



**DETERMINAÇÃO DAS ÁREAS DE RECARGA PARA A  
GESTÃO DO SISTEMA AQUÍFERO FÍSSURO-CÁRSTICO DA  
REGIÃO DE SÃO SEBASTIÃO/DF**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 51**

**MICHELLE MOTA DE SOUZA**

**Orientador: Prof. José Eloi Guimarães Campos**

**Brasília, 2013.**



**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 51**

**DETERMINAÇÃO DAS ÁREAS DE RECARGA PARA A GESTÃO  
DO SISTEMA AQUÍFERO FÍSSURO-CÁRSTICO DA REGIÃO DE  
SÃO SEBASTIÃO/DF**

**MICHELLE MOTA DE SOUZA**

**Orientador**

**JOSÉ ELOI GUIMARÃES CAMPOS**

**Banca Examinadora:**

Prof. Dr. José Eloi Guimarães Campos (Orientador)

Profa. Dra. Suely Yoshinaga Pereira (Membro Externo - UNICAMP)

Prof. Dr. Geraldo Resende Boaventura (Membro Interno - IG/UnB)

**Brasília, 2013.**

*À meus pais  
Afrânio e Marisa*

*“O processo da vida é  
erguer-se sobre as alpendras de nossos eus mortos  
na direção de coisas mais elevadas”*

**Robert Browning (1812-1889) – poeta e dramaturgo inglês**

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço à Vida pelos fascinantes desafios que me apresenta.

Aos meus pais, por tudo, e, nessa oportunidade em especial, pelo carinho demonstrado na zelosa preocupação, na dedicação e apoio incondicionais, gestos de valor inestimável sem os quais nada seria possível.

Aos meus queridos e amados irmãos, Vanessa e Júnior, e à minha amada sobrinha, Carla, por toda amizade, apoio, torcida e carinho de todos os dias, vitais para minha caminhada. Em especial à Vanessa pela valiosa ajuda na reta final desse trabalho.

Ao Laboratório de Análises Ambientais da Universidade de Leipzig, Alemanha, pela realização das análises isotópicas. Em especial à Reiner Stollberg e Holger Weiss que as viabilizaram.

À CAESB pela liberação para realização desse trabalho, pelo apoio e dados fornecidos. Em especial à Roberto e Maria do Carmo por todo apoio e compreensão ao longo desse processo.

Ao meu orientador, José Eloi Guimarães Campos pela orientação, paciência e compreensão.

À Dani por se desdobrar, sempre risonha, para me ajudar com o ArcGis. Ao meu estagiário Rafael Stremel pela sua sempre bondosa disposição em me ajudar. Ao meu amigo Zeca pelo apoio cárstico! À querida amiga Joyce, sempre presente, por fornecer boa parte dos *shapes* utilizados. À amiga-prima-irmã Lahys (Lalá) pela ajuda com algumas figuras.

Aos meus companheiros de mestrado José Cláudio, Cláudio José, Talita, Carlos Eduardo, Paulo Henrique e Gervásio pelos gratos momentos de estudo que compartilhamos.

Às minhas amadas amigas-irmãs Lalá, Vanusa, Suênia, Suélen, Luciana e Jussara pela amizade sincera; pelo amor, incentivo, paciência, respeito e apoio incondicionais em todos os momentos compartilhados nessa e em todas as outras jornadas em que nos encontramos. Ao meu amigo-irmão Paiva pelo carinho, respeito e apoio; por suas palavras; por ter, muitas vezes, me segurado pela mão; pelo exemplo de humanidade e dedicação, que tanto me inspiram; pelos ótimos momentos compartilhados; pela amizade sem preço; por ter cruzado o meu caminho.

A todos que, mesmo distantes ou ausentes, torceram e torcem por mim.

A todos que compartilham a minha vida e que me apoiaram e me incentivaram durante a realização desse trabalho com palavras e gestos, mesmo que não tenham seus nomes citados, não reduzindo o seu inestimável valor.

A todos, minha eterna gratidão.

## RESUMO

A cidade de São Sebastião/DF é abastecida exclusivamente por água subterrânea captada a partir de 20 poços mantidos pela concessionária de serviços de saneamento local, a CAESB (Companhia de Saneamento Ambiental do DF). Esses poços apresentam vazões anômalas no contexto do DF. Todos possuem outorga, porém, existe uma preocupação crescente com relação à sustentabilidade do aquífero, tendo em vista o rápido aumento da demanda por água e a crescente impermeabilização do solo dentro dos limites da própria cidade e do seu entorno. Além disso, a maior parte dessa impermeabilização está ocorrendo em áreas elevadas com alto potencial para recarga do aquífero de São Sebastião. Assim, esse projeto de pesquisa visou a identificar as áreas de recarga do aquífero que abastece a cidade de São Sebastião, que está situada sobre lentes de mármores interdigitadas a filitos do Grupo Canastra. Essas rochas mantêm contato tectônico com metassedimentos do Grupo Paranoá. Cada um desses grupos geológicos compreende um compartimento geomorfológico, quais sejam: Vales Dissecados e Planos Elevados, bem como um sistema hidrogeológico: Sistema Canastra e Sistema Paranoá, respectivamente. O método empregado foi análise isotópica de  $\delta(^{18}\text{O})$ ,  $\delta(\text{D})$  e trítio em 12 poços selecionados, sendo 4 situados no compartimento Planos Elevados e 8, no compartimento de Vales Dissecados. Os resultados das análises de  $\delta(^{18}\text{O})$  e  $\delta(\text{D})$  mostram que a origem da água subterrânea é meteórica havendo, no entanto, atenuação do sinal devido à evaporação secundária das massas de ar e à baixa umidade do ar típica do período de estiagem do DF. Os dados apresentam ainda clara compartimentação entre as unidades geomorfológicas, Planos Elevados e Vales Dissecados, sendo que, o primeiro é empobrecido em ambos os isótopos em relação ao segundo. Isto se deve à mistura da água de ambos os compartimentos. As fraturas e falhas, principalmente de direção N45E e N45W, foram reativadas e mantidas abertas pelo neotectonismo que gerou o gráben de São Sebastião. Essas aberturas verticalizadas se conjugaram com fraturas de alívio de atitude horizontal e permitiram a conexão hidráulica entre os dois domínios hidrogeológicos. Essa conexão é, no entanto, limitada espacial e hidraulicamente, havendo alternância entre a velocidade de fluxos, o que promove a atenuação do sinal isotópico da chuva, com predominância do mais lento, mostrando porque os dados não são homogêneos. Os dados de trítio corroboram essa hipótese mostrando ainda que existe recarga a partir de fluxo local. Trata-se de água meteórica que infiltra a partir das áreas de ocorrência de gleissolos. As águas relacionadas aos Planos Elevados apresentaram valores mais altos de trítio que os do compartimento Vales Dissecados o que pode ser explicado pela mistura de águas de fluxo mais lento (mais antigas) com aquelas de fluxo mais rápido (mais jovens). A partir de dados de variação do nível da água dos 2 piezômetros monitorados pela CAESB observa-se que durante o período de estiagem os piezômetros têm o seu rebaixamento mais acentuado sendo praticamente recuperado durante o período de chuvas. Conclui-se que não está havendo rebaixamento do nível da água do aquífero como resposta a um processo de sobreexploração. O rebaixamento observado no poço SS-09 provavelmente se deve à interferência com o cone de depressão de poço em operação próximo, uma vez que o nível do poço SS-14, que não conta com poços de produção num raio de 500 metros, não apresenta o mesmo comportamento de rebaixamento. Assim, foi proposta uma metodologia para verificação de sobreexploração de aquíferos, bem como foi elaborada proposta de gestão para o aquífero de São Sebastião com base na realidade local.

**Palavras-chave:** São Sebastião/DF; isótopos estáveis; áreas de recarga; sobreexploração de aquíferos.

## ABSTRACT

The São Sebastião town, Federal District (FD), Brazil is supplied solely by groundwater extracted from 20 wells maintained by the dealership site sanitation services, CAESB (Companhia de Saneamento Ambiental do FD). These wells show anomalous yields in the context of the Federal District. All of these wells are authorized to extraction, however, there is growing concern about the sustainability of the aquifer due to the rapid increase in demand for water and increasing soil sealing within the limits of the city itself and its surroundings. Moreover, most of this soil impervious is occurring in elevated areas with high potential for the recharge of São Sebastião aquifer. Thus, this research aimed to identify the recharge areas of the aquifer that supplies the city of São Sebastião situated over marble lenses interfingering on phillites of Grupo Canasta. These rocks are in tectonic contact with metasediments of Grupo Paranoá. Each of these geologic groups comprises a geomorphological compartment, namely: Vales Dissecados and Planos Elevados, as well as the hydrogeological systems: Sistema Canastra e Sistema Paranoá respectively. The method employed was the isotopic analysis of  $\delta(^{18}\text{O})$ ,  $\delta(\text{D})$  and tritium in 12 selected wells, 4 of them are located on the compartment Planos Elevados and 8, on the Vales Dissecados. The results of the analyzes of  $\delta(^{18}\text{O})$  and  $\delta(\text{D})$  showed that rainfall is the origin of the groundwater and that the isotopic attenuation is due to secondary evaporation of air mass and low humidity, typical of dry period of FD. The isotopic data also showed an obvious subdivision between geomorphological units, Planos Elevados and Vales Dissecados. The former is depleted in both isotopes in relation to the second. Fractures and faults especially those N45E and N45W families were reactivated and kept open by neotectonics forces that generated the graben of São Sebastião. These opening verticalized fractures were combined with horizontal and relief ones that allowed the hydraulic connection between the two hydrogeological domains. This connection is, however, limited spatially and hydraulically. There is alternation between the velocity of flow which promotes the isotopic signal attenuation from rainfall, predominantly slower, showing why the data are not homogeneous. The tritium data corroborate this hypothesis showing that there is also recharge from local flow, which is the main recharge source of São Sebastião aquifer. It is meteoric water that seeps from the areas of occurrence of Gleissolos. The waters related to Planos Elevados showed higher values than the compartment Vales Dissecados which can be explained by mixing slower water flow (regional) with faster flow (local). Analyzing the graphs of water level variation of 2 piezometers monitored monthly by CAESB in São Sebastião it is observed that during the drought season the drawdown is strong. But the water level is practically recovered during the rainy season. The conclusion is that there is no lowering of the water level in the aquifer in response to a overexploitation process. The lowering observed in piezometer SS-09 is probably due to interference with the cone of depression of a working well situated nearby. The water level of well SS-14 does not have the same behavior because in its neighborhood there are no working wells in a distance less than 500 meters away. Thus, we proposed a methodology for verification of overexploitation risk to aquifers, as well as it was drafted a management proposal to the São Sebastião aquifer based on local reality.

**Keywords:** São Sebastião, Federal District; stable isotopes; recharge areas; aquifer overexploitation.

# SUMÁRIO

<b>RESUMO</b> .....	<b>vi</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>viii</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1. JUSTIFICATIVA .....	1
1.2. OBJETIVOS .....	3
1.3. LOCALIZAÇÃO .....	3
1.4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	5
1.5. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	5
<b>2. CONTEXTUALIZAÇÃO DA ÁREA DE TRABALHO</b> .....	<b>7</b>
2.1. GEOLOGIA REGIONAL.....	7
2.1.1. Grupo Paranoá.....	7
2.1.2. Grupo Canastra.....	10
2.2. COMPARTIMENTAÇÃO ESTRUTURAL.....	12
2.3. GEOLOGIA DA REGIÃO DE SÃO SEBASTIÃO .....	12
2.4. GEOMORFOLOGIA.....	15
2.5. SOLOS.....	18
2.6. CLIMA.....	20
2.7. HIDROGEOLOGIA.....	20
2.7.1. Modelos Conceituais de Aquífero.....	23
<b>3. DETERMINAÇÃO DAS ÁREAS DE RECARGA</b> .....	<b>26</b>
3.1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	26
3.2. ANÁLISE DE DADOS .....	34
3.2.1. Recarga Indireta.....	34
3.2.2. Análise dos Resultados de $\delta D$ e $\delta^{18}O$ .....	35
3.2.3. Análise dos Resultados de Trítio .....	44
3.3. DISCUSSÕES.....	50
<b>4. AVALIAÇÃO DO HISTÓRICO DE EXPLOTAÇÃO</b> .....	<b>53</b>
4.1. APRESENTAÇÃO.....	53
4.2. MÉTODO DE MEDIAÇÃO DA SOBREEXPLOTAÇÃO .....	54
4.3. ANÁLISE DE DADOS .....	55
<b>5. PROPOSTA DE GESTÃO PARA O SISTEMA DE ABASTECIMENTO</b> .....	<b>59</b>
5.1. APRESENTAÇÃO.....	59
5.2. PROPOSTAS DE AÇÕES PARA GESTÃO DOS AQUÍFEROS E DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO .....	59
5.2.1. Recarga Artificial .....	59
5.2.2. Proteção das Áreas Verdes.....	62
5.2.3. Controle das Taxas de Bombeamento.....	62
5.2.4. Ampliação da Rede de Tratamento de Esgotos.....	63
5.2.5. Refinamento dos Estudos de Recarga e Reserva Hídrica .....	63
5.2.6. Limitação da Ocupação das Áreas de Recarga.....	64

5.2.7. Monitoramento Sistemático dos Níveis Dinâmicos dos Poços em Operação.....	64
5.2.8. Manutenção Preventiva em Equipamentos.....	65
5.2.9. Sistemas em Operação com Uso de Mananciais Mistos, Superficiais e Subterrâneos .....	65
5.2.10. Segurança e Proteção dos Poços .....	66
5.3. IMPLANTAÇÃO DAS AÇÕES PROPOSTAS .....	66
<b>6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>69</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>71</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1. Localização da área do projeto.....	4
FIGURA 2.1. Mapa Geológico do Distrito Federal .....	8
FIGURA 2.2. Estratigrafia do Grupo Paranoá na área tipo de Alto Paraíso de Goiás – São João D'Aliança.....	9
FIGURA 2.3. Estratigrafia do Grupo Canastra .....	11
FIGURA 2.4. Imagens de vídeo-inspeções .....	14
FIGURA 2.5. Mapa de compartimentação geomorfológica do Distrito Federal .....	16
FIGURA 2.6. Mapa de declividade da área de estudo .....	17
FIGURA 2.7. Desenhos esquemáticos dos modelos de superfícies potenciométricas aplicáveis ao contexto do DF.....	25
FIGURA 3.1. Enriquecimento isotópico na evaporação da água e o efeito da umidade .....	31
FIGURA 3.2. Principais fatores que afetam a inclinação da reta e o excesso de deutério.....	31
FIGURA 3.3. Distribuição da composição isotópica do oxigênio .....	32
FIGURA 3.4. Distribuição da composição isotópica do hidrogênio .....	33
FIGURA 3.5. Desenho esquemático da área e das hipóteses dos mecanismos de recarga .....	34
FIGURA 3.6. Localização dos poços amostrados para a pesquisa .....	36
FIGURA 3.7. Gráficos $\delta D/\delta^{18}O$ .....	37-38
FIGURA 3.8. Gráfico de variação dos resultados de $\delta D$ e $\delta^{18}O$ para os poços analisados .....	40
FIGURA 3.9. Evolução do gráben de São Sebastião.....	42
FIGURA 3.10. Hipsometria da área de estudo produzida a partir de um MDT (Modelo Digital de Terreno) .....	43
FIGURA 3.11. Mapa que ilustra a direção estimada de fluxo da água subterrânea.....	44
FIGURA 3.12. Imagem com destaque para paleodolinas preenchidas e cobertas por vegetação densa ..	47
FIGURA 3.13. Gráficos representativos da variação das concentrações de nitrato e cloreto nas águas subterrâneas de poços da CAESB.....	48-49
FIGURA 3.14. Mapa de localização dos poços que compõem o sistema de São Sebastião.....	50
FIGURA 3.15. Mapa dos limites dos Domínios Geoambientais I, II e III.....	51
FIGURA 4.1. Localização dos piezômetros SS-09 (A) e SS-14 (B).....	55-56
FIGURA 4.2. Gráfico de variação anual do nível estático do aquífero de São Sebastião medido no poço SS-09.....	56
FIGURA 4.3. Gráfico de variação mensal do nível estático do aquífero de São Sebastião medido no poço SS-09 .....	57
FIGURA 4.4. Gráfico de variação anual do nível estático do aquífero de São Sebastião medido no poço SS-14 .....	58
FIGURA 4.5. Gráfico de variação mensal do nível estático do aquífero de São Sebastião medido no poço SS-14 .....	58
FIGURA 5.1. Sistema de recarga artificial proposto para locais em que ocorrem latossolos e outros solos permeáveis com área restrita para implantação do sistema de indução da infiltração .....	61
FIGURA 5.2. Sistema de recarga artificial proposto para locais em que ocorrem solos permeáveis e maior área para se induzir a infiltração.....	61

## ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 3.1. Poços amostrados agrupados por compartimento geomorfológico, unidade geológica e subsistema hidrogeológico .....	36
TABELA 3.2. Resultados das análises isotópicas de oxigênio e hidrogênio para os poços selecionados .	37
TABELA 3.3. Resultados das análises de $d$ (excesso de deutério) para os poços amostrados .....	39
TABELA 3.4. Resultados das análises de trítio ( $^3\text{H}$ ) para os poços amostrados.....	45

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1. Justificativa

Nas últimas décadas a água subterrânea vem ganhando destaque crescente nos meios científico e de comunicação de massa. Esse interesse se explica pelo aumento de sua importância como fonte de abastecimento, principalmente para prover sistemas públicos em todo o Brasil.

Segundo dados da Pesquisa Nacional de Saneamento Básico - PNSB (2008), 47,5% das entidades prestadoras de serviços de abastecimento de água no Brasil utilizaram água subterrânea para este fim, sendo que, 76,1% dos municípios brasileiros utilizam água subterrânea (poços profundos e rasos) para o abastecimento de suas populações, mesmo que esta não seja distribuída pela concessionária local.

Ainda segundo o PNSB (2008), há normas jurídicas no país, em escala estadual e municipal, regulando a proteção direta dessas fontes. Contudo, pouca atenção vem sendo dada ao estudo para determinação das áreas de recarga de aquíferos visando a sua proteção, fato refletido nas raras normas existentes a esse respeito. Esse quadro fica ainda mais evidente quando se trata de aquíferos localizados em regiões de grandes aglomerados humanos, onde se verifica a priorização dos interesses dos principais setores econômicos em detrimento da proteção dessas áreas (Villar, 2008).

Define-se a recarga de aquíferos como o processo, natural ou artificial, a partir do qual se adiciona volume extra de água a estes. Para que o processo natural ocorra com o máximo de eficiência, alguns fatores têm papel fundamental, tais como: quantidade e distribuição de chuvas; equilíbrio entre infiltração, escoamento e evaporação da água; tipo de relevo (= topografia); classe de solo; e, cobertura vegetal.

No contexto do Distrito Federal, as áreas com maior potencial para recarga são aquelas com relevo plano; solos espessos e com boa permeabilidade; e com cobertura vegetal. Essa configuração pode ser encontrada na região dos condomínios da Região Administrativa do Jardim Botânico e no bairro Jardins Mangueiral, situados no entorno da cidade de São Sebastião.

A cidade de São Sebastião surgiu como colônia agrícola no fim da década de 1950, depois que olarias ali instaladas foram fechadas. A partir daí foram firmados contratos de arrendamento de terra entre os moradores e a extinta Fundação Zoobotânica do DF. As glebas então formadas foram sendo irregularmente parceladas ao longo dos anos e adquirindo, pouco a pouco, feições francamente urbanas. Assim, em 1993, por meio da Lei Distrital nº 167/93, a então colônia agrícola foi definida como a Região Administrativa XIV (Administração Regional de São Sebastião). Segundo dados da Companhia de Desenvolvimento do Distrito Federal (CODEPLAN), em 1996 a população da cidade era de 44.235 pessoas, sendo que a projeção para 2012 é de 135.177 pessoas. Um crescimento de 305% em 16 anos.

De acordo com Joko (2002), houve várias tentativas de controle da ocupação da cidade. Um exemplo foi a delimitação, pela Defesa Civil em 1992, da poligonal da Área de Risco de São Sebastião, situada ao longo dos córregos Mato Grande e Santo Antônio da Papuda, por tratar-se de área com risco de inundações, desabamentos e poluição das águas subterrâneas, uma vez que o nível freático na região era frequentemente aflorante. Esta iniciativa culminou com a remoção de várias famílias desses locais ainda o ano de 1992. No ano seguinte, foi elaborado, pelo então Instituto de Planejamento Territorial e Urbano do DF (IPDF), o Plano de Ocupação para a Agrovila de São Sebastião e, em 1994, o EIA/RIMA (Estudo de Impacto

Ambiental/Relatório de Impacto Ambiental) para a cidade. Este destacava, já naquela época, a necessidade de limitação do crescimento populacional na região, tendo em vista ser impraticável incrementar a oferta de água na mesma velocidade do aumento da demanda.

Não obstante, o entorno da cidade também sofreu um amplo processo de urbanização, sem perspectivas de arrefecimento, com o surgimento de inúmeros condomínios horizontais a partir do final da década de 1980. Esses condomínios vêm ocupando uma significativa porção da área de topo da chapada situada topograficamente acima da cidade de São Sebastião. Nessa chapada, no ano de 2009, foi iniciada a construção do bairro Jardins Mangueiral, situado entre o Complexo Penitenciário da Papuda e a cidade de São Sebastião. Devido às suas características físicas, conforme citado anteriormente, essa área tem grande potencial para contribuir significativamente com a recarga dos aquíferos de São Sebastião. Contudo, não existem estudos conclusivos a esse respeito. De qualquer modo, a intensa impermeabilização do solo que ocorre nessas áreas aliada à falta de controle sobre a continuidade desse processo certamente afetará os mananciais subterrâneos ali existentes. Ademais, o núcleo habitacional Jardins Mangueiral e os condomínios horizontais da RA do Jardim Botânico são parcialmente abastecidos por água subterrânea. Inúmeros poços foram sendo construídos ao longo dos anos para o abastecimento dessas comunidades, sem que, na maioria dos casos, tenha sido aplicado todo o conhecimento técnico necessário. Assim, poços cujas informações básicas, como perfis construtivos e geológicos, não foram geradas, bombeiam água continuamente sem o conhecimento dos limites naturais do meio explorado, podendo gerar inúmeros problemas.

A Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal - CAESB, concessionária dos serviços de abastecimento público de água e esgoto no DF e de algumas cidades do entorno, dispõe de 20 poços em operação, responsáveis exclusivos pelo abastecimento de São Sebastião. A atual capacidade comprovada de produção desses poços é de 1.204,894m<sup>3</sup>/h (CAESB, 2012).

A utilização de água subterrânea em São Sebastião pela companhia teve início em 1997 quando da incorporação de 5 poços já existentes no local e da posterior perfuração de outros 15 (CAESB, 2012). No entanto, informações detalhadas dos parâmetros hidráulicos, bem como do regime de fluxo do aquífero são ainda incipientes. A referida companhia opera esses poços obedecendo às exigências legais estabelecidas pela ADASA - Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do DF - por meio da legislação e outorgas expedidas. Contudo, diante da atual demanda por água e do aumento previsto é imprescindível a compreensão profunda do aquífero e de sua dinâmica a fim de se estabelecer uma gestão baseada na eficiência do uso de cada parcela mínima da água, modificando a ideia de que a solução para os problemas de escassez de água é o aumento extraordinário da oferta (Rebouças, 2008). Essa ideia há muito está ultrapassada.

Outro ponto importante da gestão do aquífero de São Sebastião é a preocupação em relação a sua sustentabilidade.

A CAESB monitora mensalmente, desde 2006, o nível estático de 2 poços (antigos poços de produção que foram desativados) e um deles vêm apresentando um aparente rebaixamento de seu nível (CAESB, 2012), trazendo preocupação, em especial pelo fato de que a urbanização da região encontrar-se em franca expansão.

Diante desse quadro, em que há uma crescente impermeabilização do solo associada à exploração continuada da água subterrânea em São Sebastião e em áreas com potencial de recarga em seus arredores, algumas questões fundamentais vieram à tona, tais como:

- Quais são as áreas de recarga dos aquíferos de São Sebastião?
- Como é o sistema de circulação destas águas?
- Existe sobreexploração?

Desta forma, o presente projeto de pesquisa visa a fornecer as respostas a essas questões.

As informações obtidas pela presente pesquisa apresentam caráter acadêmico-científico e, ao mesmo tempo, importância prática, pois deverão ser utilizadas para a gestão dos mananciais da região de São Sebastião.

## **1.2. Objetivos**

O objetivo principal desse trabalho de pesquisa é a determinação das áreas de recarga dos aquíferos que abastecem a cidade de São Sebastião, bem como a determinação das condições de circulação da água subterrânea entre os sistemas aquíferos das áreas com potencial de recarga.

Subsidiariamente pretende-se:

- Verificar a ocorrência ou não de sobreexploração do aquífero que abastece São Sebastião propondo metodologia alternativa para sua determinação;
- Propor um modelo de gestão sustentável dos mananciais subterrâneos frente ao desafio de conciliar o crescimento e o desenvolvimento da região com a proteção e a sustentabilidade do aquífero;
- Propor ações, iniciativas e projetos que visem a minimizar os problemas atuais e a antecipar eventuais problemas futuros.

## **1.3. Localização**

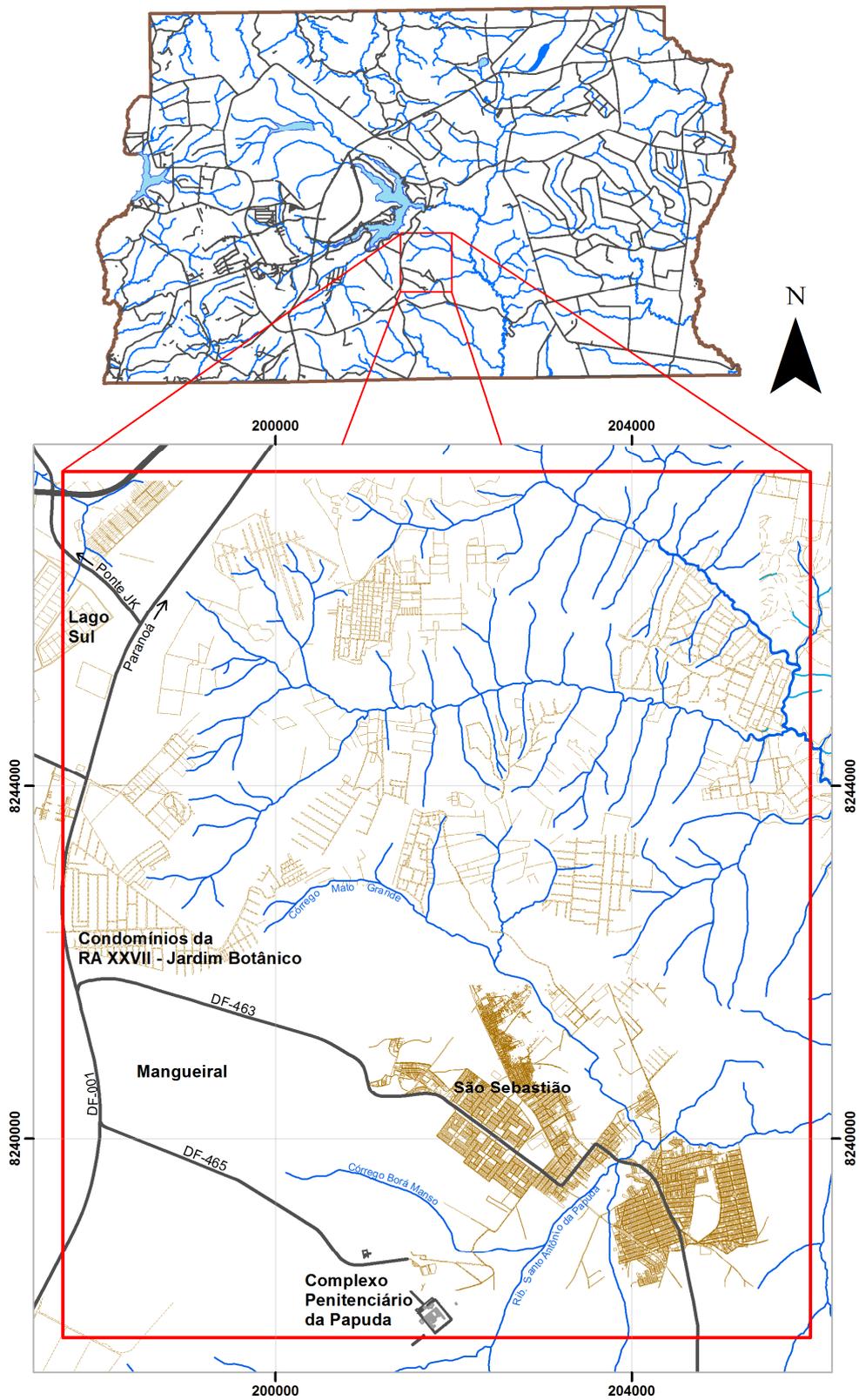
A área de pesquisa está localizada na região centro-sul do Distrito Federal e engloba a cidade de São Sebastião, parte do bairro Jardins Mangueiral e dos condomínios da Região Administrativa do Jardim Botânico (RA-XXVII).

A área de estudo é definida pelas coordenadas UTM 197.607, 206.000, 8.247.560 e 8.237.736 (fuso 23) correspondente ao polígono destacado em vermelho na Figura 1.1.

Para a definição da área de estudo foi delimitado um polígono contendo os poços da cidade de São Sebastião e aqueles de interesse no bairro Mangueiral e na RA do Jardim Botânico, além de porções dos sistemas aquíferos representativas para o trabalho a ser desenvolvido.

O acesso à área é feito, a partir do Plano Piloto, pela DF-001 seguindo-se posteriormente pela DF-463 que dá acesso à cidade de São Sebastião (Mapa Rodoviário do DF e Entorno - DER, 2009).

Do ponto de vista hidrográfico, situa-se, por ordem hierárquica, na Região Hidrográfica do Paraná, seguida da Bacia Hidrográfica do rio São Bartolomeu e das Unidades Hidrográficas dos ribeirões Santo Antônio da Papuda, Borá Manso e Mato Grande.



**Figura 1.1** - Localização da área do projeto. O polígono que a define a área principal de pesquisa está destacado em vermelho.

#### 1.4. Materiais e Métodos

O desenvolvimento dessa pesquisa compreendeu várias etapas, descritas a seguir:

- Pesquisa bibliográfica que correspondeu ao levantamento das principais obras relacionadas ao tema tratado e ao conhecimento geológico acumulado sobre o Distrito Federal, bem como sobre a região de São Sebastião, sua posterior análise e compilação. Essa etapa se desenvolveu ao longo de todo o trabalho;
- Levantamento de material cartográfico, compreendendo dados vetoriais de estradas, hidrografia, malha urbana, topografia, entre outros, a serem utilizados como base de dados para confecção de mapas e figuras;
- Coleta de amostras de água dos 12 poços pré-selecionados para realização de análises isotópicas de hidrogênio e oxigênio visando a identificar as áreas de recarga e a determinar o tempo de residência da água subterrânea no aquífero. A seleção dos poços para realização das análises obedeceu aos seguintes critérios: 1) existência de relatório de perfuração do poço, perfil geológico e construtivo; 2) coleta das amostras de água dos poços depois de 10 minutos de funcionamento da bomba. Tal procedimento foi adotado apenas para padronização de coleta, uma vez que os poços selecionados são conhecidos e produtivos; 3) envio das amostras para análise laboratorial (Laboratório de Geocronologia da Universidade de Leipzig, Alemanha);
- Para a determinação das áreas de recarga foram consideradas as idades relativas das águas, as distâncias das supostas áreas em relação àquelas de produção, associando-se esses dados à dados de qualidade da água dos aquíferos considerados;
- Compilação dos dados dos poços de São Sebastião fornecidos pela Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal, quais sejam: dados cadastrais, ensaios de bombeamento, informações construtivas dos poços, documentação dos perfis geológicos, dados operacionais e piezométricos. A organização e sistematização deste conjunto de informações permitiram otimizar a execução das etapas subsequentes;
- Análise e interpretação dos dados fornecidos pela CAESB. Os dados cadastrais foram utilizados para efeito de localização dos poços; os dados dos perfis geológicos foram utilizados para verificar a proposta de Joko (2002) sobre o gráben de São Sebastião; dados de qualidade da água (cloreto e nitrato) foram utilizados para complementar os estudos de recarga e circulação de água no aquífero; os dados piezométricos foram utilizados para se verificar a possibilidade de rebaixamento por sobreexploração.

Os dados pertinentes foram analisados e tratados nos softwares Excel, para geração de planilhas e gráficos, e ArcGis, versão 10.1 para geração de figuras e mapas.

#### 1.5. Organização do Trabalho

A presente dissertação foi estruturada em capítulos sequenciais cujos conteúdos trazem informações que, somadas, permitem a compreensão do tema proposto.

Assim, a seguir é apresentado um breve resumo das informações contidas em cada capítulo.

- **Capítulo 1: INTRODUÇÃO** - compreende as informações básicas e gerais sobre o tema da pesquisa, tais como a apresentação da problemática que a motivou, os seus objetivos, a localização da área de estudo e os métodos empregados na realização do trabalho.

- **Capítulo 2: CONTEXTUALIZAÇÃO DA ÁREA DE TRABALHO** - nesse capítulo são apresentados os aspectos do meio físico (geologia, geomorfologia, clima, pedologia e hidrogeologia) do Distrito Federal e da cidade de São Sebastião e seu entorno utilizando, principalmente, dados secundários, mas também dados primários obtidos de perfis litológicos e de vídeo-inspeções de poços pertencentes à CAESB.
- **Capítulo 3: DETERMINAÇÃO DAS ÁREAS DE RECARGA** - apresenta as hipóteses das áreas e dos mecanismos de recarga; os resultados de dados isotópicos e de qualidade; e, por fim, a análise integrada desses dados, culminando na hierarquização das diversas áreas, e o modelo hidrogeológico conceitual aplicado ao caso.
- **Capítulo 4: PROPOSTA METODOLÓGICA PARA DETERMINAÇÃO DE SOBREXPLORAÇÃO DE AQUÍFEROS** - analisa de forma detalhada a evolução dos dados potenciométricos de poços da CAESB, discute o conceito de sobreexploração e propõe métodos alternativos para sua determinação.
- **Capítulo 5: PROPOSTA PARA GESTÃO DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO** - nesse capítulo são enumerados os problemas observados no sistema de abastecimento e seus problemas potenciais (conflitos futuros), partindo-se daí para a proposição de ações, iniciativas, projetos e demais formas de minimizar problemas atuais e futuros.
- **Capítulo 6: CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES** - nesse capítulo são então discutidos, de forma sucinta, os aspectos importantes ou não suficientemente descritos no trabalho, bem como são apresentados os principais resultados da dissertação.
- **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS** - organiza em ordem alfabética, todas as citações feitas ao longo do texto.

## CAPÍTULO 2

### CONTEXTUALIZAÇÃO DA ÁREA DE TRABALHO

#### 2.1. Geologia Regional

O Distrito Federal, no contexto geológico regional, está localizado na porção central da Faixa de Dobramentos e Cavalgamentos Brasília, mais precisamente, na região de transição entre as zonas Externa e Interna (Fuck, 1994).

A Faixa Brasília tem direção geral norte-sul e vergência para leste em direção ao Cráton do São Francisco devido às compressões geradas durante a Orogênese Brasileira (Faria, 1995). É formada por diversos compartimentos tectônicos com ampla variação de material envolvido, grau de metamorfismo e estilo estrutural (Fonseca *et. al.*, 1995).

