabela 6.1. Índices de vulnerabilidade para os solos das áreas de estudo.

Solos	Índice
Latossolo Vermelho-Amarelo	4
Latossolo Vermelho	3
Neossolo Quartzarenico	5
Cambissolo Háplico	2
Gleissolo Háplico	1
Nitossolo Vermelho	3
Plintossolo Pétrico	2

A escolha dos índices foi baseada nas características do solo, como textura, condutividade hidráulica, estrutura e espessura e foram fundamentadas a partir de trabalhos com ensaios de infiltração *in situ* (Campos & Souza, 2001; Fiori *et al*, 2010) realizados no Distrito Federal. Nos dados consultados, as classes de Latossolo e Nitossolo mostraram valores de condutividade hidráulica que variaram de 10^{-5} e 10^{-6} m/s (ordem de grandeza). São caracterizados por serem solos espessos, com zona vadosa variando entre 5 e 15 metros. Apesar de serem argilosos, apresentam elevada permeabilidade por serem solos bem estruturados, isso gera macroporosidade, facilitando a percolação de fluidos. Por isso apresentam vulnerabilidade média a alta. O Neossolo Quartzarênico foi classificado com vulnerabilidade muito elevada, pois é um solo pouco espesso e com textura bastante arenosa, por vezes cascalhenta, são caracterizados por serem altamente permeáveis, com valores de condutividade hidráulica na ordem de grandeza de 10^{-5} m/s. A classe de Cambissolos é representada por solos geralmente rasos, com textura argilosa, comumente é cascalhento e ocorre em terrenos com relevo ondulado. A condutividade hidráulica está na ordem de grandeza de 10^{-5} e 10^{-6} m/s, por apresentar essas propriedades foi classificado com baixa vulnerabilidade. Para o Gleissolo foi considerada uma vulnerabilidade muito baixa por apresentar textura comumente argilosa e condutividade hidráulica variando de 10^{-6} e 10^{-7} m/s. Ademais, são solos mal drenados e caracterizados por excesso de umidade. Os Plintossolos possuem condutividade hidráulica de cerca de 10^{-5} m/s, são solos mal drenados, com percolação de água restrita, em função dessas condições foi classificado com vulnerabilidade baixa.

Mapa de declividade: As informações sobre o relevo foram obtidas utilizando o Modelo Digital de Terreno (MDT) fornecido pela Companhia Imobiliária de Brasília (Terracap). Assim, foi gerado um mapa de declividade em porcentagem, processado por meio da ferramenta *Slope* no *ArcGis*

10.2. A partir do mapa produzido, foi feita uma classificação das inclinações atribuindo a elas seus índices de acordo com a metodologia. A classificação foi gerada utilizando a ferramenta *Reclassify* no *ArcGis 10.2* (Tabela 6.2).

Tabela 6.2. Índices de vulnerabilidade para declividade.

Declividade	Índice
0 - 8%	5
8 - 20%	2
>20%	1

A determinação dos índices foi baseada na tendência de fluxo superficial em função dos diferentes graus de declividade. Em declividades entre 0 e 8%, a tendência de fluxo superficial é laminar ou difuso, sendo atribuída vulnerabilidade muito elevada. Quando a declividade está entre 8 e 20%, o fluxo superficial tende a ser linear ou concentrado, apresentando risco moderado. Para declividades elevadas, maiores que 20%, a tendência de fluxo linear é intensa e a infiltração pode ser considerada praticamente nula.

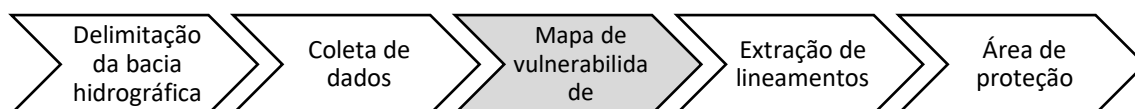
Mapa Geológico: Foi utilizado o mapa geológico do Distrito Federal proposto por Campos & Freitas-Silva (1998), na escala de 1:100.000. Foram verificadas as unidades geológicas e hidrogeológicas presentes na área e como se trata de um sistema fraturado, a classificação dos índices de vulnerabilidade foi feita a partir de dados sobre o Índice de Fraturamento Interconectado (IFI) (Tabela 6.3).

Tabela 6.3. Unidades hidrogeológicas das áreas e índices de vulnerabilidade para o IFI.

Domínio Fraturado	Subsistema	Litologia predominante	IFI	Índice
Paranoá	R3/Q3	Quartzitos e metarritmitos arenosos	3,5%	4
	R4	Metarritmitos argilosos	1,0%	2
Canastra	F	Filitos micáceos	0,5%	1
	F/Q/M	Calcifilitos, quartzitos e mármore	3,5%	4

Os dados sobre o índice de fraturamento interconectado foram coletados a partir do Relatório de Consultoria Técnica /ADASA (2007), que foi definido com base na comparação com rochas similares e com processo tectônico semelhante; por medição de aberturas de fraturas em afloramentos; pelo comportamento reológico dos materiais que compõem as rochas e a partir das vazões médias de cada subsistema aquífero.

6.3. Mapa de Vulnerabilidade

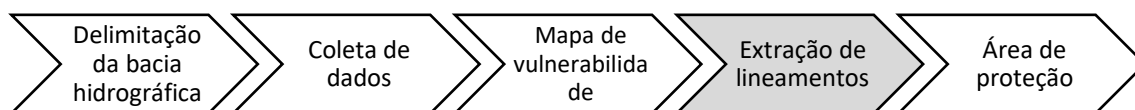


A susceptibilidade à contaminação de uma dada área depende de diferentes variáveis condicionantes, dentre elas, foram sugeridas informações sobre solo, relevo, geologia, hidrogeologia e nível estático. Todos esses, são fatores que podem influenciar na vulnerabilidade à contaminação. Para a integração das informações foi utilizado o princípio de álgebra de mapas, que consiste no conjunto de convenções, capacidades e técnicas adotadas para uso com Sistemas de Informação Geográfica (SIG) (Tomlin, 1994). Apresenta uma sintaxe simples semelhante a qualquer álgebra, que utilizada um conjunto de dados em formato *raster* para criação de expressões que são processadas em um único comando.

Para aplicação da álgebra de mapas são necessários alguns planos de informação, como mapas de solo, relevo e hidrogeologia/geologia. Para isso, foram primeiramente atribuídos os índices de vulnerabilidade, variando de 1 a 5, conforme as tabelas anteriormente apresentadas (Tabelas 6.1, 6.2 e 6.3). Esses índices foram inseridos e processados através da tabela de atributos do *ArcGis*, que posteriormente foram transformados para *raster* e classificados com a ferramenta *reclassify*.

Para aplicação da equação ($MVp = \text{Solo} + \text{Declividade} + \text{Geologia}$), a ferramenta utilizada foi a *Map Algebra >Raster Calculator*, na qual foi realizada a soma dos *rasters* gerados e classificados. O resultado dessa soma foi um mapa de vulnerabilidade em uma escala que variou de 3 a 15 pontos (Figura 6.2), que foi classificado em diferentes graus de vulnerabilidade, conforme proposto (Tabela 5.7, Capítulo 5). O processamento dos dados foi realizado nas três áreas estudadas.

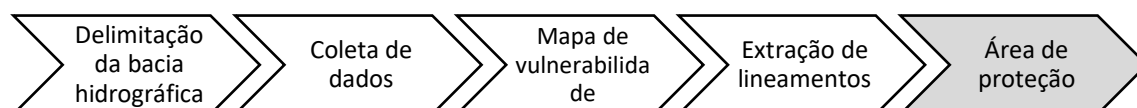
6.4. Extração de Lineamentos



Após a confecção do mapa de vulnerabilidade, uma vez que se trata de um aquífero fraturado, o próximo passo foi a extração de lineamentos. A confecção do mapa de lineamentos das áreas de estudo foi feita de forma manual a partir da ferramenta de edição do *ArcGis 10.2*. Para a extração de lineamentos aparentes, foi utilizado o Modelo Digital de Terreno (MDT), elaborado

a partir de dados SRTM, fornecido pela Terracap e considerou somente pontos no nível do solo, isentos de vegetação e elementos que não pertencem ao solo. Utilizando a ferramenta *hillshade* do *Arctoolbox*, foram aplicados quatro filtros de iluminação na imagem (000°, 045°, 090° e 315°), que consistem no ângulo azimutal da fonte de luz. Esses filtros tiveram a função de destacar os lineamentos em diferentes ângulos de sombreamento do relevo. Assim, a extração foi feita usando a imagem com os quatro ângulos de modo a facilitar a visualização das linhas de relevo. Para complementar e melhorar os resultados, foram utilizadas imagens do *Google Earth* com o objetivo de tracejar algumas feições de drenagens retilíneas. O resultado é mostrado na Figura 6.3.

6.5. Área de Proteção



Com os produtos gerados (bacia hidrográfica, mapa de vulnerabilidade e lineamentos) foi possível gerar os mapas integrados das três áreas de estudo. Posteriormente foram analisadas as informações produzidas, que consistiu em verificar a previsão do fluxo subterrâneo a partir das curvas de nível, das linhas de drenagem e do limite da bacia hidrográfica. Foram avaliados também os graus de vulnerabilidade natural à contaminação, considerando os parâmetros solo, declividade, geologia/hidrogeologia e os lineamentos estruturais. Com essa análise e com as regras propostas foram geradas as zonas de proteção, especificadas em seguida.

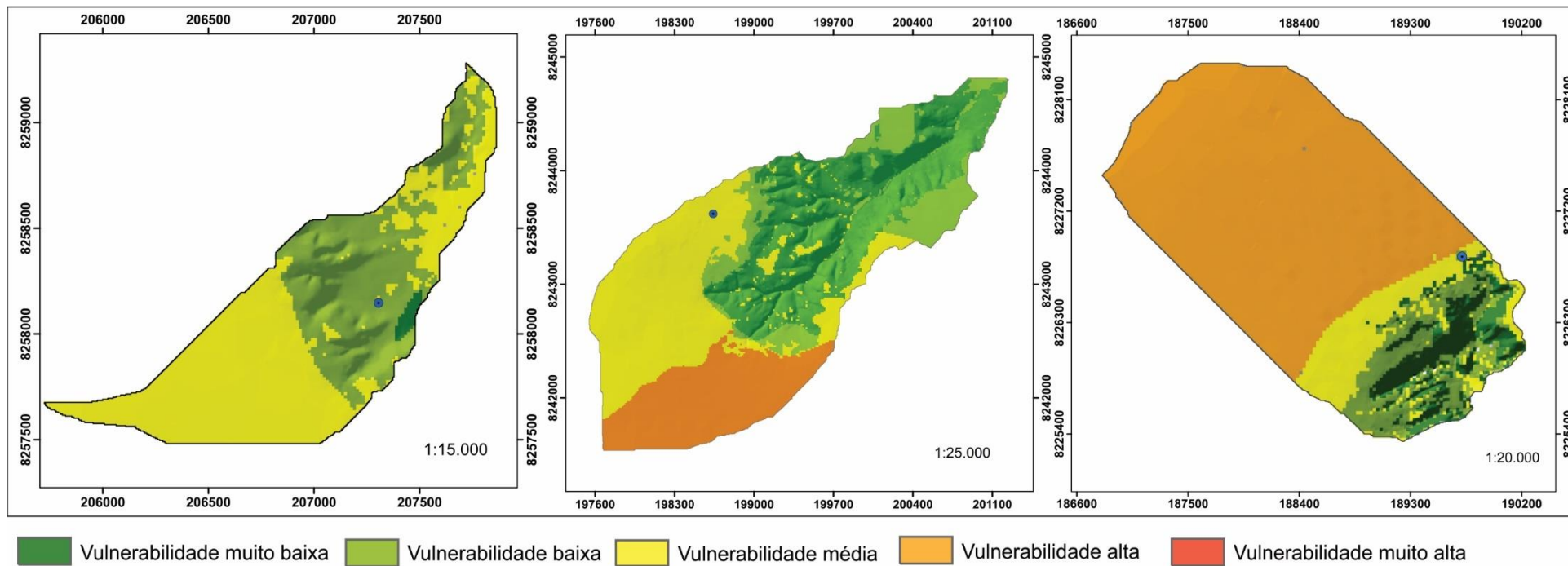


Figura 6.2. Mapa de vulnerabilidade das Áreas 1, 2 e 3 (nessa ordem).

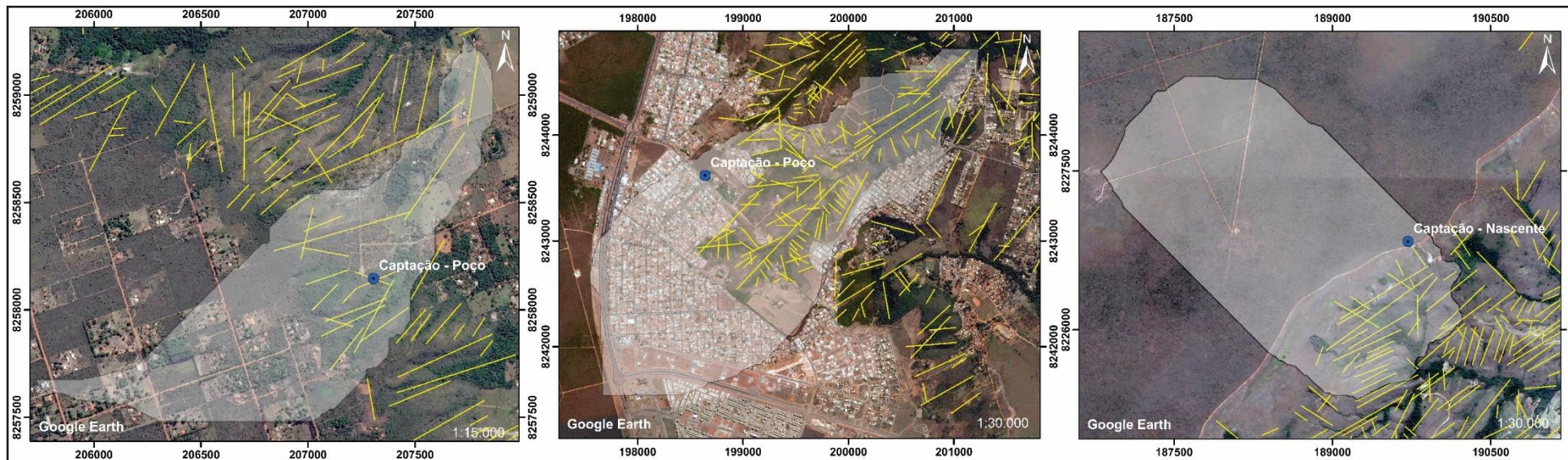


Figura 6.3. Mapa de lineamentos estruturais das Áreas 1, 2 e 3 (nessa ordem).

