

ANÁLISE DA SUSTENTABILIDADE DA EXPLOTAÇÃO DO AQUIFERO FÍSSURO-CÁRSTICO DA REGIÃO DE SÃO SEBASTIÃO, DISTRITO FEDERAL

EXPLOITATION SUSTAINABILITY ANALYSIS OF THE FISSURE-KARSTIC AQUIFER IN THE SÃO SEBASTIÃO REGION, FEDERAL DISTRICT

Drielly Souza RODRIGUES¹, José Eloi Guimarães CAMPOS¹, Michelle Mota de SOUZA²

¹Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. Câmpus Darcy Ribeiro, Asa Norte. SAIN Setor de Áreas Isoladas Norte. Brasília –DF. E-mails: driellysrodrigues@gmail.com; eloi@unb.br

²Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal. Área Especial ETA RA-I. Brasília -DF. E-mail: mixelsmota@gmail.com

Introdução
Sobreexploração
Material e métodos
Síntese sobre o meio físico local
Apresentação de dados
Discussão
Conclusões
Referências

RESUMO - A pesquisa aplicou dados de dois poços de monitoramento de níveis potenciométricos na cidade de São Sebastião, Distrito Federal, que contém uma bateria de 20 poços de produção para abastecimento público por um período maior que 20 anos. Os resultados mostram que as flutuações dos níveis demonstram variabilidade interanual, em função das demandas de bombeamento e mudanças nos padrões das chuvas e, conseqüentemente, da recarga anual. O Poço SS09 apresentou níveis variáveis entre 2 e 6 metros no mês de máxima recarga (abril) e níveis mais baixos, variáveis entre 8 e 14 metros nos meses mais secos do ano (agosto e setembro). O Poço SS14 mostrou menores flutuações, sendo que em todo o período monitorado houve variação extrema entre 2 e 3,75 metros, e na maior parte do tempo, os níveis se mantêm entre 2 e 3 metros. A conclusão das avaliações é de que o aquífero físsuro-cárstico local ainda não está em regime de sobreexploração, mesmo sendo o principal manancial de abastecimento de uma população de cerca de 120.000 pessoas. Os contrastes entre os anos de monitoramento podem indicar que o aquífero esteja sob pressão de exploração e que o equilíbrio dinâmico pode ser rompido. Para evitar problemas futuros no abastecimento, sugere-se a adoção de ações de gestão que englobam: inclusão de manancial superficial para substituir parte da demanda do aquífero, desenvolvimento de projetos de recarga gerenciada de aquíferos, manutenção de áreas verdes (para favorecer a recarga) e ampliação do sistema de monitoramento, inclusive com sistemas de medição automáticos.

Palavras-chave: Sobreexploração. Gestão de aquíferos. Monitoramento piezométrico.

ABSTRACT - The research applied data from two monitoring wells, measuring potentiometric levels in the city of São Sebastião, Distrito Federal, within several production wells for public supply for a period longer than 20 years. The results show that the levels fluctuations show annual variability as a function of pumping demands and changes in rainfall patterns and consequently of the annual recharge. Well SS09 presented levels ranging from 2 to 6 meters in the month of maximum recharge (April) and lower levels, ranging from 8 to 14 meters in the driest months of the year (August and September). Well SS14 showed smaller fluctuations, and throughout the monitored period, there was extreme variation between 2 and 3,75 meters, and most of the time the levels remain between 2 and 3 meters. The conclusion of the evaluations is that the local fissure-karstic aquifer is not in overexploitation regime yet, even though it is the main supplying source for a population about 120.000 people. The contrasts in the monitoring years may indicate that the aquifer is under exploitation pressure and that the dynamic equilibrium may be disrupted. To avoid future supplying problems, it is suggested the adoption of management practices including: inclusion of surface water source to replace part of the aquifer demand, development of managed aquifer recharge projects, maintenance of green areas (to favor recharge) and expansion of the monitoring system, including automatic measurement systems.

Keywords: Overexploitation. Aquifer management. Piezometric monitoring.

INTRODUÇÃO

O crescimento populacional, e a conseqüente ampliação das cidades, é o principal fator responsável pelo desenvolvimento de problemas relacionados aos recursos hídricos subterrâneos. O aumento da demanda por água pode resultar na sobreexploração desse recurso, visto que, o uso das águas dos aquíferos tem crescido em taxas maiores que as observadas em captações de fontes superficiais (Carr et al., 2012; Brown et al., 2015; Rodell et al., 2018; Elshall et al., 2020).

Para preservar o reservatório subterrâneo, minimizar o risco de contaminação e evitar sua sobreexploração, é necessário o conhecimento teórico e aplicado referente aos tipos de aquíferos, integrado a práticas de gestão para que o sistema seja, de fato, sustentável (Rodrigues et al., 2023). Sendo assim, a água subterrânea pode ser utilizada como um recurso natural estratégico para reforçar a disponibilidade hídrica nos períodos de seca em pequenos centros urbanos e núcleos

rurais, como é o caso de São Sebastião, que é a única cidade no Distrito Federal que é majoritariamente abastecida por água subterrânea (Codeplan, 2020).

São Sebastião surgiu como colônia agrícola no final da década de 1950 com a desapropriação de parte das fazendas Taboquinha, Papuda e Cachoeirinha depois que olarias foram instaladas para suprir parte das demandas da construção civil durante a edificação da cidade de Brasília. Posteriormente, essas terras foram arrendadas pela extinta Fundação Zoobotânica do Distrito Federal (PDAD, 2022). Assim, em 1993 por

meio da Lei Distrital nº 467/93 (DF, 1993), a então Colônia Agrícola, foi definida como a Região Administrativa XIV.

O território atual de São Sebastião (Figura 1) ocupa uma área de 26.270,52 hectares com 115.256 mil habitantes (PDAD, 2022), seu acesso pode ser feito pela DF-001 e posteriormente pela DF-463. Está localizado em áreas de cotas mais baixas, relativamente planas e com baixa densidade de drenagens. Está recoberto por uma extensa camada de solos, a maioria representada por latossolos e solos hidromórficos (Freitas-Silva & Campos, 1998).

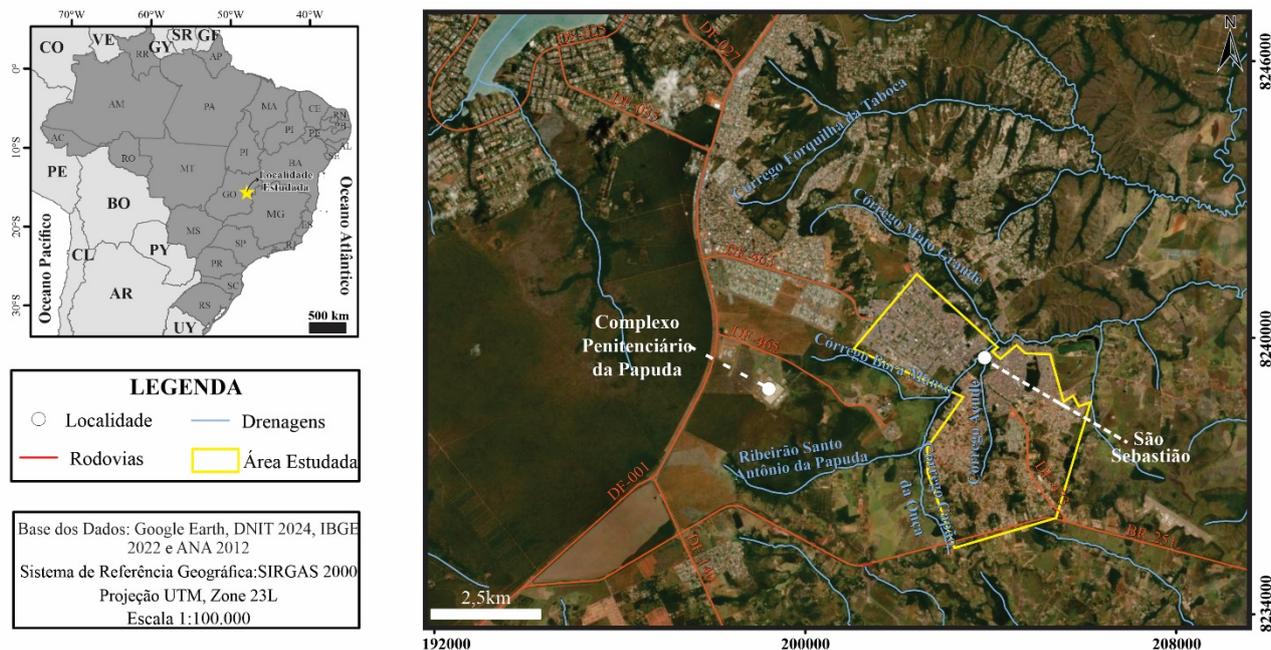


Figura 1. Mapa de localização e acesso à área de estudo. O polígono em destaque rosa representa a área do aquífero físsuro-cárstico responsável pelo abastecimento de São Sebastião, além do Complexo Penitenciário da Papuda (Fonte sistema Google Earth, Imagem de fevereiro de 2024).