O conhecimento geológico e hidrogeológico do Distrito Federal vem evoluindo devido ao número crescente de trabalhos desenvolvidos na região. Faria (1995) caracterizou a estratigrafia do Grupo Paranoá no DF a partir da definição da área-tipo desse grupo em Alto Paraíso de Goiás. Posteriormente, Campos & Freitas-Silva (1998) desenvolveram trabalho mais amplo, de importância expressiva para a região com a caracterização geológica e hidrogeológica completa do Distrito Federal, culminando na confecção de um mapa geológico e um hidrogeológico sem a cobertura de solos. A partir daí inúmeros trabalhos vem sendo realizados, podendo ser citados Souza (2001), Cadamuro (2002), Carmelo (2002), Joko (2002), Lousada (2005), Xavier (2010), Pacheco (2012) com importantes contribuições para a caracterização e compreensão dos mecanismos atuantes na dinâmica hídrica subterrânea da região do DF.

Em especial, pode-se destacar o trabalho desenvolvido por Joko (2002), que tratou da caracterização hidrogeológica da cidade de São Sebastião e seu entorno trazendo como principal contribuição a definição do gráben de São Sebastião. Esta estrutura é a responsável pelo comportamento considerado anômalo do aquífero fissuro-cárstico de São Sebastião devido às suas altas vazões, quando comparado com os outros sistemas aquíferos do DF.

Do ponto de vista litoestratigráfico, o Distrito Federal é formado pelos grupos Paranoá (Meso/Neoproterozoico), Canastra (Meso/Neoproterozoico), Bambuí (Neoproterozoico) e Araxá (Neoproterozoico) que ocupam, respectivamente, 65%, 15%, 15% e 5% da área total do seu território (Campos & Freitas-Silva, 1998), conforme Figura 2.1.

Para o presente trabalho apenas os Grupos Paranoá e Canastra apresentam relevância, de modo que somente eles são descritos a seguir.

##### 2.1.1. Grupo Paranoá

O Grupo Paranoá tem idade Meso/Neoproterozoica (1350 a 950 Ma) e é representado por um conjunto de sedimentos depositados em ambiente marinho plataformaraso, sendo posteriormente submetido a metamorfismo de baixo grau (Faria, 1995) (Figura 2.2). No Distrito Federal, são descritas, da base para o topo, sete unidades das onze existentes na área tipo, quais sejam: Q<sub>2</sub>, S, A, R<sub>3</sub>, Q<sub>3</sub>, R<sub>4</sub> e PPC (Campos, 2010):

A seguir são descritas as unidades R<sub>3</sub>, Q<sub>3</sub>, R<sub>4</sub> uma vez que são aquelas que apresentam interesse direto no presente trabalho.

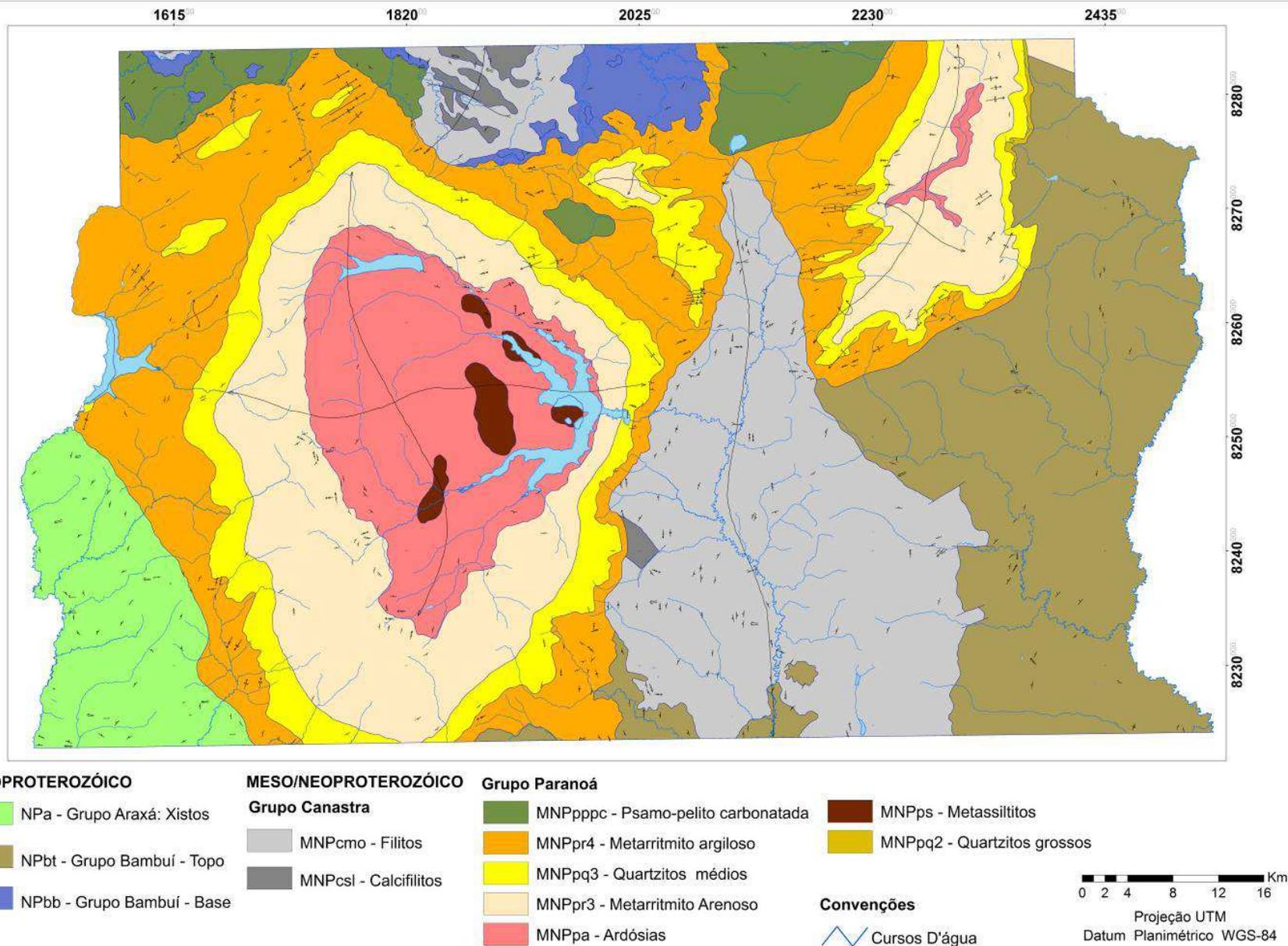
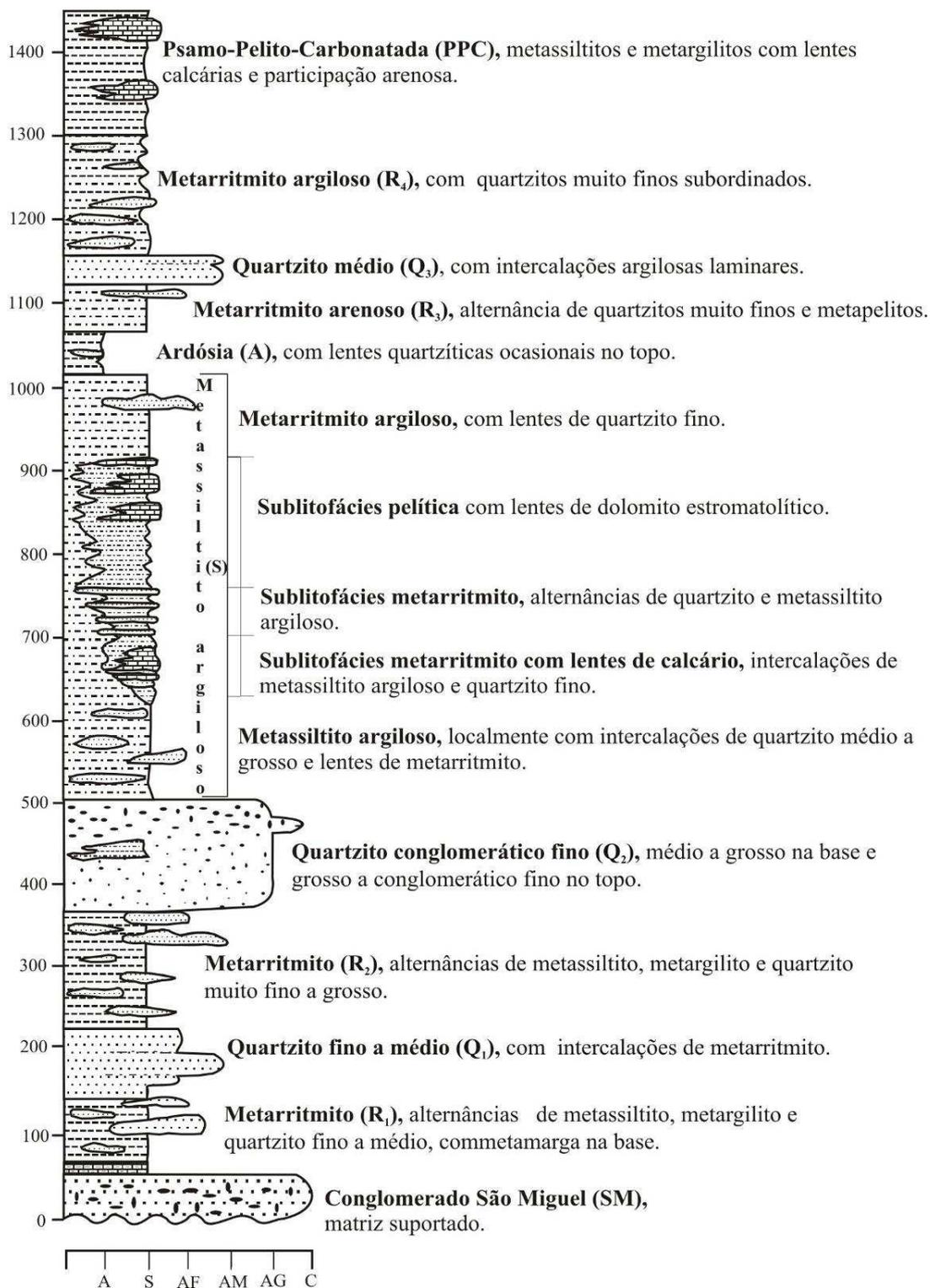


Figura 2.1 - Mapa Geológico do Distrito Federal (adaptado de Campos, 2010).



**Figura 2.2.** - Estratigrafia do Grupo Paranoá na área-tipo de Alto Paraíso de Goiás - São João D'Aliança. A - argila, S - silte, AF - areia fina, AM - areia média, AG - areia grossa e C - cascalho.

### Unidade Metarritmito Arenoso (R<sub>3</sub>)

Representada pela alternância de quartzitos finos a médios cujos estratos têm espessura centimétrica a métrica, com níveis de pequena espessura de metassiltitos argilosos, metalamitos siltosos ou micáceos. Ressalta-se que há clara prevalência dos termos psamíticos no conjunto rochoso, justificando a sua denominação.

São frequentes os estratos plano-paralelos e as lentes arenosas, distribuídas por todo o pacote de metarritmitos. As estruturas sedimentares mais frequentes são as marcas onduladas, principalmente nos bancos de quartzitos mais espessos (da ordem de decímetros); as estratificações cruzadas tabulares e de pequeno porte que ocorrem exclusivamente nos bancos de quartzito; e as laminações cruzadas encontradas nos níveis arenosos mais delgados, bem como junto aos leitos lenticulares (Campos, 2010).

### Unidade Quartzito Médio (Q<sub>3</sub>)

Em contato brusco e concordante com a unidade anterior, inicia-se por metarritmitos de espessura decimétrica a métrica, mas é representada por quartzitos de textura fina a média, podendo ser grossa muito localmente. Caracteristicamente apresentam coloração branca ou cinza-clara quando intemperizados ou cinza-escura quando frescos. Têm aspecto maciço devido a sua intensa silicificação, porém, nas porções onde esta é menos intensa e sua estruturação pode ser melhor observada, é descrita como uma rocha mineralogicamente madura, com grãos bem selecionados e arredondados.

As estruturas sedimentares são comumente obliteradas pela silicificação e pelo marcante fraturamento da rocha, contudo, localmente são descritos o acamamento plano-paralelo, estratificações cruzadas dos tipos tabulares, tangenciais, acanaladas e espinha de peixe, todas de pequeno a médio porte. Raramente ocorrem marcas onduladas assimétricas de cristas sinuosas ou paralelas.

O pacote é então encimado por metarritmitos decimétricos que vão se tornando cada vez mais frequentes, chegando a atingir os 10 metros de espessura.

### Unidade Metarritmito Argiloso (R<sub>4</sub>)

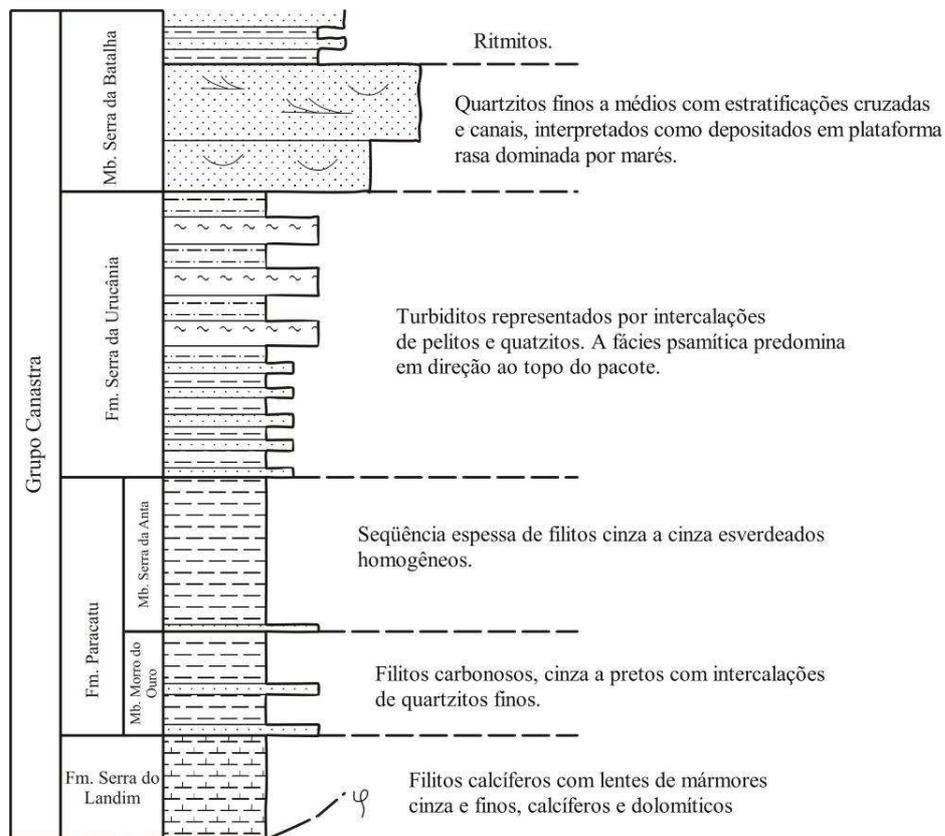
Apresenta contato gradacional com a unidade sotoposta e é representada por um metarritmito homogêneo com intercalações centimétricas regulares de quartzitos finos, metassiltitos e metalamitos. Os primeiros têm coloração cinza, quando frescos, amarelada, rosada ou avermelhada conforme varie o grau intempérico. A regularidade do pacote pode ser quebrada pela ocorrência rara de bancos de metassiltitos maciços, amarelados ou rosados, ou de quartzitos finos feldspáticos, rosados, com espessura que pode variar de 50 centímetros a 1 metro.

As estruturas sedimentares mais comumente encontradas são as estratificações plano-paralelas, lentes arenosas, *climbing ripples*, *hummockys* de pequeno porte, raras marcas onduladas simétricas e pequenos sigmóides presente principalmente em estratos mais espessos.

## **2.1.2. Grupo Canastra**

O Grupo Canastra, também de idade meso/neoproterozóica, é representado por sericita filitos, clorita filitos, quartzo-sericita-clorita filitos, metarritmitos e filitos carbonosos. Ocorrem ainda, subordinadamente, níveis descontínuos e delgados de quartzitos finos e lentes de mármore. Tais rochas apresentam-se metamorfisadas na fácies xisto-verde, zona da clorita sendo agrupadas nas Formações Serra do Landim, Paracatu, Serra da Urucânia e Serra da Batalha (Figura 2.3). No Distrito Federal, no entanto, estão expostos apenas os litotipos

correlacionáveis às Formações Serra do Landim e Paracatu - Membros Morro do Ouro e Serra de Santana, os quais serão descritos a seguir (Freitas-Silva & Campos, 1998; Campos, 2010).



**Figura 2.3.** - Estratigrafia do Grupo Canastra, conforme Freitas-Silva & Dardenne (1994).

### Formação Serra do Landim

O litotipo básico que a compõe é representada por um calcita-dolomita-clorita-sericita filito com bandamento rítmico. Próximo ao topo são descritas lentes de quartzitos puros de textura fina. Já no topo é comum a ocorrência de uma camada métrica de um quartzo-sericita-clorita filito, variando de coloração cinza-claro até cinza-escuro, devido à presença de material carbonoso. Nesse caso, o carbonato é apenas um mineral acessório.

### Formação Paracatu

**Membro Morro do Ouro** – composto por um metarritmito em que se alternam bandas de pequena espessura de quartzito, de coloração esbranquiçada, de sericita e material carbonoso de cor cinza-escuro a negra. Nessa unidade são encontradas importantes lentes de mármore calcícticos, maciços, de textura fina e coloração variando de cinza-claro a escuro que se encontram interdigitadas aos filitos descritos.

**Membro Serra de Santana** – na sua base está presente um ortoquartzito de coloração branca, granulação de areia fina e espessura de escala métrica, sendo o quartzo-sericita-clorita-filito o litotipo dominante. São comuns as intercalações de filitos carbonosos, principalmente próximo à base do pacote. Próximo ao topo, os filitos vão se tornando gradativamente mais quartzosos, de modo a serem observadas intercalações, da ordem de metros, de quartzitos.

## 2.2. Compartimentação Estrutural

O arcabouço estrutural das rochas da Faixa Brasília é decorrente de tectônica compressiva promovida por um evento deformacional único, a Orogênese Brasileira (950 – 450 Ma) ou Ciclo Brasileiro. Este é representado, ao longo de toda Faixa Brasília, por dobramentos, lineamentos, foliações, zonas de cisalhamento, falhas normais, inversas e de empurrão. Os dobramentos, em especial, apresentam um zoneamento bastante expressivo.

Conforme descrito por Freitas-Silva & Campos (1998) e Campos (2010), no DF é possível distinguir cinco fases deformacionais geradas pelo Ciclo Brasileiro a partir da identificação de estruturas planares e lineares e de seus padrões relacionais. Assim, essas fases foram denominadas: F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub>, F<sub>3</sub>, F<sub>4</sub> e F<sub>5</sub>, sendo as quatro primeiras de regime dúctil-rúptil, durante as quais se desenvolveram dobramentos denominados D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub>, D<sub>3</sub> e D<sub>4</sub>, e a última, notadamente, de regime rúptil. Cada uma das estruturas observadas reflete um momento da propagação das frentes de cavalgamentos responsáveis pela estruturação geral da região.

Do ponto de vista hidrogeológico e, portanto, de interesse desse trabalho, a fase F<sub>5</sub> é a de maior relevância. Trata-se da fase final da estruturação da orogênese Brasileira em que toma lugar a deformação em regime descompressivo, notadamente rúptil. Assim, são geradas, em profusão, juntas, diáclases e falhas normais típicas dessa fase, mas que frequentemente reativam zonas de fraquezas anteriores, visto haver sido mantida a orientação do campo de *stress* original.

Assim, são gerados três sistemas principais de estruturas planares (falhas e fraturas): o primeiro de direção preferencial N-S, com variação de 20° para oeste ou para leste, representado por fraturas de alívio da compressão principal; o segundo de direção geral E-W também com variações de 20° para norte ou sul; e o terceiro, que engloba duas famílias de direção N45W e N45E compondo um par conjugado de fraturas de cisalhamento, com pequenas variações. Todos esses conjuntos apresentam mergulhos verticalizados, de 70° a 90°.

Segundo Xavier (2010), a atividade neotectônica que afeta o Distrito Federal atua em zonas de fraquezas e anisotropias geradas durante as fases finais da deformação brasileira, em especial, na fase F<sub>5</sub>. Devido ao atual *trend* de deformação, de direção E-W, as aberturas de direção N-S tenderão a se fechar, as de direção E-W tenderão a formar falhas transcorrentes, ao passo que as aberturas de direção N45E e N45W tenderão a se fechar ou abrir, alternadamente, sendo as mais importantes para a movimentação da água.

Sob o ponto de vista hidrogeológico, a atividade neotectônica é fundamental para que essas estruturas planares se mantenham abertas e conectadas em profundidade permitindo a recarga e a circulação de água nos aquíferos fraturados (Xavier, 2010).

## 2.3. Geologia da Região de São Sebastião

A cidade de São Sebastião está assentada sobre as rochas da Formação Serra do Landim, do Grupo Canastra que apresenta as lentes de mármore responsáveis pelos poços com vazões anômalas dentro do contexto do Distrito Federal. Essas lentes de mármore encontram-se interdigitadas a filitos cortados por veios de quartzo, conforme relatado em relatórios de perfuração de poços construídos pela CAESB.

Assim, de acordo com a descrição desses perfis, os filitos são laminados com presença frequente de veios de quartzo. Apresentam coloração esverdeada que pode variar para tons de marrom e amarelo. Em alguns perfis é descrita a passagem gradacional do filito para os calcários.

As lentes carbonáticas apresentam coloração cinza escuro, textura fina e são frequentemente cortadas por veios calcíticos, apesar do aspecto bastante compacto da rocha. Não raro, há poços cujo perfil atravessa exclusivamente esse litotipo. Os perfis dos poços descrevem ainda a ocorrência frequente de cavidades associadas a esses mármore.

Joko (2002) e Xavier (2010) afirmam que um gráben é a estrutura que melhor explica o arcabouço estrutural da região. Ambos afirmam que os limites do gráben são definidos por falhamentos, sendo que o de oeste corresponde à falha de empurrão que põe em contato unidades dos grupos Paranoá e Canastra. O de leste está materializado pela calha, praticamente retilínea, do ribeirão Mato Grande de direção aproximada N40W, ocorrendo o mesmo com o limite sul. Este, no entanto, corresponde ao traçado do córrego Santo Antônio da Papuda de direção geral N40E. Já o falhamento que perfaz o limite sudeste, dado pelo córrego Borá Manso, apresenta direções N40W e E-W.

Segundo Xavier (2010), a evolução do gráben se deu pelo desenvolvimento de falhas normais neotectônicas durante o Terciário, ou seja, após a estabilização do empurrão de baixo ângulo que sobrepôs o Grupo Canastra ao Grupo Paranoá durante o Ciclo Brasileiro. Assim, a falha normal principal, bem como as subsidiárias, se formaram a partir da reativação de antigos planos de fraqueza (falhas, fraturas, etc.) de idade brasileira.

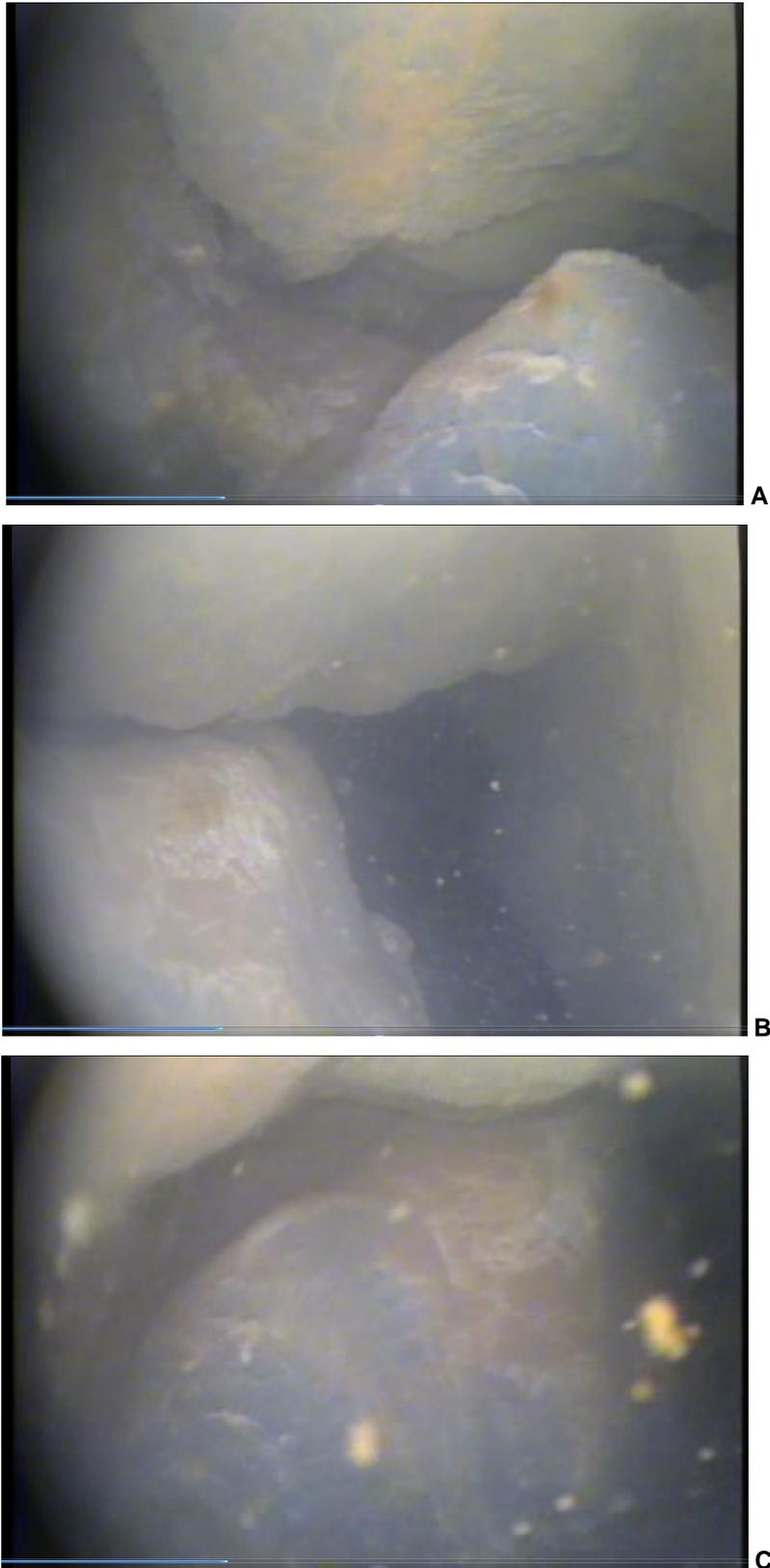
Com a ativação dessas falhas, os filitos e mármorees do Grupo Canastra foram seccionados e abatidos. As rochas psamíticas e pelíticas do Grupo Paranoá permaneceram elevadas a oeste, e os filitos do Grupo Canastra, a leste. Com a evolução da paisagem, os blocos elevados (*horsts*) sofreram erosão e os sedimentos gerados foram sendo depositados sobre os blocos abatidos. Outras falhas normais se formaram subsequentemente, promovendo novos abatimentos. Novamente as áreas elevadas foram submetidas a processos erosivos, de tal modo que as lentes de mármorees são encontradas apenas nas porções do terreno topograficamente mais baixas, conforme atestam os dados dos perfis construtivos de poços da CAESB.

Esses falhamentos favoreceram ainda o desenvolvimento da carstificação observada nos mármorees da região. As cavernas que se formaram têm, no entanto, dimensões aproximadas de 1 ou 2 metros, levando à conclusão de que o processo de dissolução dessas lentes foi apenas incipiente. Apesar disso, há evidências de importantes movimentações no interior dessas cavidades.

Imagens de vídeo-inspeções feitas em poços produtivos da CAESB mostram blocos desmoronados no interior dessas cavidades, hoje submersas, ou seja, dentro da zona saturada do aquífero (Figuras 2.4A a 2.4C).

Considerando que os blocos desmoronados estão situados a pequenas profundidades (40 a 50 metros) e que não há registros de feições de reflexo desses desmoronamentos em superfície, tais como dolinamentos, recalques, sismos, etc., depreende-se que esses desmoronamentos não são recentes, ou seja, provavelmente foram produzidos durante a formação do gráben. Durante a movimentação promovida pelas falhas normais, que posicionaram esses aquíferos a profundidades maiores, abaixo do nível freático, muitos desmoronamentos devem ter ocorrido. Tais fatos corroboram com a hipótese do gráben ser a principal estrutura que define a geometria dos aquíferos da área.

Outra evidência da existência do gráben reside na espessura dos solos que variam abruptamente de uma margem a outra do ribeirão Mato Grande. Segundo Xavier (2010), enquanto na porção correspondente à calha tectônica do gráben os solos são bastante desenvolvidos, com espessuras frequentemente superiores a 50 metros, nas áreas que margeiam a calha, onde o relevo é elevado e movimentado, as espessuras dos solos são da ordem de no máximo 3 metros. Com relação aos solos posicionados no interior da calha, trata-se principalmente de latossolos formados inicialmente a partir da deposição do material erodido das áreas elevadas. Atualmente encontram-se bastante pedogenizada, preservando fragmentos de quartzitos, apesar de repousar sobre filitos e mármorees.



**Figura 2.4 A a C** - Imagens de vídeo-inspeções mostram blocos desmoronados no interior de cavernas encontradas em poços produtivos do sistema de abastecimento de São Sebastião (2.4 A e B – poço SS-01; 2.4 C – poço SS-15) (imagens cedidas pela CAESB). A largura da imagem representa 6 polegadas.

As áreas altas, por sua vez, margeando a calha, devido ao relevo elevado e movimentado, onde predominam processos de erosão, apresentam solos rasos e imaturos, tais como cambissolos e neossolos litólicos.

A estrutura em gráben também explica a preservação das lentes de mármore no interior da calha, uma vez que estas foram poupadas dos processos erosivos, além de justificar o caráter fissural que favoreceu as vazões anômalas locais devido à formação de grande quantidade de fraturas mantidas abertas.

## 2.4. Geomorfologia

Novaes Pinto (1994) propôs dividir o DF em três compartimentos geomorfológicos, quais sejam: Região de Chapadas, Áreas de Dissecação Intermediária e Região Dissecada de Vale. Tal compartimentação se baseou nas características topográficas, altimétricas e de cobertura de solos e de vegetação.

Martins & Baptista (1998) propuseram uma compartimentação geomorfológica para o Distrito Federal tomando por base, além das feições de relevo, as relações entre os processos morfogenéticos atuantes na paisagem: pedogênese, erosão e deposição. Assim, definiram cinco compartimentos: Chapadas Elevadas, Planos Intermediários, Rebordos, Escarpas e Planícies.

Campos (2010) estabeleceu uma integração e adaptação das duas propostas citadas acima definindo cinco novos compartimentos, a saber: Planos Elevados, Planos Intermediários, Vales Dissecados, Rebordos e Rampas Íngremes. Para a construção desta proposta os critérios de maior relevância considerados foram o padrão de relevo, a declividade, o grau de dissecação e a densidade de drenagem.

Assim, abaixo, são transcritas as principais características definidas por Campos (2010) de cada um dos compartimentos delimitados (Figura 2.5).

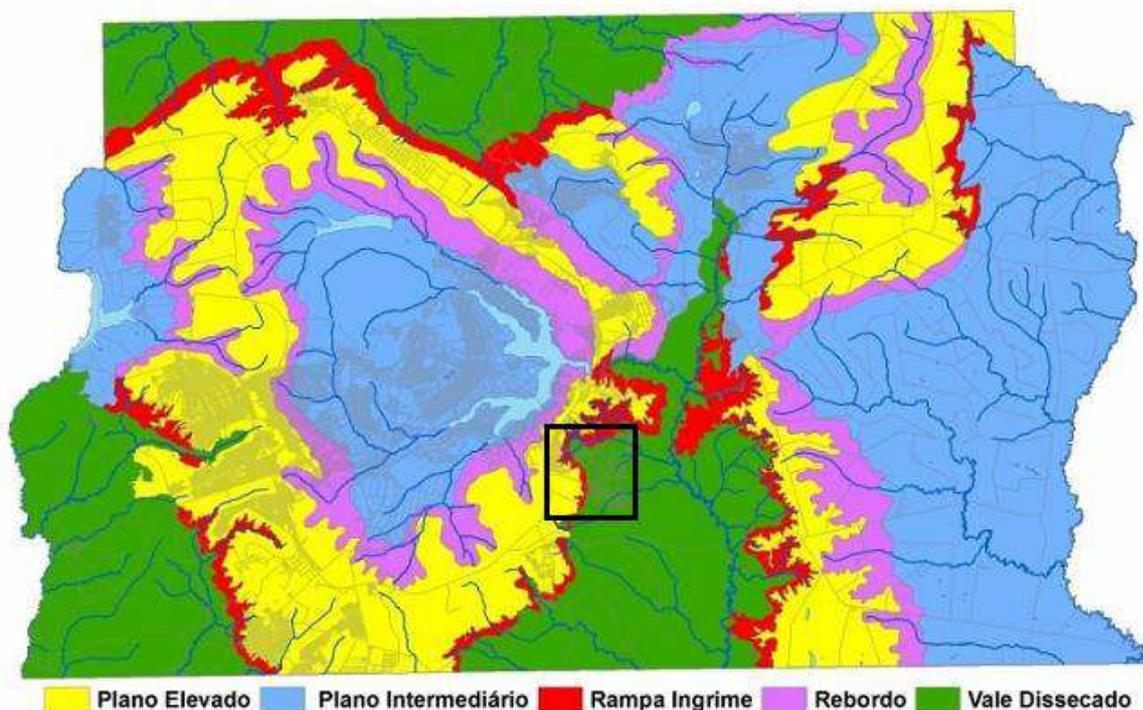
Planos Elevados: apresentam relevo plano a suave ondulado; baixa densidade de drenagem; predominância de Latossolos; declividades inferiores a 10%; cotas altimétricas superiores aos 1100 metros; e pedogênese como o processo morfodinâmico dominante em detrimento da erosão e do transporte.

Planos Intermediários: corresponde às áreas com padrão de relevo plano a suave ondulado, porém, com declividades inferiores a 12%; cotas altimétricas entre 950 e 1050 metros, sendo a pedogênese o processo predominante.

Vales Dissecados: compreende as áreas com relevo ondulado a forte ondulado que apresentam alta densidade de drenagem, declividades superiores a 20% e cotas inferiores a 800 metros. Têm predominância de Cambissolos e a erosão é o processo morfodinâmico de maior relevância.

Rebordos: correspondem às áreas de relevo ondulado com densidade de drenagem moderada e predominância de Cambissolos; apresentam declividades entre 10 e 20% e cotas entre 950 e 1100 metros sendo que a erosão ainda é o processo morfodinâmico dominante.

Rampas Íngremes: apresentam padrão de relevo forte ondulado a escarpado com alta densidade de drenagem, ampla predominância de Latossolos, porém, inclui áreas de declividade superior a 25% e cota altimétrica entre 800 e 1100 metros. A erosão e o transporte são os processos de maior relevância.



**Figura 2.5.** - Mapa de compartimentação geomorfológica do Distrito Federal (Campos, 2010). O polígono preto marca o limite da área de estudo.

Para o enquadramento detalhado da área de estudo foi construído um mapa de declividade a partir de curvas de nível cotadas com separação de 25 metros entre si (Figura 2.6). Associando a cada classe de declividade uma variação de cotas altimétricas foi possível definir três compartimentos geomorfológicos, cuja nomenclatura adotada é a mesma proposta por Campos (2010):

*Planos Elevados:* compreende toda a porção oeste da área englobando os condomínios horizontais do Jardim Botânico e o bairro Jardins Mangueiral onde a cota altimétrica é superior a 1100 metros. Trata-se do bloco não abatido (*Horst*) pela falha normal neotectônica cujo topo apresenta relevo plano e espessa camada de latossolos devido à predominância de processos pedogenéticos nesse ambiente. A declividade nesse compartimento varia de <2 a 5%, de modo que, ali, a água de precipitação pluviométrica tem tendência natural a infiltrar. Localmente essas declividades podem ser maiores.