6.5.1. Área 1 - Chácara Dom Bosco

O poço da Área 1 está localizado na Chácara Dom Bosco e atualmente ainda não possui Portaria de Lavra para envasamento de água mineral (Figura 6.4). O sistema aquífero é do tipo fraturado livre (domínio fraturado), cuja bacia está inserida na Formação Córrego do Sansão (Metarritmito Argiloso) do Grupo Paranoá, pertencente ao subsistema hidrogeológico R4, com vazões médias de $6,0 \text{ m}^3/\text{h}$ e com índice de fraturamento interconectado de 1%, de acordo com relatório técnico da ADASA. É recoberto por solos do domínio poroso do subsistema P1 (Latosolo, espessura > 5 metros) e P4 (Cambissolo, espessura $< 1\text{m}$). O poço está situado em um baixo topográfico, com presença predominante de Cambissolo Háplico. A porção a montante da captação é representada por uma borda de chapada, que consiste em uma importante área de recarga e onde há predominância de Latossolo Vermelho-Amarelo. A recarga desses aquíferos ocorre por meio de infiltração de águas de chuva através do domínio poroso que alcança e ocupa as zonas de fraturas.



Figura 6.4. Processo de construção do poço da Área 1.

Zona de contribuição (ZC) - Área 1

A partir do mapa integrado (Figura 6.5), verifica-se que a previsão de fluxo subterrâneo ocorre no sentido SW-NE. O grau de vulnerabilidade variou de baixo (até cerca de 500 metros a montante do poço) a médio (na principal área de recarga da bacia). Em relação aos lineamentos

aparentes, nota-se que existem alguns próximos ao poço que provavelmente favorecem a percolação de fluido e direcionam o fluxo subterrâneo.

A delimitação da zona de contribuição foi feita a partir da metodologia proposta, que consistiu na análise do mapa integrado e na aplicação das regras sugeridas. Foram constatados dois diferentes graus de vulnerabilidade a montante do poço. Para vulnerabilidade baixa, foi aplicado um *buffer* de 300 metros nas adjacências da captação. O *buffer* consiste em uma ferramenta para determinar uma área a partir local específico. Na região de vulnerabilidade média, foi aplicado um *buffer* de 500 metros, conforme proposto na Tabela 5.8, Capítulo 5. Com o auxílio dessas áreas circulares, a zona de proteção foi traçada a montante no sentido do fluxo e sempre dentro do limite da bacia hidrográfica e foi feita em segmentos de retas Norte-Sul ou Leste-Oeste verdadeiros para se adequar aos padrões do DNPM. A jusante, a área foi reduzida em cerca de 50%. Posteriormente, analisando os lineamentos próximos e direcionados ao poço, foram destacadas nove feições lineares relevantes, que estenderam a área de proteção. O resultado da definição da zona de contribuição pode ser visualizado na Figura 6.5.

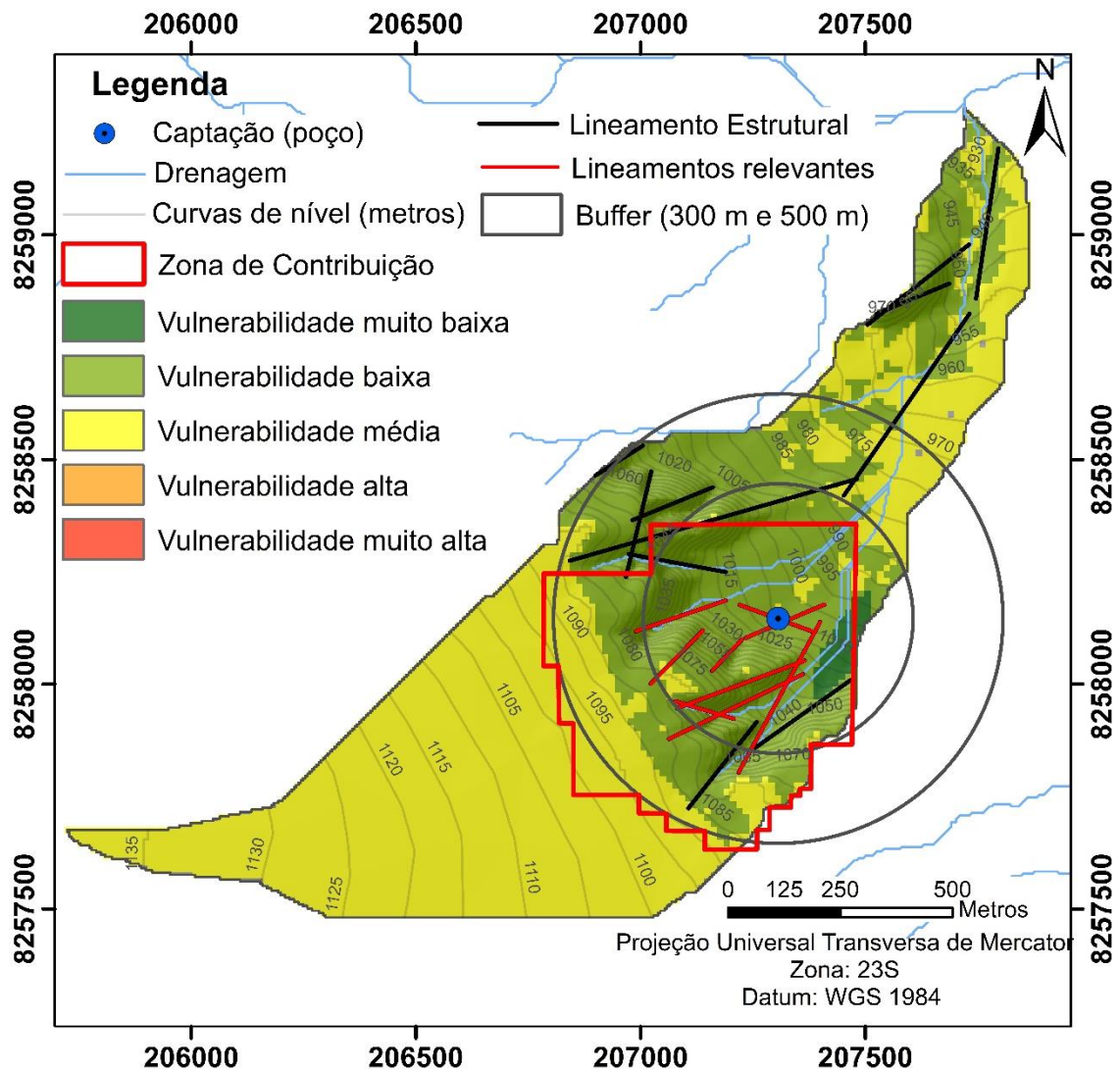


Figura 6.5. Mapa integrado e etapas de elaboração da zona de contribuição da área 1.

Zona de influência e transporte (ZI e ZT) - Área 1

Para definir a zona de influência foi utilizada a Tabela 5.1, Capítulo 5, que propõe, de forma alternativa, as distâncias mínimas para o limite da ZI a partir das características da zona vadosa e da profundidade do nível estático. O teste de bombeamento mostrou um valor de nível estático de 5,25 metros. A zona vadosa é representada pelo sistema hidrogeológico P1 (Latossolo), cujo valor de porosidade efetiva utilizado foi de 10% (ADASA, 2007). Assim, o raio final para delimitação da ZI foi de 40 metros. Como os perímetros de proteção são usualmente delimitados em segmentos de retas Norte-Sul, Leste-Oeste verdadeiros, conforme os padrões do DNPM, foi desenhada uma área quadrada a partir da área circular (raio de 40 metros). Para delimitação da zona de transporte, foi realizada a avaliação do raio calculado fixo para as características da área estudada e para um tempo de trânsito de 100 dias, o que resultou em um raio de 109 metros, considerando o fator de

segurança de 1,3, já que os dados são conhecidos nas três áreas. Assim, foi escolhida uma redução de 75% da zona de contribuição, que gerou uma distância a montante da captação de cerca de 150 metros. O resultado das três zonas de proteção é apresentado na Figura 6.6.

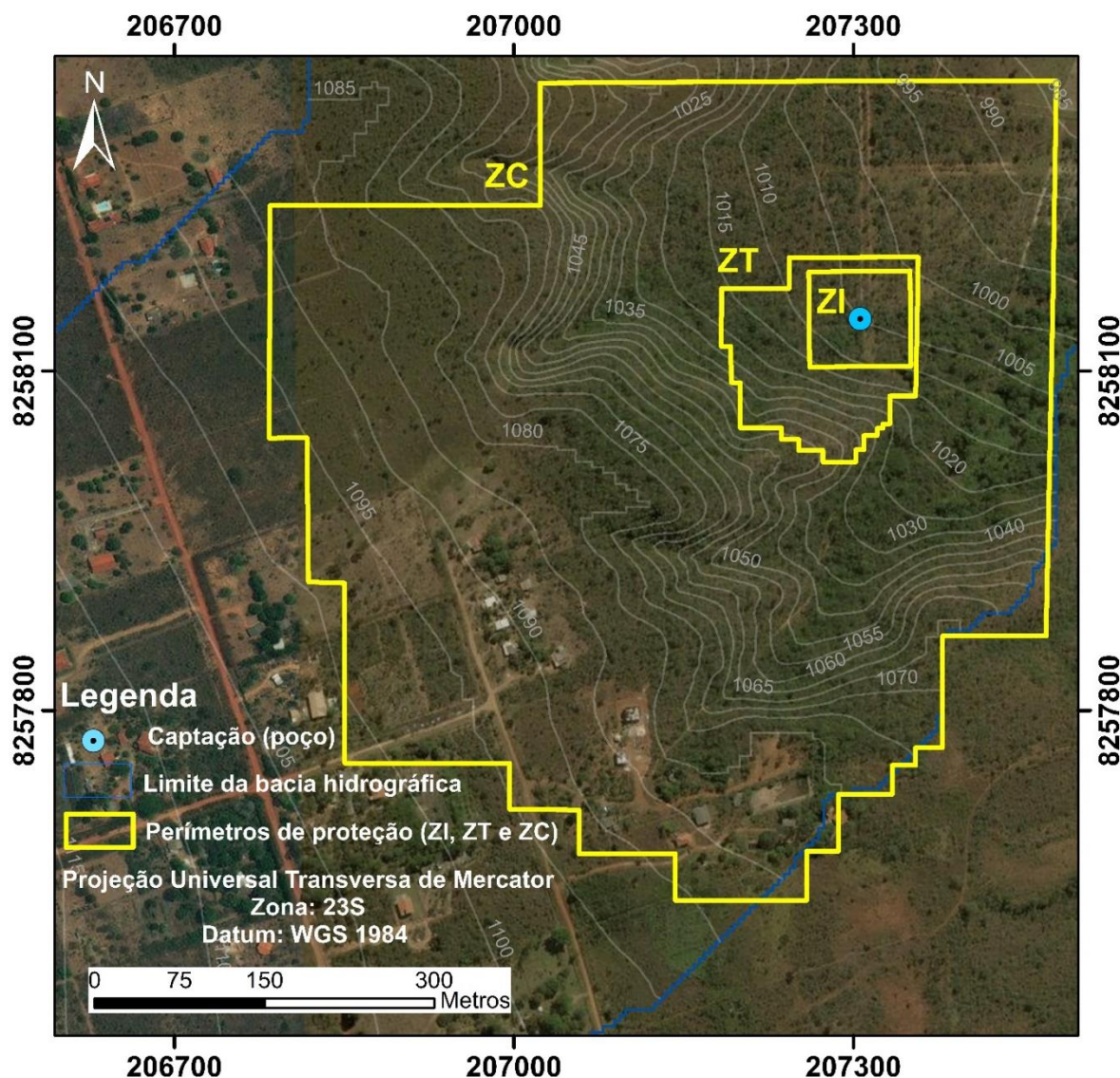


Figura 6.6. Mapa com os três perímetros de proteção (ZI, ZT e ZC) da Área 1.

6.5.2. Área 2 - Água Mineral Hydrate

A Área 2 representa um poço pertencente a Distribuidora de Água Mineral Natural Hydrate, localizada no Setor Habitacional Jardim Botânico (Figura 6.7). O aquífero é do tipo fraturado livre. A área da bacia hidrográfica está inserida em três diferentes subsistemas aquíferos: R₃/Q₃ (quartzito médio) e R₄ (metarritmito argiloso) do Grupo Paranoá e F (filitos) do Grupo Canastra. O poço está localizado mais precisamente no subsistema R₃/Q₃, caracterizado por apresentar espessura de até 150 metros e vazão média de 12m³/h, com índice de fraturamento

interconectado de 2%. O domínio poroso é representado por Latossolos do Sistema P₁, caracterizado por ser homogêneo e com baixa anisotropia, tendo como função filtrar o reservatório.



