

**AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS**

**MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE**

## **UGRH PARANAPANEMA**

### **DIAGNÓSTICO**

AVALIAÇÃO QUANTITATIVA E QUALITATIVA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Brasília - DF

Dezembro/2014



# 1. GEOLOGIA DA BACIA DO PARANAPANEMA

## 1.1. INTRODUÇÃO

A Bacia Hidrográfica do Rio Paranapanema, do ponto de vista geotectônico, está inserida em duas unidades, quais sejam: a Província Mantiqueira e a Bacia Sedimentar do Paraná.

Na Província Mantiqueira, onde se localiza a cabeceira do Rio Paranapanema, ocorrem basicamente rochas metavulcanossedimentares do Complexo Metamórfico Apiaí-Mirim, Supergrupo Açungui e Grupo Castro, além de intrusivas graníticas denominadas na literatura geológica como “Complexos Graníticos”, representadas na área principalmente pelos complexos graníticos de Três Córregos e Cunhaporanga.

Já na maior área de desenvolvimento da Bacia do Paranapanema ocorrem as rochas sedimentares e básicas da Bacia Sedimentar do Paraná.

## 1.2. EMBASAMENTO CRISTALINO NA BACIA DO RIO PARANAPANEMA

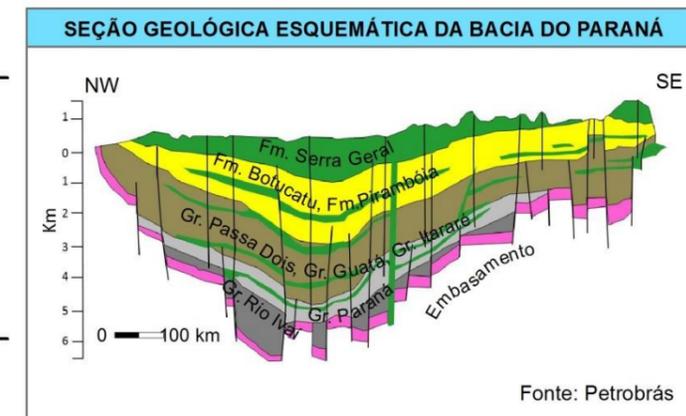
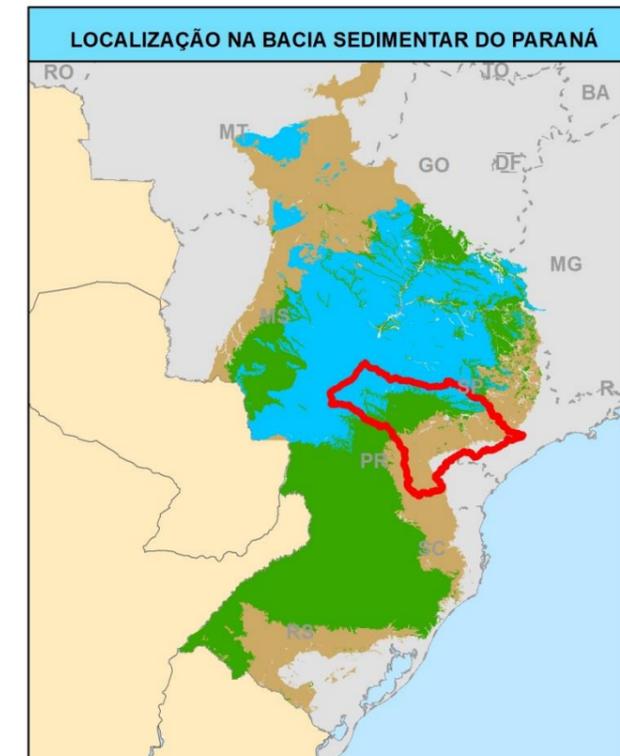
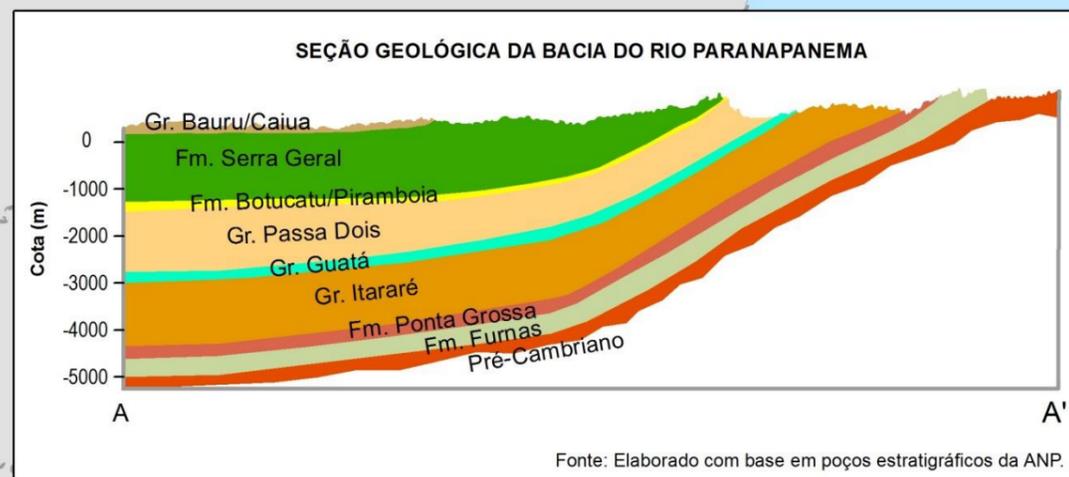
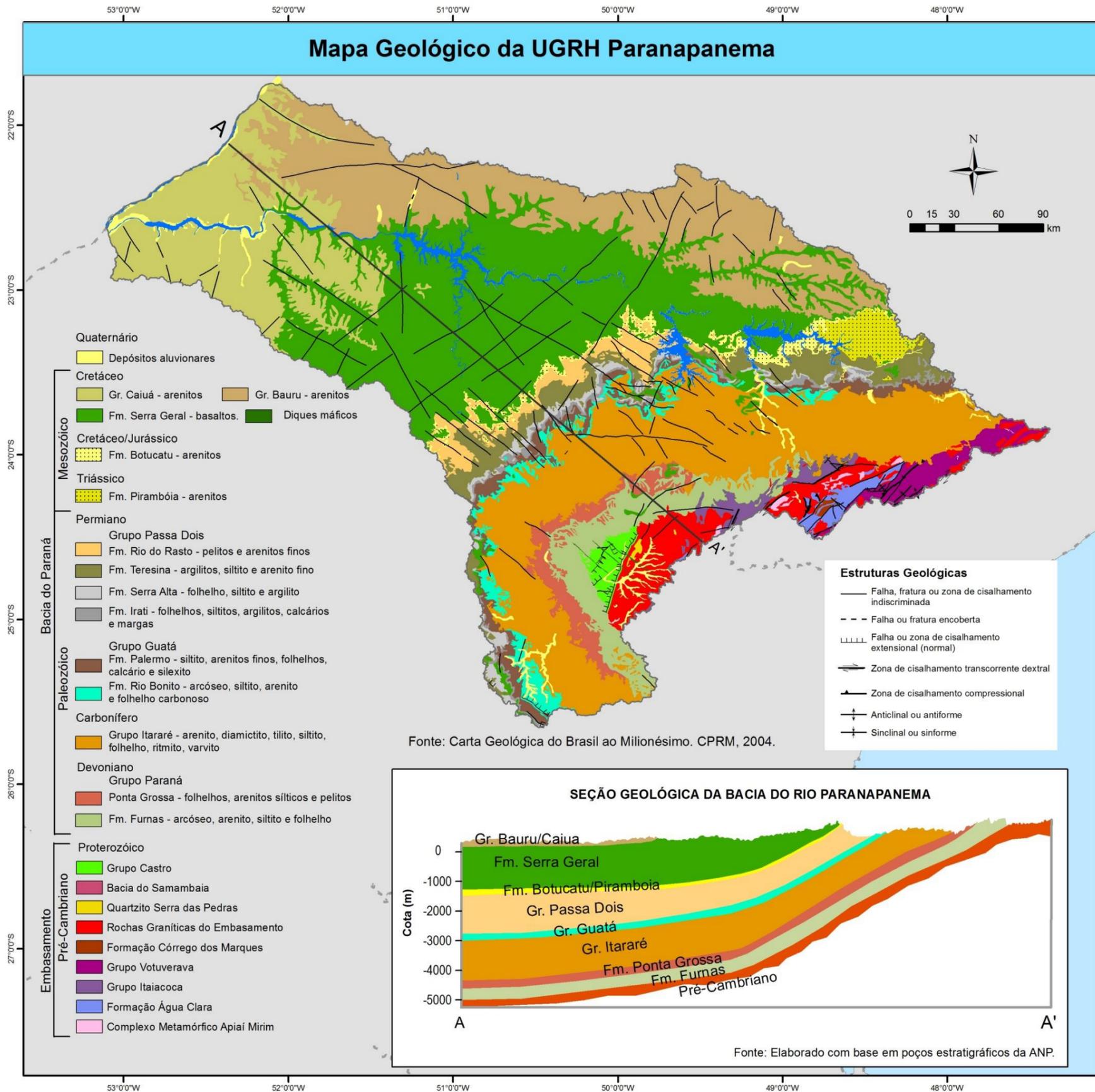
As rochas cristalinas do Embasamento na Bacia do Rio Paranapanema estão sob o contexto da Província Mantiqueira, mais especificamente no Domínio Apiaí.