A princípio, São Sebastião continha cinco poços tubulares profundos que supriam parte da população com auxílio de caminhões pipas (Araújo, 1998). Em 1997, com o objetivo de sanar os problemas de abastecimento de água originados pelo crescimento abrupto da população, perfurou-se uma bateria de poços e redes de adução e distribuição foram implantadas, sendo colocadas em funcionamento em meados de 1998 (Joko, 2002).

O aquífero responsável pelo abastecimento de São Sebastião é classificado como físsuro-cárstico heterogêneo (Rodrigues et al., 2023), ou seja, é composto, concomitantemente, por porosidade do tipo planar em fraturas (em filitos) e pela dissolução cárstica (em mármore finos). É representado por lentes de rochas carbonáticas da Formação Serra do Landim do Grupo Canastra com restrita continuidade lateral e interdigitadas

vertical e lateralmente com calcifilitos, fengita filitos e quartzo clorita filitos. Rochas pelíticas das formações Serra da Meia Noite, Ribeirão da Contagem e Córrego do Sansão do Grupo Paranoá, ocorrem a oeste, compondo aquíferos exclusivamente fraturados.

A mesma região foi alvo de estudo de eventual sobreexploração em um trabalho acadêmico concluído em 2013, que compreendeu o período de análise entre os anos de 1997 e 2012 (Souza, 2013). A pesquisa concluiu que, até aquela data o aquífero local não estava sob regime de sobreexploração, embora já fosse possível demonstrar que o sistema estava sob pressão de exploração. Como, desde a última avaliação, já se passaram mais de 12 anos de contínuo bombeamento da bateria de poços na região, o presente trabalho pretende completar essa lacuna de conhecimento.

A determinação da eventual sobreexploração

de um aquífero é fundamental para se implantar medidas de contenção de bombeamento ou até

verificação de novos mananciais para evitar o colapso do abastecimento da população.

SOBREXPLOTAÇÃO

Inúmeros métodos podem ser utilizados para a determinação da sobreexploração de aquíferos, incluindo o balanço hídrico climatológico, modelagem matemática, aplicação de sistemas de informações geográficas, uso de dados de monitoramento piezométrico, dentre outros. A seguir são apresentados, de forma sucinta, estudos de casos internacionais que abordam a questão da sobreexploração e propostas de gestão do problema.

Esteller & Diaz-Delgado (2002) trabalharam com o Aquífero do Vale do Toluca no México que é utilizado para abastecimento urbano e para a indústria desde a década de 1940. À medida em que a população aumentou, a demanda por água se intensificou. A sobreexploração resultou em declínio do nível freático, subsidência do terreno, diminuição da vazão dos rios e aumento de vulnerabilidade à poluição. A deterioração da área úmida foi um processo lento e culminou em um grave impacto ambiental com secamento das nascentes, afetou a flora e a fauna, bem como o uso da terra que era aplicada para fins agrícolas. As medidas tomadas até então para mitigar os efeitos da sobreexploração não resultaram na recuperação do aquífero. O estudo atesta que é necessário investir em gestão integrada da bacia hidrográfica, o que inclui reduzir a taxa de bombeamento, desenvolver projetos de recarga artificial, restauração das áreas úmidas, e alternar a exploração da água a partir de poços para outras fontes como água superficial e águas residuais tratadas.

Ibanez et al. (2008) analisaram a extração de águas subterrâneas em Almería no sudeste da Espanha, que surgiu inicialmente a partir de um processo de conflitos entre usuários, ou seja, os agricultores eram proprietários dos poços e bombeavam água sem qualquer acordo com outros agricultores vizinhos. O estudo foi realizado a partir de um modelo dinâmico teórico, a fim de avaliar a sustentabilidade a longo prazo da transformação do bombeamento tradicional para o intensivo. O investimento em sistemas de irrigação eficientes aumentou a produtividade e, conseqüentemente a demanda por água subterrânea. A exploração descontrolada culminou no rebaixamento gradual dos níveis piezométricos e no aumento dos custos de bombeamento. Os autores consideram que o risco à sobreexploração

poderia ser monitorado periodicamente ao acrescentar os dados de poços disponíveis e relação entre hectares irrigados e uso do aquífero. Assim, seria possível deduzir o equilíbrio, que seria interpretado como sobreexploração e quantificar os parâmetros envolvidos para avaliar se as condições se manteriam para casos particulares.

Camp & Walravens (2009) trabalharam com um aquífero na Bélgica, cujo cone de depressão se desenvolveu com rebaixamentos de quase 200 metros e apresenta níveis tão reduzidos na porção central, que o reservatório está secando localmente e a qualidade da água está deteriorando. Foram realizadas simulações de modelos de fluxo que representam todo o histórico de exploração e foi constatado que os níveis de água estão em declínio quase linear desde a década de 1990. Para reverter essa situação os autores afirmam que é obrigatório um plano de gestão e que são necessárias reduções nas taxas de bombeamento. A aplicação dessa proposta de recuperação prevê que, para que haja uma redução de 75% para 25% das presentes taxas de bombeamento no centro do cone de depressão, é necessário elevar os níveis piezométricos do aquífero nos próximos 50 anos.

Molina et al. (2009) propõem uma metodologia para abordar estudos sobre gerenciamento integrado das águas subterrâneas na região de Múrcia na Itália, cuja exploração excede muito a recarga, e as áreas irrigadas têm uma rentabilidade agrária muito elevada. Os resultados setoriais permitem compreender o funcionamento de todo o sistema hídrico, levando em conta os pontos de vista hidrogeológico, socioeconômico, jurídico e outros. A pesquisa revelou que o preço de novas fontes de captação de água tende a ser superior ao custo atual, referente às águas subterrâneas. Ao analisar a perspectiva histórica, os autores consideram que a exploração intensiva possa ser mitigada posteriormente, uma vez que os benefícios obtidos podem ser investidos para recuperar os aquíferos.

Camp et al. (2010) avaliaram o rebaixamento do armazenamento de água subterrânea causado pela sobreexploração de um aquífero no Irã utilizado para irrigação. Por se tratar de uma bacia fechada, o interfluxo lateral neste aquífero é quase ausente e a reposição é limitada à recarga das

chuvas. A fim de avaliar a sobreexploração, indicadores simples derivados de dados meteorológicos, taxas de captação e séries piezométricas temporais foram comparadas com a redução do armazenamento da água subterrânea. A partir do cálculo de balanço da umidade do solo realizado com base em um modelo de fluxo, foi obtido um índice com uma correlação eficiente de quase 1 relativa à diferença entre a recarga do aquífero e a retirada da água subterrânea simulado para o período de 1989 a 2003.

Rodriguez-Estrella (2014) denominou os efeitos negativos da sobreexploração na região de Murta na Espanha em diretos e indiretos. Os diretos incluem a queda contínua dos níveis piezométricos, aumento no custo econômico de captação de água, abandono de poços, alteração dos regimes de fluxo fluviais, compactação do terreno, compartimentação dos aquíferos, secamento das zonas úmidas e nascentes, assim como mudança no estado físico, características químicas e diminuição das reservas hídricas subterrâneas. Dentre os impactos negativos indiretos, tem-se: quebra de oleodutos, deterioração nas estradas, salinização, subsidência e colapso do solo. A fim de reduzir o déficit hídrico, o autor recomendou o uso combinado de águas subterrâneas e superficiais, redistribuição do espaço de instalação dos poços, utilização de águas residuais para irrigação, transferência de águas de aquíferos entre bacias. A aplicação dessas ações tem mitigado os problemas da sobreexploração, a tal ponto que, nos últimos cinco anos os aquíferos Jumilla-Villena, Quibas e Victorias, que são tradicionalmente sobreexplorados, apresentaram estabilização dos níveis piezométricos ou até mesmo elevação.

