



Universidade de Brasília - **UnB**  
Instituto de Geociências - **IG**  
Programa de Pós-Graduação - **Geociências Aplicadas e Geodinâmica**  
Área de Concentração - **Recursos Hídricos e Meio Ambiente**  
Linha de pesquisa - **Hidrogeologia Conceitual e Aplicada**

## **DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Nº 202**

### **MODELAGEM CONCEITUAL DE FLUXO EM AQUÍFERO FÍSSURO- CÁRSTICO ASSOCIADO À BASE DO GRUPO BAMBUÍ NA REGIÃO DE FORMOSA-GO**

**DRIELLY SOUZA RODRIGUES**

Orientador:

**Prof. Dr. Marco Antônio Caçador Martins Ferreira**

Coorientador:

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

**Brasília, Outubro de 2022.**



Universidade de Brasília - **UnB**  
Instituto de Geociências - **IG**  
Programa de Pós-Graduação - **Geociências Aplicadas e Geodinâmica**  
Área de Concentração - **Recursos Hídricos e Meio Ambiente**  
Linha de pesquisa - **Hidrogeologia Conceitual e Aplicada**

## **DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

# **MODELAGEM CONCEITUAL DE FLUXO EM AQUIFERO FÍSSURO-CÁRSTICO ASSOCIADO À BASE DO GRUPO BAMBUÍ NA REGIÃO DE FORMOSA-GO**

### **Banca Examinadora:**

José Eloi Guimarães Campos (Universidade de Brasília - Presidente)

Rogério Elias Soares Uagoda (Universidade de Brasília - Membro Interno)

Rodrigo Sérgio de Paula (Universidade Federal de Minas Gerais - Membro Externo)

**Brasília, Outubro de 2022.**

RR696m Rodrigues, Drielly Souza  
Modelagem Conceitual de Fluxo em Aquífero Fissuro-Cárstico  
Associado à Base do Grupo Bambuí na Região de Formosa - GO /  
Drielly Souza Rodrigues; orientador Marco Antônio Caçador  
Martins Ferreira; co-orientador José Eloi Guimarães Campos.  
-- Brasília, 2022.  
92 p.

Dissertação (Mestrado - Mestrado em Geociências  
Aplicadas) -- Universidade de Brasília, 2022.

1. Modelagem Conceitual. 2. Aquífero Fissuro-Cárstico. 3.  
Gestão de Águas Subterrâneas. I. Martins Ferreira, Marco  
Antônio Caçador, orient. II. Campos, José Eloi Guimarães, co  
orient. III. Título.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao professor José Eloi Guimarães Campos pelo seu apoio. O título que me é outorgado com a defesa desta dissertação eu devo à sua assistência, sem a qual esse trabalho não poderia ter sido levado adiante.

Ao Instituto de Geociências pelo apoio logístico para o desenvolvimento da pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES pela concessão da bolsa de estudo.

Ao Geólogo Max Lânio Lacerda por disponibilizar os dados de monitoramento de vazões e níveis de poços.

## RESUMO

Apesar do uso habitual, tanto na literatura internacional quanto nacional, os estudos referentes aos aquíferos físsuro-cársticos não trazem um conceito formal a respeito desse tipo de reservatório subterrâneo, que na maior parte dos casos é tratado como um subtipo de um carste clássico. Neste sentido, este trabalho sugere um modelo hidrogeológico tridimensional, cujo objetivo principal é a representação mais próxima possível das condições reais, a fim de explicar de forma didática o comportamento do fluxo da água em subsuperfície. O modelo proposto foi aplicado em uma área alvo no Distrito de Crixalândia, na região de Formosa, Goiás. A pesquisa foi desenvolvida a partir da integração de diferentes ferramentas tradicionalmente aplicadas aos estudos hidrogeológicos, que incluíram mapeamento geológico e pedológico, análise potenciométrica, ensaios de infiltração e estudo hidrológico. A denominação físsuro-cárstico é recomendada aos reservatórios mistos representados por rochas carbonáticas associadas a rochas não carbonatadas (principalmente rochas pelíticas) que apresentam, simultaneamente, tanto porosidade secundária planar, quanto secundária por dissolução cárstica. São naturalmente anisotrópicos e podem ser classificados como homogêneos e heterogêneos. Quando homogêneos são caracterizados por camadas contínuas de rochas calcárias impuras (margas) com alto grau de anisotropia gerado por planos de acamamento, planos de fraturas e pequenos vazios de dissolução. Quando heterogêneos são compostos por lentes de rochas carbonáticas com restrita continuidade lateral interdigitadas vertical e lateralmente com rochas pouco permeáveis, de baixa condutividade hidráulica, como siltitos, folhelhos, filitos ou xistos. Um aspecto importante a ser avaliado é a escala e a dimensão desses corpos de rochas. Os aquíferos físsuro-cársticos são compostos por lentes carbonáticas com dezenas de metros de espessura e centenas de metros de extensão lateral. Quando o carbonato é contínuo ou as lentes são muito espessas e lateralmente amalgamadas os aquíferos devem ser tratados como sistemas fraturados e cársticos individuais. Por se tratar de um tipo de reservatório misto, suas características hidráulicas e hidroquímicas são intermediárias aos tipos fraturados e cársticos independentes. Outro ponto importante é que a água dos aquíferos físsuro-cársticos é explorada por poços únicos que cortam seções diferentes de ambos os tipos de rochas e o seu gerenciamento deve ser tratado como um sistema único.

**Palavras-chave:** *aquífero físsuro-cárstico; modelo conceitual, gestão de águas subterrâneas.*

## ABSTRACT

Despite the usual use, both in the international and national literature, studies on the fissure-karstic aquifers do not bring a formal concept about this type of underground reservoir, which in most cases is treated as a subtype of a classical karst. In this sense, this work proposes a three-dimensional hydrogeological model, whose main objective is the closest possible representation of real conditions, in order to explain in a didactic way the behavior of the water flow in subsurface. The proposed hydrogeological model was applied in a target area in the Crixalândia District, in Formosa, Goiás. The research was developed from the integration of different tools traditionally applied to hydrogeological studies, which included geological and pedological mapping, potentiometric analysis, infiltration assays and hydrological study. The name fissure-karstic is recommended to mixed reservoirs represented by carbonate rocks associated with non-carbonated rocks (mainly pelitic rocks) that present both secondary planar porosity and secondary porosity by karstic dissolution. They are naturally anisotropic and can be classified as homogeneous and heterogeneous. When homogeneous they are characterized by continuous layers of impure limestone rocks (marls) with a high degree of anisotropy generated by depositional and fracture planes and small dissolution voids. When heterogeneous they are composed of carbonate rock lenses with restricted lateral continuity interfingering vertically and laterally with rocks that are poorly permeable, with low hydraulic conductivity, such as siltstone, shale, phyllite or schist. An important aspect to be evaluated is the scale and size of these rock bodies. The fissure-karstic aquifers are composed of carbonate lenses tens of meters thick and hundreds of meters of lateral extension. When carbonate is continuous or the lenses are very thick and laterally amalgamated the aquifers should be treated as individual fractured and karstic systems. Because it is a type of mixed aquifer, the hydraulic and hydrochemical characteristics are intermediate to independent fractured and karstic types. Another important point is that water from the fissure-karstic aquifers is pumped by single wells that cut different sections of both types of rocks and the reservoir management should be treated as a single system.

**Keywords:** *fissure-karstic aquifer, conceptual model, groundwater management.*

## SUMÁRIO

|                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</b> .....                                                                           | 1  |
| 1.1. Apresentação do Problema e Justificativa .....                                                            | 1  |
| 1.2. Objetivos .....                                                                                           | 2  |
| 1.3. Localização e Acesso à Área de Estudo .....                                                               | 3  |
| 1.4. Materiais e Métodos .....                                                                                 | 3  |
| <b>CAPÍTULO 2 - REFERENCIAL TEÓRICO E PROPOSTA DE MODELO CONCEITUAL DE<br/>AQUÍFERO FÍSSURO-CÁRSTICO</b> ..... | 8  |
| Characterization of Fissure-Karstic Aquifers: Conceptual Bases and Propositions.....                           | 9  |
| Abstract .....                                                                                                 | 9  |
| Introduction .....                                                                                             | 9  |
| Material and Methods.....                                                                                      | 12 |
| Results and Discussions .....                                                                                  | 12 |
| Conclusions .....                                                                                              | 19 |
| <b>CAPÍTULO 3 - ESTUDO DE CASO: DISTRITO DE CRIXALÂNDIA, REGIÃO DE FORMOSA,<br/>GOIÁS</b> .....                | 20 |
| 3.1. Introdução.....                                                                                           | 20 |
| 3.2. Geologia Regional.....                                                                                    | 21 |
| 3.3. Geologia Local .....                                                                                      | 22 |
| 3.4. Contexto Estrutural.....                                                                                  | 24 |
| 3.5. Clima .....                                                                                               | 25 |
| 3.6. Solos .....                                                                                               | 26 |
| 3.7. Geomorfologia.....                                                                                        | 28 |
| 3.8. Estudo Hidrogeológico.....                                                                                | 28 |
| 3.8.1. Inventário dos Pontos d'Água .....                                                                      | 28 |
| 3.8.2 Caracterização do Aquífero.....                                                                          | 30 |
| 3.8.3. Caracterização Hidráulica .....                                                                         | 35 |
| 3.8.4. Caracterização das Áreas de Recarga.....                                                                | 38 |
| 3.8.5. Caracterização Físico-Química das Águas Subterrâneas .....                                              | 39 |
| 3.8.6. Relação entre Águas Superficiais e Subterrâneas.....                                                    | 40 |
| 3.8.7. Potenciometria.....                                                                                     | 46 |
| 3.8.8. Estimativa de Reserva Hídrica .....                                                                     | 49 |
| <b>CAPÍTULO 4 - DISCUSSÕES E PROPOSTAS PARA GESTÃO</b> .....                                                   | 53 |
| 4.1. Discussões .....                                                                                          | 53 |
| 4.1.1. Condições Geológicas para o Estabelecimento de Aquíferos Físsuro-Cársticos .....                        | 53 |
| 4.1.2. Caracterização Física e Hidráulica de Aquíferos Físsuro-Cársticos.....                                  | 55 |
| 4.1.3. Contrastes entre Aquíferos Físsuro-Cársticos e Cársticos Clássicos.....                                 | 56 |

|                                                                          |           |
|--------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.1.4. Estudos de caso e aplicação da terminologia.....                  | 58        |
| 4.2. Proposta de Gestão .....                                            | 61        |
| 4.2.1. Instalação de Sistemas para Recarga Artificial dos Aquíferos..... | 61        |
| 4.2.2. Construção e Operação Adequada de Poços .....                     | 62        |
| 4.2.3. Uso de Critérios Específicos para Outorga .....                   | 62        |
| 4.2.4. Mapeamento da Vulnerabilidade à Contaminação.....                 | 63        |
| 4.2.5. Cobrança pelo Uso da Água.....                                    | 64        |
| <b>CAPITULO 5 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>                      | <b>65</b> |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>                                  | <b>68</b> |



## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1. 1.</b> Mapa de localização e acesso à área de estudo. As áreas adjacentes que contêm poços tubulares profundos também foram utilizadas para a geração de dados para a pesquisa.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 3  |
| <b>Figura 1. 2.</b> Medidor com sensor sonoro introduzido no poço. Modelo integrado por fita de medição milimetrada.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 5  |
| <b>Figura 1. 3.</b> Ensaio de infiltração em superfície de solo com aplicação da técnica do infiltrômetro de anéis concêntricos. É importante manter o nível da água do compartimento externo mais elevado para se garantir que a infiltração a partir do compartimento interno seja vertical. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 6  |
| <b>Figura 1. 4.</b> Disposição dos tubos para o desenvolvimento de ensaio de infiltração em profundidade a partir do método open end hole. Os tubos de revestimentos dos furos a trado devem ser cravados cuidadosamente no fundo para se evitar que a água se eleve entre a parede externa do tubo de PVC e a parede do furo. ....                                                                                                                                                                                                                                                                            | 6  |
| <b>Figura 1. 5.</b> Vertedouro triangular de Thompson. Neste sistema a vazão é proporcional à elevação da onda que se forma em virtude da reação ao barramento do fluxo.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 7  |
| <b>Figure 2. 1.</b> Illustration of unary and binary karst systems related to types of rocks where the recharge, flow and discharge occur (compiled from Marsaud, 1996). ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 12 |
| <b>Figure 2. 2.</b> Schematic illustration exemplifying the conceptual model of fissure-karstic aquifer in a homogeneous system represented by clay-limestone interspersed with marl. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 13 |
| <b>Figure 2. 3.</b> Idealized representation of the conceptual model of fissure-karstic aquifer in a heterogeneous system with carbonate rock lenses interfingered with siltstone. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 13 |
| <b>Figure 2. 4.</b> Cross section showing the potential change in laminar and turbulent flow regime in heterogeneous fissure-karstic aquifer composed of laterally interfingered limestone lenses with laminated shale. It shows the following flow possibilities in time and space: A - laminar flow in fracture plane to turbulent flow in dissolution cavity and laminar flow in fracture; B - laminar flow in fracture to into bedding plane; C - laminar / turbulent flow in fracture zone to turbulent flow into karstic cavity and D - laminar flow in fracture to turbulent flow in karst opening..... | 14 |
| <b>Figure 2. 5.</b> Example of an image obtained from video inspection of deep well (SS-01), drilled in the fissure-karstic system located in the São Sebastião region, Federal District, Brazil. The dissolution cavity has a maximum opening of 25 cm, at 96 m depth (Souza, 2013). ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 16 |
| <b>Figure 2. 6.</b> Conceptual model of fissure-karstic aquifer. This system is associated with the Sete Lagoas Formation, Bambuí Group in the Formosa region, Goiás State, Central Brazil.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 18 |
| <b>Figura 3. 1.</b> Principais cursos d'água e poços existentes na área de estudo (CPX I – PII, CPX II – P4, CPX III -PM, Poço Sr. Geraldo – PG, Poço Sr. Osmar e Poço Fazenda Brasil. O poço SEMARH foi usado para monitoramento, mas se encontra fora da poligonal, está localizado a 1 km ao norte do Poço Sr. Osmar. Georreferenciamento sobre imagem de alta resolução espacial (Fonte Google Earth, 2021). ....                                                                                                                                                                                          | 20 |
| <b>Figura 3. 2.</b> Ilustração da coluna estratigráfica do Grupo Bambuí (Dardenne, 1978). ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 21 |
| <b>Figura 3. 3.</b> Exposição de calcário cinza micrítico maciço a pouco estratificado da Formação Sete Lagoas. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 23 |
| <b>Figura 3. 4.</b> Siltito argiloso com cor de alteração rosada e acamamento vertical da Formação Serra de Santa Helena.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 23 |
| <b>Figura 3. 5.</b> Seção geológica regional W-E com a representação esquemática da falha de empurrão da Serra do Paranã e o padrão de dobras apertadas da fase F1 de correntes do encurtamento crustal, devido á compressão leste-oeste com movimentação de massa para leste em direção ao Cráton São Francisco.....                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 24 |
| <b>Figura 3. 6.</b> Domo estrutural representado por dobra apertada com eixo principal N20W (destacada em 25                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |    |
| <b>Figura 3. 7.</b> Total mensal da precipitação (mm) para a Estação Formosa, GO (Período 1931/2020). ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 26 |
| <b>Figura 3. 8.</b> Balanço Hídrico em que o padrão climático regional resulta em quatro períodos contrastantes: retirada da umidade dos solos entre abril e julho; déficit hídrico entre maio e outubro; reposição da umidade dos solos em novembro e dezembro; e superávit hídrico entre dezembro e março. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 26 |
| <b>Figura 3. 9.</b> Perfil de Latossolo Vermelho de textura muito argilosa derivado de siltitos da Formação Serra de Santa Helena. Observar a ampla homogeneidade do perfil. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 27 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 3. 10.</b> Perfil de Neossolo Litólico em que o horizonte A fraco está em contato direto com o horizonte R. Este tipo de solo ocorre em associação com Cambissolo Háplico. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 27 |
| <b>Figura 3. 11.</b> Perfil geológico do Poço CPX I - P2 que representa a seção de um poço tubular que intercepta majoritariamente rochas carbonáticas da Formação Sete Lagoas. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 29 |
| <b>Figura 3. 12.</b> Perfil geológico do Poço CPX II - P4 que secciona na porção superior rochas pelíticas da Formação Serra de Santa Helena e a partir de 60 m carbonatos da Formação Sete Lagoas. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 30 |
| <b>Figura 3. 13.</b> Mapa hidrogeológico da área do estudo de caso que corrobora o modelo conceitual do tipo fissuro-cárstico proposto. Todos os poços situados na área sem exposições de rochas carbonáticas interceptam calcários em diferentes profundidades. O fluxo subterrâneo tende para os exutórios representados pela rede de drenagem superficial. A área de recarga mais importante coincide com a porção de relevo mais elevado e predominância de solos espessos (Latossolo Vermelho e Latossolo Vermelho-amarelo)..... | 34 |
| <b>Figura 3. 14.</b> Bloco diagrama esquemático que ilustra a disposição em três dimensões do aquífero fissuro-cárstico presente na região em estudo. Notar que a superfície potenciométrica representada pela linha tracejada ocorre a diferentes profundidades em função de anisotropias, dissolução cárstica e relação com o relevo, tornando o aquífero naturalmente compartimentado.....                                                                                                                                         | 35 |
| <b>Figura 3. 15.</b> Comportamento do rebaixamento do poço CPX I - P2 a partir do teste de bombeamento escalonado durante 27 horas de duração. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 36 |
| <b>Figura 3. 16.</b> Comportamento do rebaixamento do poço CPX II - P4 a partir do teste de bombeamento escalonado durante 30 horas de duração. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 36 |
| <b>Figura 3. 17.</b> Sumidouro formado pela confluência dos córregos Caroba e Sucupira, onde é possível verificar um pequeno fluxo de água derivado do escoamento superficial acumulado dos afluentes (abertura do sumidouro de 1,2 m).....                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 42 |
| <b>Figura 3. 18.</b> Ponto de surgência do Córrego Escaroba com volume de água similar ao do sumidouro. Esta relação entre as vazões indica que não há contribuição das lentes carbonáticas na afluência do córrego nesta parte do aquífero (abertura da cavidade na surgência de 1,5 m). ....                                                                                                                                                                                                                                        | 42 |
| <b>Figura 3. 19.</b> Cabeceira do Córrego Sucupira com acúmulo de água de precipitação das primeiras chuvas do ano. Trata-se de uma drenagem intermitente com escoamento apenas no pico do período chuvoso. Este córrego não intercepta rocha carbonática no seu alto curso. ....                                                                                                                                                                                                                                                     | 43 |
| <b>Figura 3. 20.</b> Leito do Córrego Sucupira em seguimento a montante da foto anterior. Trata-se de um córrego intermitente com fluxo apenas após a regularização das chuvas a partir de escoamentos superficial e interno. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 43 |
| <b>Figura 3. 21.</b> Cabeceira de grota do Córrego Cabaceira. Esta nascente é intermitente e foi classificada como mista e inclui controle de contato (saprolito e rocha) e fratura. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 44 |
| <b>Figura 3. 22.</b> Variação da vazão do Córrego Sussuarana (coordenadas UTM 265.505/8.302.519; zona 23L; altitude 803 m). ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 45 |
| <b>Figura 3. 23.</b> Variação da vazão do Córrego Caroba (coordenadas UTM 264144/8301723, zona 23L; altitude 744 m). ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 45 |
| <b>Figura 3. 24.</b> Seção potenciométrica integrada de direção SW-NE na porção central da área alvo do estudo de caso. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 46 |
| <b>Figura 3. 25.</b> Representação dos sistemas de fluxos hidrogeológicos associados ao modelo conceitual de aquífero fissuro-cárstico e sua cobertura pedogenética (domínio intergranular). ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 48 |
| <b>Figura 3. 26.</b> Variação do nível estático dos poços CPX I - P2, CPX II - P4 e CPX III - PM no período de 2016 a 2022. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 52 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabela 3.1.</b> Localização do cadastro de pontos d'água da poligonal de estudo. ....                                                                                                                                                                                                                                            | 28 |
| <b>Tabela 3.2.</b> Classificação dos aquíferos na poligonal delimitada para a aplicação do modelo conceitual proposto na área de Crixalândia, Formosa- GO. ....                                                                                                                                                                     | 31 |
| <b>Tabela 3.3.</b> Localização dos pontos em que foram realizados os testes de rebaixamento no Domínio Intergranular. ....                                                                                                                                                                                                          | 31 |
| <b>Tabela 3.4.</b> Resultados dos ensaios de infiltração com o método dos anéis concêntricos, onde I = profundidade de cravação dos anéis; $\Delta t$ = tempo de infiltração; $h_0$ = carga inicial; $h_f$ = carga final; e K = condutividade hidráulica. ....                                                                      | 31 |
| <b>Tabela 3.5.</b> Resultados dos ensaios de infiltração <i>in situ</i> a partir da técnica <i>open end hole</i> , onde $\Delta t$ = tempo de infiltração; $h_0$ = carga inicial; $h_f$ = carga final; e K = condutividade hidráulica. ....                                                                                         | 32 |
| <b>Tabela 3.6.</b> Dados do teste de bombeamento escalonado dividido em três etapas no poço CPX I - P2, onde NE = nível estático; NDf = nível dinâmico final; $s_i$ = rebaixamento incremental; $Q_i$ = vazão inicial; $Q_f$ = vazão final; e t = tempo que durou a etapa do teste. ....                                            | 36 |
| <b>Tabela 3.7.</b> Dados do teste de bombeamento escalonado dividido em três etapas no poço CPX II - P4, onde NE = nível estático; NDf = nível dinâmico final; $s_i$ = rebaixamento incremental; $Q_i$ = vazão inicial; $Q_f$ = vazão final; e t = tempo que durou a etapa do teste. ....                                           | 36 |
| <b>Tabela 3.8.</b> Resultados da avaliação dos dados da terceira etapa do teste de bombeamento escalonado, onde K = condutividade hidráulica; T = transmissividade; S = coeficiente de armazenamento; e Cesp = capacidade específica. (Foi considerada a distância de 1 m entre o poço de bombeamento e o de observação. ....       | 37 |
| <b>Tabela 3.9.</b> Resultado da análise físico-química e bacteriológica em amostras de água dos poços CPX I - P2 e CPX II - P4, onde VMP = valor máximo permitido pela Portaria GM/MS Nº 888, de 4 de maio de 2021 do Ministério da Saúde. ....                                                                                     | 39 |
| <b>Tabela 3.10.</b> Dados dos poços de monitoramento e de produção utilizados para corroborar a modelagem conceitual do aquífero fissuro-cárstico, onde ND = dados não disponíveis. ....                                                                                                                                            | 47 |
| <b>Tabela 3.11.</b> Variações anuais dos níveis freáticos observados em poços de monitoramento fora do raio dos cones de depressão de poços de produção (variação natural do nível estático). ....                                                                                                                                  | 49 |
| <b>Tabela 4. 1.</b> Contrastes entre parâmetros de definição e caracterização de diferentes modelos conceituais de aquíferos. ....                                                                                                                                                                                                  | 55 |
| <b>Tabela 4. 2.</b> Comparação dos valores de referência de parâmetros hidrodinâmicos e dimensionais dos diferentes modelos conceituais de aquíferos. $\eta$ = porosidade, $\eta_e$ = porosidade efetiva, K = condutividade hidráulica, T = transmissividade, S = coeficiente de armazenamento e Cesp = capacidade específica. .... | 55 |

# CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

## 1.1. Apresentação do Problema e Justificativa

De acordo com o relatório das Nações Unidas sobre o desenvolvimento dos recursos hídricos (UNESCO, 2018) a demanda mundial por água tem aumentado a uma taxa de aproximadamente 1% ao ano na última década. Isso ocorre devido ao crescimento populacional, ao desenvolvimento econômico e às mudanças nos padrões de consumo.

A disponibilidade hídrica, por sua vez, depende da qualidade, da quantidade de água fisicamente disponível, da forma como ela é armazenada, administrada e distribuída para os usuários.

Diante disso, a dinâmica do ciclo hidrológico indica que o principal mecanismo de entrada de água na hidrosfera ocorre na forma de precipitação (Fetter, 1994). Assim, o volume de chuva acumulado em determinada região equivale à capacidade de água que, potencialmente, poderá contribuir para a elevação do nível dos reservatórios.

No Brasil o volume total de precipitação entre os anos de 2012 e 2017 foi abaixo da média, o que resultou em recargas reduzidas dos reservatórios existentes (ANA, 2020). Ao longo do ano de 2018 houve recuperação de parte do volume que, no entanto, voltou a atingir níveis bastante baixos ao final de dezembro de 2019. Nesse período cerca de 48 milhões de pessoas foram afetadas pela diminuição de oferta de água no território nacional, o que levou 2.783 municípios a decretarem Situação de Emergência ou Estado de Calamidade Pública (ANA, 2020).

Posto isso, 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.

O aumento do uso das águas dos aquíferos tem sido maior do que as captações em fontes superficiais (Carr *et al.*, 2012; Brown *et al.*, 2015; Rodell *et al.*, 2018; Elshall *et al.*, 2020). Segundo a Agência Nacional de Águas (ANA, 2020), 57% dos 5.570 municípios brasileiros são abastecidos total (36%) ou parcialmente (16%) por águas subterrâneas.

O armazenamento da água subterrânea está associado às condições do meio físico local que inclui o contexto geológico, pedológico e geomorfológico (Driscoll, 1986). Entretanto, para preservar o reservatório subterrâneo, minimizar o risco de contaminação e evitar a sobreexplotação, 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.

Dessa maneira, a exploração responsável de recursos hídricos subterrâneos pode ser uma opção factível para mitigar a questão de escassez de água. Dentre os principais aspectos, destacam-se: o fato de o aquífero ser pouco suscetível à contaminação; produzir água de boa qualidade, na maioria dos casos, e não estar sujeito à evaporação direta.

O resultado de pesquisas aplicadas ao assunto referido surge, geralmente, sob a forma de caracterização de modelos hidrogeológicos tridimensionais, cujo objetivo é a representação mais próxima possível das condições reais, a fim de explicar de forma didática o comportamento dos fluidos em meio subterrâneo. No entanto, a elaboração desse tipo de modelo conceitual se torna complexa, uma vez que se deve exprimir os processos naturais que compõem o ciclo hidrológico em subsuperfície (LeGrand & Rosen, 2000).

Sendo assim, este trabalho discorre sobre o estudo do comportamento do fluxo da água subterrânea em aquífero fissuro-cárstico no distrito de Crixalândia, pertencente ao município de Formosa no estado de Goiás. Reservatórios denominados fissuro-cárstico são compostos simultaneamente, pelos tipos fraturado e cárstico. Sua exploração ocorre de forma conjunta, o que indica se tratar de uma única unidade hidroestratigráfica. Esse sistema é complexo e pouco citado na literatura e o conhecimento ao seu respeito ainda é limitado.

A verificação dos livros didáticos de hidrogeologia mais adotados no mundo (Freeze & Cherry, 1979; Driscoll, 1986; Keller, 1996; Fetter, 1994, dentre outros) sequer cita a existência desses importantes reservatórios subterrâneos. Entretanto, sua relevância pode ser verificada nos inúmeros casos de abastecimento de núcleos urbanos por este tipo de aquífero (ex.: Paderborn - Alemanha, Burgundy - França, Cracóvia - Polônia, Sete Lagoas - MG, Lagoa Santa - MG e São Sebastião - DF).

Esse tipo de manancial subterrâneo é tratado mais comumente em artigos científicos, e mesmo assim, com restrita frequência e sem um conceito definido, sendo muitas vezes tratados de forma simplista como uma variação dos clássicos sistemas cársticos (Rózkowski, 1998, 2007; Field & Mose, 1998; Witkowski *et al.*, 2003; Cheng & Chen, 2005; Lousada & Campos, 2005; Paula & Campos, 2016; Robineau *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2020).

Neste contexto, a realização dessa pesquisa se justifica em função do restrito conhecimento e pela complexidade dos aquíferos fissuro-cársticos. O conhecimento adquirido a partir deste trabalho será importante para o entendimento, a caracterização hidrogeológica e a manutenção desse tipo de reservatório, de tal maneira que possa ser aplicado não somente na área de estudo, mas em outras regiões com contexto geológico, pedológico e geomorfológico similar.

## **1.2. Objetivos**

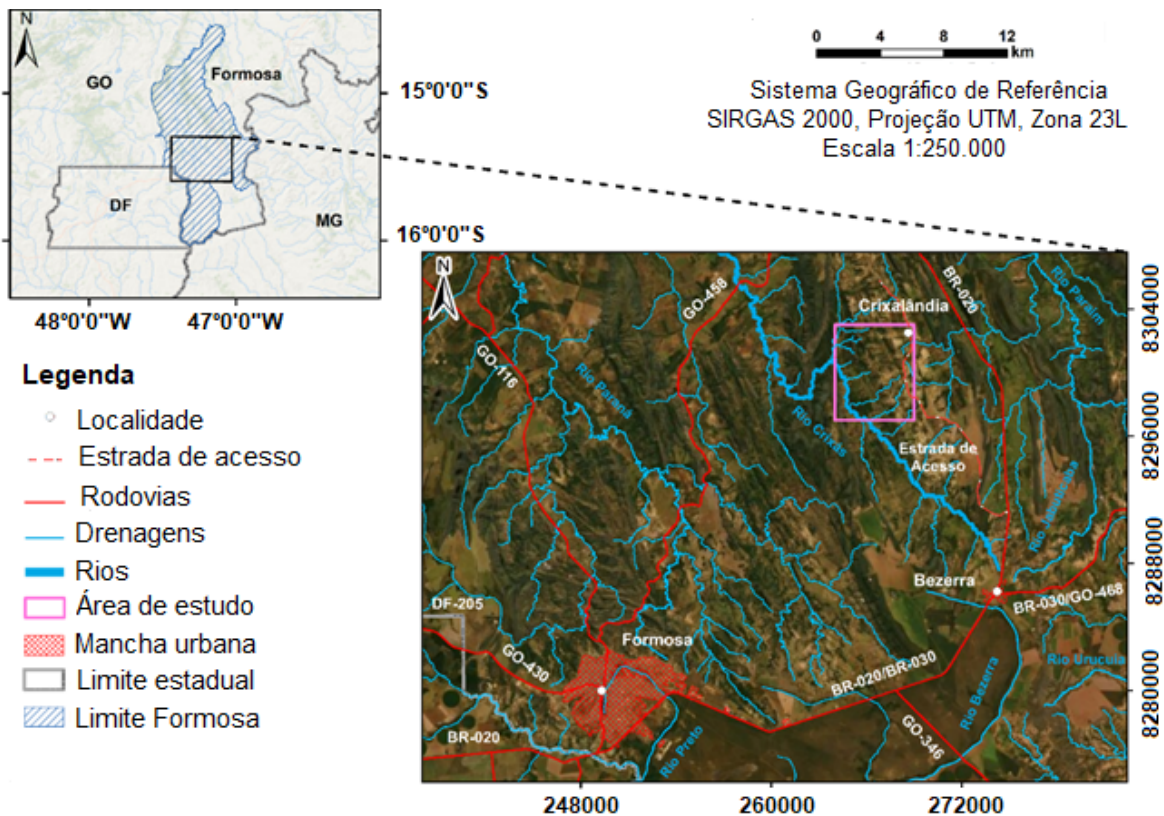
O presente estudo tem como objetivo principal propor um modelo conceitual para aquíferos classificados como fissuro-cársticos a partir dos aspectos descritivos e, posteriormente, aplicar a proposição em um estudo de caso concreto em uma área alvo específica.

Como objetivos específicos, destacam-se:

- Propor uma abordagem para estudos de caracterização de aquíferos físsuro-cársticos a partir da importância de cada subtipo no modelo conceitual;
- Definir o padrão de circulação da água, o que inclui sua forma de fluxo (laminar ou turbulento) nos diferentes meios e sua função na questão armazenamento - transmissão;
- Sugerir ações específicas para gestão de aquíferos físsuro-cársticos.