Esta província se estende ao longo da costa brasileira, desde o sul da Bahia até o Uruguai e está estabelecida sobre um domínio de rochas de idade proterozoica, composto por uma grande área de composição granito-gnáissica e metassedimentos (Heilbron *et al.*, 2004).

O Domínio Apiaí é um terreno tectônico integrante da porção meridional do Cinturão Ribeira, que corresponde a um segmento crustal paralelo à linha costeira do sudeste brasileiro. Sua formação é relacionada à Orogenia Brasileiro-Pan Africana e à consolidação do supercontinente Gondwana (Faleiros, 2008). Este domínio é limitado a sul pela Zona de Cisalhamento Lancinha que representa o traço de sutura entre este e a Microplaca Curitiba e é caracterizada por grandes zonas de cisalhamento com caráter transcorrente (Siga Junior, 1995).

De acordo com Siga Junior *et al.* (2011), o Domínio Apiaí é composto por unidades metavulcanossedimentares que formam o embasamento cristalino, além dos complexos graníticos. Cada um destes grandes compartimentos foi justaposto por cisalhamento extensivo, incluindo cavalgamentos e falhas transcorrentes. Entre os principais litotipos estão quartzitos, filitos, xistos, rochas cálcio-silicatadas, mármore, metamargas, assim como rochas metaígneas básicas, intermediárias e ácidas. O grau metamórfico varia de baixo a médio. A idade mínima de sedimentação das sequências metavulcanossedimentares é mesoproterozoica chegando até no máximo idades neoproterozoicas. Ocorrem ainda batólitos graníticos de 630-590 Ma, tidos como partes de arcos magmáticos, além de batólitos anorogênicos de 590-540 Ma, que estão intrudidos nestas sequências (Prazeres Filho, 2005).

Neste contexto, na região da Bacia do Paranapanema, o embasamento cristalino é formado por rochas metavulcanossedimentares {Complexo Metamórfico Apiaí-Mirim, Supergrupo Açungui [Grupo Itaiacoca, Grupo Votuverava (Formações Gorutuba e Serra da Boa Vista do Subgrupo Lajeado; a Formação Iporanga do Subgrupo Ribeira); e a Formação Água Clara]}, Formação Córrego dos Marques, Quartzito Serra das Pedras, Conglomerado Samambaia e Grupo Castro}, rochas graníticas (Complexo Granítico Três Córregos, Complexo Granítico Cunhaporanga, Gabro de Apiaí e granitos tardi a pós-orogênicos) e diques básicos, como mostra o Mapa Geológico da Bacia do Paranapanema (**Figura 1.1**).



**Figura 1.1** - Mapa Geológico da Bacia do Paranapanema.

O **Complexo Metamórfico Apiaí-Mirim** é um terreno desenvolvido em bacia extensional (rifte continental), com magmatismo e sedimentação associados ao final do Paleoproterozoico. É representado principalmente por biotita-anfibólio-sienogranitos e monzogranitos miloníticos, contendo porfiroclastos de K-feldspatos. A matriz apresenta granulação média a fina e é intensamente deformada (Siga Junior, 2010).

Com a evolução deste processo para bacias extensionais mais amplas durante o Mesoproterozoico houve a deposição das rochas do **Supergrupo Açungui**, que compreende rochas supracrustais metamorfas em condições de fácies xisto verde a anfibolito (Faleiros, 2008). Na área da Bacia do Paranapanema, o Supergrupo Açungui é formado por rochas da Formação Água Clara, do Grupo Itaiacoca, da Formação Serra da Boa Vista (Subgrupo Lajeado/Grupo Votuverava), da Formação Gorutuba (Subgrupo Lajeado/Grupo Votuverava) e da Formação Iporanga (Subgrupo Ribeira/Grupo Votuverava).

A **Formação Água Clara** (Marini *et al.*, 1967) na região é composta por rochas metassedimentares de origem vulcanossedimentar, predominantemente mármores puros e impuros, e rochas calciossilicáticas, cálcio xistos, mica xistos, anfibólio xistos, quartzitos, granada-clorita-biotita xistos, metacherts, metatufos básicos e intermediários, metabasitos, anfibolitos e cornubianitos (Frasca *et al.*, 1990), provenientes do metamorfismo de baixo a médio grau de rochas carbonáticas e margosas depositadas em ambiente plataformal profundo.

O **Grupo Itaiacoca** corresponde a uma sequência de rochas metavulcanossedimentares de baixo grau metamórfico que ocorre numa faixa de direção NE-SW entre os estados de São Paulo e Paraná. Estas rochas são afetadas por zonas de cisalhamento e falhas dúcteis e rúpteis, além de intrusões graníticas associadas aos plútons do Complexo Granítico Cunhaporanga (Caltabeloti, 2011). As unidades mais antigas, de idades do final do Mesoproterozoico e início do Neoproterozoico, são as formações **Água Nova**, **Serra dos Macacos**, **Bairro dos Campos** e **Unidade Metabásica**, sendo correspondentes à sequência basal de rochas metacarbonáticas e metapelitos de Siga Junior *et al.* (2009). A sequência de topo corresponde à **Formação Abapã** e é constituída por rochas metavulcanoclásticas, metarenitos arcoseanos e metapelitos do final do Neoproterozoico (Siga Junior *et al.*, 2003).

O **Grupo Votuverava** abrange dois Subgrupos: **Lajeado** e **Ribeira** (Campanha & Sadowski, 1998).

O **Subgrupo Lajeado** corresponde a uma plataforma carbonática, constituída por formações terrígenas e carbonáticas alternadamente sobrepostas, intrudida em sua porção superior por um corpo gabróide, o **Gabro de Apiaí** (Oliveira *et al.*, 2012), com idade de idade de cristalização magmática em torno de 619 Ma. (Hackspacher *et al.*, 2000). Na Bacia do Paranapanema foram reconhecidas em relação ao Subgrupo Lajeado a **Formação Serra da Boa Vista**, que é constituída por metarenito rítmico com estratificação cruzada cavalgante, intercalações de metassiltito e filito, de idade mesoproterozoica; e a **Formação Gorutuba** que compõe a unidade superior deste subgrupo e é formada basicamente por metassiltito, filito, turbiditos rítmicos, calciofilito, rochas calciossilicáticas e mármore. Também foram identificadas rochas terrígenas e carbonáticas nesta região descritas como pertencentes a “*Sequência Depositional Furnas-Lajeado*”, porém sem a identificação de quais são as formações geológicas definidas por Campanha *et al.* (1985, 1986).