Chang et al. (2017) demonstraram que a Análise de Componentes Principais (PCA) e o Mapa Auto-Organizado (SOM) com análise de regressão são ferramentas úteis para analisar as mudanças no nível das águas subterrâneas, baseados em registros de longo prazo em grande escala. O modelo computacional desenvolvido foi aplicado na região de Pingtung Plain, sul de Taiwan. A sobreexploração do aquífero foi considerada como uma consequência das interações entre as condições climáticas e hidrogeológicas. Porém, resultou na contaminação, subsidência de terras e, por fim, no esgotamento das águas subterrâneas na região.

Chatterjee et al. (2018) desenvolveram um modelo numérico para analisar possíveis soluções para os recursos hídricos que já estão sobre-

plotados no norte da China. O estudo envolveu a aplicação de técnicas geofísicas avançadas, como eletromagnética, tomografia de resistividade elétrica e sondagem elétrica vertical acoplada a investigações hidrogeológicas convencionais, como perfuração de poços, testes de bombeamento e monitoramento dos aquíferos. Os autores recomendam a implementação de quatro intervenções de gestão simultâneas: regulação da exploração das águas subterrâneas, recarga artificial dos aquíferos, práticas de conservação de água (como a reciclagem e reuso de água) e práticas de gestão de irrigação nas áreas agrícolas. Este último ponto é imprescindível, uma vez que o consumo que a irrigação demanda nos métodos tradicionais de irrigação, as perdas no transporte e na aplicação da água são extensas. Esse consumo pode ser consideravelmente reduzido ao adotar sistemas como irrigação por gotejamento e mini aspersores adequados à condição do solo (argiloso e aluvial) de Baswa-Bandikui, bem como padrões de cultivo apropriados com culturas de maior valor agregado como trigo, mostarda e outras.

Jamali et al. (2020) analisaram as variações espaciais e temporais dos níveis das águas subterrâneas em um perímetro irrigado da Bacia Oum Errabia no Marrocos. Os impactos ambientais observados foram: rebaixamento do nível das águas subterrâneas, redução ou cessação da descarga da nascente e intrusão de água salgada. Os impactos socioeconômicos foram atribuídos à redução na qualidade e na quantidade da água, o que afetou negativamente a saúde pública e diminuiu a produtividade agrícola devido à alta salinidade das águas subterrâneas. Dentre as sugestões para minimizar a sobreexploração destacam-se: alteração do sistema de agricultura para um mais sustentável, uso de energias renováveis, construção de barragens verdes, reservar água da chuva nos períodos chuvosos, e o reflorestamento por plantas que podem suportar maior salinidade e se adaptar ao índice de aridez do ambiente.

Li et al. (2023) desenvolveram um modelo de identificação de sobreexploração de um aquífero utilizado para irrigação na China. A avaliação foi fundamentada no balanço quantitativo e dos efeitos negativos em regiões de regime natural e não natural, de acordo com a dinâmica do reservatório. A metodologia proposta é aplicável apenas a áreas onde os dados de monitoramento das águas subterrâneas de longo prazo são disponíveis. Dessa forma, o polígono de interesse foi

dividido em áreas de baixo, médio e alto risco de sobreexploração e sem sobreexploração. Quanto maior a densidade de distribuição dos pontos de dados de monitoração, melhor a uniformidade dos resultados. Além disso, períodos de monitoramento mais longos naturalmente implicam em cálculos mais precisos, garantindo assim, alta confiabilidade das conclusões. No geral, trata-se de um modelo que oferece aplicações generalizadas. Entretanto, pode ser instrumentalizado por órgãos ambientais para prevenir a subsidência em áreas propensas à sobreexploração, como os grandes perímetros de irrigação.

Mammadova & Negri (2024) identificaram diversos fatores que impulsionam o aumento da captação de água subterrânea em Salento no sudeste da Itália. Dentre eles se destacam: a intensificação das atividades agrícolas e a expansão do turismo. Como consequência foram observados rebaixamentos dos níveis piezométricos e intrusão salina durante décadas. A pesquisa teve como fundamento análises de dados de poços, estudos geológicos e hidrogeológicos, juntamente com avaliações dos padrões de uso da terra, tendências de consumo de água e registros

MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido a partir de um conjunto de dados e verificação de sua consistência incluindo os seguintes passos:

- *Análise da literatura*: este item inclui dados nacionais e internacionais sobre avaliação de sobreexploração e sustentabilidade de exploração de águas subterrâneas, além do enquadramento do aquífero local.

- *Avaliação do histórico de ocupação e demanda hídrica*: elaborada com base em imagens de satélite e dados oficiais de crescimento da população, assim como a verificação dos tipos de usos e a demanda da água.

- *Análise de dados de monitoramento*: desenvolvida com o intuito de avaliar o comportamento

meteorológicos. Os resultados mostraram que os meses mais seco em Salento são durante o verão, o que coincide com o pico da temporada turística. Isso resulta em um aumento da demanda de água durante um período em que a recarga natural do aquífero está em seu nível mais baixo. Neste caso, a gestão sustentável dos recursos hídricos não é apenas um desafio técnico, mas também social, sendo possível a partir da associação de soluções tecnológicas, reformas agrícolas, campanhas de conscientização pública e medidas regulatórias.

Uma vez que modelos de avaliação da sustentabilidade de bombeamento em reservatórios físsuro-cársticos são pouco estudados e desenvolvidos (Rodrigues et al., 2023), este trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento da exploração do aquífero físsuro-cárstico que abastece a cidade de São Sebastião no Distrito Federal. A justificativa da realização deste estudo é decorrente da importância da análise de sustentabilidade da exploração do reservatório para a própria manutenção dos recursos hídricos e para se ampliar a segurança hídrica da população abastecida.

do nível estático dos poços de monitoramento ao longo do tempo, a fim de examinar a resposta ao bombeamento da bateria de poços e assim, possibilitar a análise de sustentabilidade da produção hídrica. Essa ação é indispensável, pois aquíferos físsuro-cársticos heterogêneos são pouco conhecidos e, em função de sua natureza, são bastante sensíveis à exploração (Rodrigues et al., 2023).

- *Integração dos dados*: realizada a fim de verificar a ocorrência ou não de sobreexploração do aquífero físsuro-cárstico que abastece a cidade de São Sebastião no Distrito Federal. Esta etapa também avalia as condições atuais de bombeamento do aquífero local.

SÍNTESE SOBRE O MEIO FÍSICO LOCAL

O clima do Distrito Federal é caracterizado como tropical com alternância de duas estações: inverno seco e verão chuvoso. O período da seca abrange os meses de junho a setembro, enquanto que o chuvoso se prolonga de novembro a maio.

O Distrito Federal é formado por rochas pertencentes aos grupos Paranoá, Canastra, Bambuí e Araxá. Na região estudada os litotipos correspondentes ao Grupo Paranoá são caracterizados pelas seguintes formações, da

base para o topo: Córrego do Barreiro, Córrego do Sansão, Ribeirão Contagem, Serra da Meia Noite, Ribeirão do Torto e Ribeirão Piçarrão (Campos et al., 2013). O Grupo Canastra é composto pelas formações Serra do Landim e Paracatu (Dardenne, 2000).

Na área delimitada pelo aquífero responsável pelo abastecimento de São Sebastião são verificadas as formações Córrego do Sansão, Ribeirão da Contagem e Serra da Meia Noite do Grupo

Paranoá; e a Formação Serra do Landim do Grupo Canastra.

A Formação Córrego do Sansão é constituída essencialmente por metarritmitos argilosos. Essa unidade é encontrada, normalmente, em encostas bordejando a Chapada de Brasília a oeste da área de estudo. Nesta parte as declividades são elevadas e predominam solos rasos como cambissolos e neossolos litólicos.

A Formação Ribeirão da Contagem é representada por quartzitos médios que sustentam a parte superior da Chapada de Brasília com espessas cobertura de Latossolo na parte oeste. A diferença brusca de resistência ao intemperismo desta unidade e suas adjacentes é bem expressa na paisagem por meio de quebras bruscas de relevo.

A Formação Serra da Meia Noite é verificada no extremo oeste nas superfícies de topo da Chapada de Brasília e é caracterizada por alternâncias de estratos de quartzitos finos a médios com níveis delgados de metassiltitos argilosos, metalamitos silteosos e metalamitos micáceos. As camadas quartzosas conferem a esta unidade maior resistência ao intemperismo físico, o que é possível observar no seu relevo plano a suave ondulado, recoberto por espessas coberturas de Latossolo que conferem alta capacidade de infiltração.

