12. ÁGUA SUBTERRÂNEA

PDRH

Com vistas ao diagnóstico de águas subterrâneas, será caracterizada inicialmente, nos itens 12.2 e 12.3, a estratigrafia, estrutura e tectônica da bacia do Alto São Francisco. Em seguida, nos itens 12.4, 12.5, 12.6, 12.7, 12.8 e 12.9, serão analisados o condicionamento do fluxo subterrâneo, características hidroquímicas, produtividade dos poços tubulares e interação de águas superficiais e subterrâneas. As reservas e a disponibilidade hídrica subterrânea, assim como as taxas atuais de explotação, são avaliadas no item 12.10. A vulnerabilidade dos sistemas aquíferos é estimada no item 12.11, enquanto as conclusões do diagnóstico hidrogeológico estão apresentadas no item 12.12.

12.1. Geologia Regional

A Bacia do Alto São Francisco – SF1 está inserida no Cráton do São Francisco (Arqueano) e na Faixa Brasília (Proterozóico Superior), os quais apresentam distintas características litológicas, estruturais e tectônicas.

O Cráton do São Francisco, composto por blocos arqueanos e paleoproterozóicos, é uma unidade geotectônica da plataforma Sul-Americana, a qual não foi afetada pela tectogênese brasiliana do final do Proterozóico (Almeida, 1997). As rochas cratônicas, com afloramentos comuns no sudeste e sul da bacia hidrográfica do São Francisco, são predominantemente granitos e gnaisses parcialmente sobrepostos por sequências sedimentares e vulcano-sedimentares do Proterozóico Superior ou Fanerozóico, bem como por sedimentos inconsolidados (Quaternário).

Embora pouco deformado na sua porção central, o Cráton do São Francisco tem deformações crescentes em direção às suas bordas, onde é limitado por faixas móveis compressionais do ciclo Brasiliano, quais sejam as faixas de dobramentos: Brasília a sul e a oeste, Rio Preto a noroeste, Riacho do Pontal a norte, Sergipana a leste e Araçuaí a sudeste (Alkmin, 2004). O Cráton estende-se ao leste até a margem continental, nas bacias hidrográficas do Jequitinhonha, Almada, Camamú e Jacuípe, conforme observado na Figura 12.1 e na Figura 12.2.

A Faixa Brasília (Neoproterozóico), ocupando a porção central da Província Tocantins, é formada por um espesso pacote sedimentar, o qual foi deformado e metamorfizado durante a orogenia Brasiliana, ao longo da margem ocidental do Cráton do São Francisco (Pimentel et al., 2011).

Figura 12.1 – Mapa geotectônico do Cráton do São Francisco e localização da Bacia do Alto do São Francisco – SF1, observando-se que esta é constituída predominantemente por rochas





cratonicas e secundariamente, na sua porção sudoeste, por rochas da faixa de dobramentos Brasília.





peixe vivo







Figura 12.2 – Mapa magnetométrico do Estado de Minas Gerais com superposição dos limites do Cráton e Bacias do São Francisco e SF1. Observam-se as faixas dobradas nos limites sul e leste do cráton, bem como um padrão de lineamentos NW na Bacia SF1.





Skill

12.2. Estratigrafia

O embasamento da Bacia do São Francisco é constituído por unidades paleoproterozóicas e arqueanas mais antigas que 1,8 Ga, além de outras unidades litoestratigráficas como o Supergrupo Espinhaço (Paleo/Mesoproterozóico), Supergrupo São Francisco (Neoproterozóico), Grupo Santa Fé (Permo-carbonífero) e rochas sedimentares cretácicas dos grupos Areado, Mata da Corda e Urucuia (Alkmim & Martins-Neto, 2001).

Na Faixa Brasília (Neoproterozóico), formada por várias unidades estratigráficas deformadas e metamorfizadas, destaca-se o Grupo Canastra, onde encontra-se um dos mais importantes parques do Brasil, o Parque Nacional da Serra da Canastra.

As unidades litoestratigráficas da Bacia do Alto Francisco – SF1 (vide Mapa Geológico do Estado de Minas Gerais - Figura 12.3) são descritas cronoestratigráficamente a seguir.

12.2.1. Mesoarqueano

PDRI

Supergrupo Pium-hi

Aflorante na porção austral da Bacia do Alto São Francisco, este Supergrupo é constituído pelas unidades Serra da Mamona e Serra da Boa Esperança, juntamente com os litofácies: metaarenito quartzoso, metaturbidito, metavulcânicas e metaplutônicas ácidas, metabasalto e metakomatiito.

- Serra da Mamona: Pertencente ao embasamento, essa unidade inclui formação ferrífera bandada e pelitos carbonosos na base, bem como pelitos, quartzitos e conglomerados quartzosos no topo. As duas sucessões formam um conjunto granocrescente para topo.
- Serra da Boa Esperança: Composto por metaquartzitos, arenitos, quartzitos, sericita filitos e quartzo conglomerados. Podem ocorrer associados com metaultramáficas e metamáfica tholeiíticas, metabasaltos komatiíticos e metavulcânicas félsicas.
- Litofácies Quartzito: Composto predominantemente por quartzitos.
- Litofácies Metarenito Com predomínio de arenitos metamorfizados, podem ocorrer associados com: rocha metaultramáfica e metamáfica tholeiíticas, quartzito, metabasalto komatiítico, metavulcânica félsica, formações químico-exalativas, FFB e xisto.
- Litofácies Metabasaltos / metakomatiítos: Rocha metaultramáfica e metamáfica tholeíticas, metabasalto komatiítico, metavulcânica félsica, formações químicoexalativas, FFB e xisto.





PDRH

- Litofácies Granito e ortognaisse miloníticos: Estas rochas fazem parte de um conjunto tectonicamente imbricado do Maciço de Piumhi, que compõem um sistema de cavalgamento. São rochas intrusivas ácidas à intermediárias.
- Sequência Turbidítica: Esta sucessão de turbiditos estão sobrepostas aos maciços das litofácies anteriores. São compostas por uma associação rítmica pelítico-arenosa.