Na Bacia do Paranapanema foi reconhecida no **Subgrupo Ribeira** apenas rochas da **Formação Iporanga**, que é constituída por metarritmitos finos, com intercalações de metarenitos, metaconglomerados e metabrechas polimíticas, indicando interpretações

paleoambientais diversificadas (tilitos, turbiditos distais, molassas, *wildflysh*, *debris flow* e turbiditos canalizados) (Campanha, 2002).

Para Gimenez Filho (1993), correlacionada aos metassedimentos do Grupo Itaiacoca e do Subgrupo Lajeado, a **Formação Córrego dos Marques** é constituída de uma sequência metassedimentar predominantemente pelítica e química, com intercalações restritas de metapsamitos.

No Pré-Cambriano, a granitogênese na região teria começado com o fechamento do Oceano Adamastor e consequente consumo da placa oceânica rumo ao Bloco Paranapanema a Noroeste, a qual intrude as rochas supracrustais do Domínio Apiaí (Prazeres Filho, 2000). Segundo o mesmo autor, esse evento seria o responsável por um grande período de encurtamento crustal e alojamento do **Complexo Três Córregos** entre 630 e 600 Ma, seguido da migração do processo magmático culminando na geração de um extensivo magmatismo granítico de alto K em 590 Ma, representado pelo **Complexo Granítico Cunhaporanga** (Janasi *et al.*, 2001).

O Complexo Três Córregos é constituído por granitóides, predominantemente hornblenda-biotita granitóides porfiroides e granitos leucocráticos microporfíricos a equigranulares, além de granitóides orientados, com comuns enclaves máficos de composição predominantemente diorítica potássica (Gimenez Filho *et al.*, 1995). O Complexo Cunhaporanga é representado principalmente por rochas graníticas e granito gnáissicas. Suas principais variedades litológicas compreendem biotita-monzogranitos, biotita-monzogranitos porfíricos, e anfibólio-biotita-monzogranitos (Prazeres Filho, 2000).

Segundo Ulbrich *et al.* (2009), o **Quartzito Serra das Pedras** é considerado correlato às rochas do Grupo Itaiacoca. Trata-se de mega-enclaves no Complexo Granítico Cunhaporanga, em escala mapeável, formado por metarenitos ricos em quartzo branco, metarcóseos e finos leitos intemperizados argiloso.

Posteriormente à granitogênese dos Complexos Graníticos Três Córregos e Cunhaporanga ocorreram intrusões por *stocks* graníticos mais tardios no Domínio Apiaí, tais como o **Granito Piedade**, o **Granito Sguário** e o **Granito Capão Bonito**, entre outros que se identificam na região da Bacia do Paranapanema, tendo assinatura do tipo A, oriundos de ambiente tardi a pós-orogênico, com idade entre 590 e 540 Ma (Prazeres Filho, 2005). São classificados como *stocks*, em sua maioria elípticos, com a direção do maior eixo concordante com a estruturação geral do Domínio Apiaí (NE-SW). São intrusivos tanto nas rochas metavulcanossedimentares do Domínio Apiaí (ex. Piedade) quanto nos complexos graníticos do Pré-Cambriano (ex. Capão Bonito e Sguário).

A **Bacia de Samambaia** e a Bacia Castro (**Grupo Castro**) têm suas formações e evoluções posicionadas entre o final dos processos tectônicos da aglutinação do Gondwana, ou seja, final da Orogenia Brasileira-Pan Africana e o início da formação da sinéclise Paraná. O arcabouço sedimentar destas bacias possui forma alongada, depositadas em calhas alinhadas às zonas de cisalhamento Brasileiras que reativaram de forma distensiva e rúptil após o final da orogenia. Desenvolveram-se principalmente entre o Cambriano e o Ordoviciano.

A **Bacia de Samambaia** é uma bacia eminentemente terrígena cuja sedimentação ocorreu entre 570-540 Ma (Teixeira, 2000). É constituída de metaconglomerados polimíticos e oligomíticos, metarenitos conglomeráticos e metarenitos arcoseanos a feldspáticos, sobrepostos às rochas metassedimentares do Grupo Açungui (Marini *et al.*, 1967).

O **Grupo Castro** é uma bacia com intenso vulcanismo ácido-intermediário, associado a rochas psamíticas imaturas com fácies pelíticas distais, com grau metamórfico muito baixo. Moro (1993) identificou uma associação vulcânica intermediária a ácida, seguida de associação sedimentar inferior (arcósios, siltitos,

lamitos e carbonatos, preenchendo canais subaquosos, fácies de planície de inundação, e fácies lacustres, localmente com contribuições vulcânicas), nova associação vulcânica ácida, e uma associação sedimentar superior (conglomerados de leques aluviais).

Posteriormente, durante o Jurássico-Cretáceo, as rochas do Supergrupo Açungui e os granitóides foram intrudidos por numerosos *diques básicos*, subverticais, orientados preferencialmente segundo N45W. Os diques são verticais a subverticais, sendo que alguns deles chegam a atingir quilômetros de comprimento, com espessuras de poucas a dezenas de metros. Estes diques frequentemente ocupam falhas, reativadas por esforços tracionais perpendiculares à direção costeira (Almeida, 1986). Apresentam idades em torno de 161 e 193 Ma (Guedes *et al.*, 2005) até 125-120 Ma (Renne *et al.*, 1992), em sua grande maioria de composição básica e natureza toleítica (Piccirillo & Melfi, 1988; Marques, 2001).

Do ponto de vista hidrogeológico, o Embasamento Cristalino na Bacia do Paranapanema pode ser classificado em relação à porosidade em duas categorias: domínio fraturado (rochas cristalinas) e o domínio cárstico (rochas carbonáticas). De acordo com ANA (2013), a região é formada pelos seguintes sistemas aquíferos:

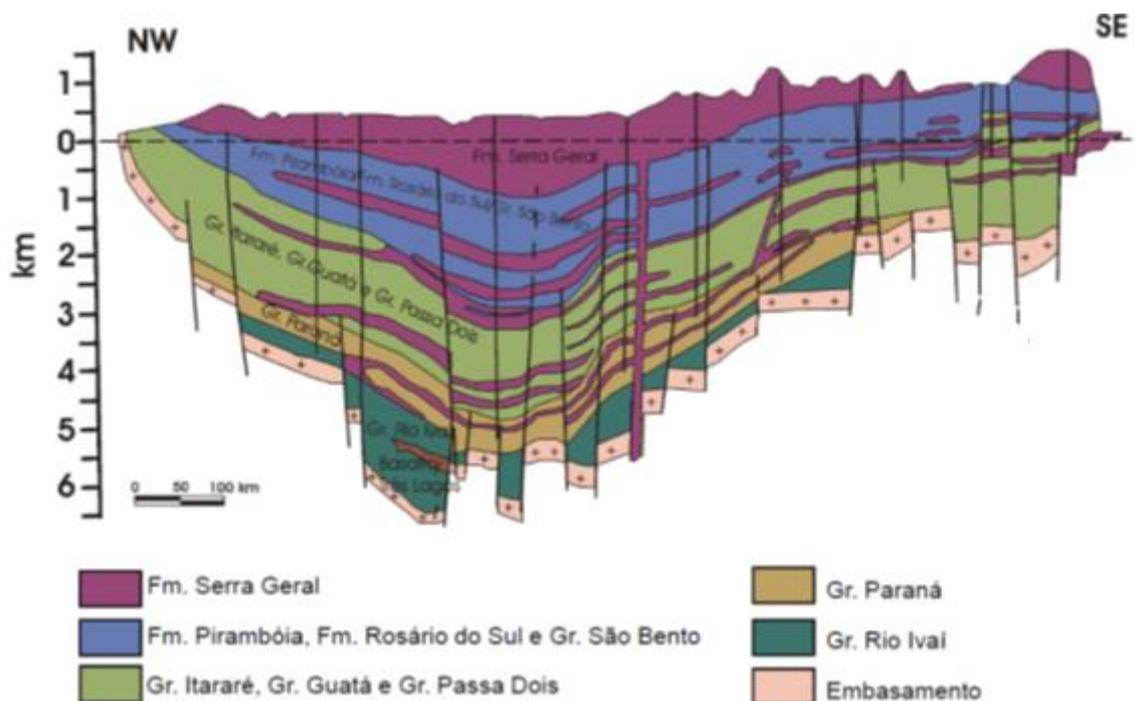
- *Fraturado Centro-Sul* - formado pelas rochas cristalinas da região, que compreendem as unidades metavulcanossedimentares: Complexo Metamórfico Apiaí-Mirim, Supergrupo Açungui [parte do Grupo Itaiacoca, Grupo Votuverava (Formações Gorutuba e Serra da Boa Vista do Subgrupo Lajeado; a Formação Iporanga do Subgrupo Ribeira); e parte da Formação Água Clara)], Formação Córrego dos Marques, Quartzito Serra das Pedras, Conglomerado Samambaia e Grupo Castro}, rochas graníticas (Complexo Granítico Três Córregos, Complexo Granítico Cunhaporanga, Gabro de Apiaí e granitos tardi pós-orogênicos) e diques básicos, como mostra a **Figura 1.1**.
- *Carste* - é representado pelas unidades carbonáticas que integram a Formação Água Clara e o Grupo Itaiacoca e pelas rochas das formações Bairro da Serra, Mina de Furnas e Passa Vinte do Subgrupo Lajeado (**Figura 1.1**).

Fernandes *et al.* (2009) descrevem que a espessura de manto inconsolidado foi avaliada para as rochas do Aquífero Fraturado Centro-Sul do Estado de São Paulo, sendo que as curvas de distribuição acumulada de capacidade específica mostram que o fator não exerce influência sobre a variação da produção de poços. Foi observado que as curvas dos poços localizados em áreas de classe manto espesso (> 15 metros) e dos poços na classe manto de espessura intermediária (5 a 15 metros) praticamente se sobrepõem. Com relação à classe manto pouco espesso ou ausente (< 5 metros), os resultados não são conclusivos devido à pequena quantidade de poços localizados nestas áreas.

Este mesmo trabalho mostra que no domínio fraturado e no domínio cárstico do Estado de São Paulo, com relação ao fator conjunto litológico, as curvas de distribuição acumulada de capacidade específica dos gnaisse (denominação simplificada para as rochas metamórficas de médio e alto grau), rochas metassedimentares de baixo grau e os diques básicos apresentam, em conjunto, a mediana em torno de 0,09 m<sup>3</sup>/h/m, entretanto com diferenças pequenas entre elas, enquanto os granitos apresentam produção ainda menor, com mediana de 0,04 m<sup>3</sup>/h/m. As rochas carbonáticas, por sua vez, apresentam potencial semelhante ao dos basaltos da Formação Serra Geral (Bacia Sedimentar do Paraná) e bastante superior aos demais tipos de rochas do embasamento. O potencial mais elevado das rochas carbonáticas é explicado por cavidades de dissolução destas rochas, como já amplamente conhecido.

### 1.3. ROCHAS DA BACIA SEDIMENTAR DO PARANÁ NA BACIA DO PARANAPANEMA

Com um preenchimento sedimentar predominantemente siliciclástico, a estratigrafia da Bacia Sedimentar do Paraná (**Figura 1.2**) é subdividida na literatura de diversos modos. Dentre os trabalhos publicados sobre a sua estratigrafia destaca-se a proposta por Milani (1997). O grande período temporal (450 a 65 Ma) de deposição dos sedimentos e da evolução da bacia como um todo representa um registro deposicional descontínuo e não homogêneo, compreendendo assim num conjunto de supersequências.



**Figura 1.2** - Seção geológica esquemática da Bacia do Paraná (Milani & Zalán, 1998).

Milani (1997) considera o arcabouço aloestratigráfico da Bacia Sedimentar do Paraná um conjunto de seis supersequências formadas por pacotes rochosos que representam intervalos temporais de evolução: Supersequência Rio Ivaí, Supersequência Paraná, Supersequência Gondwana I, Supersequência Gondwana II, Supersequência Gondwana III e Supersequência Bauru (**Figuras 1.3 e 1.4**). As três primeiras sequências caracterizam ciclos completos de transgressão e regressão marinhas ligadas as oscilações do nível relativo do mar no Paleozoico, enquanto as outras representam a deposição continental e rochas vulcânicas associadas (Milani *et al.*, 2007).

A **Supersequência Ivaí** compreende rochas de idade pré-devoniana e inclui no território brasileiro o **Grupo Rio Ivaí** (formações Alto Garças, Iapó e Vila Maria). Para Zalán *et al.* (1987), essas formações estão relacionadas ao primeiro grande ciclo transgressivo registrado na Bacia Sedimentar do Paraná, onde as águas do Oceano Pantalássico invadem o Continente de Gondwana.

A **Formação Alto Garças** foi formalizada por Assine *et al.* (1994) para designar a seção predominantemente arenítica que ocorre estratigraficamente acima do embasamento da Bacia Sedimentar do Paraná e abaixo da Formação Iapó. Esta formação não aflora na Bacia do Paranapanema.