Com relação ao Grupo Canastra, a Formação Serra do Landim é composta por lentes de mármore calcítico bem delimitadas sob o espesso manto de intemperismo na região de São Sebastião, que ocorrem interdigitadas com filitos.

Diante disso, o reservatório que abastece a cidade de São Sebastião se enquadra no modelo conceitual de aquífero fissuro-cárstico proposto por Rodrigues (2022). Trata-se de um reservatório misto composto por dois tipos de porosidade secundária simultaneamente: planar (principalmente em fraturas e planos de acamamento) em filitos e por dissolução cárstica, em lentes de mármores finos. Dessa maneira, a exploração ocorre de forma conjunta em uma única unidade hidroestratigráfica.

As rochas no território do Distrito Federal apresentam deformações derivadas da Orogênese Brasileira (650 a 550 Ma). Em São Sebastião o sistema de empurrão São Bartolomeu foi responsável por sobrepor o Grupo Canastra ao Grupo Paranoá (Freitas-Silva & Campos, 1998). A região foi submetida a neotectônica que originou o Gráben de São Sebastião (Joko, 2002), cujo

limite oeste representa a borda flexural desta estrutural, e a leste é delimitado por falhas normais correspondentes aos traços retilíneos dos ribeirões Mato Grande (N40W), Santo Antônio da Papuda (N40E).

O aquífero local é inserido no Subsistema F/Q/M do Sistema Canastra, o qual representa um reservatório fissuro-cárstico com vazão média dos poços de 35 m³/h (Campos & Freitas-Silva, 1998). Do ponto de vista da hidrogeologia local, apresenta condições bastante favoráveis no que se refere ao potencial do reservatório, sendo considerado o reservatório subterrâneo mais produtivo do Distrito Federal.

As fraturas horizontais e subhorizontais tendem a elevar a condutividade hidráulica do meio e atuar como conectores entre as lentes de mármore que se encontram normalmente saturadas. Como há limitação do fluxo lateral, em função da presença de rochas pouco fraturadas, a recarga é eminentemente a partir de fluxo vertical. Entretanto, dados isotópicos mostram que há contribuição de fluxo regional em uma condição de recarga indireta (Souza, 2013).

São Sebastião é a única cidade do Distrito Federal a ser majoritariamente abastecida por águas subterrâneas. Atualmente há 37 poços tubulares profundos na região, com produção de uma vazão média de 222 L/s, que obedecem às exigências legais estabelecidas pela ADASA (Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal), por meio da legislação e outorgas expedidas.

Representam aproximadamente 3% da vazão total produzida pela CAESB (Companhia Ambiental de Saneamento do Distrito Federal) e abastece cerca de 4% da população do Distrito Federal. Existem poços em que um tipo de domínio litológico pode prevalecer, porém é comum ocorrer poços que interceptam uma mistura, que incluem aquíferos fraturados e fissuro-cársticos.

Toda a área de exposição dos aquíferos, independentemente do tipo de solo ou rocha aflorante, é potencialmente área de recarga para os reservatórios sotopostos. Entretanto, estas áreas apresentam diferentes capacidades de infiltração e recarga (Rodrigues, 2022).

Regionalmente, São Sebastião está situada em cotas topográficas elevadas, região divisória de grandes bacias (Paraná, São Francisco e Tocantins). As drenagens não apresentam grandes vazões e, por isso, a principal fonte de recarga é

a precipitação pluvial (Joko, 2002). A principal área de recarga direta ocorre nas zonas de mata, associadas aos solos hidromórficos. O terreno rela-

tivamente plano minimiza a perda por escoamento superficial, enquanto a recarga indireta ocorre por fraturas e dissoluções cársticas.

APRESENTAÇÃO DE DADOS

A cidade de São Sebastião no Distrito Federal surgiu inicialmente como uma Agrovila com vocação para a produção agropecuária e cerâmicas vermelhas em olarias. A análise da imagem mais antiga disponível, do ano de 1985, mostra que àquela época não existia nenhuma aglomeração com características urbanas, e sim um conjunto de ocupações tipicamente de propriedades rurais.

A partir do ano de 2003 foi estabelecida pelo Governo do Distrito Federal a Região Adminis-

trativa de São Sebastião, a qual experimentou ampla e rápida expansão urbana, em que uma população de poucas dezenas de milhares de habitantes passou a um contingente de cerca de 120.000 pessoas entre os anos de 2004 e 2024.

A Figura 2 mostra aproximadamente a mesma poligonal em que é possível avaliar pelo padrão de reflectância espectral a ampliação da urbanização, principalmente em direção ao sul. Além do aumento da área urbana, também houve o adensamento da ocupação.

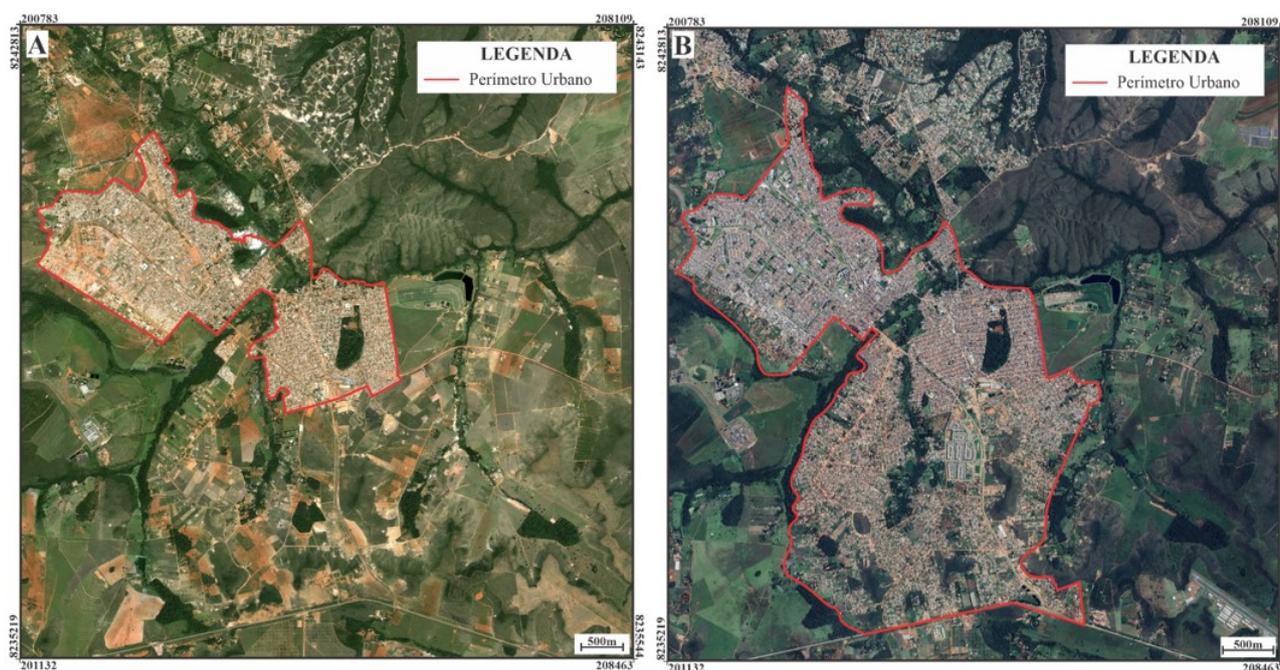


Figura 2. Imagens de satélite que mostram a ampliação da poligonal urbana da cidade de São Sebastião, Distrito Federal. **A.** Janeiro de 2004 e **B.** Fevereiro de 2024.

Este quadro de ampliação urbana, consequentemente, resulta no aumento de demanda por água potável para o abastecimento público da população residente. Mesmo considerando que o consumo *per capita* na região seja relativamente baixo, de 141 L/habitante no ano de 2020 (Adasa, 2021), o aumento da demanda por água é inevitável e crescente.

O aquífero associado à cidade de São Sebastião é associado ao Subsistema F/Q/M do Sistema Canastra (Campos & Freitas-Silva 1998 & Campos 2012). Trata-se de um reservatório subterrâneo considerado anômalo no Distrito Federal, uma vez que apresenta vazões médias de 37 m³/h (com vazões superiores a 100 m³/h em poços individuais), contra uma média de vazões

de 8,0 m³/h para toda a região.