12.2.2. Neoarqueano

2021

Gnaisses Neoarqueanos

Com idade ainda não totalmente definida, provavelmente arqueanos, foram mapeados na porção leste da bacia os gnaisses Itapecerica e Cláudio, os quais são a seguir descritos:

- Gnaisse Itapecerica: Constituintes do Complexo Campo Belo, são gnaisses rosados bandados de composição granítica com bandas félsicas (K-feldspato, plagioclásio e quartzo) e máficas (biotita). Apresentam com frequência corpos pegmatíticos e boudinagem nas rochas anfibolíticas.
- Gnaisse Cláudio: É constituído por rochas anisotrópicas, faneríticas, leucocráticas a mesocráticas, bandadas e de coloração geral cinza, com bandas máficas (biotita, piroxênio, anfibólio) e félsicas (quartzo, k-feldspato, plagioclásio). São comuns xenólitos de anfibolito fanerítico e corpos metaultramáficos.

12.2.3. Neoproterozóico

Supergrupo São Francisco

Constituído pelos grupos Macaúbas e Bambuí, o Supergrupo São Francisco compreende um pacote sedimentar neoproterozóico depositado em ambiente marinho plataformal, por vezes glaciais. Na Bacia do Alto São Francisco – SF1 ocorrem somente as unidades do Grupo Bambuí, cuja sedimentação foi controlada pelas variações do nível do mar e pelo soerguimento da Faixa Brasília, podendo ter originado uma bacia de *foreland* (CHANG et. al., 1998, MARTINS-NETO & ALKMIM, 2001).

Grupo Bambuí

O Grupo Bambuí compreende cinco formações: Carrancas, Sete Lagoas, Samburá, Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré, Serra da Saudade e Lagoa Formosa, as quais compõem o subgrupo Paraopeba; a sucessão de topo é marinho-continental e está representada pela Formação Três Marias, predominantemente psamítica, a qual não está presente na Bacia SF1. Suas unidades constituem a cobertura neoproterozóica de maior distribuição no Cráton do São Francisco, tanto quanto da Bacia do Alto São Francisco, ocupando o norte, centro e parte do sudoeste da mesma.





Subgrupo Paraopeba

2021

- Formação Carrancas: Conglomerados fluviais polimíticos de matriz carbonática, com gradação normal com intercalação de lentes de arenitos com seixos. Diamictitos e ritmitos ocorrem na porção basal.
- Formação Sete Lagoas: Essencialmente carbonática, com dolomitos, finos níveis argilosos, dolomitos laminados, estromatolitos, brechas intraformacionais, dolarenitos e calcários oolíticos. O contato basal é discordante;
- Formação Samburá: Orto e paraconglomerados com seixos de quartzo, xisto, gnaisses, milonitos, quartzitos e filitos. A sedimentação é granodecrescente para o topo, sendo que estes depósitos se intercalam com siltitos e argilitos feldspáticos.
- Litofácies Conglomerado: Trata-se de uma pequena parcela na bacia. Composto predominantemente por metaconglomerado polimítico e metagrauvaca lítico.
- Litofácies Metapelito: Composto predominantemente por Metapelito com intercalações de metaconglomerado e ilhas de calcário.
- Formação Serra da Santa Helena: Margas, folhelhos e siltitos cinza a cinza esverdeados e laminados, frequentemente intercalados com arenitos finos e calcários acinzentados. Da base para o topo a unidade é constituída por uma sucessão de margas, finamente laminadas, passando transicionalmente a siltitos finos.
- Formação Lagoa do Jacaré: Sequência predominantemente carbonática e intensamente deformada, esta unidade é composta por calcarenitos, localmente oolíticos, e subordinadamente por calcisilititos, biolititos, margas e siltitos.
- Formação Serra da Saudade: Ocupa a maior área da Bacia do Alto São Francisco, com litotipo predominante de siltitos, por vezes argilosos, com constante laminação planoparalela. Secundariamente ocorrem em lentes calcissiltitos e calcarenitos. Eventualmente encontram-se intercalados calcários negros.
- Litofácies Foforito: Fácies com predomínio de pelito, diferenciando-se pela presença de fosforito.
- Formação Lagoa Formosa: É composta predominantemente por siltitos, com pequenas intercalações de siltitos argilosos, argilitos e, em menor quantidade, arenitos.



Grupo Canastra

PDRI

O Grupo Canastras é constituído por quartzitos e filitos intercalados, também subordinadamente por rochas carbonáticas/carbonáceas, os quais metamorfizados em fácies xisto verde (Dardenne, 2000). Nestas intercalações de filitos e quartzitos de baixo grau metamórfico erguemse os paredões rochosos da Serra da Canastra, onde se encontra a nascente histórica do Rio São Francisco.

Ocupando toda a borda oeste da Bacia do Alto São Francisco, este grupo é constituído pelas Formações Paracatú e Chapada dos Pilões, as quais constituem uma sequência sedimentar indicativa de um megaciclo regressivo.

- Formação Paracatú (indivisa): Filito sericítico e muscovita-clorita-quartzo xisto predominantes.
- Formação Paracatú (Membro Morro do Ouro): Representado por quartzitos na base, passando a filito carbonoso no topo.
- Formação Chapada dos Pilões (Membro Hidroelétrica da Batalha): É composta por ortoquartzitos com intercalações subordinadas de filitos, este último em forma de litofácies.
- Formação Chapada dos Pilões (Litofácies Filito Predominante): Possui predominância de filito, este subordinado por quartzito micáceo.

Grupo Ibiá

Composto pelas formações Cubatão e Rio Verde, encontra-se apenas a primeira presente na borda sudoeste da Bacia do Alto São Francisco (SF1).

- Formação Cubatão: Metaparaconglomerados com intercalações de quartzo filito alaranjado e quartzito micáceo cinza. Alguns autores interpretam esta formação, a qual posiciona-se sempre sobre o topo das rochas do Grupo Canastra, como um pacote de diamictitos.
- Formação Santo Hilário: com ocorrência restrita na Bacia do São Francisco, é uma das coberturas do neoproterozóico, incluindo arcósios, diamictitos e mélange tectonossedimentar.