### 1.3. Localização e Acesso à Área de Estudo

A área de estudo está localizada no distrito de Crixalândia na região de Formosa, estado de Goiás e, é representada por uma poligonal de aproximadamente 30 km<sup>2</sup> (Figura 1.1). O acesso a partir de Brasília pode ser realizado pela BR-020, passa por Formosa e pelo distrito de Bezerra. A cerca de 4,5 km a norte de Bezerra toma-se uma estrada marginal de terra com acesso ao “Buraco das Araras”. Após percorrer 12 km, alcança-se a poligonal em que o estudo de caso foi desenvolvido.



**Figura 1. 1.** Mapa de localização e acesso à área de estudo. As áreas adjacentes que contêm poços tubulares profundos também foram utilizadas para a geração de dados para a pesquisa.

### 1.4. Materiais e Métodos

A pesquisa foi desenvolvida a partir da integração de diferentes ferramentas tradicionalmente aplicadas aos estudos hidrogeológicos, que incluem:

- Proposta de definição de aquífero físsuro-cárstico: esta etapa foi realizada a partir de levantamento bibliográfico, principalmente em artigos científicos. Foi dada ênfase:

- i) Ao conceito de aquífero fissuro-cárstico, incluindo os tipos de rochas que o compõe (ex.: lentes de calcários, dolomitos, margas em associação com folhelhos, xistos, filitos etc.);
- ii) À determinação das propriedades hidráulicas de acordo com os subtipos de aquíferos presentes (ex.: espessura ou volume de rochas carbonáticas em relação a rochas não carbonáticas);
- iii) Aos tipos de fluxo (ex.: laminar ou turbulento);
- iv) Ao grau de heterogeneidade (ex.: lentes de carbonatos ou presença de maciços margosos);
- v) À escala de observação e de abordagem nos estudos e demais parâmetros intervenientes na classificação de sistemas aquíferos mistos.

A validação dos conceitos propostos foi desenvolvida a partir da comparação dos casos avaliados em diferentes escalas de observação. Os parâmetros hidrodinâmicos dos mananciais fissuro-cársticos foram aferidos com reservatórios fraturados e cársticos clássicos, de forma que os valores de condutividade hidráulica fossem intermediários aos sistemas de porosidade única.

- Mapeamento geológico e pedológico: foram fundamentais para o entendimento da distribuição lateral dos tipos de rocha e sua projeção em profundidade, além da cobertura de solos que ocorrem sobrepostas. Para a determinação das espessuras das lentes de calcários foram integrados dados de furos de sondagens utilizados para a pesquisa mineral realizada na região (para fins de futura instalação de uma fábrica de cimento).

Todos os procedimentos de mapeamento foram realizados a partir dos métodos tradicionais de campo com apoio de imagens de satélite para integração dos dados e confecção do produto cartográfico em escala original 1:50.000. Esse produto auxiliou na interpretação de estruturas regionais responsáveis pelo fluxo da água subterrânea e para embasar a abordagem sobre os aquíferos estudados.

- Análise Potenciométrica: foi realizada a partir de dados de níveis de poços existentes na região, além de cotas das nascentes que foram cadastradas. Na área já existem sete poços cadastrados e cinco nascentes que vêm sendo monitorados mensalmente nos seis últimos anos.

A intenção não era confeccionar um mapa potenciométrico da área como um todo, mas sim determinar a distribuição dos blocos do aquífero e propor mapas potenciométricos segmentados, uma vez que, os aquíferos fissuro-cársticos em estudo são naturalmente compartimentados.

As medidas de nível foram realizadas a partir da boca do poço com base no método manual com uso de medidor sonoro da marca *Solinst*® (Water Level Meter), modelo 101. Trata-se de um equipamento elétrico que possui uma fita milimétrica de 10 mm de largura ligada a um sensor que, ao ser introduzido nos poços, emite um sinal sonoro ao tocar a água. Os sensores são feitos com aço inoxidável e revestidos em polietileno, que oferecem resistência e precisão (Figura 1.2). As cotas nas nascentes foram medidas com o auxílio de um GPS portátil dotado de barômetro que permite aproximação de alguns centímetros da elevação do local de instalação do poço.





**Figura 1. 2.** Medidor com sensor sonoro introduzido no poço. Modelo integrado por fita de medição milimetrada.

- Ensaio de infiltração *in situ*: foram realizados os métodos do infiltrômetro de anéis concêntricos e o teste do tipo *open end hole* com o intuito de determinar os valores da condutividade hidráulica vertical ( $K_v$ ) da zona não saturada. Na área da pesquisa foi realizado um ensaio para cada classe de solos cartografada.

De acordo com a ABGE (1996), os ensaios de infiltração representam testes de rebaixamento, realizados com carga constante ou variável (flutuação do nível d'água) e com injeção de água na zona não saturada do aquífero.

No método de infiltrômetro de anéis concêntricos é utilizada uma estrutura metálica com altura ( $H$ ) de 250 mm, que contém dois anéis concêntricos interligados encravados na superfície do terreno a uma profundidade ( $I$ ) (Figura 1.3).

O procedimento de campo consiste em preencher o anel externo com água até que o nível atinja a estabilidade ( $M_f$ ). Em seguida, preenche-se o anel interno e mede-se a distância entre a lâmina d'água e o topo desse anel ( $M_i$ ). As elevações das colunas d'água inicial e final são obtidas com base nas equações 1.1 e 1.2:

$$\text{Equação 1.1: } h_0 = H - I - M_i$$

$$\text{Equação 1.2: } h_f = H - I - M_f$$

Dessa maneira, a condutividade hidráulica vertical é determinada a partir dos dados obtidos e com o auxílio da equação 1.3:

$$\text{Equação 1.3: } K_v = U \cdot \frac{I}{\Delta t} \cdot \ln \frac{h_0}{h_f},$$

onde  $U$  = fator de correção de unidades para transformar mm/min para m/s; e  $\Delta t$  = tempo de rebaixamento entre  $h_0$  e  $h_f$ .

O método *open end hole* permite investigar diferentes profundidades, no caso dessa pesquisa foram estabelecidos os níveis de 50, 100, 150 e 200 cm (Figura 1.4).





**Figura 1. 3.** Ensaio de infiltração em superfície de solo com aplicação da técnica do infiltrômetro de anéis concêntricos. É importante manter o nível da água do compartimento externo mais elevado para se garantir que a infiltração a partir do compartimento interno seja vertical.



**Figura 1. 4.** Disposição dos tubos para o desenvolvimento de ensaio de infiltração em profundidade a partir do método *open end hole*. Os tubos de revestimentos dos furos a trado devem ser cravados cuidadosamente no fundo para se evitar que a água se eleve entre a parede externa do tubo de PVC e a parede do furo.

Os furos foram realizados com trados manuais e, em seguida, foram revestidos com tubos PVC de diâmetro e comprimento equivalentes aos furos. Os tubos foram preenchidos com água e a distância entre o topo do tubo e a lâmina d'água ( $M_i$ ) foi medida, a fim de determinar a altura da coluna d'água com o auxílio da equação 1.4:

**Equação 1.4:**  $h_0 = H - M_i$ .

Após um intervalo de tempo ( $\Delta t$ ), mediu-se novamente a distância entre o topo do tubo e a lâmina d'água ( $M_f$ ). Assim, a altura da coluna d'água final foi obtida a partir da equação 1.5:

**Equação 1.5:**  $h_f = H - M_f$ .

Por fim, a condutividade hidráulica vertical foi determinada com base na equação 1.6:

**Equação 1.6:**  $K_v = 2,303 \cdot \frac{R}{\Delta t} \cdot \text{Log} \left( \frac{h_0}{h_f} \right)$ ,

onde R = raio do tubo.

- Estudo Hidrológico: esta etapa da pesquisa foi executada com o auxílio dos dados de monitoramento entre os anos 2016 e 2022, além da continuidade das medições de vazão.

As medidas de vazão de nascentes foram realizadas a partir da técnica direta do volume aferido e com o uso de vertedouro. No primeiro caso, utilizou-se um recipiente com volume conhecido e cronometrou-se o tempo necessário para o seu preenchimento. Ao medir o volume preenchido em certo período, obteve-se a vazão média a partir da equação 1.7:

**Equação 1.7:**  $Q_v = \frac{vol}{t}$ ,

onde  $Q_v$  = vazão volumétrica (L/s), vol = volume (L) e t = intervalo de tempo (s) para preencher o reservatório (Carvalho, 2008).

No segundo caso, foi utilizado um vertedouro de Thompson (Figura 1.5), que consiste em uma chapa metálica ou de acrílico com abertura em forma de “V”, com ângulo  $\theta$  por onde o fluido escoa. O cálculo da vazão é realizado com o auxílio da equação 1.8:

**Equação 1.8:**  $Q = 1,4 \cdot \text{tang} \frac{\theta}{2} \cdot h^{5/2}$ ,

onde Q = vazão ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), 1,4 = constante adimensional,  $\theta$  = ângulo de abertura do vertedouro e h = altura da lâmina d'água (m) acima da base do corte do vertedouro (Delmée, 2003).



**Figura 1. 5.** Vertedouro triangular de Thompson. Neste sistema a vazão é proporcional à elevação da onda que se forma em virtude da reação ao barramento do fluxo.

## **CAPÍTULO 2 - REFERENCIAL TEÓRICO E PROPOSTA DE MODELO CONCEITUAL DE AQUÍFERO FÍSSURO-CÁRSTICO**

Este capítulo tem como objetivo apresentar o estado da arte do conhecimento sobre os aquíferos físsuro-cársticos e suas similaridades e contrastes com relação aos reservatórios cársticos considerados clássicos ou exclusivamente associados a rochas carbonáticas.

Neste sentido, este assunto é exposto na forma de um artigo científico a ser submetido a um periódico com temática vinculada a recursos hídricos.

Embora seja um documento com amplo caráter de revisão, com citação de estudos de casos e embasado em dados da literatura, também traz diversos aspectos propositivos e discussões, incluindo:

- A formalização da definição do modelo conceitual de aquífero físsuro-cárstico;
- Questões de escala, dimensões das lentes de rochas carbonáticas e continuidade lateral das fácies de rochas associadas aos sistemas físsuro-cársticos;
- Ambientes de deposição simultânea de rochas carbonáticas e siliciclásticas;
- Técnicas de estudos dirigidas aos mananciais físsuro-cársticos.

Da forma como este capítulo foi estruturado, na prática, não representa apenas o avanço do conhecimento até então produzido sobre estes aquíferos, mas já inclui proposições, análises e discussões que representam resultados da presente dissertação de mestrado.

Sendo assim, a ampla maioria das ilustrações apresentadas é inédita, tendo sido produzidas no âmbito deste trabalho. As referências citadas neste capítulo são encontradas ao fim da dissertação no item Referências Bibliográficas, referentes à dissertação completa.

# Characterization of Fissure-Karstic Aquifers: Conceptual Bases and Propositions

Drielly Souza Rodrigues<sup>1</sup>; José Eloi Guimarães Campos<sup>1</sup>

1. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, 70910900 Brasília, DF, Brasil. E-mail: [driellysrodrigues@gmail.com](mailto:driellysrodrigues@gmail.com) (D.S. Rodrigues); [eloi@unb.br](mailto:eloi@unb.br) (J.E.G. Campos).

## Abstract

The aim of this paper is to contribute to the knowledge about mixed aquifers composed by two types of porosity: karstic dissolution and fracturing. This type of aquifer is commonly cited in the literature, but often informally, without a strict definition and all the necessary constraints for the proper understanding of the conceptual model. Thus, in this paper it is proposed that the fissure-karstic aquifers are those in which secondary planar porosity (mainly fractures and bedding planes) occurs together with secondary porosity by karstic dissolution in the same hydrostratigraphic unit. These aquifers can be quite complex, since the water flow can change from laminar to turbulent or the opposite, when groundwater migrates through the different rock types. An important aspect to be evaluated is the observation scale and dimensions of these rock bodies. Fissure-karstic aquifers comprise carbonate lenses with a maximum of tens of meters in thickness and hundreds of meters wide. When carbonate is continuous or the lenses are very thick and laterally amalgamated the aquifers should be approached as a karstic system. Another important point is that water from fissure-karstic aquifers is exploited by single wells that cut different sections of both types of rock, and so, the reservoir management should be treated as a single system. As a conclusion, the final approach shows many geological situations result in mixed aquifers that could be treated as fissure-karstic. The inclusion in an adequate conceptual framework is very important to many applications, including aquifer characterization, groundwater management and water resources quantification.

**Keywords:** *fissure-karstic aquifer; conceptual model; groundwater management.*

## Introduction

Even though aquifers related to different rock types or contrasting rocks sets are quite common in nature, many of these groundwater reservoirs are not well described or understood. These aquifers are important to water supply systems, and because of this, must have the conceptual model well described and documented. The technical and academic literature is still incomplete concerning to mixed aquifers and in many cases their complexity is treated inappropriately.

Aquifers can be classified by the type of the dominant porosity associated with the material or rocky massifs: intergranular, fractured and karstic are the main fundamental conceptual models to describe groundwater reservoirs. However, mixed aquifers are very common and represent the combination of two or more fundamental models. Double porosity aquifers are those in which primary matrix porosity and secondary planar porosity coexist in the same hydrostratigraphic unit (commonly sandstone or low-grade metamorphic sandy rocks). Another class of mixed aquifer is related to the fissure-karstic model, where carbonate rocks are associated with non-carbonate rocks (mainly pelitic rocks).

The classic karstic aquifers are formed by thick and continuous layers of carbonate rocks, in which porosity is the result of the dissolution of carbonate that forms cavities through which water percolates by means of channeled flow, usually of turbulent-type (White, 1969; Legrand & Stringfield, 1973; Motyka, 1998; Kaufmann & Braun, 1999; Vesper *et al.*, 2003; Quinn *et al.*, 2006, Worthington *et al.*, 2017).

According to White (2002), karstic aquifers can be described as having triple porosity, including matrix, fissure and dissolution, where the flow migrates along each of the different scales and types of pores. However, this model is seen as merely theoretical, since it is difficult to observe, simultaneously, the three types of porosity even in different proportions. In this case, it would be necessary the presence of a granular limestone (calcarenite or grainstone), with remaining interstitial porosity, with fracturing and dissolution along the planes of bedding and fractures. This situation is rare, because carbonate rocks commonly contain cements that obliterate primary porosity during their lithification and thus, carbonate rock would have mainly two types of porosity: fractures (or bedding plane space) and dissolution cavities.

In addition to the presented review, the mixed aquifer is understood as the one in which the association between two types of porosity occurs and can be classified as: double porosity and fissure-karstic. The concept of double porosity aquifer was originally proposed by Barenblatt *et al.*, (1960) to describe flow in porous-fractured media applied to the oil industry. This type of reservoir occurs most commonly associated with clastic sedimentary rocks or low-grade metamorphic sandy metasediments (Moench, 1984; Berryman & Wang, 1995; Ackerer *et al.*, 2014; Paula & Campos, 2016).

On the other hand, some mixed aquifers are composed, concomitantly, by the fissured-type porosity and by karstic dissolution (even if not well developed). This type of reservoir is quite complex and little mentioned in scientific literature, since the knowledge about it is still limited. There is an inconsistency with regard to the definition of this type of mixed aquifer, including its conceptualization. In the literature, it is possible to verify different terms associated to the same descriptive objective: fissure-karst aquifer (Guerra, 1986; Mourão *et al.*, 2001 and Malik *et al.*, 2019), fissured-karstic aquifer (Debieche *et al.*, 2002 and Lousada & Campos, 2005), karst-fissured aquifer (Witkowski *et al.*, 2003), pelitic-carbonate aquifer (Gastmans *et al.*, 2005), fissured carbonate aquifer (Tallini *et al.*, 2014), carbonate fissure-karstic aquifer (Rozkowski & Rozkowski, 2016), fissured karst aquifer (Robineau *et al.*, 2018) and fractured and karstified aquifer (Fischer, 2020).

Despite the common different terminology, the related studies do not bring a formal concept about this type of aquifer. Thus, the objective of this paper is to propose the definition of a standard terminology for the fissure-karstic aquifer, emphasizing the types of rocks associated (e.g. limestone lenses, dolomite, marls in association with shale, siltstone or marble with schist and phyllite, etc.) and associated flow types (laminar or turbulent).

### *Geological setting related to fissure-karstic aquifers*

The simultaneous deposition of carbonate and terrigenous in mixed platform successions requires a clear and warmer water environment (associated with the photic zone), that allows for carbonate deposition in the shallows and the deposition of terrigenous in the deep zones (Dorsey & Kidwell, 1999, Khetani & Read, 2002, Arana *et al.*, 2005, Campos *et al.*, 2012, Thran *et al.*, 2020).

Consequently, the carbonate rocks lens commonly occur interfingered laterally and vertically with non-carbonate rocks. The lenses associated with pelite (shale and siltstone) can have variable dimensions from tens of meters up to a few kilometers, and thicknesses of up to a few tens of meters.

In other geological situations, continuous layers of marl sediment can be deposited in chemical and physical-chemical circumstances in which the conditions are favorable for carbonate deposition, but with higher intake of fine terrigenous. Sediment from mixed platform successions (carbonatic-siliciclastic) form rocks of the same nature when submitted to metamorphism, generating marble lenses interspersed to schist or phyllite (Campos *et al.*, 2012).

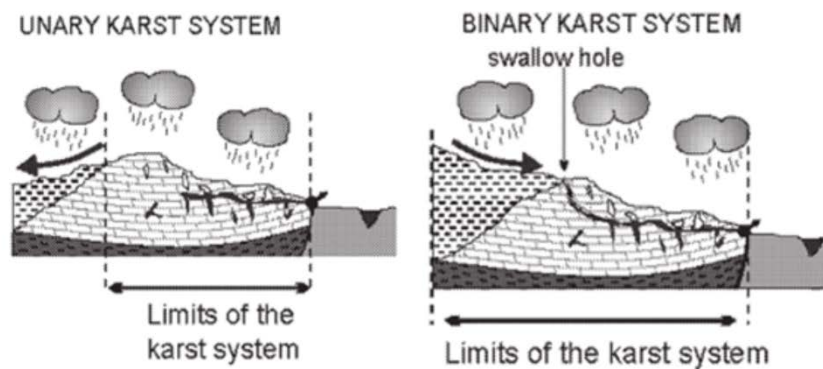
Therefore, all sets of mixed rocks, with contribution of carbonate lenses associated with terrigenous rocks (commonly pelitic) will compose mixed aquifers classified as fissure-karstic. These aquifers are naturally anisotropic and can be classified as homogeneous or heterogeneous. When homogeneous, they are represented by continuous layers of marls with a high degree of anisotropy generated by bedding and fracture planes and dissolution voids.

When heterogeneous, they are composed of carbonate rock lenses with restricted lateral continuity interfingered vertically and laterally with rocks that are poorly permeable, with low hydraulic conductivity, such as siltstone, shale, phyllite or schist.

Marsaud (1996) proposed the terms unary and binary karst system, respectively, related to water flow exclusive in carbonated rocks and groundwater flow in carbonate and non-carbonate rocks (Figure 2.1). By this point of view, the classical karst would be classified as a unary karst system where the recharge, water flow and discharge occur in carbonate rocks and the fissure-karstic model represents a binary karst system, where the recharge or discharge can occur in carbonate or non-carbonate interfingered rocks.

Besides the above cited authors, there are many other contributions to the karstic aquifers modeling and the karstic variability types, including: Jeannin & Sauter, (1998); Malozewski *et al.*, (1998 and 2002); Scanlon *et al.* (2003); Bakalowicz, (2005) and Ford & Williams, (2007).





**Figure 2. 1.** Illustration of unary and binary karst systems related to types of rocks where the recharge, flow and discharge occur (compiled from Marsaud, 1996).

## Material and Methods

The present research was developed by the integration of literature data with new propositions related to the conceptual model to the understanding of groundwater circulation in carbonate and non carbonate rocks reservoirs.

The main method applied is the integration of previous information with new insights by the use of schematic illustrations and detailed descriptions, to emphasize the main objective of the applied research.

No specific type of chemical, physical or statistical analysis was applied, once the main interest includes qualitative evaluation, including definitions discussions with detailing of the groundwater flow in complex framework media. In this sense, the geology and the carbonated rock depositional environments were specially considered.

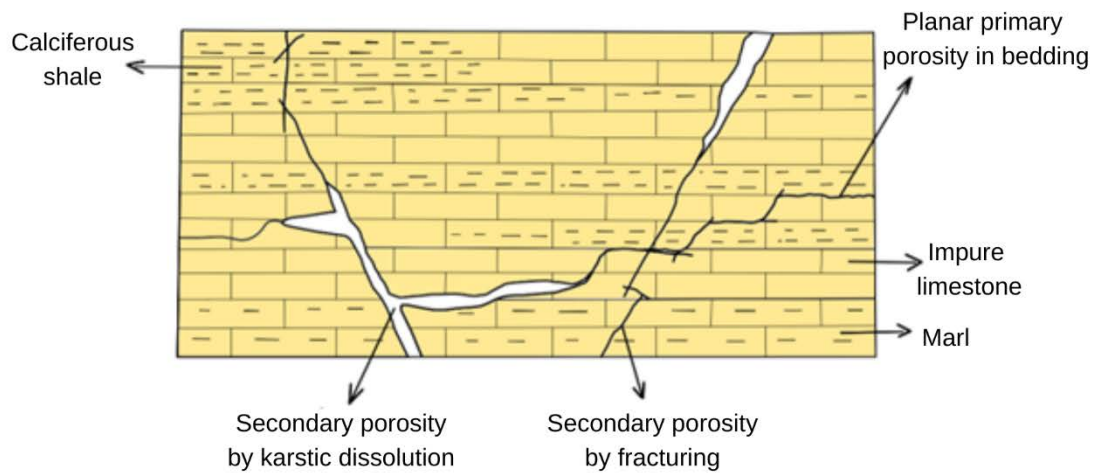
## Results and Discussions

### *The conceptual model to fissure-karstic aquifer*

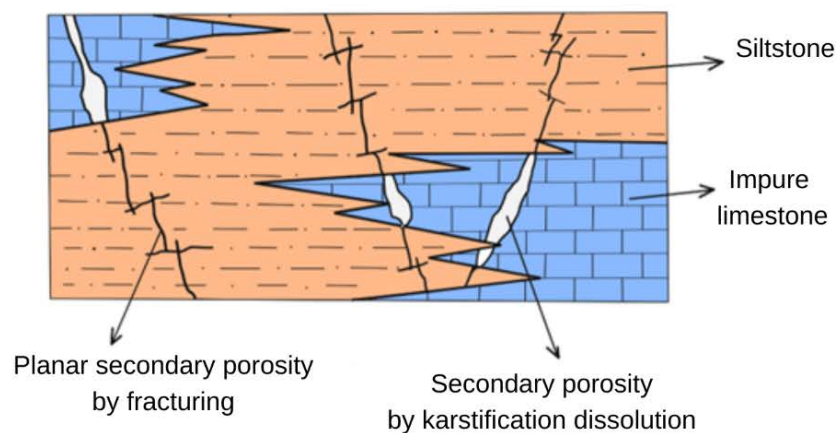
As explained above, fissure-karstic aquifers are groundwater reservoirs that present simultaneously both types of porosity, secondary planar porosity by fracturing and secondary channel porosity by karstic dissolution. In order to fit on this conceptual aquifer model, the two types of pores must occur in carbonate or non-carbonate rocks, which combined forms the aquifer rocky massif.

In general, planar porosity can be primary (e.g., bedding planes) or secondary (e.g., anisotropies associated with fractured zones). Porosity associated with karstic dissolution is commonly limited, due to discontinuities or limitation of carbonate rock bodies.

Aquifers framed in this conceptual model always present strong anisotropy. However, they can be classified as homogeneous or heterogeneous. When associated with continuous layers of impure carbonate rocks (marls), they are considered to be homogeneous (Figure 2.2) and when related to carbonate rock lenses interspersed to non-carbonate rocks, they are considered to be heterogeneous (Figure 2.3).



**Figure 2. 2.** Schematic illustration exemplifying the conceptual model of fissure-karstic aquifer in a homogeneous system represented by clay-limestone interspersed with marl.



**Figure 2. 3.** Idealized representation of the conceptual model of fissure-karstic aquifer in a heterogeneous system with carbonate rock lenses interfingering with siltstone.

With regard to classification by other criteria, these aquifers may be: i) unconfined or confined; ii) associated with local to regional hydrogeological flow; and iii) have laminar to turbulent flow as a function to the opening of fracture/bedding planes and dissolution degree.

Another important aspect regarding the framing of these aquifers is related to the size of carbonate rock lenses and the observation scale. When individual layers of both carbonate and non-carbonate rocks have thicknesses of tens of meters, the reservoirs should be treated as individual aquifers. However, when the layers or lenses of carbonate rocks occur with thicknesses of up to a few dozens of meters and up to hundreds of meters of lateral extension and/or are interspersed with other non-calcareous rocks, they should be treated as a fissure-karstic aquifer type.

This differentiation is based on the fact that the exploitation and management of the combination of carbonate rocks (with karstic dissolution) and non-carbonate rocks (fractured) are carried out jointly. Wells that intercept these two rock types produce water with mixed chemical features. Similarly, the determination of protection areas, recharge areas, sage yields, and hydraulic properties should consider, simultaneously, the existence of the two sets of rocks.

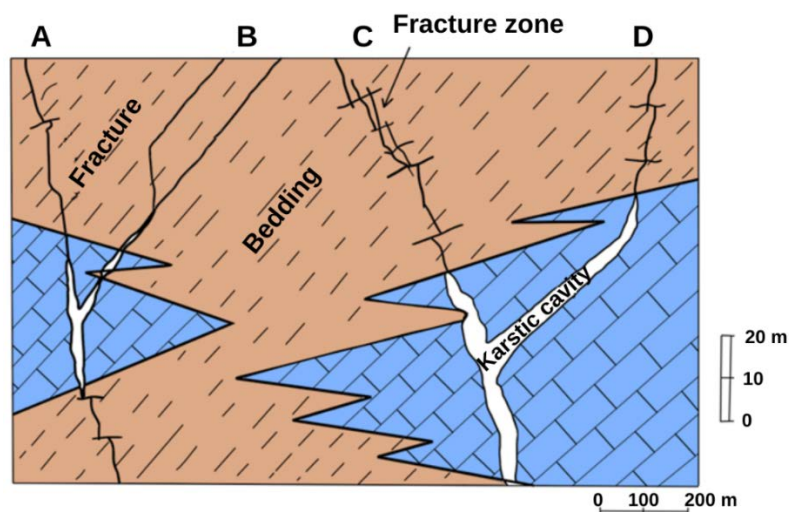


One of the contrasts between mixed double porosity and fissure-karstic aquifers is linked to the origin and nature of porosity. Double porosity aquifers present a residual primary porosity (matrix or intergranular) and another planar porosity that can be primary (bedding planes) or secondary (tectonic or non tectonic). The fissure-karstic systems present a secondary porosity developed by dissolution and, yet, another secondary porosity formed by fracture planes, which may also be associated with primary bedding planes.

Another contrast is that mixed double porosity aquifers are composed of a single geological unit, because fractures and matrix pores are preserved in the same lithological unit. However, the fissure-karstic aquifers represent a composite lithological unit that consist of a single hydrostratigraphic unit, since they are commonly related to situations where carbonate rocks occur in the form of lenses with restricted lateral continuity interspersed with poorly permeable rocks. In this case, the hydrodynamic parameters differ from fractured aquifers or classical karstic, they commonly present mean values depending on the contribution of each rock type.

Aquifers related to the fissure-karstic class still have a factor that can make their understanding more complex in terms of hydraulic parameters. In these media, the flow features both laminar pattern in small opening fractures and turbulent flow in dissolution cavities / fractures with wide opening (Figure 2.4). In these circumstances, the determination of the average linear flow velocity, hydraulic conductivity, storage coefficient and other variables, are difficult.

This type of reservoir is naturally anisotropic and consequently compartmentalized. Its distribution in blocks is due to the heterogeneous nature of karstification, which causes the dissolution of carbonate rocks to vary at different depths as a function of recharge water circulation.



**Figure 2. 4.** Cross section showing the potential change in laminar and turbulent flow regime in heterogeneous fissure-karstic aquifer composed of laterally interfingered limestone lenses with laminated shale. It shows the following flow possibilities in time and space: A - laminar flow in fracture plane to turbulent flow in dissolution cavity and laminar flow in fracture; B - laminar flow in fracture to into bedding plane; C - laminar / turbulent flow in fracture zone to turbulent flow into karstic cavity and D - laminar flow in fracture to turbulent flow in karst opening.

Unlike classical karst systems, fissure-karstic aquifers do not present intense karstic dissolution; hence they are not associated with typical features of the hydrology and the karst landscape, including the formation of large cavities, presence of large sink holes and springs, and development of several types of speleothemes.

#### *Approaches for the study of fissure-karstic aquifers*

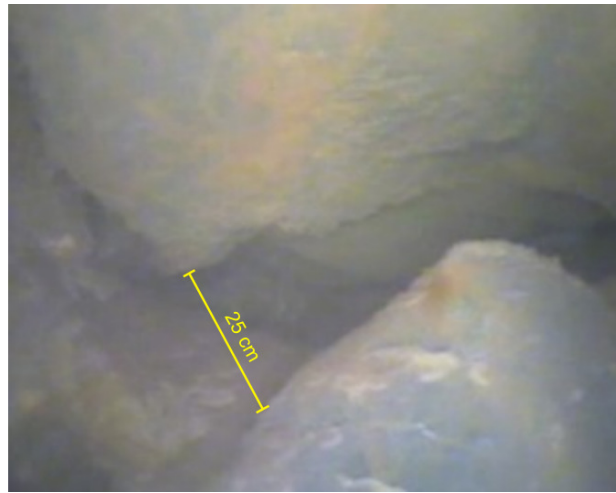
Usually, the same tools and techniques that are applied to study classical karstic aquifers should be applied to mixed aquifers. However, the type of conceptual model and possible adaptations of the common methods applied to characterize these reservoirs should be taken into account.

Goldscheider & Drew (2007) edited a book concerning to methods of studies applied to karstic aquifers, which can be functional to the fissure-karstic medium. Besides the techniques presented in this important publication, other must be considered, and are, as following, listed and commented.

#### Water points inventory

The inventory of water points is a primary and indispensable tool for hydrogeological studies. It is carried out from the study of deep wells that allow direct access to aquifers to obtain all necessary information to be used in its characterization. The inventory of water points is the registration of deep wells, springs and shallow wells in the study area. The geological descriptions (rock types, weathering zones, fractures, veins presence) and constructing logging (screen position, diameter, pumping test) are among the most important information.

In the case of fissure-karstic aquifers, geological description is fundamental in order to define the presence of lenses, their thicknesses and relationships between carbonate and non-carbonate rocks, water inputs associated with the different types of intercepted rocks, among other aspects. Video inspection or profiling data are very important and should be applied whenever possible for studies of complex fissure-karstic systems. Figure 2.5 shows an example of a snapshot image of a system classified as mixed aquifer of the fissure-karstic type.



**Figure 2. 5.** Example of an image obtained from video inspection of deep well (SS-01), drilled in the fissure-karstic system located in the São Sebastião region, Federal District, Brazil. The dissolution cavity has a maximum opening of 25 cm, at 96 m depth (Souza, 2013).

### Hydraulic characterization

The hydrodynamic characterization of aquifers is achieved by analysing pumping test data from monitoring wells. In the case of fissure-karstic aquifers, the Moench Method (Moench, 1984) is the most applied, which is based on the assumption of diffuse matrix-fracture flow and considers the flow and storage conditions in a continuous medium. Another strategy is to use the weighted average by the volume of each portion (calcareous and non-calcareous) can be considered an approximation, so that it is possible to obtain minimally coherent data for application to the type of aquifer under study.

The hydrodynamic parameters (hydraulic conductivity, transmissivity and storage coefficient) in classical aquifers represent average values of the related rocks. In the case of the fissure-karstic model, the values do not match the fractured or karstic aquifers individually, but mean values depending on the contribution of each set of rocks in the system.

In any case, the values of hydrodynamic parameters obtained, with emphasis on hydraulic conductivity and storage coefficient, should be evaluated and compared with individual systems (fractured and karstic) to verify the coherence of the obtained data.

### Hydrochemical studies

Studies on the chemical composition of water in the fissure-karstic systems should be applied to verify the water mixture of the different reservoirs, including meteoric water, water of exclusive circulation of non-carbonate and carbonate rocks, as well as water mixtures. Sampling can be carried out in deep wells, springs and inlets and outlets of existing natural cavities.