Entretanto, a despeito das vazões atípicas, sua área de ocorrência é restrita a locais em que as rochas carbonáticas (mármore finos) da Formação Serra do Landim do Grupo Canastra estão preservadas em diferentes profundidades. No Distrito Federal essa condição ocorre no extremo norte (vale do Rio Maranhão) e na porção central (região de São Sebastião).

O Subsistema F/Q/M é considerado um típico aquífero que responde ao modelo hidráulico de um reservatório físsuro-cárstico (Rodrigues et al., 2022). Trata-se de um conjunto de lentes de mármore interdigitado lateral e verticalmente com filitos e quartzitos fraturados. A vídeo inspeção dos poços existentes em São Sebastião

mostra pequenas cavidades de dissolução, entretanto, durante a construção de poços na região foi possível confirmar a existência de cavidades vadasas a diferentes profundidades.

O volume de rochas carbonáticas na região é restrito a lentes de centenas de metros de extensão lateral e dezenas de metros de espessura, sendo que este conjunto não compõe um aquífero cárstico contínuo típico. Inclusive, as águas subterrâneas da área não apresentam elevado teor total de sais dissolvidos (ou elevada condutividade elétrica), sendo que os pH são neutros a levemente alcalinos.

As vazões específicas anômalas são decorrentes da presença das cavidades cársticas, mesmo que pequenas e pouco conectadas, uma vez que a porosidade é ampliada, resultando na maior produtividade dos poços.

Em São Sebastião o Subsistema F/Q/M está limitado a um gráben cenozoico, que compõe um polígono entre o Córrego Mato Grande e os córregos Borá Manso e Santo Antônio da Papuda (Joko, 2001; Souza, 2013 e Campos et al., 2016).

Trata-se de um hemi-gráben, cujas bordas falhadas correspondem aos vales dos referidos córregos e a borda flexural se situa a oeste / sudoeste (Xavier, 2010, Campos et al., 2014).

É importante salientar que, apenas no interior do gráben há poços com vazões de dezenas de metros cúbicos por hora (até 120 m³/h). Quando se afasta deste território, a média das vazões é da ordem de 7,5 m³/h, sendo que os poços apenas interceptam filitos pouco fraturados.

Para a análise do regime de exploração do aquífero local foram utilizados dados de dois poços de monitoramento exclusivamente dedicados a medições mensais de níveis estáticos, isto é, não são poços de produção. Os poços de monitoramento são denominados Poço SS09 e Poço SS14 e apresentam distâncias variáveis entre 150 a 750 metros dos poços de produção (Figura 3), que apresentam regimes de bombeamento de até 20 horas diárias. A Tabela 1 apresenta os principais dados referentes aos poços de produção e de monitoramento



Figura 3. Localização dos poços de produção (sinalizados com x) e dos poços de monitoramento SS-09 e SS-14 (destacados em vermelho) que compõem a bateria responsável pelo abastecimento da cidade de São Sebastião.

Tabela 1. Dados dos principais poços que compõem a bateria que abastece a cidade de São Sebastião, no Distrito Federal. NE - nível estático à época da construção dos poços (entre os anos de 2004 e 2007). Vazão referente à descarga operacional dos poços.

Poço	Coordenadas UTM		Elevação (m)	NE (m)	Vazão (m³/h)
SS01	8.240.128	203.164	913,01	15,33	61,2
SS02	8.240.918	202.722	914,99	5,17	63,5
SS05	8.240.814	203.175	906,17	0,0	7,2
SS06	8.240.510	203.296	904,80	6,04	41,4
SS07	8.240.171	203.965	900,54	0,65	25,7
SS08	8.240.030	203.987	899,67	1,35	39,6
SS09	8.239.804	203.877	900,03	1,57	4,4
SS10	8.239.674	203.644	904,56	4,6	32,7
SS11	8.239.825	203.438	906,63	8,7	25,5
SS12	8.240.413	203.525	903,96	5,49	81,5
SS13	8.241.336	202.681	914,74	6,7	24,3
SS14	8.241.640	202.696	914,83	2,06	6,4
SS15	8.239.779	203.148	915,64	17,6	36,1
SS16	8.240.954	202.640	916,34	7,57	126,7
SS17	8.241.041	202.903	911,62	5,15	49,5
SS18	8.240.629	202.873	913,93	19,25	14,8
SJ01	8.238.955	203.871	917,29	8,0	24,4
SJ02	8.238.833	204.471	943,57	14,0	4,9
SJ03	8.239.076	203.729	911,51	11,99	39,6

Durante a construção dos poços e instalação do sistema de abastecimento, os testes de bombeamento determinaram que haviam interferências entre poços de bombeamento e os de observação a diferentes distâncias. Contudo, não existe uma relação direta de distâncias de interferência, sendo possível ter poços próximos sem que o bombeamento de um poço seja associado em outro e poços a maiores distâncias que apresentam influência entre si. A magnitude das interferências também varia de forma não linear entre poços a diferentes distâncias e com diferentes vazões ou profundidades dos níveis dinâmicos.

O Poço SS-09 mostra uma variação máxima de 11 metros em toda a série histórica, sendo que no ano de 2023 a variação máxima foi a maior

em um único ano, alcançando cerca de 8 metros. No caso do Poço SS-14 a maior variação em todos os anos de monitoramento foi de 1,0 metro (com exceção do ano de 2011 considerado um *outlier* de dados).

A flutuação dos níveis não segue um padrão em que os níveis são gradativamente mais baixos em anos mais recentes. Ao contrário, pode-se observar anos anteriores (exemplo 2008 e 2010) em que os níveis estiveram mais baixos que em anos mais recentes (exemplo 2021 e 2023).

Os gráficos das Figuras 4 e 5 mostram o comportamento dos níveis estáticos dos poços SS-09 e SS-14 mensalmente em todos os anos da série histórica de 2004 até 2024 para o Poço SS-09 e de 2007 a 2024 para o Poço SS-14.

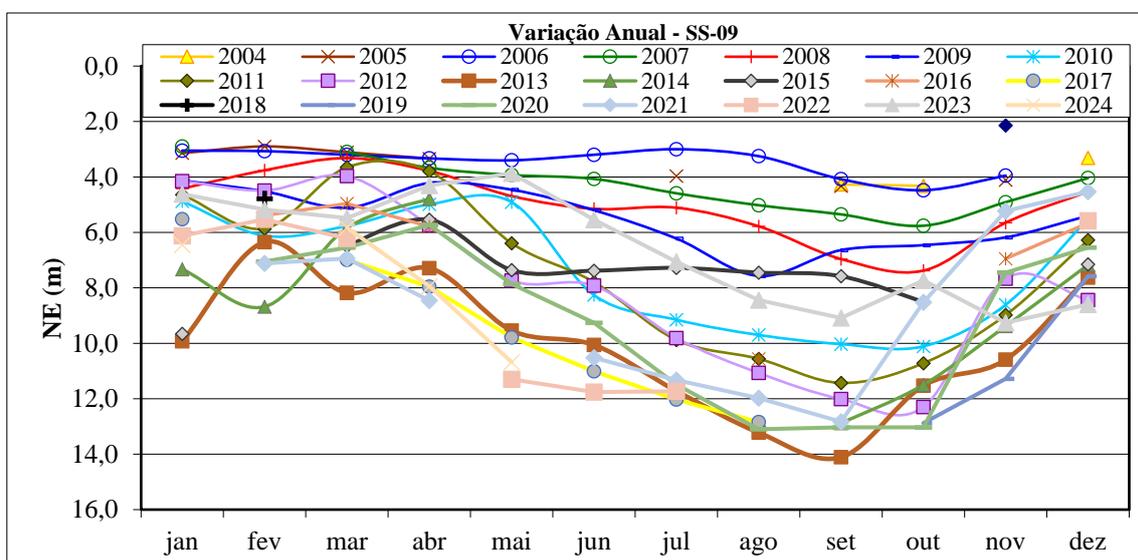


Figura 4. Variações mensais dos níveis estáticos do Poço de monitoramento SS-09.