12.2.4. Mesozóico

Grupo Areado

Este grupo é um registro do Cretáceo da Bacia do São Francisco, estando constituído por conglomerados e arenitos na base, pelitos e carbonatos na porção intermediária e um pacote relativamente espesso de arenitos de origem aluvial, eólica e lacustre no topo.

12.2.5. Cenozóico

- Depósitos Aluvionares: Resultantes do retrabalhamento fluvial recente, os depósitos aluvionares encontram-se ao longo dos principais cursos d'água da região, com maior expressão no Rio São Francisco e seus principais tributários. São constituídos por depósitos de areia, cascalhos, siltes e argilas, com ou sem contribuição orgânica, formando terraços e planícies de várzeas. Podem ocorrer turfeiras e paleocanais, estes últimos constituídos por depósitos de areias com intercalações de argila e cascalho, além de restos de matéria orgânica. Ocorrem ainda depósitos colúvio-aluvionares recentes, recobrindo a base das encostas, os quais são compostos por areias silto-argilosas, com grânulos e seixos, geralmente de quartzo, quartzito e canga limonítica, com linhas de seixos na base.
- Cobertura Superficial indiferenciada: Constituída por sedimentos clásticos e lateríticos ferruginosos, com idade cenozoica indiscriminada, recobre as formações do Grupo Bambuí e rochas cristalinas da Unidade Gnaisse Cláudio. A cobertura do Grupo Bambuí corresponde a depósitos eluvionares gerados a partir da decomposição de calcários e pelitos (argilas vermelhas), enquanto sobre as rochas cristalinas ocorrem elúvios e colúvios em graus variados de laterização, eventualmente canais suspensos, constituídos por sedimentos argilo-siltosos vermelho-escuros com concreções ferruginosas e níveis de cascalho intercalados. Os solos desenvolvidos sobre esta unidade são predominantemente Latossolos.

12.3. Geotectônica e estrutura geológica

O embasamento da Bacia do São Francisco, conforme levantamento aeromagnético (SIG do Brasil, CPRM 2003), tem uma estruturação regional com lineamentos NW de grande extensão, à qual associam-se estruturas NE de menor porte, conforme pode ser observado na Figura 12.4. Esta bacia, alongada segundo N-S, é limitada a leste e oeste pelas faixas Araçuai e Brasília, tendo sofrido esforços compressionais com orientação aproximada E-W durante o ciclo Brasiliano, os quais convergem para o centro da bacia e afetam com mais intensidade as suas bordas leste e oeste (Alkmin et al, 2001).





PLANO DIRETOR DE RECURSOS HÍDRICOS AFLUENTES DO ALTO SÃO FRANCISCO R2 - RELATÓRIO DE DIAGNÓSTICO

A evolução tectônica originou domínios tectônico-estruturais com distintas características cinemáticas. Os lineamentos NW caracterizam-se predominantemente por transcorrência e cisalhamento, enquanto os lineamentos NE podem ter comportamento extensional com falhamentos normais, os quais tem interesse hidrogeológico, ou então cavalgamentos de blocos em ângulos variados. As menores tensões tectônicas residuais devem ocorrer perpendicularmente aos lineamentos E-W.

Quanto às deformações, litologias como gnaisses, quartzitos, metassiltitos e carbonatos tem comportamento predominantemente rúptil, com geração de porosidade fissural secundária. No caso das rochas carbonáticas, a porosidade secundária é significativamente ampliada por processos de dissolução. Outras litologias, como ardósias, metargilitos, filitos e xistos, tem comportamento mais plástico, com geração de menor porosidade secundária efetiva.

VERSÃO EM ELABORAÇÃO







Figura 12.3 – Lineamentos e falhamentos estruturais da Bacia do Alto São Francisco – SF1 (Fonte: Adaptado de Codemig, CPRM e ANP, esc: 1:5.000.000)



12.4. Caracterização Hidrogeológica

As características e o comportamento hidrogeológico da bacia do Alto São Francisco refletem a complexidade do seu arcabouço geológico. Com vistas ao diagnóstico de águas subterrâneas, analisou-se a hidroestratigrafia e o condicionamento do fluxo subterrâneo, estimando-se os seus parâmetros hidrogeológicos e hidroquímicos, bem como avaliando-se a produtividade dos poços tubulares, reservas explotáveis e a vulnerabilidade dos sistemas aquiferos.

12.4.1. Domínios e subdomínios hidrogeológicos

PDRH

As unidades estratigráficas da bacia do Alto São Francisco, de acordo com o seu tipo de porosidade predominante, foram enquadradas como granulares, fissurais, cársticas e Cárstico-fissurais, como indicado a seguir e observado no Quadro 12.1, na Figura 12.5 e na Figura 12.6.

- Granulares: Aluviões e coberturas coluvionares, bem como outras unidades estratigráficas com arenitos e conglomerados. O fluxo subterrâneo ocorre através do espaço poroso intergranular.
- Fissurais: Unidades estratigráficas com porosidade secundária predominante, tais como rochas ígneas, metavulcânicas e metassedimentares. O fluxo subterrâneo é predominantemente fissural.
- Cársticos: Unidades com ocorrência predominante de rochas carbonáticas, caracterizando-se por elevada taxa de recarga superficial e rápida circulação das águas subterrâneas. Entretanto, quando capeados por coberturas sedimentares cenozoicas, a recarga passa a ser controlada pela cobertura superficial porosa
- Cárstico-fissurais: Unidades com interdigitações de rochas carbonáticas, siltitos, folhelhos, filitos, nas quais há limitação do fluxo lateral devido às rochas menos permeáveis. A recarga é eminentemente vertical e a dissolução cárstica não é tão intensa como em aquíferos tipicamente cársticos.