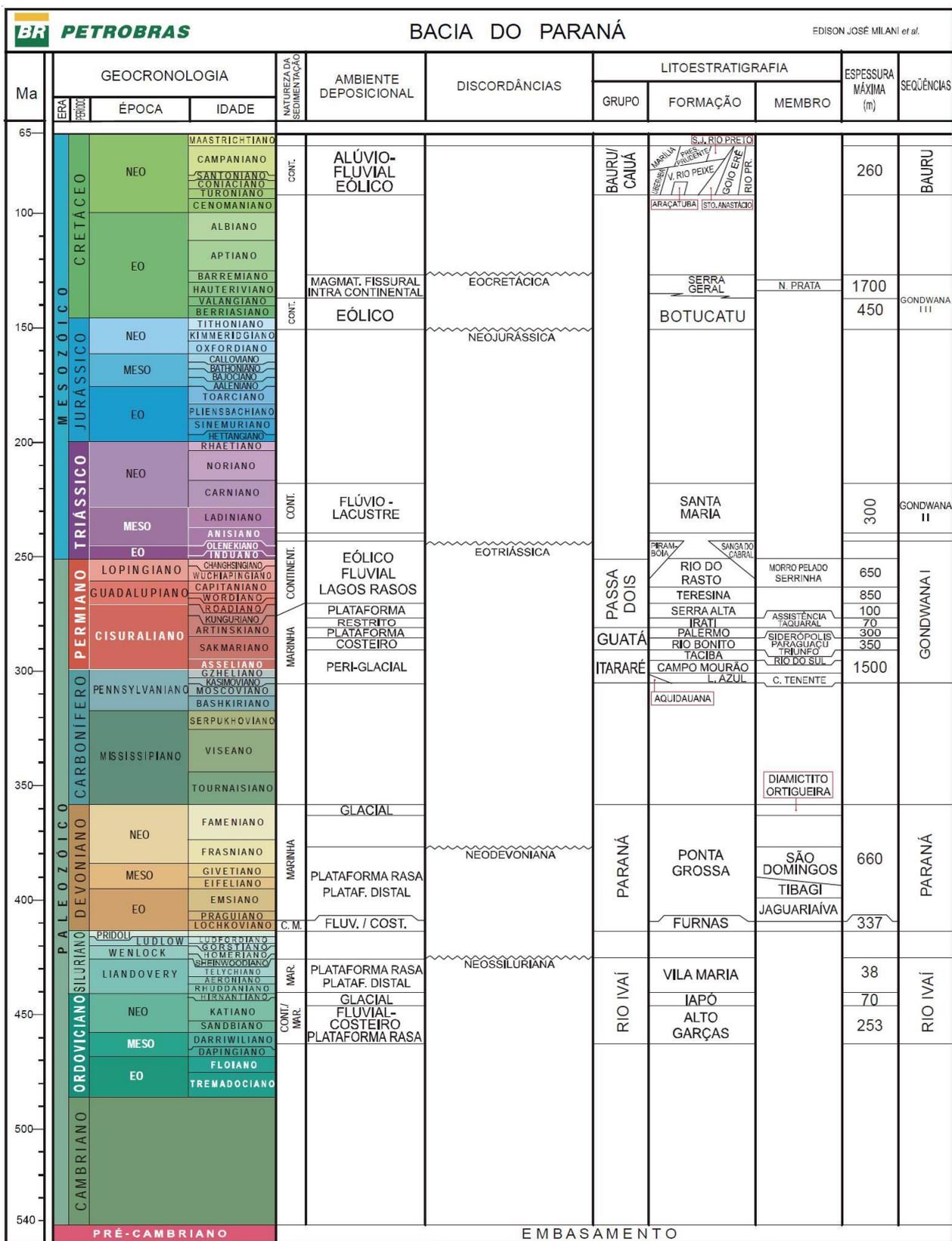
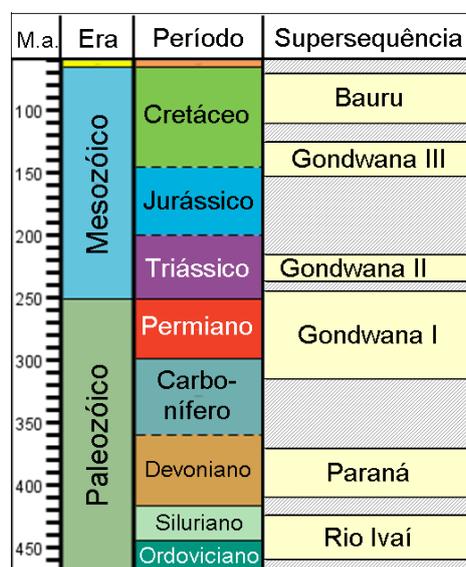


Figura 1.3 - Carta estratigráfica da Bacia Sedimentar do Paraná (Milani *et al.*, 2007).

A *Formação Iapó* constitui-se de diamictitos glaciais, arenitos e lamitos associados, sendo a única unidade do grupo verificada em afloramentos do flanco leste da Bacia Sedimentar do Paraná (Maack, 1950), onde se situa a Bacia Hidrográfica do Paranapanema. Pelo seu caráter descontínuo e sua pequena espessura na borda leste da bacia sedimentar, não pode ser representada em mapa na escala deste estudo; no entanto, segundo Assine (1996), a formação

estende-se, na base da Escarpa Devoniana, desde a altura da cidade de Ponta Grossa (PR) até o sul do Estado de São Paulo. Assine *et al.* (1998) afirma que nesta região são observados pequenos afloramentos nos municípios de Ponta Grossa (PR), Catanduvas (PR), Carambeí (PR), Castro (PR), Piraí do Sul (PR) e Itapeva (SP).



**Figura 1.4** - Coluna aloestratigráfica simplificada da Bacia Sedimentar do Paraná (modificado de Milani *et al.*, 2007).

A **Formação Vila Maria** foi formalizada por Faria (1982) para designar uma sucessão de folhelhos marinhos avermelhados com intercalações de bancos arenosos, que afloram no povoado homônimo, no Estado de Goiás (Moreira & Borghi, 1999). Quanto à idade, segundo Gray *et al.* (1985) e Grahn (1992), a Formação Vila Maria é datada do Eossiluriano com base em palinomorfos. Não aflora na Bacia do Paranapanema.

O **Basalto Três Lagoas** (Milani *et al.*, 1994) foi amostrado no poço epônimo, perfurado junto ao Rio Paraná na porção central da bacia, e constitui uma singular ocorrência de material ígneo associado aos sedimentitos Rio Ivaí. Sugere uma tectônica sin-sedimentar, provavelmente algum mecanismo de rifteamento que estaria então ligado à implantação da Bacia Sedimentar do Paraná (Milani & Ramos, 1998).

Retomada a subsidência, acumulou-se a **Supersequência Paraná**, um pacote caracterizado por uma notável uniformidade faciológica em toda sua grande área de ocorrência. Esta se encontra representada por sedimentos de idades devonianas, aos quais são atribuídos por Milani (1997) ao **Grupo Paraná**: um pacote arenoso inferior denominado de **Formação Furnas** e um pacote pelítico a ele sobreposto, denominado de **Formação Ponta Grossa**.

A **Formação Furnas** é essencialmente psamítica, com geometria tabular e espessura em superfície de aproximadamente 250 metros no *Canyon* do Guartelá (Estado do Paraná), na porção sul da Bacia Hidrográfica do Paranapanema. Segundo Vieira (1973), de Sengés (PR) para leste, sua espessura diminui gradualmente até o desaparecimento total na cidade de Itapeva (SP). É caracterizada por sedimentos conglomeráticos e arenitos conglomeráticos na base, seguidos por um arenito típico médio a grosso, passando a arenitos finos e siltitos argilosos no topo. Essa sucessão de fácies, num arranjo transgressivo, sugere um afogamento progressivo da plataforma arenosa que culminaria em deposição de sedimentos fracamente marinhos, iniciando-se assim a deposição pelítica da Formação Ponta Grossa (Milani, 1997).

Na porção paranaense da Bacia do Paranapanema, Melo *et al.* (2011) observaram que a evolução diagenética dos quartzo-arenitos da Formação Furnas foi bastante complexa. Minerais autógenos (principalmente caulinita, mas também illita, carbonatos, clorita, albita e anatásio) incluem principalmente o quartzo, sendo estes responsáveis por uma intensa cimentação e consequente porosidade média baixa (9%). Segundo a CPRM (2012), a porosidade primária dos arenitos da Formação Furnas é baixa devido a esta cimentação. Por isso, o “Aquífero Furnas” é,

frequentemente, tratado como do tipo fraturado. Uma particularidade destes arenitos refere-se à identificação de feições cársticas, devido à tendência de dissolução do cimento caulínico e consequente liberação dos grãos de quartzo (Melo & Giannini, 2007). Essa característica torna a porosidade dos arenitos mais elevada e faz com que seja comum a ocorrência de dolinas, lagoas, sumidouros, fendas, etc.

A **Formação Ponta Grossa** é uma unidade constituída por rochas de granulação fina (folhelhos e siltitos), cujas condições de sedimentação em ambiente de plataforma marinha são comprovadas por uma grande variedade de micro e microfósseis. Na Bacia do Paranapanema, em superfície, a espessura média é de aproximadamente 200 metros. Segundo Vieira (1973), as maiores espessuras são encontradas na região do Arco de Ponta Grossa. Ao sul deste Arco apresenta espessura aproximada de 100 metros, aumentando gradativamente até 280 metros na porção central. Daí para nordeste diminui progressivamente até desaparecer ao sul de Sénges (PR). Por sua vez, a Formação Ponta Grossa também apresenta uma subdivisão litoestratigráfica, que foi formalizada por Lange & Petri (1967). Estes autores subdividiram a unidade em três membros que, da base para o topo, foram nomeados Jaguariaíva, Tibagi e São Domingos. Em termos litológicos, o Membro Jaguariaíva (inferior) e o São Domingos (superior) são predominantemente formados por folhelhos acinzentados, as vezes betuminosos, com raras intercalações e lentes síltico/arenosas. Já o Membro Tibagi (intermediário) é constituído por arenitos de granulometria muito fina ou sílticos.