Figura 6.7. Localização da fonte de água mineral Hydrate.

Zona de Contribuição (ZC) - Área 2

Com auxílio do mapa integrado, verificou-se que a direção preferencial do fluxo é de oeste para leste. Algumas feições lineares podem ser visualizadas a jusante da captação e apesar dos lineamentos estarem aparentes apenas nos Cambissolos, o mais provável é que eles se estendam em toda a área representada pelo Latossolo. Houve uma grande variação de níveis de vulnerabilidade na bacia hidrográfica, porém próximo ao poço ocorrem vulnerabilidades média e baixa. O poço está situado em uma área relativamente plana e com elevada taxa de ocupação urbana decorrente de condomínios residenciais que utilizam predominantemente sistema de saneamento *in situ*.

Para a delimitação da zona de contribuição da Área 2 foi analisado o mapa integrado, que mostrou previsão de fluxo subterrâneo na direção oeste-leste. Foi destacada vulnerabilidade média a montante da captação e vulnerabilidade baixa a jusante. Para auxiliar na delimitação da ZC foram criados dois *buffers*, de 300 metros e 500 metros ao redor da captação de acordo com os diferentes graus de vulnerabilidade. Os limites da ZC foram traçados aproximadamente na demarcação dos *buffers* gerados, respeitando a área da bacia hidrográfica. Na região a jusante do poço foi feita uma redução da área. Os lineamentos foram marcados para visualização do fluxo, porém eles não interferiram na forma do polígono, pois estão localizados a jusante do poço. O resultado pode ser observado na Figura 6.8.

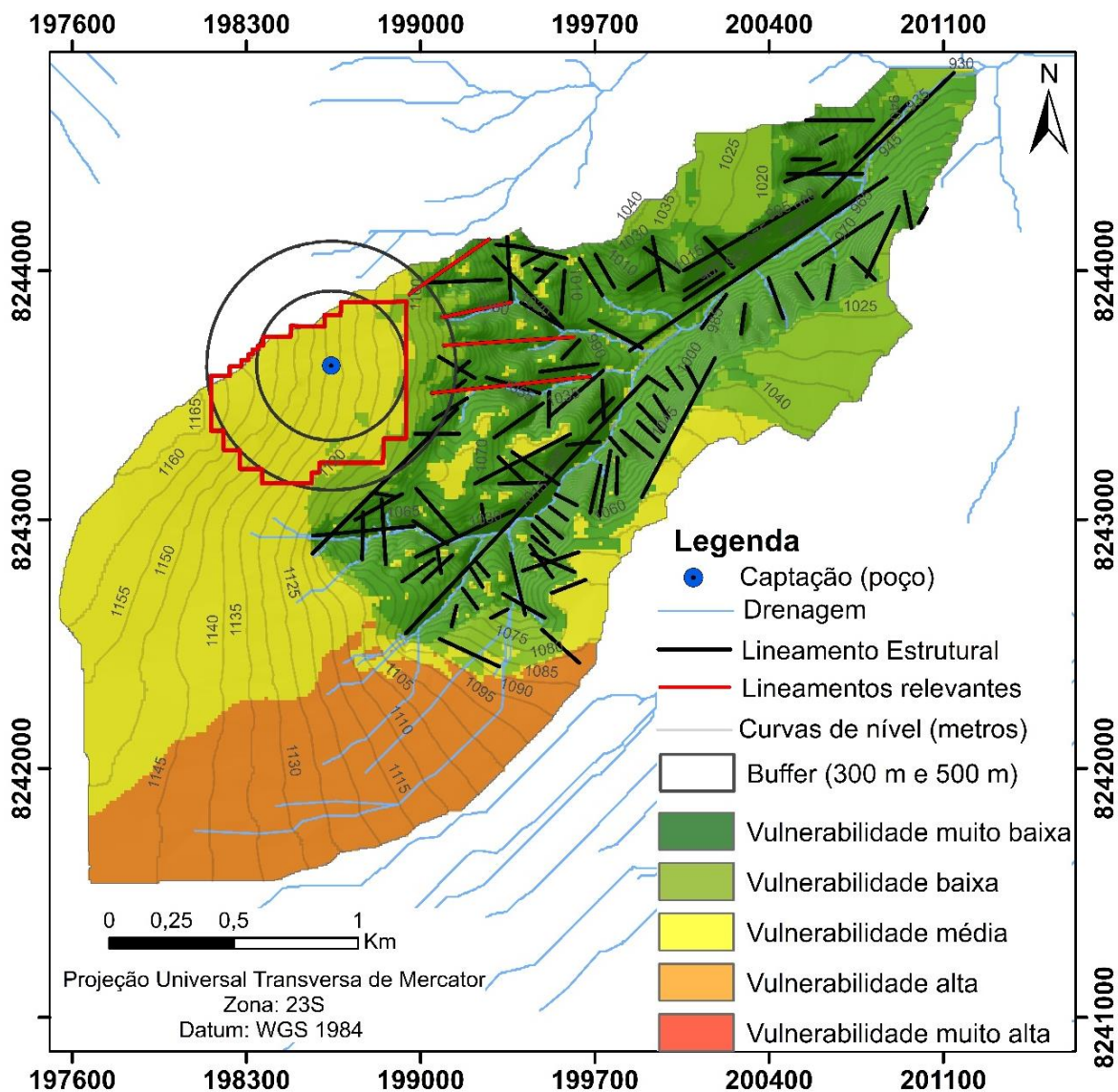


Figura 6.8. Mapa integrado da Área 2 com zona de contribuição definida.

Zona de Influência e de Transporte (ZI e ZT) - Área 2

A zona de influência foi delimitada a partir do valor do nível estático do poço e da porosidade efetiva na zona vadosa. O teste de bombeamento mostrou nível estático de 12,28 metros, a uma vazão medida de $7\text{m}^3/\text{h}$. A zona vadosa onde está localizado o poço é representada pelo sistema do domínio poroso P_1 , com presença predominante de Latossolos, cuja porosidade efetiva é sugerida pelo Relatório de Consultoria Técnica da ADASA como sendo de 10%. Com isso, considerando a Tabela 5.1, Capítulo 5, a zona de influência foi de 30 metros a partir da captação. Para a definição da zona de transporte foi determinado o raio calculado fixo, cujo tamanho do raio foi de 60 metros para um tempo de trânsito de 100 dias. Assim, a ZT foi definida

por meio da redução em 75% da ZC, o resultado foi uma distância a montante da captação de cerca de 150 metros. A representação das três zonas é apresentada no mapa da Figura 6.9.

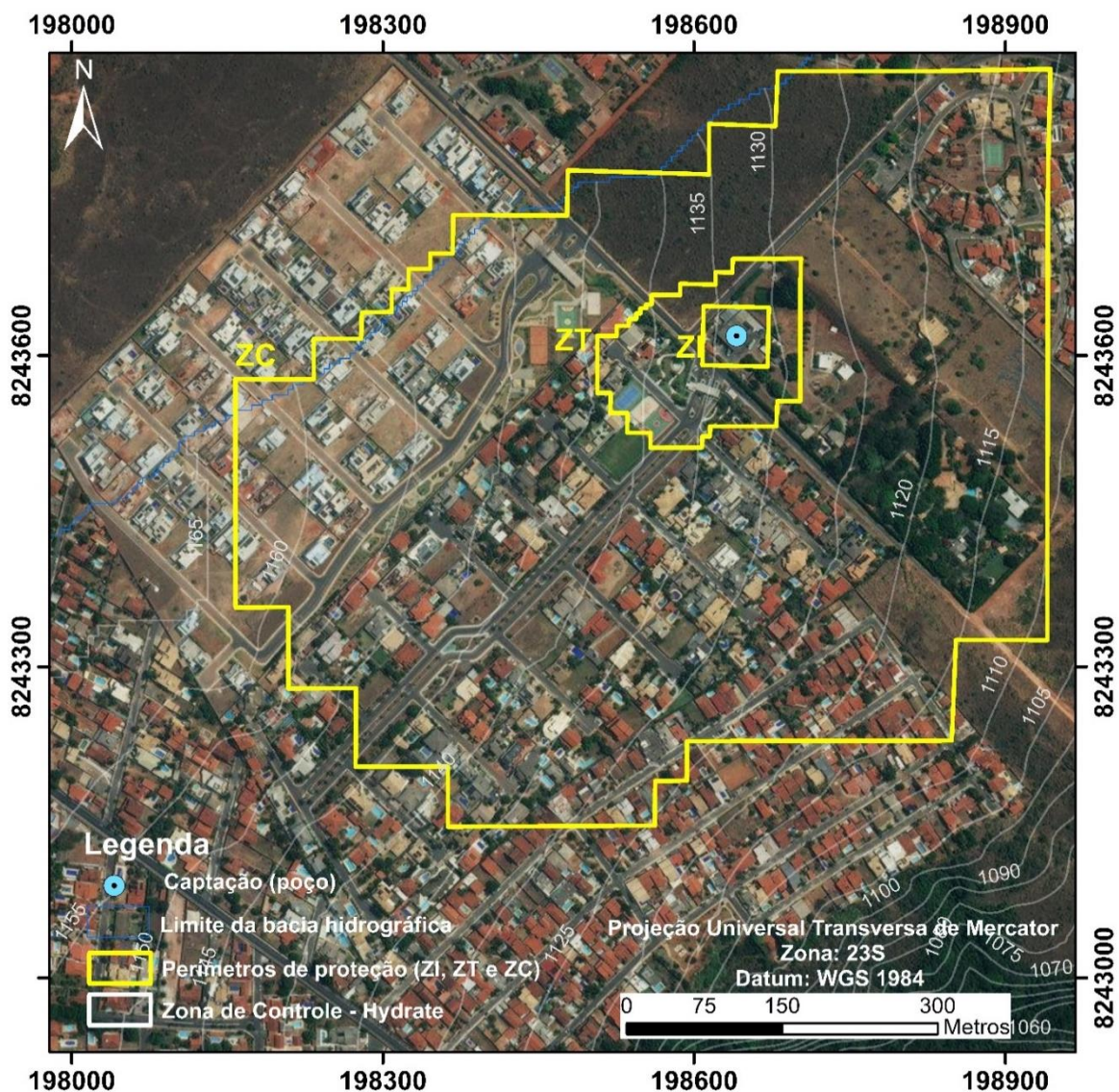


Figura 6.9. Mapa com os três perímetros de proteção (ZI, ZT e ZC) da Área 2.

6.5.3. Área 3 - Água Mineral Ibiá

A captação da Área 3 é feita por uma nascente para envase, denominada de Água Mineral Ibiá (Figura 6.10). É classificada como uma nascente mista (contato/fratura), envolvendo o contato entre os subsistemas R₃/Q₃ (quartzito médio) e R₄ (metarritmito argiloso) do Grupo Paranoá com solos e saprolitos e ainda controlada por lineamentos (associados ao sistema de fraturas). No domínio poroso estão presentes: Latossolo Vermelho, Gleissolo Háptico e Plintossolo Pétrico.



Figura 6.10. Localização da fonte da água mineral Ibiá, incluindo panorama de sua zona de proteção.

Zona de Contribuição (ZC) - Área 3

No traçado da zona de contribuição da Área 3, o mapa integrado mostrou uma previsão de fluxo subterrâneo na direção NW-SE, evidenciado pelas linhas de drenagem predominantemente paralelas, pelas curvas de nível e pelo contorno da bacia hidrográfica. A vulnerabilidade natural mostrou níveis variando de baixo a muito baixo a jusante da captação e médio a alto a montante. Portanto, foram criados três *buffers* (300, 500 e 750 metros) para auxiliar na definição do contorno. Assim, optou-se por manter uma distância de 750 metros em toda a área de recarga a montante da nascente e onde a vulnerabilidade mostrou alto grau. Em locais de vulnerabilidade média e baixa, essa distância foi reduzida para 500 e 300 metros. Quanto à análise dos lineamentos estruturais, foram evidenciados três mais significativos, na qual se optou por proteger integralmente aquele com que está diretamente ligado a captação. O resultado do limite da zona de contribuição pode ser verificado na Figura 6.11.