Quadro 12.1 – Domínios e subdomínios das unidades estratigráficas da Bacia do Alto São Francisco						
Domínio	Subdomínio	Grupo	Idade	Formação/Litofácies	Litologia	
	Aluvião	Dep. aluvionares	Cenozóico		Areias e cascalhos	
	Colúvio	Cobertura indiferenciada	Cenozóico		Sedimentos Argilo-siltosos + lateritas	
Granular	Aronitos (aroázana	Areado	Mesozóico		Arenitos	
	Arennos / arcoseos	Sto. Hilário	Neo-Proterozóico	Sto. Hilário	Arcóseos e diamictitos	
	Conglomerados proterozóicos	Bambuí	Neo-Proterozóico	Carrancas	Conglomerados com matriz carbonática, lentes de arenitos, diamicititos e ritmitos na base	
	Meta-vulcânica	Pium-hi	Meso-Arqueano	Lit.Metabasaltos /metakomatiítos	metaultramáfica e metamáfica tholeíticas, metabasalto komatiítico, metavulcânica félsica	
		lbiá	Neo-Proterozóico	Cubatão	Metaconglomerados com intercalações de quartzitos e filitos, capeia o G. Canastra	
	Meta-sedimentar	Canastra	Neo-Proterozóico	Membro Hidroelétrica da Batalha	Ortoquartzitos com intercalações de filitos	
		Canastra	Neo-Proterozóico	Chapada dos pilões, Lit. Filito	Filito predominantemente, subordinado por quartzito	
Fissural		Canastra	Neo-Proterozóico	Paracatú (Indivisa)	Filito sericítico e muscovita- clorita-quartzo xisto predominantes	
		Canastra	Neo-Proterozóico	Membro Morro do Ouro	Quartzito na base, filito carbonoso no topo	
		Bambuí	Neo-Proterozóico	Lagoa formosa	Siltitos com intercalações de argilitos	
		Bambuí	Neo-Proterozóico	Samburá, Lit. Conglomerado	Metaconglomerado polimítico, metagrauvaca lítico	
		Bambuí	Neo-Proterozóico	Samburá, Lit. Metapelito	Metapelito com intercalações de metaconglomerado e ilhas de calcário	
		Pium-hi	Meso-Arqueano	Serra Boa Esperança	Metaquartzitos, arenitos, filitos, meta-ultramáficas	
ECOPLAN				VERSÃO	AO Skii	
ENGENHARIA			530	ELAD	ENGENHARIA	



Domínio	Subdomínio	Grupo	Idade	Formação/Litofácies	Litologia
			Meso-Arqueano	Serra Boa Esperança, Lit. Quartzito	Predominantemente quartzitos
		Pium-hi	Meso-Arqueano	Serra da Mamona	Pelitos carbonosos, quartzitos, conglomerados
		Pium-hi	Meso-Arqueano	Seq. Turbidítica	Associação rítmica pelítico- arenosa
		Pium-hi	Meso-Arqueano	Lit. Metarenito	Metarenito predominante
		Gnaisses Arq.	Neo-Arqueano	Cláudio	Gnaisses graníticos e anfibolitos
	Cristalino	Gnaisses Arq.	Neo- Arqueano	Itapecerica	Gnaisses de composição granítica
		Pium-hi	Meso-Arqueano	Lit. Granito e ortognaisse miloníticos	Rochas intrusivas ácidas a intermediárias
		Bambuí	Neo-Proterozóico	Serra da Saudade	Siltitos argilosos margosos, calcário cinza na base
Cárstico - fissural	Siltito/marga/calcário	Bambuí	Neo-Proterozóico	Serra da Saudade, Lit. Fosforito	Pelito e fosforito
		Bambuí	Neo-Proterozóico	Serra Sta. Helena	Margas, folhelhos, siltitos laminados e calcários
Cárstico	Margas / calcarenitos Bambuí		Neo-Proterozóico	Lagoa do jacaré	Siltitos argilosos margosos, intercalações calcárias
	Carbonatos	Bambuí	Neo-Proterozóico	Sete Lagoas	Calcários e dolomitos

Fonte: Elaboração própria (2020).

ECOPLAN

VERSÃO EM ELABORAÇÃO

Skil



Figura 12.4 – Domínios hidrogeológicos da Bacia do Alto São Francisco.







ECOPLAN





Figura 12.5 – Subdomínios hidrogeológicos da Bacia do Alto São Francisco.

Estimativa de parâmetros hidrogeológicos 12.5.

Inicialmente, através da expressão proposta por Dupuit e Forchheimer (1901, apud FEITOSA, 2008), estimou-se as condutividades hidráulicas de Darcy (k) para os domínios hidrogeológicos e suas unidades estratigráficas. Para este procedimento utilizou-se os dados de testes de ELABORAÇÃO bombeamento de 125 poços (SIAGAS), para os quais considerou-se as seguintes hipóteses simplificadoras:

- Os poços encontram-se em regime operacional estabilizado;
- A espessura saturada (b) é equivalente à profundidade dos poços e;
- A transmissividade (T) dos aquíferos é equivalente à vazão específica (Qe) em regime • estabilizado.





ρειχε νινο



Os resultados obtidos mostram comportamentos característicos para os domínios hidrogeológicos e unidades hidroestratigráficas (Figura 12.7), quais sejam:

Domínio granular: Os aluviões apresentam resultados homogêneos, com condutividades hidráulicas elevadas e pouco variáveis, enquanto as coberturas detrito-lateríticas tem ampla variação paramétrica (k = 1×10^{-03} cm/s até 3×10^{-06} cm/s).

Domínio fissural: O desenvolvimento de porosidade secundária em gnaisses e migmatitos (k = 10^{-03} a 10^{-05} cm/s) resultou em condutividade hidráulica mais elevada do que nas rochas ultramáficas (com maior porosidade, tipicamente fissurais, tem condutividade hidráulica superior às rochas máficas, com k = 10^{-06} cm/s), estas últimas excepcionalmente baixas em relação às demais unidades da bacia hidrográfica. Os quartzitos e filitos Canastra, os quais encontram-se metarmofizados em fácies xisto verde (Dardenne, 2000), também mostram variação ampla de suas condutividades hidráulicas.

Domínios Cárstico e cárstico-fissural: As unidades cársticas, como a Formação Sete Lagoas, nos poços analisados, não mostraram diferenças significativas em relação às condutividades hidráulicas das unidades cárstico-fissurais (formações Serra da Saudade e Serra Sta. Helena).