*Vales Dissecados:* na área do projeto compreende as porções rebaixadas cuja declividade está entre <2 e 10%. Localmente podem ocorrer declividades maiores. Correspondem, portanto, à área do gráben propriamente dito que abriga a cidade de São Sebastião, os vales dos córregos e ribeirões e suas várzeas. Compreende as áreas com cotas inferiores a 975 metros. Esse compartimento recebeu todo o aporte de sedimentos resultante da erosão da porção mais elevada. Os solos existentes nesse compartimento são bastante espessos, tanto em função dos sedimentos transportados e depositados sobre sua superfície quanto pela favorabilidade ao desenvolvimento de processos pedogenéticos.

*Rampas Íngremes:* perfaz o contato entre os dois compartimentos anteriores, apresentando relevo acidentado com declividades acentuadas, superiores a 10% e até superiores a 20%. É nesse compartimento que se encontram as nascentes das drenagens que cortam a área, sendo comum encontrar fragmentos rochosos na superfície do terreno visto que

ali predominam os processos erosivos. É caracterizado por estar situado entre as cotas 975 a 1100 metros.

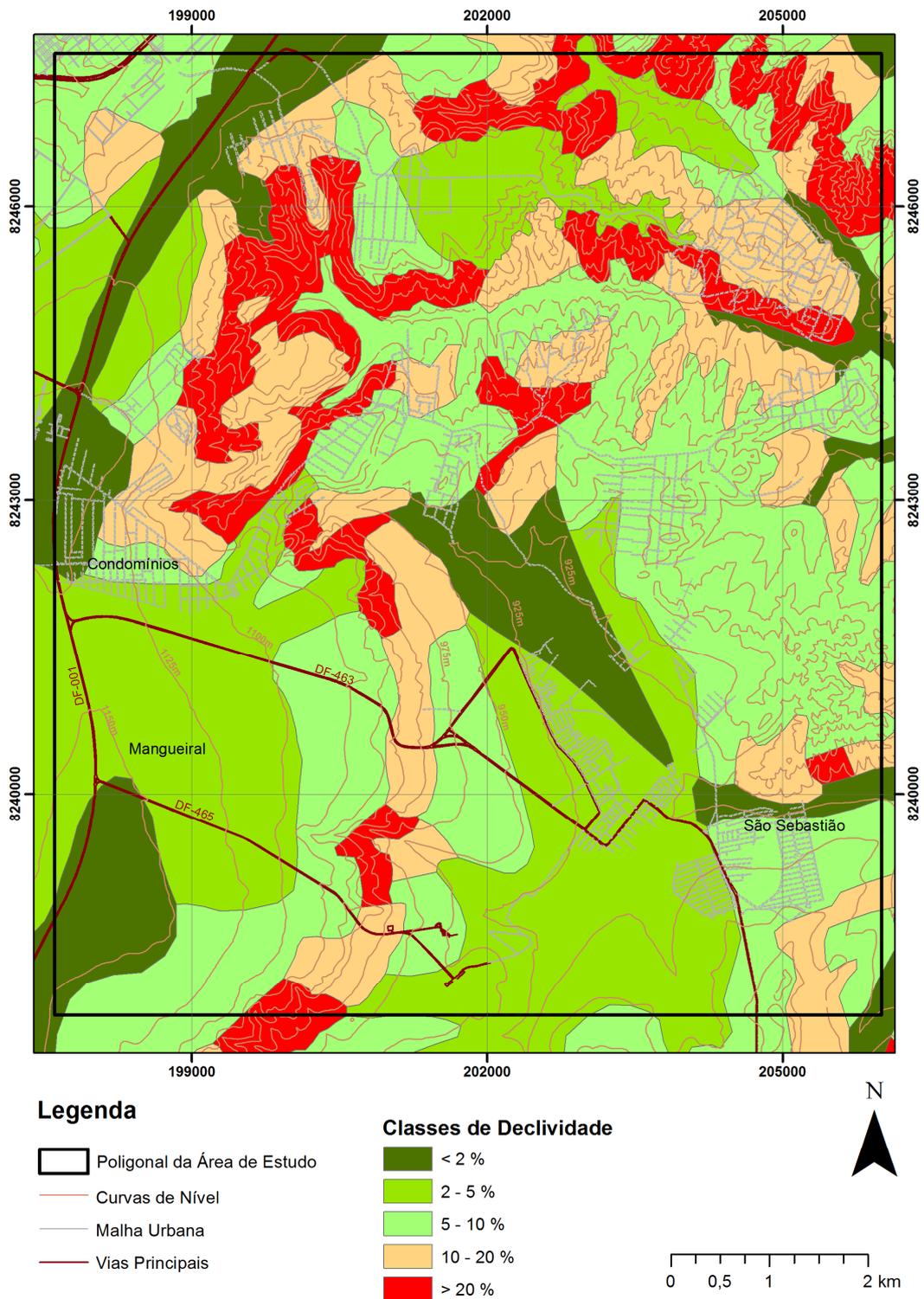


Figura 2.6 - Mapa de declividade da área de estudo.

## 2.5. Solos

No Distrito Federal são três as classes de solos mais representativas em termos de distribuição espacial: latossolos vermelhos, vermelho-amarelos e cambissolos háplicos. Há ainda outras classes de ocorrência mais restrita, porém, de importância significativa, que merecem destaque. São eles: gleissolos, nitossolos, plintossolos, neossolos litólicos, neossolos quartzarênicos, neossolos flúvicos, chernossolos e organossolos (Campos, 2010).

De acordo com o mapeamento realizado por Joko (2002), na região de São Sebastião são encontradas as seguintes classes de solos: latossolo vermelho, latossolo vermelho-amarelo, cambissolo, organossolo e nitossolo. Os trabalhos de campo realizados na região permitiram corroborar o levantamento feito por Joko (2002) tanto no que concerne às classes de solos, quanto aos seus limites. Cumpre esclarecer que esse reconhecimento baseou-se, principalmente, em variações texturais dos solos e no tipo de vegetação associada.

Outrossim, tendo em vista o objetivo da presente dissertação, não será feita a descrição detalhada de todas as classes de solo encontradas no território do Distrito Federal, mas apenas daquelas encontradas na área de interesse, conforme apresentado a seguir.

### Latossolos

Os latossolos estão associados à regiões de relevo plano à suave ondulado, comumente em áreas de chapada onde a declividade é, no geral, igual ou inferior a 5%. Assim, nessas áreas ocorre o desenvolvimento de espessas camadas desses solos (da ordem de dezenas de metros), pois é favorecida a infiltração da água de precipitação pluviométrica em detrimento do escoamento superficial, de tal modo que a exposição prolongada das rochas à percolação da água promove intemperismo químico intenso e profundo nas rochas.

Esse processo intempérico é o responsável pela lixiviação de bases e de sílica e pelo enriquecimento relativo em ferro e alumínio, com a formação de óxidos e hidróxidos desses elementos. Assim, os latossolos são, no geral, álicos, fortemente ácidos e distróficos. Neste último caso, porém, a intensidade varia de acordo com o aporte de matéria orgânica fornecido pelo tipo de cobertura vegetal.

Segundo EMBRAPA (2009), são definidos como solos constituídos por material mineral, com horizonte B latossólico, posicionado logo abaixo de qualquer horizonte A e com espessura mínima de 200cm. Os latossolos são divididos em diversas subclasses, segundo critérios variados. Para o caso em tela, duas subclasses são relevantes, quais sejam: latossolos vermelhos e vermelhos-amarelos.

No que concerne a área do projeto, os latossolos vermelhos e vermelhos-amarelos ocorrem nas porções oeste e sul do seu polígono, associados às áreas de topo de Planos Elevados, bem como às áreas de Vales Dissecados. O material de origem, no caso dos Planos Elevados, corresponde às rochas quartzíticas e metapelíticas do Grupo Paranoá e, apesar da textura desses solos ser predominantemente siltosa e argilosa, sua estruturação em forma de grânulos esféricos e semi-esféricos melhora sua permeabilidade.

Na parte sul da área, os latossolos são resultado do intemperismo das rochas pelíticas do Grupo Canastra, porém, os sedimentos gerados nessas áreas de relevos ondulados foram transportados e depositados nas áreas de relevo plano, correspondentes aos Vales Dissecados. Esses latossolos, no entanto, não estão estruturados em grânulos como aqueles situados nas áreas de chapada. Joko (2002) atribui essa característica ao fato desses solos estarem assentados sobre superfícies recentes.

### Cambissolos

Segundo a definição da EMBRAPA (2009), cambissolos são constituídos por material mineral e compostos por horizonte B incipiente sobreposto por horizonte A ou hístico (constituído predominantemente de material orgânico) cuja espessura é insuficiente para defini-los como organossolos. Contudo, a configuração geral desta classe pode variar amplamente tendo em vista a forte influência exercida pelo material de origem, pelas formas de relevo e pelas condições climáticas.

Assim, de acordo com Campos (2010) no DF, os cambissolos podem ser descritos como solos pouco desenvolvidos, sendo comum encontrar fragmentos de minerais primários e de rocha em seu perfil. Geralmente ocorrem em áreas de vertentes e encostas onde a declividade é acentuada e cuja vegetação associada é, no geral, o campo limpo. São solos comumente muito ácidos e distróficos.

O horizonte A apresenta altos teores de silte o que, aliado à pequena profundidade do perfil, reduz significativamente a sua permeabilidade, favorecendo o desenvolvimento de processos erosivos e restringindo suas potencialidades hidrogeológicas.

Ocupam amplamente a área do projeto estendendo-se de norte a sudeste, sendo largamente associados às áreas de relevo movimentado correspondentes ao compartimento de Rampas Íngrimes e aos filitos do Grupo Canastra. Estes solos apresentam espessura bastante reduzida sendo comum a presença de fragmentos rochosos em sua superfície.

### Gleissolos

Segundo EMBRAPA (2009), trata-se de solos pouco evoluídos, constituídos, basicamente, de matéria orgânica em diversas fases de decomposição, portanto, apresenta coloração escura, preta ou cinza-escura. Essa condição, no geral, é fruto de ambientes mal ou muito mal drenados devido à constante elevação do nível freático durante muitos meses do ano.

A grande quantidade de matéria orgânica que os compõe torna-os, frequentemente, muito ácidos pela presença abundante de ácidos húmicos. Além disso, apresentam elevada capacidade de troca catiônica e baixa saturação por bases. Podem ser intercalados por horizontes minerais de espessuras variáveis.

Segundo Campos (2010), no DF esses solos podem ser caracterizados como friáveis, espessos, frequentemente encharcados e ocorrem em áreas de relevo plano a deprimido com vegetação rasteira e/ou arbustiva associada. Além disso, se desenvolvem a partir de uma taxa de deposição de matéria orgânica muito superior à capacidade de decomposição desta.

Na porção centro-leste da área do projeto, ocorre em estreitas faixas que correspondem às margens do córrego Mato Grande onde o nível freático encontra-se próximo à superfície durante a maior parte do ano. São associados à densa floresta perenifolia de várzea (Joko, 2002), apresentam textura argilosa e ocorrem em áreas planas e dissecadas.

Joko (2002) afirma que as áreas ocupadas por esses solos não foram ocupadas por edificações, tendo sido destinadas à preservação ambiental. Campos (2010), por sua vez, afirma que as limitações dessa classe de solos, no tocante aos usos urbanos, são função de sua alta plasticidade, reduzida permeabilidade e abundância de matéria orgânica. Outros autores (Valladares *et. al.*, 2005) afirmam que a subsidência é um dos problemas mais recorrentes dessa classe de solo devido à drenagem excessiva para abrigar construções.

### Nitossolos

De acordo com EMBRAPA (2009) estes solos podem ser definidos como solos constituídos por material mineral, com horizonte B nítico posicionado sob horizonte A, desde que contido em 1,5 metros a partir da superfície do solo. Apresentam textura argilosa ou muito

argilosa e estrutura em blocos subangulares, angulares ou prismáticos, com cerosidade expressiva nas superfícies dos agregados e coloração que varia de vermelho a brunada. São profundos, bem drenados, moderadamente ácidos a ácidos, formados por argila de baixa atividade, comumente caulínica.

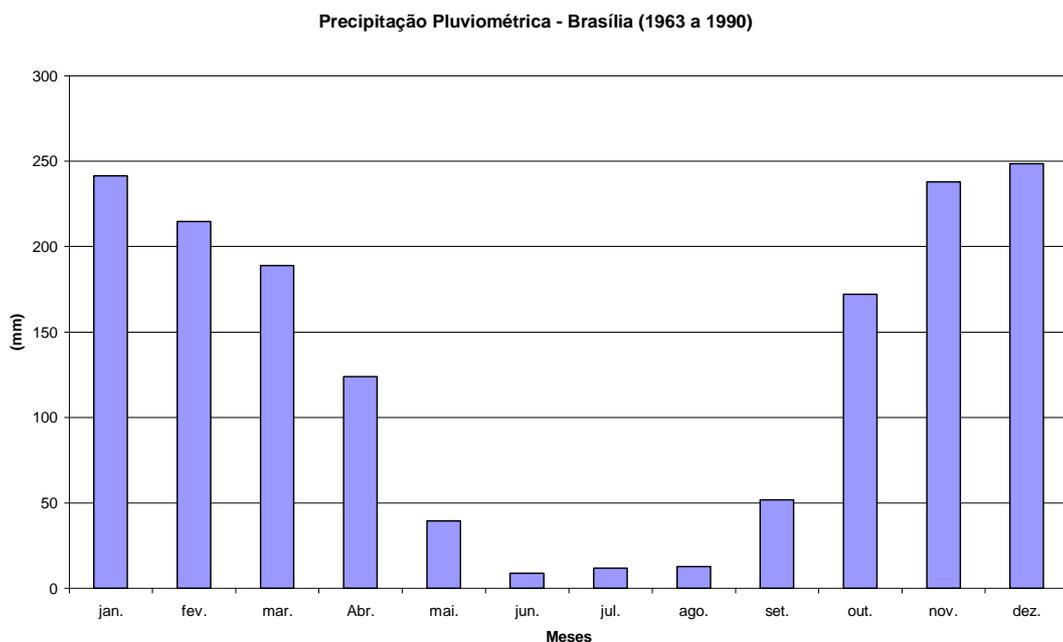
Na área do projeto ocorrem em pequenas manchas e são associados às áreas de relevo ondulado e de floresta subcaducifolia que ocorrem ao longo de algumas drenagens superficiais. Segundo Joko (2002), a grande concentração de argila no horizonte B, devido à processos de iluviação, além de determinar a marcante heterogeneidade textural desses solos dificultam o fluxo descendente e lateral da água subterrânea. Assim, configuram-se como aquíferos de reduzida expressividade.

## 2.6. Clima

De acordo com a classificação de Köppen (*apud* Campos, 2010), o Distrito Federal tem clima do tipo tropical úmido cuja sigla, Aw, remete a um clima tropical com inverno seco. Assim, a marcante sazonalidade climática é sua principal característica: o inverno, compreendido entre os meses de maio e setembro, é frio e seco, e o verão, no período que vai de outubro a abril, é quente e úmido.

Campos (2010) analisou dados de uma estação climatológica do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) obtidos entre os anos de 1960 e 1990 para estabelecer os parâmetros climáticos do DF. Para compreender a distribuição das chuvas em seu território, foram utilizados dados de outras 44 estações situadas dentro do DF e de 14, situadas no seu entorno. Assim, abaixo são apresentadas as conclusões obtidas aplicáveis ao presente projeto.

As chuvas no DF se concentram no período correspondente ao verão do hemisfério sul, sendo as médias mensais entre os meses de novembro e fevereiro superiores a 200 mm. Entre os meses de maio e setembro, compreendendo o período seco, a média de precipitação é inferior a 50 mm (Figura 2.7). A média anual no DF pode variar de 709 a 1890 mm (Campos, 2010).



**Figura 2.7** – Distribuição anual dos totais mensais da estação Brasília (Baptista, 1998).

Dados da estação pluviométrica da CAESB denominada Papuda coletados entre 1971 e 2010 mostram que a média de precipitação para a região é de 1360,3 mm.

A temperatura do ar também sofre importante influência da variação altimétrica de uma área. No DF observam-se valores de médias mais elevadas nas regiões correspondentes ao compartimento de Vales Dissecados (depressões) e, mais baixas nos compartimentos de Planos Elevados (chapadas).

Há ainda que se considerar que, no período seco a insolação no DF é maior que no período chuvoso devido à escassez de nebulosidade, acarretando numa maior evaporação da água. O resultado disso é um déficit de água no solo entre os meses de maio e outubro e um superávit entre novembro e abril (Campos, 2010).

## 2.7. Hidrogeologia

Do ponto de vista hidrogeológico, o Distrito Federal está situado entre as Províncias Hidrogeológicas do Escudo Central e do São Francisco. Em tais províncias predominam aquíferos fissurais cobertos por solos espessos com características hidrogeológicas variáveis (Campos, 2010).

Campos & Freitas-Silva (1998) classificaram os domínios hidrogeológicos do DF denominando-os de Domínio Aquífero Poroso e Domínio Aquífero Fraturado, tendo em vista as principais características hidrodinâmicas de cada um. Porém, Campos (2010) reclassificou esses domínios em Domínio Aquífero Intergranular, Domínio Aquífero Fraturado e Domínio Aquífero Fissuro-Cárstico tomando por base o tipo de reservatório que cada um desses aquíferos representa.

### Domínio Aquífero Intergranular

O Domínio Aquífero Intergranular corresponde aos aquíferos conformados em solos, saprolitos e aluviões. Esses meios geológicos apresentam porosidade intersticial, ou seja, os espaços vazios entre os grãos do material não consolidado são interconectados e capazes de armazenar e transmitir água. Assim, tais aquíferos têm como características gerais: são aquíferos livres ou suspensos, de grande extensão e continuidade lateral, têm espessuras saturadas da ordem de dezenas de metros, são heterogêneos e anisotrópicos.

Outrossim, com base nas espessuras saturadas e nas condutividades hidráulicas, quatro sistemas aquíferos foram definidos para o domínio, quais sejam: **P<sub>1</sub>**, **P<sub>2</sub>**, **P<sub>3</sub>** e **P<sub>4</sub>**.

Os Sistemas **P<sub>1</sub>** e **P<sub>2</sub>** apresentam espessuras saturadas superiores a 20 metros e condutividades hidráulicas alta, para o primeiro caso, que significa valores superiores a  $10^{-6}$  m/s; e moderada, para o segundo, representando valores de condutividade da ordem de grandeza de  $10^{-6}$  m/s.

O Sistema **P<sub>3</sub>** apresenta espessura saturada menor que 10 metros e condutividade hidráulica com valores inferiores a  $10^{-6}$  m/s.

Por fim, o Sistema **P<sub>4</sub>** tem espessura saturada, no geral, inferior a 1 metro, mas que pode atingir os 2,5 metros, e condutividade hidráulica muito baixa.

### Domínio Aquífero Fraturado

Compreende os aquíferos conformados em rocha sã. A água nesses aquíferos é transportada e acumulada ao longo das descontinuidades planares das rochas, tais como fraturas, microfraturas, diáclases, juntas e falhas, incluindo as de zonas de cisalhamento. Essas descontinuidades são denominadas de porosidade secundária, visto os espaços intersticiais das rochas originais haverem sido obliterados pelos processos de litificação e, principalmente, pelos metamórficos.

Assim, este domínio é representado por aquíferos livres ou confinados, de extensão lateral variável, com forte anisotropia e heterogeneidade. Freitas-Silva & Campos (1998) descreveram quatro sistemas aquíferos correspondentes às respectivas unidades geológicas do DF, incluindo os sistemas aquíferos: Paranoá, Canastra, Bambuí e Araxá.

O Sistema Paranoá foi subdividido em seis subsistemas correspondentes às unidades geológicas e hidroestratigráficas, reunidas segundo as semelhanças em seus comportamentos hidrodinâmicos, conforme descrito a seguir:

- Subsistema S/A: apresenta média de vazões de 12 m<sup>3</sup>/h; sua condutividade hidráulica é classificada como média; as águas captadas podem apresentar anomalias em ferro total. A importância hidrogeológica local é grande;
- Subsistema A: apresenta média de vazões de 4,39 m<sup>3</sup>/h; compõe-se de aquíferos com baixa condutividade hidráulica devido à alta plasticidade da rocha em questão, visto produzir fraturamentos com interconectividade deficiente. Esta característica torna bastante pequena sua importância hidrogeológica local. As reservas hídricas dos poços tubulares estão sujeitas a amplas variações sazonais;
- Subsistema R<sub>3</sub>/Q<sub>3</sub>: apresenta média de vazões de 12,2 m<sup>3</sup>/h e condutividade hidráulica média; a água apresenta excelente qualidade físico-química; configuram-se como os melhores aquíferos do domínio, em termos de vazão média;
- Subsistema R<sub>4</sub>: apresenta média de vazões de 6,14 m<sup>3</sup>/h; trata-se de aquíferos de baixa condutividade hidráulica, característica que diminui sua importância hidrogeológica local.

O Sistema Canastra também foi subdividido segundo os mesmos critérios aplicados ao Sistema Paranoá, resultando em dois subsistemas, contudo, apenas um enquadrado no presente domínio.

- Subsistema F: com média de vazões de 7,5 m<sup>3</sup>/h; apresenta baixa condutividade hidráulica e importância hidrogeológica local moderada. Registram-se maiores possibilidades hidrogeológicas em locais de intersecção entre a foliação das rochas do Canastra e fraturas de alto ângulo.

O Sistema Bambuí apresenta média de vazões de 5,21 m<sup>3</sup>/h, condutividade hidráulica média a baixa. Sua importância hidrogeológica local é mediana.

O Sistema Araxá apresenta média de vazões de cerca de 3,14 m<sup>3</sup>/h e condutividade hidráulica muito baixa. A importância hidrogeológica local dos aquíferos deste sistema é muito pequena, com melhores condições em áreas de ocorrência de quartzitos.

#### Domínio Aquífero Fissuro-Cárstico

É representado por cavidades desenvolvidas nas rochas devido à dissolução de minerais carbonáticos. Esses minerais compõem rochas calcárias ou dolomíticas lenticulares que ocorrem interdigitadas a rochas pelíticas. São representadas pelo Subsistema PPC, do Sistema Paranoá, e pelo Subsistema F/Q/M, do Sistema Canastra.

Cumprido esclarecer que essas lentes são bastante restritas lateralmente, formando, portanto, cavernas de pequenas dimensões. No entanto, poços cujos perfis atravessam essas lentes apresentam vazões com anomalias consideráveis no contexto hidrogeológico do Distrito Federal, pois, chegam a atingir 186 m<sup>3</sup>/h (CAESB, 2012).

### *Sistema Paranoá*

- Subsistema PPC: apresenta média de vazões de 9,1 m<sup>3</sup>/h; trata-se de aquíferos com alta variabilidade lateral, de condutividade hidráulica baixa a elevada, e localmente com elevado grau de carstificação; água ligeiramente dura e importância hidrogeológica local variável.

### *Sistema Canastra*

- Subsistema F/Q/M: com média de vazões de 33 m<sup>3</sup>/h; trata-se de aquíferos com grau de carstificação localmente variável; a importância hidrogeológica local dos aquíferos desse sistema é relativamente grande.

A área do projeto engloba os Subsistemas R<sub>3</sub>/Q<sub>3</sub> e R<sub>4</sub> do Sistema Paranoá, além dos Subsistemas F e F/Q/M do Sistema Canastra. Os aquíferos R<sub>3</sub>/Q<sub>3</sub> e R<sub>4</sub> ocorrem na porção oeste da área do projeto, enquanto os aquíferos do Sistema Canastra são encontrados em toda a porção leste e central. A CAESB mantém poços ativos em todos os subsistemas citados e, a partir dos dados levantados e fornecidos pela concessionária, tem-se um panorama das características hidráulicas de cada um.

Os poços construídos no subsistema R<sub>3</sub>/Q<sub>3</sub>, por estarem situados próximos ao contato tectônico entre os grupos Paranoá e Canastra, no que concerne ao projeto em questão, apresentam-se bastante fraturados. São poços com vazões bastante variáveis (variam de 17 a 56m<sup>3</sup>/h). A partir de vídeo-inspeções observa-se que as principais fraturas produtoras apresentam aberturas que podem atingir até uma dezena de centímetros, revelando poços com boa capacidade produtiva. Essas fraturas encontram-se bastante interconectadas, mostrando que se trata de aquíferos com boa capacidade de recarga e reservação.

Os poços situados no subsistema R<sub>4</sub> apresentam vazões muito variadas, devido à baixa competência das rochas argilosas que tendem a se dobrar ao invés de fraturar frente aos esforços tectônicos deformacionais. Assim, as fraturas geradas são de pequena escala e o mergulho sub-horizontal. Com isso, as vazões não são muito altas no geral, podendo, no entanto, alcançar valores que ultrapassam a média estabelecida para o domínio apresentada por Campos & Freitas-Silva (1998).

Os poços do subsistema F apresentam vazões baixas, no geral inferiores a 10m<sup>3</sup>/h, no entanto, podem atingir valores próximos a 64m<sup>3</sup>/h. Isto se deve provavelmente devido aos veios de quartzo bastante abundantes em seus perfis. Os veios de quartzo, além de favorecerem a circulação e a armazenagem da água subterrânea, contribuem significativamente para a alteração das rochas em profundidade, visto ser comum a descrição de perfis profundos de solos e rocha alterada (>50 metros). A rocha sã é descrita como bastante compacta ocorrendo entradas d'água a profundidades superiores a 100 metros.

Os poços do sistema F/Q/M têm vazões que variam de 14 a 186m<sup>3</sup>/h, sendo que esse valor pode ser ainda maior, uma vez que a capacidade de suporte da rede elétrica na região impõe limitações ao sistema de bombeamento da água. Trata-se de água armazenada nas cavidades formadas nas lentes de mármores com boa interconexão.

### **2.7.1. Modelos Conceituais de Aquífero**

Lousada (2005) definiu quatro modelos conceituais de fluxo para o Distrito Federal (Figuras 2.8 A a D) baseados em diferentes contextos de relevo, solo e geologia.

### Modelo das Duas Superfícies Potenciométricas

Aplica-se às regiões no interior das chapadas, onde pela conformação do meio, há propensão para a formação de duas superfícies potenciométricas. A primeira se forma no aquífero intergranular sendo sustentada por uma barreira hidráulica formada por argilas que se acumulam no topo do aquífero fraturado. A segunda superfície é formada no interior do próprio aquífero fraturado.

Esse modelo é mais evidente no período de estiagem, uma vez que, durante o período chuvoso, o topo do aquífero fraturado também sofre saturação rompendo a barreira hidráulica e misturando então as duas superfícies potenciométricas (Figura 2.8A).

### Modelo da Superfície Única com Confinamento

Aplica-se às regiões de relevo movimentado em que ocorrem rochas pelíticas cobertas por camada de solo pouco desenvolvido. O solo funciona como aquitarde, alimentando o aquífero rochoso/fraturado sotoposto por gotejamento a uma velocidade muito baixa. A recarga também pode ocorrer por fluxo lateral a partir de outros sistemas aquíferos (Figura 2.8B).

### Modelo da Superfície Única sem Confinamento

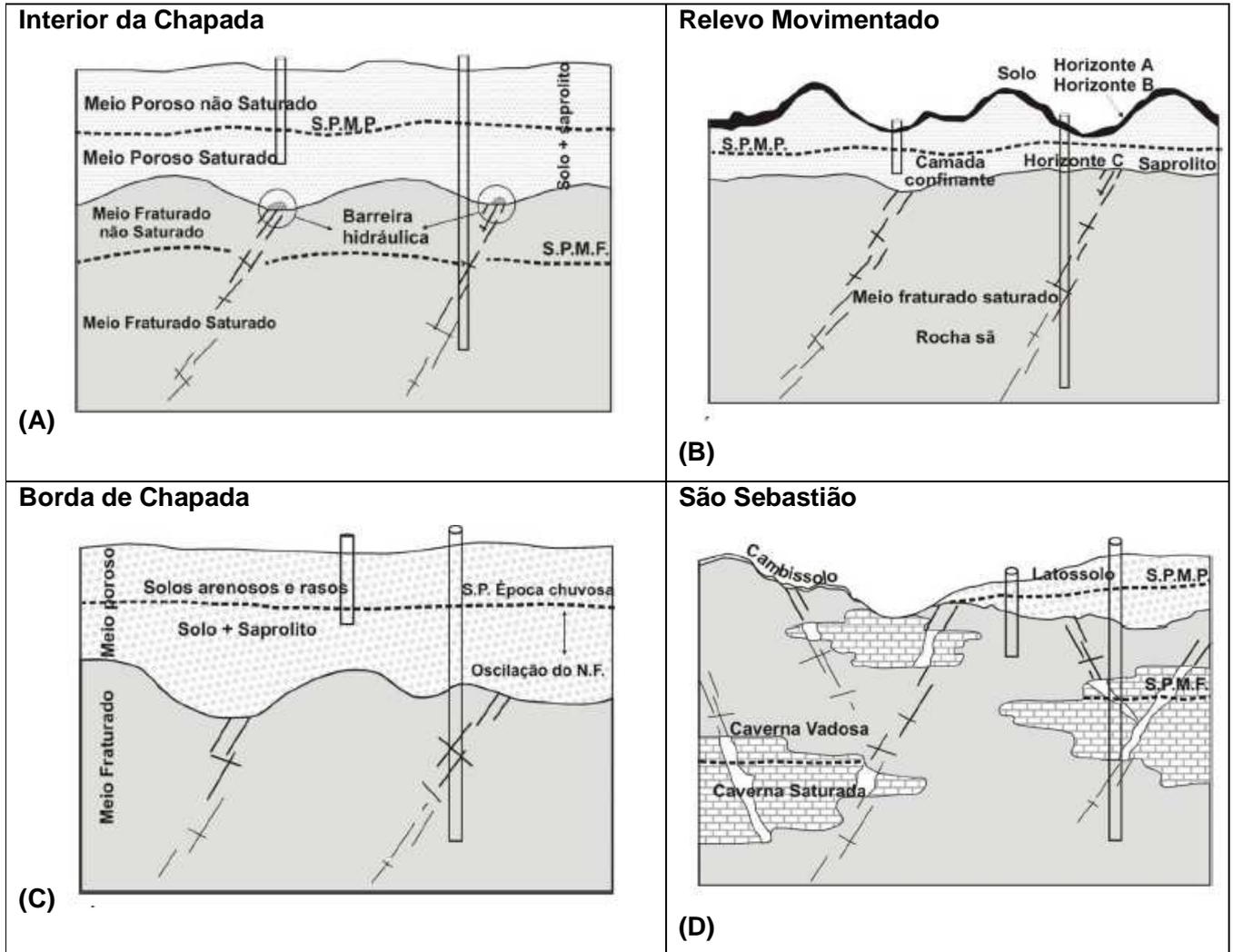
Aplica-se às áreas de relevo suave-ondulado, próximas às quebras de relevo e com cotas intermediárias. O aquífero fissural é recoberto por espessa camada de solo que favorece a circulação vertical da água de precipitação pluviométrica (Figura 2.8C).

### Modelo Fissuro-Cárstico

Aplica-se às regiões do DF que apresentam rochas carbonáticas interdigitadas a filitos e outras rochas pelíticas. Apresentará uma ou duas superfícies potenciométricas a depender da espessura da camada de solos sobreposta. A circulação é eminentemente vertical devido às limitações relativas ao fraturamento das rochas encaixantes (Figura 2.8D).

Este é o modelo aplicado ao aquífero que abastece a cidade de São Sebastião, objeto de estudo desse trabalho. O topo das lentes de mármore que compõe tal aquífero é encontrado a profundidades variáveis, de modo que essas lentes ocorrem: a pequenas profundidades (<10 metros) conectadas hidráulicamente à superfície e associadas a uma cobertura de solo de reduzida espessura; a grandes profundidades (>10 e <100 metros) e recobertas por espessa camada de solo.

Considerando esses dois cenários podem ocorrer significativas variações no comportamento hidrogeológico do modelo considerado, uma vez que os parâmetros hidráulicos do aquífero sofrem influência direta não só da espessura do solo, mas também da sua textura, bastante variável na área em estudo. Também a maior ou menor quantidade de material pelítico interdigitado às lentes de mármore e a espessura dessas lentes interferem no comportamento do aquífero.



**Figura 2.8** - Desenhos esquemáticos dos modelos de superfícies potenciométricas aplicáveis ao contexto do DF. (A) Modelo das Duas Superfícies Potenciométricas; (B) Modelo de Uma Superfície Potenciométrica com Confinamento; (C) Modelo de Uma Superfície Potenciométrica sem Confinamento; (D) Modelo Físsuro-Cárstico.

## CAPÍTULO 3

### DETERMINAÇÃO DAS ÁREAS DE RECARGA

A identificação de áreas e mecanismos de recarga de aquíferos é questão fundamental para a sua gestão, sendo importante do ponto de vista acadêmico e econômico frente a necessidade premente de se conciliar a crescente demanda por água e a preservação dos mananciais explorados.

A recarga pode ser então natural ou não-natural. O primeiro caso ocorre quando água de precipitação pluvial, de degelo, de rios ou de lagos infiltra a partir da superfície do solo, ou mesmo de afloramentos rochosos, até atingir o nível potenciométrico do aquífero adicionando-lhe volume extra. E é não-natural quando induzida por irrigação, vazamento de redes de distribuição, por meio de projetos de recarga artificial, entre outros (Maldaner, 2010).

Para o presente trabalho somente a recarga natural é relevante e esta, por sua vez, pode ser classificada como direta, indireta ou localizada. A recarga direta ocorre quando é atingido o limite de umidade da zona vadosa do solo. O excesso de água favorece a formação de fluxo vertical descendente até que seja atingida a zona saturada do aquífero. Já a recarga indireta se dá a partir da infiltração de água oriunda de corpos hídricos superficiais, como rios e lagos. Esse tipo de manancial é então denominado de influente. Por fim, a recarga localizada pode ser definida como resultante da concentração horizontal de água na superfície do solo devido à falta de canais de escoamento bem definidos. A água assim acumulada tem oportunidade de infiltrar até abastecer o aquífero.

A identificação das áreas de recarga de um aquífero é tradicionalmente feita por meio do levantamento de características do meio físico e interpretação de mapas e imagens de satélite utilizando técnicas de geoprocessamento. Porém, a utilização de isótopos estáveis de oxigênio e hidrogênio como traçadores naturais apresenta excelentes resultados e vem sendo largamente aplicada em estudos do gênero. Assim sendo, esta técnica foi utilizada no presente trabalho.

#### 3.1. Fundamentação Teórica

Isótopos estáveis de elementos químicos presentes nos maiores e mais significativos ciclos naturais, como o oxigênio ( $^{18}\text{O}$ ,  $^{17}\text{O}$  e  $^{16}\text{O}$ ), o hidrogênio ( $^1\text{H}$ ,  $^2\text{H}$ , e  $^3\text{H}$ ), o nitrogênio ( $^{14}\text{N}$ ,  $^{15}\text{N}$ ), o enxofre ( $^{32}\text{S}$ ,  $^{34}\text{S}$ ) e o carbono ( $^{12}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}$ ,  $^{14}\text{C}$ ) vêm sendo largamente utilizados como ferramenta para compreensão de diversos fenômenos climáticos e biológicos. A sua abundância na natureza, tanto quantitativa quanto qualitativamente, rendeu-lhes a denominação “Isótopos Ambientais” e possibilitou a sua utilização como marcadores ou traçadores cronológicos (Clark & Fritz, 1997).