The seasonal variation in the composition of water due to dry and rainy periods can be especially important for the definition of water recharge and transport conditions between fractures of non-carbonate rocks and in cavities in contact with limestone.

The same chemical species and substances analyzed in the different aquifer types should be evaluated in fissure-karstic systems. However, hardness, alkalinity, pH, bicarbonate, carbonate, calcium and magnesium should be prioritized in order to allow an evaluation of water mixtures, water-rock interaction in different contexts of influence of carbonate rocks and non carbonate rocks. A common characteristic observed in the fissure-karstic systems is that the average composition of water is distinct from the classical karstic aquifers, with lower hardness, pHs close to neutral or slightly alkaline and lower relative alkalinity. These features are due to the restricted karstification observed in these mixed aquifers.

### Potenciometric maps

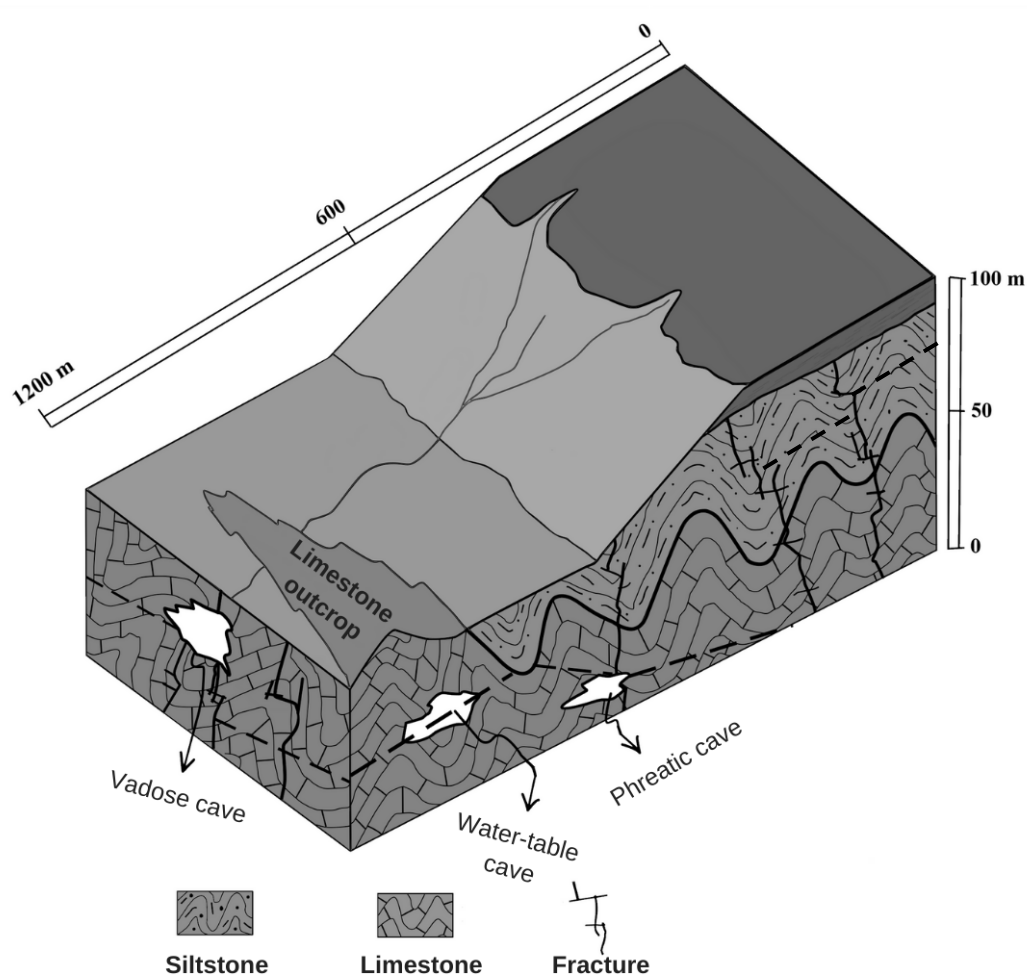
Aquifers classified as fissure-karstic type, as well as the karstic systems, are often compartmentalized. The compartmentalization can be controlled by faults or by the lateral discontinuity of carbonate layers and lenses. Thus, the potentiometric analysis represents more faithfully the real nature of these aquifers, being essential that the presence of these compartments is taken into account.

For the production of a potentiometric map in a mixed carbonate system, the application of the following methodological screenplay is suggested:

- Determine the total hydraulic head for each well located in the studied area, including wells possibly located in adjacent areas (to improve the interpolation process);
- Trace the large structural lineaments that intersect the study area, especially those potentially classified as deeper fractures and faults;
- Delimit the blocks separated by these lineaments that should be treated as individual compartments;
- Interpolate the data separately for each compartment.

The construction of a segmented map is interesting to better characterize the reality of this type of aquifer, since in many cases there is no single and continuous potentiometric surface, but large lateral variations of depth in restricted lateral distances. Another aspect that should be considered is the possibility of occurrence of confined sections within the aquifer, in which fractured pelitic rocks can take part in as confining layers.

A more appropriate possibility of representing the potentiometric characteristics is by the construction of three-dimensional models such as block diagrams. From this perspective it is possible to evaluate the relationships between structures and changes in the depth of the potentiometric surface, the presence of vadose and saturated caves, the relationship of karstification (even if incipient) and the main structures, in addition to the possible groundwater flow direction in each compartment. Figure 2.6 illustrates an example of a block diagram representing a case study of a fissure-karstic aquifer with extensive potentiometric lateral variation.



**Figure 2. 6.** Conceptual model of fissure-karstic aquifer. This system is associated with the Sete Lagoas Formation, Bambuí Group in the Formosa region, Goiás State, Central Brazil.

### Tracer test

Tracer tests are very relevant for studies of karstic aquifers. When performed in fissure-karstic systems, these tests are more commonly applied directly to wells, since the presence of sinks holes and springs is more restricted than in classical karstic areas. In this case, the tracer should be applied to wells situated upstream of the flow and checked in downstream wells, after the boundary conditions of each case studied and the compartments of the aquifer are preliminarily defined.

For the determination of launch and sampling points, a previous structural and lineament study should be carried out in order to increase the success of the tracer test. Another important aspect is the determination of sampling periodicity, since the mean linear flow velocity is lower when compared to the more typical karsts.

The guidelines to develop tracer tests, type of tracer, volume of tracer, sampling methods, analysis techniques and all the practical aspects involved can be find in Käss (1998).

## Conclusions

This work presented the concept of fissure-karstic aquifer, the tools applied to its study, in addition to the main differences relative to karstic aquifers.

Aquifers composed of two porosities defined as fissure-karstic can be associated with individual layers of clayey limestone (marls) being described as homogeneous and anisotropic or being linked to lenses of carbonate rocks interspersed or interfingering to non-carbonate rocks (e.g. shale, siltstone or schist) and in this case described as heterogeneous and anisotropic.

In the analysis of hydrogeological system fitted in the conceptual model of fissure-karstic, the observation scale and the dimensions of carbonate rocks are fundamental. When impure limestone layers are very thick and continuous or the limestone lenses become very huge, larger than 10 km<sup>2</sup> (e.g. > 5 x 2 km lateral length) and tens of meters thick, the system should be treated as an individual karst. The fissure-karstic model is only applicable for cases where the contribution of carbonate rock features dimensions of hundreds of meters in length.

The classification of the underground water reservoir in an appropriate conceptual model is important not only from the theoretical point of view, but most significantly as the basis for validation of the aquifer numerical simulation, the hydraulic parameters obtained by field tests, management processes, estimating the water reserves, site remediation and many other practical applications.

Fissure-karstic systems, although not formally treated under this concept, are quite common in the literature (generally being described as karstic systems) and are important for the public water supply, once the sedimentary environment responsible to simultaneous deposition of carbonate and non-carbonate rocks are common in the geological record.

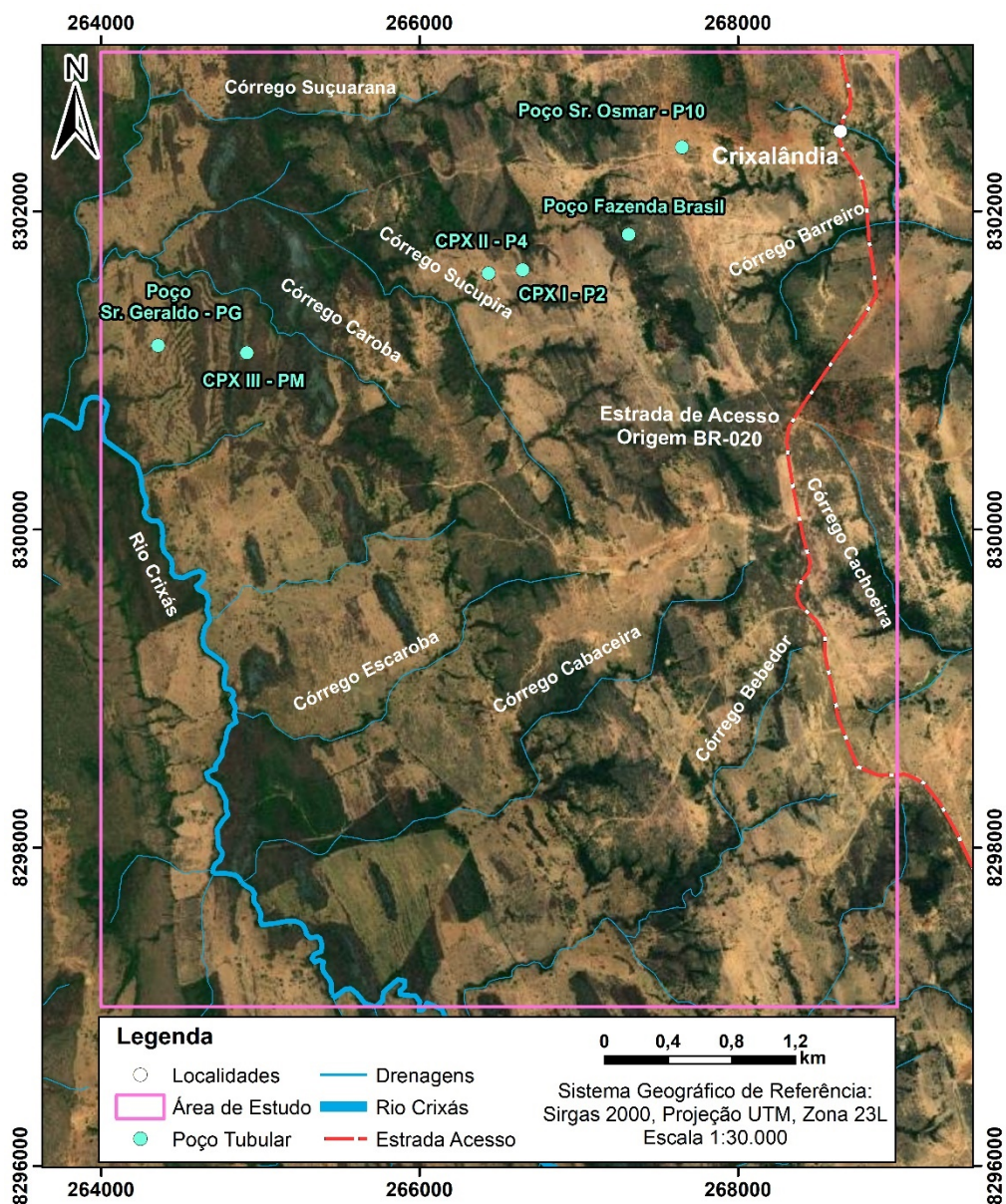


## CAPÍTULO 3 - ESTUDO DE CASO: DISTRITO DE CRIXALÂNDIA, REGIÃO DE FORMOSA, GOIÁS

### 3.1. Introdução

A poligonal utilizada para a aplicação do modelo conceitual está localizada no contexto geológico que inclui o topo do Grupo Paranoá em contato com a base do Grupo Bambuí na porção externa da Faixa Brasília.

As principais feições hidrológicas de superfície estão representadas na Figura 3.1, bem como os acessos locais (estradas de terra e trilhas).

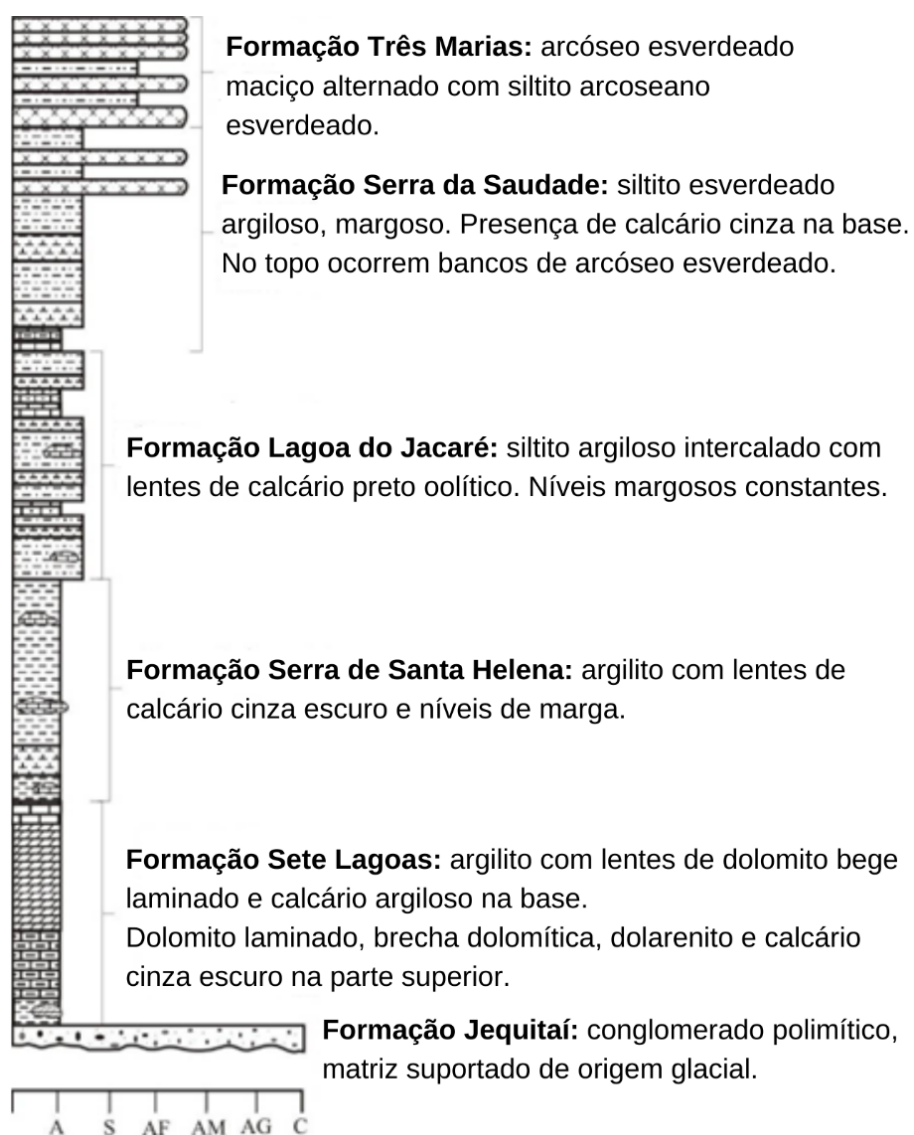


**Figura 3. 1.** Principais cursos d'água e poços existentes na área de estudo (CPX I – PII, CPX II – P4, CPX III -PM, Poço Sr. Geraldo – PG, Poço Sr. Osmar e Poço Fazenda Brasil). O poço SEMARH foi usado para monitoramento, mas se encontra fora da poligonal, está localizado a 1 km ao norte do Poço Sr. Osmar. Georreferenciamento sobre imagem de alta resolução espacial (Fonte Google Earth, 2021).

### 3.2. Geologia Regional

A região de interesse deste trabalho situa-se na bacia do Rio Crixás e inclui a sua confluência com os córregos Suçuarana, Sucupira, Caroba, Escaroba, Cabaceira e Bebedor, na qual ocorrem exclusivamente sedimentos atribuídos ao Grupo Bambuí, além de coberturas recentes (solos rasos e aluviões).

O Grupo Bambuí (Figura 3.2), de idade neoproterozoica, corresponde a uma sucessão pelito-carbonática-arcoseana depositada em ambiente de sedimentação exclusivamente marinho. Compõe ampla cobertura sobre o Cráton São Francisco e, está presente também, em toda a extensão da porção externa da Faixa de Dobramentos Brasília. É dividido da base para o topo nas seguintes formações: Sete Lagoas, Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré, Serra da Saudade e Três Marias (Dardenne, 1978).



**Figura 3. 2.** Ilustração da coluna estratigráfica do Grupo Bambuí (Dardenne, 1978).



*Formação Sete Lagoas:* na Faixa de Dobramentos Brasília as litologias que constituem essa formação são lentes de rochas carbonáticas (calcários e dolomitos) de diferentes dimensões interdigitadas com siltitos, folhelhos e margas. Em contrapartida, na região cratônica as fácies carbonáticas dessa formação são predominantes e ocorrem como camadas espessas e contínuas (Dardenne, 1978).

*Formação Serra de Santa Helena:* é composta por siltitos cinzas e esverdeados, margas, folhelhos pretos, lentes e lâminas calcárias. Em algumas áreas de ocorrência esta unidade apresenta-se rica em muscovita detrítica que acumula no plano de acamamento. Também podem ocorrer, de forma local, camadas de arenitos líticos muito finos e grauvacas líticas ricas em illita.

*Formação Lagoa do Jacaré:* integrada por calcarenitos, calcilutitos, calcários microcristalinos de coloração preta e calcários sílticos. Da mesma maneira que a unidade basal, na Faixa Brasília as fácies carbonáticas ocorrem na forma lenticular.

*Formação Serra da Saudade:* representada por siltitos e argilitos cinzas intercalados por camadas mais arenosas, sendo estas de maior espessura no topo com truncamentos de camadas de baixo ângulo.

*Formação Três Marias:* constituída por um conjunto de siltitos, grauvacas líticas e arcóseos com coloração que varia de verde a marrom-escuro intercalados com siltitos calcíferos, siltitos argilosos e predominância de arcóseos de granulometria fina a média. Estruturas sedimentares como acamamento plano-paralelo, marcas onduladas, laminações cruzadas e *hummockys* são comumente observados.

### **3.3. Geologia Local**

Na poligonal estudada são reconhecidas rochas correlacionáveis às unidades basais do Grupo Bambuí como siltitos, margas e calcários da Formação Sete Lagoas e siltitos com camadas delgadas de grauvacas e arenitos finos da Formação Serra de Santa Helena.

A associação de fácies carbonáticas da Formação Sete Lagoas é composta pelas seguintes litofácies: calcário cinza micrítico maciço que ocorre em ampla predominância (Figura 3.3); calcário cinza claro micrítico estratificado (ocorre no topo e na base de lentes carbonáticas); calcirudito cinza escuro, aspecto brechado com intraclastos micríticos (ocorrência local).

Esta unidade é exposta na porção mais baixa da topografia e mantém-se sob os siltitos da unidade sobreposta. As lentes de calcários podem ter mais de 1,5 km de comprimento, mas são limitadas em sua largura e espessura, respectivamente em até 500 m e não superior a 80 m. Além das lentes carbonáticas, esta unidade também é constituída por folhelho, silito argiloso laminado e margas.

Os siltitos da Formação Serra de Santa Helena apresentam acamamento com alto ângulo de mergulho e mica detrítica ao longo dos planos de acamamento (Figura 3.4). A cor da rocha fresca é cinza esverdeada em função da abundante presença de ilita, enquanto que a cor de alteração é rosada. Os afloramentos desta unidade são comuns ao longo da quebra de relevo que está situada entre os dois patamares existentes na área delimitada para o estudo.

As informações obtidas dos poços tubulares mostram que a estratigrafia se mantém lateralmente, onde os poços mais profundos sempre interceptam os calcários em profundidades maiores que 60 m.



**Figura 3. 3.** Exposição de calcário cinza micrítico maciço a pouco estratificado da Formação Sete Lagoas.

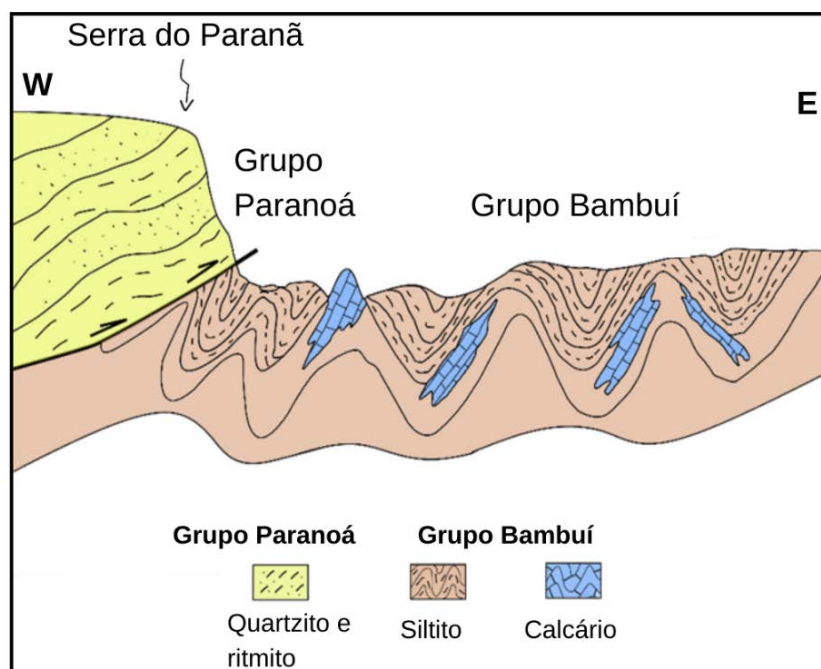


**Figura 3. 4.** Siltito argiloso com cor de alteração rosada e acamamento vertical da Formação Serra de Santa Helena.

### 3.4. Contexto Estrutural

No contexto estrutural são observadas dobras em estilo *chevron* apertadas e assimétricas correlacionadas à fase F<sub>1</sub>. Apresentam eixos em torno de N10-20W e planos axiais com mergulho para SW e desenvolvimento de clivagem espaçada de plano axial (foliação principal).

Essas dobras foram geradas durante a estruturação do Sistema de Cavalcamento Paranoá, que foi responsável pela superposição do Grupo Paranoá por sobre o Grupo Bambuí e tem como expressão regional a Serra do Paranoá situada a 2,5 km a oeste da área em estudo (Figura 3.5). Esta fase de dobramentos resulta na verticalização do acamamento, o que pode ser visto tanto em planos deposicionais de siltitos, quanto nas camadas carbonáticas mais espessas.



**Figura 3. 5.** Seção geológica regional W-E com a representação esquemática da falha de empurrão da Serra do Paranoá e o padrão de dobras apertadas da fase F<sub>1</sub> de correntes do encurtamento crustal, devido á compressão leste-oeste com movimentação de massa para leste em direção ao Cráton São Francisco.

A Fase F<sub>2</sub> é materializada por dobras suaves com eixos aproximadamente E-W que redobram os eixos da Fase F<sub>1</sub> e são responsáveis pelo desenvolvimento do padrão de domos estruturais, comumente observados em imagens de satélite e em afloramentos métricos na região (Figura 3.6).

As duas fases deformacionais citadas correspondem ao estágio de deformação dúctil-rúptil mais importante na porção externa da Faixa de Dobramentos Brasília, sendo que a orientação do estiramento mineral, relacionada a estas fases coaxiais, indica movimentação de oeste para leste em direção ao anteparo representado pelo Cráton São Francisco.

Ao final do Ciclo Brasileiro, em um estágio fortemente rúptil, foi desenvolvida a fase F<sub>3</sub>, caracterizada por um conjunto de discontinuidades planares representadas por fraturas e falhas normais. Na poligonal foi possível evidenciar dois sistemas principais de fraturas/falhas.





**Figura 3. 6.** Domo estrutural representado por dobra apertada com eixo principal N20W (destacada em vermelho) e duplo caimento de eixo (destacado em amarelo). Localizado a 2,5 km da área de estudo.

O primeiro de direção geral N-S com variação de até 15° para leste e oeste é caracterizado como fraturas de alívio da compressão principal. Aproveita, localmente, a direção da foliação  $S_1$  para seu desenvolvimento.

O segundo sistema é composto por duas famílias que representam, com pequenas variações, um par conjugado N45E e N45W de fraturas de cisalhamento. Naturalmente, ocorrem outras direções de menor importância, que foram desenvolvidas a partir da reativação de anisotropias geradas durante as fases de deformação anteriores ( $F_1$  e  $F_2$ ).

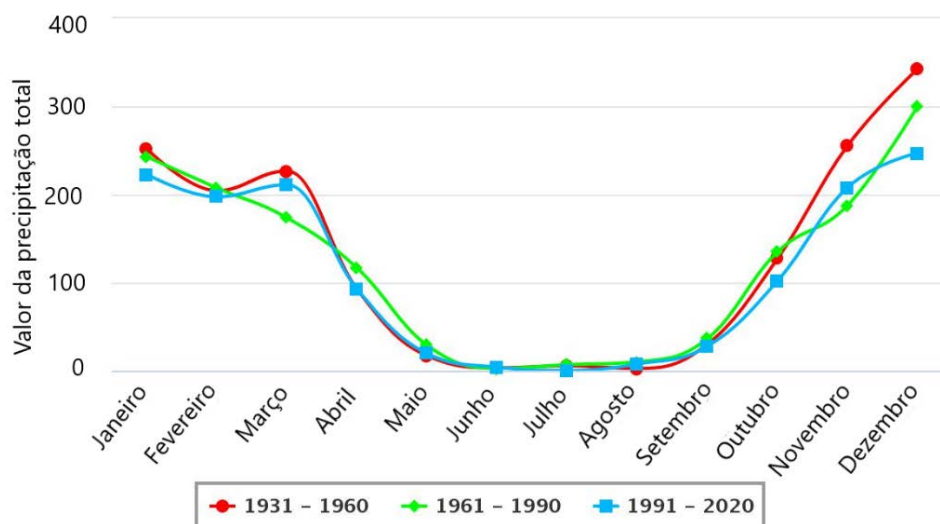
### 3.5. Clima

O clima na região é caracterizado por alternância de duas estações, sendo caracterizado por inverno seco e o verão chuvoso. Assim, o período chuvoso abrange os meses de novembro a maio e a estação seca se prolonga entre junho e setembro.

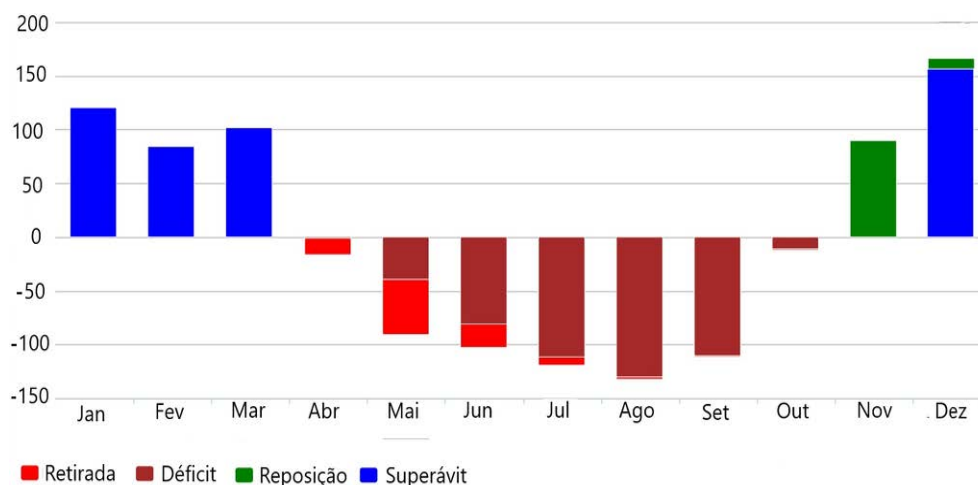
Para as variações da precipitação foram utilizados dados da estação Formosa (Figura 3.7). Esse padrão é típico da região dos cerrados e a forte sazonalidade climática não é apenas observada na distribuição das chuvas, mas se repete na umidade relativa do ar, nebulosidade da atmosfera, temperatura, evaporação e demais parâmetros climatológicos, de forma que o balanço hídrico (Figura 3.8) é desfavorável para a recarga.

Desta forma, a recarga efetiva é verificada entre os meses de dezembro (quando se inicia a elevação dos níveis freáticos) até abril (quando, em média, observa-se o início do rebaixamento dos níveis dos aquíferos).

Os intervalos de tempo em que os processos hidrológicos ocorrem podem ser modificados em função de mudanças no comportamento das chuvas com destaque para o período de início das chuvas, períodos de veranicos no mês de janeiro e acumulado das chuvas no período de precipitações mais significativas (novembro a fevereiro).



**Figura 3. 7.** Total mensal da precipitação (mm) para a Estação Formosa, GO (Período 1931/2020).



**Figura 3. 8.** Balanço Hídrico em que o padrão climático regional resulta em quatro períodos contrastantes: retirada da umidade dos solos entre abril e julho; déficit hídrico entre maio e outubro; reposição da umidade dos solos em novembro e dezembro; e superávit hídrico entre dezembro e março.

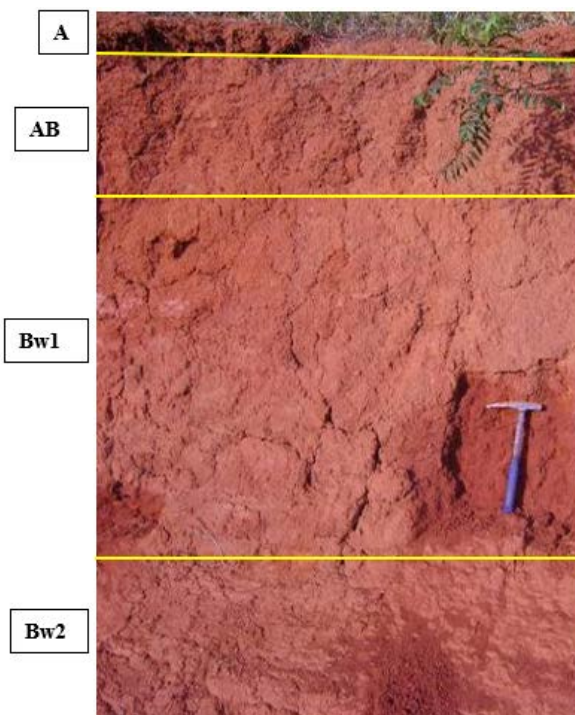
### 3.6. Solos

Foram caracterizadas três associações de solos que apresentam funcionamento hídrico contrastante: latossolos vermelho-amarelos e latossolos vermelhos; argissolos e nitossolos vermelhos; e cambissolos e neossolos litólicos.

Os latossolos (Figura 3.8) ocorrem nas regiões planas e elevadas e são argilosos a muito argilosos. Apresentam estrutura granular pequena e grumosa e são desenvolvidos principalmente a partir de rochas pelíticas da Formação Serra de Santa Helena.

Os solos podzolizados (argissolos e nitossolos) ocorrem sobre rochas carbonáticas e margosas e são distribuídos nos terrenos mais deprimidos nas adjacências das lentes de calcário da Formação Sete Lagoas. Apresentam textura muito argilosa e estrutura granular média a grande nos horizontes mais rasos. Comumente possuem cerosidade associada à estrutura e rochosidade representada por blocos de rochas carbonáticas nos horizontes A e B.

Os solos enquadrados na associação de cambissolos e neossolos litólicos são pouco desenvolvidos pedologicamente e, portanto, são rasos. Estes solos são desenvolvidos *in situ* sobre rochas pelíticas da Formação Serra de Santa Helena e sempre expõem o horizonte C saprolítico a profundidades inferiores a 50 cm do perfil (Figura 3.9).



**Figura 3. 9.** Perfil de Latossolo Vermelho de textura muito argilosa derivado de siltitos da Formação Serra de Santa Helena. Observar a ampla homogeneidade do perfil.



**Figura 3. 10.** Perfil de Neossolo Litólico em que o horizonte A fraco está em contato direto com o horizonte R. Este tipo de solo ocorre em associação com Cambissolo Háplico.

### 3.7. Geomorfologia

Na área de estudo são reconhecidos três compartimentos geomorfológicos caracterizados por Latrubesse & Carvalho (2006) como platôs residuais, vales dissecados e rebordos.