De acordo com Milani (1997), após uma lacuna na história tectono-sedimentar da Bacia Sedimentar do Paraná, ou seja, a ocorrência de uma discordância neodevoniana (“pré-Itararé”) que representa um hiato de cerca de 70 Ma, houve com a migração do Gondwana para norte, a implantação de sedimentação carbonífera, representado pela **Supersequência Gondwana I**, que materializa um ciclo transgressivo-regressivo completo, fruto da invasão e posterior saída do Oceano Pantalássico sobre o interior do Gondwana. As unidades depositadas apresentam características sedimentares que indicam uma variação nas condições deposicionais, desde uma marcante influência glacial (Neocarbonífero) até um amplo e árido interior continental com domínio de campos de dunas eólicas (Mesozoico). Engloba o maior volume de sedimentos da bacia com espessura média de 2,5 km.

Na Bacia do Paranapanema, a Supersequência Gondwana I é constituída pelo Grupo Itararé, Grupo Guatá (Formação Rio Bonito e Formação Palermo), Formação Dourados, Grupo Passa Dois (Formações Irati, Serra Alta, Teresina e Rio do Rasto) e Formação Pirambóia.

O **Grupo Itararé** guarda o mais importante registro de glaciação da história da Terra, desenvolvido em todo o Gondwana. Resumidamente, o Grupo Itararé é formado por sedimentos de idade permo-carbonífera, bastante expressivos na Bacia do Paraná. Constitui-se por arenitos finos a grossos avermelhados, esbranquiçados e amarelados, e predominantemente siltitos, ritmitos e folhelhos cinzentos, varvitos, diamictitos com estratificações e laminações convolutas, paralelas, cruzadas e onduladas, depositados em ambientes glaciais (fluviais, litorâneos e plataformais) (Moro & Brito Neves, 2004).

Na Bacia do Paranapanema, o Grupo Itararé está representado pelas três formações definidas por França & Potter (1988): Lagoa Azul, Campo Mourão e Taciba, porém não são individualizadas no mapa da Figura 1, uma vez que não existem trabalhos com a individualização das formações que integram o Grupo Itararé. Vieira (1973) descreve que o Grupo Itararé nesta região tem sua espessura variando de 450 metros em sua porção sul (flanco sul do Arco de Ponta Grossa) até quase 1.300 metros no nordeste paranaense, próximo da divisa com São Paulo, e daí diminuindo até cerca de 1.000 metros no Estado de São Paulo.

O **Grupo Guatá** é constituído pela **Formação Rio Bonito** e **Formação Palermo**. Representa o início do ciclo de deposição pós-glacial, de idade permiana.

A **Formação Rio Bonito** foi depositada num ambiente costeiro, formado por deltas, baías e estuários com planícies de marés, ilhas de barreira e plataforma marinha rasa. Na área da Bacia do Paranapanema, é pouco expressiva do ponto de vista de exposição. Aflora especialmente no extremo sul do território da bacia analisada, no Estado do Paraná, numa região elevada sobre a

qual se situa a cidade de Teixeira Soares (PR), a sudoeste de Ponta Grossa (PR). Nesta região possui menos de 50 metros de espessura, aflorando basicamente seu membro basal (Membro Triunfo), composto por arenitos grossos, imaturos textural e granulometricamente dispostos em bancos tabulares e com ocorrência de delgados níveis siltosos ricos em carvão (MINEROPAR, 2007). Na região paulista e norte paranaense da Bacia do Paranapanema, a exposição da Formação Rio Bonito ainda é menos expressiva. Segundo Vieira (1973), na porção sul da área da bacia em estudo, a espessura da Formação Rio Bonito é da ordem de 130 metros, e daí para o norte diminui progressivamente para 90 metros sobre o Arco de Ponta Grossa e a 45-50 metros ao norte de Telêmaco Borba (PR), mantendo-se com este valor na direção nordeste.

A **Formação Palermo** representa um estágio marinho transgressivo a âmbito de bacia que recobre totalmente aos antigos depósitos deltaicos e transgride estratigraficamente em direção às bordas da Bacia Sedimentar do Paraná sobre as unidades de idade mais antiga (Perinotto & Fúlfaro, 2001). É formada por siltitos e siltitos arenosos, cinzentos a esverdeados, intensamente bioturbados e com estratificação cruzada de pequeno porte. Trata-se de um pacote litológico muito homogêneo, em cuja base aparecem arenitos muito finos. As suas características sedimentares acusam um ambiente de deposição marinho de plataforma rasa, abaixo da zona de influência das ondas, mas localmente sob a ação de correntes. Ocorre com até 95 metros de espessura no sul da Bacia do Paranapanema até o Arco de Ponta Grossa, e cerca de 55 metros na porção nordeste do Paraná. Na porção paulista da Bacia do Paranapanema não atinge 50 metros de espessura (Santana, 2011).

O **Grupo Passa Dois** representa o domínio de sistemas continentais na bacia de acumulação que causaram o assoreamento da bacia remanescente no período Permiano. É constituído pelas formações Irati, Serra Alta, Teresina e Rio do Rasto (Schneider *et al.*, 1974).

A **Formação Irati** é constituída por argilitos e folhelhos intercalados, de cores cinza-escuro a preto, pirobetuminosos e associados a níveis de calcários dolomíticos e margosos, bastante silicificados em superfície. Esta formação tem sua origem marinha de águas rasas, registrada no rico conteúdoossilífero. Para Vieira (1973), na Bacia do Paranapanema, esta formação não ultrapassa 35 metros de espessura. Na porção paranaense da mesma bacia, a divisão das camadas pirobetuminosas é bem demarcada, ao passo que no estado de São Paulo observa-se um aumento na deposição dos carbonatos e uma diminuição na espessura das camadas de folhelho.

A **Formação Serra Alta** é um pacote de folhelhos cinza-escuros finamente laminados, produto de decantação de argila em um contexto marinho de baixa energia (Gama Junior, 1979) e interpretados como os depósitos relativos ao “afogamento” do “Golfo Irati”. Na realidade é a última incursão marinha importante documentada na Bacia Sedimentar do Paraná. Na Bacia do Paranapanema aflora desde sua porção sul, no Estado do Paraná, até a estrada de Itapetininga (SP) - Guareí (SP). Vieira (1973) estima sua espessura em 50 metros sobre o Arco de Ponta Grossa e 60 metros no nordeste do Paraná. Daí decresce a partir das proximidades de Itaí (SP), atingindo 15 metros.

Para Holz *et al.* (2010), a **Formação Teresina** corresponde a um sistema deposicional costeiro e de costa-afora dominado por tempestades. É formada por siltitos, argilitos e folhelhos silticos, folhelhos pirobetuminosos, localmente em alternância rítmica com calcários dolomíticos, silicificados e restritos níveis conglomeráticos.

Vieira (1973) descreve que na Bacia do Paranapanema, enquanto no Paraná a Formação Teresina apresenta cores cinza ou verde, à medida que se adentra no Estado de São Paulo, toma coloração avermelhada, sendo ali denominada de Formação Corumbataí. Sua espessura varia de 340 metros na região central do Arco de Ponta Grossa, no município de Ortigueira (PR), até espessuras inferiores a 120 metros no nordeste paranaense, entre Joaquim Távora (PR) e Carlópolis (PR). Daí para leste observa-se ligeiro espessamento para 130-140 metros, na região de Angatuba (SP) e Itapetininga (SP).