Em estudos hidrogeológicos são utilizados com maior frequência os isótopos de oxigênio e hidrogênio, devido à composição da molécula da água, e principalmente em estudos de proveniência, de recarga de aquíferos e de idade da água subterrânea.

A água, na Terra, é encontrada nos estados físicos: líquido, sólido e gasoso, a depender do processo a que ela se encontra submetida dentro do seu ciclo. Este último se estabelece pela interação entre a superfície do planeta e sua atmosfera. Do ponto de vista das reações isotópicas, essas transformações são significativamente condicionadas pela temperatura, já que se trata de um processo termodinâmico, e pela umidade relativa do ar. Outros fatores atuam em menor escala.

Essa mudança nos estados físicos da água dentro de seu ciclo motiva a diferenciação isotópica de sua molécula, lembrando que, isótopos são elementos químicos com mesmo

número atômico, porém, com diferente número de massa. Essa variação no número da massa atômica é dada pela diferente quantidade de nêutrons presentes no núcleo do elemento químico considerado. Tal variação, por sua vez, confere propriedades físicas específicas a cada isótopo, condicionando, assim comportamentos distintos para cada um frente aos diversos processos do ciclo hidrológico.

A molécula de água é formada por dois átomos de hidrogênio e um de oxigênio. A composição isotópica dela pode, portanto, variar a depender da massa dos isótopos que a compuser.

O oxigênio possui três isótopos:  $^{18}\text{O}$ ,  $^{17}\text{O}$  e  $^{16}\text{O}$ , todos considerados estáveis na natureza por não apresentarem decaimento radioativo. O hidrogênio também apresenta três isótopos distintos:  $^1\text{H}$  - *prótio*,  $^2\text{H}$  - *deutério ou D* e  $^3\text{H}$  - *trítio ou T*, sendo este último radiogênico. Na natureza, cada isótopo ocorre em uma determinada proporção, havendo sempre predominância de um deles. No caso do oxigênio essas proporções ou abundâncias são:  $^{16}\text{O}$  - 99,756% e  $^{18}\text{O}$  - 0,205%. O  $^{17}\text{O}$  tem sua abundância medida relativamente ao  $^{18}\text{O}$ . Contudo, as variações do  $^{17}\text{O}$  em relação ao  $^{18}\text{O}$  dentro do ciclo hidrológico não foram medidas a ponto de gerar uma regra, porém, pode-se afirmar que sua abundância é de cerca de 1/10  $^{18}\text{O}$  (Gat, 1996) (Allègre, 2008). Já para o hidrogênio as abundâncias de cada isótopo são:  $^1\text{H}$  - 99,985% e D - 0,015% (Maldaner, 2010). A ocorrência do trítio será discutida em tópico separado mais adiante.

Assim, considerando todos os isótopos de hidrogênio e oxigênio, são possíveis 18 combinações distintas na construção da molécula de água. Cada uma delas também apresenta maior ou menor abundância relativamente ao tipo de isótopo que a compuser. O processo que determina essa abundância é denominado fracionamento isotópico.

O fracionamento isotópico pode ser resumidamente definido como uma troca de isótopos, de um mesmo elemento, entre quaisquer duas espécies moleculares ou fases que estejam participando de uma reação ou processo. Ele ocorre em qualquer reação termodinâmica devido à diferenças nas taxas de reação das diferentes espécies moleculares. O resultado é a concentração desproporcional de um isótopo em relação a outro, em um dos lados da reação. Esse fenômeno pode ser explicado pela diferença na força de ligação estabelecida entre os isótopos pesado e leve de um mesmo elemento. As diferenças nas forças das ligações para isótopos de um mesmo elemento governam as diferenças nas taxas de fracionamento (Clark & Fritz, 1997).

A energia de um átomo é representada pela soma de suas energias específicas, a saber: rotacional, translacional e vibracional. A energia vibracional é, por definição, inversamente proporcional à massa atômica, portanto, uma molécula composta por isótopos leves, de uma mesma espécie, apresenta alta frequência ou energia vibracional. Isto implica a formação de ligações mais fracas, como as covalentes, que requerem menor quantidade de energia para serem rompidas, ou seja, uma molécula formada por isótopos mais leves tende a reagir mais rapidamente do que aquelas formadas por isótopos pesados (Ramos, 2006).

Portanto, a diferença de massa molecular e conseqüentemente do tipo de ligação estabelecida, determinarão o enriquecimento de um isótopo específico relativamente a outro mediante os fenômenos envolvidos no ciclo hidrológico (evaporação, precipitação, etc.). Portanto, se considerado, por exemplo, o processo de evaporação, verifica-se que os isótopos mais pesados ficam concentrados na fase residual mais densa, ou seja, na fase aquosa da associação vapor-líquido. Desse modo, a água na fase de vapor apresenta maior abundância de isótopos mais leves, como o  $^{16}\text{O}$  (o  $^{17}\text{O}$  é muito pouco abundante) e  $^1\text{H}$ , ao passo que a água residual ficaria enriquecida nos isótopos mais pesados,  $^{18}\text{O}$  e D (assim como o  $^{17}\text{O}$ , o trítio é bastante raro).

Há mais de uma forma de ocorrer fracionamento isotópico numa reação termodinâmica: reações físico-químicas sob condições de equilíbrio, de não-equilíbrio (também denominada reação de fracionamento cinético) ou de difusão (Clark & Fritz, 1997).

O equilíbrio isotópico pode ser definido a partir das condições necessárias para que ele ocorra. Em primeiro lugar, para que haja equilíbrio isotópico em uma reação é necessário que também exista equilíbrio químico, isto é, que a taxa de reação dos reagentes e dos produtos seja a mesma. Também é necessário que a reação ocorra durante tempo suficiente em ambas as direções para que ocorra a mistura dos isótopos entre os reservatórios de produtos e reagentes. Por fim, os reservatórios dos reagentes e dos produtos devem estar bem misturados, de outro modo o equilíbrio isotópico irá existir apenas para os reagentes e produtos formados instantaneamente e na região de vizinhança da reação, como, por exemplo, na interface ar-água para o equilíbrio vapor-água (Clark & Fritz, 1997).

Já as reações de não-equilíbrio ou de fracionamento cinético podem ser explicadas a partir de uma repentina mudança na temperatura, ou ainda pela retirada ou adição de um reagente, o que provoca o deslocamento de todo o sistema do equilíbrio termodinâmico. Desse modo, os produtos podem ter sua taxa de reação acelerada. O resultado disso é a redução ou aumento no fracionamento ou na discriminação de massa (Clark & Fritz, 1997).

O fracionamento por difusão molecular pode ser explicado pela maior difusividade das moléculas leves na fase de vapor. Assim, a fase vapor se torna mais enriquecida nos isótopos mais leves se comparada à fase líquida durante o processo de evaporação da água. Os principais fatores envolvidos nesse processo são a pressão de vapor e a massa molecular (Clark & Fritz, 1997).

Verifica-se que algumas importantes variações podem ser observadas no fenômeno do fracionamento isotópico. Essas variações se devem à influência de dois fatores principais, que geram determinados efeitos sobre as reações isotópicas, quais sejam: temperatura e precipitação. Outros efeitos são conhecidos, tais como, efeito da latitude, efeito da altitude, efeito da sazonalidade e efeito da continentalidade. No entanto, estes são desdobramentos dos primeiros, podendo ser entendidos como sua função, pois variam de acordo com esses dois parâmetros. Considerando que esses efeitos são melhor percebidos em escalas regionais, não serão descritos aqui. Assim, apenas os dois efeitos principais, que têm relevância para o presente trabalho, são apresentados a seguir.

#### Efeito da Temperatura

Por se tratar de uma reação termodinâmica, o fracionamento isotópico é extremamente dependente das variações de temperatura.

De acordo com Allègre (2008), o efeito da temperatura pode ser entendido por meio de uma curva em forma de sino: o fracionamento isotópico aumenta com a elevação da temperatura apenas inicialmente. A partir de um determinado valor de temperatura o que ocorre é um declínio do fracionamento, mesmo que a temperatura continue aumentando.

Em termos gerais, a temperatura promove o fracionamento cinético. Contudo, a troca isotópica, processo pelo qual o equilíbrio é atingido, é em si mesmo um processo cinético e, portanto, ativado pela temperatura. Assim, o aumento do fracionamento em função dos efeitos cinéticos promovidos pelo aumento de temperatura é progressivamente cancelado porque os processos de equilíbrio tornam-se dominantes. Diante disso, o fracionamento irá diminuir com o aumento da temperatura. Ou seja, sob temperaturas mais baixas o fracionamento isotópico é mais eficiente.

#### Efeito da Precipitação

Esse efeito pode ser explicado, em linhas gerais, como a perda significativa de isótopos  $^{18}\text{O}$  e  $\text{D}$ , mais pesados, em função da quantidade de precipitação, ou seja, quanto mais fortes forem os eventos de precipitação, maior será essa perda. A frequência de precipitação também influencia nesse efeito, ou seja, quanto maior a frequência de ocorrência de eventos de

precipitação, maior a “perda” de isótopos pesados para a superfície, ficando a fração atmosférica cada vez mais “enriquecida” em isótopos leves (Pacheco, 2012).

A destilação de Rayleigh explica com mais propriedade esse efeito. De acordo com Clark & Fritz (1997), como as massas de ar se deslocam de sua área evaporativa, genericamente os oceanos, em direção às latitudes mais altas e passando sobre os continentes, elas se resfriam e perdem o vapor d’água ao longo do caminho sob a forma de chuva. No interior da nuvem, o equilíbrio de fracionamento entre vapor e a fase condensada preferencialmente particiona  $^{18}\text{O}$  e D para a chuva ou para a neve. Assim, ao longo da trajetória da massa de ar o processo de precipitação “destila” os isótopos pesados da fase de vapor. Este passa então a ficar progressivamente depletado em  $^{18}\text{O}$  e D, ao passo que, a chuva se torna enriquecida isotopicamente. Assim, as chuvas sucessivas, apesar de enriquecidas em relação ao vapor remanescente, serão depletadas em relação às chuvas iniciais, oriundas da mesma massa de vapor.

A fim de se viabilizar a medição das variações isotópicas foi criada a notação  $\delta$  conforme a fórmula abaixo:

$$\delta = \left( \frac{(\text{razão isotópica da amostra}) - (\text{razão isotópica do padrão})}{(\text{razão isotópica do padrão} - \text{VSMOW})} \right) \times 1000$$

Sendo a razão isotópica representada da seguinte maneira:

$$\alpha = \frac{\text{Isótopo Pesado}}{\text{Isótopo Leve}}$$

Assim, o valor de  $\delta$  expressa o desvio de uma amostra relativamente a um padrão em partes por mil, pois as variações nas proporções isotópicas são extremamente pequenas para serem expressas em números significativos.

Considerando que as razões isotópicas são expressas com o isótopo mais pesado no numerador, se  $\delta$  é positivo significa que a amostra é mais “rica” que o padrão no isótopo pesado em referência. Se ocorrer o contrário e  $\delta$  for negativo, entende-se que a amostra é mais “pobre” que o padrão no isótopo pesado analisado. Lembrando que os termos “rico” e “pobre” são relativos ao isótopo posicionado no numerador da razão acima que, por convenção, é sempre o isótopo mais pesado. Já o padrão, posicionado no denominador é aquele naturalmente mais abundante no meio analisado (Allègre, 2008).

Para os casos que envolvem medidas de razões isotópicas em compartimentos associados ao ciclo hidrológico, o padrão utilizado para o cálculo das razões é o SMOW – *Standart Mean Ocean Water* - definido por Craig (1961) *apud* Gat (1996). Uma amostra hipotética da água do mar foi considerada como padrão porque o oceano é o maior reservatório de água do planeta e apresenta uma composição relativamente homogênea. Posteriormente, o SMOW foi revisto e atualizado sendo definido e atualmente indicado o padrão V-SMOW (*Viena Standart Mean Ocean Water*). Trata-se de uma mistura sintética padronizada e distribuída pela IAEA (*International Atomic Energy Agency*) para as moléculas  $\text{D}^{16}\text{O}$ ,  $\text{HD}^{16}\text{O}$  e  $\text{D}^{18}\text{O}$  que simulam o SMOW.

A maneira usual de se representar dados isotópicos de amostras de água é a construção de um gráfico  $\delta(\text{D})$  vs  $\delta(^{18}\text{O})$ , sendo que a escala do eixo que representa  $\delta(\text{D})$  é comprimida por um fator de 10, haja vista a variabilidade de  $\delta(\text{D})$  ser tipicamente maior que  $\delta(^{18}\text{O})$  cerca de uma ordem de magnitude (Allègre, 2008).

Segundo Gat (1996), a partir de análises isotópicas realizadas desde a década de 1930, Craig e Dansgaard observaram que o comportamento dos isótopos  $^{18}\text{O}$  e D era perfeitamente previsível, sendo, portanto, possível estabelecer uma relação entre  $\delta(\text{D})$  e  $\delta(^{18}\text{O})$  para águas doces em escala global. A chave dessa compreensão foi a observação de que águas isotopicamente depletadas estavam associadas a regiões frias, ao passo que águas enriquecidas estavam associadas a regiões quentes. Com isso ficou definida a Linha Meteórica Global ou *Global Meteoric Water Line - GMWL* que pode ser expressa pela equação:

$$\delta(\text{D}) = 8 \times \delta(^{18}\text{O}) + 10\text{‰} \quad (\text{Eq. 1})$$

Essa linha serve de base de comparação para todos os resultados obtidos em análises isotópicas relativas ao ciclo hidrológico, permitindo identificar, assim, a origem da água amostrada, bem como os processos ocorridos durante o seu caminho no ciclo.

Santiago *et. al.* (2008) afirmam que em regiões de clima seco, é comum ocorrer a evaporação da água de precipitação antes que esta atinja o solo. Assim, o coeficiente angular da reta é, no geral, inferior a 8. Daí há a necessidade de utilização da reta meteórica local para melhor ajuste dos dados. A linha da água meteórica de Brasília (Pacheco, 2012) é representada pela equação abaixo, na qual se verifica o efeito comentado:

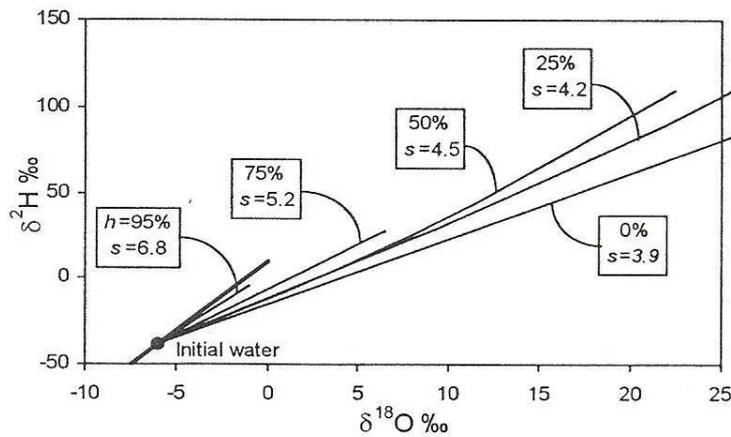
$$\delta(\text{D}) = 7,783 \times \delta(^{18}\text{O}) + 10,38\text{‰} \quad (\text{Eq. 2})$$

Já os coeficientes lineares das equações 1 e 2 acima representam o que Dansgaard (1965) *apud* Gat (1996) denominou de “excesso de deutério”. Esse valor representa o empobrecimento progressivo das massas de ar evaporadas a partir do oceano nos isótopos pesados e o conseqüente enriquecimento da precipitação e das massas de água superficiais.

A evaporação da água do mar sob baixas umidades resulta numa redução significativa da troca vapor-água, de modo que o fracionamento isotópico cinético, ou de não-equilíbrio, se torna o processo dominante na fase de vapor. Isto porque altas taxas de evaporação limitam a referida troca e, por conseguinte, o grau de equilíbrio isotópico.

A difusão molecular ocorre normalmente em ambas as direções entre vapor-líquido quando os níveis de umidade do ar são elevados, embora não ocorra difusão na fase líquida. No entanto, sob condições de baixa umidade, passa a ocorrer difusão entre as fases líquida e vapor preferencialmente em uma direção, depletando assim a fase líquida nas espécies mais difusivas (leves), que se deslocam em direção à fase de vapor, porém, enriquecendo o reservatório líquido nos isótopos mais pesados. O resultado desse processo se reflete no diagrama  $\delta^{18}\text{O}/\delta\text{D}$ , uma vez que se verifica um desvio na linha meteórica analisada em relação à *GMWL*, devido a uma variação no seu coeficiente angular. Esse desvio, conforme descrito anteriormente, depende amplamente da umidade do ar, isto é, sob condições de baixa umidade do ar, a evaporação cinética é potencializada e a inclinação da reta meteórica será, então, menor que da *GMWL* (Clark & Fritz, 1997).

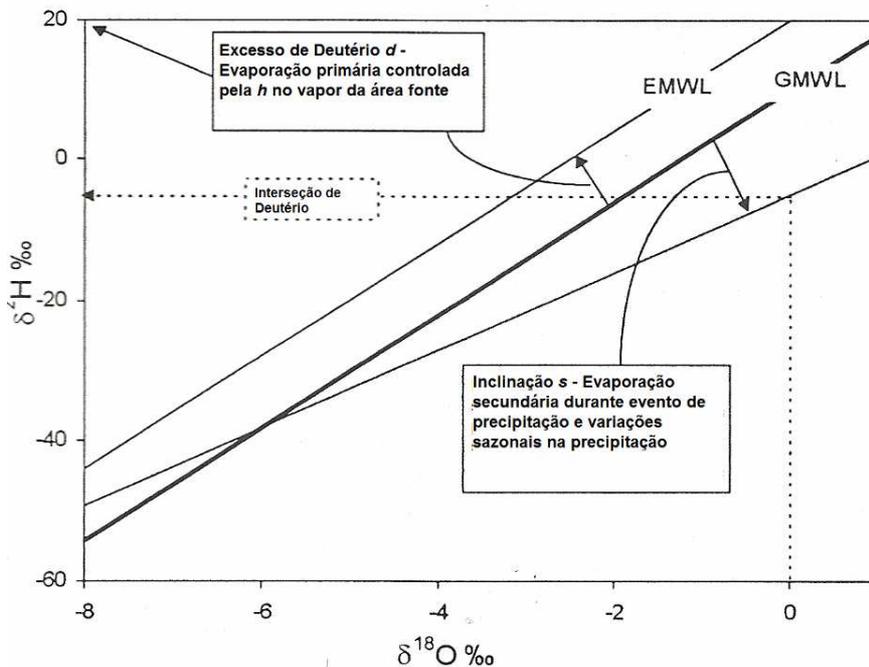
A Figura 3.1 mostra que quanto menor for a umidade do ar durante o processo de evaporação da água dentro do ciclo hidrológico, menor será a inclinação da linha meteórica representativa de uma amostra qualquer em relação à *GMWL*.



**Figura 3.1** - Enriquecimento isotópico na evaporação da água e o efeito da umidade. As inclinações são aproximações da porção inicial de cada curva próxima à GMWL (Clark & Fritz, 1997). *h* - umidade relativa do ar e *s* - inclinação da reta.

O excesso de deutério pode ser entendido, portanto, a partir da perspectiva da destilação de Rayleigh, visto que uma mudança de fase submetida a efeito cinético resulta em diferente difusividade para moléculas de água isotopicamente diferentes na fase de vapor. Um exemplo é que a maior difusividade da molécula  $^1\text{H}_2^{16}\text{O}$  no ar relativamente à da molécula  $^2\text{H}^1\text{H}^{16}\text{O}$  ou  $^2\text{H}_2^{18}\text{O}$  resulta em uma separação adicional e, portanto, em mais excesso de deutério na fase líquida, com menor pressão de vapor.

A Figura 3.2 ilustra que a inclinação da reta, assim como o excesso de deutério, são afetados e, portanto, determinados, por fatores climáticos locais que incluem a origem da massa de ar, a evaporação secundária durante a precipitação e a sazonalidade climática representada pela variação temporal da precipitação.



**Figura 3.2** - Principais fatores que afetam a inclinação da reta e o excesso de deutério. Observando a distinção entre o excesso de deutério, o qual é calculado para uma declividade de 8, e o ponto de interseção de deutério (eixo Y), determinado pela atual inclinação e para  $\delta^{18}\text{O}=0$ .

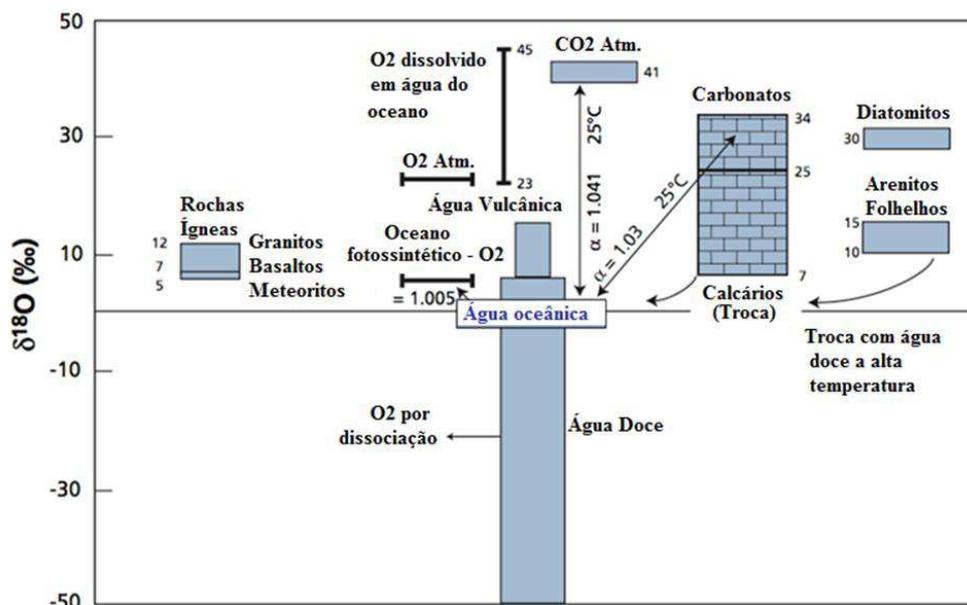
Verifica-se que quanto maior a umidade do ar, mais próxima da condição de equilíbrio isotópico com relação à água do mar estará a massa de ar evaporada. O vapor da água atmosférica global se forma com umidade média do ar superior a 85%, resultando em uma precipitação cuja linha representativa é deslocada em relação à água do mar por um fator +10‰ para  $\delta D$ . É por essa razão que a *GMWL* descrita por Craig apresenta excesso de deutério igual a 10‰ (Clark & Fritz, 1997). Assim, à medida que massas de ar se deslocam ao longo da costa e em direção aos continentes ocorre o seu resfriamento e, por conseguinte, a perda de umidade cujo resultado é o fenômeno descrito.

Assim, o excesso de deutério fornece informações a respeito das condições meteorológicas (umidade relativa do ar, velocidade do vento e temperatura da superfície do mar são as variáveis de influência preponderante) durante a primeira evaporação e sobre a distância entre a área de amostragem e a fonte que originou a chuva, uma vez que massas de ar submetidas a episódios sucessivos de condensação e evaporação produzem precipitações com valores elevados de excesso de deutério (Pereira *et. al.*, 2004).

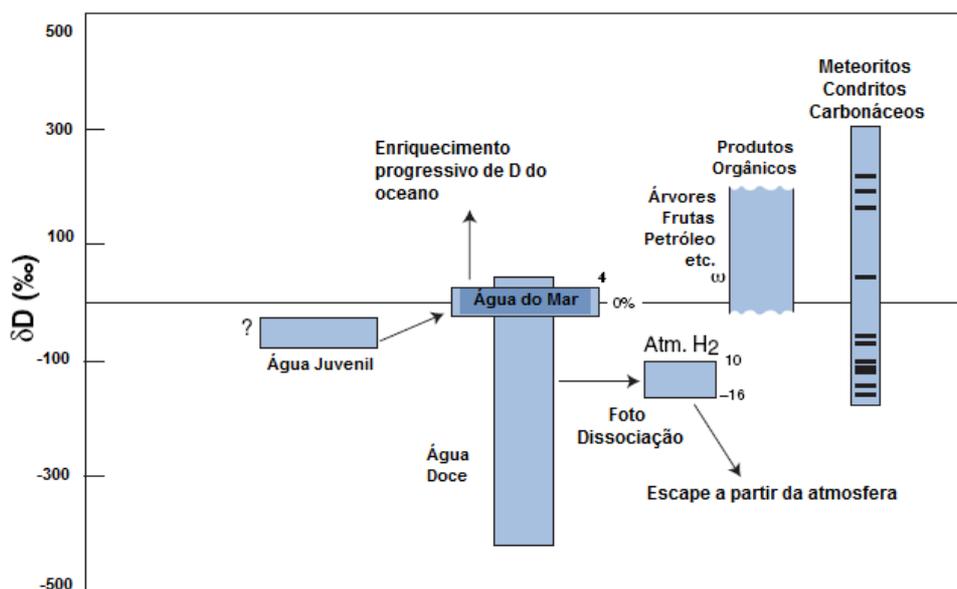
As Figuras 3.3 e 3.4 representam as variações dos valores de  $\delta D$  e  $\delta^{18}O$  para os principais reservatórios terrestres existentes (rochas, vegetação, etc.). Essas variações que têm V-SMOW como padrão, mostram que as águas de precipitação pluviométrica são eminentemente negativas se comparadas com os outros reservatórios.

### Trítio

A idade de uma água subterrânea diz respeito, basicamente, ao tempo médio de residência desta em um determinado aquífero. Dificilmente se obtém a idade absoluta de uma água visto que processos de mistura e alterações no padrão de fluxo subterrâneo redundam em alterações na origem da recarga e, portanto, na idade da água subterrânea. Inúmeros métodos são empregados com vistas a determinar esse tempo de residência.



**Figura 3.3** - Distribuição da composição isotópica do oxigênio nos principais reservatórios terrestres expresso em  $\delta^{18}O$  baseado no VSMOW (adaptado de Allègre, 2008).



**Figura 3.4** - Distribuição da composição isotópica do hidrogênio nos principais reservatórios terrestres expresso em  $\delta D$  baseado no VSMOW (adaptado de Allègre, 2008).

O trítio ( $^3\text{H}$  ou T) é um isótopo radiogênico indicado para datação de águas jovens, uma vez que o hidrogênio é um constituinte natural da água, ao passo que outros métodos dependem da presença de compostos dissolvidos na água cuja abundância é controlada por reações físico-químicas e processos biológicos (Clark & Fritz, 1997).

Assim, o trítio é, provavelmente, o radioisótopo mais usado para verificação da ocorrência de recarga moderna de águas subterrâneas. Isto porque, entre o mês de maio de 1951 até meados do ano de 1976, foram feitos inúmeros testes com bombas termonucleares que modificaram a concentração deste isótopo na atmosfera. O trítio então liberado foi incorporado à água subterrânea cuja presença, portanto, define o termo “moderna”. Desse modo, tais águas apresentarão idades menores que 45 anos até aquelas correspondentes a meados dos anos 1990. Depois disso, o sinal do trítio baixou consideravelmente e praticamente retornou aos níveis naturais devido a sua remoção da atmosfera pelo decaimento radiogênico.

O trítio é naturalmente produzido por radiação cósmica, tem meia-vida de 12,43 anos e curta permanência na atmosfera terrestre. Sua produção geogênica é insignificante na maioria das águas subterrâneas, sendo assim possível utilizá-lo como traçador devido a sua intensa utilização durante um período de tempo definido, indicando, portanto, a distância das fontes de recarga de um aquífero.

Para a definição da idade da água subterrânea a partir de dados de trítio algumas abordagens são possíveis, especialmente as quantitativas. Estas, no entanto, exigem a utilização de dados de séries históricas de longo prazo, além de curvas padrões específicas para a região sob análise que, no caso do Brasil, seria uma curva própria para o hemisfério sul (Lousada & Campos, 2011). No entanto, o Distrito Federal não dispõe de uma série histórica de análise de trítio, o que torna a normalização de dados, sob o prisma quantitativo, inviável. Assim, abordagens qualitativas tornam-se soluções possíveis nessas situações.

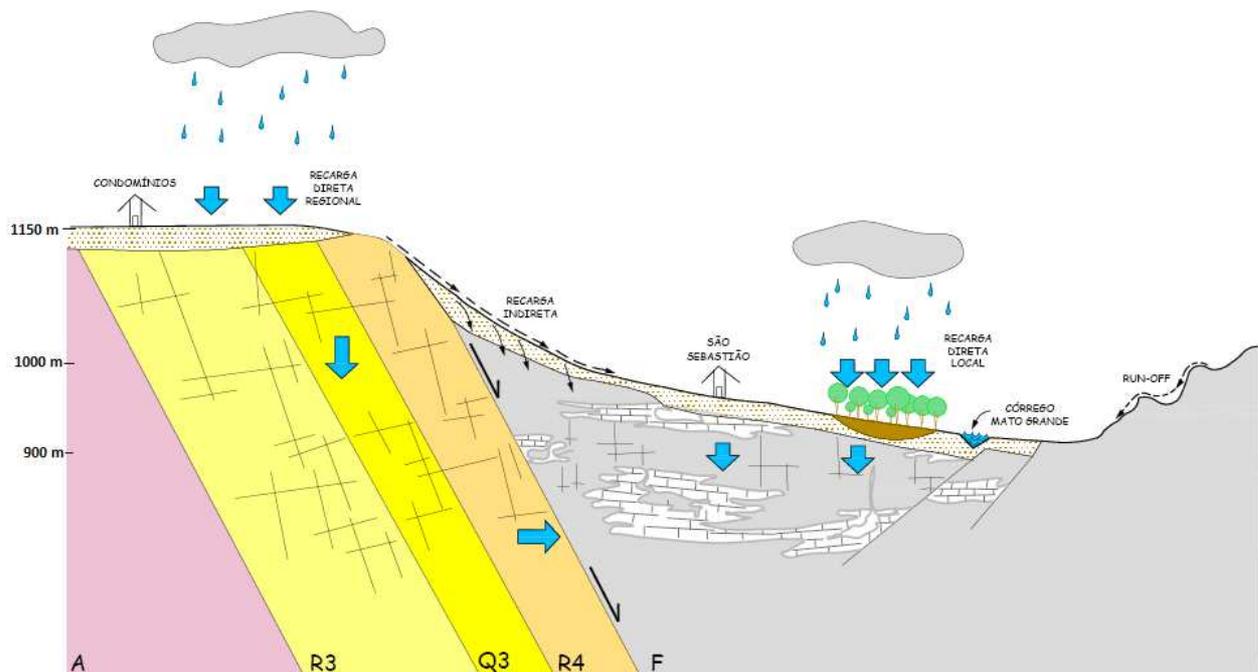
Para o presente trabalho foi adotada a análise qualitativa e relativa dos dados.

### 3.2. Análise dos Dados

A partir dos dados levantados é possível identificar dois tipos de recarga para os aquíferos de São Sebastião, aqui denominadas: Recarga Direta Regional e Recarga Direta Local. Cumpre esclarecer que se trata da mesma denominação utilizada por Joko (2002) devido à questões de ordem prática.

Joko (2002) apresenta ainda uma terceira hipótese, denominada Recarga Indireta aqui também considerada, porém, não testada por questões que serão descritas mais adiante.

Para a devida compreensão das hipóteses do regime de fluxo e conseqüentemente dos mecanismos e fontes de recarga é apresentado um desenho esquemático da área e das hipóteses a ela relacionadas (Figura 3.5).



**Figura 3.5** - Desenho esquemático da área e das hipóteses dos mecanismos de recarga apresentados no presente trabalho.

#### 3.2.1. Recarga Indireta

Trata-se da recarga induzida a partir dos córregos e ribeirões perenes existentes na área cujos leitos estão condicionados aos traçados das falhas do gráben. Tal configuração pode ser observada, principalmente, no ribeirão Santo Antônio da Papuda e no córrego Mato Grande. A associação entre falhas e rios favorece a infiltração da água a partir das drenagens para o aquífero sobre o qual estão assentadas, uma vez que planos de falha funcionam como conduto preferencial para que a água de superfície atinja o aquífero e circule através dele. Portanto, é comum que rios assentados sobre falhamentos sejam do tipo influente, classificação que se encaixa perfeitamente na descrição das drenagens citadas e em outras presentes na área de estudo.

Para constatar essa hipótese seria necessária a tomada de medidas regulares de vazão e de nível dos corpos d'água nos períodos chuvoso e seco, em diferentes pontos de seus cursos. Esses dados comparados entre si forneceriam informações sobre a transferência de águas entre o rio e o aquífero nas estações seca e chuvosa. Contudo, do mesmo modo que foi observado por Joko (2002), verificou-se que existem captações e lançamentos de água em

vários pontos ao longo do curso dessas drenagens, o que altera sua vazão diária natural. Desse modo, tornou-se inviável a aplicação desse método, uma vez que os dados obtidos não retratariam a realidade.

Não existe controle de vazões ou do período diário em que estas pequenas captações são ativas. Da mesma forma não há controle dos lançamentos. Assim, as medidas de vazões não podem ser controladas de forma que pode haver diminuição da vazão em pontos a jusante, não em decorrência da transferência de águas do rio para o aquífero, mas devido à captação.

Joko (2002) tentou uma metodologia alternativa para verificar a natureza efluente ou influente da drenagem, a partir da comparação entre os níveis estáticos dos poços de São Sebastião, do ano de 1997, com os níveis do ano de 2001, e as cotas altimétricas obtidas nos pontos mais próximos aos poços comparados. A partir desta analogia, os dados de 1997 mostram que o ribeirão Santo Antônio da Papuda e o córrego Açude são influentes, ao passo que o ribeirão da Papuda é do tipo efluente. Porém, os dados do ano 2001 demonstram que todas as drenagens superficiais passaram a ser do tipo influente, isto devido ao expressivo aumento do bombeamento dos poços ocorrido entre os anos estudados, cujo efeito foi a inversão da direção de fluxo da água subterrânea.

Este cenário ainda pode ser considerado válido no presente, principalmente considerando que a produção dos poços em São Sebastião praticamente triplicou entre 2001 e 2011 (CAESB, 2012). Esse aumento não se deveu a um aumento no número de poços construídos, mas sim à vazão de bombeamento dos poços em operação ocorrida nesse período. Até 2001 a CAESB contava com dezesseis poços ativos. Entre 2001 e 2011 seis novos poços foram perfurados. No entanto, em 2001 a produção era de cerca de 150.000m<sup>3</sup>/mês, já em 2011, esse valor passou para, aproximadamente, 450.000m<sup>3</sup>/mês. Esse aumento na vazão de produção pode influenciar na interação entre as águas subterrânea e superficial no que tange a inter-transferência dos dois reservatórios.

Entretanto, a complexidade dos sistemas aquíferos locais em que ocorrem sistemas intergranulares (= solos) variados recobrimo sistemas físsuro-cársticos, que, por sua vez, podem ou não estar conectadas hidraulicamente com a superfície diretamente, dificulta a aplicação desse tipo de abordagem.

Assim, recomenda-se realizar a amostragem e a análise de isótopos estáveis de oxigênio e hidrogênio, além de trítio, tanto nos corpos hídricos superficiais quanto na água subterrânea captada nos poços da região e efetuar a comparação entre eles.