Os platôs residuais apresentam relevo suave ondulado em cotas superiores a 900 m cobertos por latossolos e têm a vegetação nativa representada por cerrado *sensu strictu*.

Os vales dissecados retratam um padrão ondulado a forte ondulado, alta densidade de drenagem, vales com amplitude topográfica de até 50 m e amplas coberturas de matas que são, em grande parte, substituídas por pastagens plantadas. As coberturas de solos verificadas são cambissolos, argilossos e nitossolos, além de amplas exposições de maciços calcários.

Os rebordos representam a zona de transição entre os platôs residuais e os vales dissecados. Neste compartimento o padrão de relevo é ondulado com predominância de cambissolo e vegetação composta por campo limpo.

Com relação ao balanço morfodinâmico do relevo, tem-se as seguintes relações: nos platôs a pedogênese superar a erosão, nos rebordos a erosão superar amplamente a pedogênese e nos vales há um equilíbrio entre pedogênese e erosão.

O fluxo que mantém a perenidade dos cursos d'água superficiais é alimentado pela infiltração da precipitação pluvial a partir dos platôs e em menor relevância pela infiltração nos próprios vales dissecados.

### 3.8. Estudo Hidrogeológico

#### 3.8.1. Inventário dos Pontos d'Água

O inventário de pontos d'água para efeito deste estudo é representado por poços e nascentes. Apesar de restrito, é considerado bastante relevante, uma vez que todos os sete poços existentes na área de interesse têm informações construtivas e pedolíticas disponíveis, sendo que alguns foram construídos especificamente para fins de estudo hidrogeológico (Tabela 3.1).

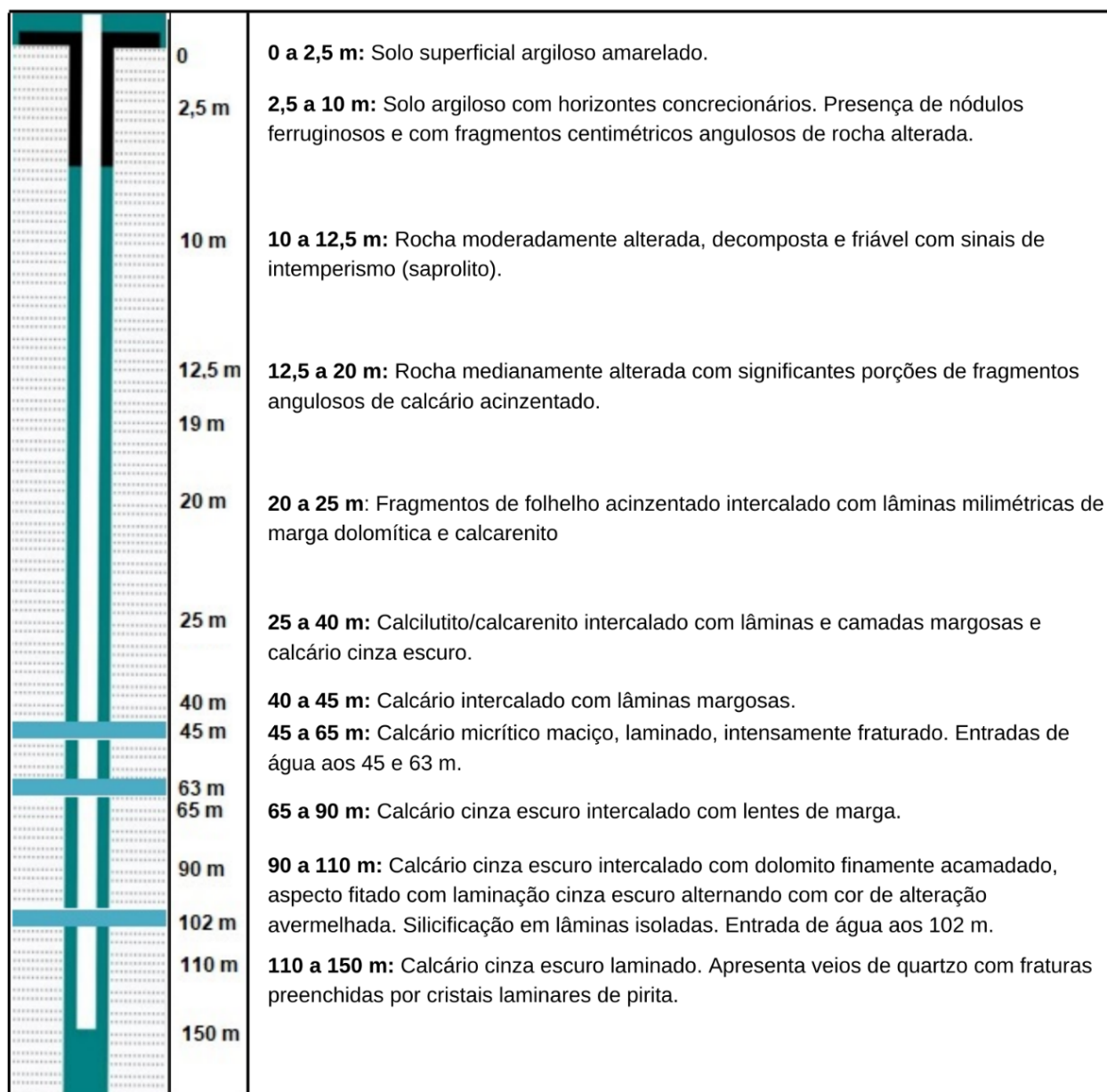
Outro aspecto importante é o fato de os poços terem dados de ensaios de bombeamento utilizados para a determinação de parâmetros hidráulicos. As nascentes, por sua vez, são representadas por exutórios intermitentes relacionados à elevação da superfície potenciométrica no período chuvoso do ano.

**Tabela 3.1.** Localização do cadastro de pontos d'água da poligonal de estudo.

| Poço Tubular          | Coordenadas UTM, Zona 23L |
|-----------------------|---------------------------|
| Poço Fazenda Brasil   | 267.314 / 8.301.854       |
| Poço Sr. Osmar - P10  | 267.648 / 8.302.403       |
| Poço SEMARH           | 267.478 / 8.303.483       |
| Poço CPX I - P2       | 266.647 / 8.301.632       |
| Poço CPX II - P4      | 266.433 / 8.301.611       |
| Poço CPX III - PM     | 264.915 / 8.301.110       |
| Poço Sr. Geraldo - PG | 264.357 / 8.301.156       |

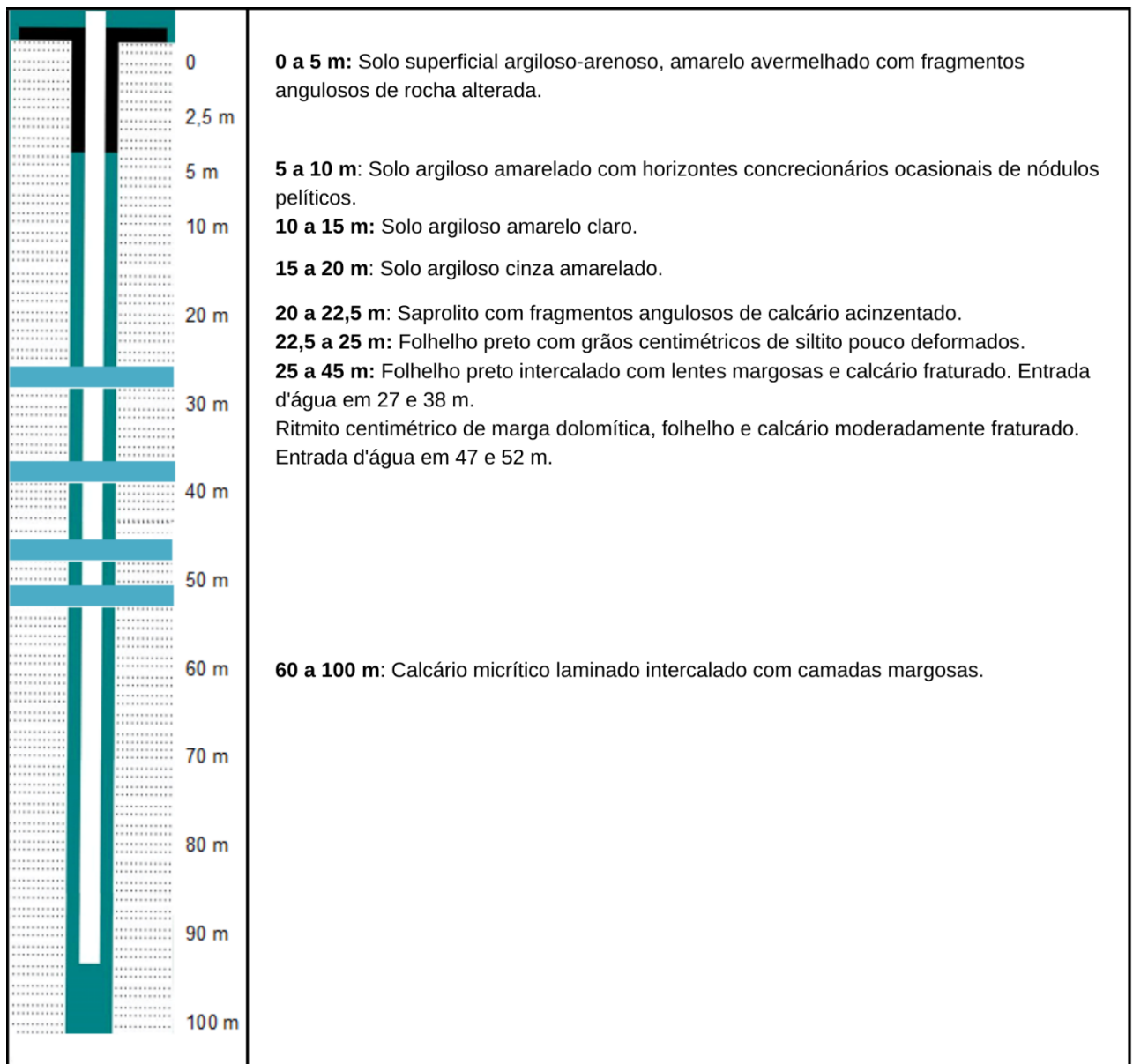


Quatro poços são usados para o abastecimento de propriedades da região (Poço Fazenda Brasil, Poço Sr. Osmar, Poço SEMARH e Poço Sr. Geraldo). Os outros três foram instalados exclusivamente para monitoramento e geração de dados para estudos hidrogeológicos: CPX I - P2 (Figura 3.10), CPX II - P4 (Figura 3.11) e CPX III - PM que possui 100 m perfurado integralmente em rocha calcária e se apresentou seco no momento da perfuração.



**Figura 3. 11.** Perfil geológico do Poço CPX I - P2 que representa a seção de um poço tubular que intercepta majoritariamente rochas carbonáticas da Formação Sete Lagoas.





**Figura 3. 12.** Perfil geológico do Poço CPX II - P4 que secciona na porção superior rochas pelíticas da Formação Serra de Santa Helena e a partir de 60 m carbonatos da Formação Sete Lagoas.

### 3.8.2 Caracterização do Aquífero

Na poligonal delimitada para o estudo estão presentes dois domínios hidrogeológicos distintos: um intergranular caracterizado por um aquífero raso e um físsuro-cárstico representado por um reservatório profundo (Tabela 3.2).

O sistema de drenagem principal (Rio Crixás) é, em parte, controlado por lineamentos estruturais (falhas e fraturas) com baixa sinuosidade, enquanto a rede secundária é tipicamente dendrítica com alta sinuosidade.

O curso principal é perene e ainda existem pequenos afluentes intermitentes com vazões inferiores a 5 L/s no período seco do ano (afluentes de terceira ordem e grotas). A incisão dos vales fluviais é alta, em razão das variações altimétricas e podem superar 120 m onde a drenagem se encaixa nos silitos (das formações Sete Lagoas e Serra de Santa Helena).

**Tabela 3.2.** Classificação dos aquíferos na poligonal delimitada para a aplicação do modelo conceitual proposto na área de Crixalândia, Formosa- GO.

| Grupo    | Domínio          | Sistema          | Litologia/Solos Predominantes                                                |
|----------|------------------|------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Freático | Intergranular    | Freático I (F1)  | Latossolos, argissolos e nitossolos                                          |
|          |                  | Freático II (F2) | Neossolos litólicos e cambissolos háplicos                                   |
| Profundo | Físsuro-cárstico | Grupo Bambuí     | Lentes de calcário e dolomito interdigitadas c/ siltitos, folhelhos e margas |

- *Domínio Intergranular*

Este domínio é representado por aquíferos livres e contínuos lateralmente, cujos parâmetros hidrodinâmicos (condutividade hidráulica, transmissividade e coeficiente de armazenamento) são diretamente proporcionais à espessura dos solos e à porosidade/permeabilidade.

Foi dividido em dois sistemas: Freático I representado por latossolos, argissolos e nitossolos geralmente sobre rochas mais pelíticas; e Freático II composto por e neossolos litólicos e cambissolos háplicos pouco estruturados sobre rochas pelíticas e carbonáticas.

No presente estudo todos os ensaios de infiltração com carga variável foram realizados na zona não saturada, em função dos tipos de solos a partir de testes de rebaixamento (Tabela 3.3).

**Tabela 3.3.** Localização dos pontos em que foram realizados os testes de rebaixamento no Domínio Intergranular.

| Ponto | Coordenada UTM  | Sistema | Tipos de solo                                                    |
|-------|-----------------|---------|------------------------------------------------------------------|
| 1     | 0267516/8302637 | F1      | Latossolo Vermelho distrófico com textura argilosa               |
| 2     | 0267791/8301586 | F1      | Latossolo Vermelho-amarelo distrófico com textura muito argilosa |
| 3     | 0267382/8302345 | F2      | Neossolo Litólico distrófico com textura silto-argilosa          |
| 4     | 0265610/8300311 | F2      | Cambissolo Háptico Tb distrófico com textura silto-argilosa      |

A fim de avaliar a variabilidade da condutividade hidráulica vertical em profundidade, foi executado um ensaio superficial e outro em diferentes profundidades: 50, 100, 150 e 200 cm; em cada ponto de observação.

Os ensaios de infiltração em superfície foram realizados a partir do método dos anéis concêntricos, enquanto que, os testes em profundidade, do “*open end hole*” (Tabelas 3.4 e 3.5).

**Tabela 3.4.** Resultados dos ensaios de infiltração com o método dos anéis concêntricos, onde I = profundidade de cravação dos anéis;  $\Delta t$  = tempo de infiltração;  $h_0$  = carga inicial;  $h_f$  = carga final; e K = condutividade hidráulica.

| Ponto | I (mm) | $\Delta t$ (min) | $h_0$ (mm) | $h_f$ (mm) | K (m/s)              |
|-------|--------|------------------|------------|------------|----------------------|
| 1     | 45     | 50               | 133        | 44         | $1,6 \times 10^{-5}$ |
| 2     | 60     | 40               | 126        | 25         | $4,0 \times 10^{-5}$ |
| 3     | 50     | 62               | 152        | 122        | $2,9 \times 10^{-6}$ |
| 4     | 45     | 38               | 153        | 135        | $2,4 \times 10^{-6}$ |

**Tabela 3.5.** Resultados dos ensaios de infiltração *in situ* a partir da técnica *open end hole*, onde  $\Delta t$  = tempo de infiltração;  $h_0$  = carga inicial;  $h_f$  = carga final; e K = condutividade hidráulica.

| <b>Ponto 1</b>    |                |            |            |                      |
|-------------------|----------------|------------|------------|----------------------|
| Profundidade (cm) | $\Delta t$ (s) | $h_0$ (cm) | $h_f$ (cm) | K (m/s)              |
| 50                | 2540           | 54         | 53         | $9,2 \times 10^{-8}$ |
| 100               | 2540           | 103,6      | 101,2      | $1,1 \times 10^{-7}$ |
| 150               | 2540           | 160,5      | 159,3      | $3,6 \times 10^{-8}$ |
| 200               | 2510           | 201,4      | 197,9      | $8,7 \times 10^{-8}$ |
| <b>Ponto 2</b>    |                |            |            |                      |
| Profundidade (cm) | $\Delta t$ (s) | $h_0$ (cm) | $h_f$ (cm) | K (m/s)              |
| 50                | 2985           | 55,1       | 52,9       | $1,7 \times 10^{-7}$ |
| 100               | 2990           | 104,6      | 103,2      | $5,6 \times 10^{-8}$ |
| 150               | 2985           | 164,5      | 159,7      | $1,2 \times 10^{-7}$ |
| 200               | 2980           | 197,8      | 194,3      | $7,4 \times 10^{-8}$ |
| <b>Ponto 3</b>    |                |            |            |                      |
| Profundidade (cm) | $\Delta t$ (s) | $h_0$ (cm) | $h_f$ (cm) | K (m/s)              |
| 50                | 2700           | 55,2       | 50,4       | $4,2 \times 10^{-7}$ |
| <b>Ponto 4</b>    |                |            |            |                      |
| Profundidade (cm) | $\Delta t$ (s) | $h_0$ (cm) | $h_f$ (cm) | K (m/s)              |
| 50                | 2455           | 55,8       | 53,7       | $1,9 \times 10^{-7}$ |
| 70                | 2455           | 106,6      | 105,4      | $5,7 \times 10^{-8}$ |

Em todos os pontos avaliados a condutividade hidráulica (K) alcança valores na ordem de  $10^{-7}$  a  $10^{-8}$  m/s a profundidades rasas, menos de 150 cm de *pedum* (horizontes A + B). Isso indica que os solos da região apresentam condutividade hidráulica muito baixa a baixa e com tendência decrescente em profundidade, sendo utilizado como filtro das águas de recarga dos aquíferos mais profundos. Estes resultados são coerentes com a situação dos solos observados na região que se apresentam pouco estruturados e com textura argilosa, muito argilosa ou silto-argilosa.

O sistema associado aos latossolos é caracterizado por grandes espessuras (>5 m) e condutividade hidráulica baixa. Já o associado aos neossolos e cambissolos caracteriza-se por pequenas espessuras (comumente menores que 1 m, podendo alcançar 2,5 m) e condutividade hidráulica muito baixa. As vazões de ambos são muito restritas, em geral menores que 300 L/h.

A porção saprolítica apresenta condutividade hidráulica maior em função do acamamento verticalizado que gera planos preferenciais de fluxo descendente. Esta informação é obtida a partir da observação do material, uma vez que não foi possível realizar os ensaios de infiltração sem quebrar a estrutura do material.

- *Domínio Físsuro-cárstico*

Este domínio é representado por intercalações de rochas carbonáticas e pelíticas (margas e siltitos) em diferentes proporções. A determinação do aspecto estratificado do aquífero é obtida a partir dos perfis de poços e de sondagens rotativas realizadas na região (com objetivo de geração de dados e informações para futura mineração de calcário).

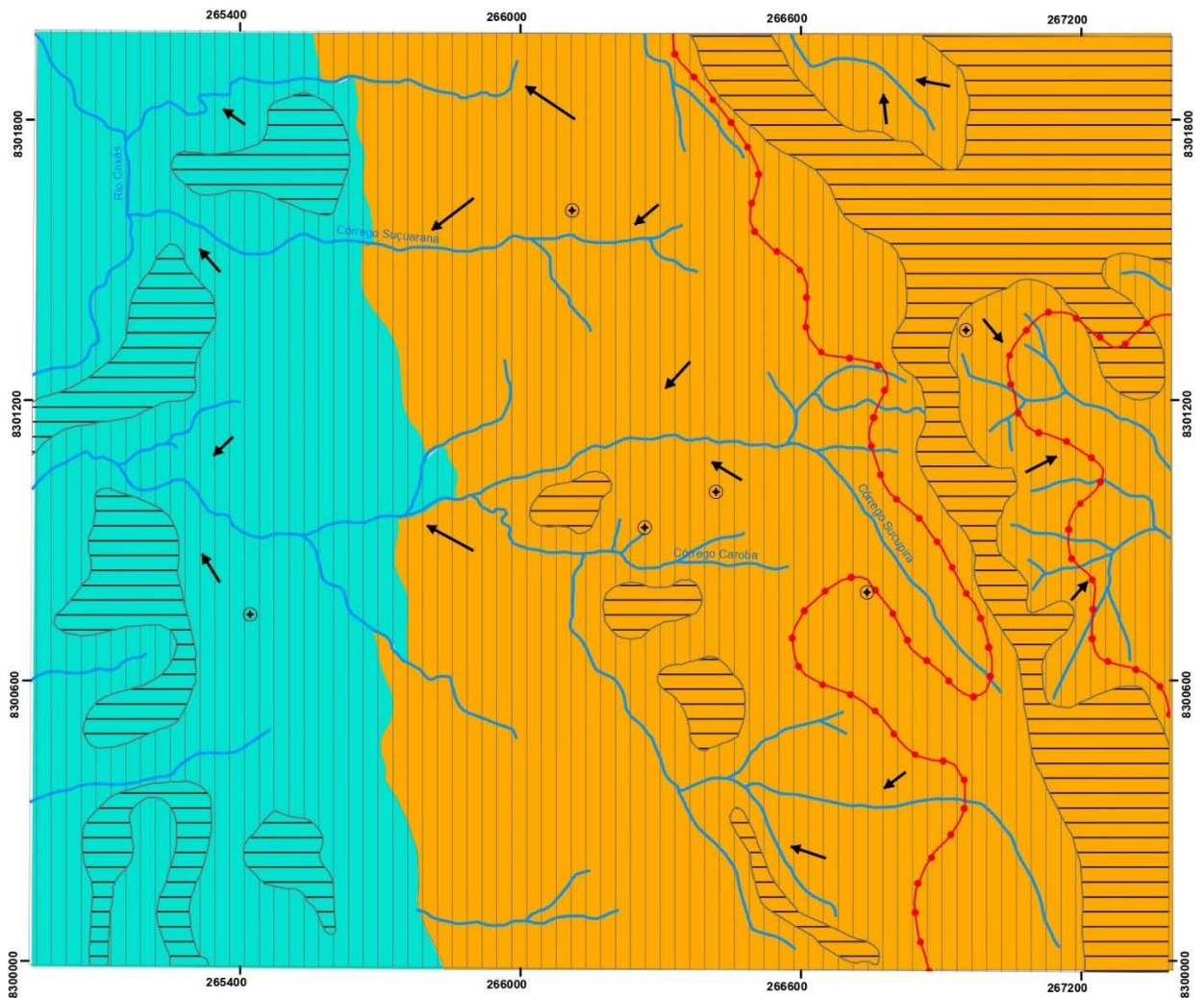
Na área do estudo de caso há uma compartimentação do relevo que resulta em maior exposição de rochas carbonáticas na porção oeste (mais dissecada e rebaixada) e ausência no segmento leste. Entretanto, mesmo nas porções sem afloramentos de calcário, o aquífero é representado pelo mesmo domínio físsuro-cárstico, uma vez que intercepta em profundidade camadas de calcário (Figuras 3.12 e 3.13).

Nas áreas mais dissecadas as lentes de calcário aflorante apresentam dimensões variáveis de 150 a 1300 m de comprimento por 80 a 160 m de espessura aparente. Entretanto, a natureza lenticular das rochas carbonáticas é nítida, tanto na observação em subsuperfície quanto em superfície.

Os dados de poços e sondagens rotativas mostram que há intercalações de rochas carbonáticas e não carbonáticas, de forma a se gerar meios com potencial associação à porção carbonática e condições, exclusivamente, de fluxo em ambiente fraturado.

Apesar da existência de rochas carbonáticas na região, as feições cársticas não são amplamente desenvolvidas, sendo apenas observadas localmente dois pequenos sumidouros e duas surgências, além de pequenas cavidades de dissolução. Dolinas, uvalas, trechos longos de curso de água subterrânea, anfiteatros, espeleotemas e demais elementos da paisagem cárstica não são observados.

A limitação das feições cársticas é típica das áreas de ocorrência de aquíferos físsuro-cársticos, uma vez que a descontinuidade das camadas e pacotes de rochas calcárias, tanto vertical quanto lateralmente, restringe o fluxo que é responsável pela dissolução e, conseqüente, desenvolvimento da geomorfologia cárstica considerada mais clássica.



### Domínio Intergranular

Sistema Freático I - Latossolo e Nitossolo  
K da ordem de  $10^6$  m/s. Relevo suave ondulado.

Sistema Freático II - Cambissolo e Neossolo.  
K menor que  $10^6$  m/s. Relevo ondulado.

### Domínio Físsuro-cárstico - Sistema Bambuí

Aquífero heterogêneo e anisotrópico com porosidade controlada simultaneamente por fraturas e dissoluções cársticas. Fluxo laminar em zonas de fratura e turbulento em cavidades de dissolução.

Predominância de exposição de rochas carbonáticas.

Restrita exposição de rochas carbonáticas.

Poço do cadastro de pontos d'água

Direção de Fluxo Hidrogeológico Local

Limite de Zona de Recarga Principal

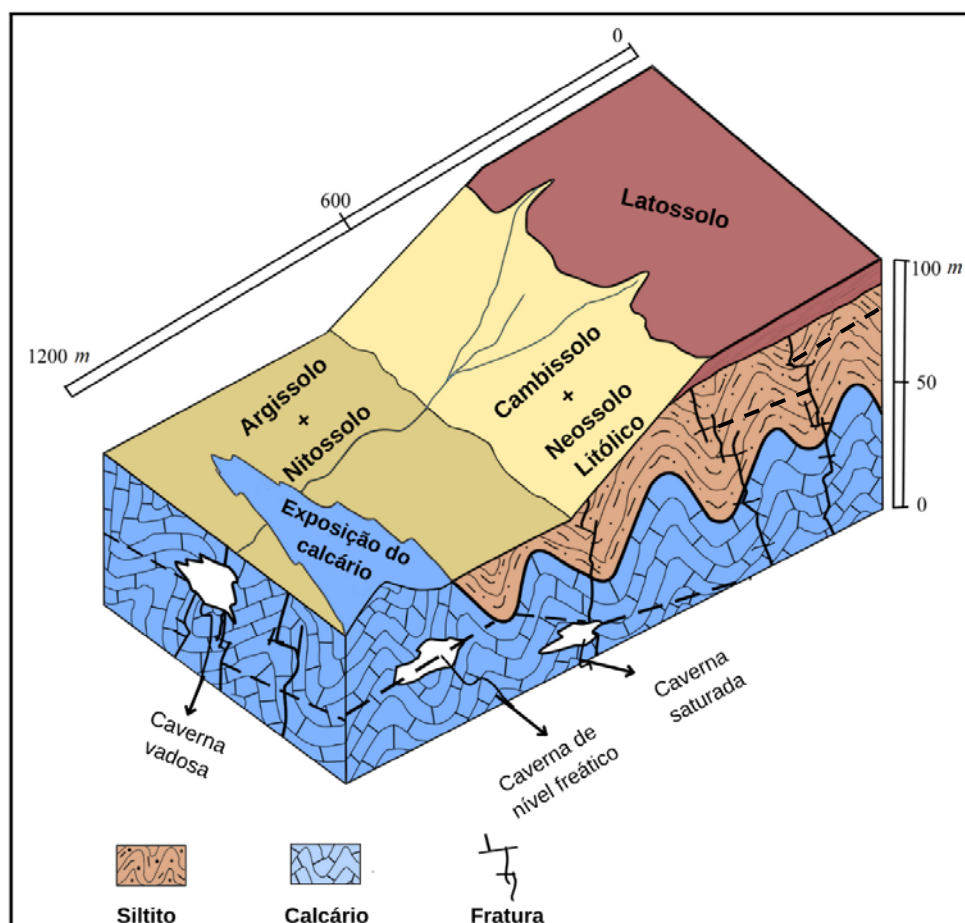
Rede de Drenagem Superficial



Escala Gráfica

0 135 270 540 m

**Figura 3. 13.** Mapa hidrogeológico da área do estudo de caso que corrobora o modelo conceitual do tipo físsuro-cárstico proposto. Todos os poços situados na área sem exposições de rochas carbonáticas interceptam calcários em diferentes profundidades. O fluxo subterrâneo tende para os exutórios representados pela rede de drenagem superficial. A área de recarga mais importante coincide com a porção de relevo mais elevado e predominância de solos espessos (Latossolo Vermelho e Latossolo Vermelho-amarelo).



**Figura 3. 14.** Bloco diagrama esquemático que ilustra a disposição em três dimensões do aquífero fissuro-cárstico presente na região em estudo. Notar que a superfície potenciométrica representada pela linha tracejada ocorre a diferentes profundidades em função de anisotropias, dissolução cárstica e relação com o relevo, tornando o aquífero naturalmente compartimentado.

Outra característica digna de nota é a compartimentação deste tipo de aquífero que, comumente, é controlada a partir da presença de lineamentos regionais. Na área do estudo de caso esta segmentação é comprovada pela presença de poço seco (CPX III – PM) no momento da perfuração, justamente na porção de maior presença de rocha calcária, o qual não apresenta zona de saturação até 100 m de profundidade.

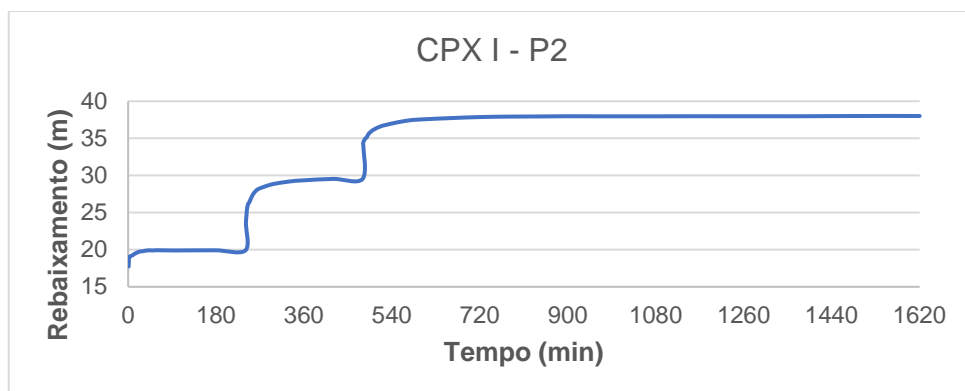
A natureza fraturada das rochas (carbonáticas e pelíticas) é corroborada pelos valores de RQD (*Rock Quality Designation* - Apêndice 9) dos furos de sondagens, que variam de 30 a 90%, sendo raras as passagens com valores de 100%.

### 3.8.3. Caracterização Hidráulica

Para a caracterização hidráulica do aquífero fissuro-cárstico foram utilizados dados de dois testes de bombeamento escalonados desenvolvidos nos poços CPX I – P2 e CPX II – P4 (Tabelas 3.5 e 3.6). O gráfico da Figura 3.14 apresenta a curva de rebaixamento durante 27 horas de bombeamento no Poço CPX I – P2. Enquanto que o gráfico da Figura 3.15 corresponde à curva de rebaixamento durante 30 horas de bombeamento no Poço CPX II – P4.

**Tabela 3.6.** Dados do teste de bombeamento escalonado dividido em três etapas no poço CPX I - P2, onde NE = nível estático; NDf = nível dinâmico final;  $s_i$  = rebaixamento incremental;  $Q_i$  = vazão inicial;  $Q_f$  = vazão final; e t = tempo que durou a etapa do teste.