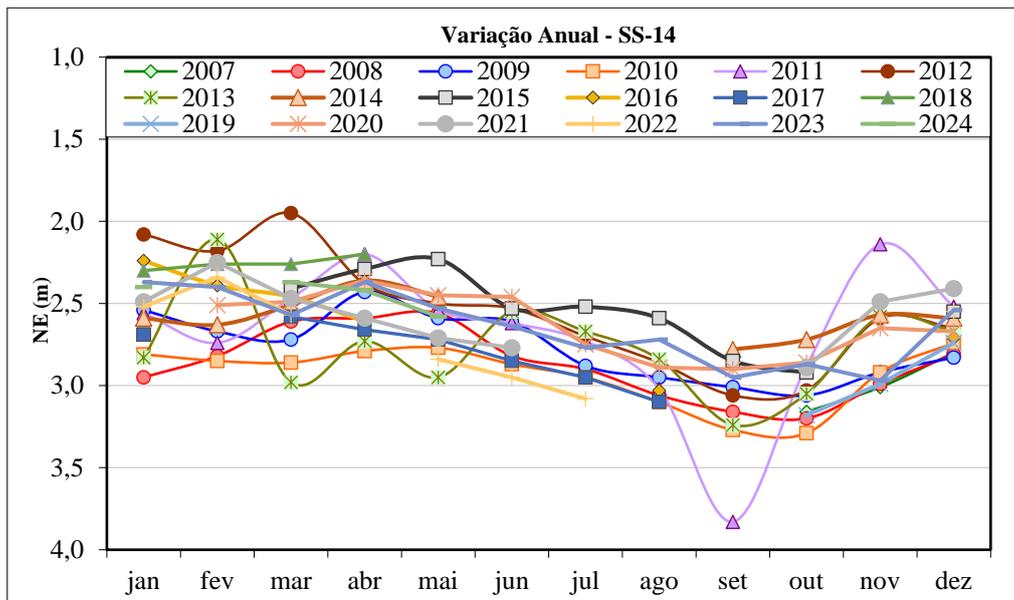


Figura 5. Variabilidade menção dos níveis freáticos verificada no poço de monitoramento SS-14.

As Figuras 6 e 7 apresentam os valores de níveis mínimo e máximo a cada ano, integrando todo o período de monitoramento. As falhas de dados são faltas de medições devidas a

várias causas incluindo: mudança de empresa responsável pelo monitoramento, dificuldade de acesso ao local, equipamento manual de medição com defeito, dentre outras.

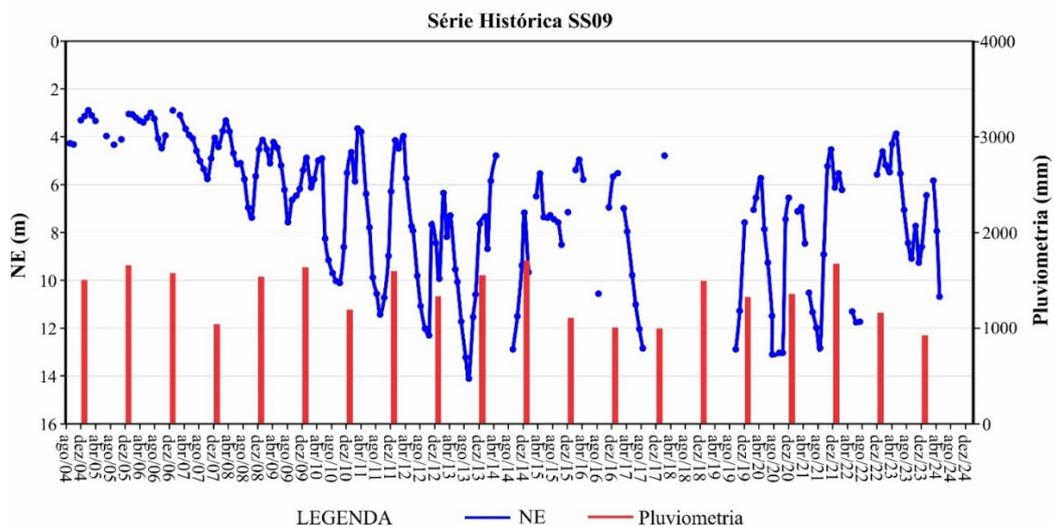


Figura 6. Distribuição de níveis máximo e mínimo da série histórica de medição do Poço SS-09.

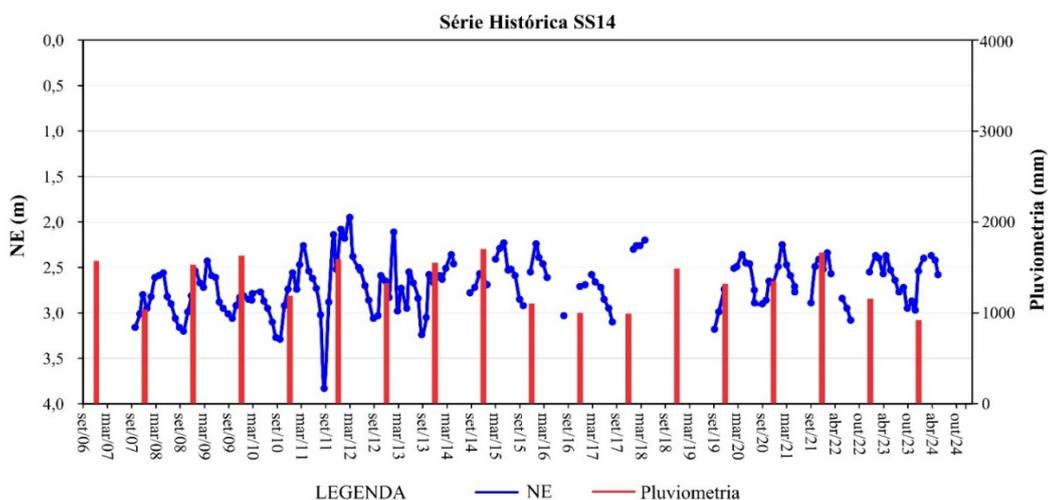


Figura 7. Flutuação anual do nível estático medidos no poço de monitoramento SS-14.

DISCUSSÃO

A análise do padrão de reflexão das imagens de satélite entre os anos de 2004 e 2024 mostra que a poligonal da cidade de São Sebastião teve um aumento de 90%. A ampliação da área urbana se deu majoritariamente em direção ao sul e sudeste, inclusive com início de verticalização com a construção de edifícios de apartamentos,

ao contrário do padrão geral de residências unifamiliares da cidade anteriormente consolidada.

Os dados de flutuação dos níveis dos dois poços de monitoramento demonstram comportamentos distintos, muito provavelmente em função da sua distância com relação aos poços de produção (Tabela 2).

Tabela 2. Distâncias e azimutes entre os poços de monitoramento (SS09 e SS14) e os poços de produção da bateria responsável pelo abastecimento da Cidade de São Sebastião.

Poço de Produção	Distância	Quadrante	Azimute
Poço de Monitoramento SS14			
SS13	323 m	Sudoeste	184
SS16	696 m	Sudoeste	185
SS02	723 m	Sudeste	178
SS17	635 m	Sudeste	161
SS18	1,04 km	Sudeste	170
SS05	956 m	Sudeste	150
SS06	1,28 km	Sudeste	153
SS01	1,58 km	Sudeste	163
SS12	1,48 km	Sudeste	146
SS15	1,92 km	Sudeste	167
SS11	1,96 km	Sudeste	158
SS07	1,94 km	Sudeste	140
SS08	2,06 km	Sudeste	142
SS09	2,18 km	Sudeste	148
SS10	2,18 km	Sudeste	155
SJ03	2,77 km	Sudeste	158
SJ01	2,93 km	Sudeste	157
SJ02	3,32 km	Sudeste	148
Poço de Monitoramento SS09			
SJ02	1,14 km	Sudeste	149
SJ01	853 m	Sudoeste	181
SJ03	746 m	Sudeste	192
SS10	271 m	Sudeste	242
SS08	251 m	Nordeste	26
SS07	381,5m	Nordeste	13
SS11	435 m	Noroeste	273
SS15	731 m	Noroeste	268
SS12	783 m	Noroeste	331
SS01	788 m	Noroeste	295
SS06	915 m	Noroeste	321
SS18	1,30 km	Noroeste	310
SS05	1,23 km	Noroeste	326
SS17	1,57 km	Noroeste	322
SS02	1,61 km	Noroeste	314
SS16	1,69 km	Noroeste	313
SS13	1,94 km	Noroeste	323
SS14	2,17 km	Noroeste	328

O Poço SS-09 apresenta maior variação, tanto na análise ano a ano quanto no conjunto da série histórica que inclui os 21 anos de medições. Este comportamento é atribuído à menor distância entre este poço de monitoramento e os de produção. Dessa forma, os níveis medidos não representam níveis estáticos naturais, mas níveis

dinâmicos relativos aos poços de produção.

O Poço SS-14, por estar a maiores distâncias dos cones de depressão dos poços de produção, representa mais fielmente o nível freático natural no ponto em que está localizado.