### **3.2.2. Análise dos Resultados de $\delta D$ e $\delta^{18}O$**

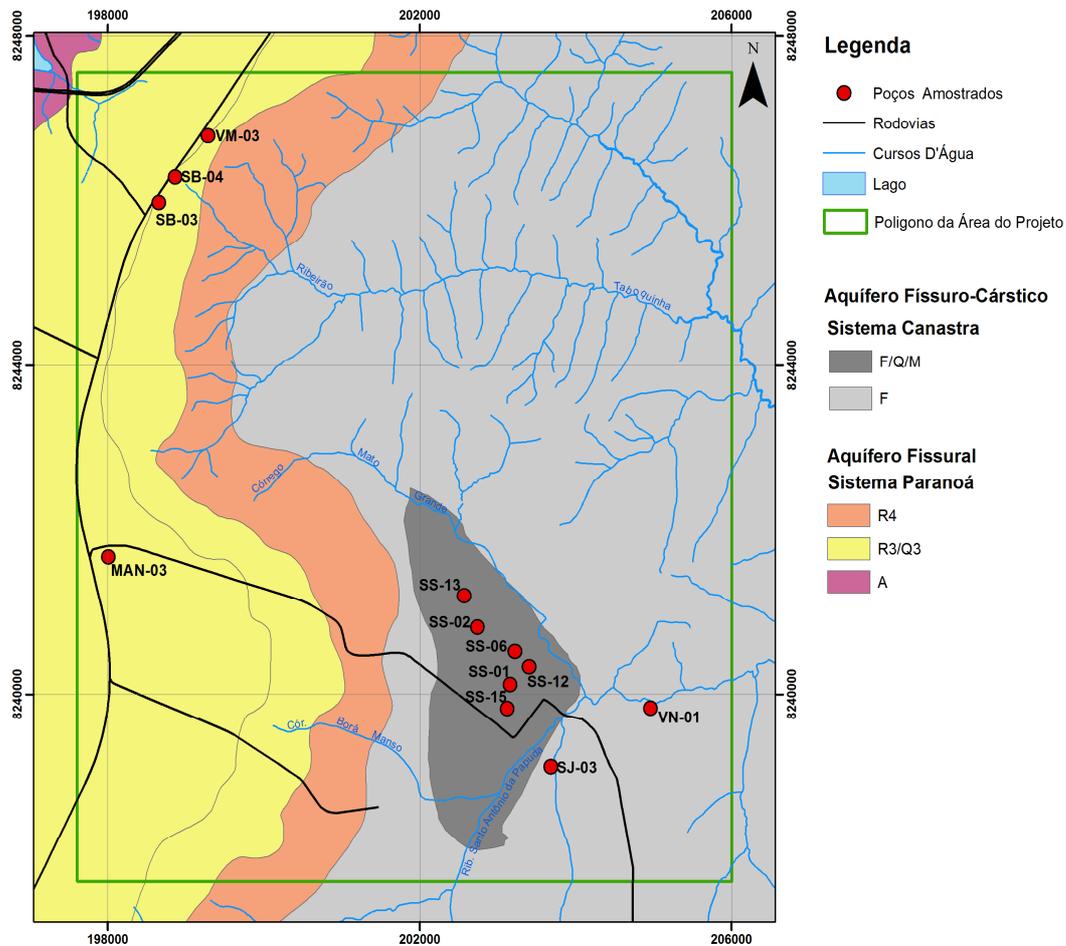
Para a realização das análises dos isótopos de oxigênio e hidrogênio foi feita a coleta de uma amostra de água, em frascos de polietileno de alta densidade, para cada um dos 11 (onze) poços da CAESB e em 1 (um) poço pertencente a empresa Jardins Mangueiral Empreendimentos Imobiliários S/A (MAN-03), selecionados para este trabalho. O critério para a seleção desses poços foi a existência de dados dos perfis litológico e construtivo rigorosamente acompanhados pelas empresas responsáveis e respaldados por profissional habilitado, ou seja, que tivessem dados confiáveis. Do total de poços, 4 estão posicionados no compartimento de Planos Elevados e 8, estão situados na região de Vales Dissecados conforme é possível verificar na Tabela 3.1.

Dados de  $\delta D$  e  $\delta^{18}O$  apresentam tradicionalmente boa resposta para identificação de áreas de recarga. Assim, eles foram analisados considerando que as áreas elevadas, associadas às unidades psamíticas do Grupo Paranoá (Unidades R<sub>3</sub> e Q<sub>3</sub>), ao Sistema Aquífero Paranoá - Subsistema R<sub>3</sub>/Q<sub>3</sub> e ao compartimento geomorfológico de Planos Elevados, contribuem para a recarga do aquífero físsuro-cárstico situado na região de São Sebastião (Tabela 3.1), ou seja, Recarga Direta Regional.

Código do Poço	Cota	Compartimento Geomorfológico	Unidades Geológicas	Subsistema Hidrogeológico
MAN-03	1147	Planos Elevados	R3	R3/Q3
SB-03	1108		Q3	
SB-04	1105		R3	
VM-03	1097			
SJ-03	918	Vales Dissecados	filitos	F
SS-01	930		mármoreos	F/Q/M
SS-02	925			
SS-06	918			
SS-12	918			
SS-13	926			
SS-15	936			
VN-01	903		filitos	F

**Tabela 3.1** - Poços amostrados agrupados por compartimento geomorfológico, unidade geológica e subsistema hidrogeológico.

A distribuição espacial desses poços, e sua relação com as unidades hidrogeológicas pode ser observada na Figura 3.6.



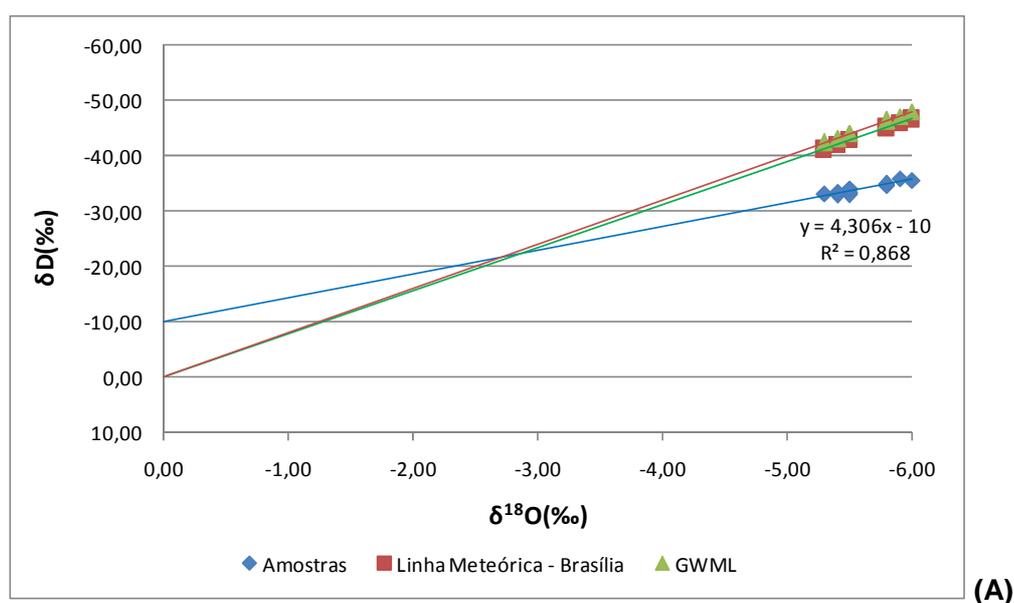
**Figura 3.6** - Localização dos poços da CAESB amostrados para a pesquisa.

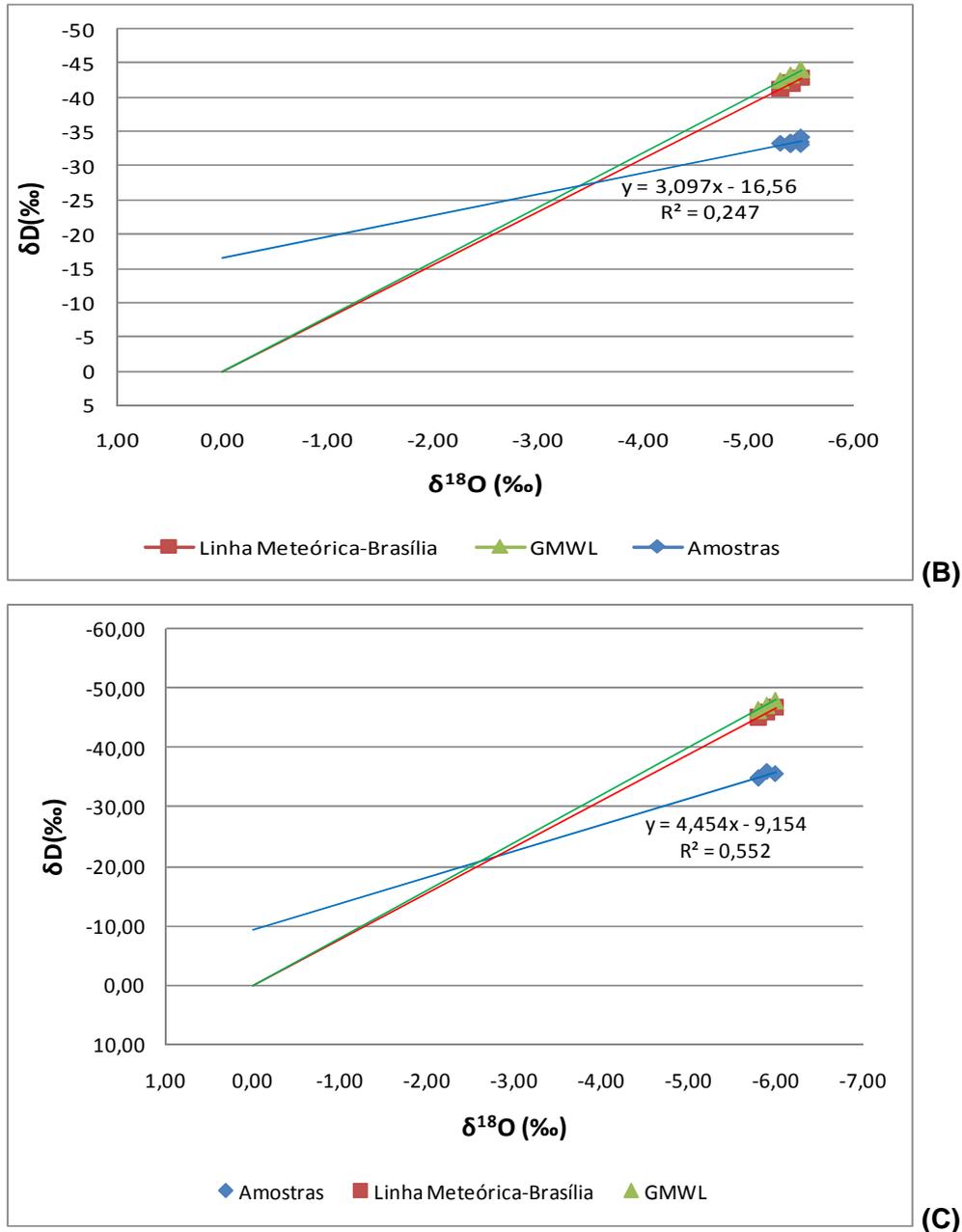
Os resultados das análises isotópicas para cada um dos poços podem ser observados na Tabela 3.2.

Poços posicionados no compartimento - Planos Elevados (=chapada)		
Código do Poço	d18O/16O (‰)	d D/H (‰)
MAN-03	-5,80	-34,80
SB-03	-5,90	-36,00
SB-04	-6,00	-35,60
VM-03	-5,80	-34,90
<b>Variação</b>	-5,8 a -6,0	-34,8 a -36,0
Poços posicionados no compartimento - Vales Dissecados (=depressão)		
Código do Poço	d18O/16O (‰)	d D/H (‰)
SJ-03	-5,40	-33,00
SS-01	-5,30	-33,20
SS-02	-5,50	-34,10
SS-06	-5,50	-33,40
SS-12	-5,50	-33,00
SS-13	-5,50	-34,10
SS-15	-5,40	-33,00
VN-01	-5,40	-33,40
<b>Variação</b>	-5,3 a -5,5	-33,0 a -34,1

**Tabela 3.2** - Resultados das análises isotópicas de oxigênio e hidrogênio para os poços selecionados.

Esses resultados foram plotados em gráficos  $\delta D/\delta^{18}O$  juntamente com as retas meteóricas global (GMWL) e local a fim de se verificar a proveniência da água subterrânea amostrada. Tendo em vista a diferença de agrupamento de valores observada no conjunto de dados, estes foram plotados em um gráfico contendo todo o conjunto, bem como em dois gráficos distintos, sendo um relativo ao compartimento geomorfológico Vales Dissecados e o outro, aos Planos Elevados (Figuras 3.7 A, B e C).





**Figura 3.7** - Gráficos  $\delta D/\delta^{18}O$  para o conjunto total de dados (A) e para os compartimentos geomorfológicos Vales Dissecados (B) e Planos Elevados (C) comparadas às linhas meteóricas global (GMWL) e local.

A partir da análise da assinatura isotópica das águas subterrâneas amostradas (Tabela 3.2) verifica-se que se trata de água doce devido aos seus valores negativos para  $\delta D$  e  $\delta^{18}O$  (Figuras 3.3 A e B). Porém, no compartimento Geomorfológico Planos Elevados as águas são mais empobrecidas nos isótopos pesados, D e  $^{18}O$ , que aquelas analisadas para o compartimento Vales Dissecados. É possível afirmar que essa diferenciação não tem relação com origens diferenciadas para a água subterrânea de cada compartimento, uma vez que se trata de áreas contíguas geograficamente e que efeitos de atenuação (efeitos de continentalidade, latitude, altitude, etc.) se desenvolvem e se manifestam em escala regional. Ressaltando que a principal hipótese para a origem da água subterrânea é a precipitação pluvial, para ambos compartimentos, visto a configuração geomorfológica das áreas analisadas.

Analisando o gráfico que traz o conjunto completo de dados, verifica-se que a reta representativa destes apresenta pequena inclinação em comparação com a reta meteórica global (*GMWL*). Tal fato sugere a ocorrência de processos de evaporação secundária durante eventos de precipitação, provavelmente motivados pelo clima do DF que tem uma estação seca bastante proeminente. Nesses períodos a evaporação direta e a evapotranspiração são bastante elevadas implicando em processos de evaporação secundária que atenuam o sinal da chuva antes que essa atinja a superfície do solo e, posteriormente, a zona saturada do aquífero. Portanto, a reta representativa dos dados coletados no conjunto total de poços aponta para origem meteórica da água subterrânea para ambos os compartimentos, porém, com atenuação do seu sinal devido à sucessivos processos de evaporação da água.

O coeficiente linear da reta, que representa o excesso de deutério, com valor negativo ( $d=-10$ ) (Figura 3.7A) reforça a ideia de atenuação do sinal da precipitação devido à processos secundários, principalmente, a evaporação, nesse caso, sob condições de baixa umidade do ar.

Por outro lado, os baixos valores de  $R^2$  encontrados para os gráficos dos compartimentos geomorfológicos analisados separadamente (Figuras 3.7B e C) mostram pequena correlação entre os parâmetros,  $\delta D$  e  $\delta^{18}O$ , uma vez que estes ocorrem de forma bastante agrupada. Analisando os dados em separado verifica-se que a compartimentação observada para os dados não tem relação com a origem da água. Outro parâmetro condiciona essa separação como será explicado mais adiante. Em resumo, tais dados indicam que a origem da água de ambos os compartimentos é a mesma, ou seja, meteorólica, pois a atenuação do sinal isotópico não está relacionada à origem da água.

Analisando os dados de excesso de deutério (Tabela 3.3) percebe-se novamente uma separação entre os compartimentos geomorfológicos citados, apesar de, nesse caso, haver interseção. Observam-se valores mais elevados para a região de Planos Elevados e mais baixos para o compartimento Vales Dissecados.

	Cód. Poço	Excesso de Deutério
Planos Elevados	MAN-03	11,80
	SB-03	10,90
	SB-04	12,50
	VM-03	11,30
Vales Dissecados	SJ-03	10,60
	SS-01	9,50
	SS-02	10,20
	SS-06	10,40
	SS-12	10,90
	SS-13	10,00
	SS-15	10,40
	VN-01	9,70

**Tabela 3.3** - Resultados das análises de  $d$  (excesso deutério) para os poços amostrados

O excesso de deutério informa que, sob condições de baixa umidade durante os processos de evaporação da água de superfície, a fase líquida se torna progressivamente enriquecida em D e  $^{18}O$ . Porém, se durante esse processo a umidade do ar é muito baixa, a evaporação se torna eminentemente um processo de não-equilíbrio (= efeito cinético), promovendo assim a concentração exponencial de D na fase líquida. Isto porque tal isótopo é muito mais sensível aos efeitos cinéticos dentro do ciclo hidrológico que o  $^{18}O$ , de modo que seus valores variam mais amplamente.

Nos períodos de estiagem no Distrito Federal a baixa umidade do ar é condição marcante. Nessa época a evaporação da água de umidade do solo, contida principalmente na zona de capilaridade, é bastante intensa, de modo que o fracionamento isotópico de não-equilíbrio promove o enriquecimento da água de umidade do solo em D. Isto explica os valores elevados de  $d$  no compartimento de Planos Elevados se comparado com os dados dos poços posicionados no compartimento de Vales Dissecados.

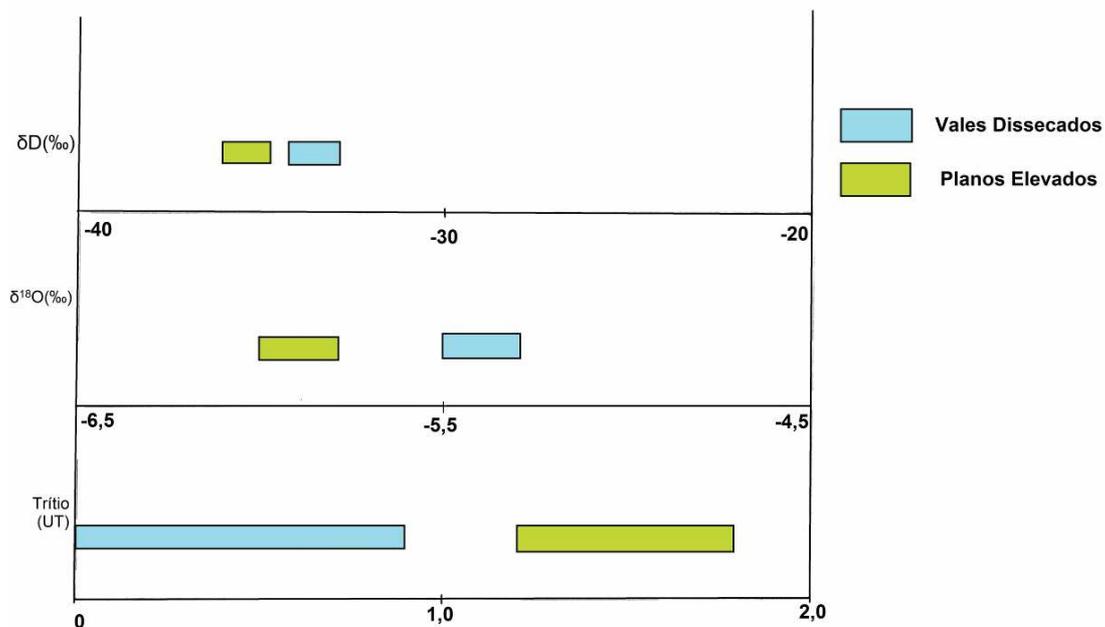
O modelo de superfície potenciométrica única sem confinamento, aplicável ao compartimento de Planos Elevados, ilustra bem essa situação devido à ampla oscilação anual do nível da água do aquífero. Tal oscilação favorece a formação de uma espessa franja de capilaridade que, por sua vez, estabelece maior contato com a atmosfera, perdendo, assim, umidade para ela.

Foi levantada ainda a hipótese da assinatura isotópica dos compartimentos analisados ser função da interação água-rocha, ou seja, da água subterrânea com o aquífero, e não proveniente da água meteórica. Porém, essa hipótese foi descartada tendo em vista que as condições necessárias para que haja troca isotópica entre os sistemas água/rocha à baixas temperaturas não são encontradas na região.

Sob baixas temperaturas são necessárias as seguintes condições para ocorrer influências do reservatório sobre a assinatura isotópicas das águas: (1) grande tempo de contato água-rocha (= escala geológica), e (2) ampla interação geoquímica entre as rochas e a água. Os dados de trítio (discutidos mais adiante) mostram que as amostras analisadas representam águas jovens (décadas de idade). A mineralogia das rochas dos reservatórios mostra que se trata de uma associação bastante estável (com exceção do carbonato) com restrita possibilidade de solubilização.

Verifica-se, assim, que a assinatura isotópica da água analisada no presente trabalho não pode ser função de interações água-rocha.

Dando continuidade à análise, os resultados isotópicos para cada uma das amostras coletadas foram também plotados em um gráfico para demonstrar a variação entre eles e pode ser observado na Figura 3.8.



**Figura 3.8** - Gráfico da variação dos resultados de  $\delta D$  e  $\delta^{18}O$  para os poços analisados.

A separação entre o conjunto de dados analisados é bastante clara conforme já comentado anteriormente. Para cada compartimento geomorfológico corresponde uma variação, tanto para  $\delta^{18}\text{O}$  quanto para  $\delta\text{D}$ , formando conjuntos de dados distintos. Ou seja, verifica-se em todos os dados obtidos que existe alta correlação entre a assinatura isotópica da água e o compartimento geomorfológico em que o aquífero está situado.

A mistura de águas subterrâneas em sistemas de fluxo regional tem o efeito de homogeneizar a composição isotópica das águas subterrâneas oriundas dos diferentes ambientes de recarga. Assim, quanto mais ampla for essa mistura, mais homogêneo será esse valor. Tal amplitude é condicionada, por sua vez, tanto pela quantidade quanto pela qualidade da conexão hidráulica existente entre os aquíferos.

Assim, considerando que a massa de ar que origina a água meteórica que recarrega ambos os sistemas aquíferos analisados é a mesma e que, por se tratar de áreas geograficamente contíguas, não existem as condições necessárias para que ocorra a atenuação do sinal isotópico por fenômenos atmosféricos; considerando que, portanto, ocorre uma diferenciação no sinal isotópico relacionada às características físicas/hidráulicas de cada um dos sistemas aquíferos; e considerando que a diferença do sinal isotópico dos aquíferos analisados é pequena, é possível concluir que existe interconexão hidráulica entre os dois sistemas aquíferos, isto é, entre o Subsistema  $\text{R}_3/\text{Q}_3$  e  $\text{R}_4$  e o Sistema Físsuro-Cárstico, no processo de recarga deste último.

O contato entre as unidades  $\text{R}_3$ ,  $\text{Q}_3$  e  $\text{R}_4$  do Grupo Paranoá e os filitos e lentes de mármores do Grupo Canastra foi promovido pelo empurrão de baixo ângulo de idade brasileira que gerou inúmeras estruturas planares associadas a seu movimento, em especial, fraturas e falhas associadas ao *front* do empurrão. Essas fraturas e falhas foram reativadas posteriormente graças à eventos neotectônicos que afetam a região (Figura 3.9).

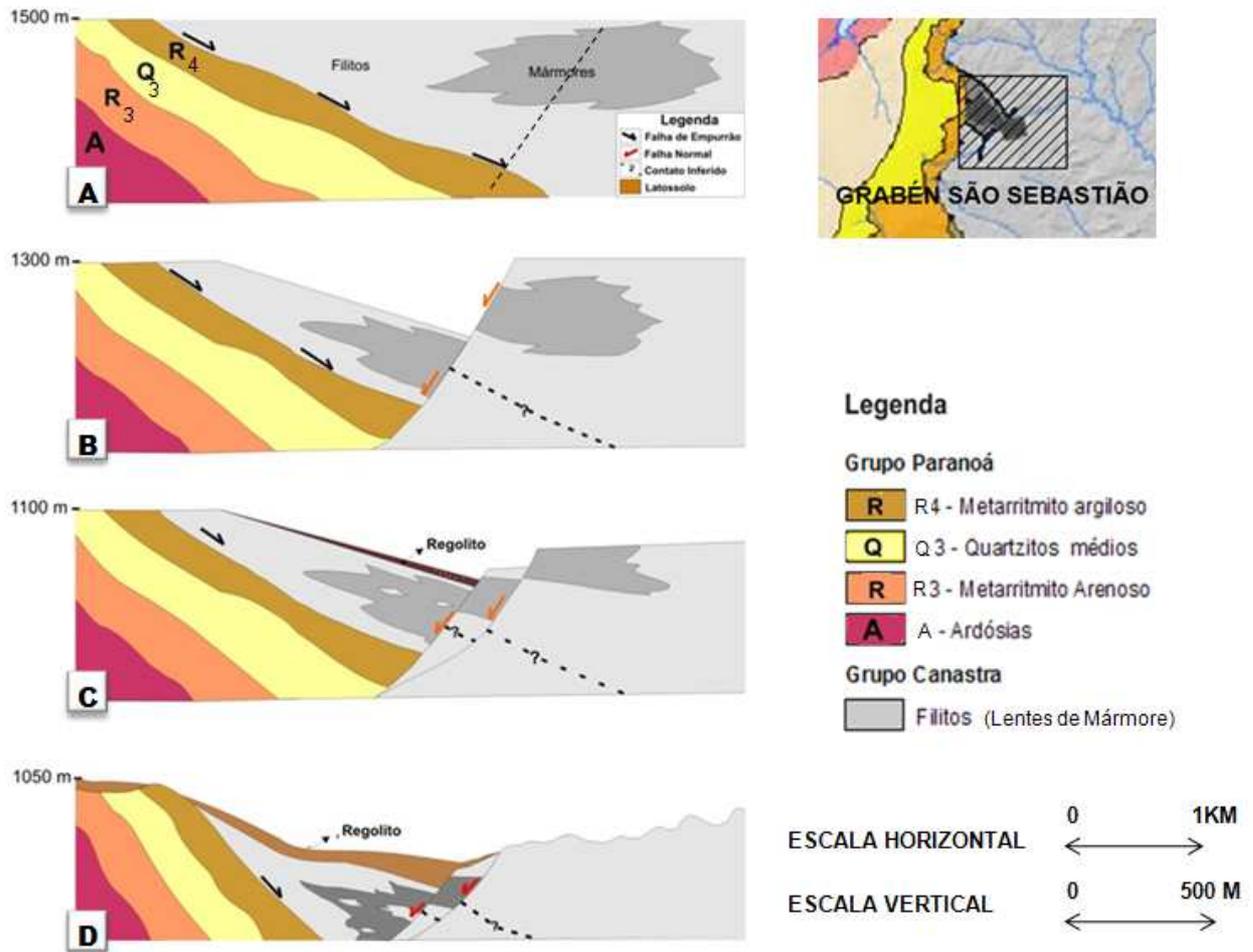
Os esforços neotectônicos reativaram algumas dessas estruturas planares verticalizadas que, ao serem abertas e se conjugarem com fraturas horizontalizadas, também mantidas abertas, criaram a condição necessária para que ocorresse interconexão entre os dois domínios hidrogeológicos, permitindo assim a circulação da água. Tendo em vista que as tensões atualmente vigentes ativam preferencialmente as estruturas com direção N45E e N45W, é possível concluir que a interconexão entre os dois sistemas aquíferos não é contínua ao longo de todo o contato. Ou seja, tal conexão ocorre preferencialmente por meio dessas famílias de fraturas. No entanto, verifica-se ser bastante significativa, uma vez que o sinal isotópico dos sistemas hidrogeológicos se aproxima, apesar de não se homogeneizar totalmente. Assim, a separação entre as assinaturas de cada compartimento pode ser explicada pela interconexão descontínua ou localizada entre os sistemas.

Se a conexão entre os dois sistemas fosse contínua ao longo de todo o empurrão, a mistura seria tal que, provavelmente não haveria diferenças entre as assinaturas isotópicas de um e outro sistema, especialmente considerando que a amostragem para a presente pesquisa foi realizada durante o período chuvoso (mês de janeiro).

Aparentemente a conexão hidráulica entre os compartimentos não se dá a partir de um fluxo contínuo e de vazão elevada. Isto porque a unidade  $\text{R}_4$  (metarritmito argiloso), do Grupo Paranoá, e a Formação Serra do Landim (filitos), do Grupo Canastra, que mantém contato através do empurrão, têm tendência de formar fraturas de pequenas dimensões, além de horizontalizadas. Essa configuração é tida como desfavorável do ponto de vista hidrogeológico, principalmente quando se considera o fluxo descendente devido à água de precipitação pluviométrica que infiltra a partir da superfície. Porém, para o caso em tela, esta configuração é que permite que ocorra a interconexão, pois favorece o fluxo lateral, vital para a sustentação do fenômeno observado.

As fraturas/falhas verticalizadas das rochas mais competentes captam água a partir da superfície e a transportam até profundidades mais elevadas. A pressão hidrostática exercida por essa água força a sua circulação lateral, inicialmente entre o metarritmito argiloso e os filitos,

dessa vez por meio da fraturas de pequenas dimensões horizontalizadas formadas no contato entre os dois litotipos. O processo tem continuidade pela circulação da água através das fraturas dos filitos que também estão hidráulicamente conectadas às cavidades existentes nas lentes de mármore. Ressalta-se que esse fluxo é lento e de pequenas proporções, provavelmente ocorra por gotejamento e transferência de umidade.



<p><b>A - CENÁRIO NEOCRETÁCIO</b></p>	<p>A superfície corresponde ao modelado da Superfície Sul-americana. O pacote carbonático representa as lentes de mármore atribuídas à formação à Serra do Landin do Grupo Canastra. A conformação tectônica foi formada ao final da Orogênese Brasileira, gerando cavalgamento, dobramento e fraturamento.</p>
<p><b>B - CENÁRIO PALEÓGENO (?)</b></p>	<p>Formação do Gráben de São Sebastião, com falhamento normal neotectônico com rejeito principal seccionando os mármore. O bloco alto é submetido a processo erosivo de grande magnitude. A tectônica extensiva provoca abertura das juntas, fraturas e demais planos brasileiros.</p>
<p><b>C - CENÁRIO QUATERNÁRIO (?)</b></p>	<p>Continuação dos processos erosivos do bloco elevado com acumulação nos mármore situados a oeste. Intensificação dos processos cársticos já iniciado nas fases anteriores.</p>
<p><b>D - CENÁRIO ATUAL</b></p>	<p>Conformação da superfície atual com a total eliminação dos mármore a leste da falha principal do gráben. O Grupo Paranoá permanece em cotas superiores devido a maior resistência ao intemperismo. O depocentro principal do gráben foi preenchido por material coluvionar, posteriormente latossolizado. A leste da falha predominam cambissolos sobre relevo movimentado.</p>

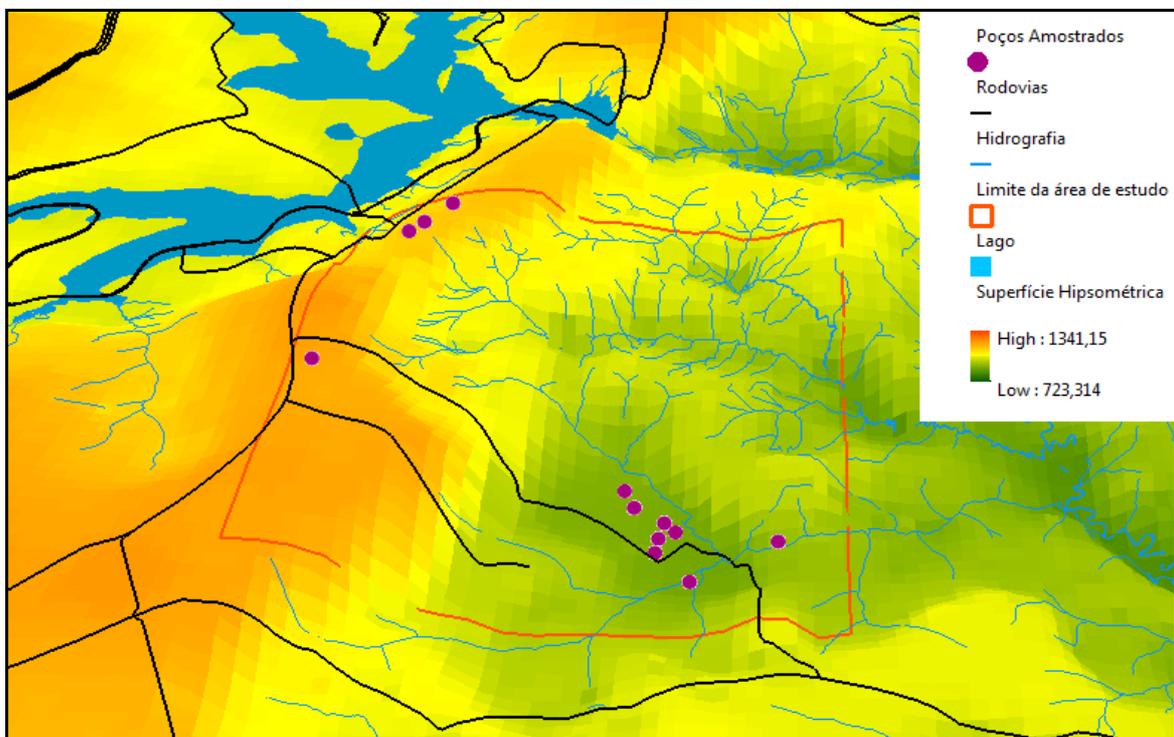
**Figura 3.9** - Evolução do Gráben de São Sebastião (Compilado de Xavier, 2010 a partir da modificação de Joko 2002).

A variação na rede de porosidade e no grau de saturação da água cria sistemas de fluxo, ora lentos (relacionados às rochas argilosas de baixa porosidade), ora rápidos (relacionados aos quartzitos e às rochas cársticas), mas ao longo dos quais ocorre a mistura das águas. Essa diferenciação no fluxo é fundamental para a definição da composição isotópica da água, uma vez que promove a atenuação do sinal da água da chuva quando esta atinge a zona saturada do aquífero, o que explica, a separação dos dados em dois conjuntos distintos.

Sendo assim, a principal contribuição para a recarga do aquífero de São Sebastião seria de fluxo local, o que explicaria as vazões anômalas no contexto do DF e a diferença de assinatura isotópica entre os compartimentos.

Outra evidência da interconexão entre os sistemas aquíferos é a compartimentação topográfica do terreno conforme se observa na Figura 3.10.

A porção correspondente aos Vales Dissecados apresenta declividade baixa (áreas em tons de verde dentro do polígono vermelho) configurando uma área de descarga tanto da água que infiltra e escoar abaixo da superfície, quanto daquela que escoar superficialmente como córregos e ribeirões a partir dos Planos Elevados (áreas em tons de laranja dentro do polígono vermelho).