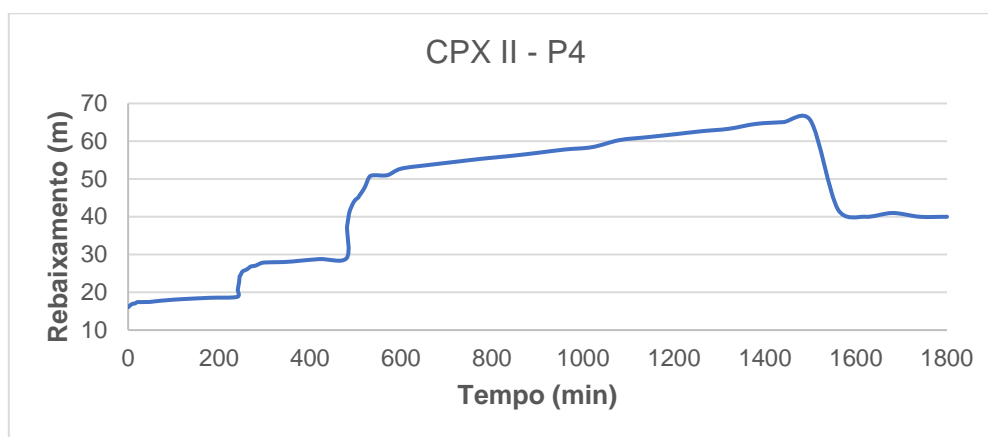
| Parâmetros | 1ª etapa                | 2ª etapa                | 3ª etapa                |
|------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| NE         | 17,74 m                 | 19,9 m                  | 29,55 m                 |
| NDf        | 19,90 m                 | 29,55 m                 | 38,01 m                 |
| $s_i$      | 2,16 m                  | 9,65 m                  | 8,46 m                  |
| $Q_i$      | 31,68 m <sup>3</sup> /h | 66 m <sup>3</sup> /h    | 88 m <sup>3</sup> /h    |
| $Q_f$      | 24,06 m <sup>3</sup> /h | 59,06 m <sup>3</sup> /h | 76,15 m <sup>3</sup> /h |
| t          | 4 h                     | 4 h                     | 19 h                    |



**Figura 3. 15.** Comportamento do rebaixamento do poço CPX I - P2 a partir do teste de bombeamento escalonado durante 27 horas de duração.

**Tabela 3.7.** Dados do teste de bombeamento escalonado dividido em três etapas no poço CPX II - P4, onde NE = nível estático; NDf = é o nível dinâmico final;  $s_i$  = rebaixamento incremental;  $Q_i$  = vazão inicial;  $Q_f$  = vazão final; e t = tempo que durou a etapa do teste.

| Parâmetros      | 1ª etapa                | 2ª etapa               | 3ª etapa                |
|-----------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|
| NE              | 16,1 m                  | 18,8 m                 | 29 m                    |
| ND <sub>f</sub> | 18,8 m                  | 29 m                   | 40 m                    |
| $s_i$           | 2,7 m                   | 10,2 m                 | 11 m                    |
| $Q_i$           | 15,53 m <sup>3</sup> /h | 33 m <sup>3</sup> /h   | 66 m <sup>3</sup> /h    |
| $Q_f$           | 9,89 m <sup>3</sup> /h  | 27,1 m <sup>3</sup> /h | 52,11 m <sup>3</sup> /h |
| t               | 4 h                     | 4 h                    | 22 h                    |



**Figura 3. 16.** Comportamento do rebaixamento do poço CPX II - P4 a partir do teste de bombeamento escalonado durante 30 horas de duração.

O rebaixamento observado no Poço CPX I - P2 é exponencial e a estabilização é rápida. Esse comportamento é devido a elevada transmissividade do meio, que recebe contribuição de águas provenientes de fraturas e cavidades de dissolução cárstica interligadas a grandes distâncias radiais do poço.

Em contrapartida, o rebaixamento observado no Poço CPX II - P4 é anômalo, principalmente na análise da terceira etapa de bombeamento. Entre a oitava e a vigésima quinta hora (480 min - 1500 min) o rebaixamento é contínuo e progressivo, onde o nível da água passa de 29 para 65,47 m. A partir da vigésima quinta hora de bombeamento é observada uma brusca elevação do nível, passando de 65,27 para 42 m.

Nas duas horas finais do ensaio o nível se estabiliza em 40 m. Este comportamento é explicado pela ampliação do cone de depressão do poço que intercepta novas zonas de fraturas e pequenas cavidades de dissolução cárstica que aumentam a vazão do poço.

Para o cálculo dos parâmetros hidrodinâmicos dos poços (Tabela 3.8) foi utilizada a terceira etapa do ensaio escalonado e considerada a vazão final de estabilização como se fosse constante, visto que esta é uma condição de contorno necessária para aplicação do método de Moench no *software Aquifer Test Pro da Waterloo Hydrogeologist*. Assim, foi adotada a vazão de 76 m<sup>3</sup>/h e de 52 m<sup>3</sup>/h para os poços CPX I - P2 e CPX II - P4, respectivamente.

**Tabela 3.8.** Resultados da avaliação dos dados da terceira etapa do teste de bombeamento escalonado, onde K = condutividade hidráulica; T = transmissividade; S = coeficiente de armazenamento; e Cesp = capacidade específica. (Foi considerada a distância de 1 m entre o poço de bombeamento e o de observação).

| Parâmetros | CPX I - P2                             | CPX II - P4                             |
|------------|----------------------------------------|-----------------------------------------|
| K          | $1,6 \times 10^{-5}$ m/s               | $1,72 \times 10^{-6}$ m/s               |
| T          | $2,4 \times 10^{-3}$ m <sup>2</sup> /s | $1,72 \times 10^{-4}$ m <sup>2</sup> /s |
| S          | $10^{-1}$                              | $10^{-2}$                               |
| Cesp       | 3,75 m <sup>3</sup> /h/m               | 2,18 m <sup>3</sup> /h/m                |

A avaliação qualitativa dos dados dos ensaios de bombeamento indicam que CPX I - P2, com rebaixamento de 20,27 m, pode operar com uma vazão de 76,15 m<sup>3</sup>/h e o CPX II - P4, com rebaixamento de 23,9 m, deve usar uma vazão operacional de 52,11 m<sup>3</sup>/h.

O tempo máximo diário de bombeamento deve ser de 20h para CPX I - P2 e de 18h para CPX II - P4, em razão desses poços requererem um tempo de 3h e 4h, respectivamente, para a recuperação do nível estático original (após mais de 24h contínuas de bombeamento ao final da terceira etapa do ensaio escalonado).

Para verificação dos dados dos testes de bombeamento ver apêndices 1 a 8.



### 3.8.4. Caracterização das Áreas de Recarga

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.

Dessa maneira, as áreas mais elevadas com coberturas de solos mais espessos e com maior condutividade hidráulica são as que apresentam o maior potencial de infiltração, com menor perda por interfluxo e, portanto, resulta na maior recarga efetiva.

Já em áreas situadas em terrenos com maior declividade e solos rasos e impermeáveis resultam em recarga limitada. Assim, da parcela da água de chuva infiltrada há grande perda por fluxo interno, o que reduz a recarga efetiva (Campos *et al.*, 2021).

Isto posto, e ao ressaltar que a poligonal estudada é essencialmente recoberta por três categorias de solos, a recarga pode ser assim delimitada:

- *Área de Recarga Principal:* nas áreas de solos mais espessos, neste caso, latossolos e solos podzolizados (principalmente nitossolos e mais raramente argissolos) em relevos suaves a ondulados.
- *Área de Recarga Limitada:* sobre terrenos com elevada declividade e grande incisão da rede de drenagem associada aos cambissolos e neossolos litólicos. A infiltração é reduzida em detrimento do escoamento superficial. Além da reduzida percolação vertical de água, há, ainda, grande perda por fluxo lateral na interface dos horizontes A e B com o horizonte C (cambissolo) ou na interface do horizonte A com C.

De forma geral, e em analogia com outras regiões do estado de Goiás (Almeida *et al.*, 2006), pode-se atribuir 20% e 5% para as áreas de recarga principal e limitada, respectivamente. A proposta desses valores é definida a partir da integração de informações sobre os solos (espessura, textura e estruturação), relevo (hipsometria e declividade) e geologia.

Visto que a área de *recarga limitada* é mais ampla, a reposição de água no aquífero físsuro-cárstico contido na poligonal estudada é reduzida. Isso explica o restrito volume de água dos córregos na região no período seco. Muitos destes cursos d'água são intermitentes ou apresentam vazão específica reduzida, em função da condição desfavorável da recarga natural do aquífero intergranular sobreposto.

Por outro lado, os mananciais cársticos clássicos apresentam depressões cársticas de grandes proporções (de metros a dezenas de metros lateralmente e até quilométricas em extensão longitudinal) que ampliam o reabastecimento nas áreas de exposição destes aquíferos.

Ao utilizar o raciocínio análogo, é esperado que a recarga seja mais favorável nos locais de afloramento de rochas carbonáticas em reservatórios enquadrados no modelo físsuro-cárstico. Porém, a limitação do desenvolvimento de cavidades cársticas dificulta as condições previstas.

Na área do estudo de caso, do ponto de vista do funcionamento hídrico, os platôs residuais oferecem os melhores controles por se tratar de áreas elevadas, com padrão de relevo suave ondulado e com solos espessos e estruturados nos horizontes superficiais. Nos vales dissecados a taxa de recarga apresenta redução significativa, que é ainda mais pronunciada no compartimento de rebordo, devido à presença de solos rasos e terrenos com alta declividade.

### 3.8.5. Caracterização Físico-Química das Águas Subterrâneas

Foram utilizados dados de duas análises químicas dos poços tubulares CPX I - P2 e CPX II - P4 (Tabela 3.9), cujas amostras foram retiradas após, pelo menos, 1h de bombeamento, além de medições de parâmetros físico-químicos com auxílio de aparelho multiparâmetro portátil em amostras de nascentes e poços.

**Tabela 3.9.** Resultado da análise físico-química e bacteriológica em amostras de água dos poços CPX I - P2 e CPX II - P4, onde VMP = valor máximo permitido pela Portaria GM/MS Nº 888, de 4 de maio de 2021 do Ministério da Saúde.

| <b>Parâmetro</b>        | <b>Poço CPX I - P2</b> | <b>Poço CPX II - P4</b> | <b>VMP</b> |
|-------------------------|------------------------|-------------------------|------------|
| pH                      | 7,4                    | 7,6                     | 6,0 - 9,5  |
| Turbidez                | 2,32                   | 2,25                    | 5          |
| Cloretos                | 10,4 mg/L              | 12,3 mg/L               | 250        |
| Dureza Total            | 120 mg/L               | 124 mg/L                | 500        |
| Manganês                | 0,05 mg/L              | 0,05 mg/L               | 0,1        |
| Ferro Total             | 0,1 mg/L               | 0,3 mg/L                | 0,3        |
| Amônia                  | 0,4 mg/L               | 0,4 mg/L                | 1,5        |
| Nitrato                 | 0,1 mg/L               | 0,1 mg/L                | 10         |
| Sais Totais Dissolvidos | 126,5 mg/L             | 124,9 mg/L              | 1000       |
| Coliformes Fecais       | Ausente                | Ausente                 | Ausente    |
| Coliformes Totais       | Presente               | Presente                | Ausente    |

Os dados de medições *in situ* de poços rasos e nascentes mostram que, ocorra contaminação a partir de rochas carbonáticas, as águas freáticas apresentam propriedades hidroquímicas distintas das águas profundas.

Dois parâmetros, particularmente, corroboram tal contraste: o pH e o total de sais dissolvidos (TDS). As águas rasas são menos mineralizadas e apresentam pHs ácidos, enquanto as águas do domínio físsuro-cárstico são alcalinas e têm maior TDS.

Ao considerar os resultados hidroquímicos e a avaliação de risco à contaminação, as águas subterrâneas da região pertencem as classes 3 e 1 para os domínios intergranular e físsuro-cárstico, respectivamente, de acordo com a Resolução do CONAMA Nº 396/2008, que dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas.

As águas freáticas inseridas na Classe 3 requerem tratamento para uso potável. Enquanto que as águas profundas contidas na Classe 1 não apresentam alteração de sua qualidade por atividades antrópicas, e não exigem tratamento para quaisquer usos preponderantes devido às suas características hidrogeoquímicas naturais.

O ferro com teor 0,1 mg/L e 0,3 mg/L para CPX I – P2 e CPX II – P4, respectivamente, e o manganês 0,05 mg/L para ambos os poços ocorrem sempre em associação, e sua presença em teores próximos ao limite da potabilidade é atribuída à pedogênese que oxida argilominerais das rochas pelíticas (siltitos e folhelhos) encontradas na região.

O total de sólidos dissolvidos dos reservatórios físsuro-cársticos é significativamente maior do que aqueles medidos em aquíferos fraturados associados a rochas metassedimentares (Campos, 2012). Contudo, as duas substâncias químicas que explicam tal fato são, exclusivamente, o cálcio e o bicarbonato, oriundos da solubilização da calcita. Em comparação aos carstes clássicos, em clima representado pela mesma isoietal, os mananciais físsuro-cársticos apresentam valores de TDS mais reduzidos.

### 3.8.6. Relação entre Águas Superficiais e Subterrâneas

A análise integrada dos dados de vazões dos cursos superficiais e suas variações sazonais, os tipos de materiais que compõem os solos (principalmente coberturas argilosas) e a composição química das águas permitem apresentar os seguintes entendimentos com relação à interação entre as águas superficiais e subterrâneas na área do estudo de caso:

- Parte da água dos sistemas F1 e F2 escoam para o manancial físsuro-cárstico sotoposto, uma vez que a recarga dos aquíferos profundos se inicia com a infiltração das chuvas;
- A descarga do sistema F1 abastece as drenagens intermitentes por fluxo interno na interface entre horizontes superficiais dos solos e o saprolito (local com forte contraste da condutividade hidráulica entre os dois meios).

Os córregos são alimentados por escoamento superficial e fluxo local e não têm contribuição do físsuro-cárstico, que ocorre a maiores profundidades e com níveis freáticos abaixo da cota do talvegue dos córregos. Esta afirmação pode ser corroborada pelos seguintes argumentos:

- O pH da água dos córregos varia entre 6,6 e 7,2, portanto inferior aos das águas do aquífero físsuro-cárstico, que sempre apresentam valores superiores a 7,4;

- A dureza total nos cursos superficiais é inferior a 60 mg/L, o que é considerado um valor baixo para exutório carbonático, uma vez que as águas que estão em contato com rochas carbonáticas apresentam dureza superior a 100 mg/L;
- As cabeceiras dos córregos estão situadas em altitudes superiores a 950 m, muito acima da cota de exposição dos calcários que ocorrem na base da seção geológica local;
- Existência de um poço tubular que interceptou 100 m exclusivamente de rocha carbonática sem alcançar a zona saturada do aquífero profundo (CPX III – PM seco à época de sua instalação).

Como a base do aquífero ocorre sobre rochas pelíticas de baixa condutividade hidráulica, o escoamento é rapidamente eliminado em zonas de surgências que alimentam a rede de drenagem local, em grande parte, o próprio Rio Crixás.

O curso d'água formado após a confluência dos córregos Caroba e Sucupira apresenta um restrito trecho de fluxo subterrâneo. As coordenadas UTM do ponto do sumidouro são 265.455/8.301.514 e da surgência são 265.223/8.301.244 (zona 23L).

As coordenadas dos pontos considerados nascentes intermitentes dos córregos Sucupira, Caroba e Suçuarana são, respectivamente, 267.320/8.302.010, 266.375/8.301.455 e 267.095/8.302.615 (zona 23L).

As Figuras 3.16 a 3.20 correspondem aos pontos considerados nascentes ou leito das drenagens associadas ao domínio físsuro-cárstico. As imagens foram obtidas no início do período chuvoso, nos meses de setembro e outubro, sendo que todos os cursos d'água afluentes do Rio Crixás são intermitentes.

Toda a rede de drenagem superficial recebe contribuição de escoamento superficial e fluxo interno a partir do sistema F1, sem nenhum vínculo com o reservatório sotoposto. Como o aquífero físsuro-cárstico é livre e apresenta níveis potenciométricos profundos (onde é aflorante), as águas tendem a migrar para maiores profundidades e perdem a conexão hidráulica com a rede e cursos d'água superficiais.



**Figura 3. 17.** Sumidouro formado pela confluência dos córregos Caroba e Sucupira, onde é possível verificar um pequeno fluxo de água derivado do escoamento superficial acumulado dos afluentes (abertura do sumidouro de 1,2 m).



**Figura 3. 18.** Ponto de surgência do Córrego Escaroba com volume de água similar ao do sumidouro. Esta relação entre as vazões indica que não há contribuição das lentes carbonáticas na afluência do córrego nesta parte do aquífero (abertura da cavidade na surgência de 1,5 m).





**Figura 3. 19.** Cabeceira do Córrego Sucupira com acúmulo de água de precipitação das primeiras chuvas do ano. Trata-se de uma drenagem intermitente com escoamento apenas no pico do período chuvoso. Este córrego não intercepta rocha carbonática no seu alto curso.



**Figura 3. 20.** Leito do Córrego Sucupira em seguimento a montante da foto anterior. Trata-se de um córrego intermitente com fluxo apenas após a regularização das chuvas a partir de escoamentos superficial e interno.





**Figura 3. 21.** Cabeceira de grota do Córrego Cabaceira. Esta nascente é intermitente e foi classificada como mista e inclui controle de contato (saprolito e rocha) e fratura.

As análises dos dados de monitoramento das vazões de nascentes e cursos d'água no período de junho de 2016 até março de 2022 indicam que todas das nascentes e drenagens localizadas na área de estudo são intermitentes (Figuras 3.21 e 3.22).

A variação das vazões demonstra que os picos são decorrentes do escoamento superficial após eventos de precipitações críticas e que há fluxo contínuo entre os meses de novembro até março, quando começa o declínio do período de chuvas. Este padrão é observado de forma independente em cursos d'água de maior ou menor porte.

O comportamento que define a rede de drenagem como intermitente é esperado em sistemas físsuro-cársticos. A ampla variação dos níveis potenciométricos resulta no rebaixamento da carga hidráulica no período seco e causa a desconexão hidráulica entre os cursos d'água em superfície e a zona saturada dos aquíferos em subsuperfície.

As nascentes são classificadas como de contato (interface entre solo e rocha / saprolito), de fratura, de *sinkhole* (surgência em aquíferos físsuro-cárstico) ou mista (quando resultante de mais de um controle simultaneamente).



Figura 3. 22. Variação da vazão do Córrego Sussuarana (coordenadas UTM 265.505/8.302.519; zona 23L; altitude 803 m).

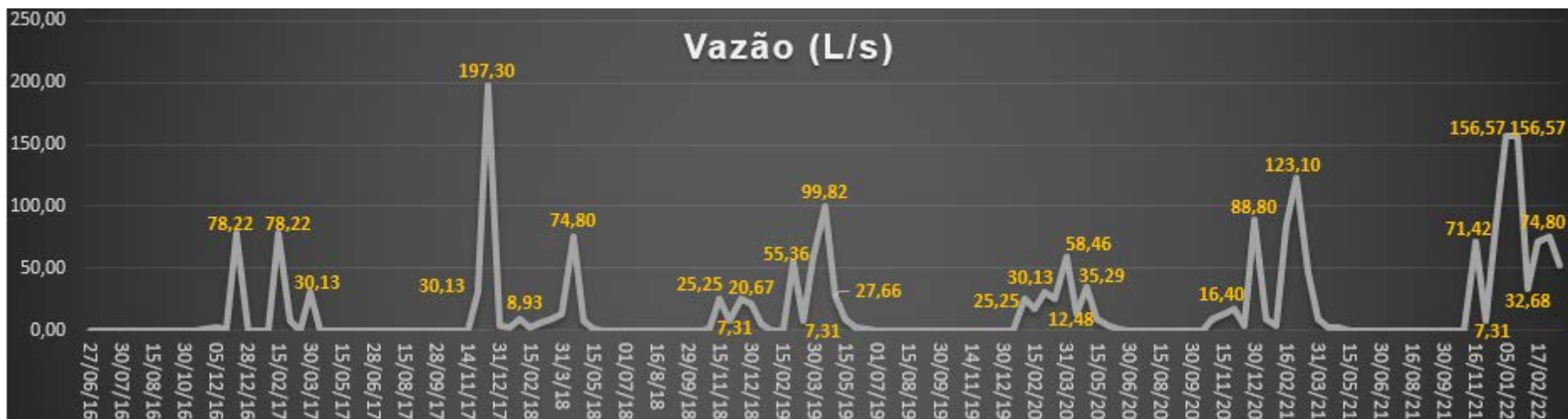


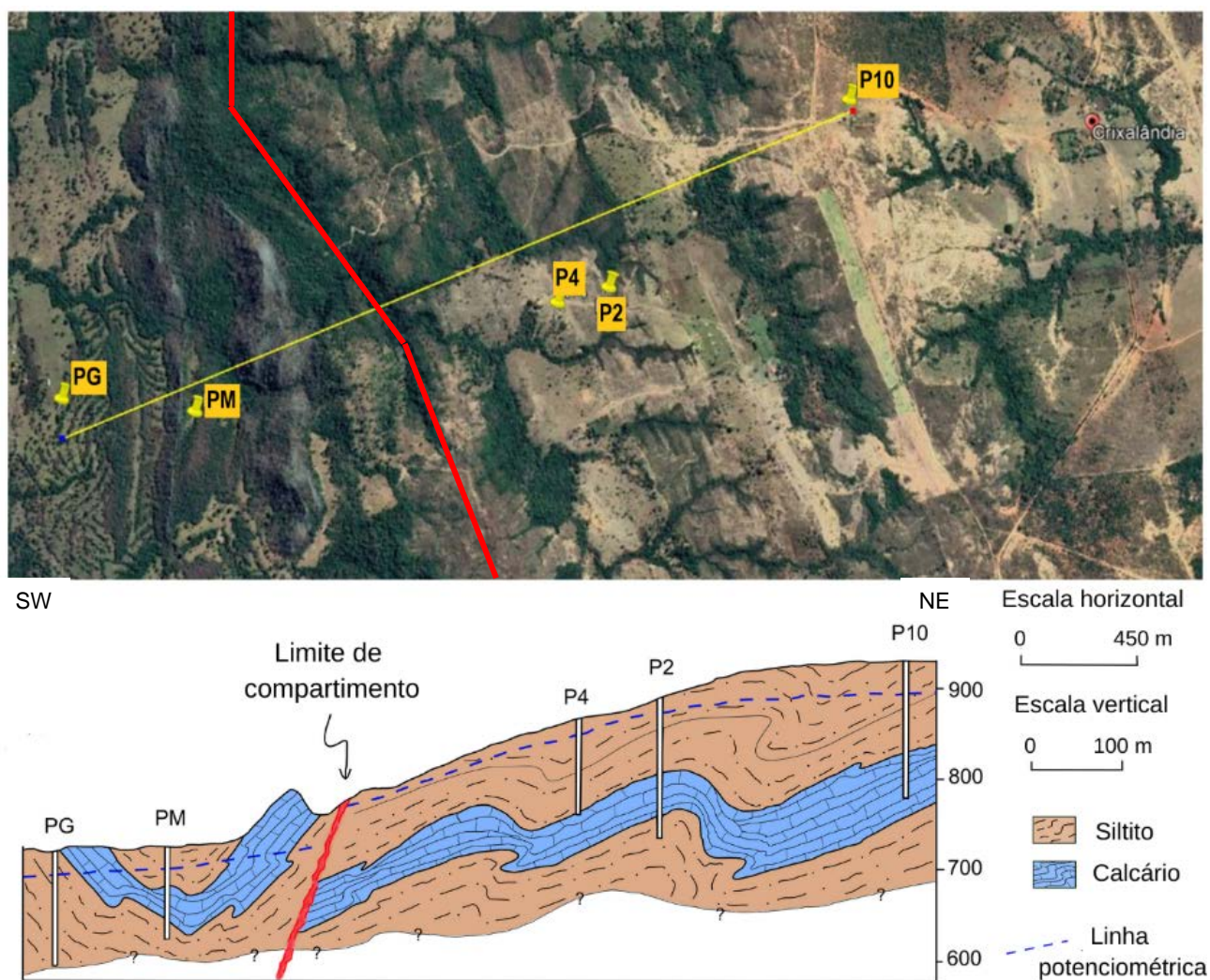
Figura 3. 23. Variação da vazão do Córrego Caroba (coordenadas UTM 264144/8301723, zona 23L; altitude 744 m).



### 3.8.7. Potenciometria

A análise potenciométrica foi realizada a partir dos dados de níveis dos poços existentes na região, além das cotas de cinco nascentes no período de 2016 a 2022. A finalidade não foi confeccionar um mapa potenciométrico da área como um todo, pois não há poços e nascentes em número suficiente, mas sim, destacar o quanto esta feição é complexa em aquíferos do tipo fissuro-cárstico.

Outro fator que dificulta a confecção de um mapa de isopieza é a má distribuição espacial dos dados, que estão concentrados na zona central da poligonal e ausentes nos quadrantes extremos. Dessa maneira, foi produzida uma seção potenciométrica (Figura 3.23) que demonstra o aspecto compartimentado do aquífero fissuro-cárstico. Em sua porção nordeste o nível estático apresenta-se cerca de 40 m acima da porção sudoeste. A zona de ruptura do nível freático coincide com o lineamento de direção SE-NW observado em análise sobre imagem de satélite.



**Figura 3. 24.** Seção potenciométrica integrada de direção SW-NE na porção central da área alvo do estudo de caso.

Os dados da superfície potenciométrica média aferidos nos poços indicam que existe um bloco a nordeste com cargas hidráulicas mais elevadas e outro a sudoeste com cargas profundas e variáveis. O poço CPX III - PM com 100 m não apresentou zona de saturação à época de sua perfuração, apesar de apresentar rochas fraturadas e carstificadas até esta profundidade. Após a sua construção, foi submetido à infiltração de água de recarga e aproveitado como poço de monitoramento do nível freático, pois apresenta flutuação que responde à sazonalidade climática.

O lineamento que separa os dois compartimentos foi interpretado como uma falha reversa e, caso não ocorresse a ruptura vertical da superfície potenciométrica naquela região, deveria haver uma zona de descarga do aquífero, o que não é observado em campo.

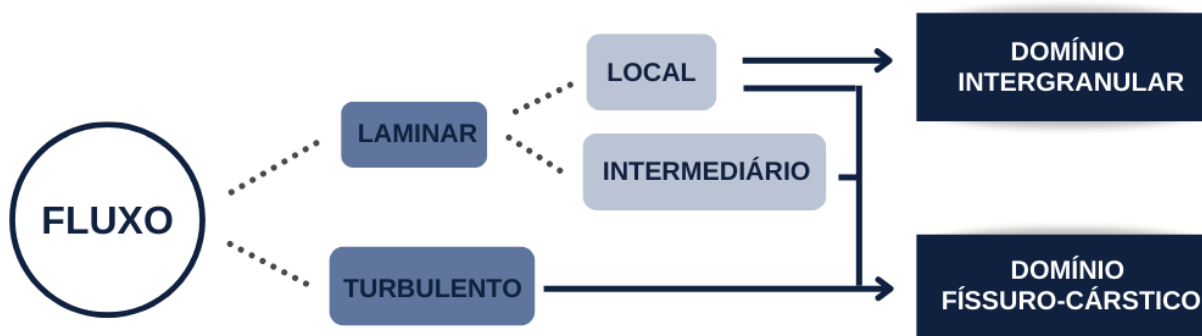
A Tabela 3.10 apresenta os dados dos poços que compõem o cadastro de pontos d'água aplicado ao presente estudo. As informações disponíveis indicam que a zona não saturada pode variar de 8,9 até mais de 30 metros em distâncias horizontais a 400 m. Este fato é decorrente da presença de rochas carbonáticas, cuja dissolução abre espaço para a drenança das águas de infiltração. Isso resulta em zonas muito profundas sem saturação, mesmo no período de máxima precipitação.

**Tabela 3.10.** Dados dos poços de monitoramento e de produção utilizados para corroborar a modelagem conceitual do aquífero fissuro-carstíco, onde ND = dados não disponíveis.

| Poço             | NE<br>(m) | ND<br>(m) | Prof<br>(m) | Vazão<br>(L/h) | Rocha predominante                                                                                                                         |
|------------------|-----------|-----------|-------------|----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CPX I - P2       | 14,10     | 34,31     | 150         | 76.000         | Calcário micrítico cinza pouco recristalizado da Formação Sete Lagoas e restrita contribuição de pelitos da Formação Serra de Santa Helena |
| CPX II - P4      | 13,85     | 40,00     | 100         | 52.000         | Siltito, siltito argiloso, folhelho e calcário na porção inferior da Formação Sete Lagoas                                                  |
| CPX III - PM     | 30,56     | -         | 100         | Seco           | Calcário micrítico da Formação Sete Lagoas em toda a seção perfurada                                                                       |
| Sr. Osmar- P10   | 17        | ND        | 120         | 28.000         | Pelito da porção superior da Formação Serra de Santa Helena e calcário na base da Formação Sete Lagoas                                     |
| Sr. Geraldo - PG | -         | -         | -           | -              | Siltito e calcário da Formação Sete Lagoas                                                                                                 |
| Fazenda Brasil   | ND        | ND        | ND          | 15.000         | Calcário da Formação Sete Lagoas                                                                                                           |
| SEMARH I         | 8,9       | 23,4      | 150         | 10.350         | Calcário dominante em toda a seção (Formação Sete Lagoas)                                                                                  |

Nestas condições, a presença de fluxo turbulento indica que os meios estudados não respondem à Lei de Darcy, principalmente quando o fluxo está associado a rochas carbonáticas e siltitos fraturados, em que as fraturas apresentam abertura maior que 5 mm.

A Figura 3.24 ilustra os sistemas de fluxo que corroboram a complexidade hidrogeológica do modelo proposto: fluxo do tipo laminar local referente ao domínio intergranular e fluxo que pode ser do tipo laminar local a intermediário e turbulento relacionado ao físsuro-cárstico. O comportamento do fluxo que varia de laminar a turbulento ocorre de forma simultânea no sistema físsuro-cárstico quando a água flui através de fraturas e de condutos.



**Figura 3. 25.** Representação dos sistemas de fluxos hidrogeológicos associados ao modelo conceitual de aquífero físsuro-cárstico e sua cobertura pedogenética (domínio intergranular).

O Sistema de Fluxo Local Laminar está associado às águas de infiltração de chuvas, cujas áreas de recarga e de descarga estão situadas em pontos ou em regiões muito próximas. Neste caso, a drenagem alimentada por esta rede de fluxo é intermitente e de restrita vazão. Inclui grande parte do *interflow*, uma vez que o saprolito presente nas amplas áreas de ocorrência de cambissolos apresenta baixa condutividade hidráulica, o que impede a infiltração vertical das águas de precipitação.

O Sistema de Fluxo Laminar Local a Intermediário é observado apenas nas porções em que ocorrem siltitos fraturados. As áreas de recarga e de descarga são próximas e as nascentes alimentadas por este sistema são intermitentes.

O Sistema de Fluxo Intermediário está relacionado aos sítios em que solos mais espessos (latossolos e solos podzolizados) favorecem a infiltração de águas de chuva, porém em terrenos com relevo de menor declividade. Neste caso, as rampas com maior comprimento permitem maior tempo de percolação e o desenvolvimento de fluxo intermediário natural.

Por fim, o Sistema de Fluxo Turbulento é verificado em locais de ocorrência de rochas carbonáticas e flui de forma canalizada. Dessa maneira, apresenta-se associado a sumidouros e surgências e os níveis d'água podem apresentar maior variação ao longo do ano hidrológico. Nessas condições, a recarga é rápida a muito rápida e esses aquíferos podem descarregar diretamente no exutório regional, representado pelo rio Crixás.

### 3.8.8. Estimativa de Reserva Hídrica

Para as estimativas das reservas hídricas de sistemas físsuro-cársticos são propostas adaptações das equações gerais existentes para reservatórios intergranulares (Costa, 2000), de tal maneira que os cálculos sejam factíveis para o modelo de aquífero proposto.

Para tanto, adapta-se o conceito de *Índice de Fraturamento Interconectado* ( $I_{fi}$ ) (Campos, 2012) que propõe valor médio de 1 a 2% para sistemas fraturados e 18 a 20% para cartes. Sendo assim, introduz-se a definição de *Índice de Fraturamento e Carstificação Interconectados* ( $I_{fci}$ ), que equivale a parte de vazios livres para o fluxo (tanto de fraturas quanto de dissolução cárstica).

Para o estudo de caso, foram utilizados dados dos poços de monitoramento CPX I - P2, CPX II - P4 e CPX III - PM (Tabela 3.11), que estão distantes de poços produtores e não estão equipados com sistemas de bombeamento, de forma que a variação do nível estático ao longo desses seis anos é considerada a flutuação natural, em função da sazonalidade climática.