A distribuição das vazões específicas (Qe) em relação ao total de poços (Figura 12.8) mostra trechos com diferentes declividades (A, B, C e D), prováveis compartimentos hidrogeológicos com parâmetros distintos. A análise da distribuição espacial das vazões específicas mostra que os maiores valores ocorrem nos domínios cárstico-fissural e cárstico, conforme observado na Figura 12.9.

VERSÃO EM ELABORAÇÃO





Figura 12.7 – Vazões específicas dos poços tubulares (base SIAGAS/CPRM), excluídos 16 poços de maior vazão, observando-se trechos com distintas declividades (A, B, D e D).





peixe vivo





Figura 12.8 – distribuição espacial das vazões específicas e sub-domínios hidrogeológicos

ECOPLAN

Skill

12.6. Fluxo subterrâneo

PDRH

O fluxo subterrâneo, apresentado na Figura 12.10, converge de forma geral para o rio São Francisco, a partir dos limites leste e oeste da bacia, fluindo então para NNE com o curso fluvial. Além de pontos de convergência interna, observa-se divisores de águas subterrâneas, a partir dos quais o fluxo converge para a rede de drenagem, em torno da qual concentram-se as zonas de descarga subterrânea (Figura 12.11).

Os gradientes hidráulicos subterrâneos são elevados nas bordas leste e oeste da bacia SF1, denotando baixas transmissibilidades (T) nestes locais. Na região central, os gradientes hidráulicos decaem nos subdomínios cárstico-fissural e cárstico (Figura 12.12). Não há coincidência entre os exutórios superficial e subterrâneo principal.



Figura 12.9 – Fluxo subterrâneo da bacia hidrográfica do Alto São Francisco.





Figura 12.10 – Zonas de descarga hidrogeológica, verificando-se que as mesmas encontram-se predominantemente no entorno da rede de drenagem superficial









VERSÃO EM ELABORAÇÃO

Skil

PDRH

12.7. Interação entre águas superficiais e subterrâneas

A rede de drenagem é predominantemente efluente (73%), com provável alimentação a partir dos sistemas aquíferos durante todo o ano hidrológico, como pode ser observado na Figura 12.13. As perdas de água superficial ocorrem nos trechos de drenagens influentes ou em zonas de dolinas, como também nos trechos onde os cursos fluviais encontram-se dentro do raio de influência do bombeamento subterrâneo.

Quanto à influência do bombeamento, estudos anteriores em áreas próximas (bacia do rio Verde Grande) indicaram que há interferência dos poços tubulares sobre a drenagem superficial. Algum efeito visível já ocorre a distâncias de 110m, principalmente para vazões mais elevadas, o que se intensifica a partir de 40m a 50m de distância das drenagens (Figura 12.14).





Como se observa na Figura 12.15, parte dos poços tubulares cadastrados na base IGAM encontra-se próxima à rede de drenagem. As distâncias às drenagens foram determinadas em SIG, verificando-se que há 130 poços situados a distâncias inferiores a 100m, sendo que destes 52% encontram-se a menos de 50m das drenagens.













Figura 12.14 – Distribuição espacial e distâncias dos poços tubulares à rede de drenagem superficial na bacia do Alto São Francisco (drenagens de ordem 5 a 8).



A bases de dados SIAGAS, assim como o cadastro de outorgas de poços tubulares do estado de Minas Gerais (IGAM), tem poucos dados hidroquímicos, não permitindo a caracterização das águas subterrâneas da Bacia do Alto São Francisco – SF1.





R2 - RELATÓRIO DE DIAGNÓSTICO

Uma estimativa indireta, utilizando como parâmetro estimador a condutividade elétrica (Ce) das águas subterrâneas, pode ser feita com relação aos sólidos totais dissolvidos (STD). De forma geral, a condutividade elétrica cresce no sentido do fluxo subterrâneo, indicando um aumento progressivo dos sólidos dissolvidos no sentido do fluxo. Uma zona anômala, com valores Ce elevados e alinhados segundo NE, ocorre entre Doresópolis e Pains, a qual coincide com uma zona de convergência do fluxo subterrâneo. Outras zonas de convergência de fluxo mostram também condutividades elétricas mais elevadas (Figura 12.16).

Embora não haja dados suficientes, algumas características hidroquímicas podem ser estimadas genericamente para as unidades do Grupo Bambuí na bacia do Alto São Francisco, conforme observado no Quadro 12.2.

Aquifero	Características hidroquímicas	Observações
Bambuí aflorante	a) Águas predominantemente	Em zonas de carstificação
	bicarbonatadas cálcicas, em menor	acentuada a recarga elevada e a
	proporção sulfatadas cálcicas e	rápida circulação resultam em baixos
	bicarbonatadas sódicas.	valores de STD
	b) Dureza média a dura (100 a >200 mg/L)	
	c) Baixa salinidade (STD <500 mg/L)	
Bambuí recoberto	a) Águas predominantemente	As formações de cobertura (Aerado)
	bicarbonatadas cálcicas, neutras a	e/ou coberturas cenozoicas
	alcalinas.	propiciam o decaimento dos valores de STD
	b) Dureza média a dura (100 a >200 mg/L)	
	c) Baixa salinidade (STD <500 mg/L)	
Fonte: Elaboração própria (20)20).	VERSÃO EM ELABORAÇÃ

Quadro 12.2 – Características hidroquímicas do Grupo Bambuí.

2011









ECOPLAN

544

PDRH

12.9. Usos e produtividade dos poços tubulares

As bases SIAGAS e IGAM, respectivamente com 216 e 3595 poços cadastrados (Figura 12.17), esta última sem dados de níveis dinâmicos ou vazões específicas, mostram conflitos de localização dos poços. Desta forma, as bases foram analisadas em separado.

Examinando-se o desempenho dos poços da base SIAGAS nos testes de bombeamento (Figura 12.18), verifica-se que as maiores vazões estabilizadas correspondem aos menores rebaixamentos. Os poços com vazões abaixo de 20 m³/h apresentam rebaixamentos variáveis, podendo atingir mais de 100 m. Para os poços de altas vazões estabilizadas (Q > 20 m³/h) há uma redução significativa dos rebaixamentos, os quais são em grande parte menores do que 30 m.

Figura 12.16 – Vazões e rebaixamentos obtidos nos testes de bombeamento dos poços da base SIAGAS (n=216).