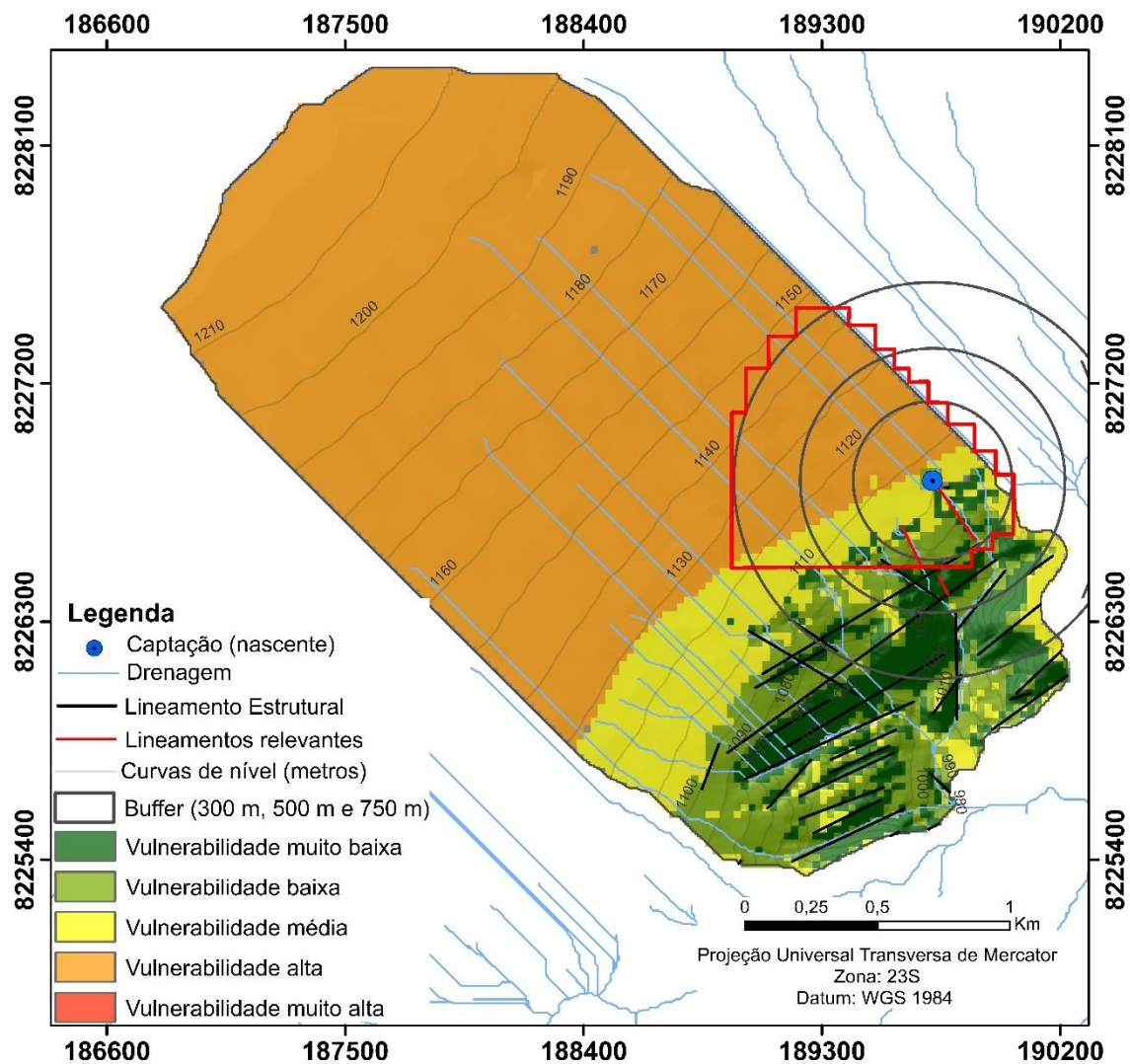


Figura 6.11. Mapa integrado e etapas de elaboração da zona de contribuição da Área 3.

Zona de influência e de transporte (ZI e ZT) - Área 3

Para delimitação da zona de influência, por se tratar de uma fonte natural, sem cone de rebaixamento associado ao bombeamento, foi considerado um raio de 70 metros a partir da captação conforme a sugestão metodológica, uma vez que as nascentes estão mais expostas à contaminação em relação aos poços, pois não existem revestimentos de proteção exigidos na construção de poços tubulares. Além disso, a nascente em questão está associada a um extenso lineamento de drenagem. A ZI foi delimitada em segmentos de reta Norte-Sul, Leste-Oeste, a partir do raio proposto. Para zona de transporte foi feito o cálculo do raio calculado fixo para um tempo de trânsito de 100 dias, que resultou em um raio de 74 metros, essa distância foi considerada pouca para a zona de transporte, por isso, foi aplicada a redução de 75% da zona de contribuição, que gerou uma área com limite do perímetro de proteção de cerca de 170 metros a montante da captação. As três áreas de proteção são mostradas na Figura 6.12.

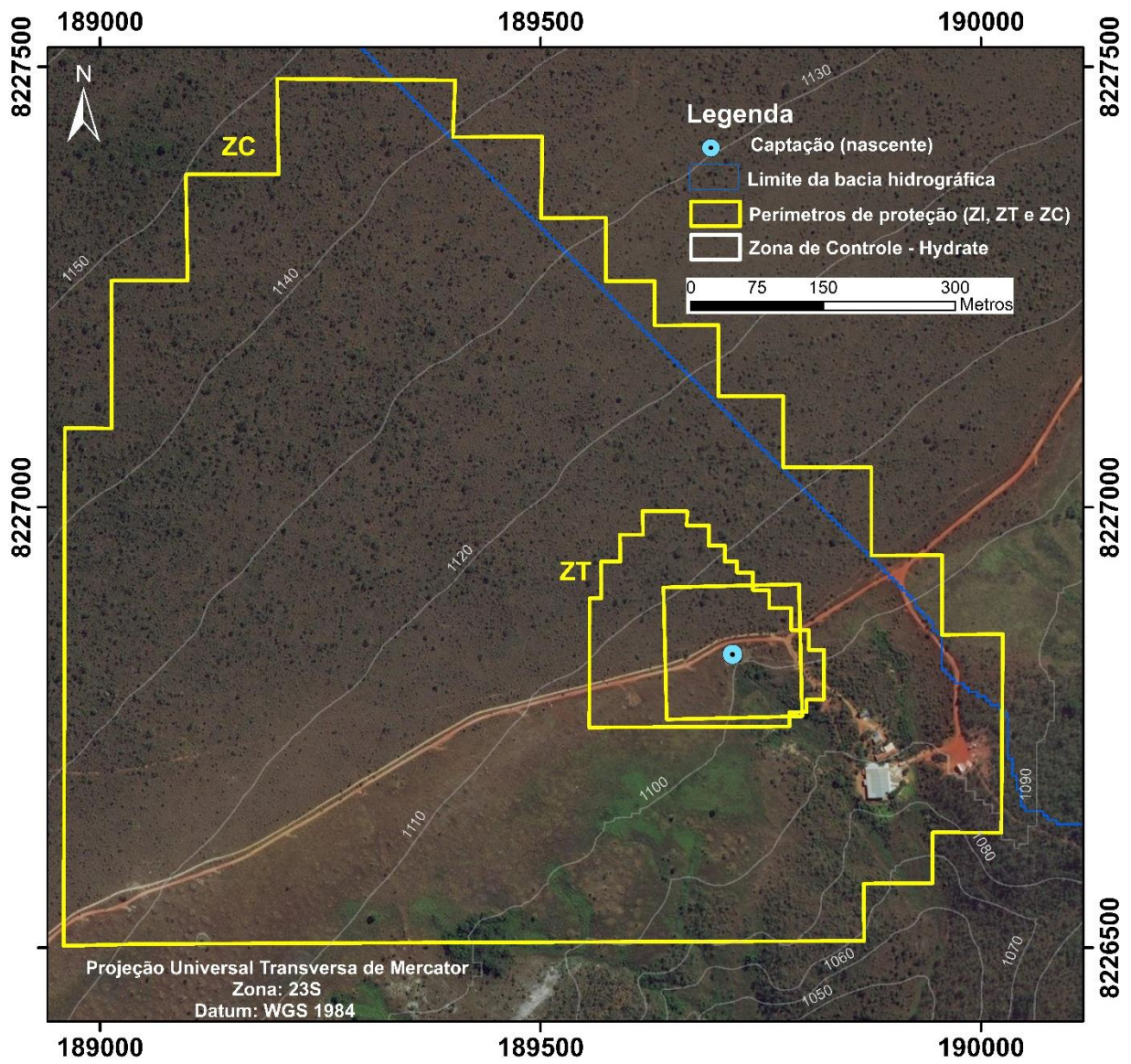


Figura 6.12. Mapa com os três perímetros de proteção (ZI, ZT e ZC) da Área 3.

CAPÍTULO 7. ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a aplicação da metodologia proposta nas áreas de estudo, os resultados foram analisados e comparados com os perímetros de proteção da zona de contribuição já definidos nos processos minerários das respectivas áreas, adquiridos a partir do Sistema de Informações Geográficas da Mineração - SIGMINE do DNPM. Na base de dados do referido sistema somente constam os polígonos da zona de contribuição, pois equivalem aos limites mais externos e por isso são utilizados para fins de análise de controle de áreas.

As três zonas de proteção são relevantes quando se trata de proteção de poço ou nascente, porém a zona de contribuição se caracteriza como a mais importante, pois precisa ser delimitada em função da área de recarga e das características hidrogeológicas locais. Por essa razão e devido a metodologia desta pesquisa ter sido elaborada principalmente para definição da ZC, as análises dos resultados estão descritas com mais detalhe para esta modalidade de área proteção.

7.1. Área 1 - Chácara Dom Bosco

A zona de contribuição da Área 1 (Figura 7.1) apresentou uma extensão de 39 ha, com dimensões maiores a montante da captação, alcançando distâncias do poço de até 600 metros em função do grau de vulnerabilidade e dos lineamentos estruturais. Isso permitiu uma proteção adequada na área de recarga, onde já existem poucas ocupações, que são representadas por algumas chácaras. Para a zona de influência, foi adotada uma distância de 40 metros do poço. O limite da ZI também se mostrou apropriado, considerando que o nível estático não é suficientemente profundo para garantir uma proteção vertical em um aquífero livre, com porosidade efetiva apresentando indicador moderado quanto à vulnerabilidade à contaminação. Com relação à zona de transporte, a redução de 75% da área foi suficiente para atingir um alcance de 150 metros da captação até seu limite. Para as características hidrogeológicas do terreno, essa distância é satisfatória para eliminação por retenção de grande parte de possíveis bactérias e vírus que possam ser inseridos no meio.

Devido ao fato de a Área 1 estar em fase de elaboração de relatório de pesquisa junto ao DNPM para fins de produção de água mineral, ela ainda não apresenta área de proteção da fonte, e por esse motivo, não foi possível fazer comparação entre áreas de proteção.

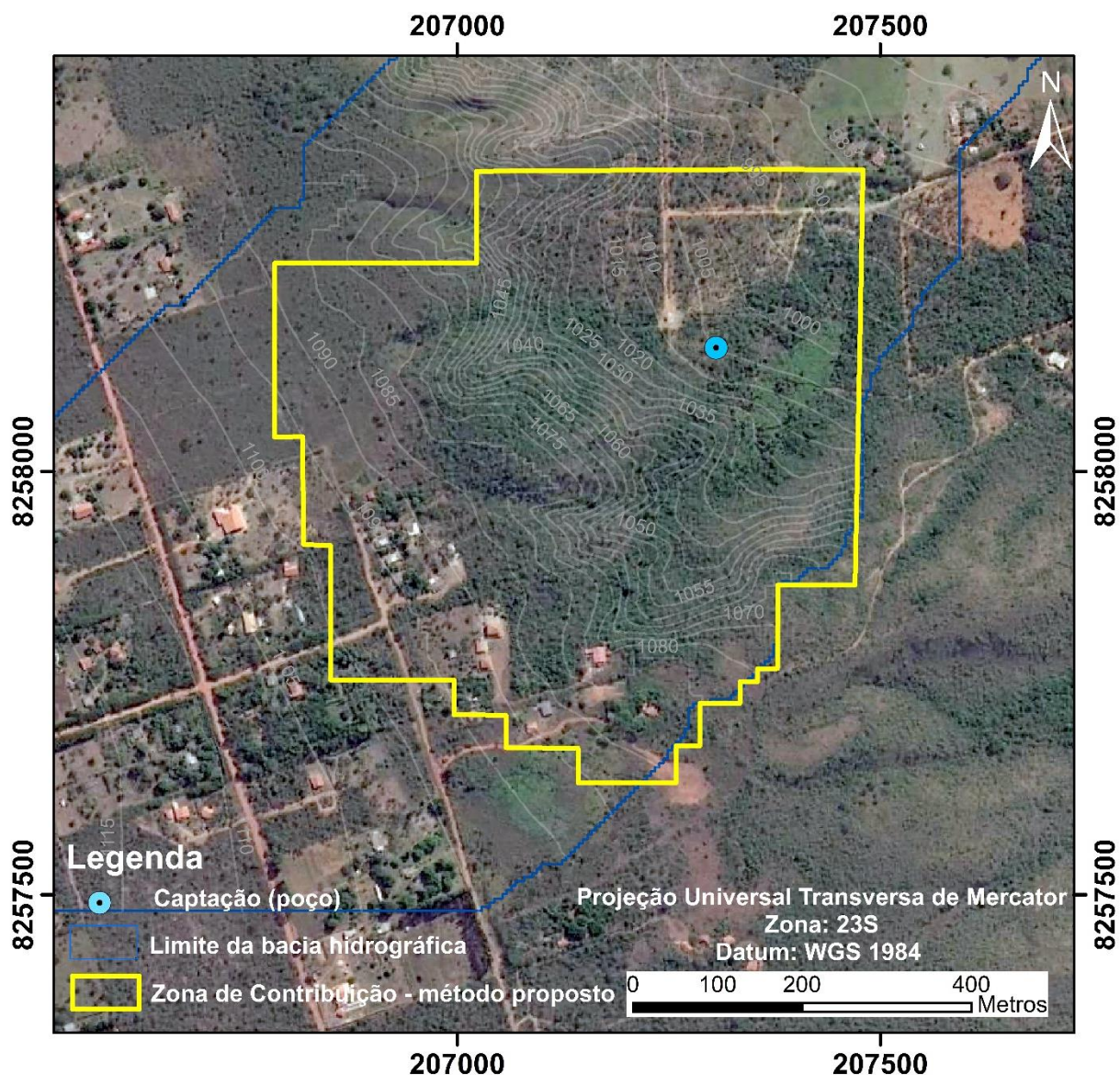


Figura 7.1. Limite da zona de contribuição da Área 1.