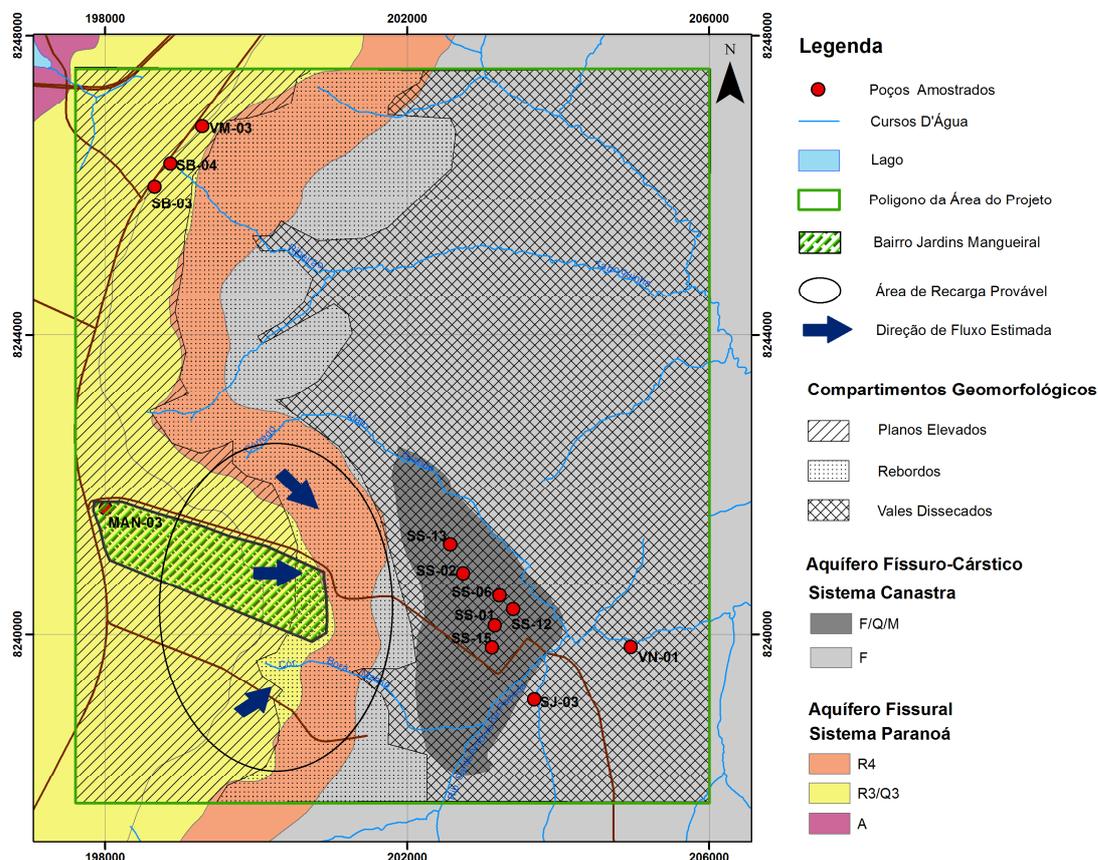


**Figura 3.10** - Hipsometria da área de estudo produzida a partir de um MDT (Modelo Digital de Terreno).

Próximo à borda oeste da área de estudo estão os limites das unidades hidrográficas dos córregos Borá Manso e Mato Grande e do ribeirão Taboquinha. Os tributários desses córregos, que escoam em direção à leste/sudeste, materializam a evidência de que a água que infiltra no topo da chapada, onde se encontram os poços MAN-03, SB-03, SB-04 e VM-03 amostrados, se dirige para a região de ocorrência dos mármore e filitos do Grupo Canastra (Figura 3.9 e 3.10), mesmo que o limite da bacia hidrogeológica não coincida com o limite da bacia hidrográfica.

Com isso conclui-se que a área de contribuição para a recarga do aquífero fissuro-cárstico de São Sebastião, a partir da região de Planos Elevados, não compreende toda a

extensão da Chapada de Brasília que mantém contato com as rochas do Grupo Canastra. Esta provavelmente está restrita à área onde atualmente está assentado o bairro Jardins Mangueiral e Setor Habitacional Jardim Botânico (Figura 3.11), o que pode ser observado pela direção de escoamento da água das nascentes do córrego Borá Manso.



**Figura 3.11** - Mapa que ilustra a direção estimada de fluxo da água subterrânea e a principal área de contribuição para o aquífero de São Sebastião a partir do compartimento Planos Elevados.

Assim, verifica-se que a recarga do aquífero de São Sebastião recebe contribuição de fluxo regional, oriundo do compartimento Planos Elevados. Essa recarga é de pequena escala, porém, não desprezível. Ademais, é possível concluir que os dados isotópicos de  $\delta D$  e  $\delta^{18}O$  mostram que a principal contribuição para a recarga do aquífero de São Sebastião é de fluxo local – Recarga Direta Local, havendo contribuição de fluxo regional – Recarga Direta Regional.

### 3.2.3. Análise dos Resultados de Trítio

Foram realizadas análises de trítio nas doze amostras de água subterrânea coletadas nos mesmos poços já citados anteriormente. Os resultados obtidos foram aplicados para a datação das águas analisadas, visto que o trítio é um excelente marcador geocronológico.

Contudo, considerando que não se dispõe de uma série histórica completa e longa de concentrações de trítio nas águas subterrâneas e meteóricas da área pesquisada foi utilizada análise qualitativa e relativa, ou seja, comparativa dos dados de trítio obtidos.

As análises foram realizadas no laboratório de geocronologia da Universidade de Leipzig, Alemanha, e os resultados foram expressos em UT (unidades de trítio) conforme Tabela 3.4.

Observando os valores obtidos verifica-se que novamente há diferenças marcantes entre os compartimentos geomorfológicos Vales Dissecados e Planos Elevados. As águas amostradas no compartimento de Planos Elevados apresentam valores mais elevados, ao passo que, comparativamente, as águas amostradas no compartimento de Vales Dissecados mostram valores de concentração de trítio mais baixos. Os valores de trítio fornecem, mais especificamente, informações sobre o tempo de recarga e a circulação da água dentro do aquífero.

	Código do Poço	T (UT)	$\pm 2\sigma$ (UT)
Planos Elevados	MAN-03	1,2	0,2
	SB-03	1,8	0,3
	SB-04	1,4	0,3
	VM-03	1,7	0,3
Vales Dissecados	SJ-03	< 0,5	—
	SS-01	< 0,5	—
	SS-02	< 0,5	—
	SS-06	< 0,5	—
	SS-12	< 0,5	—
	SS-13	0,5	0,3
	SS-15	< 0,5	—
	VN-01	0,9	0,2

**Tabela 3.4** - Resultados das análises de trítio ( $^3\text{H}$ ) para os poços amostrados.

As águas dos poços localizados no compartimento Vales Dissecados apresentam valores baixos de concentração de trítio, inclusive abaixo do limite de detecção do equipamento utilizado para a análise (<0,5 UT). A princípio conclui-se que as águas desse aquífero são antigas, ou seja, águas cuja recarga ocorreu antes de 1951, quando foram iniciados os testes com as bombas termonucleares. Analisando os dados dos poços situados no compartimento Planos Elevados, em paralelo, conclui-se que se trata de água com idade inferior a 60 anos. Contudo, conforme citado anteriormente, a análise absoluta dos dados não é aplicável ao hemisfério sul, sendo necessária a análise comparativa entre os dados levantados para compreensão da realidade local.

Considerando que a origem das águas subterrâneas é a mesma para os dois compartimentos considerados (se originam da precipitação da mesma massa de ar), era esperado que as idades das águas subterrâneas de ambos os compartimentos fosse a mesma. Porém, não é essa a situação encontrada de fato.

As lentes de mármore, responsáveis pelas vazões anômalas dos poços que abastecem a cidade de São Sebastião, apresentam alta velocidade de fluxo, típica de um ambiente cárstico. Isto se explica pelo diâmetro considerável das fraturas de dissolução que se formam nesse tipo litológico. A circulação e a renovação da água nesse aquífero são, portanto, muito rápidas.

Em contrapartida, os filitos, nos quais os mármoreos estão interdigitados, não são aquíferos fraturados eficientes, se comportando frequentemente como aquíferos. O filito é uma rocha com tendência a comportamento dúctil diante de esforços de deformação, tendo como resposta preferencial o dobramento da rocha. Desse modo, as aberturas que se formam são frequentemente de baixo ângulo e com reduzida interconectividade, desfavorecendo o fluxo da água subterrânea.

O modelo de fluxo aplicado para a compreensão desse sistema de circulação se baseia na mistura de águas de fluxo regional, em menor escala, e de fluxo local, de maiores proporções.

O sistema aquífero associado aos Planos Elevados apresenta uma renovação maior devido à combinação de solo arenoso e fraturas abertas verticalizadas, ambos com alta condutividade hidráulica. Assim, ocorre nesse sistema uma adição frequente de água de precipitação pluviométrica elevando os valores de concentração de trítio.

As lentes de mármore se conectam hidráulicamente tanto com a superfície (através de fraturas estruturais e de dissolução) quanto com os aquíferos circunvizinhos. Essa conexão com a superfície, porém, não ocorre com a mesma eficiência que aquela descrita para a região de Planos Elevados devido, principalmente, à predominância de solos argilosos associados. Assim, dois tipos de fluxo se estabelecem: um de circulação rápida, que ocorre por meio do aproveitamento das fraturas de dissolução, com maior diâmetro; e outro de circulação mais lenta, estabelecido através da comunicação hidráulica entre as referidas lentes e os sistemas aquíferos circundantes. Tais características conferem um comportamento de relativo confinamento ao aquífero.

Isto implica em concentrações baixas de trítio. Com a restrita renovação da água contida na zona saturada do aquífero o trítio contido na água sofre decaimento radioativo reduzindo progressivamente suas concentrações.

Diante disso, entende-se que, apesar das concentrações de trítio revelarem águas antigas para a região de Vales Dissecados verifica-se que, na verdade, trata-se do reflexo da mistura entre as águas dos compartimentos geomorfológicos examinados.

A água da chuva que infiltra no topo da chapada (Planos Elevados) migra verticalmente até atingir a zona saturada do aquífero. Posteriormente, esse fluxo se desloca lateralmente alcançando o aquífero fissuro-cárstico. Como essa água migra com valores mais elevados de concentração de trítio e se mistura com uma água com concentrações muito baixas, esta última tem suas concentrações aumentadas, dentro do aquífero fissuro-cárstico, tendo em vista as reações de equilíbrio para homogeneização das concentrações.

Ressalta-se ainda que a única fonte de recarga possível para esse compartimento é a água da chuva, tendo em vista a sua constituição geomorfológica, de modo que os valores de concentração de trítio refletem diretamente a composição média da chuva na região.

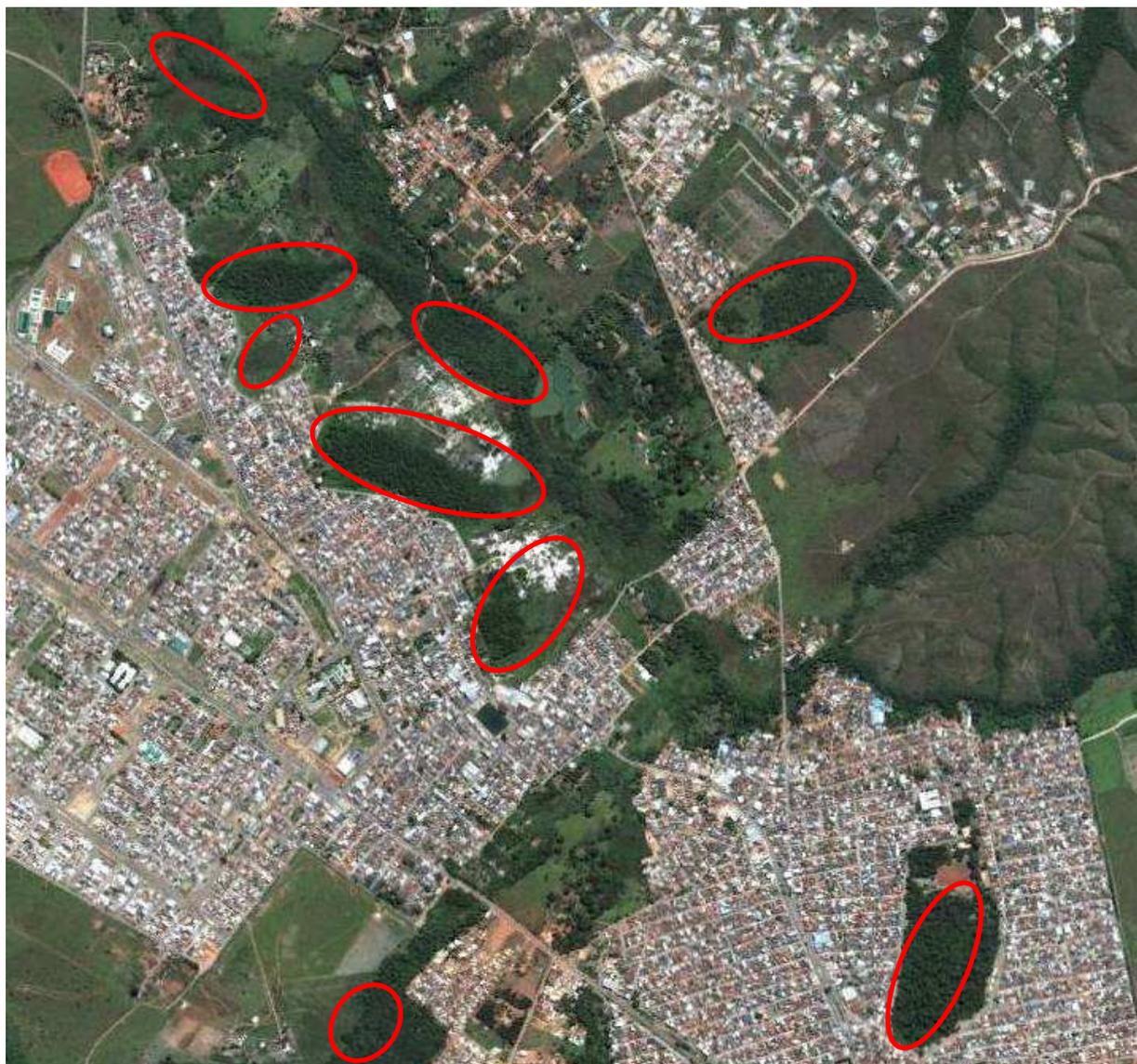
Observando os resultados dos poços SS-13 e VN-01 verifica-se que estes apresentam valores intermediários entre aqueles analisados para a região de Vales Dissecados, demonstrando que ocorre mistura das águas oriundas do fluxo regional (mais antigas) com águas de recarga direta local (mais jovens). O poço VN-01, que apresenta o valor mais elevado dentre aqueles da região de Vales Dissecados, provavelmente está sofrendo influência da água infiltrada a partir do ribeirão Santo Antônio da Papuda, confirmando, inclusive, que existe recarga a partir dos corpos hídricos superficiais, conforme hipótese levantada no item 3.2.1. Este fato é condicionado à presença de estruturas neotectônicas favoráveis à circulação da água subterrânea e pela presença de grandes manchas de gleissolos, onde é observada ampla variação sazonal dos níveis freáticos.

Já o poço SS-13 encontra-se posicionado dentro de uma área de mata, possivelmente sobre uma paleodolina, o que explicaria o valor mais alto de concentração de trítio se comparado com aqueles do compartimento Vales Dissecados.

Assim, verifica-se que a recarga de fluxo local é a principal fonte de recarga dos aquíferos de São Sebastião, sendo que ela se dá principalmente a partir das paleodolinas situadas no perímetro urbano da cidade de São Sebastião. Essas paleodolinas são áreas circulares/elipsoidais ocupadas atualmente por mata densa com indivíduos arbóreos de grande porte. Essas áreas concentram grandes volumes de água de escoamento superficial e de

precipitação pluviométrica que são infiltrados a partir da espessa cobertura de solos sobre os quais estão assentadas (Figura 3.12).

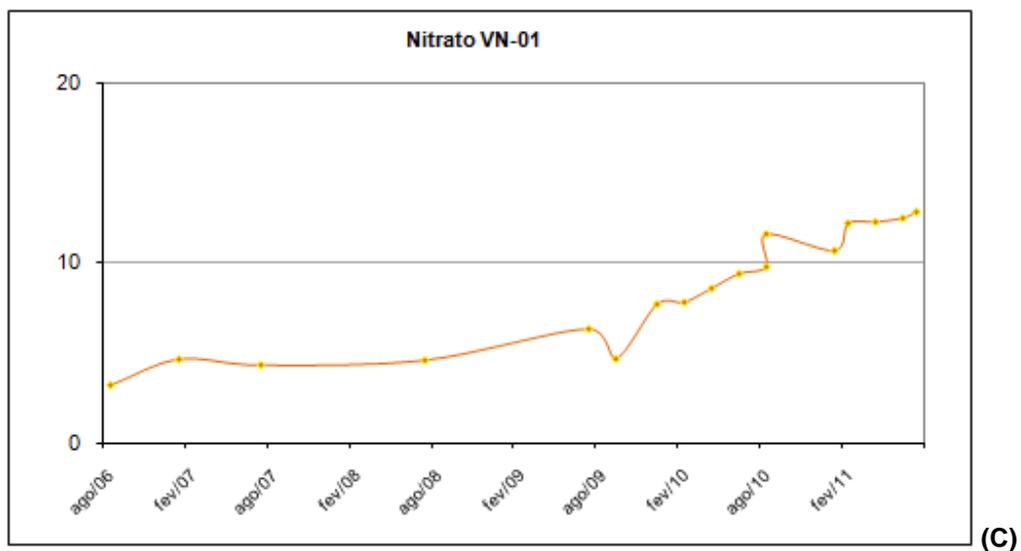
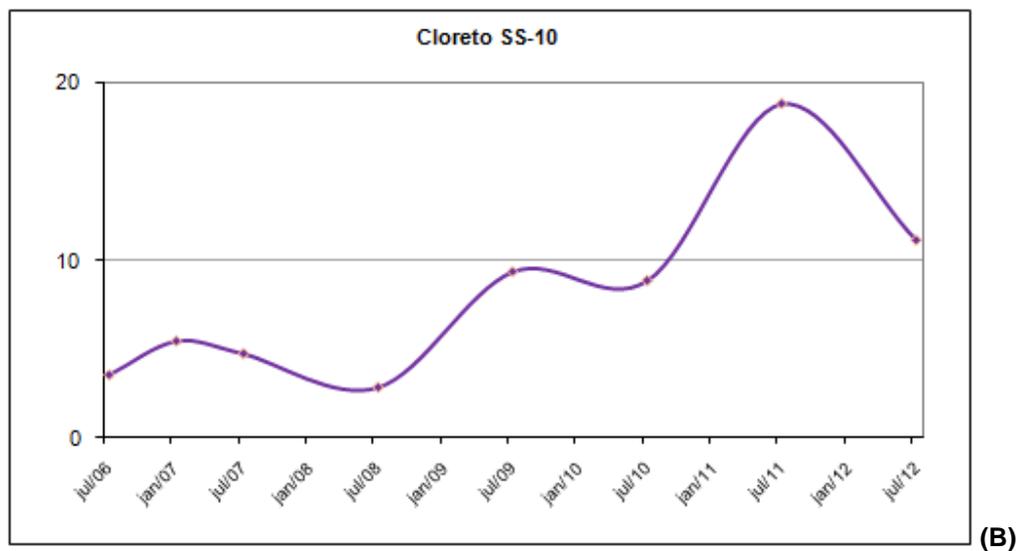
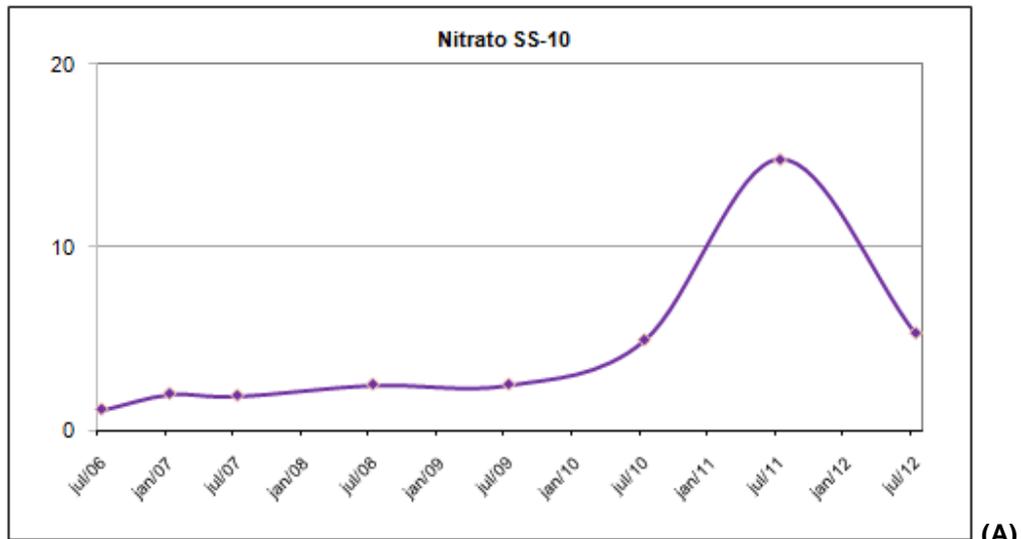
Vale a pena ressaltar que essas análises e conclusões destacam a ampla importância das chapadas e bordas de chapadas para a recarga no Distrito Federal. Além de proporcionar eficiente recarga para os aquíferos que abrigam, este compartimento geomorfológico proporciona recarga para as áreas deprimidas adjacentes, a partir do fluxo intermediário e regional.

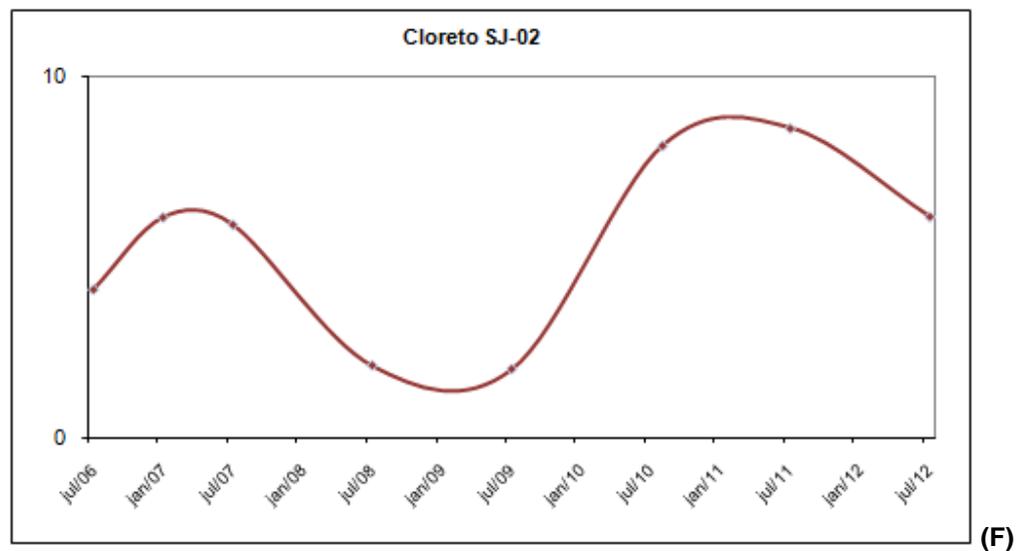
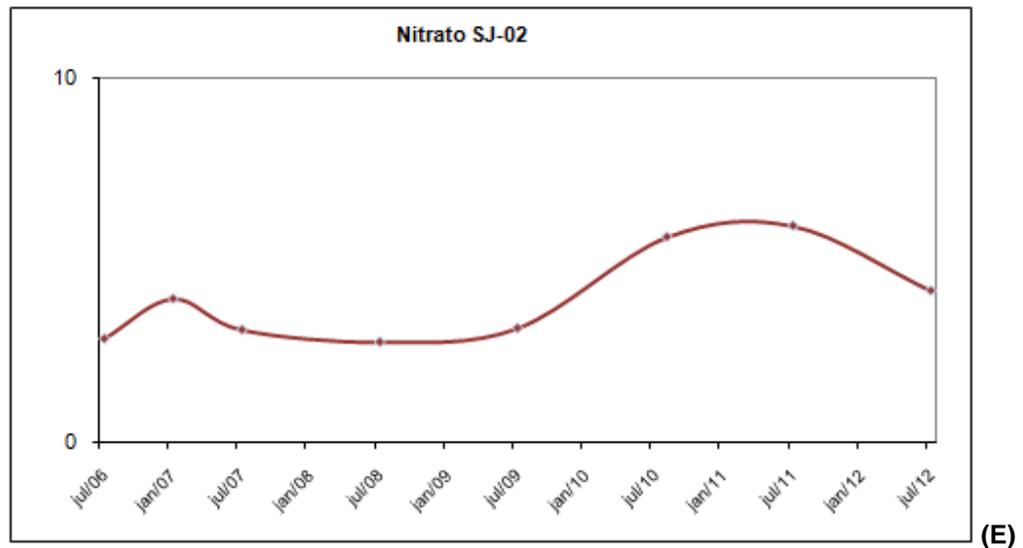
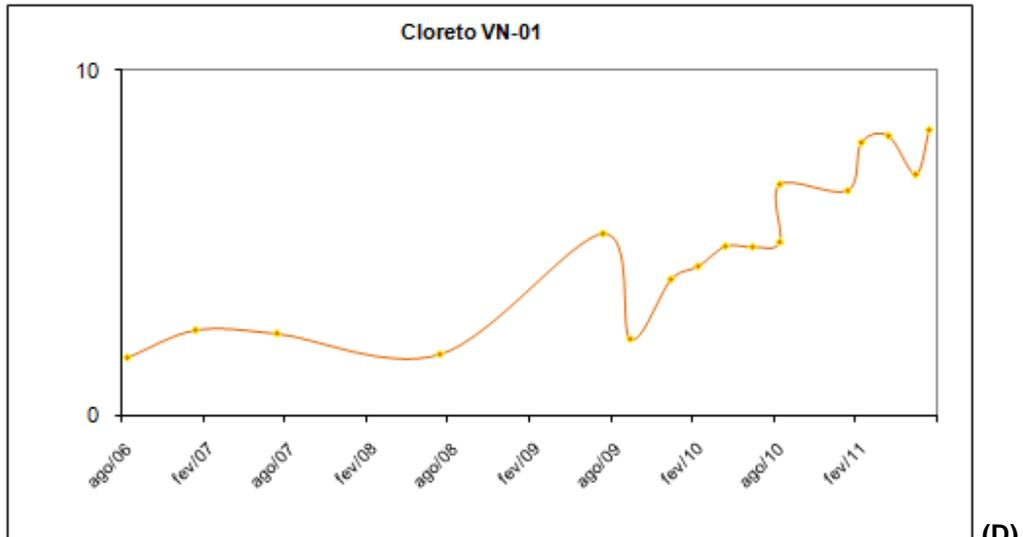


**Figura 3.12** - Imagem com destaque para paleodolinas preenchidas e cobertas por vegetação densa. Estes polígonos compõem importantes áreas de recarga direta local para o aquífero fissuro-cárstico de São Sebastião (Google Earth 2012).

Outra evidência da ocorrência deste tipo de recarga (recarga local) é a rápida e marcante oscilação das concentrações de nitrato e cloreto que se observa nos poços da região de São Sebastião. Esses compostos são excelentes traçadores da água subterrânea devido à sua grande mobilidade. Assim, a oscilação de grande escala e em curto espaço de tempo, visto que são perceptíveis apenas de um ano para o outro, só é possível a partir de recarga local,

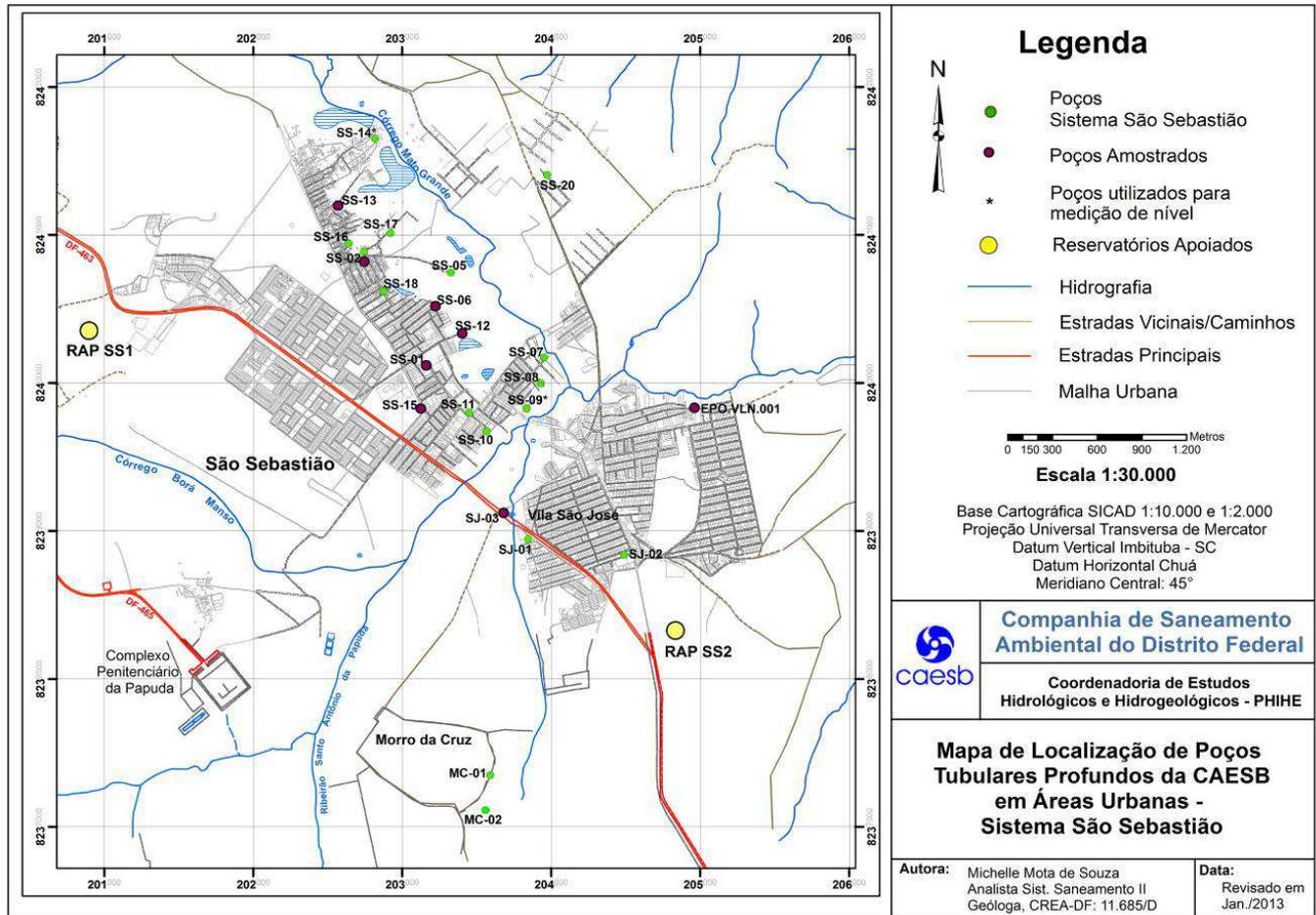
pois, a recarga regional apresenta resposta mais lenta conforme se verifica nos gráficos das Figuras 3.13 A a 3.13 F.





**Figuras 3.13 A a F** - Gráficos representativos da variação das concentrações de nitrato e cloreto nas águas subterrâneas captadas de poços da CAESB mostrando a rápida elevação dos teores destas substâncias;

O mapa da Figura 3.14 mostra a localização dos poços cujos gráficos são anteriormente apresentados.



**Figura 3.14.** - Mapa de localização dos poços que compõe o Sistema São Sebastião com destaque para aqueles nos quais foram feitas análises isotópicas (adaptado de CAESB, 2012).

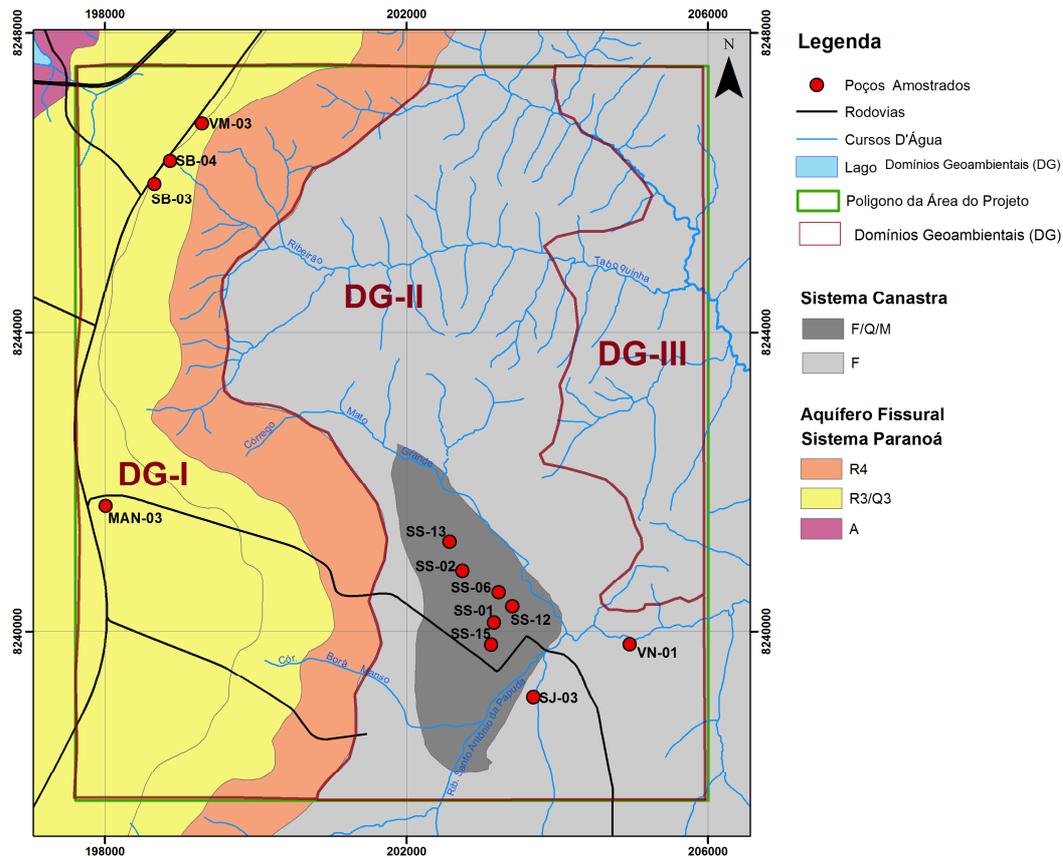
Os resultados de trítio analisados corroboram com os resultados obtidos nas análises de  $\delta D$  e  $\delta^{18}O$  que mostram haver contribuição de fluxo regional e local para a recarga do aquífero fissuro-cárstico de São Sebastião, sendo, no entanto, a mais significativa aquela de fluxo local.

### 3.3. Discussões

A partir dos resultados de análises laboratoriais de isótopos de hidrogênio (D e  $^3H$  - trítio) e oxigênio ( $^{18}O$ ) foi possível concluir que o aquífero sotoposto à cidade de São Sebastião, e que a abastece, é recarregado por sistemas de fluxo regional e local.

Conjugando os dados levantados é possível sintetizar as conclusões obtidas propondo um modelo hidrogeológico de fluxo.

Dentro do polígono definido para a área de estudo são definidos três domínios geoambientais distintos, denominados DG-I, DG-II e DG-III (Figura 3.15).



**Figura 3.15.** - Mapa dos limites dos Domínios Geoambientais I, II e III.

O primeiro (DG-I) abrange toda a região oeste da área e é constituído pelo metarritmito arenoso – R<sub>3</sub>, seguido do quartzito – Q<sub>3</sub> e encimado pelo metarritmito argiloso – R<sub>4</sub>. Essas unidades geológicas condicionaram a estruturação geomorfológica de toda a sua área de ocorrência desenvolvendo relevos planálticos (áreas com cotas altimétricas elevadas e planas, com baixa declividade), correspondendo ao compartimento geomorfológico de Planos Elevados. Sobre tais rochas se desenvolveu espessa camada de latossolos devido à ação intempérica das chuvas. Sua percolação foi possível graças à grande quantidade de fraturas e falhas, verticalizadas, interconectadas que atingem profundidades de até 250 metros, desenvolvidas nesses litotipos no final do evento orogenético Brasileiro. Tal configuração é bastante favorável do ponto de vista hidrogeológico, no que tange a produção de água subterrânea, além de apresentar grande potencial para a recarga de aquíferos por fluxo regional.