**Tabela 3.11.** Variações anuais dos níveis freáticos observados em poços de monitoramento fora do raio dos cones de depressão de poços de produção (variação natural do nível estático).

| <b>CPX I - P2 - 878 m</b>          |               |             |               |            |
|------------------------------------|---------------|-------------|---------------|------------|
| <i>Data</i>                        | <i>NE máx</i> | <i>Data</i> | <i>NE mín</i> | $\Delta h$ |
| 07/10/2016                         | 13,99         | 15/02/2017  | 9,69          | 4,3        |
| 30/10/2017                         | 13,69         | 15/04/2018  | 9,73          | 3,96       |
| 29/09/2018                         | 13,04         | 15/04/2019  | 9,96          | 3,08       |
| 15/10/2019                         | 12,80         | 17/02/2020  | 9,74          | 3,06       |
| 30/09/2020                         | 12,64         | 16/02/2021  | 9,79          | 2,85       |
| 15/09/2021                         | 13,21         | 17/02/2022  | 10,44         | 2,77       |
| <b><math>\Delta h</math> médio</b> | <b>3,33</b>   |             |               |            |
| <b>CPX II - P4 - 863 m</b>         |               |             |               |            |
| <i>Data</i>                        | <i>NE máx</i> | <i>Data</i> | <i>NE mín</i> | $\Delta h$ |
| 07/10/2016                         | 14,52         | 15/02/2017  | 11,42         | 3,1        |
| 30/10/2017                         | 14,96         | 15/04/2018  | 11,09         | 3,87       |
| 29/09/2018                         | 13,82         | 15/04/2019  | 10,95         | 2,87       |
| 15/11/2019                         | 13,75         | 31/03/2020  | 10,96         | 2,79       |
| 15/10/2020                         | 13,58         | 02/03/2021  | 10,78         | 2,8        |
| 15/09/2021                         | 13,63         | 15/01/2022  | 10,38         | 3,25       |
| <b><math>\Delta h</math> médio</b> | <b>3,11</b>   |             |               |            |
| <b>CPX III - PM - 799 m</b>        |               |             |               |            |
| <i>Data</i>                        | <i>NE máx</i> | <i>Data</i> | <i>NE mín</i> | $\Delta h$ |
| 16/10/2017                         | 31,04         | 15/04/2018  | 27,17         | 3,87       |
| 16/10/2018                         | 30,76         | 15/04/2019  | 26,94         | 3,82       |
| 15/10/2019                         | 30,77         | 31/03/2020  | 27,17         | 3,6        |
| 30/09/2020                         | 30,77         | 16/03/2021  | 28,33         | 2,44       |
| 15/09/2021                         | 30,83         | 05/01/2022  | 25,12         | 5,71       |
| <b><math>\Delta h</math> médio</b> | <b>3,88</b>   |             |               |            |
| <b><math>\Delta h</math> total</b> | <b>3,44</b>   |             |               |            |



O valor 3,44 m da variação anual é maior do que o observado em reservatórios intergranulares analisados em poços de monitoramento em solos de região com o mesmo tipo de clima de cerrado (Lousada & Campos, 2005). Isso indica que as condições de recarga de mananciais físsuro-carstícos são mais favoráveis em comparação aos intergranulares, sob condições de clima similares.

Os cálculos de estimativa de reserva foram feitos por hectare, de forma a se ter uma referência por unidade de aquífero. Para a área do estudo de caso foi considerado o valor de 6%, para o  $I_{fci}$ , uma vez que o volume de rochas pelíticas (siltitos e folhelhos) supera o das lentes de calcários.

A espessura saturada foi considerada de 140 m, pois os poços mais profundos na área têm 150 metros e ainda não interceptam toda a extensão potencial do meio. Este valor é considerado mínimo, pois na estimativa de reservas hídricas há uma tendência de subestimação dos cálculos para ampliação da sustentabilidade de exploração dos aquíferos.

- *Reserva Renovável*, também conhecida como *Reguladora* (Equação 4.1): representa o volume de recarga natural anual média e, por essa razão, é submetida ao efeito sazonal ou interanual das precipitações.

$$\text{Equação 4.1: } R_r = A \cdot I_{fci} \cdot \Delta h ,$$

onde  $R_r$  = reserva renovável;  $A$  = área ( $m^2$ );  $I_{fci}$  = índice de fraturamento e carstificação interconectados;  $\Delta h$  = variação anual da superfície potenciométrica (m/ano).

Assim,  $R_r = 10.000 \text{ m}^2 \times 0,06 \times 3,44 \text{ m} = \mathbf{2.064 \text{ m}^3/\text{ano}}$  (em uma área de 1 hectare).

- *Reserva Permanente*: refere-se à água armazenada na zona saturada do aquífero (Equação 4.2) que não varia em função da precipitação anual, e corresponde à parcela mais importante do ponto de vista de volume, pois é regularizada em períodos de vários anos.

$$\text{Equação 4.2: } R_p = A \cdot I_{fci} \cdot b \text{ (m}^3\text{)},$$

onde  $R_p$  = reserva permanente;  $A$  = área ( $m^2$ );  $I_{fci}$  = índice de fraturamento e carstificação interconectados;  $b$  = espessura saturada do aquífero.

Assim,  $R_p = 10.000 \text{ m}^2 \times 0,06 \times 140 \text{ m} = \mathbf{84.000 \text{ m}^3}$  (em uma projeção de 1 ha do aquífero).

- *Reserva Explorável*: equivale à disponibilidade hídrica do reservatório, isto é, ao volume que pode ser retirado sem causar efeitos deletérios ao aquífero (Equação 4.3).

$$\text{Equação 4.3: } R_e = R_r + \%/\text{ano} R_p \text{ (m}^3\text{/ano)},$$

onde  $R_e$  = reserva renovável;  $R_r$  = reserva permanente;  $\%/\text{ano}$  = parcela anual passível de extração sem causar danos ao reservatório.

O ponto crítico na estimativa da disponibilidade hídrica é a manutenção do equilíbrio do sistema. Por esse motivo, a *Reserva Explorável* não deve ser superior à vazão sustentável de renovação e de alimentação dos poços.

Neste trabalho a *Reserva Explotável* admite a retirada de toda a *Reserva Renovável* e mais um percentual da *Permanente*. Durante a medição do nível estático do aquífero a descarga nas nascentes e córregos ocorre de forma independente. Nesta perspectiva, considera-se que, ao se medir o  $\Delta h$  anual, as vazões dos corpos hídricos superficiais já estão garantidas.

Por outro lado, com a formação do cone de depressão após o início do bombeamento, é gerada uma condição para induzir uma infiltração adicional, que anteriormente não existia. A partir deste entendimento, é possível extrair parte da *Reserva Permanente*, além da *Renovável*.

A porcentagem de *Reserva Permanente* deve ser determinada em função do próprio reservatório, das condições de renovação, de recarga e da precipitação média anual. Portanto, por representar sistemas naturalmente sensíveis, sugere-se o valor de 4% da *Reserva Permanente* para o aquífero associado ao estudo de caso.

Assim,  $R_e = 2.064 \text{ m}^3/\text{ano} + 0,04 / \text{ano} \times 84.000 \text{ m}^3 = 2.064 \text{ m}^3/\text{ano} + 3.360 \text{ m}^3/\text{ano} = \mathbf{5.424 \text{ m}^3/\text{ano}}$  por hectare de área de distribuição do aquífero.

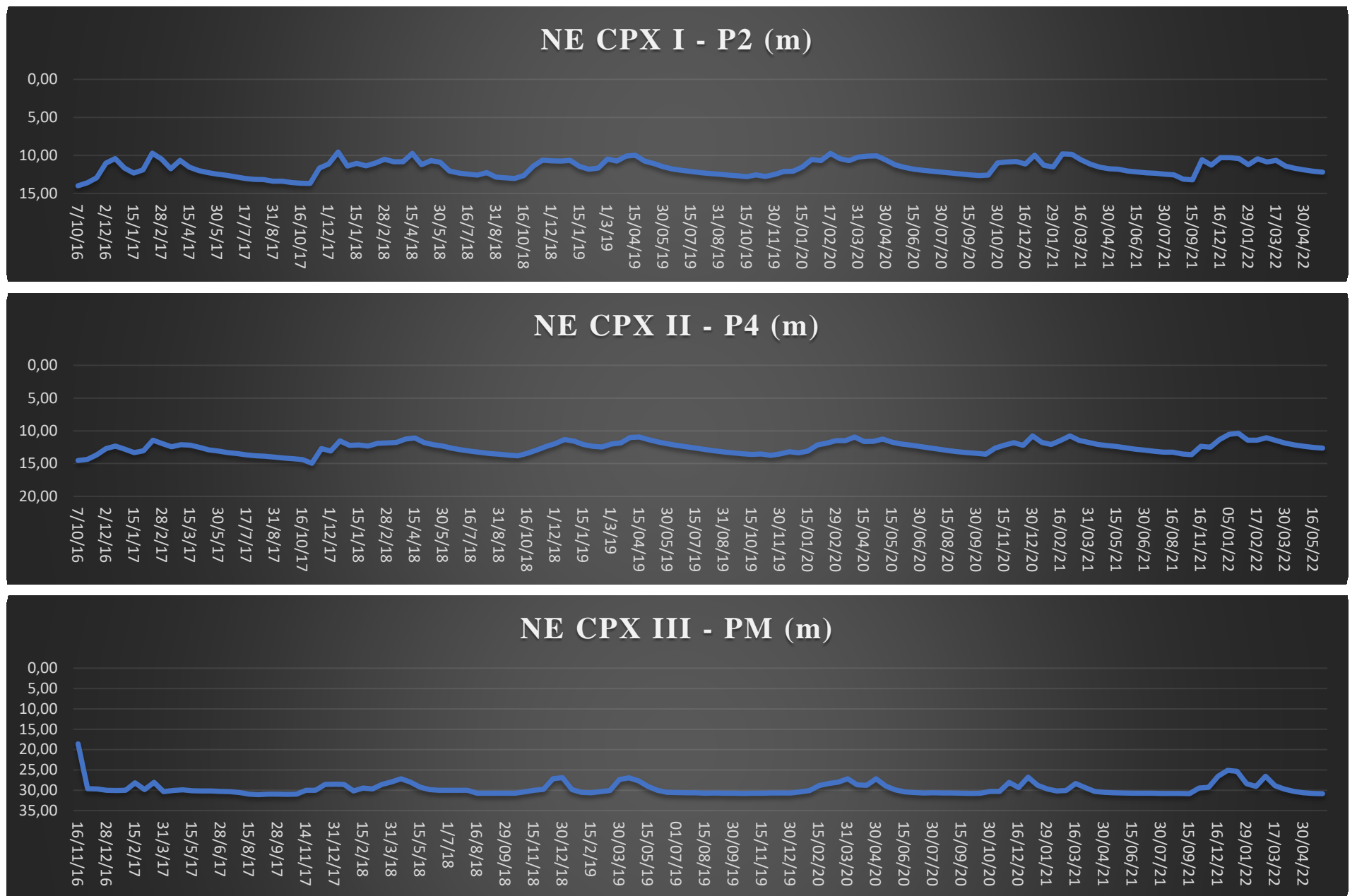
Recomenda-se o monitoramento continuado do reservatório, de tal maneira que, se porventura, os níveis se mantenham, a porcentagem pode ser ampliada. Caso haja reduções significativas, deve-se limitar o percentual da *Reserva Permanente* no cômputo das disponibilidades.

A Figura 3.25 exhibe a flutuação dos níveis freáticos nos três poços de monitoramento instalados na área de estudo no período de outubro de 2016 a abril de 2022. Os dados correspondentes à flutuação no nível estático são coerentes com o modelo fissuro-cárstico proposto.

Comumente, reservatórios fraturados dependem muito do solo sobreposto, logo a resposta da flutuação da superfície potenciométrica se assemelha a de um sistema intergranular, cujas curvas são mais suaves.

Por outro lado, a variação do nível freático natural em carstes é representada por picos que correspondem diretamente aos eventos de precipitação.

O comportamento observado na Figura 3.25 indica que em sistemas fissuro-cársticos é verificada uma combinação entre uma curva típica de aquíferos intergranulares (suave) e a de reservatórios associados a calcários (com presença de picos).



**Figura 3. 26.** Variação do nível estático dos poços CPX I - P2, CPX II - P4 e CPX III - PM no período de 2016 a 2022.

## CAPÍTULO 4 - DISCUSSÕES E PROPOSTAS PARA GESTÃO

A primeira parte desse capítulo apresenta uma discussão acerca dos resultados, obtidos a partir da integração dos dados expostos no capítulo anterior. E tem por finalidade dar suporte ao modelo hidrogeológico de aquífero fissuro-cárstico estudado na região de Crixalândia.

A segunda parte, por sua vez, é direcionada para a proposta de gestão desse tipo de reservatório, onde são tratados elementos comuns e aplicáveis ao modelo de forma mais específica.

### 4.1. Discussões

Neste item serão enumerados os principais aspectos que são utilizados para a caracterização e avaliação do modelo fissuro-cárstico, além das ferramentas usadas para seu estudo e a comparação destes aquíferos com aqueles enquadrados como carstes clássicos.

#### 4.1.1. Condições Geológicas para o Estabelecimento de Aquíferos Fissuro-Cársticos

Sedimentos carbonáticos são produzidos na própria bacia de deposição pela atividade biológica ou por indução química, sendo tanto por acumulação direta de fragmentos de carapaças, quanto pelo metabolismo de microrganismos e invertebrados.

Os principais controles da deposição de grandes volumes de rochas carbonática incluem presença de águas limpas, quentes, agitadas, com subsidência lenta da bacia, estabilidade tectônica e ausência de sedimentos terrígenos (não carbonáticos), uma vez que a sua contribuição fomenta a diminuição da produção orgânica e, conseqüente, redução da sedimentação orgânica (Campos *et al.*, 2012).

Sendo assim, quando os carbonatos ocorrem de forma contínua em camadas espessas com ampla continuidade lateral e compõem aquíferos, são associados a sistemas cársticos clássicos com dissolução bem desenvolvida que formam grandes cavidades, geomorfologia particular, além das demais características do ambiente cárstico (espeleotemas, rios subterrâneos, águas duras, etc.).

Os sedimentos terrígenos, por sua vez, são produzidos a partir do intemperismo e erosão na área fonte, que passam por transporte e deposição na bacia. O transporte envolve processos de suspensão, tração e fluxo de detritos, de modo que, são levados até a bacia de deposição e então, depositados em ambientes distintos.

Além das condições responsáveis pela deposição de sedimentos carbonáticos e terrígenos, em ambientes particulares, existem situações geológicas que possibilitam sua deposição de maneira simultânea. Os principais parâmetros que determinam e controlam a sedimentação concomitante de carbonatos e terrígenos em sucessões de plataformas mistas (carbonáticas/siliciclásticas) (Dorsey & Kidwell, 1999, Khetani & Read, 2002, Arana *et al.*, 2005, Thran *et al.*, 2020), incluem:

- *Paleotopografia de fundo que mantém porções mais altas do embasamento entre porções rebaixadas*: assim, a deposição carbonática ocorre nas elevações e a dos terrígenos nas áreas com maior lâmina d'água;
- *Águas límpidas em que há restrito aporte de sedimentos detríticos*: possibilitam a proliferação de microrganismos como algas e invertebrados com exoesqueleto carbonático;
- *Águas quentes associadas à zona fótica*: ambientes mais iluminados apresentam maior disponibilidade de nutrientes, o que favorece o desenvolvimento da fábrica orgânico-carbonática;
- *Manutenção da estabilidade da lâmina d'água*: permite que as condições favoráveis à deposição carbonática sejam permanentes; e
- *Controle químico da sedimentação nos casos em que ocorre saturação de bicarbonato, cálcio e magnésio em condições físicas adequadas (pH, Eh e temperatura)*: viabiliza a deposição direta de micrita a partir da água do mar.

Posto isso, a paleotopografia é responsável pelas dimensões dos corpos de rochas carbonáticas e sua natureza composicional nos aquíferos fissuro-cárstico e, portanto, possibilita dois cenários que formam reservatórios homogêneos e heterogêneos.

Em condições de plataforma estável, sem variações de paleobatimetria, depositam camadas espessas e contínuas de rochas, que podem ser representadas por calcários com elevado aporte de terrígenos finos, e formam o que é denominado de margas.

O Membro Pedro Leopoldo da Formação Sete Lagoas do Grupo Bambuí (região cratônica) nas cidades de Sete Lagoas e Lagoa Santa, MG, Brasil (Carneiro, 2013 e Pessoa & Mourão, 1998), e as margas da região da Cracóvia, Polônia (Rozkowksi, 1998) podem ser citados como exemplos de aquíferos fissuro-cársticos homogêneos.

Nos casos em que a plataforma apresenta variações da profundidade da lâmina d'água, depositam-se, preferencialmente, as lentes carbonáticas interdigitadas lateral e verticalmente com rochas não carbonáticas, que podem ter dimensões variáveis de dezenas de metros até poucos quilômetros, e espessuras de até poucas dezenas de metros.

Como exemplos de aquíferos fissuro-cársticos heterogêneos podem ser citados: Paderborn, Alemanha (Michel & Struckmeier, 1985); Burgundy, França, (Robineau *et al.*, 2018), e São Sebastião, DF, Brasil (Campos & Freitas, 1998).

Portanto, os reservatórios fissuro-cársticos, assim como demais aquíferos, podem ser classificados como livres, totalmente confinados ou semiconfinados (com ou sem contribuição de água do aquítarde).

As variações de subtipos de aquíferos são controladas pela natureza do ambiente deposicional, pelas dimensões das lentes carbonáticas, pelo relevo atual em que os sistemas ocorrem, tipos de coberturas de solos, e clima.

#### 4.1.2. Caracterização Física e Hidráulica de Aquíferos Físsuro-Cársticos

Apesar de não haver um método de estudo hidráulico ideal para aquíferos físsuro-cársticos, a definição dos parâmetros hidrodinâmicos no estudo de caso foi realizada a partir de dados de teste de bombeamento nos respectivos poços de monitoramento.

Para o cálculo da condutividade hidráulica e do coeficiente de armazenamento foi utilizado o Método de Moench, por ser aquele disponível em *softwares* comerciais, o mais coerente com o modelo conceitual em análise. Entretanto, outros métodos como o de Walton e Hantush também poderiam ser aplicados, com a obtenção de resultados adequados, para o caso em que o aquífero físsuro-cárstico seja semiconfinado.

As Tabelas 4.1 e 4.2 exibem alguns dos principais parâmetros físicos e hidrodinâmicos utilizados para a caracterização dos diferentes tipos de aquíferos clássicos (Freeze e Cherry, 1979; Custodio e Llamas, 1983; Keller, 1996; Fetter, 1994; Paula e Campos, 2016). A referência utilizada para os reservatórios físsuro-cársticos é baseada na proposta de modelo conceitual sugerida neste trabalho.

Os parâmetros hidrodinâmicos nos aquíferos clássicos representam valores médios das rochas que os compõem. No caso do modelo físsuro-cárstico, os valores não são correspondentes aos aquíferos fraturados ou cársticos isoladamente, mas valores médios em função da contribuição de cada conjunto no sistema.

De qualquer modo, os valores obtidos, com destaque para a condutividade hidráulica e o coeficiente de armazenamento, devem ser avaliados e comparados com sistemas individuais (fraturados e cársticos) para se verificar a coerência dos dados obtidos.

**Tabela 4. 1.** Contrastes entre parâmetros de definição e caracterização de diferentes modelos conceituais de aquíferos.

| PARÂMETROS DE CARACTERIZAÇÃO      |                                                 |                           |                                    |                      |
|-----------------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------|------------------------------------|----------------------|
| <i>Denominação dos Aquíferos</i>  | <i>Tipos de porosidade predominante</i>         | <i>Unidade litológica</i> | <i>Isotropia / Anisotropia</i>     | <i>Tipo de fluxo</i> |
| Intergranular / granular / poroso | Intergranular (matricial)                       | Única ou composta         | Isotrópico (maior parte dos casos) | Laminar              |
| Fraturado / fissural / cristalino | Secundária planar (fraturas)                    | Única ou composta         | Anisotrópico                       | Laminar a turbulento |
| Cárstico                          | Secundária planar por dissolução                | Única                     | Fortemente anisotrópico            | Turbulento           |
| Dupla Porosidade / misto          | Matricial primária residual + secundária planar | Única                     | Anisotrópico                       | Laminar a turbulento |
| Físsuro-Cárstico                  | Secundária planar + secundária por dissolução   | Única ou composta         | Fortemente anisotrópico            | Laminar e turbulento |



**Tabela 4. 2.** Comparação dos valores de referência de parâmetros hidrodinâmicos e dimensionais dos diferentes modelos conceituais de aquíferos.  $\eta$  = porosidade,  $\eta_e$  = porosidade efetiva,  $K$  = condutividade hidráulica,  $T$  = transmissividade,  $S$  = coeficiente de armazenamento e  $C_{esp}$  = capacidade específica.

| AQUÍFEROS<br><i>Quanto à porosidade</i> | PARÂMETROS HIDRÁULICOS E DIMENSIONAIS |              |                     |                     |                     |                         |
|-----------------------------------------|---------------------------------------|--------------|---------------------|---------------------|---------------------|-------------------------|
|                                         | $\eta$ (%)                            | $\eta_e$ (%) | $K$ (m/s)           | $T$ ( $m^2/s$ )     | $S$                 | $C_{esp}$ ( $m^3/h/m$ ) |
| Intergranular                           | 12 a 25                               | 8 a 22       | $10^{-5} - 10^{-7}$ | $10^{-4} - 10^{-6}$ | $10^{-1} - 10^{-5}$ | 1 - 10                  |
| Faturado                                | 0,5 a 3                               | 0,2 a 2,5    | $10^{-7} - 10^{-8}$ | $10^{-5} - 10^{-6}$ | $10^{-1} - 10^{-4}$ | 0,01 - 0,5              |
| Cárstico                                | 15 a 30                               | 12 a 28      | $10^{-4} - 10^{-6}$ | $10^{-3} - 10^{-6}$ | $10^{-1} - 10^{-4}$ | 5 - 50                  |
| Intergranular + Faturado                | 6 a 10                                | 4 a 8        | $10^{-5} - 10^{-6}$ | $10^{-3} - 10^{-6}$ | $10^{-1} - 10^{-4}$ | 1 - 5                   |
| Faturado + Cárstico                     | 10 a 12                               | 6 a 10       | $10^{-4} - 10^{-8}$ | $10^{-3} - 10^{-6}$ | $10^{-1} - 10^{-4}$ | < 1 - > 6               |

#### 4.1.3. Contrastes entre Aquíferos Físsuro-Cársticos e Cársticos Clássicos

Existem diversos exemplos de casos de aquíferos físsuro-cársticos que foram estudados na perspectiva de um cárstico típico. Este tipo de abordagem pode alterar resultados esperados ou gerar informações que não condizem com a realidade. Assim, a seguir são enumeradas diferenças entre estes dois modelos conceituais.

A principal diferença é vinculada às dimensões e continuidade das cavidades de dissolução. Como no modelo físsuro-cárstico as rochas carbonáticas ocorrem na forma de lentes ou como rochas impuras (margas), os processos de dissolução do carbonato de cálcio são limitados.

A dissolução de calcita e dolomita depende da mistura de água de recarga ao longo do trajeto do fluxo subterrâneo. A tendência da água é aumentar a concentração de bicarbonato de cálcio e alcançar o equilíbrio entre a solução e a própria rocha que compõe o aquífero. Assim, é necessário que ocorram novas entradas de águas meteóricas no sistema para ampliar a eficiência da carstificação.

Em sistema cársticos clássicos é comum existir recarga ao longo fluxo, pois as camadas carbonáticas são espessas e contínuas. Nos físsuro-cársticos a recarga e o fluxo são mais restritos nas porções fraturadas, o que dificulta a entrada de água de recarga ao longo do trajeto do fluxo subterrâneo e, conseqüentemente, limita a dissolução cárstica.

Poços e nascentes associados aos carstes típicos, geralmente, apresentam grandes vazões, que podem, inclusive, ser consideradas anômalas. Os poços podem apresentar vazões de mais de  $150 \text{ m}^3/\text{h}$  (Campos & Freitas-Silva, 1998), uma vez que, o reservatório apresenta ampla continuidade lateral, o que resulta em um grande volume de rocha que, potencialmente, contribui para alimentação da captação.

Este contraste é diretamente proporcional ao volume de rocha não carbonática, que por apresentar menor porosidade, é responsável pela redução da vazão do poço. De forma geral, os poços instalados em reservatórios físsuro-cársticos apresentam vazões tanto maiores quanto maior a espessura de rochas carbonáticas interceptadas.

O mesmo é observado em nascentes, pois o fluxo no carste tende a convergir e gerar surgências com vazões muito grandes, comumente 180 m<sup>3</sup>/h (Campos, 2004). Por outro lado, as vazões em reservatórios físsuro-cársticos são mais reduzidas, comumente da ordem de dezenas de m<sup>3</sup>/h.

A composição química das águas associadas aos aquíferos cársticos e físsuro-cársticos é outro ponto importante para sua distinção. De forma geral, águas provenientes de carstes são mais mineralizadas, ricas em bicarbonato, cálcio e magnésio, elevada dureza total e pHs muito elevados.

O total de sólidos dissolvidos associado aos sistemas clássicos podem alcançar, comumente, valores de 300 a 400 mg/L e, em função da condição climática, estes valores podem alcançar mais de 500 mg/L (Sousa, 2013).

Em aquíferos físsuro-cársticos a composição química das águas é mais amena, sendo que, de forma geral, para locais com precipitação da ordem de 1300 mm/ano ou maior, o total de sólidos dissolvidos é inferior a 200 mg/L, o pH entre 7 e 8, e o mesmo ocorre com os demais parâmetros químicos que enquadram as águas como potáveis.

Carstes clássicos apresentam todas as feições da paisagem cárstica, o que inclui grande número de sumidouros e surgências, dolinas, uvalas, sistemas ricos em espeleotemas, pináculos, dentre outras feições características. Em reservatórios físsuro-cársticos, em função da menor presença de rochas carbonáticas e de sua descontinuidade, as feições da geomorfologia cárstica são mais escassas ou ausentes.

Ao considerar sistemas hidrogeológicos cársticos e físsuro-cársticos similares, com áreas de recarga e de descarga às distâncias equivalentes, com as mesmas coberturas de solos e em um contexto geomorfológico semelhante, é comum que as águas em circulação apresentem idades distintas. Em reservatórios físsuro-cársticos as águas tendem a ser mais antigas, em função da menor condutividade hidráulica média, resultante do fluxo em meios carstificados e fraturados (Ribeiro, 2020).

Por fim, pode-se enumerar mais um parâmetro discriminante associado à forma de flutuação nos níveis freáticos, conforme a sazonalidade climática. Em sistemas cársticos a variação é rápida a instantânea, fortemente vinculada aos eventos de precipitação que, em função do grande número de dolinas e outras feições da geomorfologia típica, contribuem para uma recarga eficiente. Em meios físsuro-cársticos a água precisa percolar em meios de fluxo mais lento, associados às porções fraturadas não carstificadas. Portanto, há um retardo da chegada da água à zona saturada, de forma que a elevação e o rebaixamento dos níveis ocorrem mais lentamente.

#### 4.1.4. Estudos de Caso e Aplicação da Terminologia

Este subitem apresenta alguns exemplos de estudos de caso que foram descritos como fissuro-cársticos sem o uso de uma definição precisa da terminologia; ou aquíferos cársticos que, pelas suas características, estariam melhor enquadrados no modelo proposto no presente estudo.

- Debieche *et al.* (2002) trabalharam com um conjunto de rochas calcárias intercaladas com gesso e formações argilosas em um *graben* intensamente fraturado localizado em Mouans-Sartoux, sudeste da França. Os autores consideraram que o comportamento hidráulico do reservatório difere de acordo com a taxa de bombeamento: um meio único contínuo - equivalente para baixas vazões e de dupla permeabilidade para altas descargas.

Uma explicação plausível para esse comportamento é o potencial aumento de volume de aquífero sob descarga. A baixas vazões, a projeção do reservatório para alimentação do poço é restrita, sendo a água drenada principalmente de fraturas. Para altas taxas de bombeamento, o cone de depressão é ampliado, incorporando a drenança de zonas fraturadas e de condutos. Esse comportamento é similar ao observado no poço CPX II – P4 (Figura 3.15) contido na área de estudo.

- Witkowski *et al.* (2003) estudaram o aquífero na região entre Katowice e a Cracóvia, sul da Polônia, que é representado por rochas dolomíticas e calcárias intercaladas com conglomerados e margas argilosas. A espessura total do conjunto varia de 20 a mais de 200 m e os reservatórios têm caráter cárstico e fraturado, sendo cortados por sistemas de falhas. As condutividades hidráulicas variam da seguinte forma: rochas pelíticas (margas) de  $1,9 \times 10^{-10}$  a  $2,2 \times 10^{-8}$  m/s; o meio fraturado de  $3,8 \times 10^{-8}$  a  $1,1 \times 10^{-4}$  m/s.

Apesar de ser classificado como fissuro-cárstico, os autores consideram o aquífero como tendo tripla porosidade, porém, apenas duas (fraturas e dissoluções cársticas) são funcionais para o fluxo (geram condutividade hidráulica). Além disso, seria mais adequado calcular a condutividade hidráulica de acordo com a contribuição de cada conjunto no sistema, e não considerar os tipos de rochas em uma perspectiva separada.

- Feitosa *et al.* (2008) classificaram como fissural cárstico reservatórios compostos por rochas metamórficas de composição calcífera. De forma geral, no Brasil rochas carbonáticas metamorfizadas ocorrem em restritos volumes em maciços lenticulares intercaladas ou interdigitadas entre anfíbolitos ou gnaisses. Esta feição é devida à ocorrência dessas rochas associada à sequências metavulcanossedimentares ou metassedimentares, em que os carbonatos originais são distribuídos em forma de lente.

Dessa maneira, é inadequado considerar apenas o conjunto de rochas carbonáticas para a classificação do aquífero. O mais apropriado, neste caso, seria incluir as rochas adjacentes, o que resultaria no modelo de porosidade mista proposto como fissuro-cárstico.

- Campos (2013) caracterizou o aquífero relacionado à base do Grupo Bambuí na Região de Formosa, estado de Goiás como um sistema cárstico. Entretanto, a natureza das lentes de rochas carbonáticas intercaladas com siltitos argilosos laminados e fraturados indica que a descrição relacionada com o modelo fissuro-cárstico seria mais apropriada. Essa afirmação é corroborada pela verificação das dimensões de centenas de metros das lentes calcárias pouco carstificadas na região.
- Rozkowski & Rozkowski (2016) consideram um reservatório entre a Cracóvia e a Silésia, sul da Polônia, como um carste típico com desenvolvimento incompleto (carstificação restrita), devido à presença de margas e sedimentos argilosos. Este é um caso típico de um aquífero que foi classificado como cárstico pouco desenvolvido, mas que deveria ser reenquadrado no modelo fissuro-cárstico, visto que as principais características não são condizentes ao ambiente de águas subterrâneas carbonáticas clássicas.
- Robineau *et al.* (2018) estudaram um reservatório em Borgonha, França, representado por calcários com oólitos e oncólitos intercalados com margas que contêm bioclastos, e o classificaram como fissuro-cárstico homogêneo de tripla porosidade.

Embora a classificação tenha sido utilizada adequadamente, o reservatório foi descrito como um carste pouco desenvolvido, devido ao tamanho das cavidades não ultrapassar alguns metros. Comumente, rochas carbonáticas compostas por aloquímicos apresentam cimento espático e/ou matriz micrítica que preenche os poros primários.

Portanto, ao analisar a funcionalidade dos diferentes tipos de porosidades, conclui-se que apenas as fraturas e as cavidades de dissolução cárstica (mesmo sendo pouco desenvolvidas) são livres para o fluxo, o que enquadra o aquífero como fissuro-cárstico e ratifica o modelo proposto.

- Malik *et al.* (2019) apresentam um estudo de caso em que rochas dolomíticas e calcárias estão associadas a margas pouco permeáveis na parte norte do Monte Vel'ká Fatra, Eslováquia Central. Há registro de um pequeno número de cavernas, nenhuma delas com mais de algumas dezenas de metros. No entanto, feições cársticas são frequentemente observadas em poços existentes na região que foram, em sua maioria, consideradas como fraturas alargadas por dissolução.

Embora a área do aquífero (17 km<sup>2</sup>) corresponda à escala em distribuição lateral proposta por este trabalho, a espessura (média de 300 m) é muito extensa, sendo melhor enquadrado como um sistema cárstico pouco desenvolvido. Entretanto, as margas que contornam as rochas carbonáticas concordam com o modelo fissuro-cárstico homogêneo. Assim, neste caso, trata-se de um sistema composto por dois aquíferos: um cárstico clássico individual na porção central e um fissuro-cárstico homogêneo nas adjacências.