7.2. Área 2 - Água Mineral Hydrate

O polígono gerado a partir da metodologia proposta, referente a zona de contribuição, apresenta uma área de 42 ha, com maior dimensão a montante da captação. Abrange uma ampla proteção na área de recarga, com distância até o poço de aproximadamente 600 metros e que se prolonga até o limite da bacia hidrográfica. A região a jusante foi reduzida expressivamente, em função da restrita possibilidade de contaminação devido à direção de fluxo subterrâneo e do grande gradiente hidráulica em direção a jusante. Fazendo uma comparação com a área de proteção previamente definida durante a execução do Relatório Final de Pesquisa para envasamento de água mineral pela Companhia Hydrate, nota-se que o formato das áreas é parecido, porém a área

definida pela Hydrate é mais ampla, com 92 ha, o que equivale a mais do dobro da dimensão da área elaborada a partir da metodologia proposta. Entretanto, foi delimitada uma área muito extensa a jusante da captação, com tamanho desnecessário devido ao improvável fluxo naquela direção, que seguramente poderia ser reduzida. Apesar disso, ambas as zonas de contribuição estão adequadas quanto a proteção da região a montante do poço, que corresponde a área de recarga e a porção da poligonal mais susceptível a contaminação.

Atualmente esta área de recarga está completamente ocupada por condomínios residenciais não planejados, com predominância de sistemas de saneamento *in situ*, que acarreta no despejo de efluentes domésticos no solo e que atinge a zona saturada (Figura 7.2). De acordo com dados consultados no sistema Cadastro Mineiro do DNPM, o relatório final de pesquisa da Água Mineral Hydrate foi aprovado em 1999, com Portaria de Lavra publicada em 2000. No início da implantação da indústria, havia pouca ocupação na extensão equivalente a área de recarga, evidenciando que a zona de proteção previamente definida não foi respeitada, provavelmente em função de fatores econômicos, visto que é uma região com elevada valorização imobiliária, sobretudo para fins residenciais. Os efeitos causados pela ocupação no local estão acarretando ao longo dos anos em uma alteração dos componentes originais da água captada, especialmente no aumento nos índices de nitrato, que de acordo com os rótulos da água mineral envasada, mostrava valores menores que 1 mg/L no início da produção e cerca de 10 anos depois, a quantidade de nitrato apresentada foi de cerca de 6 mg/L. Se a zona de contribuição tivesse sido respeitada quanto a restrição de uso, possivelmente a qualidade da água teria sido mantida. Isso evidencia a importância da utilização de áreas de proteção para prevenir a contaminação e a poluição da água subterrânea que é captada e utilizada para consumo, que deve ser feita utilizando uma metodologia com precisão razoável, para que se obtenha uma área de dimensões suficientes para garantir uma proteção adequada.

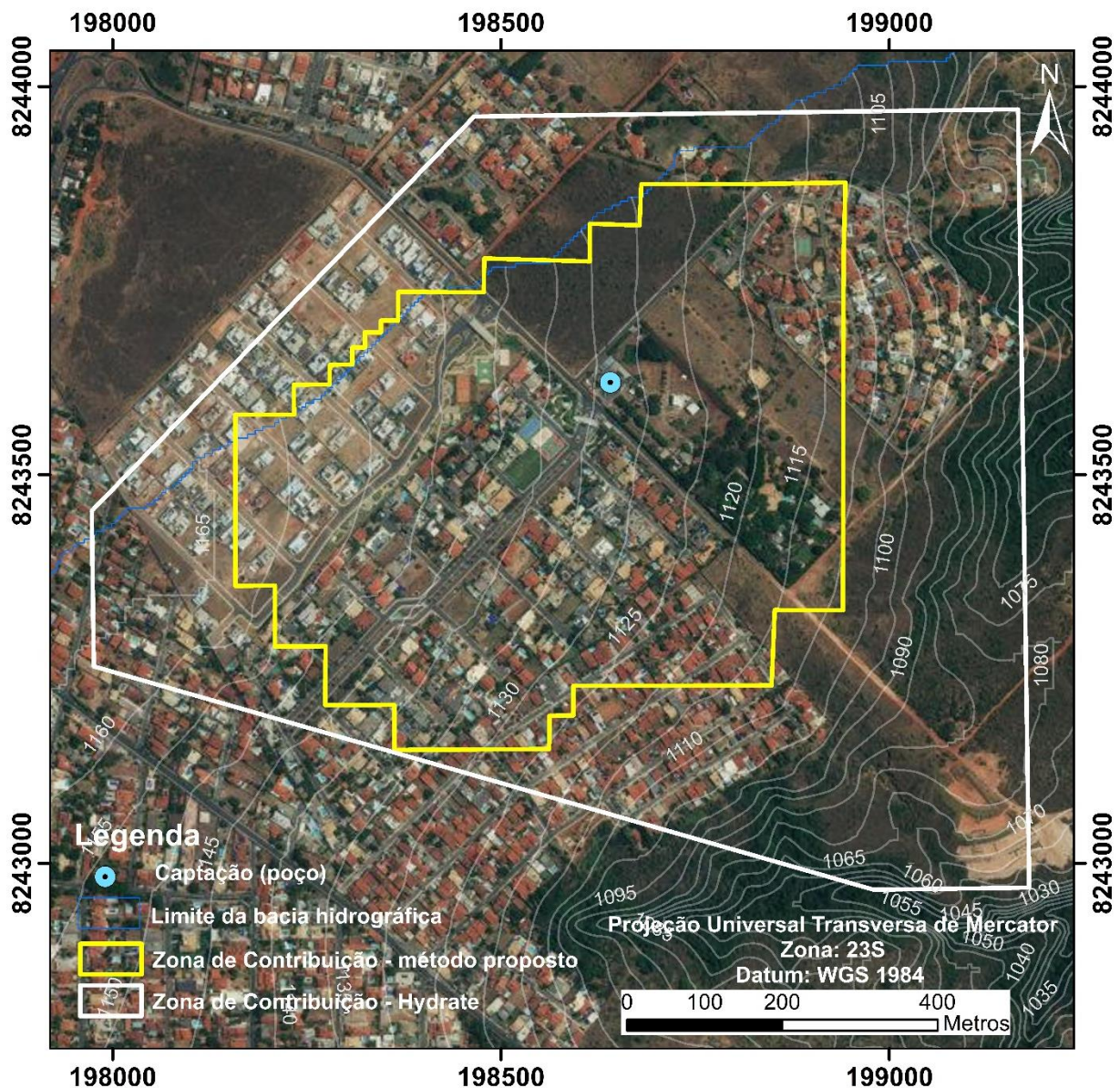


Figura 7.2. Limites das zonas de contribuição da Água Mineral Hydrate e pela metodologia proposta.

Para a zona de influência, o polígono equivalente a uma distância de 30 metros foi considerado suficiente para a adequada proteção nesta área, visto que o nível estático é relativamente profundo (12,28 metros), o que permite maior tempo para retenção do contaminante na zona vadosa, que apresenta grau de vulnerabilidade moderado. A aplicação de uma redução de 75% da ZC para definição da zona de transporte resultou em uma distância a montante do poço e na direção do fluxo de 150 metros. Essa distância é satisfatória para eliminar a maior parte da contaminação microbiológica.

7.3. Área 3 - Água Mineral Ibiá

O limite da zona de contribuição da Área 3 resultou em um polígono de 76 ha, com distância a montante da captação de 750 metros, que engloba grande parte da área de recarga. O polígono gerado pela empresa Ibiá possui uma área de 37 ha, equivalente à metade da ZC utilizando a metodologia proposta (Figura 7.3). Basicamente o que diferencia um polígono do outro é a proteção da área de recarga, que é maior pela metodologia proposta, devido ao grau de vulnerabilidade natural, que se mostrou alto em toda essa extensão. A distância a montante entre o limite da área de proteção e a captação no perímetro proposto pela Ibiá foi de cerca de 200 metros, o que não garante proteção para o grau de vulnerabilidade presente no local, que foi resultado da baixa declividade do terreno, da presença de Latossolos e das características geológicas locais, constituída essencialmente por quartzitos médios, com elevado índice de fraturamento.

A fonte de água mineral Ibiá está localizada em um terreno funcional da Marinha do Brasil, com praticamente nenhum tipo de ocupação, por essa razão, o risco de contaminação atualmente é irrelevante. Porém, na metodologia proposta, o risco não é considerado na delimitação do polígono de proteção, sendo somente levados em conta os aspectos naturais do meio físico, uma vez que a vulnerabilidade natural é fixa e estática no tempo e espaço, exceto quando há alterações no conhecimento hidrogeológico ou em função de mudanças no regime hidráulico. Em oposição, a carga contaminante é frequentemente variável, de forma que se fosse considerada, haveria necessidade de análises de risco constantes. Esse entendimento é razoável, visto que o objetivo da área de proteção é evitar ocupações que possam causar algum tipo de risco, se ele não existe ou é pouco provável, isso é excelente e garante a qualidade da água por muitas décadas. Dessa forma, a área de proteção deve continuar existindo com suas dimensões originais em função das características hidrogeológicas para que a qualidade da água subterrânea seja mantida e para que futuras ocupações somente ocorram fora do limite estabelecido. Se a área está inserida em um local com dinâmica urbana, carece que seja feito um monitoramento periódico das fontes de contaminação.

O limite da zona de influência de 70 metros de distância da captação é adequado para fins de proteção com elevada restrição, ainda mais se tratando de nascentes. O polígono gerado a partir da redução de 75% da ZC resultou em uma distância de cerca de 170 metros na direção do fluxo e a montante da captação, o que garante excelente proteção para essa área.

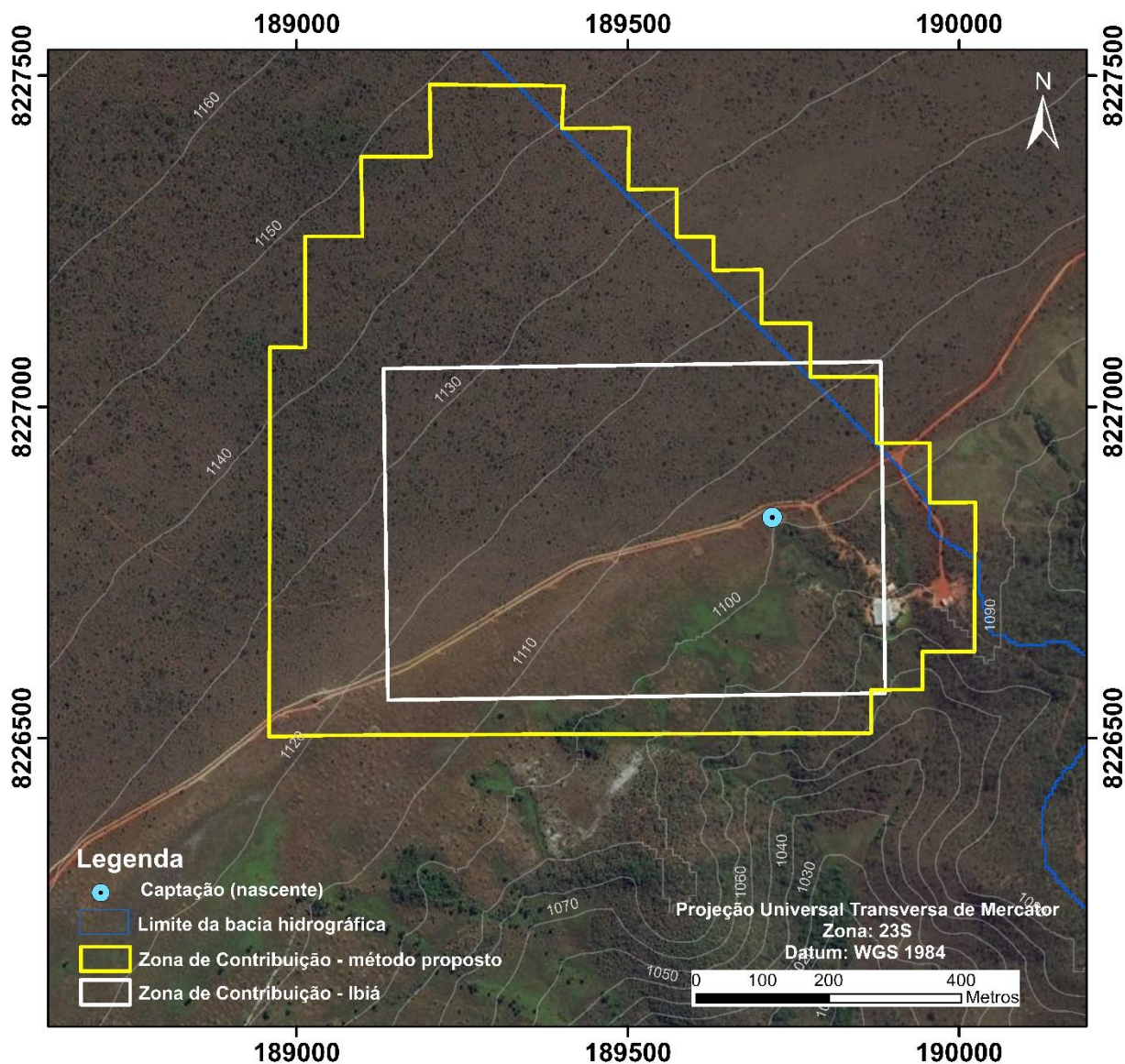


Figura 7.3. Limites das zonas de contribuição da Água Mineral Ibiá e pela metodologia proposta.