O segundo domínio geoambiental (DG-II) corresponde à porção central da área do projeto que está assentada sobre os filitos interdigitados à lentes de mármore com processo de carstificação incipiente da Serra do Landim, Grupo Canastra. As rochas pelíticas também apresentam um número significativo de fraturas interconectadas, porém, com configuração diferente daquela observada para o domínio anteriormente descrito principalmente em função do mergulho eminentemente horizontal. Configuram áreas de relevo plano a suave ondulado, correspondendo ao compartimento geomorfológico Vales Dissecados, e são cobertas por classes de solos variadas devido à interferência de diversos fatores, dentre eles destaca-se a deposição de material alóctone, proveniente de áreas topograficamente mais altas, e a oscilação do nível potenciométrico na área. Abrigam o leito dos principais corpos hídricos superficiais da área. Em termos hidrogeológicos, devido à dupla porosidade da rocha, podem ser considerados aquíferos (mármore) ou aquíferos (filitos), sendo que os primeiros apresentam bom potencial para a recarga de aquíferos.

Ressalta-se que o contato entre um e outro domínio se deu por meio de um empurrão de baixo ângulo ocorrido durante a orogênese brasileira. Posteriormente, esses domínios foram afetados por eventos neotectônicos que reativaram antigos planos de falhas e de fraturas, favorecendo o intercâmbio hidráulico entre eles.

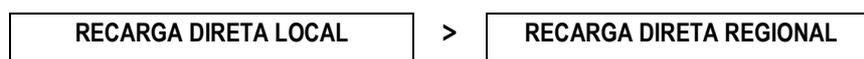
O terceiro domínio (DG-III) localiza-se na porção leste da área e corresponde aos filitos do Grupo Canastra. Devido à sua baixa competência essas rochas desenvolveram dobramentos em várias escalas em detrimento da formação de falhas e fraturas. Apresentam relevo forte ondulado e são recobertas por solos rasos e pouco estruturados sendo frequente a ocorrência de material imaturo em sua superfície. Mediante esse contexto, do ponto de vista hidrogeológico, se configuram como aquíferos ou até mesmo aquícludes, de tal modo que também apresentam baixíssimo potencial para recarga de aquíferos.

Os resultados das análises isotópicas de  $^{18}\text{O}$  e D realizadas nas amostras coletadas nos poços posicionados no DG-I e no DG-II mostram que a origem da água subterrânea para ambos os domínios é meteórica. Porém, o sinal isotópico da água da chuva é atenuado por eventos de evaporação a baixas umidades. Os dados obtidos mostram-se agrupados permitindo a separação de dois conjuntos distintos tanto para  $^{18}\text{O}$  quanto para D. Cada um deles pode ser relacionado a um compartimento geomorfológico distinto: Planos Elevados e Vales Dissecados. A água relacionada aos Planos Elevados é empobrecida nos isótopos analisados em comparação com aquela do compartimento de Vales Dissecados. Esse fato pode ser explicado pela mistura de águas de fluxo regional e local: a variação na rede de porosidade e no grau de saturação da água cria fluxos contínuos, ora lentos (fluxo regional), ora rápidos (fluxo local), mas ao longo dos quais ocorre a mistura das águas. Essa diferenciação no fluxo é fundamental para a definição da composição isotópica da água, uma vez que promove a atenuação do sinal da água da chuva quando esta atinge a zona saturada do aquífero, o que explica a separação dos dados em dois conjuntos distintos.

Os dados de trítio corroboram essa hipótese uma vez que mostram que águas subterrâneas com a mesma origem (meteórica) e geograficamente contíguas aparentemente apresentam idades diferentes. A hipótese é de que a água que infiltra no domínio DG-I, onde a circulação da água é naturalmente mais rápida e a concentração de trítio é mais alta (1,2 a 1,9UT), atinge os aquíferos do domínio DG-II, com concentrações mais baixas (entre <0,5 e 0,9UT), e por meio de mistura, ocorre elevação das concentrações de trítio das águas desse último. Ressaltando que, como o fluxo de origem regional tem baixa velocidade, a mistura das águas dos dois sistemas de fluxo não ocorre tão amplamente de modo a elevar significativamente a concentração de trítio nas águas do aquífero cárstico.

Muito provavelmente as áreas do domínio DG-III não contribuem para a recarga do aquífero de São Sebastião, visto apresentarem contexto desfavorável: relevo acidentado associado a solos rasos, litotipo argiloso de comportamento dúctil, além de fraturas horizontalizadas.

Diante disso, é possível estabelecer uma hierarquização qualitativa para cada um dos tipos de recarga descritos:



## CAPÍTULO 4

### AVALIAÇÃO DO HISTÓRICO DE EXPLOTAÇÃO

#### 4.1. Apresentação

A gestão eficiente de um aquífero pressupõe a otimização do uso da água explorada, resultando, entre outros benefícios, na proteção do recurso hídrico subterrâneo. Essa proteção diz respeito, não só à qualidade, mas também à quantidade de água captada, tendo em vista as pressões que atingem o aquífero, sobretudo pelo aumento da impermeabilização das áreas de recarga e da demanda por água. Assim, um programa de gestão deve contemplar também o risco de sobreexploração do aquífero.

O conceito de sobreexploração, no entanto, é controverso o que se reflete na escassa literatura a respeito.

Apesar de não haver uma definição formal para o tema, o entendimento corrente estabelece que a sobreexploração de um aquífero ocorre quando, por um período longo de tempo, a taxa de extração de água excede a taxa média de recarga, à semelhança de um simples balanço de massa. Esta é explicação comumente dada quando são percebidos resultados negativos do desenvolvimento do aquífero, tais como: rebaixamento contínuo do nível da água ou a piora progressiva da qualidade da água em função da diminuição da reserva hídrica. Tais efeitos não estão necessariamente ligados ao esgotamento ou sobreexploração do aquífero, eles podem estar ligados à interferência entre poços ou de um longo período de transiência, por exemplo (Custodio, 2002).

O efeito de retardo ou transiência implica na ausência de mudanças no balanço hídrico do aquífero em um primeiro momento. Imediatamente após uma modificação na recarga ou na extração de água subterrânea, não há alteração na descarga, ou seja, o fluxo de base de drenagens não é afetado. Posteriormente as águas subterrâneas entram ou saem da reserva do aquífero, de modo que as primeiras frentes de modificações hidráulicas adaptam-se ao ritmo da mudança, desaparecendo lentamente. A duração desse efeito depende do tamanho, da interconectividade, do armazenamento específico e da transmissividade do aquífero (Custodio, 2002).

Em termos práticos, em um aquífero de pequena extensão e alta transmissividade os efeitos de uma alteração na captação de água ou na recarga se desfazem em poucos dias ou semanas. Por outro lado, em se tratando de um aquífero de grande extensão (alta interconectividade) ou com transmissividade relativamente baixa, ocorre uma grande alteração no nível freático e na frente hidráulica cujo progresso se dá em ritmo muito lento. É por essa razão que observações de curto prazo não detectam tais alterações e também porque em grandes sistemas aquíferos o nível da água subterrânea, atualmente rebaixado, pode estar refletindo uma fase transitória (efeito transiente) produzido por circunstâncias passadas.

Assim, o rebaixamento do nível da água de um aquífero não é necessariamente algo negativo, principalmente se não for permanente. Pode, na verdade, ser um passo na direção do desenvolvimento sustentável, uma vez que o termo sobreexploração de aquíferos frequentemente tem uma conotação qualitativa e não um significado hidrodinâmico preciso. Isto se deve a uma deficiência comum ligada ao conhecimento técnico quantitativo das áreas de recarga, visto ser bastante complexo definir as taxas e a extensão de tais áreas devido às intensas e rápidas modificações que as atividades humanas e o próprio desenvolvimento do aquífero lhes impõem. Portanto, a sobreexploração se refere basicamente a uma preocupação com a evolução do sistema de fluxo do aquífero estudado sob pontos de vista específicos e restritos (Custodio, 2002).

Diante dessas contradições até o momento não havia sido desenvolvida uma metodologia aplicável em larga escala para a verificação segura da sobreexploração. Com vistas

a preencher esta lacuna o presente trabalho de pesquisa propõe uma metodologia alternativa aplicável para a definição da ocorrência ou não de sobrexplotação de aquíferos.

## 4.2. Método de Medição da Sobrexplotação

Normalmente para se verificar a ocorrência ou não de sobrexplotação de um aquífero efetuam-se medidas sistemáticas do nível estático (NE) de poços representativos. Esses dados são posteriormente comparados aos valores de NE obtidos quando da perfuração do poço amostrado. A partir dessa comparação observa-se se houve mudanças significativas entre o NE inicial e o atual, principalmente se for observado rebaixamento em longo período de tempo.

Apesar da aparente praticidade desse método, há um inconveniente que a torna inexequível para a realidade de São Sebastião. Para que fosse obtido o NE atual de cada poço seria necessário que todos eles fossem simultaneamente desligados por um período de tempo muito longo, o que acabaria provocando o desabastecimento da população da cidade.

Este mesmo problema é observado em outras localidades onde o abastecimento é integral ou em grande parte feito a partir de mananciais subterrâneos. Mesmo nos casos em que seja possível desligar todos os poços do sistema oficial de abastecimento, não se pode garantir que o nível estático foi recuperado, pois existem poços desconhecidos em operação que não são passíveis de desligamento simultâneo.

Dois procedimentos alternativos de medição são propostos para determinar a sobrexplotação:

- nível dinâmico às mesmas taxas de bombeamento após o mesmo período de bombeamento ou;
- nível d'água em poços de observação ou piezômetro com as mesmas condições de contorno.

O monitoramento do nível de água pode ser desenvolvido por diferentes formas:

- medição contínua com equipamento automático (como transdutor de pressão, *data logger*, *divers*) ou;
- periodicamente a partir da medição do nível de água com equipamento manual (com sensor sonoro).

O uso de formas automáticas de medição tem a vantagem de gerar um grande número de dados que podem ser aplicados para traçar curvas mais precisas, de forma que o comportamento do rebaixamento possa ser mais evidente. O uso de medição periódica deve ser pelo menos em base mensal, mas se possível duas medidas por mês é a forma mais adequada. No caso de monitoramento contínuo é necessário separar os dados para obter o rebaixamento mais crítico nas mesmas condições de bombeamento. Se o equipamento manual for usado para o monitoramento, as medidas devem ser tomadas nas mesmas condições, preferencialmente ao mesmo tempo de um determinado dia da semana, com o mesmo consumo de água.

Os dados disponíveis, em seguida, são plotados em dois tipos de gráficos:

- nível dinâmico (nível de água em metros) versus tempo (dia/mês do ano) e
- nível de dinâmico interanual (em metros) versus meses do ano.

Para a confecção dos gráficos devem ser usados dados de um conjunto de poços em vez de um único poço. Esta condição pode ajudar a filtrar casos anômalos ou inconsistências causadas por baixa eficiência dos poços, poços com penetração parcial ou outros distúrbios hidráulicos.

Uma análise qualitativa deve ser executada sobre os dados plotados e devem-se considerar algumas correções ou correlações incluindo:

- subtração dos efeitos da influência climática sazonal;
- avaliação das distâncias de poços individuais ou entre os poços de bombeamento e monitoramento;
- verificação da tendência das curvas.

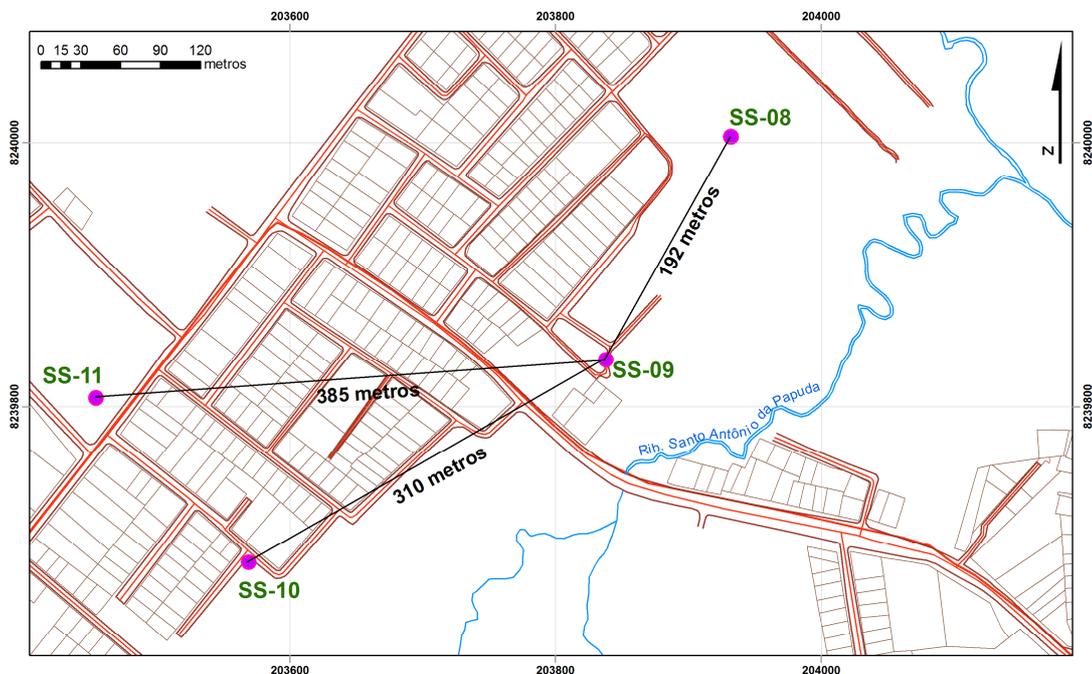
A subtração de efeitos sazonais deve ser feita sobre o gráfico interanual. Neste caso é possível verificar os efeitos das diferenças de recarga anual ou os efeitos de variações sazonais do nível freático.

### 4.3. Análise de Dados

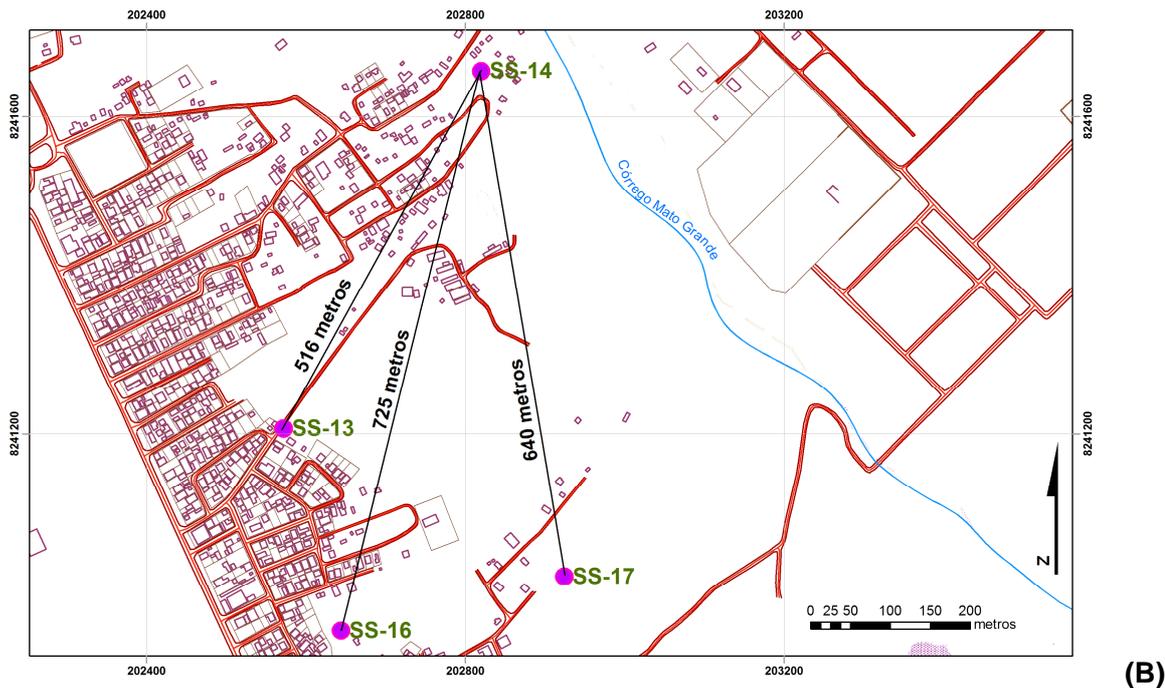
A CAESB realiza o monitoramento sistemático do nível estático de 2 poços em São Sebastião por meio de leituras mensais. Os poços monitorados são denominados de SS-09 e SS-14. Trata-se de antigos poços de produção que foram desativados e atualmente são utilizados exclusivamente como poços de monitoramento para avaliar a condição de exploração do aquífero, no que tange ao nível da água e seu comportamento de longo período. Esse dado pode fornecer importantes informações a respeito da resposta do aquífero ao regime de exploração que vem sendo praticado ao longo dos anos.

A preocupação com a sobreexploração é grande, pois a taxa de extração de água foi multiplicada por três desde o início de operação do sistema de bombeamento e a ADASA vedou a emissão de outorgas de direito de uso de água subterrânea para novos poços na região.

As condições de localização de ambos os poços são contrastantes. Enquanto o poço SS-09 está situado numa porção de intensa ocupação na cidade, o poço SS-14 está situado em uma área mais isolada, próximo ao córrego Mato Grande. As distâncias entre esses poços e aqueles que os avizinham também são diferentes. O poço mais próximo ao poço SS-14 está a, aproximadamente, 500 metros de distância em linha reta (Figura 4.1B), já em relação ao poço SS-09 essa distância é de apenas 190 metros (Figura 4.1A).

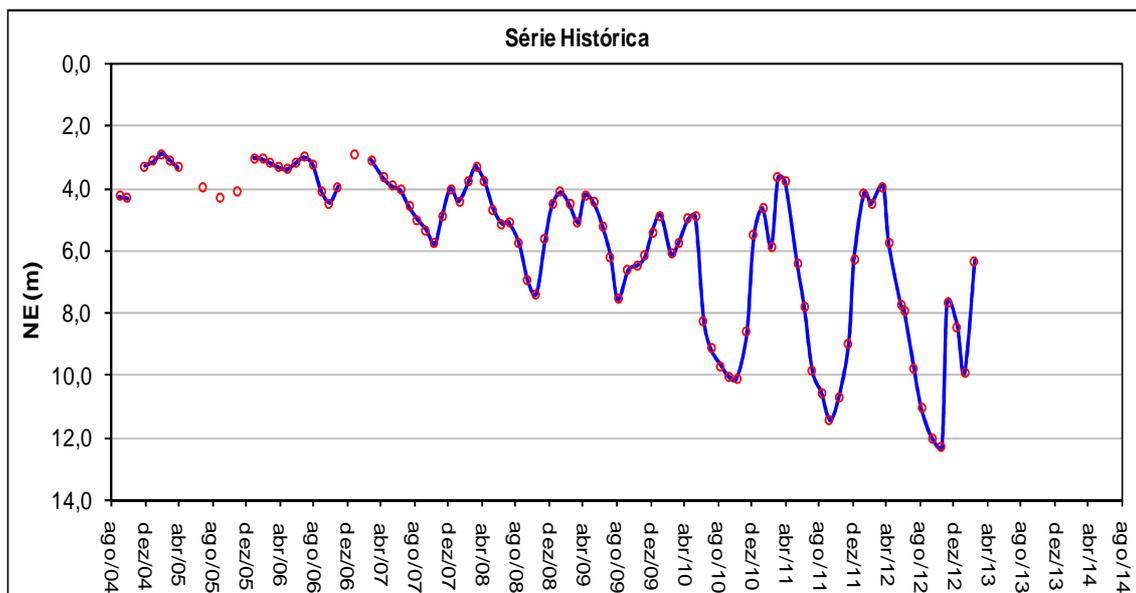


(A)



**Figura 4.1** - Localização dos piezômetros SS-09 (A) e SS-14 (B) e a distância entre estes e seus vizinhos mais próximos.

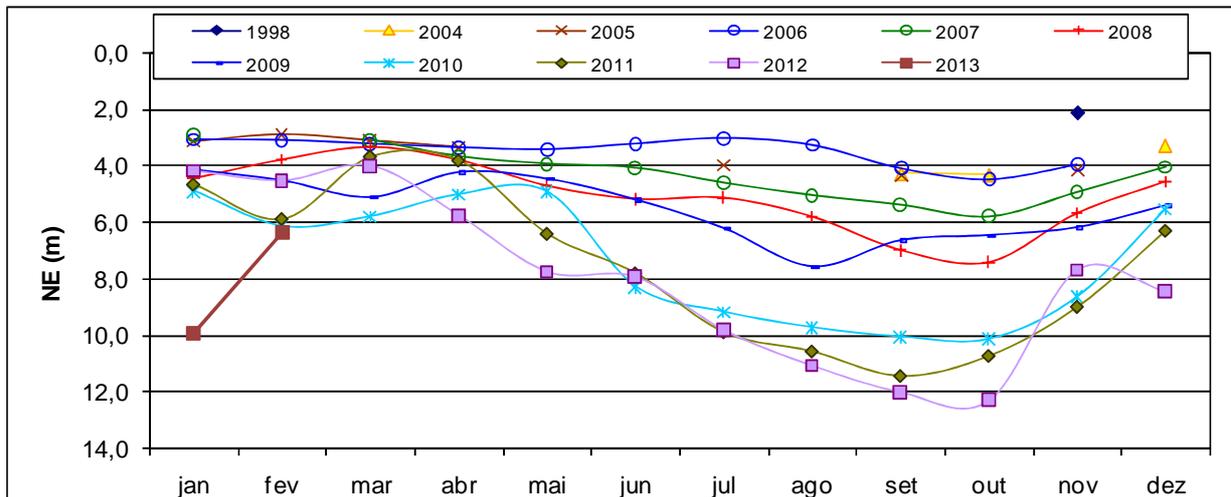
Analisando o gráfico da série histórica referente ao poço SS-09 (Figura 4.2), que retrata a variação anual do nível deste poço, há uma propensão a se considerar que esteja havendo rebaixamento do nível da água do aquífero, apontando, portanto, para uma possível sobreexploração. Isto porque observa-se uma tendência de rebaixamento, uma vez que o nível estático inicial do poço (2,10 metros, segundo dados da CAESB) não foi novamente atingido. Mais que isso, os valores de nível estático estão atingindo valores progressivamente mais baixos, chegando, em 2012, a atingindo os 12 metros de profundidade.



**Figura 4.2** - Gráfico de variação anual do nível d'água do aquífero de São Sebastião medido no poço SS-09.

A partir da análise da variação mensal dos valores de NE, conforme consta da Figura 4.3, é possível observar que os maiores valores de nível d'água, ou seja, quando o nível atingiu as maiores profundidades, corresponde aos meses de seca no DF, quando a precipitação média mensal pode ser zero. Observa-se que invariavelmente entre os meses de fevereiro e março o nível da água atinge valores em torno dos 3 metros, muito próximos do NE inicial. Em 2012, nesses mesmos meses, o NE atingiu a profundidade de 4 metros. Assim, muito provavelmente a variação do nível da água no referido poço está refletindo a sazonalidade climática no Distrito Federal que coincide com a maior demanda por água e, por conseguinte, ampliação da taxa de bombeamento. Contudo, como o nível d'água atual não retoma o patamar inicial, de 2,10 metros, isso pode significar apenas uma adaptação do sistema aquífero às condições de exploração, atuais e passadas. Inclusive, conforme já comentado anteriormente, os valores de produção dos poços de São Sebastião vieram aumentando significativamente ao longo dos anos, chegando a triplicar em 13 anos, o que implica necessariamente um impacto. Este, porém, não significa sobreexploração.

Ressalta-se ainda que o que efetivamente se mede no poço de monitoramento é o nível d'água instantâneo e não necessariamente seu nível estático, uma vez que pode ocorrer conexão hidráulica (= interferência) com os poços de produção que são bombeados em regime permanente.



**Figura 4.3** - Gráficos de variação mensal do nível d'água do aquífero de São Sebastião medido no poço SS-09.

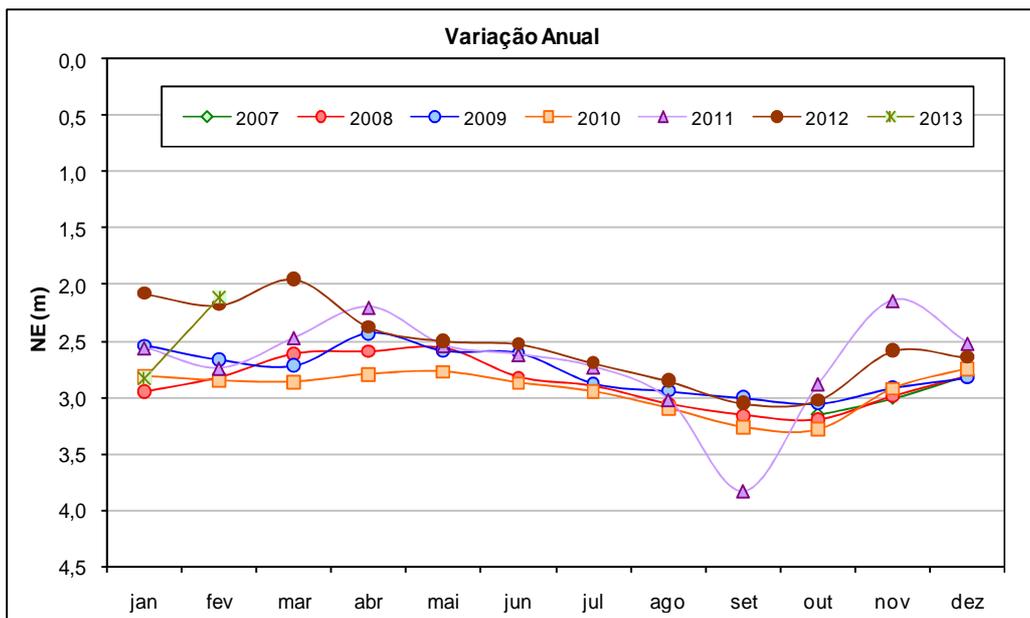
Esta hipótese deve, portanto, considerar a interferência entre poços. Devido à proximidade entre os poços SS-09 e SS-08 (190 metros de distância) é possível que esteja havendo interferência entre eles, especialmente se considerada a alta vazão deste último (vazão de produção de aproximadamente  $96\text{m}^3/\text{h}$ ). O cone de depressão deste poço é provavelmente bastante amplo provocando o rebaixamento do nível daqueles poços conectados a ele hidráulicamente, o que justificaria as perturbações observadas nos gráficos das Figuras 4.3 e 4.4 anteriormente comentadas. Esta hipótese torna-se ainda mais factível quando se analisam os dados do poço SS-14 (Figuras 4.4 e 4.5).

Ao contrário do que se verifica para o poço SS-09, o nível estático do poço SS-14 vem mostrando uma tendência para a recuperação do nível, inclusive atingindo patamares superiores àquele observado como valor inicial de 3,30 metros. As variações sazonais também são observadas, porém, em menor escala, provavelmente devido à ausência de interferência entre o poço monitorado e demais poços de bombeamento. Nos meses de estiagem há aumento na demanda por água, asseverando o rebaixamento do nível do aquífero devido ao aumento no bombeamento, de modo que o reflexo desse rebaixamento é percebido nos poços

conectados hidráulicamente, como é o caso dos poços SS-09 e SS-08, porém, não verificado no poço SS-14.



**Figura 4.4** - Gráfico de variação anual do nível d'água do aquífero de São Sebastião medido no poço SS-14.



**Figura 4.5** - Gráfico de variação mensal do nível d'água do aquífero de São Sebastião medido no poço SS-14.

Assim é possível concluir que o regime de exploração atual não está provocando o que é conhecido como sobreexploração de aquíferos em São Sebastião/DF.

Com vistas a refinar o conhecimento a respeito do impacto do regime de bombeamento da região de São Sebastião sugere-se a comparação dos dados de nível d'água com dados de transmissividade e direção de fluxo da água no aquífero.

## **CAPÍTULO 5**

### **PROPOSTA DE GESTÃO PARA O SISTEMA DE ABASTECIMENTO**

#### **5.1. Apresentação**

A gestão das águas subterrâneas em São Sebastião traz uma questão comum a várias outras cidades brasileiras que também utilizam dessa fonte para o abastecimento de suas populações: conciliar o rápido crescimento da demanda com a sustentabilidade de exploração do aquífero. Isto se torna um problema porque a prática mais difundida é a elevação progressiva do volume da água captada sem uma avaliação mais aprofundada das variáveis envolvidas e um planejamento de longo prazo. Com relação à água subterrânea essa situação é ainda mais crítica dadas as peculiaridades de sua dinâmica quando comparadas às das águas superficiais, principalmente a questão da lenta renovação (quando comparada à renovação anual dos mananciais superficiais).

Em São Sebastião, a descoberta de poços com vazões anômalas dentro do contexto do Distrito Federal aliada à limitações físicas e econômicas para o abastecimento da cidade a partir de uma fonte de água superficial, levaram a opção do abastecimento exclusivo por água subterrânea, porém, sem um programa de gestão. Isto ocorre porque, conforme já comentado nos capítulos anteriores, a população da cidade e de seu entorno vem crescendo rapidamente, promovendo, inclusive, a impermeabilização das áreas de recarga dos aquíferos. No entanto, experiências de sucesso em outros países mostram que essas questões são satisfatoriamente solucionadas com a otimização do uso da água, valorizando sua parcela mínima em cada processo, modificando assim a ideia de que a solução para os problemas de escassez seja apenas o aumento da oferta de água.

Desta forma, o presente capítulo apresenta propostas de gestão para o aquífero de São Sebastião, elaboradas a partir dos dados, das observações e resultados obtidos neste projeto de pesquisa. Cumpre esclarecer que todas as ações propostas são elaboradas com base na realidade local e são, portanto, factíveis e exequíveis.

Outra premissa considerada na proposição das medidas para a gestão é que o gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos deve ser local e que ações aplicadas em outros locais devem ser adaptadas aos problemas observados no sistema de abastecimento local.

#### **5.2. Propostas de Ações para a Gestão dos Aquíferos e do Sistema de Abastecimento**

##### **5.2.1. Recarga Artificial**

A impermeabilização generalizada do solo por meio da instalação de calçadas, pavimentação de ruas e coberturas de residências reduz a recarga natural dos aquíferos alterando as condições do equilíbrio dinâmico responsáveis pela sua manutenção. Com a impermeabilização dos solos ocorre um incremento significativo no escoamento superficial durante a estação de chuvas repercutindo em perdas do excedente hídrico que infiltraria, reabastecendo o aquífero.

Essa quebra nas condições necessárias para a manutenção do equilíbrio dinâmico pode ser compensada pela aplicação de técnicas de recarga artificial de aquíferos. Considerando que foi constatado que as precipitações locais representam grande relevância para a recarga do aquífero que abastece a cidade de São Sebastião, sugere-se aplicar a referida técnica na área da cidade, preferencialmente sobre as áreas de ocorrência das lentes de mármores, que são recobertas por espessos solos naturalmente bastante permeáveis (Souza, 2001).

Contudo, considerando ainda que se trata de área urbana já consolidada, que as dimensões dos lotes existentes são bastante reduzidas e que as áreas verdes da cidade se restringem a pequenas áreas remanescentes da vegetação nativa preservada principalmente junto às drenagens superficiais, sugere-se que a técnica de recarga artificial seja aplicada em áreas específicas, pré-determinadas.

No Distrito Federal a recarga artificial, quando aplicada em núcleos urbanos, é feita lote a lote, isto é, o equipamento designado é instalado em cada uma das unidades residenciais captando água da chuva a partir de calhas instaladas no telhado que direcionam essa água para o sistema de infiltração instalado no solo. Contudo, em São Sebastião, além das dimensões dos lotes serem reduzidas, dificultando a designação de uma área específica para esse fim, grande parte do lote está edificada. Também é bastante frequente que as áreas, mesmo que não edificadas, sejam cimentadas (impermeabilizadas), o que inviabiliza a instalação dos equipamentos necessários para a aplicação da técnica.

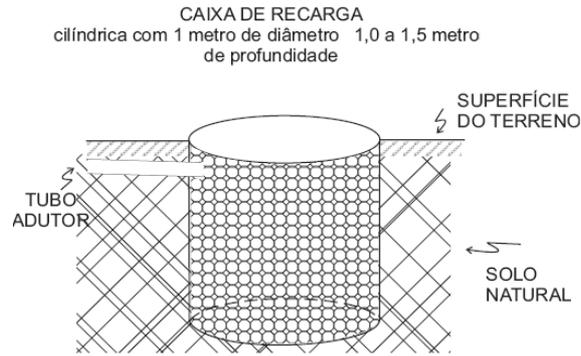
Diante desses fatos sugere-se que o projeto de recarga artificial seja aplicado nos lotes destinados aos prédios institucionais da cidade, tais como o fórum, a delegacia e a escola. Trata-se de lotes com áreas livres (não-edificadas) suficientes para que sejam instalados os equipamentos necessários. Áreas verdes como canteiros centrais e áreas destinadas a arborização também podem ser utilizadas para este fim.

Cadamuro (2002) desenvolveu projeto de recarga artificial voltada para a realidade geológica e climatológica do Distrito Federal, as quais são compatíveis com as características físicas da zona vadosa do aquífero de São Sebastião.

O referido estudo comprovou que sistemas indiretos de recarga, baseados em caixas de infiltração instaladas no solo, apresentam alta eficiência e baixo custo. Trata-se de caixa de infiltração sem revestimento, preenchida por seixos de quartzo que recebe água de precipitação pluviométrica captada por calhas instaladas nos telhados/coberturas de edificações e direcionadas para essas caixas. Cumpre esclarecer que essa água apresenta, no geral, boa qualidade, haja vista sua restrita permanência na superfície, redundando em baixa exposição e contato com agentes contaminantes, o que praticamente elimina a possibilidade de contaminação do aquífero.

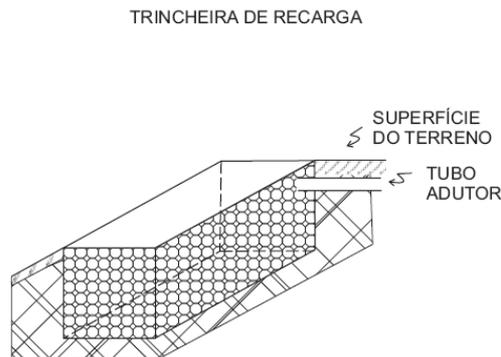
Dois sistemas devem ser considerados: caixa de recarga e trincheira de recarga (Figura 5.1 e Figura 5.2). O primeiro caso deve ser aplicado em locais onde a área destinada a sua instalação seja restrita. Assim a infiltração se dá de forma predominantemente vertical. Este sistema deve ser mantido a pelo menos 3 metros de distância de edificações ou de fundações de obras civis.

O sistema de trincheira de recarga deve ser instalado em locais onde a área disponível seja maior, como pátios de colégios, canteiros centrais das avenidas principais ou áreas periféricas da cidade que não deverão ser ocupadas.



- \* TUBO ADUTOR DE CALHAS: 50 A 100 mm
- \* PREENCHIMENTO: CASCALHO LAVADO MÉDIO A GROSSO POROSIDADE TOTAL 30 A 40%
- \* TAMPONAMENTO: *BIDIN* + ATERRO OU LAJE DE CONCRETO
- \* SEM REVESTIMENTO
- \* APLICÁVEL PARA LOCAIS COM NÍVEL FREÁTICO MAIOR QUE 3,0 METROS

**Figura 5.1** - Sistema de recarga artificial proposto para locais em que ocorrem latossolos e outros solos permeáveis com área restrita para implantação do sistema de indução da infiltração (adaptado de Cadamuro, 2002 e Cadamuro *et al.* 2002).



- \* PREENCHIMENTO: CASCALHO LAVADO
- \* SEM REVESTIMENTO
- \* TAMPONAMENTO: LAJE DE CONCRETO OU GRADE METÁLICA
- \* DIMENSÕES: 50 A 80 cm DE PROFUNDIDADE X 50 cm DE LARGURA X 200 a 300 cm DE COMPRIMENTO
- \* APLICÁVEL PARA LOCAIS COM NÍVEL FREÁTICO MÁXIMO MENOR QUE 3,0 METROS

**Figura 5.2** - Sistema de recarga artificial proposto para locais em que ocorrem solos permeáveis e maior área para se induzir a infiltração.