A **Formação Rio do Rasto** compreende sucessão com tendência geral granocrescente ascendente (Holz *et al.*, 2010), ou seja, registra mudança marcante no tipo de sedimentação que

encerra o ciclo sedimentar Passa Dois, em que esta passa de predominantemente síltico-argilosa no Permiano para arenosa no Triássico-Jurássico (Formações Pirambóia e Botucatu) (Riccomini *et al.*, 1984). Para Milani *et al.* (2007), trata-se de um complexo progradacional de *red beds* incluindo lobos deltaicos, pelitos lacustres, arenitos eólicos e depósitos fluviais.

Na Bacia do Paranapanema, Vieira (1973) descreve que a espessura da Formação Rio do Rasto é cerca de 150 metros, ao sul de Santo Antônio da Platina (PR) e gradualmente é reduzida até desaparecer totalmente em Taguaí (SP) e Itai (SP), ou seja, desaparecendo completamente a partir deste ponto no sul do Estado de São Paulo.

A **Formação Pirambóia** é resultado de depósitos fluviais e eólicos compondo uma cunha que se adelgaça para sudoeste no sentido da porção paranaense da Bacia Sedimentar do Paraná (Milani *et al.*, 2007). Para Garcia *et al.* (2011) esta é constituída por arenito avermelhado e esbranquiçado, fino a médio, localmente conglomerático, apresentando estratificações cruzadas de médio a grande porte, tendo sido depositada sob condições continentais em ambiente flúvio-eólico associado, localmente, a lagos rasos. Para Giacomeli *et al.* (2009), o processo de silicificação aparece apenas localmente na Formação Pirambóia. Na região oeste da Bacia do Paranapanema, ao estudar poços dos municípios de Presidente Prudente (SP) e Presidente Epitácio (SP), Gesicki (2007) relata a existência de horizontes de cimentação de calcita no domínio superior da Formação Pirambóia e a cimentação de analcima no domínio inferior da mesma formação, próximo à transição com o Grupo Passa Dois, refletindo no excesso de sódio nas águas destes poços.

A espessura da Formação Pirambóia é muito variável, desde alguns metros em afloramento até 276 metros em subsuperfície na Bacia do Paranapanema (Massoli, 2007). Por meio de dados apresentados em Gesicki (2007), é possível observar que nesta bacia, a espessura tem um adelgaçamento de W para E. Em alguns municípios foram avaliadas as espessuras, como: Pedrinhas Paulista (SP) - 276 metros; Presidente Prudente (SP) - 232 metros; Pitangueiras (PR) - > 100 metros; Paraguaçu Paulista (SP) - 75 metros; São Jerônimo da Serra (PR) - 20 metros; Guareí (SP) - < 20 metros; Angatuba (SP) - < 20 metros. É na região do Pontal do Paranapanema, onde estão as maiores profundidades de soterramento, de até 1.900 metros abaixo da superfície.

A **Supersequência Gondwana II** não ocorre na Bacia do Paranapanema e corresponde a Formação Santa Maria de ocorrência localizada no Estado do Rio Grande do Sul. Trata-se da deposição no intervalo do Meso ao Neotriássico e é caracterizada pela presença de rochas sedimentares de ambiente continental (Milani, 1997).

Na continuidade do Mesozoico, prosseguiram as condições de erosão em ampla escala ligadas à abrasão eólica do substrato no interior do Gondwana, refletindo-se na Bacia Sedimentar do Paraná como a mais pronunciada lacuna de seu registro estratigráfico (Milani *et al.*, 2007). A partir do final do Jurássico, inicia-se a deposição da **Supersequência Gondwana III**, representada pelos sedimentos eólicos de ambiente árido da Formação Botucatu e posteriormente, no Eocretáceo, pelas rochas vulcânicas da Formação Serra Geral. Neste contexto, estas duas formações geológicas formam o **Grupo São Bento** (Zalán *et al.*, 1987).

A **Formação Botucatu** é constituída por arenitos médios a finos de elevada esfericidade e aspecto fosco róseos, que exibem estratificação cruzada tangencial, de médio a grande porte, caracterizando bem o ambiente eólico. Dominantemente é constituída por monótonos e amplos campos de dunas e interdunas secas (Rosa Filho *et al.*, 2003). Zonas silicificadas também são comuns nos arenitos da Formação Botucatu principalmente na porção superior próximo ao contato com as vulcânicas da Formação Serra Geral (Paraguassu, 1968). Para Giacomeli *et al.* (2009), o processo de silicificação aparece de forma marcante no topo da Formações Botucatu.

Em relação à espessura da Formação Botucatu na Bacia do Paranapanema, por meio de dados apresentados em Gesicki (2007), é possível observar que a espessura da Formação Botucatu tem um adelgaçamento de NE para SW. Em alguns municípios foram avaliadas as espessuras, como: Paraguaçu Paulista (SP) - 201 metros; Presidente Prudente (SP) - 138 metros; Pitangueiras (PR) - 100 metros; Piraju (PR) - >64 metros; São Jerônimo da Serra (PR) - 50 metros; Águas de Santa Bárbara (SP) - > 16 metros.

A Formação Botucatu, como as demais unidades litoestratigráficas do leste da Bacia Sedimentar do Paraná, possui mergulho para oeste, no sentido da calha do Rio Paraná. É na região do Pontal do Paranapanema, onde estão as maiores profundidades de soterramento, de até 1.500 metros abaixo da superfície (Gesicki, 2007).

A **Formação Serra Geral** é o resultado de um evento vulcânico ocasionado pela ruptura do Continente Gondwana e o início da evolução do Oceano Atlântico Sul. Representa o mais volumoso episódio de vulcanismo intracontinental do planeta, cobrindo cerca de 75% de toda a Bacia Sedimentar do Paraná.

Na Bacia do Paranapanema, ocorrem essencialmente os basaltos da unidade básica-intermediária, constituídos por plagioclásio (essencialmente labradorita), piroxênio (augita e piegonita), olivina (principalmente sob a forma de pseudomorfos) e os acessórios magnetita e ilmenita. São das fácies Pitanga e Paranapanema (Machado *et al.*, 2007), distinguíveis apenas do ponto de vista geoquímico. Na região de Nova Santa Bárbara (PR) e São Jerônimo da Serra (PR) também ocorrem litotipos vulcânicos ácidos das fácies Palmas (normalmente afíricos) e Chapecó (predominantemente porfíricos).

Vieira (1973) descreve que na Bacia do Paranapanema a Formação Serra Geral nas bordas do derrame (a leste da bacia) alcança espessuras superiores a 300 metros, a qual aumenta de forma irregular em direção W, alcançando espessuras superiores a 1.500 metros em Presidente Epitácio (SP) e atingindo quase 2.000 metros na região do Pontal do Paranapanema. Northfleet *et al.* (1969), por meio do estudo poços estratigráficos em alguns municípios, mostraram as seguintes espessuras desta formação: Echaporã (SP) - 799 metros; Paraguaçu Paulista (SP) - 910 metros; e Taciba (SP) - 1.249 metros.

Milani *et al.* (2007) descreve que cessadas as atividades vulcânicas e promovidos os ajustes isostáticos, definiu-se uma depressão sobre o pacote basáltico onde, no Neocretáceo, o material siliciclástico proveniente de alteração e erosão de rochas paleozoicas e pré-cambrianas expostas nas bordas da bacia alcançou o interior após erosão e transporte por centenas de quilômetros. Esta sedimentação, a **Supersequência Bauru**, ocorreu em condições semiáridas, mais úmidas nas margens (Grupo Bauru) e desérticas em seu interior (Grupo Caiuá).