As áreas de proteção de captação, quando definidas e aplicadas de forma adequada, e quando seus limites são respeitados, representam eficientes instrumentos para garantia da segurança de poços e nascentes contra possíveis fontes de contaminação, pois impedem ou restringem as atividades potencialmente poluidoras em locais com características que lhe conferem maior vulnerabilidade.

Os conceitos para cada zona que compõe o perímetro de proteção, de acordo com a portaria vigente, em algumas situações, não são práticos em termos de aplicabilidade, já que, dependendo das características do terreno, pode resultar em áreas muito extensas. Por isso, é importante que, independentemente do método utilizado, seja analisada também a aplicabilidade e funcionalidade das áreas propostas.

A definição dos perímetros de proteção no Distrito Federal e sua aplicação a partir da metodologia proposta utilizou ferramentas relativamente simples, onde foi possível obter limites confiáveis e funcionais em termos práticos para proteção de captações. Quando os perímetros de proteção, principalmente a zona de contribuição, não são definidos a partir das características hidrogeológicas do aquífero, os limites dessas áreas podem ser falhos, com contornos impróprios, pois não levam em consideração as anisotropias do meio. Portanto, a adequada elaboração e aplicação das áreas de proteção são essenciais para minimizar os riscos de contaminação para preservar a qualidade atual e futura da água captada a partir dos mananciais subterrâneos. Cabe destacar, que a delimitação de perímetros de proteção tem como objetivo, em primeiro lugar, reduzir os riscos e não impedir a contaminação, já que para isso, devem ser realizadas em conjuntos outras medidas de gestão.

7.4. Recomendações Sobre Gestão

No presente trabalho, foi demonstrada a importância sobre a adequada proteção da água subterrânea, tanto como fonte de recurso hídrico, como recurso mineral. Essa proteção pode ser feita por meio de diferentes medidas. A determinação de perímetros de proteção nas adjacências de captações é apenas uma dessas ações que auxiliam no controle da produção e dispersão de poluentes. Para sua adequada aplicação é importante o conhecimento sobre os parâmetros hidrológicos e hidrogeológicos que caracterizam os sistemas aquíferos, pois são indispensáveis para a correta delimitação de áreas de proteção. Além dessas informações, são necessários técnicos capacitados para a sua aplicação, bem como para sua análise no âmbito do Departamento Nacional da Produção Mineral - DNPM.

Apesar da exigência da elaboração de perímetros de proteção para o envasamento de água mineral, de acordo com a Portaria nº 231/1998 do DNPM, o que ocorre na prática é que essas áreas de proteção das captações ainda são ocupadas e utilizadas de forma inadequada, principalmente em função de fatores econômicos e territoriais. Isso gera preocupação para o produtor, pois coloca em risco a qualidade da água envasada, podendo ficar a fonte inutilizada. Um exemplo mostrado foi o da Água Mineral Hydrate, cujos valores referentes ao nitrato evidenciam alteração nas características naturais da água em função de ocupações dentro dos limites de proteção. Valores de nitrato obtidos a partir da leitura de rótulos de garrafas desta marca indicam a seguinte evolução de valores: 0,46 mg/L em 1999; 2,90 mg/L em 2005 e 6,11 mg/L em 2011.

Embora haja pressões de desenvolvimento econômico e industrial quando se trata do uso de recursos naturais, ainda mais se for levado em consideração que parte das indústrias de captação de água mineral está localizada próximo aos centros consumidores, é importante que as esferas do setor público (federal, estadual e municipal) trabalhem de forma integrada para garantir a proteção dessas áreas, sendo necessária conciliação entre os diversos interesses, com a finalidade de se estabelecer quais são as atividades prioritárias nos locais de conflito.

Apesar de a Constituição Federal distinguir a competência administrativa entre as águas minerais e as águas comuns, sendo o domínio e o direito de outorga das águas minerais da União e das águas comuns dos Estados e Distrito Federal, a integração entre a gestão de recursos hídricos e a gestão de águas minerais está prevista na resolução n.º 76 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos, que determina também que o órgão gestor de recurso hídrico competente e o órgão gestor de recursos minerais, devam buscar o compartilhamento de informações e a compatibilização de procedimentos, definindo de forma conjunta o conteúdo e os estudos técnicos necessários, consideradas as legislações específicas vigentes. Dentre as informações a serem compartilhadas, inclui-se o perímetro de proteção de fonte instituído pelo órgão gestor de recursos minerais, a fim de que seja considerado pelos órgãos gestores de recursos hídricos. Portanto, a gestão integrada já está prevista na referida lei e deve ser colocada em prática para que o gerenciamento dos recursos hídricos e minerais possa ocorrer de forma interligada e efetiva, de modo que haja esforços e recursos por parte de todos os atores envolvidos para que possam participar em conjunto das ações e decisões necessárias visando garantir que os limites das áreas de proteção sejam respeitados.

Diante do cenário geral sobre as áreas de proteção de poços/nascentes, algumas medidas de gestão são indicadas:

- ✓ Discussões institucionais sobre a problemática de ocupação inadequada das áreas de proteção e reuniões com órgãos gestores da ocupação urbana e dos definidores de políticas de crescimento das cidades;
- ✓ Anuência do órgão gestor do município sobre os vetores de crescimento e sobre o planejamento de ampliação dos espaços municipais (distrito industrial, loteamentos, áreas protegidas, etc.);
- ✓ Gestão descentralizada, envolvendo a participação do Poder Público, dos usuários e das comunidades;
- ✓ Integração entre as Instituições no âmbito, federal, estadual e municipal para discussões sobre o uso do solo em áreas de proteção;

- ✓ Gestão integrada e compartilhamento de informações para os diferentes usos da água subterrânea;
- ✓ Verificar a possibilidade de que as áreas de proteção sejam determinadas no início dos estudos para o relatório final e não no fim (como é feito atualmente). Assim, os empreendedores podem avaliar os riscos de concluir os investimentos ou até eventualmente adquirir o terreno no limite das áreas de proteção para evitar problemas no futuro caso a área de proteção não seja respeitada;
- ✓ Verificar a possibilidade de proibição de locação de captações de água mineral em áreas urbanas e peri-urbanas em vistas aos maiores riscos de contaminação.
- ✓ Capacitação dos gestores para fins de análise de perímetros de proteção;
- ✓ Elaboração de guias técnicos para elaboração e avaliação de perímetros de proteção;
- ✓ Incentivo para estudos a respeito da proteção das águas subterrâneas;
- ✓ Realização de novos estudos hidrogeológicos e atualização dos existentes;
- ✓ Confecção de mapas regionais de vulnerabilidade à contaminação de aquíferos;
- ✓ Conscientização da sociedade sobre aspectos ambientais relativos ao uso racional da água e do solo;
- ✓ Despejo de resíduos sólidos em aterros sanitários;
- ✓ Proteção de áreas de recarga natural de importantes mananciais subterrâneos;
- ✓ Inclusão das áreas de proteção e de áreas de recarga natural no planejamento territorial das cidades e municípios;
- ✓ Cadastro e monitoramento das atividades existentes e de novas ocupações;
- ✓ Instalação de sistemas de recarga nos locais onde existam atividades que possam comprometer a qualidade da água captada;
- ✓ Realização de análises laboratoriais com maior frequência em casos de ocupações já existentes e que estejam comprometendo a qualidade da água;
- ✓ Utilização de perímetros de proteção em poços de abastecimento público e
- ✓ Fiscalização sobre cumprimento das normas técnicas de construção de poços.

CAPÍTULO 8. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados obtidos a partir da pesquisa realizada, as principais conclusões do estudo são apresentadas:

✓ Esta pesquisa alcançou o propósito inicial, que foi a proposição de metodologia simples, eficiente e praticável para delimitação de zonas de proteção de poços/nascentes para envasamento de água mineral e/ou potável de mesa;

✓ A metodologia foi proposta com maior detalhe para a zona de contribuição, que consiste na área mais importante, com restrição de uso e ocupação bem definidos;

✓ O trabalho abordou de forma mais detalhada todas as etapas metodológicas, podendo ser utilizado como guia para delimitação de áreas de proteção;

✓ A metodologia pode ser aplicada em meio poroso e fraturado e é mais indicada para aquíferos livres, onde existe maior necessidade de proteção;

✓ A aplicação da metodologia proposta não é complexa e exige técnicas simples de geoprocessamento (que é uma técnica amplamente conhecida por diferentes profissionais);

✓ A utilização de Sistema de Informação Geográfica para delimitação de áreas de proteção tornou o processo mais prático e seguro;

✓ A maior parte dos dados foi obtida por meio de informações bibliográficas e fontes públicas. Entretanto, trabalhos de campo foram fundamentais para a ampliação das escalas e percepção dos diferentes aspectos.

✓ A proposta para delimitação da zona de influência (ZI) resultou em limites poucos extensos em relação a ZT e ZC, porém o conceito dessa área é que realmente seja menor, visto que seu uso e ocupação devem ser totalmente restritos, impedindo quaisquer atividades. Seu tamanho variou em função do nível estático e da porosidade efetiva da zona vadosa;

✓ A proposta metodológica para a determinação da zona de transporte (ZT), de reduzir em 75% a zona de contribuição, resultou em áreas com tamanho suficiente para eliminar a maior parte dos contaminantes bacteriológicos. Destaca-se ainda que foram considerados os aspectos hidrogeológicos, visto que esses foram definidos a partir das regras anteriormente aplicadas na elaboração da ZC;

✓ A proposta metodológica para delimitação da ZC considerou importantes critérios técnicos, que resultou em áreas de proteção com geometria e tamanho adequados, com limite de proteção razoável.

✓ A proposta não é adequada para aquíferos cársticos, devido a sua extrema heterogeneidade, necessitando de estudos mais específicos e complexos;

✓ As restrições de uso do solo propostas foram fundamentadas a partir de pesquisas bibliográficas e sua utilização pode ser útil para auxiliar na decisão quanto as atividades permitidas e proibidas em cada zona;

✓ Ocupações sem planejamento provocam problemas na qualidade da água subterrânea, devido, sobretudo, à impermeabilização de áreas de recarga e aos sistemas de saneamento utilizados, como fossas sépticas e sumidouro, gerando carga contaminante que comprovadamente alcança aos aquíferos;

✓ Quando as áreas de proteção não são respeitadas geram grande risco de contaminação e de poluição da água subterrânea captada, evidenciando a importância de sua utilização;

✓ O risco de contaminação não foi um critério adotado na delimitação do polígono de proteção, uma vez que essa informação deve ser analisada de forma separada;

✓ Em locais com maior ocupação, o monitoramento de qualidade da água e das fontes de poluição precisa ser mais frequente;

✓ A pesquisa permitiu sugerir recomendação sobre a gestão da água subterrânea para fins de proteção de captações e efetivamente contribui com as discussões a respeito da temática de proteção de captações de águas subterrâneas;

✓ Os resultados desta pesquisa também podem ser extensivos às captações comuns de águas subterrâneas, isto é, podem ser aplicados a captações para abastecimento público a partir da operação de poços tubulares. Para tanto, seriam necessárias algumas adaptações para minimizar as dimensões das áreas de proteção e

✓ A comparação entre as poligonais de proteção (zona de contribuição) das empresas de águas minerais Hydrate e Ibiá mostrou que as áreas foram respectivamente, superestimada e subestimada, resultando em delimitação de área excessiva a jusante da captação e eventual exposição da captação a cargas contaminantes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ab'Saber, A.N. 1977. Os domínios morfoclimáticos na América do Sul: primeira aproximação. *Geomorfologia*, **53**: 1-23.
- ABGE - Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental. 1996. Ensaio de permeabilidade em solos - orientações para sua execução no campo. 3 ed. São Paulo, Boletim n°.4, 35 p.
- ADASA - Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal. 2007. Relatório de Consultoria Técnica. Gestão de recursos hídricos subterrâneos no Distrito Federal: diretrizes, legislação, critérios técnicos, sistema de informação geográfica e operacionalização. 153 p.
- Ainsworth, S. & Jehn, P. Source Water Protection: What's in It for You? 2005. *Groundwater Monitoring & Remediation*. p.44-51.
- Alemanha. 1957. Lei de Gestão da Água, de 27 de julho de 1957, revisada em 31 de julho de 2009. Dispõe sobre a proteção e utilização das águas superficiais e subterrâneas, assim como as regras relativas.
- Aller, L., Bennett, T., Lehr, J.H., Petty, R.J., Hackett, G. 1987. DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings. U.S. Environmental Protection Agency, 455 p.
- ANA - Agência Nacional das Águas. 2010. Atlas Brasil: Abastecimento urbano de água: panorama nacional. Engercops, Cobrape, Brasília, vol. 1, 2010, 70 p.
- Arraes, T.M. 2008. *Proposição de critérios e métodos para delimitação de bacias hidrogeológicas*. Dissertação de mestrado - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 108 p.
- Barreto, C.E.A.G.; Wendland, E.; Gomes, L.H.; Marcussi, F.F.N. 2006. A interação rio-aquífero na bacia do Ribeirão da Onça: aplicação de equação empírica para estimativa do escoamento de base. In: Anais do XIV Congresso Brasileiro de Água Subterrânea, Curitiba. 20 p.
- Bear, J. & Verrujit, A. 1990. *Modelling Groundwater Flow and Pollution*. Dordrecht, The Netherlands: D. Reidel Publ. Co. 414 p.
- Bernardo, S. 1986. *Manual de irrigação*. Viçosa: UFV, 596 p.
- Bertolo, R. A.; Hirata, R.; Fernandes, A. 2007. Hidrogeoquímica das águas minerais envasadas do Brasil. *Revista Brasileira de Geociências* **37**(3): 515-529.
- Brasil. 1934. Decreto nº 24.643, de 10 de julho de 1934. Decreta o código das águas.
- Brasil. 1945. Decreto-lei nº 7.841 de 8 de agosto de 1945. Código das Águas Minerais.
- Brasil. 1988. Constituição da República Federativa do Brasil: promulgada em 5 de outubro de 1988.
- Brasil. 1997. Lei nº 9.433 de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional dos Recursos Hídricos.
- Brasil. 1998. Portaria n. 231 de 31 de julho de 1998 do DNPM. Regulamenta as Áreas de Proteção das Fontes de Águas Minerais.
- Brasil. 2012. Lei Complementar nº 854 de 15 de outubro de 2012. Plano Diretor de Ordenamento Territorial do Distrito Federal – PDOT.
- Brasil. 2017. Lei nº 13.575, de 26 de dezembro de 2017. Cria a Agência Nacional de Mineração (ANM) e extingue o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM).