As flutuações mais amplas observadas no Poço SS-09 são atribuídas às variações sazonais

das chuvas, que de ano para ano pode variar entre 990 e 1600 mm, além do regime de bombeamento, que também varia, em função das mudanças da demanda pela população. De forma geral no período seco de maio a outubro há maior demanda de água.

A tentativa de elaboração de um mapa de fluxo para a região estudada não alcançou resultados satisfatórios, tendo em vista que, o aquífero local é compartimentado por blocos falhados, de forma que seria necessária a produção de um mapa para cada bloco. Os diferentes blocos também não são claramente estabelecidos, em função da ausência de exposições rochosas na região. Nem mesmo com a aplicação das diretrizes propostas por Oliveira et al. (2022), a confecção do mapa de fluxo hidrogeológico local foi viável.

A análise comparativa ano a ano, aponta variações expressivas. Esse comportamento é devido à combinação de dois fatores: variações no montante e distribuição mensal das chuvas, e oscilações sazonais da demanda hídrica. Quando o período seco do ano se prolonga, há maior demanda para abastecimento por maior tempo. Quando as chuvas se iniciam e regularizam precocemente, a demanda é reduzida.

A extração de água pode variar de acordo com as temperaturas, umidade relativa do ar e com a duração do período seco ano, resultando em maior consumo de água pela população, principalmente para irrigação de jardins e áreas verdes. Este quadro resulta em maior tempo de bombeamento diário dos poços produtivos, respondendo de forma mais intensa nos níveis dos poços de monitoramento.

A avaliação dos dados dos dois poços de monitoramento demonstra que não há sobreexploração do aquífero fissuro-cárstico local. Observa-se efetivamente que o sistema alcançou um novo equilíbrio em que a recarga, tanto local quanto regional, equilibram-se à retirada de água a partir do bombeamento pela bateria de poços de produção.

O trabalho de Souza (2013) indica com base na avaliação de isótopos estáveis e do trítio, que o aquífero da região de São Sebastião recebe recarga direta local e regional, sendo a recarga direta a partir da infiltração das chuvas sobre a área de projeção do próprio aquífero e a recarga regional devida à migração da água através de fraturas a partir da área elevada situada a oeste.

A estabilização dos níveis em um novo equilíbrio dinâmico é observada mesmo considerando o aumento da população e da demanda ao longo

do tempo de operação de sistema de abastecimento público da cidade.

Um aspecto significativo na sustentabilidade de exploração do aquífero estudado é vinculado ao tipo de uso das águas, que é exclusivamente para o abastecimento público. Caso os usos fossem vinculados à irrigação de lavouras ou à indústria, com maior demanda hídrica, certamente o equilíbrio atualmente observado poderia já ter sido interrompido. Outro aspecto relevante é que o volume de consumo per capita é relativamente reduzido, o que reduz a pressão sobre o reservatório.

Para a manutenção do equilíbrio, até então observado, é fundamental que ações de gestão sejam implantadas, incluindo a recarga gerenciada do aquífero, preservação de áreas verdes, manutenção e ampliação do monitoramento e controle preventivo dos poços de produção.

A recarga artificial deve ser implantada a partir da captação de águas de coberturas de edificações e direcionamento para caixas de infiltração ou outros sistemas que induzam a percolação da água para zonas profundas do aquífero. Os trabalhos de Cadamuro (2002) e Campos et al. (2023) apresentam exemplos que podem ser replicados para a área em estudo.

As matas que ocorrem na zona urbana e ao longo dos cursos d'água devem ser mantidas na forma de áreas verdes, pois tais feições apresentam papel relevante na manutenção da recarga local. Nessa região de relevo plano ocorrem solos que favorecem a infiltração das águas de chuvas, além de situarem em áreas topograficamente deprimidas recebendo o escoamento pluvial das porções mais elevadas.

A manutenção corretiva e preventiva dos poços que compõem o sistema de produção de água é fundamental, para que a eficiência hidráulica seja mantida e não ocorram problemas de interrupção no abastecimento. Importante lembrar que a área urbana e periurbana da cidade de São Sebastião já alcançou limite de emissão de outorga de direito de uso e assim, não é possível construir poços adicionais para reforçar o sistema de abastecimento.

O monitoramento deve ser ampliado com a introdução de, pelo menos, mais um ponto na porção central da bateria que compõe os poços do sistema de abastecimento. Sugere-se destinar o Poço SS05, que é um poço de baixa vazão, para compor a rede de monitoramento. Outra ação importante seria a realização de testes de bombeamento

mento com medição simultânea em diferentes poços de observação, de forma a se verificar as interferências entre os diferentes cones de depressão.

A fim de evitar risco futuro de sobreexploração do aquífero é essencial que o abastecimento seja complementado com outro manancial, preferencialmente, águas de fontes superficiais. Esta prática poderá resultar na manutenção das vazões operacionais atuais ou até mesmo na diminuição

das taxas de bombeamento, o que a médio e longo prazos resultará na elevação das cargas potenciométricas do reservatório.

A ampliação da impermeabilização das áreas de recarga situadas a oeste acarretará na diminuição da recarga regional. Com a consolidação deste cenário, incluindo a ampliação do Bairro Mangueiral (situado a oeste), a redução das taxas de bombeamento deve ser considerada, sob risco de se instalar um quadro efetivo de sobreexploração.

CONCLUSÕES

O uso da água subterrânea na cidade de São Sebastião é exclusivamente para abastecimento público em contexto urbano. O consumo *per capita* é relativamente baixo, sendo da ordem de 150 litros por habitante por dia.

O aquífero fissuro-cárstico local não está em regime de sobreexploração, uma vez que os níveis estáticos dos poços de monitoramento instalados nas adjacências da bateria dos poços de produção se mantêm sob equilíbrio dinâmico. No período crítico da seca, com restrição de recarga e aumento da demanda, há maior rebaixamento. Contudo, na estação chuvosa, com efetivação e regularização da recarga, a carga hidráulica se restabelece próximo aos níveis à época da instalação dos poços.

Aparentemente o sistema alcançou um novo equilíbrio em que as recargas local e regional compensam a abstração de água do aquífero, mesmo considerando o aumento da demanda desde o início de operação do sistema de abastecimento, majoritariamente baseado no bombea-

mento de uma bateria de poços tubulares.

Para evitar a pressão sobre os aquíferos sugere-se o desenvolvimento das seguintes ações de gestão: ampliar a parcela do abastecimento a partir de mananciais superficiais, preservar áreas verdes na poligonal urbana, visando a manutenção da recarga local, desenvolver projetos de recarga artificial para compensar a recarga reduzida pela urbanização e otimizar o sistema de medição da flutuação dos níveis, incluindo mais poços na rede de monitoramento (idealmente a partir de medição automática dos níveis).

Aquíferos fissuro-cársticos em associação a aquíferos intergranulares espessos e cársticos são importantes do ponto de vista quantitativo. No Distrito Federal, este é o único caso em que um núcleo urbano, com população maior que cem mil habitantes, é majoritariamente abastecida por água captada de um aquífero, nos demais casos as águas subterrâneas apenas contribuem de forma subordinada para a complementação do abastecimento.