Skil



Em relação à produtividade dos poços da base SIAGAS, verifica-se que as maiores vazões estabilizadas (Qb > 20 m³/h) correspondem a apenas 20% dos poços instalados (Figura 12.19). Utilizando-se todo o conjunto amostral da base SIAGAS (n=216), observa-se que apenas 20% dos poços, justamente os de maiores vazões, são responsáveis por aproximadamente 2/3 do volume total de explotação dos poços desta base de dados (Figura 12.20).





Figura 12.19 – Vazão estabilizada acumulada dos poços tubulares (base SIAGAS/CPRM).





SKI

Quanto à utilização da água subterrânea, utilizando-se apenas o uso principal cadastrado na base IGAM, verifica-se que aproximadamente 75% da vazão total de explotação tem como uso principal o consumo humano, correspondendo a 2717 poços de baixa vazão (Qbomb = 0,98 m³/h) distribuídos na bacia hidrográfica. O segundo uso principal é a dessedentação animal, com 9,7% da explotação total (Quadro 12.3).

Tipos de uso	Vaz	ão	Poços	
	(m³/h)	(%)	Número	(%)
Abast. Público	223	0,9	42	1,2
Aquicultura	370	1,5	31	0,9
Agroindústria	735	2,9	97	2,7
Consumo humano	18922	<mark>74,3</mark>	2717	75,6
Industrial	806	3,2	120	3,3
Dessed. animal	2460	<mark>9,7</mark>	277	7,7
Ext. Mineral	36	0,1	22	0,6
Irrigação	708	2,8	107	3,0
Lavagem veículos	489	1,9	86	2,4
Não informado	531	2,1	78	2,2
Paisagismo	93	0,4	10	0,3
outros	85	0,3	8	0,2
Total	25458	100	3595	100

Quadro 12.3 – Usos da água subterrânea na bacia do Alto São Francisco.

Fonte: Elaboração própria (2020).

12.10. Avaliação da disponibilidade hídrica subterrânea

Com vistas a evitar impactos significativos no ecossistema aquático superficial, a explotação das águas subterrâneas deve ser limitada à 50% das reservas renováveis (Heine, 2008), sendo que alguns autores recomendam ainda o limite máximo de 20%. Com abordagem ambientalista, a disponibilidade hídrica subterrânea é aqui considerada como 20% das reservas reguladoras (Rr).

A recarga anual efetiva, quando estimada por balanço hídrico como uma fração da precipitação pluviométrica anual média, varia comumente entre 5% e 12% para aquíferos granulares, decaindo para apenas ano 5% da precipitação anual em aquíferos fissurais, cársticos e cárstico-fissurais. Utilizando-se os dados pluviométricos, obtidos no Portal HidroWeb da ANA, do ano 1970 (Figura 12.21), bem como considerando-se uma recarga anual efetiva da ordem de 8% da precipitação anual, estimou-se as reservas renováveis (Rr) para as sub-bacias de nove estações fluviométricas da bacia do Alto São Francisco (Figura 12.22). Os resultados são apresentados





no Quadro 12.4, verificando-se que na estação fluviométrica 40100000, a qual abrange praticamente toda a bacia hidrográfica, a reserva estimada é Rr = 1,28E+09 m³/ano.

Estação	Área (km²)	PPt anual (mm)	Rr (m³/ano)
40025000	300	1229	2,95E+07
40032000	749	1243	7,45E+07
40037000	755	1238	7,48E+07
40040000	242	1194	2,31E+07
40050000	5338	1169	4,99E+08
40053000	292	1058	2,47E+07
40070000	9776	1154	9,03E+08
40080000	646	1212	6,26E+07
40100000	13755	1159	1,28E+09

Quadro 12.4 – Reservas renováveis (Rr) estimadas a partir da precipitação média anual.

Fonte: Elaboração própria (2020).

PDRH















VERSÃO EM ELABORAÇÃO



PLANO DIRETOR DE RECURSOS HÍDRICOS AFLUENTES DO ALTO SÃO FRANCISCO

R2 - RELATÓRIO DE DIAGNÓSTICO

Figura 12.21 – Localização das estações fluviométricas e sub-domínios hidrogeológicos na bacia do Alto São Francisco.







As reservas subterrâneas renováveis (Rr) são comumente avaliadas através de métodos de separação do escoamento de base, este último caracterizado pelo trecho de recessão dos hidrogramas fluviais. Entre estes, devido a sua simplicidade e eficácia, os métodos de Maillet (1905) e de Meyboom (1961, apud Fetter, 2001) são aqui utilizados.

Avaliou-se inicialmente as reservas reguladoras (Rr) através dos registros fluviométricos históricos da bacia do Alto São Francisco (1970 - 2016). Buscando retratar a menor influência antrópica sobre a recarga subterrânea, o método da curva de recessão (Maillet, 1905) foi aplicado ao ano inicial (1970), considerando nove estações distribuídas na bacia hidrográfica (Figura 12.22). Os registros fluviométricos destas estações mostraram um período de vazões decrescentes entre Abril e Agosto/1970, mais precisamente entre os dias 100 e 240 (Figura 12.23).

Os resultados indicaram uma recarga efetiva da ordem de 8,3% da precipitação anual, correspondendo e uma reserva renovável de Rr=1,32E+09 m3/ano para a estação fluviométrica 40100000, a qual abrange praticamente toda a bacia hidrográfica (Quadro 12.5). Estes resultados são próximos da avaliação realizada a partir da precipitação média anual (ano 1970), a qual resultou em uma reserva renovável Rr = 1,28E+09 m³/ano para a estação fluviométrica 40100000.

—	(a)	(b)	(c)	(d) = (c) / (b)	(e)	(f) = {(d) / (e)}*100	
Estaçao	K/dia	Área (km²)	Rr (m³)	h (mm)	PPt anual (mm)	h (% PPt anual)	
40025000	0,00975	300	6,44E+07	215	1229	17,5	1
40032000	0,00532	749	2,45E+08	327	1243	26,3	
40037000	0,01038	755	1,28E+08	170	1238	13,7	
40040000	0,00667	242	4,58E+07	189	1194	15,9	
40050000	0,01002	5338	5,68E+08	106	1169	9,1	
40053000	0,01652	292	1,65E+07	57	1058	5,3	
40070000	0,01089	9776	1,07E+09	110	1154	9,5	
40080000	0,00953	646	3,65E+07	57	1212	4,7	
40100000	0,00652	13755	<mark>1,32E+09</mark>	96	1159	<mark>8,3</mark>	
e: Elaboração própria (2020).							