- Bricalli, L.L. & Mello, C.L. 2013. Padrões de lineamentos relacionados à litoestrutura e ao fraturamento neotectônico (estado do Espírito Santo, SE do Brasil). *Revista Brasileira de Geomorfologia* **14** (3): 301-311.
- Campos, J.E.G. & Freitas-silva, F.H. 1998. Hidrogeologia do Distrito Federal. *In: Inventário hidrogeológico e dos recursos hídricos superficiais do Distrito Federal. Parte I. Vol II. IEMA-SEMATEC/Universidade de Brasília. (Inédito). 66p.*
- Campos, J.E.G. & Souza, M.T. 2001. O papel dos regolitos nos processos de recarga de aquíferos do Distrito Federal. *Rev. Esc. Minas*, **54** (3): 191-198.
- Campos, J.E.G. 2004. Hidrogeologia do Distrito Federal: bases para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos. *Revista Brasileira de Geociências*, **34**(1): 41-48.
- Campos, J.E.G. 2010. Meio Físico do Distrito Federal. *In: Zoneamento Ecológico-Econômico do Distrito Federal. SEDUMAH, GDF.*
- Campos, J.E.G., Dardenne, M.A., Freitas-Silva, F.H., Martins-Ferreira M.A.C. 2013. Geologia do Grupo Paranoá na porção externa da Faixa Brasília. *Brazilian Journal of Geology*, **43**(3):461-476.
- Campos, J.E.G. & Cunha, L. S. 2015. Caracterização Hidrogeológica da Ocorrência de Aquífero Termal no Distrito Federal. São Paulo, UNESP. *Geociências* **34**(2): 210-223.
- Carvalho, A.M. & Hirata, R. 2012. Avaliação de métodos para a proteção dos poços de abastecimento público do Estado de São Paulo. *Revista do Instituto de Geociências – USP. Geol. USP, Sér. cient., São Paulo*, **12**(1):53-70.
- Cerda, A. 1995. Seasonal variability of infiltration rates under contrasting slope conditions in southeast Spain. *Geoderma*, **69**: 217-232.
- Cherubini, C. 2008. A Modeling Approach for the Study of Contamination in a Fractured Aquifer. *Geotechnical and Geological Engineering*, **26** (5): 519 - 533.
- Chow, R; Frind M. E; Frind E.O.; Jones J.P.; Sousa M.R.; Rudolph D.L.; Molson J.W.; Nowak W. 2016. Delineating baseflow contribution areas for streams – A model and methods comparison. *Journal of Contaminant Hydrology*. **195**: 11-22.
- Coimbra, A.R.S.R. 1987. Balanço hídrico preliminar do Distrito Federal. *In: Inventário hidrogeológico do Distrito Federal (GDF/CAESB) Brasília DF. p. 50-78.*
- Cordova, R & Makin, B. 1995. Arkansas' Wellhead Protection Program, with Discussion of Delineation Methodology. *Journal of the Arkansas Academy of Science*, **49**: 41 – 44.
- Davis, S. N. 1969. Porosity and permeability of natural materials. *Flow Through Porous Media*, ed. R.J.M De Wiest. Academic Press, New York, p. 54-89.
- Diersch, H.G. 2014. *FEFLOW - Finite element modeling of flow, mass and heat transport in porous and fractured media*, Springer, Berlin Heidelberg, XXXV, 996 p.
- Distrito Federal. 2001a. Câmara legislativa do Distrito Federal. Lei nº 2725, de 13 de junho de 2001. Institui a Política de Recursos Hídricos e cria o Sistema de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Distrito Federal. 15 p.
- Distrito Federal. 2001b. Decreto nº 22.358, de 31 de agosto de 2001. Governo do Distrito Federal. Dispõe sobre a outorga de direito de uso de água subterrânea no território do Distrito Federal de que trata o inciso II, do artigo 12, da Lei n.º 2.725 de 13 de junho de 2001, e dá outras providências. 10 p.
- DNPM. Departamento Nacional de Produção Mineral. Sumário Mineral da Água Mineral, anos-base 2010, 2011, 2012, 2013 e 2014.

- Doveri, M.; Menichini, M.; Scozzari, A. 2015. *Protection of Groundwater Resources: Worldwide Regulations and Scientific Approaches*. Istituto di Geoscienze e Georisorse-Consiglio Nazionale delle Ricerche (IGG-CNR). Pisa, Italy, p. 13-30.
- DVGW (Deutscher Vereinigung des Gas - und Wasserfaches). 1995. Code of Practice W 101: Guidelines on Drinking Water Protection Areas, Germany.
- EEA (European Environment Agency). 1999. Groundwater Quality and Quantity in Europe. Environmental Assessment Report, no. 3, 112 p.
- Embrapa - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 1978. Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Distrito Federal. Boletim Técnico nº53. Rio de Janeiro, Brazil. 455 p.
- Embrapa - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 2013. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 3 ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 353 p.
- Estados Unidos da América. 1974. Lei Federal *Safe Drinking Water Act (SDWA)*, de 1974. Estabelece padrões para a qualidade da água potável e implementa programas técnicos e financeiros para garantir a segurança da água potável.
- Faria, A. 1995. *Estratigrafia e sistemas deposicionais do Grupo Paranoá nas áreas de Cristalina, Distrito Federal e São João D'Aliança - Alto Paraíso de Goiás*. Brasília: Universidade de Brasília/ Instituto de Geociências. (Ph.D. thesis). 199 p.
- Farr, T.G. & Kobrick, M. 2000. Shuttle Radar Topography Mission produces a wealth of data. *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, **81**: 583 -585.
- Feitosa, F.A.C. & Manoel Filho, J. 2000. *Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações*. 2ª ed. CPRM. 269 p.
- Fetter, C.W. 2000. *Applied hydrogeology*. Fourth Edition. New Jersey: Prentice Hall. 598 p.
- Fetter, C. W. 2008. *Contaminant Hydrogeology*. Second Edition, 500 p.
- Fiori, J.P.O.; Campos, J.E.G.; Almeida, L. 2010. Variabilidade da condutividade hidráulica das principais classes de solos do Estado de Goiás. *Geociências*, **29**(2): 229-235.
- Foster, S. 1987. *Fundamental concept in aquifer vulnerability pollution risk and protection strategy*. Proc. Intl. Conf. Vulnerability of soil and groundwater to pollution Nordwijk, The Netherlands, p. 69-86.
- Foster, S. S. D.; Skinner, A. C. 1995. Groundwater protection: the science and practice of land surface zoning, *Groundwater Quality: Remediation and Protection* (Proceedings of the Prague Conference, May 1995). IAHS Publ, **225**: 471-482.
- Foster, S.; Hirata, R.; Gomes, D.; D'elia, M.; Paris, M. 2006. Proteção da qualidade de águas subterrâneas – Guia para empresas de água, autoridades municipais e agências ambientais. Banco Mundial, Washington/EUA. 104 p.
- França. 1902. Lei de 15 de fevereiro de 1902. Lei sobre a proteção da saúde pública.
- França. 1953. Código da Saúde Pública, criado em 1953 (alterado)
- França. 1964. Lei nº 64-1245, de 16 de dezembro de 1964. Dispõe sobre o plano e a distribuição de água e a luta contra a poluição.
- França. 1992. Lei n. 92-3, de 3 de janeiro de 1992. Dispõe sobre a gestão equilibrada dos recursos hídricos.
- França. 2007. Decreto nº 2.007-49, de 11 de janeiro de 2007. Dispõe sobre a segurança da água destinada ao consumo humano.
- Freeze, R.A.; Cherry, J.A. 1979. *Groundwater*. New Jersey: Prentice-Hall; Englewood Cliffs, 603 p.

- Frind, E.O., Muhammed, D.S., Molson, J.W. 2002. Delineation of three-dimensional well capture zones for complex multi-aquifer systems. *Ground Water*, **40**(6): 586-598.
- Garcia, A.G. & Navarrete C.M. 2005. Protection of groundwater intended for human consumption in the water framework directive: strategies and regulations applied in some European countries. Polish Geological Institute Special Papers, p. 28-32.
- Hirata, R.C.A. 1994. Fundamentos e estratégias de proteção e controle da qualidade das águas subterrâneas. Estudo de casos no estado de São Paulo. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 195 p.
- INMET. Normais Climatológicas do Brasil (1961 - 1990). Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br>>. Acesso em maio de 2017.
- Iritani, M.A. & Ezaki, S. 2010. Roteiro Orientativo para Delimitação de Perímetro de Proteção de Poço. 1ª ed. São Paulo, SMA, IMESP, 60p.
- Itália. 2006. Decreto Legislativo n. 152 de 03 de abril de 2006. Dispõe sobre regulamentos ambientais.
- Johnson J. M. & Loáiciga H.A. 2017. Coupled Infiltration and Kinematic-Wave Runoff Simulation in Slopes: Implications for Slope Stability. Department of Geography, University of California, Santa Barbara. *Water*, **327**: 1-16.
- Kaiser, I.M. 2006. *Avaliação de métodos de composição de campos de precipitação para uso em modelos hidrológicos distribuídos*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Carlos, 273 p.
- Martins, E.S. & Baptista, G.M.M. 1998. Compartimentação geomorfológica e sistemas morfodinâmicos do Distrito Federal. In: Inventário hidrogeológico e dos recursos hídricos superficiais do Distrito Federal. IEMA/ SEMATEC/ UnB. Brasília. Parte II. 53p.
- Matos, B. 2001. *Avaliação da ocorrência e do transporte de microrganismos no aquífero freático do cemitério de Vila Nova Cachoeirinha, município de São Paulo*. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 114 p.
- McDonald, M.G. & Harbaugh, A.W. 1988. A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model. Techniques of Water-Resources Investigations. U.S. Geological Survey, 576 p.
- Meyboom, P. 1966. *Groundwater studies in the Assiniboine River drainage basin: I. The evaluation of a flow system in south-central Saskatchewan*, Bull. Geol. Surv. Can., 139, 65 p.
- Misstear B.D. & Daly D. 2000. Groundwater protection in a Celtic region: the Irish example. Geological Society, London, *Special Publications*, **182**:53-65.
- Moran, S.R.; Cherry, J.A.; Ulmer, J.H. 1976. An environmental assessment of 250 MMSCFD dry ash Surgi coal gasification facility in Dunn Country, North Dakota. Univ. North Dakota, Eng. Exp. Sta. Bull. 76-12-EES-01.
- Morbidegli, R., Saltalippi, C., Flammini, A., Cifrodelli, M., Corradini, C., and Govindaraju, R.S. 2015. Infiltration on sloping surfaces: Laboratory experimental evidence and implications for infiltration modelling. *Journal of Hydrology*, **523**: 79-85.
- Nascimento G.C.S. 2015. Modelo conceitual e numérico do aquífero hospedeiro de depósito polimetálico - Caçapava do Sul: Relações entre lavra e recursos hídricos subterrâneos. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília. 99 p.
- Neuman, S.P. 1972. Theory of flow in unconfined aquifers considering delayed gravity response of the water table. *Water Resources Research*. **8**(4): 1031-1045.
- Novaes Pinto, M. 1994a. Caracterização geomorfológica do Distrito Federal. In: Novaes Pinto, M. (org). Cerrado: Caracterização, Ocupação e Perspectivas. Brasília. Editora UnB. 2a ed., p.

285-320.