REFERENCIAS

- ADASA. Agência Reguladora de Águas e Saneamento do Distrito Federal. Gestão de Recursos Hídricos Subterrâneos no Distrito Federal: Diretrizes, Legislação, Critérios Técnicos, Sistema de Informação Geográfica e Operacional. Relatório de Consultoria Técnica. Responsável Técnico: Campos, J.E.G. 153p., 2007.
- ADASA. Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal. Consumo Urbano de Água no Distrito Federal, 2020. Superintendência de Abastecimento de Água e Esgoto (SAE). 65p., 2021.
- ARAÚJO, L.M.V. Agrovila de São Sebastião - DF: Uma Região Totalmente Abastecida por Água Subterrânea. In: Congresso Brasileiro de Geologia, XL. Belo Horizonte, 1998. Anais Sociedade Brasileira de Geologia, p.339., 1998.
- BROWN, C.M., LUND, J.R., CAI, X., REED, P.M., ZAGONA, E.A., OSTFELD, A., HALL, J., CHARACKLIS, G.W., YU, W., BREKKE, L. The Future of Water Resources Systems Analysis: Toward a Scientific Framework for Sustainable Water Management. *Water Resources Research*. 51, 6110-6124, 2015. DOI: 10.1002/2015WR017114, 6110-6124.
- CAMP, M.V. & WALRAEVENS, K. Recovery scenarios for deep over-exploited aquifers with limited recharge: methodology and application to the aquifer in Belgium. *Environmental Geology* 56:1505-1516, 2009. DOI: 10.1007/s00254-008-1248-6.
- CAMP, M.V., RADFAR, M., WALRAEVENS, K. Assessment of Groundwater Storage Depletion by Overexploitation Using Simple Indicators in an Irrigated Closed Aquifer Basin in Iran. *Agricultural Water Management* 97, 1876-1886, 2010. DOI: 10.1016/j.agwat.2010.02.006.
- CAMPOS, J.E.G. & FREITAS-SILVA, F.H. 1998. Hidrogeologia do Distrito Federal. In: Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal. Brasília, IEMA - UnB. Relatório Técnico. v. I, Cap. IV, p.1-84.
- CAMPOS, J.E.G. Zoneamento Ecológico-Econômico do Distrito Federal. 2010. Disponível em: <http://www.zee-df.com.br>. Acessado em 23 de março 2024.
- CAMPOS, J.E.G., DARDENNE, M.A., FREITAS-SILVA, F.H., MARTINS-FERREIRA, M.A.C. Geologia do Grupo Paranoá na Porção Externa da Faixa Brasília. *Brazilian Journal of Geology*. 43(3), 461-476, 2013. https://doi.org/10.5327/Z2317-488920130003_00004.
- CAMPOS, J.E.G.; SOUZA, M.M. Alternativa para determinação de sobreexploração de aquíferos. *Geociências*, São Paulo, 36(2):339-346, 2017.
- CAMPOS, J.E.G.; XAVIER, T.O.; FREITAS-SILVA, F.H. Registros de atividade neotectônica no Distrito Federal. *Geociências*, São Paulo, 35(2):203-219, 2016.
- CARR, G., BLOSHL, G., LOUCKS, D.P. Evaluating Participation in Water Resource Management: A Review. São Paulo, UNESP, *Geociências*, v. 44, n. 1, p. 69 - 82, 2025

- Water Resources Research, 48, W11401, 17p., 2012. DOI: 10.1029/2011WR011662.
- CHANG, F-J, HUANG, C-W, CHENG, S-T, CHANG, LI-C. Conservation of Groundwater from Over-Exploitation – Scientific Analyses for Groundwater Resources Management. Science of the Total Environment 598, 828-838, 2017. DOI:10.1016/j.scitotenv.2017.04.142
- CHATTERJEE. R., JAIN, A.K, TOMAR, V., PARCHURE, P.K., AHMED, S. Mapping and Management of Aquifers Suffering from Over-Exploitation of Groundwater Resources in Baswa-Bandikui Watershed, Rajasthan, India. Environmental Earth Science, 77:157, 2018. DOI: 10.1007/s12665-018-7257-1.
- CODEPLAN. Atlas do Distrito Federal. Capítulo 6. 20p., 2020. <https://www.codeplan.df.gov.br/wp-content/uploads/2018/05/Atlas-do-Distrito-Federal-2020-Cap%C3%ADulo-6.pdf>.
- CUSTODIO, E. Aquifer overexploitation: what does it mean? Hydrogeology Journal, 10: 254-277, 2002.
- DISTRITO FEDERAL. Lei Nº 467 de 25 de junho de 1993. Cria a Região Administrativa de São Sebastião – RA XIV. Diário Oficial do Distrito Federal, Nº 128, de 28 de junho de 1993.
- ELSHAL, A.S., ARIK, A.D., EL-KADI, A.I., PIERCE, S., YE, M., BURNETT, K.M., WADA, C.A., BREMER, L.L., CHUN, G. Groundwater Sustainability: A Review of the Interactions Between Science and Policy. Environmental Research Letters, 15 (2020) 093004, 2020. DOI: 10.1088/1748-9326/ab8e8c.
- ESTELLER, M.V & DIAZ-DELGADO, C. Environmental Effects of Aquifer Overexploitation: A Case Study in the Highlands of Mexico. Environmental Management, Vol. 29, No. 2, 266-278, 2002. DOI: 10.1007/s00267-001-0024-0
- FREITAS-SILVA, F.H. & CAMPOS, J.E.G. Geologia do Distrito Federal. In: Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal. Parte I. Vol I. IEMA/SEMATEC/Universidade de Brasília. 86p., 1998.
- FREITAS-SILVA, F.H., CAMPOS, J.E.G. Geologia do Distrito Federal. In: Inventário hidrogeológico e dos recursos hídricos superficiais do Distrito Federal. Parte I. Vol I. IEMA-SEMATEC/ Universidade de Brasília. 86 p. 1998.
- IBANEZ, J., VALDERRAMA, J.M., PUIGDEFÁBREGAS, J. Assessing Overexploitation in Mediterranean Aquifers Using System Stability Condition Analysis. Ecological Modelling. Vol 218, Issues 3-4, 260-266, 2008. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2008.07.004.
- JAMALI, M.Y., NAMOUS, M., AMIR, S. Impact of Overexploitation of Groundwater Along the Irrigated Perimeter of Tadra, Oum Errabia Basin, Morocco. Desalination and Water Treatment. 195, 201-212, 2020. DOI: 10.5004/dtw.2020.25877.
- JOKO, C.T. 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, 159p., 2002.
- LI, H., DU, X., LU, X., FANG, M. Analysis of Groundwater Overexploitation Based on Groundwater Regime Information. Groundwater. Vol. 61, No. 5, 692-705. 2023. DOI: 10.1111/gwat.13285.
- MAMMADOVA, L. NEGRI, S. Understanding the Impacts of Overexploitation on the Salento Aquifer: A Comprehensive Review Through Well Data Analysis. Sustainable Futures. 7, 100188, 2024. DOI: 10.1016/j.sft.2024.100188.
- MOLINA, J.L., ARÓSTEGUI, J.L.G., BENAVENTE, J., VARELA, C. DE LA HERA, A., GETA, J.A.L. Aquifers Overexploitation in SE Spain: A Proposal for the Integrated Analysis of Water Management. Water Resource Management, 2009. DOI: 10.1007/s11269-009-9406-5.
- OLIVEIRA, O. A., RODRIGUES, D.S., CAMPOS, J.E.G., UAGODA, R.E.S. Metodologia para Confecção de Mapas Potenciométricos em Aquíferos Cársticos e Físsuro-Cársticos: Estudo de Caso na Alta Bacia do Rio Corrente, Mambá, GO. Revista Brasileira de Geografia Física, 15(05), 2327-2339. 2022. DOI: 10.26848/rbgf.v15.5.p2327-2339.
- PDAD. Pesquisa Distrital por Amostra de Domicílios 2021. Relatório CODEPLAN - Companhia de Planejamento do Distrito Federal. 139p., 2022.
- RODELL, M., FAMIGLIETTI, J. S., WIESE, D.N., REAGER, J.T., BEAUDOING, H.K., LANDERER, F.W., LO, M.H. Emerging Trends in Global Freshwater Availability. Nature 557, 651–659, 2018. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0123-1>.
- RODRIGUES, D.S. Modelagem Conceitual de Fluxo em Aquífero Físsuro-Cárstico Associado à Base do Grupo Bambuí na Região de Formosa - GO. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 92p, 2022.
- RODRIGUES, D.S., CAMPOS, J.E.G., MARTINS-FERREIRA, M.A.C. Caracterização de Aquíferos Físsuro-Cársticos: Bases Conceituais e Proposições. Revista Brasileira de Geografia Física. V. 16, n. 03, 1288-1304, 2023. DOI: 10.26848/rbgf.v16.3.p1288-1303.
- RODRIGUEZ-ESTRELLA, T. The Problems of Overexploitation of Aquifers in Semi-Arid Areas: Characteristics and Proposals for Mitigation. In: Boletín Geológico y Minero, 125 (1): 91-109, 2014. ISSN: 0366-0176.
- SOUZA, M.M. Determinação das áreas de recarga para a gestão do Sistema Aquífero Físsuro-Cárstico da região de São Sebastião/DF. Brasília. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, 73p., 2013.
- SOUZA, M.T. Fundamentos para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos no Distrito Federal. Brasília. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, 124 p. 2001.
- XAVIER, T.O. Registros neotectônicos no Distrito Federal: Implicações para o condicionamento dos recursos hídricos subterrâneos. Brasília. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, 105 p., 2010.

*Submetido em 18 de setembro de 2024
Aceito para publicação em 18 de dezembro de 2024*