A adoção dessa medida contribuiria significativamente para mitigar os efeitos da intensa impermeabilização das áreas de recarga direta local e regional sobre o aquífero que abastece a cidade de São Sebastião. Essa medida é fundamental para a estabilização e/ou recuperação do rebaixamento local do nível da água, o que garantiria a auto-sustentabilidade do sistema aquífero em questão.

### **5.2.2. Proteção das Áreas Verdes**

Conforme descrito no capítulo 3, as áreas verdes de formato circular que ocorrem, principalmente, às margens do córrego Mato Grande, correspondem à paleodolinas. Trata-se de antigas lentes de calcário que sofreram dolinamento; estas, por sua vez, evoluíram para lagoas, que foram posteriormente ocupadas por vegetação densa que Joko (2002) classifica como floresta perenifólia de várzea. Essas áreas, devido às suas características físicas, apresentam alta condutividade hidráulica capazes de transmitir importantes volumes de água para os aquíferos subjacentes. Essas áreas representam as poligonais mais importantes para o abastecimento de São Sebastião sob o ponto de vista da recarga do aquífero físsuro-cárstico.

Contudo, a continuidade desse processo depende fortemente da manutenção do equilíbrio da dinâmica desse ambiente. Para tanto se faz necessária a preservação de todos os elementos que permitem que esse processo se desenvolva: o solo, a vegetação, a altura do nível freático, a topografia e o fluxo anual de água do escoamento superficial.

Há registros de esforços do governo local, por meio de seus órgãos e agentes, de evitar a ocupação destas áreas por edificações, tendo em vista o eminente risco geotécnico que essas áreas oferecem. Risco esse comum à classe de solo desenvolvida naquelas áreas, os gleissolos. Todavia, as margens do córrego Mato Grande já estão ocupadas em alguns pontos e já se verifica a ocorrência de desmatamentos e, conseqüentemente, exposição do solo o que dificulta a infiltração. Vale registrar que essas iniciativas visaram exclusivamente a proteção da população de problemas relacionados a desmoronamentos, sem, no entanto, desconsiderar a repercussão positiva para a recarga local dos aquíferos.

A fim de se evitar que esse quadro evolua e que a recarga local seja afetada, sugere-se que as margens do córrego Mato Grande, que compreendem toda a área que era originalmente vegetada, seja cercada. Desse modo, pretende-se coibir a ocupação e a degradação dos solos e da vegetação que são elementos cruciais para a manutenção da dinâmica da recarga dos aquíferos subjacentes sob o risco de escassez da água. A mesma ação deve ser aplicada às áreas em que a floresta perenifólia de várzea ocorrem foram da APP do córrego Mato Grande.

Para que essa medida tenha maior efetividade, sugere-se a implantação de uma Unidade de Conservação que contivesse a APP (Área de Preservação Permanente) do córrego Mato Grande, porém, que extrapole a concepção estrita para essa unidade. O SNUC (Sistema Nacional de Unidades de Conservação) prevê a criação de unidades de conservação voltadas exclusivamente para a preservação e/ou recuperação dos recursos hídricos, quer superficiais, quer subterrâneos. Diante disso, seria possível a criação de uma “Unidade de Proteção das Áreas de Recarga do Aquífero de São Sebastião”, por exemplo, que preservaria tanto o manancial subterrâneo quanto o manancial superficial, em termos quantitativos e qualitativos, atendendo inclusive o preceito da gestão integrada das águas.

### **5.2.3. Controle das Taxas de Bombeamento**

A demanda por água em São Sebastião cresceu substancialmente na última década. Tal fato exigiu que a oferta de água aumentasse no mesmo ritmo visando a suprir as novas exigências. Contudo, o aumento da oferta, devido à urgência da situação, não foi precedido por estudos técnicos que comprovassem a viabilidade desse crescimento na exploração.

É sabido que a sustentabilidade da exploração de um aquífero pressupõe a observação do balanço entre recarga e descarga, entendendo a descarga, nesse caso, como a retirada da água do aquífero por meio de poços produtores. Para tanto, sugere-se que sejam estritamente observadas e praticadas as informações técnicas obtidas por meio dos ensaios de bombeamento de cada poço (vazão ótima, rebaixamento máximo disponível, nível dinâmico e profundidade da bomba). Desse modo, estarão sendo respeitados os limites hidráulicos de cada captação, uma vez que o bombeamento além desses limites implica na exaustão do aquífero.

O monitoramento da exploração da água subterrânea é importante para a racionalização de seu uso, uma vez que agrega informações sobre a eficiência dos sistemas de gestão propostos, bem como de outros que por ventura possam ser implantados, conjugando os dados dos sistemas hidrogeológicos local e regional.

Aplicar estritamente as regras de exploração determinadas nos documentos de outorgas emitidos pelo órgão gestor, neste caso a ADASA (Agência Distrital de Águas e Saneamento) é outra ação importante para evitar danos aos aquíferos. Em sua avaliação para emissão da outorga a ADASA verifica o potencial de recarga, os dados de ensaios de bombeamento e determinada a vazão máxima de bombeamento de cada poço e o tempo máximo diário de bombeamento (que varia de 12 a 20 horas). Como tais exigências são feitas sob rigorosa base técnica, o respeito a estas limitações deverá resultar na preservação dos aquíferos.

#### **5.2.4. Ampliação da Rede de Tratamento de Esgotos**

A qualidade da água é elemento imprescindível para a gestão dos mananciais subterrâneos. Mesmo que haja disponibilidade de água em termos quantitativos, se a qualidade dessa água está comprometida a sua captação fica inviabilizada para o abastecimento humano, principalmente para sistemas públicos de grandes populações.

Inúmeras são as interferências capazes de comprometer a qualidade da água subterrânea. No caso de São Sebastião esse problema se restringe à contaminação por saneamento *in situ*, visto tratar-se de cidade com ocupação estritamente residencial, de modo que a contaminação esperada pelos esgotos domésticos deverá resultar no aumento progressivo de nitrato, fosfato, sódio e cloreto em suas águas.

Segundo dados da CAESB, 80% das residências da cidade são atendidas pela rede coletora de esgotos. Porém, essa rede só começou a ser instalada no ano de 2002 de modo que até então o esgotamento sanitário da cidade era feito por meio de fossas negras ou por sistema de fossa-sumidouro. Atualmente, é possível que quase a totalidade dessas fossas estejam inativas. Contudo, mesmo nessa situação, reações químicas e biológicas continuam ocorrendo no interior desses sistemas devido à circulação da água da chuva e à própria atividade do solo. Assim, os poluentes mais persistentes vão sendo liberados e transportados ao longo de anos na água subterrânea, contaminando-a.

Para mitigar e até mesmo eliminar essa influência faz-se necessário o levantamento das fossas negras e sépticas, ativas ou não, dentro do perímetro da cidade e a sua conseguinte neutralização utilizando procedimento técnico recomendado. Somando-se a isso, recomenda-se que a rede coletora de esgotos atenda a toda a cidade.

A recarga artificial de aquíferos é uma medida auxiliar que tem se mostrado eficiente nesses casos, já que a injeção de água de melhor qualidade no aquífero, muitas vezes a uma taxa de infiltração superior àquela encontrada naturalmente, dilui contaminantes persistentes.

#### **5.2.5. Refinamento dos Estudos de Recarga e Reserva Hídrica**

A efetividade de um sistema de gestão de recursos hídricos subterrâneos depende do conhecimento aprofundado da estrutura física do aquífero e de sua dinâmica. No caso de São Sebastião, estudos básicos já foram realizados e muitos dados vêm sendo gerados, em especial, pela concessionária de serviços de saneamento local, a CAESB, por meio dos seus programas de monitoramento qualitativo e quantitativo.

Diante disso, para o refinamento do conhecimento a respeito da área e, por conseguinte, do processo de gestão faz-se necessária a realização de estudos de quantificação de recarga, bem como da reserva hídrica dos aquíferos explorados, por meio de métodos hidráulicos (balanço hídrico e variação do nível da água do aquífero) e de modelagem matemática. A esses estudos podem se somar estudos e mapeamentos de vulnerabilidade de aquíferos, bem como

de risco de contaminação, a fim de se estabelecer critérios para a ocupação das áreas que influenciam a recarga do aquífero.

Com relação à disponibilidade hídrica ou reserva explotável pode-se apresentar um dado considerado uma aproximação, mas que deve ser usado como referência para o sistema de São Sebastião.

Para a estimativa da reserva explotável foi aplicada a clássica equação que considera a renovação anual no sistema escrita como  $R_r = A \times \Delta h \times \eta_e$  onde  $R_r$  é a reserva renovável ou disponibilidade anual (em  $m^3/\text{ano}$  ou  $l/s$ );  $A$  é a área do sistema (em  $m^2$  ou hectare);  $\Delta h$  é a variação anual do nível d'água natural (em metro) e  $\eta_e$  é a porosidade eficaz ou porosidade efetiva (adimensional).

Para o caso em estudo foram considerados os seguintes dados:  $A = 25 \text{ km}^2$  o que representa um polígono regular com 5 km de lado (aproximadamente a poligonal em que a cidade está distribuída e as áreas adjacentes);  $\Delta h = 1$  metro (dado obtido do monitoramento do poço SS-14, situado à distância mínima de 500 metros da bateria de poços produtores) e  $\eta_e = 0,15$  (15%, o que é coerente com a média dos aquíferos locais, intergranular e físsuro-cárstico).

A aplicação da equação resulta em um valor de disponibilidade de 119  $l/s$ . Considerando que a estimativa esteja correta e que a produção média atual é da ordem de 173  $l/s$  é necessário que ocorra recarga adicional para a manutenção do equilíbrio. Assim, pode-se afirmar que como não há sobreexplotação, pelo menos 50  $l/s$  devem ser adicionados ao sistema a partir da recarga direta regional que se processa na porção de terreno plano e elevado situado a oeste da cidade de São Sebastião (Chapada de Brasília).

### **5.2.6. Limitação da Ocupação das Áreas de Recarga**

A partir dos dados levantados no presente trabalho de pesquisa, confirmou-se o potencial das áreas elevadas, representadas pelo Compartimento Geomorfológico Planos Elevados (áreas com cotas superiores aos 1.100 metros), para a recarga do aquífero físsuro-cárstico posicionado no Compartimento de Vales Dissecados, onde esta assentada a cidade de São Sebastião. Verificou-se ainda que a principal contribuição para a recarga do referido aquífero é aquela de fluxo local. Contudo, a contribuição do fluxo regional, derivado dos Planos Elevados, não é desprezível, desempenhando importante papel na alimentação do aquífero de São Sebastião.

No entanto, a crescente taxa de impermeabilização dessas áreas, em especial onde está sendo instalado o bairro Jardins Mangueiral, poderá comprometer a recarga do aquífero de São Sebastião. Tendo em vista que o bairro já se encontra instalado, pouco pode ser feito para impedir o avanço da impermeabilização nessa porção, em específico. Porém, sugere-se que sejam adotadas medidas preventivas para que a área situada entre o referido bairro e o Complexo Penitenciário da Papuda não seja ocupada.

Para a efetivação dessa proteção também poderia ser definida para esta área, bem como para outras julgadas pertinentes, uma unidade de conservação ligada à proteção da recarga do aquífero de interesse.

Cumprе esclarecer que o controle da ocupação não deve se restringir apenas a ações e estudos ligados à impermeabilização do solo, mas também à temas ligados ao risco para a qualidade da água subterrânea (vulnerabilidade e risco de contaminação).

### **5.2.7. Monitoramento Sistemático dos Níveis Dinâmicos dos Poços em Operação**

Com o incremento da ocupação da área urbana e aumento da necessidade de bombeamento dos poços tubulares, tornou-se inviável a medição sistemática dos níveis estáticos (NEs) dos poços em operação. Para que a medida fosse feita seria necessário o

desligamento simultâneo de todos os poços em operação por períodos muito longos, implicando no desabastecimento da população atendida. Como essa medida não é exequível, haja vista as implicações previstas sugere-se o monitoramento sistemático dos níveis dinâmicos de todos os poços em operação, esclarecendo que a definição da periodicidade da medição depende de estudos específicos, além da instalação de mais piezômetros.

O monitoramento dos níveis dinâmicos (NDs) associado ao controle da produção de água oferece informações a respeito do nível de exploração do aquífero. Ressaltando que essas medições devem ser realizadas obedecendo sempre às mesmas condições de bombeamento, principalmente em relação ao período do dia no qual foi feita a medição (maior ou menor consumo). A partir dos dados levantados é possível identificar indícios de sobreexploração do aquífero e até mesmo de interferência entre poços em operação.

Inicialmente o sistema de medição pode ser implantado a partir de medição manual periódica, mas com o tempo uma rede de medição automática com uso de transdutores de pressão é considerado mais adequado.

### **5.2.8. Manutenção Preventiva em Equipamentos**

A manutenção preventiva dos poços melhora todo o sistema de abastecimento com uso de água subterrânea. Ao mesmo tempo em que dá maior garantia ao sistema, reduz as perdas uso e o risco de descontinuidade no fornecimento de água, além de diminuir custos com troca de equipamentos e redução no período de inatividade dos poços, muitas vezes necessários para reparos devido à problemas não detectados com antecedência.

Para tanto, soluções simples ligadas à variações de energia elétrica, tais como sobrecorrente ou elevação da amperagem, podem indicar, por exemplo, acúmulo de areia na bomba ou desgaste de suas peças. Assim, observações dessa natureza podem auxiliar na redução de problemas de solução mais onerosa e demorada. Igualmente, é preciso considerar a necessidade de realizar serviços de manutenção (regulagem da bomba, por exemplo) e limpeza nos poços periodicamente garantindo a qualidade da água, dos equipamentos, revestimentos e filtros utilizados.

Além da manutenção do sistema poço-bomba, cuidados permanentes com o quadro de controle de energia, tubulação e reservatório são iniciativas que em longo prazo minimizam custos e aumentam a funcionalidade do sistema de abastecimento.

Perroni (2005) sugere medidas para minimizar o consumo de energia e melhorar o sistema para a região de São Carlos, SP, as quais incluem: adequação tarifária; alteração da tensão de alimentação; desativação das instalações não utilizadas; correção do fator de potência e melhoria do fator de carga, que pode ser obtida através de alterações do sistema operacional, buscando a minimização do funcionamento em horários de ponta e a otimização da operação com base em custos.

### **5.2.9. Sistemas Operação com Uso de Mananciais Mistos - Superficiais e Subterrâneos**

Considerando a função reguladora dos aquíferos (transmissão lenta das águas armazenadas nos aquíferos para os mananciais superficiais nos períodos de estiagem, garantindo-lhes a perenidade), sugere-se a utilização dos recursos hídricos subterrâneos durante os meses de seca e dos mananciais superficiais durante a estação chuvosa, quando se registra um superávit hídrico superficial.

Ressalta-se que, visando garantir sustentabilidade ao sistema e, portanto, ao abastecimento, a alternância entre os tipos de fonte (superficial e subterrânea) não deveria ser de 100%. Sugere-se uma contribuição variável de cada manancial de acordo com o período climático considerado, isto é, no período de estiagem, a contribuição maior viria da água

subterrânea e, apenas um complemento seria oriundo dos corpos hídricos superficiais. Durante o período chuvoso essa situação deveria ser invertida. Obviamente, os percentuais de contribuição de cada manancial devem ser definidos a partir de suas disponibilidades.

### **5.2.10. Segurança e Proteção dos Poços**

Diversas iniciativas deverão ser implementadas pelos operadores do sistema para ampliar a segurança do sistema de abastecimento, incluindo a definição dos perímetros de proteção dos poços - PPP, com a respectiva determinação de usos proibidos nos diferentes raios dos poços.

A definição do PPP para as captações deve contemplar uma área com alambrado de no mínimo 100 m<sup>2</sup>, onde são mantidos pátios para manutenção e inspeção dos poços. O uso de sistemas de vigilância remota com auxílio de câmaras de vídeo pode ser uma alternativa de proteção aos casos comuns de depredação e furtos de equipamentos, especialmente para os poços situados em áreas mais distantes.

Análises físico-químicas e bacteriológicas bimestrais em amostras de água dos poços devem enfatizar principalmente: coliformes totais e fecais, além de amônia, nitrato, nitrito, fosfato e turbidez. Estas amostras devem ser retiradas na saída dos poços, antes, portanto da água ser submetida aos sistemas obrigatórios de tratamento (ex. cloração). Análises realizadas com menor periodicidade, em contraste com a amostragem anual atualmente realizada, podem mostrar eventuais variabilidades sazonais da qualidade da água do aquífero.

## **5.3. Implantação das Ações Propostas**

As ações enumeradas devem ser implantadas em diferentes estágios, sendo denominadas, pelo presente estudo, de emergenciais, permanentes e gradativas.

### Medidas Emergenciais

As medidas emergenciais devem ter caráter prioritário e sua viabilização deve ser iniciada imediatamente. Estas ações compreendem:

- Adequação das instalações dos poços de forma a viabilizar o monitoramento integral da operação, com medidas precisas de vazão, nível da água no poço (nível dinâmico sob a mesma condição de exploração) e pressão na saída;
- Dentro da possibilidade da demanda, evitar o bombeamento no período de ponta de consumo de energia (de 18:00 as 22:00h). Neste sentido, um acordo com a Companhia de Energia para diminuição da tarifa pode minimizar custos operacionais;
- Aquisição de todas as áreas com cobertura de matas situadas no interior e adjacências da área urbana. Estas áreas devem ser transformadas em unidades de conservação ambiental de alta restrição. Além da função ambiental na sua definição estas áreas devem ser consideradas como área de proteção de manancial subterrâneo (APMS). As áreas devem cercadas para evitar acesso de pessoas e inclusive de animais domésticos.

### Ações Permanentes

Dentre as ações consideradas de forma contínua destacam-se:

- Uso do sistema misto de abastecimento - esta ação é simples de ser viabilizada, pois a região dos condomínios do Jardim Botânico já está integrada ao sistema de abastecimento por mananciais superficiais do Torto/Santa Maria. Como no período das chuvas as vazões são ampliadas em função do aumento do fluxo de base e do

escoamento superficial há um grande excedente que pode ser usado no abastecimento de São Sebastião. Mesmo que seja aplicado por apenas 3 ou 4 meses ao ano esta ação é muito importante, pois neste período os níveis do aquífero podem se recuperados de eventuais pressões de exploração que foram necessárias no período seco anterior;

- Recarga artificial de aquíferos - para que esta técnica seja aplicada será necessária a elaboração de projeto executivo detalhado que contemple, no mínimo: a altura máxima do nível freático na área escolhida; a determinação da existência ou não de camada confinante e, em caso positivo, sua espessura e área; dimensionamento das caixas de infiltração, calhas e tubos condutores subterrâneos; a proteção da área onde estarão instaladas as caixas de infiltração; além de um plano de avaliação do projeto. Este plano, por sua vez, deve conter, no mínimo: monitoramento mensal das variações dos níveis estáticos das superfícies potenciométricas do aquífero freático e do aquífero fissuro-cárstico; programa de manutenção periódica das caixas de recarga (limpeza e desobstrução); e instalação de estação meteorológica (pluviômetro, termômetro e evaporímetro) na área das unidades hidrográficas do córrego Mato Grande e do ribeirão Santo Antônio da Papuda dando suporte a estudos baseados em balanço hídrico;
- Limitação da ocupação das áreas de recarga - sugere-se que, para proteção, no que tange a urbanização, das áreas situadas nos Planos Elevados que ainda não foram ocupadas e que estão posicionadas a oeste de São Sebastião, seja elaborado minuta de projeto da criação de “*Unidade de Proteção das Áreas de Recarga do Aquífero de São Sebastião*”, à semelhança das APMs (Áreas de Proteção de Mananciais) delimitadas para corpos hídricos superficiais. O projeto deverá ser claro quanto à necessidade de vetar a ocupação dessas áreas no entorno de São Sebastião sob o risco de comprometimento da qualidade e quantidade da água que a abastece;
- Manutenção preventiva em equipamentos - para a implantação dessa medida sugere-se estabelecer um cronograma de visitas periódicas aos poços para realização de limpezas e troca de peças, quando apresentarem sinal de desgaste, além da verificação diária do sistema de energia elétrica visando a observar alterações no funcionamento regular do sistema. Em caso de alterações significativas, acionar imediatamente equipe para realização de reparos.

As medidas gradativas compreendem:

- Ampliação da rede de esgotos e neutralização de antigas fossas e sumidouros - sugere-se empreender levantamento de campo para localização das fossas/sumidouros, efetuar o cadastro desses sistemas (fotos, coordenadas) e, se se julgar necessário, poderão ser empregadas técnicas geofísicas, tais como o GPR (*Ground Penetrating Radar*), para a sua localização precisa. Tendo sido feita a identificação e o cadastro, todo o material contido no sistema deverá ser removido, ou seja, a fossa/sumidouro deverá ser esgotada, e em seguida deverá ser preenchida com material de baixa condutividade hidráulica como, por exemplo, *pelets* de argilas (bentonítica ou montmorilónica). Com relação à rede de coleta e o sistema de tratamento de esgotos, considerando que todo o seu processo de implantação depende de recursos dos governos distrital e federal e, muitas vezes, de investimentos externos, sugere-se que o sistema de coleta e tratamento de esgotos de São Sebastião conste como prioridade no recebimento de recursos.
- Controle das taxas de bombeamento - para a haja efetividade nessa medida recomenda-se a instalação de horímetros e pressostato em todos os poços, progressivamente e que, para que os períodos de horas outorgados não sejam ultrapassados, os poços funcionem em regime de revezamento com sobreposição de intervalos para que não haja desabastecimento.

- Refinamento de estudos de recarga e reserva hídrica - estudos para detalhamento de mecanismos de recarga, bem como para estimar a reserva hídrica, devem ser realizados no âmbito da própria companhia de serviços de saneamento, a CAESB, e por meio de acordos com a Universidade de Brasília e outras instituições de ensino e pesquisa.
- Segurança e proteção de poços - para a proteção e a segurança efetivas dos poços faz-se necessário: a realização de estudos de vulnerabilidade de aquífero, redundando na geração de um mapa; a delimitação das Áreas de Proteção da Fonte obedecendo aos conceitos de atenuação e tempo de trânsito por dia; o cadastro da carga contaminante por meio das características de cada tipo de contaminante, sua ocorrência espacial e temporal e classificação delas como difusas e pontuais; e, por fim, a avaliação e o controle das cargas contaminantes/poluentes por meio de monitoramento da qualidade entre outros instrumentos.

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A partir da análise dos dados levantados durante as diversas etapas desta pesquisa foi possível alcançar os seguintes resultados e conclusões:

- As análises isotópicas  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta\text{D}$  realizadas em amostras de água subterrânea coletadas em 12 poços tubulares profundos produtivos, situados em contextos geoambientais distintos, mostraram que a origem da recarga da água subterrânea na região de São Sebastião/DF é meteórica, com influência da baixa umidade do ar e dos efeitos da evaporação da chuva antes de esta atingir o solo. A clara diferenciação entre o sinal isotópico de um e outro compartimento mostra que apesar da origem da água ser a mesma que a atenuação do sinal da água meteórica se deve à mistura das águas desses compartimentos, revelando, assim, que a região do domínio DG-I (Planos Elevados) contribui para a recarga do domínio DG-II (Vales Dissecados – aquífero de São Sebastião);
- O fluxo oriundo da região do compartimento Planos Elevados (DG-I), ou seja, a Recarga Direta Regional é menos significativa para a recarga do aquífero fissuro-cárstico de São Sebastião do que a Recarga Direta Local;
- Os valores de trítio mais baixos relacionados aos poços posicionados na região dos Vales Dissecados (<0,5 a 0,9 uT) comparativamente àqueles encontrados nos Planos Elevados (1,2 a 1,8 uT) corroboram com a conclusão de que há mistura entre as águas dos dois compartimentos geomorfológicos considerados. Os valores baixos revelam que o aquífero fissuro-cárstico recebe contribuição de recarga de uma fonte distante, por meio de fluxo regional, correspondendo bem ao modelo hidrogeológico proposto;
- O poço VN-01, com valor de 0,9uT, indica que existe recarga a partir de corpos hídricos superficiais influentes;
- O poço SS-13, com valor de 0,5uT, indica que existe recarga a partir das paleodolinas situadas às margens do córrego Mato Grande;
- As áreas de mata de formato elipsoidal situadas especialmente no vale do córrego Mato Grande correspondem à paleodolinas que, devido à sua estrutura física, promovem a alimentação dos aquíferos sotopostos além da rápida circulação da água no aquífero;
- Análises da evolução de teores de nitrato e cloreto nas águas do aquífero fissuro-cárstico de São Sebastião reiteram a importante contribuição de recarga de fluxo local. A evolução dos teores desses compostos na água subterrânea é bastante rápida, sendo possível inclusive observar variações mensais nas concentrações, fenômeno compatível apenas mediante rápida circulação da água no aquífero considerado que somente ocorre por meio de recarga de fluxo local;
- A análise da variação dos níveis da água de dois piezômetros monitorados pela CAESB mostra que o aquífero fissuro-cárstico de São Sebastião não está sob efeitos de superexploração. Verifica-se que o rebaixamento observado no nível d'água do poço piezométrico, SS-09, é reflexo da interferência do cone de depressão do poço SS-08 situado a uma distância aproximada de 190 metros, além da adaptação do aquífero ao regime de exploração e do efeito da sazonalidade climática do Distrito Federal. Esse rebaixamento não é observado no poço de monitoramento identificado como SS-14 e situado a distâncias maiores que 50 metros do raio de influência de outras captações de água subterrânea, corroborando com esta conclusão;
- O abastecimento da cidade de São Sebastião com base nos aquíferos fissuro-cársticos ainda é sustentável do ponto de vista quantitativo. Com relação à questão qualitativa,

pode-se afirmar que apenas localmente ocorrem alterações, sendo que na maior parte da zona de exploração as águas mantêm sua excelente potabilidade natural;

- Para ampliar o aproveitamento da potencialidade do aquífero de São Sebastião, a sua gestão deve incluir, entre outras medidas: a instalação de sistema de recarga artificial em áreas institucionais e canteiros centrais, tendo em vista as peculiaridades urbanísticas da cidade; proteção das áreas verdes, situadas principalmente às margens do córrego Mato Grande, por se tratar das áreas mais importantes para a recarga do aquífero no que concerne o fluxo local; o controle das taxas de bombeamento por meio da utilização das informações obtidas a partir dos dados dos ensaios de bombeamento, entre outras; ampliação da rede coletora e do tratamento de esgotos na cidade evitando a continuidade da contaminação dos aquíferos locais; refinamento dos estudos de recarga e reserva hídrica; limitação da ocupação das áreas de recarga tanto de fluxo regional quanto local; monitoramento sistemático dos níveis dinâmicos dos poços em operação utilizando equipamentos de medição automática; manutenção preventiva de equipamentos por meio da observação de alterações no funcionamento do sistema de fornecimento de energia elétrica e do cumprimento de cronograma de atividade de manutenção; operação mista dos sistemas de águas superficiais e subterrâneas; e, por fim, a segurança dos poços, principalmente, por meio da definição do perímetro de proteção dos poços.

Com vistas a refinar o conhecimento a respeito dos sistemas de fluxo e dos mecanismos de recarga do aquífero de São Sebastião algumas propostas para geração de dados futuros estudos na região são apresentadas:

- Realizar novos estudos utilizando isótopos de oxigênio e hidrogênio para verificar a relação de recarga entre os corpos hídricos superficiais e o aquífero fissuro-cárstico na região.
- Desenvolver estudos utilizando CFCs para a datação das águas e conseqüente determinação da distância entre a área de recarga e o aquífero explorado.
- Realizar estudos de quantificação das recargas local e regional, bem como da reserva hídrica do aquífero fissuro-cárstico.
- Ampliar a rede de monitoramento dos níveis em poços de monitoramento e em poços produtores selecionados.
- Manter estações climatológicas completas na porção elevada da Chapada (áreas de recarga regional) e no interior da cidade (área de recarga local) para se possibilitar a composição de balanços hídricos distintos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Administração Regional de São Sebastião - DF. Disponível em: <http://www.saosebastiao.df.gov.br>. Acessado em 05 nov 2011.
- Allègre, C.J. 2008. *Isotope Geology*. Cambridge University Press – New York. 512p.
- Baptista, G.M.M. 1998. Caracterização Climatológica do Distrito Federal. *In: Inventário hidrogeológico e dos recursos hídricos superficiais do Distrito Federal*. v. I. IEMA/SEMATEC/UnB. p 187-208.
- Cadamuro, A.L.M; Campos, J.E.G. Tröger, U. 2002. Artificial recharge in fractured rocks? An example from the Federal District of Brazil for the sustainability of the system. *Proceedings do 4 Inter. Symp. on Artificial Recharge*. Adelaide, v. 1, p.56 - 60, 2002.
- Cadamuro, A.L.M. 2002. Proposta, avaliação e aplicabilidade de técnicas de recarga artificial em aquíferos fraturados para condomínios residenciais do Distrito Federal. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. 126p.
- CAESB (Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal). Sinopse dos Poços da CAESB em Áreas Urbanas – Ano 2012. Brasília.
- 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. v. IV. IEMA/SEMATEC/UnB. 86p.
- Campos, J.E.G. 2010. Zoneamento Ecológico-Econômico do Distrito Federal. Disponível em: <http://www.zee-df.com.br>. Acessado em 05 de nov 2011.
- Carmelo, A.C. 2002. Caracterização de aquíferos fraturados por integração de informações geológicas e geofísicas. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. 161p.
- Clark, I.D. & Fritz, P. 1997. *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. Lewis Publishers. New York. 328p.
- CODEPLAN (Brasil). Companhia de Planejamento do Distrito Federal. Disponível em: <http://www.codeplan.df.gov.br>. Acessado em 05 de nov 2011.
- Custodio, E. 2002. Aquifer overexplotation: what does it means? *Hydrogeology Journal*, **10**: 254-277.
- Dardenne, M.A. 1978. Zonação tectônica na borda ocidental do Cráton do São Francisco. *In: CONGR. BRAS. GEOC.*, 30. Recife, 1978. Anais..., Recife, SBG. v. 2. p. 299-308.
- DER – DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM / SECRETARIA DE TRANSPORTES. 2009. Brasília: Mapa Rodoviário do Distrito Federal e Entorno, escala 1:162.000.
- EMBRAPA. 2009. Sistema brasileiro de classificação de solos. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 2ª ed. Rio de Janeiro. 412 p.
- 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. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. 199p.
- Fonseca, M.A., Dardenne, M.A. & Uhlein, A. 1995. Faixa Brasília Setor Setentrional: Estilos estruturais e arcabouço tectônico. *Rev. Bras. Geoc.*, **25(4)**: 267-278.

- Freitas-Silva, F.H. & Campos, J.E.G. 1998. Geologia do Distrito Federal. *In: Inventário hidrogeológico e dos recursos hídricos superficiais do Distrito Federal. Parte I. Vol I. IEMA-SEMATEC/Universidade de Brasília.* 85p.
- Freitas-Silva, F.H. & Dardenne, M.A. 1994. Proposta de subdivisão estratigráfica formal para o Grupo Canastra no oeste de Minas Gerais e leste de Goiás. *Anais...*, 4º Simp. Geol. Do Centro-Oeste, Goiânia, SBG. p. 161-163.
- Fuck, R.A. 1994. A Faixa Brasília e a compartimentação tectônica na Província Tocantins. *In: SIMP. GEOL. CENTRO-OESTE*, 4, Brasília, 1994. *Anais...*, Brasília, SBG-CO/DF. p.184-187.
- Gat, J.R. 1996. Oxygen and Hydrogen Isotopes in Hydrologic Cycle. *Annu. Rev. Earth Planet Sci.*, **24**:225-262.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. 2008. Pesquisa Nacional de Saneamento Básico. Rio de Janeiro. 219p. Disponível em: [http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaoodevida/pnsb2008/PNSB\\_2008.pdf](http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaoodevida/pnsb2008/PNSB_2008.pdf). Acessado em 18 abril 2012.
- Joko, C.T. 2002. Hidrogeologia da região de São Sebastião – DF: implicações para a gestão do sistema de abastecimento de água. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. 158p.
- Lousada, E.O. & Campos, J.E.G. 2011. Estudos isotópicos em águas subterrâneas do Distrito Federal: subsídios ao modelo conceitual de fluxo. *Rev. Bras. Geoc.*, **41(2)**: 355-365.
- Lousada, E.O. 2005. Estudos hidrogeológicos e isotópicos no Distrito Federal: Modelos conceituais de fluxo. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. 124p.
- Maldaner C.H. 2010. Recarga de aquífero em área urbana: estudo de caso de Urânia (SP). Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 95p.
- 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. Brasília. IEMA/ SEMATEC/UnB. Vol. 1, Parte II.* 53p.
- Novaes Pinto, M. 1994. Caracterização geomorfológica do Distrito Federal. *In: Cerrado: caracterização, ocupação e perspectivas.* Novaes Pinto, M. (org.). 2ª ed. Editora Unb. p. 511-542.
- Pacheco, W.L. 2012. Águas subterrâneas do Distrito Federal – Efeito de sazonalidade e características associadas aos isótopos de Deutério, Oxigênio e Carbono. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. 129p.
- Pereira, L., Santiago, M.M.F., Mendonça, L.A.R., Frischkorn, H., Lima, J.O.G., Filho, J.M. 2004. Medidas Hidroquímicas e Isotópicas em Águas Subterrâneas que abastecem o município de São Luís – Maranhão. *Revista de Águas Subterrâneas*, nº 18. pp.103 a 119.
- Perroni, J.C.A. 2005. Avaliação do consumo de energia elétrica para produção de água subterrânea: o caso do abastecimento público da cidade de São Carlos-SP. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 129p.
- Ramos, R. da C.P. 2006. Caracterização paleoceanográfica do testemunho JPC-95, margem continental Sul Brasileira, com base em foraminíferos planctônicos e isótopos estáveis de oxigênio. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense. 79p.
- Rebouças, A.C. 2008. Importância da Água Subterrânea. *In: Hidrogeologia – Conceitos e Aplicações.* Fernando A.C. Feitosa (org.). 3ª ed. CPRM. p.20-22.

- Rebouças, A.C.; Braga, B.; Tundisi, J.G. 2002. Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação. 2 ed. São Paulo: Escrituras Editora, 703 p.
- Santiago, M.M.F., Frischkorn, H., Silva, C.M.S.V. 2008. Métodos Isotópicos. *In*: Hidrogeologia - Conceitos e Aplicações. Fernando A.C. Feitosa (org.). 3 ed. CPRM. p. 257-273.
- Souza, M.T. 2001. Fundamentos para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos no Distrito Federal. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. 124p.
- Valladares, G.S., Gomes, E.G., Mello, J.C.C.B.S. de, Pereira, M.G., Anjos, L.H.C. dos. 2005. Aplicação de Métodos Multicritério Ordinais para Avaliar o Risco de Subsidência de Organossolos. Disponível em:[http://www.cnpm.embrapa.br/publica/download/newsdownload/artigosresumos%20anais%20eventos/apc\\_1ceiognp05\\_aplica\\_gusta.pdf](http://www.cnpm.embrapa.br/publica/download/newsdownload/artigosresumos%20anais%20eventos/apc_1ceiognp05_aplica_gusta.pdf). Acessado em 20 fev 2012.
- Villar, P.C. 2008. Gestão das áreas de recarga do Aquífero Guarani: o caso do município de Ribeirão Preto, São Paulo. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambiental, Universidade de São Paulo. 184p.
- Xavier, T.O. 2010. Registro neotectônicos no Distrito Federal: implicações para o condicionamento dos recursos hídricos subterrâneos. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. 106p.