- Novaes Pinto, M. 1994b. Paisagens do cerrado no Distrito Federal. In: Novaes Pinto, M. (org). Cerrado: caracterização, ocupação e perspectivas. 2a ed. Brasília:UnB, p. 511-542.
- Pacheco, A. 1984. Análise das características técnicas e da legislação para uso e proteção das águas subterrâneas em meio urbano - Município de São Paulo. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 174 p.
- Peterson, R. 1954. Studies of the Bears paw Shale at a dam site. Proc. Amer. Soc. Civil Engrs., Soil Mech. Found. Div., vol 80, n. 476.
- Portugal. 1990. Decreto Lei n. 90 de 16 de março de 1990. Disciplina o regime geral de revelação e aproveitamento dos recursos geológicos.
- Portugal. 1999. Decreto-lei nº 382, de 22 de setembro de 1999. Estabelece as normas e os critérios para a delimitação de perímetros de proteção de captações de águas subterrâneas destinadas ao abastecimento público. Diário da República, Lisboa, 22 de setembro de 1999.
- Ribeiro, J.F. & Walter, B.M.T. 2008. As Principais Fitofisionomias do Bioma Cerrado. In: Sano S.M. *et al.* Cerrado: ecologia e flora. Brasília, DF. Embrapa, p. 151-212
- Romero, J.C. 1970. The movement of bacteria and viruses through porous media. *Ground Water*, **8**(2):37-48.
- São Paulo. 1988. Lei Estadual nº 6.134, de 02 de junho de 1988. Dispõe sobre a preservação dos depósitos naturais de águas subterrâneas do Estado de São Paulo, e dá outras providências. São Paulo.
- São Paulo. 1991. Decreto Estadual nº 32.955, de 07 de fevereiro de 1991. Regulamenta a Lei nº 6.134, de 2 de junho de 1988. São Paulo.
- Schmoll, O.; Howard G.; Chilton G.; Chorus I. 2006. Protecting Groundwater for Health: Managing the Quality of Drinking-water Sources, Londres. 697p.
- Stuart, W. T., Brown, E. A., Rhodehamel, E. C. 1954. *Groundwater investigations of the Marquette iron-mining district*. Michigan. Geological Survey Division. Technical Report. 92 p.
- Theis, C. V. 1935. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. Trans. Amer. Geophys. Union, 2, p. 519 – 524.
- Tomlin C.D. 1994. Map algebra: One perspective. *Landscape and Urban Planning*, **30**: 3-12.
- Toth, J., 1962. A theory of groundwater motion in a small drainage basin in central Alberta, Canada. *J. Geophys. Res.*, **67**: 4375-4387.
- Toth, J., 1963. A theoretical analysis of groundwater flow in a small drainage basin. *J. Geophys. Res.*, **68**: 4795-4812.
- Toth, J., 1966. Mapping and interpretation of field phenomena for groundwater reconnaissance in a prairie environment, Alberta, Canada. *Bull. Intern. Assoc. Sci. Hydrol.*, **11**(2): 1-49.
- Tucci, C.E.M. 1993. *Hidrologia: ciência e aplicação*. Porto Alegre: Editora da Universidade, 943p.
- Tushaar, S., Burke, J., Villholth, K., Angelica, M., Custodio, E., Daibes, F., Hoogesteger, J., Giordano, M., Girman, J. Van Der Gun, K., Kendy, E., Kijne, J., Llamas, R., Masiyandama, M., Margat, J., Marin, L., Peck, J., Rozelle, S., Sharma, B., Vincent, L. And Wang, J. 2007. Groundwater: A Global Assessment of Scale and Significance. CAWMA, Water for Food, Water for Life: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture. London/Colombo, Earthscan/International Water Management Institute (IWMI). p. 395 - 423

- U.S. Environmental Protection Agency (EPA). 1987. Guidelines for Delineation of Wellhead Protection Areas, Washington, DC, Office of groundwater protection, 212 p.
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA). 1993. Guidelines for Delineation of Wellhead Protection Areas, Washington, DC, Office of groundwater protection, EPA-440/5-93-001.
- UNESCO - United Nations Educational, Scientific and Cultural. 2017. Organization Wastewater The untapped resource: The United Nations World Water Development Report 2017.
- USGS - United States Geological Survey. 1998. Estimating Areas Contributing Recharge to Wells. Office of Ground Water. Denver, CO. 16 p.
- Walton, W. C. 1970. *Groundwater Resource Evaluation*. McGraw-Hill, New York. 664 p.
- Weber, J. & Weed, S. 1974. Effects of soil on biological activity of pesticides. *Jour. Series of North Caroline State*. University Agricultural Experiment Station. Paper 4.087. p. 223-256.
- Winter, T.C., Rosenberry, D.O., LaBaugh, J.W. 2003. Where does the groundwater in small watersheds come from? *Ground Water*, **41**: 989-1000.
- Witherspoon, P.A., J.C.S. Long, E.L. Majer, L.R. Myer. 1987. A New Seismic-Hydraulic Approach to Modeling Flow in Fractured Rocks. University of California, Berkeley, California, 34 p.
- WWAP - United Nations World Water Assessment Programme. 2012. The United Nations World Water Development Report 4: Managing Water under Uncertainty and Risk. Paris, UNESCO. Disponível em: <<http://www.unesco.org/>>. Acesso em 14 de novembro de 2016.
- Young, A.; Lau P. F.; Mclatchie A. S. 1964. Permeability studies of argillaceous rocks. *J. Geophys. Res.*, **69**: 4237-4245.
- ZEE. Zoneamento Ecológico Econômico do Distrito Federal. 2011. Disponível em: <<http://www.zee.df.gov.br>>. Acesso em maio de 2017.



DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL

PORTARIA Nº 231, de 31 DE JULHO DE 1998

DOU de 07/08/98

O DIRETOR-GERAL DO DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL - DNPM, no uso das atribuições que lhe confere a Portaria nº 340, de 15 de julho de 1992 e o Decreto de 07 de março de 1996, publicado no D.O.U. de 08 de março de 1996, e atendendo ao que estabelece o Art. nº 12, do Decreto-Lei nº 7.841/45, de 08 de agosto de 1945, Código de Águas Minerais e considerando que:

Considerando que a grande maioria das Fontes, Balneários e Estâncias de Águas Minerais e Potáveis de Mesa, naturais, em exploração no país, localiza-se próximo aos centros urbanos, distritos industriais, atividades agropecuárias, lixões e outros agentes poluentes;

Considerando que a água mineral uma vez poluída, descaracteriza a sua qualificação e que na maioria das vezes o processo é irreversível;

Considerando, finalmente, que o conhecimento do potencial hídrico subterrâneo da área e o seu dimensionamento, a sua preservação, a sua conservação e a racionalização do seu uso necessitam de estudos geológicos e hidrogeológicos de detalhe, estudos esses indispensáveis para a definição da área de proteção de uma fonte; resolve:

1. Os titulares de Alvarás de Pesquisa de água classificada como mineral e ou potável de mesa, naturais, e se o seu uso se destine a envase, balneário e estância hidromineral, devem apresentar a área de proteção de sua fonte, quando da apresentação do Relatório Final dos Trabalhos de Pesquisa;
2. Os concessionários que ainda não dispõem de áreas de proteção, deverão apresentar ao DNPM a área de proteção de sua fonte no prazo de 365 (trezentos e sessenta e cinco) dias a contar da publicação da presente portaria;
3. Aprovar a Metodologia de Estudos necessários à definição de Áreas de Proteção de Fontes, Balneários e Estâncias de Águas Minerais e Potáveis de Mesa, naturais, a seguir discriminada:

3.1. OBJETIVO

Regulamentar de acordo com o que estabelece o capítulo III, artigos 12 a 18 do Código de Águas Minerais, as ações e procedimentos necessários à definição de áreas de proteção das fontes, balneários e estâncias de águas minerais e potáveis de mesa em todo o território nacional, objetivando sua preservação, conservação e racionalização de uso.

3.2. FINALIDADES

Conhecer e definir as condições de ocorrência das fontes de águas minerais e potáveis de mesa; identificar a situação atual e potencial quanto aos riscos de contaminação e grau de vulnerabilidade frente aos diversos fatores ambientais e fontes de poluição, e estabelecer, em função destes condicionantes, as medidas corretivas ou preventivas necessárias à sua proteção e conservação.

3.3. CONCEITUAÇÃO DE ÁREAS OU PERÍMETRO DE PROTEÇÃO

Para efeito desta regulamentação, as áreas ou perímetros de proteção das águas minerais ou potáveis de mesa, captadas através de poços ou fontes e nascentes naturais, destinam-se à proteção da qualidade das águas e tem como objetivo estabelecer os limites dentro dos quais deverá haver restrições de ocupação e de determinados usos que possam vir a comprometer o seu aproveitamento.

Os diversos modos de ocorrência e tipos de sistemas aquíferos dão origem a condições bastantes diferenciadas no que se refere ao grau de vulnerabilidade ou de riscos de contaminação das águas. Em consequência, torna-se necessário um adequado conhecimento do modelo hidrogeológico local e regional para a avaliação e delineamento de um plano de controle e proteção.

Na definição de áreas ou perímetros de proteção deverão ser conceituadas três diferentes zonas segundo suas características hidráulicas: a ZI ou zona de influência; a ZC ou zona de contribuição e a ZT, zona de transporte.

A zona de influência (ZI) é aquela associada ao cone de depressão (rebaixamento da superfície potenciométrica) de um poço em bombeamento ou de uma fonte ou nascente natural, considerado aqui como um afloramento da superfície piezométrica ou freática, equivalente a um dreno.

A zona de contribuição (ZC) é a área de recarga associada ao ponto de captação (fonte ou poço), delimitada pelas linhas de fluxo que convergem a este ponto.

A zona de transporte (ZT) ou de captura é aquela entre a área de recarga e o ponto de captação. É esta zona que determina o tempo de trânsito que um contaminante leva para atingir um ponto de captação, desde a área de recarga. Em geral, este tempo depende da distância do percurso ou fluxo subterrâneo, das características hidráulicas do meio aquífero e dos gradientes hidráulicos.

A zona de influência ZI, associada ao perímetro imediato do poço ou fonte, define uma área onde serão permitidas apenas atividades inerentes ao poço ou fontes e delimita também um entorno de proteção microbiológica. Suas dimensões serão estabelecidas em função das características hidrogeológicas e grau de vulnerabilidade ou risco de contaminação de curto prazo. Nesta zona, não serão permitidas quaisquer edificações e deverá haver severas restrições à atividade agrícola ou outros usos considerados potencialmente poluidores.

As zonas de contribuição e de transporte (ZC e ZT) serão estabelecidas objetivando uma segura proteção para contaminantes mais persistentes, como produtos químicos industriais ou outras substâncias tóxicas, por exemplo. Sua definição e dimensões serão baseadas em função principalmente das atividades, níveis e intensidade de ocupação e utilização da terra, levando-se em conta também as estimativas sobre o tempo de trânsito.

3.4. ESTUDOS E LEVANTAMENTOS

A definição das áreas de proteção deverá ser baseada em estudos e levantamentos prévios, envolvendo:

- a- Caracterização hidrológica e climática.
- b- Características hidrogeológicas locais e sua inserção no contexto regional.
- c- Características físico-químicas e sanitárias das águas.

d- Caracterização do uso do solo e das águas, com identificação das principais fontes de poluição.

e- Análise das possibilidades de contaminação das fontes e seu grau de vulnerabilidade aos agentes poluentes.

f- Identificação de medidas corretivas ou preventivas com estabelecimento de um plano de controle.

g- Definição das áreas de proteção.

3.4.1. Caracterização Hidrológica e Climática

a- Características da drenagem e principais aspectos físicos das bacias hidrográficas.

b- Regime fluviométrico e dados de vazões máximas e mínimas.

c- Principais características climáticas - tipo de clima, regime e totais pluviométricos, temperaturas e umidade relativa.

3.4.2 - Características Hidrogeológicas

a- Geologia - aspectos litológicos e estruturais da área e sua inserção regional.

Apresentação de base geológica local e situação regional.

b- Identificação e caracterização do(s) sistema(s) aquífero(s):

b-1 = Tipos de aquífero: local ou regional, granular, fissurado, cárstico, livre, confinado ou semi-confinado.

b-2 = Sua distribuição e áreas de ocorrência (mapa dos sistemas aquíferos), condições de contorno ou limites (impermeáveis ou de recarga).

b-3 = Características hidráulicas (permeabilidade, transmissividade, porosidade efetiva ou coeficiente de armazenamento).

b-4 = Dados de pontos d'água existentes (fontes, nascentes, poços rasos, poços tubulares).

b-5 = Capacidade específica dos poços e vazões das fontes.

c- Definição do modelo hidrogeológico

c-1 = Superfície piezométrica ou freática.

c-2 = Direções de fluxo ou escoamento.

c-3 = Identificação das áreas de recarga e descarga.

c-4 = Estimativas de infiltração e do tempo de residência das águas.

3.4.3.- Características Hidroquímicas

a- Qualidade química e físico-química - tipos de águas, maiores elementos e traços, metais pesados, fenóis e outras substâncias orgânicas e tóxicas - Classificação quanto ao Código de Águas Minerais.

b- Qualidade sanitária - análises microbiológicas.

c- Relações água-rocha e evolução química da água - variações temporais.

3.4.4 - Caracterização do Uso do Solo e das Águas - fontes atuais e potenciais de poluição:

a- Identificação e mapeamento dos principais usos do solo e das águas na área de influência direta - usos urbanos, industriais, agrícolas e pecuário.

b- Identificação das fontes de poluição ou agentes poluentes - origem, tipos e caracterização de resíduos e efluentes líquidos.

c- Principais usos das águas superficiais e subterrâneas - doméstico, industrial, agrícola, diluição de despejos.

3.4.5 - Análise das Possibilidades de Contaminação das Fontes e Grau de Vulnerabilidade:

a- Análise de eventuais interferências e impactos ambientais sobre a quantidade e qualidade das águas minerais decorrentes do uso e ocupação do solo ou da utilização das águas subterrâneas e superficiais.

Na análise das possibilidades de interferências ou de impactos ambientais adversos deverão ser definidas sua importância e magnitude, localização e extensão (pontual, local, regional), duração (temporária ou permanente), previsão de incidência dos efeitos (curto, médio e longo prazos) e seu grau de reversibilidade.

b- Análise conjunta de todos esses fatores aliados às condições de ocorrência das águas das fontes no sentido de definir seu grau de vulnerabilidade aos agentes contaminantes.

3.4.6 - Definição das Áreas de Proteção

Para a definição das Áreas de Proteção, deverão ser utilizados métodos apropriados e adequados às disponibilidade de informações, das características hidrogeológicas e do nível de intensidade de ocupação das áreas em estudo, devendo ser apresentado, o memorial descritivo e a planta de situação da área acompanhada da Anotação de Responsabilidade Técnica - A.R.T.

O DNPM, com base em critérios técnicos, aprovará a delimitação de áreas de proteção, ou formulará exigências que se fizerem necessárias.

4. Esta Portaria entrará em vigor na data de sua publicação.

Miguel Navarrete Fernandez Júnior

Diretor Geral do DNPM