- Dausse *et al.* (2019) e Fischer *et al.* (2020) realizaram um estudo ao norte da cidade de Montpellier, na França, em um reservatório classificado como cárstico, porém descrito como fraturado e carstificado. Os limites exatos da área do aquífero são pouco conhecidos, mas os autores estimam que seja superior a 250 km<sup>2</sup>. Dados obtidos de poços indicam que o manancial é composto por finas camadas de calcário margoso no topo e na parte inferior por calcário maciço com um elevado grau de carstificação.

A porção superior tem espessura que varia de 30 a 40 m e os autores a consideram como uma camada confinante. A profundidade máxima perfurada na unidade basal corresponde a 60 m. A interface entre essas duas unidades é representada por uma falha com direção NE/SW e mergulho de 20° para NW. Para este reservatório o modelo físsuro-cárstico homogêneo seria mais apropriado à camada superior, enquanto a porção basal se encaixa mais adequadamente em um carste clássico.

- Por fim, como destaque dessa discussão, é apresentado o caso do Aquífero Jandaíra de 17.756 km<sup>2</sup> na região de Baraúna - Rio Grande do Norte, onde Feitosa (1994) realizou o zoneamento com resistividade elétrica e delimitou três segmentos:

- i) *Área de elevada carstificação*: constituída por um pacote maciço de rochas calcárias com presença de grandes condutos;

- ii) *Área de restrita carstificação I*: composta por calcário com intercalações de folhelhos e pequeno número de cavidades de dimensões reduzidas; e

- iii) *Área com restrita carstificação II*: formada por calcários e margas com rede de carstificação pouco desenvolvida.

Posteriormente, Manoel Filho (2003) considerou o conjunto inteiro e o classificou como fissural-cárstico livre. Demétrio *et al.*, (2018) consideram que o mesmo reservatório é constituído por dois conjuntos de características hidrogeológicas particulares e se comporta como dois aquíferos distintos: a parte superior formada por calcários com aproximadamente 20 m de profundidade, sendo mais carstificada; e a porção basal com carstificação limitada.

Este é um caso especial em que o mais adequado seria dividir esse sistema em três unidades hidroestratigráficas distintas: I: carste (clássico) no topo, onde o calcário se encontra intensamente carstificado; II: físsuro-cárstico heterogêneo na porção intermediária representado por rochas calcárias intercaladas por folhelhos; e III: físsuro-cárstico homogêneo na base com margas e calcário com carstificação pouco desenvolvida.

#### 4.1.5. Importância dos Diferentes Tipos de Porosidade no Aquífero

Os diferentes tipos de porosidades secundárias associadas às fraturas e aos condutos apresentam diferentes funções no aquífero fissuro-cárstico. Os condutos são mais importantes como reservatórios de água por acumulação sendo, desta forma, fundamentais como armazenadores de águas subterrâneas.

Por outro lado, as fraturas têm função principal de transmissão das águas a partir de diferentes compartimentos: recarga, de porções rasas para mais profundas, de diferentes blocos de aquíferos. Entretanto, fraturas com maiores aberturas também podem desempenhar funções de armazenamento de água.

Em analogia ao reservatório de dupla porosidade, há uma tendência similar. Neste caso, entretanto, a porosidade matricial tem maior importância para o armazenamento da água, enquanto as fraturas funcionam principalmente na sua transmissão (Paula e Campos, 2016).

## **4.2. Proposta de Gestão**

Neste item serão enumeradas ações aplicadas à gestão de aquíferos de forma geral, com as devidas adaptações para o modelo hidrogeológico proposto.

### 4.2.1. Instalação de Sistemas para Recarga Artificial dos Aquíferos

A recarga artificial é um conjunto de técnicas que, efetivamente, pode ser útil à gestão dos recursos hídricos (Villaroya & Adwell, 1998). A aplicação destas ações deve favorecer o aumento da disponibilidade hídrica superficial e subterrânea, uma vez que ambos os mananciais são abastecidos por precipitação pluvial e, em muitos casos, apresentam forte conexão hidráulica (Campos *et al.*, 2021).

Diante disso, para a gestão de aquíferos fissuro-cársticos recomenda-se:

- Indução da infiltração em áreas de ocorrência de dolinas. O fluxo subterrâneo é modificado em função do padrão de relevo, de heterogeneidades e em função da área de recarga e descarga (Campos *et al.*, 2021). Com isso, é sugerido o redirecionamento do fluxo de escoamento superficial, através de barreiras, no sentido das estruturas naturais de colapso já existentes (dolinas, abismos, depressões e abatimentos).
- Levantamento de perfis geofísicos para a determinação da distribuição dos carbonatos em profundidade e verificação de eventuais cavidades, onde não há ocorrência de dolinas. Tendo em vista o elevado contraste de resistividade entre o calcário e as rochas pouco permeáveis que compõem um aquífero fissuro-cárstico, o método geofísico mais indicado é o de eletrorresistividade.



#### 4.2.2. Construção e Operação Adequada de Poços

Para a construção de poços recomenda-se a análise de lineamentos sobre fotografias aéreas e composição colorida RGB sobre imagens de satélite com o intuito de identificar as principais direções de fraturas. Outras ações propostas são:

- Definição dos perímetros de proteção dos poços (PPP), a fim de evitar usos que causem risco de contaminação e interferência com poços existentes;
- Proteção sanitária no espaço anelar entre a parede do poço e a seção de revestimento. É indicado o uso de encascalhamento artificial de alta condutividade hidráulica como pré-filtro. A cimentação e a vedação permitem o isolamento adequado;
- Testes prolongados para analisar as características hidrodinâmicas do aquífero (condutividade hidráulica, transmissividade e coeficiente de armazenamento), definir a vazão ideal de bombeamento e a eficiência hidráulica do poço;
- Instalação de hidrômetros e tubos piezométricos para racionalizar a produção dos poços, de tal maneira que se possa evitar riscos de queda acentuada de vazão ou, até mesmo, da total exaustão dos reservatórios. É interessante que esse monitoramento seja quali-quantitativo com análise periódica das águas. A medição dos níveis deve ser, preferencialmente, realizada em tempo real com o apoio de telemetria.

#### 4.2.3. Uso de Critérios Específicos para Outorga

A outorga de direito de uso dos recursos hídricos subterrâneos está entre os instrumentos previstos pela Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei Nº 9.433/97). Em geral, este documento é emitido de forma cartorial, sem um critério imposto.

Para garantir o equilíbrio dos usos múltiplos e a sustentabilidade dos mananciais, é essencial o estudo das características intrínsecas do aquífero quanto ao seu regime de fluxo, reservas, parâmetros hidrodinâmicos e interrelações com o ciclo hidrológico.

No caso de aquíferos físsuro-cársticos, que são naturalmente complexos, a velocidade do fluxo é muito rápida. Dessa maneira, os critérios técnicos não devem ser baseados apenas nos valores de bombeamento. É importante considerar, também, os níveis potenciométricos anuais máximos. Sendo assim, a outorga de uso de recursos hídricos subterrâneos deve ser fundamentada no cálculo de disponibilidade do reservatório, como foi exemplificado no item sobre as estimativas de reservas.

O período de validade da outorga deve ser curto, pois a pressão de bombeamento por intervalos longos de tempo pode resultar na sobreexplotação e prejuízos aos sistemas. Para a renovação, recomenda-se a avaliação anual. Caso haja rebaixamento exagerado, a quantidade bombeada deve ser reduzida até que o nível dinâmico atinja seu ponto de equilíbrio. Por outro lado, no caso do nível se manter na média anual, os volumes podem ser majorados.

#### 4.2.4. Mapeamento da Vulnerabilidade à Contaminação

De forma geral, a avaliação da sensibilidade à contaminação auxilia na proteção das áreas de recarga e na preservação da qualidade das águas dos reservatórios. Essa metodologia consiste em utilizar parâmetros selecionados como indicadores a partir da sobreposição de mapas. Sendo assim, são realizadas combinações dos aspectos físicos específicos que, potencialmente, podem afetar a maior ou menor exposição do aquífero. A soma da vulnerabilidade (que é uma característica natural e intrínseca do manancial) com as cargas contaminantes resulta no risco de degradação da qualidade da água.

As ferramentas mais populares para a modelagem da suscetibilidade à contaminação incluem os métodos: DRASTIC (Aller *et al.* 1987), GOD (Foster, 1987), AVI (Von Stempvoort *et al.* 1992), SINTACS (Civita *et al.* 1997), dentre outros; que podem ser aplicadas para diferentes tipos de aquífero.

Contudo, devido às particularidades dos aquíferos cársticos foram desenvolvidos métodos específicos para este tipo de reservatório, e os três mais, comumente, utilizados são:

- EPIK (Doerfliger *et al.* 1999) utiliza os seguintes atributos: (E) epicarste, (P) cobertura de proteção, (I) condição de infiltração e (K) desenvolvimento de rede cárstica;
- COP (Vías *et al.* 2002) combina os parâmetros: (C) concentração de fluxo, (O) camadas sobrepostas e (P) precipitação; e
- PaPRIKa (Kavouri *et al.* 2011) analisa tanto a estrutura quanto o funcionamento hidráulico, de tal maneira que (Pa) equivale à proteção do aquífero e considera dois fatores: I - Grupo da Estrutura que pondera dois aspectos: (P) proteção e (R) tipo de rocha; e II - Grupo do Funcionamento Hidráulico que avalia (I) infiltração e (Ka) grau de carstificação.

Tendo em vista à complexidade dos aquíferos fissuro-cársticos, ao utilizar métodos específicos para carstes os resultados podem não condizer com a realidade dos sistemas. Neste caso, é necessário adaptar alguns parâmetros aplicados, como por exemplo, considerar a relação de espessuras dos tipos de rocha que compõem o reservatório fissuro-cárstico, ou dos volumes destas rochas em uma análise tridimensional. É fundamental comparar e avaliar os parâmetros, a fim de que o produto se adeque ao modelo proposto.

#### 4.2.5. Cobrança pelo Uso da Água

A cobrança pelo uso da água também é uma ferramenta da Política Nacional dos Recursos Hídricos (Lei Nº 9.433/97). A água é considerada como insumo da produção e, portanto, deve ter um valor econômico intrínseco. Trata-se de um aspecto que, inclusive, resulta em maior justiça, pois usuários de maiores volumes devem pagar mais do que aqueles que consomem menos.

Essa prática visa à redução de desperdício e de uso descontrolado da água, e sempre deve ser aplicada em conjunto com os processos de outorga. Uma vantagem da cobrança é a obrigatoriedade em se medir a quantidade de água retirada dos aquíferos. Assim, se houver necessidade, pode-se reduzir o bombeamento de maneira proporcional para os diversos usuários outorgados. A medição do volume é realizada a partir da instalação de hidrômetros na saída dos poços, ou na entrada dos reservatórios de regularização (caixas d'água).

Os recursos financeiros acumulados devem ser, prioritariamente, utilizados para financiar a gestão do próprio manancial, do qual as águas são bombeadas ou da bacia hidrogeológica em que o aquífero explorado se situa.

Assim, a cobrança pelo uso da água deve ser um instrumento não apenas arrecadatório, mas, principalmente, de controle da demanda, em contraste com a maioria das outras ações de gerenciamento, que visam o aumento da disponibilidade hídrica. Para aquíferos físsuro-cársticos, que são reconhecidamente complexos e sensíveis, esta conduta deve ser ainda mais recomendada, e deverá ser uma ação a mais para alcançar a sustentabilidade de exploração.

## CAPITULO 5 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 5.1 Conclusões

As condições de ocorrência da água subterrânea são extremamente variáveis, em função da diversidade das características do aquífero, clima, tipos de solo, controle estrutural, entre outros aspectos. Expressar todas essas informações não é simples. Contudo, modelos conceituais podem ser testados com a utilização de técnicas específicas, tornando-os uma representação coerente do contexto hidrogeológico natural.

O enquadramento de um reservatório em um modelo conceitual adequado é importante não apenas do ponto de vista teórico, mas também por ser a base para o desenvolvimento de simulação numérica, validação de parâmetros hidráulicos, elaboração de processos de outorga de direito de uso, estimativas de reservas hídricas e, enfim sua gestão. Em contrapartida, a classificação equivocada pode deturpar resultados esperados ou gerar dados que não condizem com a realidade.

Neste sentido, a presente dissertação apresentou o projeto de um modelo hidrogeológico para sistemas fissuro-cársticos, as ferramentas aplicadas à sua caracterização, além das principais diferenças em relação aos aquíferos cársticos clássicos. O trabalho foi baseado em pesquisa na literatura de sistemas análogos e, complementarmente, com estudos hidrogeológicos a partir de poços tubulares profundos por meio da análise do comportamento de testes de bombeamento, perfis descritivos, variações de vazões, etc.

As observações de campo forneceram informações sobre litologia, tipos pedológicos, níveis freáticos, direções de fluxo, comportamento de zonas saturadas e não saturadas, vocação hidrogeológica das rochas, entre outros elementos que, reunidos, subsidiaram a elaboração da proposta.

O modelo fissuro-cárstico, como tratado neste trabalho, é considerado distinto de um aquífero cárstico. As principais diferenças são vinculadas à natureza do conjunto de rochas reservatório, dos contrastes do fluxo no meio, das variações dos parâmetros hidráulicos (vazões, condutividade hidráulica e capacidade específica), além de divergências nas características hidroquímicas, onde águas de meios fissuro-cársticos apresentam menor mineralização e menor pH em comparação aos carstes típicos (sob mesmas condições climáticas).

Para o enquadramento no modelo proposto, o reservatório precisa apresentar, simultaneamente, fluxo laminar em fraturas e turbulento em espaços gerados por dissolução de rochas carbonáticas. A porosidade matricial é ausente ou minimamente interconectada, em função do desenvolvimento de processos diagenéticos (principalmente compactação mecânica e química e cimentação).

De forma geral, a dissolução das porções carbonáticas nos sistemas que se encaixam no modelo fissuro-cárstico é menor quando comparada aos aquíferos cársticos típicos. Em geral, formam cavidades variáveis de centímetros a poucos metros. Este comportamento é devido à restrição do fluxo através das rochas não carbonáticas.

Como a deposição simultânea de rochas siliciclásticas e carbonáticas é relativamente comum no registro geológico, o desenvolvimento de reservatórios mistos não é raro. Este tipo de sedimentação pode estar associada a diferentes controles: paleogeografia de fundo em ambiente marinho, distribuição espacial da zona fótica, entrada de terrígenos na plataforma carbonática, entre outros.

Os aquíferos fissuro-cársticos são sempre fortemente anisotrópicos, mas podem ser homogêneos ou heterogêneos, livres ou confinados, e ter mudança do fluxo de laminar para turbulento ou vice-versa ao longo das mesmas linhas de fluxo.

O estudo da potencimetry em sistemas cársticos clássicos e fissuro-cársticos não deve ser realizada de forma análoga aos aquíferos intergranulares, por se tratar de sistemas comumente segmentados. Assim, uma avaliação prévia dos compartimentos, a partir da análise de lineamentos estruturais, e a verificação da variação lateral dos níveis dos poços devem ser realizadas em busca de *outliers* e tendências. A presença de cavidades não saturadas próximas a zonas saturadas a pequenas distâncias é um indicador da existência de blocos dispostos lateralmente. Mesmo em condições em que haja poucos dados e mal distribuídos, a compartimentação pode ser evidenciada a partir de seções potenciométricas.

O controle hidrológico das vazões dos cursos d'água superficiais pelos reservatórios fissuro-cársticos é similar ao observado em sistemas cársticos clássicos. Isso é devido à variação natural da superfície potenciométrica, presença de níveis profundos, zonas de drenagens associadas a porções mais carstificadas e aos cursos d'água correspondentes à descarga destes aquíferos, que comumente, se apresentam de forma intermitente.

Por fim, a presença de características típicas da geomorfologia cárstica é menos comumente observada em regiões de ocorrência de aquíferos fissuro-cársticos. Feições como sumidouros, trechos de drenagens subterrâneas, dolinas, uvalas, dentre outras, são pouco presentes ou apenas verificadas em zonas de epicartes, onde ocorrem exposições de lentes de rochas carbonáticas.

## **5.2 Recomendações**

Para subsidiar pesquisas futuras com o objetivo de ampliar ainda mais o conhecimento sobre os aquíferos enquadrados no modelo conceitual do tipo fissuro-cárstico, recomenda-se desenvolver as seguintes linhas de investigação:

- Intensificar estudos de tratamento de dados de testes de bombeamento, de forma a se ter uma estatística de variações dos dados de condutividade hidráulica e vazões. Os métodos a serem escolhidos devem ser testados, em função das características locais dos mananciais estudados (se livre, confinados, semiconfinados etc.).

A avaliação do comportamento das curvas de rebaixamento deve ser verificada e comparada com aquíferos enquadrados em outros modelos conceituais. Outro aspecto importante a ser considerado são as recuperações que ocorrem após longos períodos de bombeamento, quando novas zonas de dissolução são alcançadas pela ampliação dos cones de depressão;

- Avaliar o monitoramento de longo prazo (no mínimo 5 anos) dos níveis para verificar sua resposta ao bombeamento e possibilitar uma análise de sustentabilidade da produção hídrica. Esta ação é indispensável, pois estes reservatórios são pouco conhecidos e, em função de sua natureza, são bastante sensíveis à exploração. Neste sentido, critérios de outorga específicos para estes aquíferos devem ser estabelecidos;
- Desenvolver estudos isotópicos, de forma a se obter informações sobre a circulação e a idade das águas, além da interação água-rocha. Para este fim, podem ser realizadas análises de isótopos estáveis de Oxigênio, Deutério e Estrôncio, além de isótopos radiogênicos de Trítio e Carbono 14. Estes estudos devem ser realizados de forma específica para cada local, uma vez que além do contexto da circulação das águas, o clima é um fator interveniente fundamental;
- Realizar pesquisas para o reenquadramento de reservatórios que se encaixam de forma adequada no modelo fissuro-cárstico, mas que foram classificados como aquíferos cársticos clássicos.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABGE.1996. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental. Ensaio de Permeabilidade em Solos: Orientações para sua Execução no Campo. 3ª ed. Boletim, n. 4, 35p.
- Ackerer, P., Trottier, N., Delay, F. 2014. Flow in double-porosity aquifers: Parameter estimation using an adaptive multiscale method. *Advances in Water Resources* 73:108-122.
- ANA, 2020. Agência Nacional de Águas e Saneamento. Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2020: Informe Anual / Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. – Brasília: ANA, 2020. 118p.
- Aller, L., Bennett, T., Lehr, J.H., Petty, R.J., Hackett, G.1987. DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. US Environment Protection Agency, Ada, Oklahoma, EPA/60012-87/035. 163p.
- Almeida, L., Resende, L., Rodrigues, A.P., Campos, J.E.G. 2006. Hidrogeologia do Estado de Goiás. Superintendência de Geologia e Mineração. Governo do Estado de Goiás, v.1000, Goiânia. CDU: 556.3 (817.3). 232p.
- Arana, H.A.H., Attrill, M.J., Hartley, R., Bouchot, G.G. 2005. Transitional carbonate-terrigenous shelf sub-environments inferred from textural characteristics of surficial sediments in the Southern Gulf of Mexico. *Continental Shelf Research*, 25:1836-1852.
- Bakalowicz, M. 2005. Karst groundwater: a challenge for new resources. *Hydrogeology Journal*, 13:148-160.
- Barenblatt, G.I., Zheltov I.P., Kochina, I.N. 1960. Basic concepts in the theory of seepage of homogeneous liquids in fissured rocks. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, (24):1286-1303.
- Berryman, J.G. Wang, H.F. 1995. The elastic coefficients of double-porosity models for fluid transport in jointed rock. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 100(B12):24611-24627.
- Brasil. CONAMA. 2008. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução 396/2008. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. Publicada no DOU nº 66, de 7 de abril de 2008, Seção 1, 64-68p.
- Brasil. PRT GM/MS Nº 888. 2021. Ministério da Saúde. Portaria Nº 2.914/2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial da União Nº 85, 4 de maio de 2021, Seção 1, 39-46p.
- 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. 2015. The Future of Water Resources Systems Analysis: Toward a Scientific Framework for Sustainable Water Management. *Water Resources Research*. 51, 6110-6124, doi: 10.1002/2015WR017114, 6110-6124.
- 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 / SEMATEC / UnB, 1998. (Vol. IV- Relatório Técnico). 1-84.
- Campos, J.E.G. 2004. Hidrogeologia do Distrito Federal: bases para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos. *Revista Brasileira de Geociências*, 34(1):41-48.
- Campos, J.E.G. 2012. Meio Físico do Distrito Federal. In: Zoneamento Ecológico-Econômico do Distrito Federal. SEDAHB/GDF. Subproduto 3.1. 172p.
- Campos, J.E.G., Bogossian, J., Carvalho, R.M. 2012. Sedimentology of the psamo-pelitic-carbonate unit, Paranoá Group, and Sete Lagoas Formation, Bambuí Group: examples of mixed carbonate-siliciclastic sedimentation in the Proterozoic of the Brasilia Fold Belt. *Revista*

Brasileira de Geociências. 42(3):513-522.

- Campos, J.E.G. 2013. Estudo hidrogeológico. CPX Cimentos SA. Unidade Formosa. Relatório Técnico. 56p.
- Campos, J.E.G., Rodrigues, D.S., Rocha, A.B.A., Gonçalves, T.D. 2021. Diretrizes para implantação de recarga artificial de aquíferos no domínio dos Cerrados do Brasil. Anuário do Instituto de Geociências, 2021, v 44, 35827. 13p.
- Carneiro, F.A. 2013. Modelagem hidrogeoquímica do sistema aquífero pelito-carbonático existente no CNPMS da Embrapa, Sete Lagoas/MG-Brasil. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia da UFMG. 338p.
- Carr, G., Bloshl, G., Loucks, D.P. 2012. Evaluating Participation in Water Resource Management: A Review. *Water Resources Research*, 48, W11401, doi: 10.1029/2011WR011662, 2012, 17P.
- Carvalho, T.M. 2008. Técnicas de Medição de Vazão por Meios Convencionais e Não Convencionais. *Revista Brasileira de Geografia Física*. Recife-Pe. 10(1): 75-85.
- Cheng, J.M., Chen, C.X. 2005. An Integrated Linear/ No Linear Flow Model for the Conduit-Fissure-Pore Media *In: the Karst Triple Void Aquifer System*. *Environmental Geology*. 47: 163-174.
- Civita, M., & De Maio, M. (1997). SINTACS Un sistema paramétrico per la valutazione e la cartografia per la valutazione della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento, Metodologia e automazione. Bologna: Ed. Pitagora. 191p.
- Costa, W. D. 2000. Uso e gestão de água subterrânea. In: Feitosa, F.A.C; Manoel Filho. *Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações*. 2a ed. Rev. e Ampl. CPRM – Serviço Geológico do Brasil, Rio de Janeiro, RJ. p. 341-367.
- Custodio, E. Llamas, M.R. 1983. *Hidrologia Subterranea*. 2.ed. Ed. Omega. Barcelona. 1157p.
- Dardenne, M.A. 1978. Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 30, Recife, Anais, (2): 597-610.
- Dausse, A., Leonardi, V., Jourde, H. 2019. Hydraulic characterization and identification of flow-bearing structures based on multi-scale investigations applied to the Lez karst aquifer. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 26 (2019) 100627. 22p.
- Debieche, T.H., Guglielmi, Y., Mudry, J. 2002. Modeling the hydraulic behavior of a fissured-karstic aquifer in exploitation conditions. *Journal of Hydrology*: 257, 247-255.
- Delméé, G.J. *Manual de Medição de Vazão*. 3ª. Ed. Editora Edgard Blüncher Ltda, São Paulo. 344p.
- Demétrio, J.G.A., Batista, A.G.S., Melo, JG. 2018. Contribuição ao conhecimento da hidráulica subterrânea do aquífero Jandaíra na região de Baraúna – RN. *Águas Subterrâneas*, v. 32, n. 1, p. 52-60.
- Doerfliger, N., Jeannin, P.Y., Zwahlen, F. 1999. Water vulnerability assessment in karst environments: a new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method). *Environmental Geology* 39, issue 2, 165-176.
- Dorsey, R. & Kidwell, S.M. 1999. Mixed carbonate-siliciclastic sedimentation on a tectonically active margin: example from the Pliocene of Baja California Sur, Mexico. *Geology* 27(10):935-938.
- Driscoll, F.G. 1986. *Groundwater and Wells*. Johnson Screen, St. Paul, Minnesota. 2a ed.1089p.
- 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. 2020. Groundwater Sustainability: A Review of the Interactions Between Science and Policy. *Environmental Research Letters*, 15 (2020) 093004, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab8e8c>.

- Feitosa, E.C., 2004. O Aquífero Jandaíra no Município de Baraúna/RN. ANA/PróÁgua Semiárido/SERHID RN - FADE/LABHID/UFPE, Recife. Zoneamento dos calcários aquíferos e mapeamento das áreas de maior índice de carstificação através do método geofísico de eletrorresistividade.
- Feitosa, A.C.F., Manoel Filho, J., Feitosa, E.C., Demétrio, J.G.A. (Coord.). 2008. Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações. CPRM/LABHID. Rio de Janeiro. 3ª ed. Ampliada e Revisada. 812p.
- Fetter, C.W. 1994. Applied Hydrogeology. 4th Edition. Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River, New Jersey. 598p.
- Field, M.S. & Mose, D.G. 1998. Estimating Subsurface Fissure Apertures in Karst Aquifers From Equilibrium Activities. Environmental & Engineering Geoscience, vol. IV, No. 2, 1998. 145-159.
- Fischer, P., Jardani, A, Jourde, H. 2020. Hydraulic tomography in coupled discrete-continuum concept to image hydraulic properties of a fractured and karstified aquifer (Lez aquifer, France). Advances in Water: 137, 103523.
- Foster, S. (1987) Fundamental Concepts in Aquifer Vulnerability, Pollution Risk and Protection Strategy: International Conference, 1987, Noordwijk Aan Zee, the Netherlands Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants. Netherlands Organization for Applied Scientific Research, The Hague, 69-86.
- Freeze, R.A. & Cherry, J.A. 1979. Groundwater. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, 604p.
- Gastmans, D.; Alberto, M.C.; Bufon, A.G.M.; Moraes, F.T.; Santos, M.M.; Silva, J.R.M.; Chang, H.K. 2005. Implicações hidroquímicas da interação rocha-água: interpretações através da representação gráfica de análises químicas de águas subterrâneas. In: XIV Encontro Nacional de Perfuradores de Poços. II Simpósio de Hidrogeologia do Sudeste. 18p.
- Goldscheider, N. Drew, D. 2007. Methods in karst hydrogeology. International contributions to hydrogeology. Robins, N.S., Chief-Editor. International Association of Hydrogeologists. Taylor and Francis / Balkema. 264p.
- Guerra, A.M. 1986. Processos de carstificação e hidrogeologia do Grupo Bambuí na região de Irecê- Bahia. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. Instituto de Geociências. 132p.
- Jeannin, P.Y. Sauter, M. 1998. Analysis of karst hydrodynamic behavior using global approach: a review. Bulletin d'Hydrologie, Centre d'Hydrologie, Université de Neuchâtel, 16:31-48.
- Käss, W. 1998. Tracing technique in Geohydrology. Balkema, Rotterdam. 581p.
- Kaufmann, G. & Braun, J. 1999. Karst aquifer evolution in fractured rocks. Water Resources Research, 35:3223-3238.
- Kavouri, K., Plagnes, V., Tremoulet, T., Dörfliger, N., Rejiba. F., Marchet. P. 2011. PaPRIKa: a method for estimating karst resource and source vulnerability - application to the Ouyse karst system (southwest France). Hydrogeology Journal. 19: 339-353.
- Keller, E.A. 1996. Environmental Geology. 7th ed. Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River, New Jersey. 560p.
- Khetani, B. & Read, J.F. 2002. Sequence development of a mixed carbonate-siliciclastic high-relief ramp, Mississippian, Kentucky, USA. Sedimentary Geology 72(5):657-672.
- Latrubesse, E.M. & Carvalho, T.M. 2006. Geomorfologia do Estado de Goiás e Distrito Federal. Secretaria de Indústria de Comércio do Goiás- Superintendência de Geologia e Mineração, Goiânia. 128p.:il. (Série Geologia e Mineração, n.2).
- LeGrand, H.E & Rosen, L. 2000. Systematic Makings of Early Stage Hydrogeologic Conceptual Models. Groundwater, 38(6): 887-893.

- LeGrand, H.E. & Stringfield, V.T. 1973. Karst Hydrology- a review. *Journal of Hydrology*, 20 (1973), 97-120.
- Li, X., Ke, T., Wang, Y., Zhou, T., Li, D., Tong, F., Wen, J. 2020. Hydraulic Conductivity Behaviors of Karst Aquifer with Conduit-Fissure Geomaterials. *Frontiers in Earth Science*, vol. 8(30):1-10.
- Lousada, E.O. & Campos, J.E.G. 2005. Proposta de Modelos Hidrogeológicos Conceituais Aplicados aos Aquíferos da Região do Distrito Federal. *In: Revista Brasileira de Geociências*, volume 35, 2005. 407-414p.
- Malik, P. Coplak, M., Kuvik, M, Svasta, J. 2019. Recharge impulse spreading in Western Carpathian's Mountainous fissure-karst aquifer. *Water*: 11, 763; doi:10.3390.
- Maloszewski, P., Benischke, R., Harum, T., Zojer, H. 1998. Estimation of solute transport parameters in a karstic aquifer using artificial tracer experiments. In: Simmers PD (ed) *Shallow groundwater systems. International contribution to hydrogeology*. Balkema, Rotterdam, pp 177-190
- Manoel Filho, J., Demétrio, J.G., Costa, W.D. 2003. Possibilidades de ampliação da exploração de água subterrânea na zona oeste da Bacia Potiguar, Rio Grande do Norte: Diagnóstico da situação atual. *Fade LABHID-UFPE/FUNCATE*, Recife.
- Marsaud, B. 1996. Structure and functioning of the saturated zone of karsts from experimental results. *Doctorate Thesis, Paris XI, Orsay*, 305p.
- Michel, G. Struckmeier, W. 1985. The cretaceous basin of Münster- A general groundwater system in response to multiple impacts. (Water Supply, SPAS, Deep Mining). *Hydrogeology in Service of Man, Memories of the 18<sup>th</sup> Congress of the International Association of Hydrogeologists*, Cambridge, 150-159.
- Moench, A.F., 1984. Double-porosity models for a fissured groundwater reservoir with fracture skin. *Water Resources Research*, 20:831-846.
- Mourão, M.A.A., Cruz, W.B., Gonçalves, R.LF. 2001. Caracterização hidrogeológica da porção mineira da bacia hidrográfica do São Francisco, In: PINTO, C. P.; MARTINS-NETO, M. A (eds.), *Bacia do São Francisco: Geologia e Recursos Naturais*. Belo Horizonte, SBG-MG, 2001, 327-350.
- Motyka, J. 1998. A conceptual model of hydraulic networks in carbonate rocks, illustrated by examples from Poland. *Hydrogeology Journal*, 6(4), 469-482.
- Ribeiro, C.G. 2020. Compartimentação dos fluxos do sistema hidrológico cárstico do Grupo Bambuí a partir dos isótopos <sup>2</sup>H, <sup>18</sup>O e <sup>3</sup>H na região de Lagoa Santa, Minas Gerais. *Dissertação de Mestrado*. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. 260p.
- Rodell, M., Famiglietti, J. S., Wiese, D.N., Reager, J.T., Beaudoin, H.K., Landerer, F.W., Lo, M.H. 2018. Emerging Trends in Global Freshwater Availability. *Nature* 557, 651–659 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0123-1>
- Robineau, T., Tognelli, A., Goblet, P., Renard, F., Schaper, L. 2008. A Double Medium Approach to Simulate Groundwater Level Variations in a Fissured Karst Aquifer. *Journal of Hydrology*. 565: 861-875.
- Rózkowski, J. 1998. Endangering of The Upper Jurassic Karst-Fissured Aquifer in The Krakow Upland (southern Poland). *Environmental Geology*. 33 (4): 274-278.
- Rózkowski, J. 2007. Evaluation of Intrinsic Vulnerability of an Upper Jurassic Karstic-Fissured Aquifer in The Jura Krakowska (Southern Poland) to Anthropogenic Pollution Using the DRASTIC Method. *Geological Quarterly*. 51 (1): 17-26.
- Rozkowski, J. & Rozkowski, K. 2016. Influence of fissuring and karstification of the carbonate

- aquifer unsaturated zone on its vulnerability to contamination (Cracow Upper Jurassic Region, Poland). *Environmental Earth Sciences*, 75:1023
- Paula, T.L.F. & Campos, J.E.G. 2016. Aquíferos com Fluxos Controlados Simultaneamente por Porosidade Intergranular e Planar: Aplicação a Rochas Metassedimentares do Alto Paraguaí, MT. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. vol 21, No 1. 11-24.
- Pessoa, P.F.P. & Mourão, M.A.A. Levantamento Hidrogeológico. In: IBAMA; CPRM; (Eds.). APA Carste de Lagoa Santa - Meio físico. Belo Horizonte, 1998. 36p. (Série APA Carste de Lagoa Santa - MG).
- Quinn, J.J.; Tomasko, D.; Kuiper, J.A. 2006. Modeling complex flow in a karst aquifer. *Sedimentary Geology* 184:343-351.
- Scanlon, B., Mace, R.E., Barrett, M.E., Smith, B. 2003. Can we simulate regional groundwater flow in a karst system using equivalent porous media models? Case study, Barton Springs Edwards aquifer, USA. *Journal of Hydrology* 276:137-158.
- Souza, M.M. 2013. Determinação das áreas de recarga para a gestão do sistema aquífero fissurocárstico da região de São Sebastião. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. 73p.
- Thran, A.C., East, M., Webster, J.M., Salles, T., Petit, C. 2020. The influence of carbonate platforms on the geomorphological development of a mixed carbonate-siliciclast margin (Great Barrier Reef, Australia) 21, e2020GC008915.
- UNESCO, 2018. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. The United Nations World Water Development Report 2018: Nature- Based Solutions for Water. World Water Assessment Program. Colombella, Purugia, Italy. 2018. P.1-12.
- Vesper, D.J.; Loop, C.M.; White, W.B. 2003. Contaminant transport in karst aquifer. *Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifer*, 1(2):101-111.
- Vías, J. M., Andreo, B., Perles, M. J., Carrasco, F., Vadillo, I., & Jiménez, P. (2002). Preliminary proposal of a method for contamination vulnerability mapping in carbonate. *Karst and Environment*, 75-83.
- Villaroya, F., & Adwell, C.R. (1998). Sustainable development and groundwater resources exploitation. *Environmental Geology*, 34(2/3):111-115.
- Von Stempvoort, D., Ewert, L., & Wassenaar, L. (1992). Aquifer Vulnerability Index: a GIS compatible method for groundwater vulnerability mapping. *Canadian Water Resources Journal*, vol 18, 25-37.
- White, W.B. 1969. Conceptual models for limestone aquifers: *Ground Water*, 7(3):15-21.
- White, W.B. 2002. Karst hydrology: recent developments and open questions. *Engineering Geology*, 65:85-105.
- Witkowski, A.J., Rubin, K., Kowalczyk, A., Rózkowski, A., Wróbel, J. 2003. Groundwater Vulnerability Map of the Chrzanów Karst-Fissured Triassic Aquifer (Poland) *Environmental Geology*. 44: 59-67.
- Worthington, S.R.H.; Jeannin, P.Y.; Alexander Jr, E.C., Davies, G.J., Schindel, G.M. 2017. Contrasting definitions for the term “karst aquifer”. *Hydrogeology Journal*, 25:1237-1240.