Quadro 12.5 – Estimativa de reservas renováveis (Rr) para o ano 1970 - Método de Maillet (1905).

Fonte: Elaboração própria (2020).

PDRH







ECOPLAN







ECOPLAN

Co B













Fonte: Elaboração própria (2020).



VERSÃO EM ELABORAÇÃO

Skill

Ainda, utilizando o método da recarga anual entre dois períodos de recessão (Meyboom 1961, apud Fetter, 2001), considerou-se os dados fluviométricos para o período entre Set/1971 a Jan/1972 (Figura 12.24). Os resultados são da mesma ordem dos obtidos pelo método de Maillet (1905), com uma indicação de reserva hídrica subterrânea da ordem de 1,58E+09 m³/ano, o que corresponde a 9,9% da precipitação média anual (Quadro 12.6).

Estação	Meyboom (1961)	Maillet (1905)
40025000	3,66E+07	6,44E+07
40032000	1,71E+08	2,45E+08
40037000	1,31E+08	1,28E+08
40040000	2,44E+07	4,58E+07
40050000	8,14E+08	5,68E+08
40053000	1,91E+07	1,65E+07
40070000	1,10E+09	1,07E+09
40080000	4,18E+07	3,65E+07
40100000	1,58E+09	1,32E+09

Quadro 12.6 – Comparação das reservas renováveis (Rr) estimadas por diferentes métodos (m³).

Obs: O método de Maillet (1905) utilizou dados do ano 1970, enquanto o método de Meyboom (1961) utilizou dados de 1971/1972

Fonte: Elaboração própria (2020).

PDRH

VERSÃO EM ELABORAÇÃO







ECOPLAN





ECOPLAN



R2 - RELATÓRIO DE DIAGNÓSTICO

Fonte: Elaboração própria (2020).

A disponibilidade de água subterrânea pode ser avaliada a partir dos dados da estação 40100000, a qual encontra-se bastante próxima ao exutório superficial, abrangendo a quase totalidade da bacia hidrográfica. Considerando-se o limite explotável de 20% das reservas renováveis (Rr = 1,32E+09 m³/ano), a disponibilidade hídrica da bacia é de 2,63E+08 m³/ano.

Para a avaliação das taxas atuais de explotação, há dados disponíveis nas bases SIAGAS (216 poços) e IGAM (3595 pontos de explotação), esta última incluindo poços, cacimbas e nascentes. Devido às diferenças de códigos e coordenadas, as bases foram utilizadas separadamente.

Utilizou-se incialmente a base SIAGAS, a qual não tem dados operacionais e apenas 152 poços tem testes de bombeamento. Adotando-se uma abordagem conservadora, estimou-se que estes 152 poços operem com as vazões estabilizadas dos testes de bombeamento, com turnos operacionais de 8h/dia e 365 dias/ano. Disto resultou um volume de explotação de V.anual = 8,54E+06 m³/ano. Considerando que os poços sem dados de bombeamento tenham uma explotação proporcional ao primeiro conjunto de 152 poços, chega-se a uma estimativa de explotação total anual de 1,22E+07 m³/ano, o que corresponde à 4,6 % da disponibilidade subterrânea explotável de 2,63E+08 m³/ano.

Ainda, considerando os poços com dados operacionais (3200) cadastrados na base IGAM, chega-se a um volume de explotação total anual de 2,47E+07 m³/ano. Novamente, considerando que os pontos sem dados operacionais tenham uma explotação proporcional ao primeiro conjunto, chega-se ao volume de explotação total anual de 2,77E+07 m³/ano, o que corresponde à 10,5 % da disponibilidade subterrânea explotável de 2,63E+08 m³/ano.





oeixe vivo

Ambos os resultados mostram que as taxas atuais de explotação estão bastante aquém do limite explotável, na ordem de 10% do mesmo. Entretanto, recomenda-se a atualização do cadastro de poços e a aferição das taxas e turnos de bombeamento.

12.11. Vulnerabilidade dos sistemas aquíferos

Estudos anteriores, realizados em escala 1:250.000 pelo método EPIK (Doerfliger & Swahlen, 1998), o qual aplica-se a sistemas cársticos, indicaram uma vulnerabilidade predominantemente média para a Bacia do Alto do São Francisco (ANA, 2018), porém com elevada incidência de fontes contaminantes industriais. A região das nascentes apresentou baixa vulnerabilidade.

No presente diagnóstico utilizou-se a versão agrícola do método DRASTIC (Aller et al, 1987), o qual é adequado para a análise espacial por geoprocessamento (Figura 12.25). Este método considera diversas características da bacia hidrográfica, tais como a profundidade do nível d'água subterrâneo (D), o regime de precipitação pluviométrica e recarga subterrânea (R), o meio aquífero (A), os solos (S), o relevo (T), a influência da zona vadosa (I) e a condutividade hidráulica do aquífero (C).

O resultado da aplicação do método DRASTIC (Figura 12.26), indicou que a bacia tem uma vulnerabilidade predominantemente moderada a alta, conforme apresentado no Quadro 12.7. A vulnerabilidade das nascentes varia de muito baixa a alta, esta última predominante nos trechos médio e baixo da bacia hidrográfica.

Vulnerabilidade	Área (km2)	Área (%)
Muito baixa	1.273	9
Baixa	2405	17
Moderada	6649	47
Alta	3254	23
Muito alta	566	4
Fonte: Elaboração própria (2020).		VERSÃO EN ELABORAÇÃO

Quadro 12.7 – Vulnerabilidade DRASTIC da bacia do Alto são Francisco.