## APÊNDICES

### 1. Dados de rebaixamento a partir do teste de bombeamento escalonado do poço PCX I

| Tempo (min) | Rebaixamento (m) |
|-------------|------------------|
| 1           | 17,74            |
| 2           | 19,05            |
| 3           | 19,08            |
| 4           | 19,09            |
| 5           | 19,12            |
| 6           | 19,17            |
| 8           | 19,23            |
| 10          | 19,30            |
| 12          | 19,40            |
| 15          | 19,50            |
| 20          | 19,67            |
| 25          | 19,76            |
| 30          | 19,80            |
| 40          | 19,91            |
| 50          | 19,90            |
| 60          | 19,93            |
| 90          | 19,90            |
| 120         | 19,91            |
| 180         | 19,92            |
| 240         | 19,90            |
| 241         | 23,50            |
| 242         | 24,47            |
| 243         | 25,35            |
| 244         | 25,76            |
| 245         | 26,03            |
| 246         | 26,24            |
| 248         | 26,37            |
| 250         | 26,72            |
| 252         | 26,99            |
| 255         | 27,39            |
| 260         | 27,83            |
| 265         | 28,12            |
| 270         | 28,27            |
| 280         | 28,52            |
| 290         | 28,73            |
| 300         | 28,89            |
| 330         | 29,19            |
| 360         | 29,35            |
| 420         | 29,54            |
| 480         | 29,55            |

|      |       |
|------|-------|
| 481  | 34,31 |
| 482  | 34,60 |
| 483  | 34,70 |
| 484  | 34,85 |
| 485  | 34,95 |
| 486  | 35,01 |
| 488  | 35,12 |
| 490  | 35,36 |
| 492  | 35,59 |
| 495  | 35,79 |
| 500  | 36,08 |
| 505  | 36,25 |
| 510  | 36,43 |
| 520  | 36,69 |
| 530  | 36,85 |
| 540  | 37,00 |
| 570  | 37,38 |
| 600  | 37,55 |
| 660  | 37,73 |
| 720  | 37,87 |
| 780  | 37,93 |
| 840  | 37,95 |
| 900  | 37,98 |
| 960  | 37,97 |
| 1020 | 37,97 |
| 1080 | 37,97 |
| 1140 | 37,98 |
| 1200 | 37,98 |
| 1260 | 37,98 |
| 1320 | 37,98 |
| 1380 | 37,98 |
| 1440 | 38,00 |
| 1500 | 38,01 |
| 1560 | 38,02 |
| 1620 | 38,01 |

### 2. Dados de vazão a partir do teste de bombeamento escalonado do poço CPX I na 1ª etapa

| Tempo (min) | Vazão (m³/h) |
|-------------|--------------|
| 1,00        | 31,68        |
| 2,00        | 31,491       |
| 3,00        | 30           |
| 4,00        | 29,552       |
| 5,00        | 29,064       |

|        |        |
|--------|--------|
| 6,00   | 28,285 |
| 8,00   | 28,235 |
| 10,00  | 28,205 |
| 12,00  | 28,185 |
| 15,00  | 28,185 |
| 20,00  | 28,165 |
| 25,00  | 28,134 |
| 30,00  | 28,134 |
| 40,00  | 26,4   |
| 50,00  | 26,155 |
| 60,00  | 26,138 |
| 90,00  | 26,035 |
| 120,00 | 25,73  |
| 180,00 | 25,714 |
| 240,00 | 25,68  |

**3. Dados de vazão a partir do teste de bombeamento escalonado do poço CPX I na 2ª etapa**

| Tempo (min) | Vazão (m³/h) |
|-------------|--------------|
| 241,00      | 66,00        |
| 242,00      | 65,55        |
| 243,00      | 64,92        |
| 244,00      | 63,61        |
| 245,00      | 62,86        |
| 246,00      | 62,26        |
| 248,00      | 62,12        |
| 250,00      | 62,02        |
| 252,00      | 61,88        |
| 255,00      | 61,49        |
| 260,00      | 60,09        |
| 265,00      | 60,00        |
| 270,00      | 59,50        |
| 280,00      | 59,41        |
| 290,00      | 59,19        |
| 300,00      | 59,19        |
| 330,00      | 59,10        |
| 360,00      | 59,02        |
| 420,00      | 59,10        |
| 480,00      | 59,06        |

**4. Dados de vazão a partir do teste de bombeamento escalonado do poço PCX I na 3ª etapa**

| Tempo (min) | Vazão (m³/h) |
|-------------|--------------|
| 481,00      | 88,00        |
| 482,00      | 87,03        |

|         |       |
|---------|-------|
| 483,00  | 85,16 |
| 484,00  | 82,07 |
| 485,00  | 81,65 |
| 486,00  | 79,92 |
| 488,00  | 79,92 |
| 490,00  | 79,60 |
| 492,00  | 79,44 |
| 495,00  | 79,20 |
| 500,00  | 79,20 |
| 505,00  | 79,04 |
| 510,00  | 78,96 |
| 520,00  | 78,85 |
| 530,00  | 78,65 |
| 540,00  | 78,42 |
| 570,00  | 78,26 |
| 600,00  | 78,16 |
| 660,00  | 77,95 |
| 720,00  | 77,88 |
| 780,00  | 77,72 |
| 840,00  | 77,65 |
| 900,00  | 77,65 |
| 960,00  | 77,42 |
| 1020,00 | 77,27 |
| 1080,00 | 77,04 |
| 1140,00 | 76,89 |
| 1200,00 | 76,82 |
| 1260,00 | 76,67 |
| 1320,00 | 76,52 |
| 1380,00 | 76,45 |
| 1440,00 | 76,23 |
| 1500,00 | 76,08 |
| 1560,00 | 76,15 |
| 1620,00 | 76,15 |

**5. Dados de rebaixamento a partir do teste de bombeamento escalonado do poço CPX II**

| Tempo (min) | Rebaixamento (m) |
|-------------|------------------|
| 1           | 16,1             |
| 2           | 16,3             |
| 3           | 16,4             |
| 4           | 16,5             |
| 5           | 16,6             |
| 6           | 16,7             |
| 8           | 16,85            |
| 10          | 16,93            |
| 12          | 17,03            |



|     |       |
|-----|-------|
| 15  | 17,05 |
| 20  | 17,4  |
| 25  | 17,4  |
| 30  | 17,42 |
| 40  | 17,43 |
| 50  | 17,48 |
| 60  | 17,63 |
| 90  | 17,96 |
| 120 | 18,2  |
| 180 | 18,55 |
| 240 | 18,8  |
| 241 | 20,6  |
| 242 | 21,4  |
| 243 | 22,1  |
| 244 | 22,8  |
| 245 | 24,2  |
| 246 | 24,35 |
| 248 | 24,8  |
| 250 | 25,28 |
| 252 | 25,57 |
| 255 | 25,75 |
| 260 | 26,01 |
| 265 | 26,42 |
| 270 | 26,86 |
| 280 | 27,05 |
| 290 | 27,62 |
| 300 | 27,9  |
| 330 | 27,98 |
| 360 | 28,15 |
| 420 | 28,8  |
| 480 | 29,00 |
| 481 | 37,13 |
| 482 | 38,00 |
| 483 | 38,85 |
| 484 | 39,6  |
| 485 | 40,4  |
| 486 | 41,00 |
| 488 | 41,85 |
| 490 | 42,4  |
| 492 | 42,95 |
| 495 | 43,7  |
| 500 | 44,55 |
| 505 | 45,00 |
| 510 | 45,9  |
| 520 | 47,75 |

|      |       |
|------|-------|
| 530  | 50,5  |
| 540  | 50,99 |
| 570  | 51,02 |
| 600  | 52,73 |
| 660  | 53,7  |
| 720  | 54,55 |
| 780  | 55,39 |
| 840  | 56,09 |
| 900  | 56,92 |
| 960  | 57,81 |
| 1020 | 58,43 |
| 1080 | 60,29 |
| 1140 | 61,05 |
| 1200 | 61,82 |
| 1260 | 62,64 |
| 1320 | 63,28 |
| 1380 | 64,58 |
| 1440 | 65,05 |
| 1500 | 65,47 |
| 1560 | 42,00 |
| 1620 | 40,00 |
| 1680 | 41,00 |
| 1740 | 40,00 |
| 1800 | 40,00 |

**6. Dados de vazão a partir do teste de bombeamento escalonado do poço CPX II na 1ª etapa**

| Tempo (min) | Vazão (m³/h) |
|-------------|--------------|
| 1           | 15,53        |
| 2           | 13,68        |
| 3           | 11,49        |
| 4           | 11,07        |
| 5           | 11,03        |
| 6           | 11,00        |
| 8           | 10,95        |
| 10          | 10,75        |
| 12          | 10,72        |
| 15          | 10,69        |
| 20          | 10,56        |
| 25          | 10,26        |
| 30          | 9,90         |
| 40          | 9,89         |
| 50          | 9,89         |
| 60          | 9,89         |
| 90          | 9,89         |

|     |      |
|-----|------|
| 120 | 9,89 |
| 180 | 9,89 |
| 240 | 9,89 |

**7. Dados de vazão a partir do teste de bombeamento escalonado do poço CPX II na 2ª etapa**

| Tempo (min) | Vazão (m³/h) |
|-------------|--------------|
| 241         | 33,00        |
| 242         | 31,43        |
| 243         | 30,52        |
| 244         | 30,29        |
| 245         | 29,50        |
| 246         | 29,25        |
| 248         | 28,42        |
| 250         | 28,24        |
| 252         | 27,91        |
| 255         | 27,69        |
| 260         | 27,31        |
| 265         | 27,26        |
| 270         | 27,22        |
| 280         | 27,20        |
| 290         | 27,17        |
| 300         | 27,12        |
| 330         | 27,13        |
| 360         | 27,13        |
| 420         | 27,10        |
| 480         | 27,10        |





**8. Dados de vazão a partir do teste de bombeamento escalonado do poço CPX II na 3ª etapa.**

| Tempo (min) | Vazão (m³/h) |
|-------------|--------------|
| 481         | 66,00        |
| 482         | 62,36        |
| 483         | 60,92        |
| 484         | 60,69        |
| 485         | 59,55        |
| 486         | 58,24        |
| 488         | 56,77        |
| 490         | 56,57        |
| 492         | 56,57        |
| 495         | 56,45        |
| 500         | 56,37        |
| 505         | 56,25        |
| 510         | 56,09        |
| 520         | 55,97        |










|      |       |
|------|-------|
| 530  | 55,97 |
| 540  | 55,93 |
| 570  | 55,85 |
| 600  | 55,67 |
| 660  | 55,15 |
| 720  | 54,69 |
| 780  | 54,02 |
| 840  | 53,62 |
| 900  | 53,37 |
| 960  | 53,05 |
| 1020 | 52,91 |
| 1080 | 52,80 |
| 1140 | 52,80 |
| 1200 | 52,62 |
| 1260 | 52,55 |
| 1320 | 52,49 |
| 1380 | 52,45 |
| 1440 | 52,11 |
| 1500 | 52,11 |
| 1560 | 52,00 |
| 1620 | 52,11 |
| 1680 | 52,07 |
| 1740 | 52,11 |
| 1800 | 52,11 |

**9. Dados RQD**

**Legenda:**

|                                                                                     |                              |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
|  | Solo                         |
|  | Calcário Silicoso Magnesiano |
|  | Calcário Calcítico           |
|  | Marga                        |

**FFS 510E:** 23L, 2.64.943/8.301.002, 791 m

| Cor Log                                                                             | Prof (m) | Recuperação (%) | RQD (%) |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----------|-----------------|---------|
|  | 2,3      | 75              | 63      |
|  | 3,1      | 75              | 63      |
|  | 3,7      | 75              | 20      |
|  | 4,1      | 75              | #       |
|  | 5        | 75              | 30      |
|  | 6        | 100             | 86      |
|  | 7        | 100             | 89      |
|  | 8,2      | 100             | 96      |
|  | 8,5      | 100             | 89      |
|  | 9,3      | 100             | 89      |
|  | 10       | 100             | 98      |
|  | 11       | 100             | 91      |
|  | 12       | 100             | 68      |
|  | 13       | 100             | 57      |
|  | 14       | 100             | 85      |

|       |     |     |
|-------|-----|-----|
| 15    | 100 | 97  |
| 16,22 | 100 | 79  |
| 17    | 100 | 97  |
| 18    | 100 | 83  |
| 19    | 100 | 93  |
| 20    | 100 | 100 |
| 21,3  | 100 | 80  |
| 22    | 100 | 90  |
| 23    | 100 | 78  |
| 24    | 100 | 100 |
| 24,3  | 100 | 64  |
| 25,1  | 100 | 64  |
| 26    | 100 | 98  |
| 27    | 100 | 98  |
| 28    | 100 | 95  |
| 29,09 | 100 | 96  |
| 30    | 100 | 85  |
| 31    | 100 | 60  |
| 32    | 100 | 73  |
| 33    | 100 | 92  |
| 34    | 100 | 99  |
| 35    | 100 | 86  |
| 36    | 70  | 33  |
| 37    | 43  | 11  |
| 38,2  | 100 | 23  |
| 38,35 | 100 | 23  |
| 40,5  |     |     |
| 42    |     |     |
| 43    |     |     |
| 44    |     |     |
| 45    |     |     |
| 46    | 100 | 81  |
| 47    |     |     |
| 48    |     |     |
| 49    |     |     |
| 50    |     |     |
| 51    |     |     |
| 52    |     |     |
| 53    |     |     |
| 54    | 100 | 95  |
| 55    |     |     |
| 56    | 100 | 100 |
| 57    | 100 | 100 |
| 58    | 100 | 98  |
| 59,5  | 100 | 97  |
| 60,35 |     |     |
| 61    | 100 | 95  |
| 62    |     |     |
| 63,8  | 100 | 100 |
| 65    | 100 | 92  |
| 66,1  | 100 | 100 |
| 67    |     |     |
| 68    | 100 | 92  |
| 69    | 100 | 87  |
| 70,55 | 100 | 100 |
| 73,9  | 100 | 98  |
| 75    | 100 | 100 |
| 76,45 | 100 | 51  |
| 77,6  | 100 | 100 |
| 79    | 100 | 92  |
| 80,45 | 100 | 85  |
| 82,45 | 100 | 100 |
| 83    | 100 | 90  |
| 85,5  |     |     |

FFS 695E: 23L, 265.117/8.301.002, 784 m

| Cor Log | Prof (m) | Recuperação (%) | RQD (%) |
|---------|----------|-----------------|---------|
|         | 0,8      | #               | #       |
|         | 6,1      | #               | #       |
|         | 7,6      | 93              | 94      |
|         | 8,5      | 100             | 81      |
|         | 9,7      | 100             | 76      |
|         | 10,7     | 100             | 80      |
|         | 12,05    | 100             | 68      |
|         | 13,65    | 100             | 73      |
|         | 15       | 100             | 83      |
|         | 16       | 100             | 78      |
|         | 17       | 100             | 80      |
|         | 18       | 100             | 91      |
|         | 19       | 100             | 96      |
|         | 20,15    | 100             | 100     |
|         | 21,4     | 100             | 94      |
|         | 22,4     | 100             | 84      |
|         | 23,75    | 100             | 100     |
|         | 25,25    | 100             | 49      |
|         | 26,25    | 100             | 53      |
|         | 27,25    | 100             | 81      |
|         | 28,35    | 100             | 98      |
|         | 30,35    | 100             | 70      |
|         | 31,35    | 100             | 71      |
|         | 32,75    | 100             | 82      |
|         | 34,6     | 100             | 96      |
|         | 35,6     | 100             | 85      |
|         | 36,6     | 100             | 95      |
|         | 37,35    | 100             | 85      |
|         | 38,85    | 100             | 97      |
|         | 40       | 96              | 68      |
|         | 41       | 100             | 88      |
|         | 42       | 100             | 11      |
|         | 42,1     | 100             | 61      |
|         | 43       | 100             | 61      |
|         | 43,9     | 100             | 86      |
|         | 45,9     | 100             | 93      |
|         | 48,05    | 100             | 100     |
|         | 49,05    | 100             | 97      |
|         | 52,8     | 100             | 100     |
|         | 55       | 100             | 100     |
|         | 58       | 100             | 88      |
|         | 60,05    | 100             | 100     |
|         | 61,03    | 100             | 99      |
|         | 62,05    | 100             | 100     |
|         | 63       | 100             | 82      |
|         | 63,1     | 100             | 82      |
|         | 64,7     | 100             | 82      |
|         | 67,1     | 100             | 100     |
|         | 70       | 100             | 100     |
|         | 71,7     | 100             | 89      |
|         | 73,9     | 100             | 100     |
|         | 75,3     | 100             | 100     |
|         | 77       | 100             | 97      |
|         | 78,9     | 100             | 90      |
|         | 81       | 100             | 94      |
|         | 82,7     | 100             | 95      |
|         | 84,65    | 100             | 100     |

**FHS 1135E:** 23L, 265.556/8.300.802, 840 m

| Cor Log | Prof (m) | Recuperação (%) | RQD (%) |
|---------|----------|-----------------|---------|
|         | 8,2      | #               | #       |
|         | 9        | #               | #       |
|         | 10       | #               | #       |
|         | 11       | #               | #       |
|         | 12       | #               | #       |
|         | 13       | #               | #       |
|         | 14       | #               | #       |
|         | 15       | #               | #       |
|         | 16       | #               | #       |
|         | 17       | #               | #       |
|         | 18       | #               | #       |
|         | 19       | #               | #       |
|         | 20,35    | #               | #       |
|         | 21       | #               | #       |
|         | 22       | #               | #       |
|         | 23,9     | #               | #       |
|         | 24       | #               | #       |
|         | 25       | #               | #       |
|         | 26       | #               | #       |
|         | 27       | #               | #       |
|         | 28       | 100             | 93      |
|         | 29,9     | 100             | 80      |
|         | 31,15    | 100             | 58      |
|         | 32,25    | 100             | 93      |
|         | 33,6     | 100             | 96      |
|         | 34       |                 |         |
|         | 35       |                 |         |
|         | 36       |                 |         |
|         | 37       |                 |         |
|         | 38       |                 |         |
|         | 39       |                 |         |
|         | 40       |                 |         |
|         | 41       | 100             | 96      |
|         | 42       |                 |         |
|         | 43       |                 |         |
|         | 44       |                 |         |
|         | 45       |                 |         |
|         | 46       |                 |         |
|         | 47       |                 |         |
|         | 48       |                 |         |
|         | 49,2     | 100             | 96      |
|         | 50,3     | 100             | 96      |
|         | 51       |                 |         |
|         | 52,95    | 100             | 96      |
|         | 54       | 100             | 97      |
|         | 55       | 100             | 96      |
|         | 56       | 100             | 97      |
|         | 57       | 100             | 98      |
|         | 58       | 100             | 95      |
|         | 59       | 100             | 90      |
|         | 60       | 100             | 98      |
|         | 61       | 100             | 93      |
|         | 62       | 100             | 97      |
|         | 63       | 100             | 93      |
|         | 64       | 100             | 96      |
|         | 65,2     | 100             | 92      |
|         | 68       | 100             | 98      |
|         | 70,25    | 100             | 97      |
|         | 71       | 100             | 98      |
|         | 72       | 100             | 94      |
|         | 73       | 100             | 96      |
|         | 74,25    | 100             | 93      |

|  |       |     |     |
|--|-------|-----|-----|
|  | 75    |     |     |
|  | 76    | 100 | 93  |
|  | 77    |     |     |
|  | 78,8  | 100 | 96  |
|  | 80,7  | 100 | 96  |
|  | 81    | 100 | 100 |
|  | 82    |     |     |
|  | 83    | 100 | 96  |
|  | 84    | 100 | 90  |
|  | 85,05 |     |     |

**FJS 825EE:** 23L, 265.249/8.300.602, 812 m

| Cor Log | Prof (m) | Recuperação (%) | RQD (%) |
|---------|----------|-----------------|---------|
|         | 2,1      | #               | #       |
|         | 3,21     | 75              | 42      |
|         | 4,2      | 91              | 70      |
|         | 5,2      | 100             | 68      |
|         | 6,2      | 100             | 67      |
|         | 7,2      | 100             | 51      |
|         | 8,2      | 100             | 92      |
|         | 9,2      | 100             | 65      |
|         | 10,3     | 100             | 80      |
|         | 11,3     | 100             | 83      |
|         | 13,2     | 100             | 83      |
|         | 14       | 100             | 97      |
|         | 15       | 100             | 100     |
|         | 16,4     | 100             | 100     |
|         | 17,4     | 100             | 90      |
|         | 18,5     | 100             | 86      |
|         | 19,5     | 100             | 100     |
|         | 20,5     | 100             | 86      |
|         | 21,5     | 100             | 95      |
|         | 22,4     | 100             | 90      |
|         | 23,5     | 100             | 94      |
|         | 24,5     | 100             | 92      |
|         | 25,4     | 100             | 100     |
|         | 26,8     | 100             | 98      |
|         | 27,7     | 100             | 95      |
|         | 28,85    | 100             | 100     |
|         | 30       | 100             | 95      |
|         | 31,3     | 100             | 100     |
|         | 32       | 95              | 100     |
|         | 32,5     | 95              | 100     |
|         | 33       | 95              | 100     |
|         | 34       | 95              | 91      |
|         | 35       | 97              | 100     |
|         | 36       | 100             | 99      |
|         | 37       | 100             | 90      |
|         | 38       | 100             | 100     |
|         | 39,2     | 100             | 99      |
|         | 40,4     | 100             | 100     |
|         | 41,15    | 100             | 98      |
|         | 42,25    | 100             | 97      |
|         | 43,15    | 100             | 95      |
|         | 44,3     | 100             | 100     |
|         | 45,15    | 100             | 99      |
|         | 45,2     | 100             | 99      |
|         | 46,2     | 100             | 93      |
|         | 47,3     | 100             | 94      |
|         | 48,3     | 100             | 90      |
|         | 49,3     | 100             | 94      |
|         | 50,5     | 95              | 93      |
|         | 52,5     | 95              | 67      |
|         | 53,5     | 100             | 82      |

|  |       |     |     |
|--|-------|-----|-----|
|  | 54,5  | 100 | 55  |
|  | 55,6  | 100 | 100 |
|  | 56,6  | 100 | 82  |
|  | 57,6  | 100 | 79  |
|  | 58,6  | 100 | 100 |
|  | 60    | 100 | 76  |
|  | 61    | 100 | 55  |
|  | 62    | 100 | 100 |
|  | 63    | 100 | 91  |
|  | 64,65 | 100 | 99  |
|  | 65,6  | 100 | 93  |
|  | 66,6  | 100 | 100 |
|  | 67,65 | 100 | 100 |
|  | 68,6  | 100 | 100 |
|  | 69,6  | 100 | 100 |
|  | 70,65 | 100 | 100 |

**FLS 1200E:** 23L, 265.621/8.300.402, 836 m

| Cor Log | Prof (m) | Recuperação (%) | RQD (%) |
|---------|----------|-----------------|---------|
|         | 5,4      | #               | #       |
|         | 6        |                 |         |
|         | 7        |                 |         |
|         | 8        |                 |         |
|         | 9        |                 |         |
|         | 10       |                 |         |
|         | 11       |                 |         |
|         | 12       |                 |         |
|         | 13       |                 |         |
|         | 14       |                 |         |
|         | 15       |                 |         |
|         | 16       |                 |         |
|         | 17       |                 |         |
|         | 18       |                 |         |
|         | 19,25    | 100             | 25      |
|         | 21,4     |                 |         |
|         | 22,5     | 100             | 31      |
|         | 23,85    | 100             | 32      |
|         | 25,3     | 100             | 76      |
|         | 26,2     | 100             | 30      |
|         | 27,4     | 100             | 26      |
|         | 30,3     | 62              | 22      |
|         | 33,3     | 46              | 9       |
|         | 35,25    | 31              | 15      |
|         | 37,4     | 90              | 72      |
|         | 38,4     | 100             | 83      |
|         | 39,4     | 100             | 100     |
|         | 40,95    | 97              | 69      |
|         | 43,45    | 73              | 6       |
|         | 44,45    | 76              | 32      |
|         | 45,45    | 70              | 32      |
|         | 47,65    | 70              | 42      |
|         | 49,65    | 60              | 14      |
|         | 50,65    | 77              | 56      |
|         | 52,65    | 75              | 34      |
|         | 53,65    | 83              | 50      |
|         | 54,65    | 100             | 29      |
|         | 55,9     | 97              | 43      |
|         | 57,25    | 100             | 61      |
|         | 58,15    | 95              | 46      |
|         | 60,95    | 100             | 100     |
|         | 62,35    | 100             | 98      |
|         | 63       | 100             | 99      |
|         | 64       | 100             | 100     |
|         | 65       | 100             | 100     |

|  |       |     |     |
|--|-------|-----|-----|
|  | 66    | 100 | 100 |
|  | 67    | 100 | 77  |
|  | 68    | 100 | 100 |
|  | 69,03 | 100 | 100 |
|  | 70    | 100 | 98  |
|  | 71,08 | 100 | 100 |
|  | 72    | 100 | 100 |
|  | 73    | 100 | 100 |
|  | 73,95 | 100 | 100 |
|  | 76,48 | 100 | 98  |
|  | 78,3  | 100 | 97  |
|  | 79,38 | 100 | 100 |
|  | 81,4  | 100 | 100 |
|  | 82,4  | 100 | 100 |
|  | 83,3  | 100 | 100 |
|  | 84,45 | 100 | 96  |
|  | 85,05 | 100 | 100 |

**FLS 1410E:** 23L, 265.831/8.300.402, 874 m

| Cor Log | Prof (m) | Recuperação (%) | RQD (%) |
|---------|----------|-----------------|---------|
|         | 1,1      | #               | #       |
|         | 2        |                 |         |
|         | 3,6      | 65              | 83      |
|         | 4        | #               | #       |
|         | 5        | #               | #       |
|         | 6        | #               | #       |
|         | 7        | #               | #       |
|         | 8        | #               | #       |
|         | 9        | #               | #       |
|         | 10       | #               | #       |
|         | 11       | #               | #       |
|         | 12       | #               | #       |
|         | 13,15    | #               | #       |
|         | 14       |                 |         |
|         | 15       | 100             | 81      |
|         | 16       | #               | #       |
|         | 17       | #               | #       |
|         | 18       | #               | #       |
|         | 19       | #               | #       |
|         | 20,05    | #               | #       |
|         | 21       | 100             | 97      |
|         | 22       |                 |         |
|         | 23,13    | 100             | 86      |
|         | 23,85    |                 |         |
|         | 24       |                 |         |
|         | 25,56    | 100             | 86      |
|         | 26       |                 |         |
|         | 27       | 100             | 93      |
|         | 28,81    |                 |         |
|         | 29       | 100             | 100     |
|         | 30,51    |                 |         |
|         | 31       | 100             | 99      |
|         | 32,9     |                 |         |
|         | 33       | 100             | 69      |
|         | 34,2     |                 |         |
|         | 35,12    | 100             | 100     |
|         | 35,4     | 100             | 90      |
|         | 36       | 100             | 89      |
|         | 37,4     | 100             | 90      |
|         | 38       | 100             | 85      |
|         | 39,9     | 100             | 98      |
|         | 41,55    | 100             | 100     |
|         | 42,3     | 100             | 100     |
|         | 43,16    | 100             | 67      |

|       |     |    |
|-------|-----|----|
| 44    |     |    |
| 45,55 | 100 | 97 |
| 46    | 100 | 93 |
| 47    | 100 | 93 |
| 48,05 | 100 | 66 |
| 49,05 | 100 | 34 |
| 50,5  | 100 | 45 |
| 51,55 | 100 | 58 |
| 52    |     |    |
| 53    | 100 | 66 |
| 54    | 100 | 36 |
| 55,09 | 100 | 77 |
| 56,14 | 100 | 62 |
| 57    | 100 | 82 |
| 58    | 100 | 79 |
| 59    | 100 | 68 |
| 60    | 100 | 57 |
| 61,05 | 100 | 68 |
| 62    | 100 | 70 |
| 63,05 | 100 | 50 |
| 64,23 | 100 | 91 |
| 65    | 100 | 68 |
| 66,15 | 100 | 24 |
| 67    | 100 | 30 |
| 68,21 | 100 | 95 |
| 69,95 | 100 | 97 |
| 70    | 100 | 98 |
| 71    | 100 | 87 |
| 72,1  | 100 | 80 |
| 73,1  | 100 | 91 |
| 74,05 | 100 | 93 |
| 75,85 | 100 | 95 |
| 76    | 100 | 90 |
| 77,12 | 100 | 78 |
| 78    | 100 | 87 |
| 79,15 | 100 | 66 |
| 80,32 | 100 | 25 |
| 81    | 100 | 38 |
| 82    | 100 | 74 |
| 83,9  | 100 | 96 |
| 84    | 100 | 89 |
| 85,35 | 100 | 84 |