PLANO DIRETOR DE RECURSOS HÍDRICOS AFLUENTES DO ALTO SÃO FRANCISCO



R2 - RELATÓRIO DE DIAGNÓSTICO

Figura 12.24 – Método DRASTIC para estimativa da vulnerabilidade dos sistemas aquíferos da Bacia Hidrográfica do Alto São Francisco.











12.12. Conclusões e Diagnósticos

- A Bacia do Alto São Francisco SF1 está inserida no Cráton do São Francisco (Arqueano) e na Faixa Brasília (Proterozóico Superior). As deformações do Cráton são crescentes em direção às suas bordas, onde é limitado por faixas móveis compressionais do ciclo Brasiliano;
- A evolução tectônica originou domínios tectônico-estruturais com distintas características cinemáticas. Os lineamentos tectônicos, os quais tem interesse hidrogeológico, caracterizam-se comumente por transcorrência e cisalhamento segundo a orientação NW, enquanto na orientação NE podem apresentar comportamento extensional e geração de falhamentos normais;





São Franc

- A tectônica rúptil é responsável pela geração de porosidade fissural secundária em rochas como gnaisses, quartzitos, metassiltitos e carbonatos, estas últimas com ampliação do espaço poroso por processos de dissolução;
- Litologias com comportamento típicamente plástico, tais como ardósias, metargilitos, filitos e xistos, tem menor porosidade secundária efetiva;
- Os domínios hidrogeológicos foram caracterizados de acordo com o tipo de porosidade predominante, quais sejam: granular, fissural, cárstico e cárstico-fissural;
- Os parâmetros dos domínios hidrogeológicos variam de acordo com os tipos litológicos constituintes;
- Domínio granular: Os aluviões são relativamente homogêneos com condutividades hidráulicas elevadas (K=10⁻³ a 10⁻⁴ cm/s) enquanto as coberturas detrito-lateríticas mostram-se heterogêneas e com ampla variação paramétrica (K = 10⁻³ a 3x10⁻⁶ cm/s);
- Domínio fissural: Os gnaisses e migmatitos tem condutividades hidráulicas (k = 10⁻³ a 10⁻⁵ cm/s) mais elevadas do que as rochas ultramáficas (k = 10⁻⁶ cm/s). Rochas metamorfizadas em fácies xisto verde (quartzitos e filitos) apresentam também ampla variação de sua condutividade hidráulica;
- Domínios cárstico e cárstico-fissural: Não foram detectadas diferenças significativas entre as unidades estratigráficas. Entretanto, estes domínios apresentaram os maiores valores de vazão específica;
- O fluxo subterrâneo, embora tenha uma convergência geral para o rio São Francisco no centro da bacia hidrográfica, mostra divisores internos de águas subterrâneas e pontos localizados de convergência. Os exutórios superficial e subterrâneo principal não são coincidentes;
- Os gradientes hidráulicos são mais elevados nos limites leste e oeste da bacia hidrográfica, denotando condutividades hidráulicas mais baixas nestes locais (domínio fissural). Por outro lado, nos locais de convergência interna de fluxo subterrâneo, assim como nos domínios cárstico e cárstico-fissural, os gradientes hidráulicos são mais baixos, denotando maior condutividade hidráulica;
- Quanto a interação de águas superficiais e subterrâneas, as zonas de descarga concentram-se em torno da rede de drenagem, a qual é predominantemente efluente. Aproximadamente 73% das drenagens de 4ª a 8ª ordem foram caracterizadas como efluentes;





- Além dos trechos de drenagem influente (27% das drenagens de 4ª a 8ª ordem), bem como eventuais dolinas, as perdas da rede hídrica superficial podem ocorrer por efeito do bombeamento subterrâneo (poços tubulares);
- As bases SIAGAS (216 poços) e IGAM (3595 pontos de captação) não apresentam correspondência de coordenadas, motivo pelo qual foram utilizadas separadamente;
- O uso principal da água subterrânea é o consumo humano, correspondendo a 75% da vazão total de explotação (Base IGAM), com 2717 poços de baixa vazão (Q = 0,98 m³/h) distribuídos na bacia hidrográfica. O segundo uso principal é a dessedentação animal, correspondendo a 9,7% da vazão total de explotação;
- Em torno de 130 poços (Base IGAM) encontram-se a menos de 100 m de distância da rede de drenagem superficial, sendo que 52% destes estão a menos de 50 m de distância;
- Estima-se que, a partir de 100 m de distância, os poços de alta vazão (Q > 20 m³/h) já apresentem impacto sobre a rede de drenagem superficial. De forma geral, a partir de 40 m a 50 m de distância da rede de drenagem, todos os poços tem impacto crescente sobre o meio aquático superficial;
- Os testes de bombeamento (base SIAGAS) indicaram que os poços de alta vazão (Q > 20 m³/h) tem os menores rebaixamentos, portanto as maiores vazões específicas;
- As bases SIAGAS e IGAM não dispõem de dados hidroquímicos. Entretanto, a condutividade elétrica mostra valores elevados nas zonas internas de convergência de fluxo subterrâneo, indicando que nestes locais a água subterrânea deve também apresentar teores elevados de sólidos totais dissolvidos (STD);
- As reservas renováveis, estimadas por métodos fluviométricos (Maillet, 1905), são da ordem de Rr = 1,32E+09 m³/ano. Outros métodos, como Meyboom (1961) e fração da PPt anual, resultaram respectivamente em reservas renováveis de 1,58E+09 e 1,28E+09 m³/ano;
- Com enfoque ambientalista, a disponibilidade hídrica subterrânea da bacia hidrográfica, considerando o limite explotável de 20% das reservas renováveis (Rr = 1,32E+09 m³/ano), é portanto de 2,63E+08 m³/ano;
- Estima-se que a taxa anual de explotação por poços tubulares (Base IGAM) encontre-se atualmente em torno de 10% do limite explotável da bacia hidrográfica;





PDRH

- Ainda, estima-se também que apenas 20% dos poços tubulares (Q >20 m³/h) sejam responsáveis por 80% da explotação total anual da bacia SF1;
- A vulnerabilidade DRASTIC é predominantemente moderada. As nascentes do Rio São Francisco têm vulnerabilidade desde muito baixa até alta, esta última nos trechos médio e baixo da bacia hidrográfica SF1.