O **Grupo Caiuá** reúne arenitos e corresponde a trato de sistemas eólicos interior do Deserto Caiuá (Fernandes, 2006): depósitos de complexos de dunas de cristas sinuosas eólicas de grande porte (Formação Rio Paraná); depósitos periféricos, de dunas eólicas de porte moderado, de cristas sinuosas, e interdunas úmidas/aquosas (Formação Goio-Erê); e depósitos de lençóis de areia, em extensas e monótonas planícies desérticas (Formação Santo Anastácio). Este grupo tem as suas maiores espessuras conhecidas na região noroeste do Paraná e Pontal do Paranapanema, com valores máximos entre 250 e 270 metros no Paraná (Maack, 1941) e 150 a 200 metros em São Paulo (Almeida *et al.*, 1981), sendo esta porção provavelmente, a área central do antigo Deserto Caiuá (Fernandes & Coimbra, 2000).

Para Milani *et al.* (2007), o **Grupo Bauru** corresponde a depósitos de trato de sistemas de clima semiárido, formado por leques aluviais marginais, lençóis de areia atravessados por sistemas fluviais efêmeros e zona endorrêica paludial, que alimentaram o deserto interior correspondente ao Grupo Caiuá.

Na Bacia do Paranapanema, o Grupo Bauru apresenta-se de forma pouco expressiva no Estado do Paraná (por exemplo, município de Santo Inácio), tendo sua presença basicamente na porção paulista, que se restringe as formações Vale do Rio do Peixe (camadas de espessura submétrica de estruturação tabular típica de arenitos intercalados com siltitos ou lamitos arenosos); Presidente Prudente (arenitos muito finos a finos predominantes e lamitos arenosos); e Marília (estratos tabulares maciços métricos de arenitos finos a médios, imaturos, com frações grossas e grânulos em quantidades subordinadas). Nesta última formação ocorre abundância de cimento calcífero. A intensidade variável da cimentação deste arcabouço litológico conduz a variações de permeabilidade que o tornam heterogêneo e anisotrópico.

Além das rochas relacionadas à Bacia Sedimentar do Paraná ocorrem ainda sedimentos cenozoicos, sobretudo representados por depósitos aluviais longo das calhas dos principais rios e também exposições ocasionais de rochas do embasamento da bacia.

Do ponto de vista hidrogeológico, a Bacia Sedimentar do Paraná na Bacia do Paranapanema pode ser classificada em relação à porosidade em duas categorias: domínio poroso (rochas sedimentares) e o domínio fraturado (rochas vulcânicas). Da base para o topo, de acordo com ANA (2013), a região é formada pelos seguintes sistemas aquíferos, conforme mostra a **Figura 1**:

- *Aquífero Furnas* - formado pelas rochas sedimentares da Formação Furnas;
- *Aquífero Ponta Grossa* - é representado pelas rochas sedimentares da Formação Ponta Grossa;
- *Aquífero Itararé* - é representado pelas rochas sedimentares do Grupo Itararé;
- *Aquífero Rio Bonito* - composto pelas rochas sedimentares da Formação Rio Bonito;
- *Aquífero Palermo* - formado pelas rochas sedimentares da Formação Palermo;
- *Aquífero Passa Dois* - é formado pelas rochas sedimentares de granulação fina do Grupo Passa Dois (Formação Irati, Formação Serra Alta, Formação Teresina e Formação Rio do Rasto);
- *Sistema Aquífero Guarani* - formado pelas rochas sedimentares da Formação Pirambóia e da Formação Botucatu;
- *Sistema Aquífero Serra Geral* - formado pelas rochas vulcânicas da Formação Serra Geral, sendo o único representante do domínio fraturado na Bacia Sedimentar do Paraná;
- *Sistema Aquífero Bauru-Caiuá* - formado pelas rochas sedimentares da Formação Caiuá e Formação Bauru.

#### **1.4. SHALE GAS DA BACIA SEDIMENTAR DO PARANÁ NA BACIA DO PARANAPANEMA**

Segundo Monteiro (2013), nos sistemas petrolíferos ou reservatórios convencionais, encontrados com mais frequência, o hidrocarboneto é gerado em uma rocha (**rocha geradora**) e, a partir desta, migra por fraturas/falhas para uma rocha porosa e permeável (**rocha reservatório**) até a armadilha (**trapa**), que é o conjunto da rocha reservatório e a rocha impermeável que funciona como uma barreira e impede a passagem do hidrocarboneto durante o seu deslocamento (**rocha selante**). Neste sentido, entende-se como um sistema petrolífero convencional aquele que engloba rocha geradora, rocha reservatório, rocha selante e trapa (Jácomo, 2014).

Entretanto, em alguns casos, o óleo e o gás, quando produzidos, acabam aprisionados em rochas com características diferentes dos reservatórios convencionais. São chamados de recursos não convencionais os hidrocarbonetos que se encontram aprisionados nos poros das rochas reservatórios pouco permeáveis, dificultando dessa forma a movimentação do fluido ou gás contido nelas. Relaciona-se às características do reservatório que tornam seu entendimento mais complexo e sua exploração econômica significativamente mais cara do que no caso dos reservatórios convencionais. Dessa forma, dada a tecnologia e o nível de informação existentes há uma maior dificuldade atrelada à sua extração, sendo requerida uma tecnologia mais avançada e cara (Santos & Coradesqui, 2013).

De acordo com Virgens (2011), os principais tipos de reservatórios não convencionais são: (i) reservatórios de metano em camadas de carvão (*coalbed metano*); (ii) reservatórios em arenitos com baixa permeabilidade. (*tight sands*); (iii) hidratos de metano (*methane hydrates*); (iv) reservatórios de óleo pesado (*heavy oil*); e (v) reservatórios de gás em folhelhos (*shale gas*).

Durante a 12ª Rodada de Licitações da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), em novembro de 2013, cujo objeto foi a outorga de contratos de concessão para o exercício das atividades de exploração e produção de petróleo e gás natural (reservatórios convencionais e não convencionais) foram arrematados 04 blocos exploratórios na

Região da Bacia do Paranapanema (Setor SPAR-CN, Blocos 198, 218, 219 e 220). Do ponto de vista econômico, o interesse principal das concessionárias por esta área é, sobretudo, referente aos seus recursos não convencionais, em especial pelo *shale gas* (gás de folhelho) devido às características geológicas regionais.

O *shale gas* é o gás gerado a partir de folhelhos (rocha geradora) e que não sofreu migração para rochas reservatórios, tendo ficado aprisionado na matriz da rocha geradora (Jácomo, 2014).

O folhelho (*shale*) é a rocha sedimentar argilosa mais abundante na Terra. É uma rocha sedimentar formada por fração granulométrica argila depositada por decantação em ambientes de baixa energia, constituindo camadas com laminações paralelas que eventualmente podem conter gás confinado no espaço entre elas (Carestiato, 2014). Entretanto, somente o folhelho cujo processo deposicional se deu em ambiente anóxico, pode representar potencial para acumulação de gás, pois para que haja a ocorrência de hidrocarboneto, a matéria orgânica geradora deverá acumular-se sem sofrer oxidação (Virgens, 2011).

Essas rochas possuem um alto conteúdo de matéria orgânica e uma permeabilidade muito baixa. Para efeito de comparação, um reservatório convencional de arenito possui permeabilidade na faixa de 0,5 mD a 20 mD, enquanto que a permeabilidade nos reservatórios de *shale gas* é na faixa de 0,000001 mD a 0,0001 mD (ou 1 a 100 nanoDarcies) (King, 2012). Portanto, para viabilizar a exploração e produção comercial desse gás, torna-se necessário aumentar a permeabilidade da rocha. Nesse sentido, dois avanços tecnológicos, utilizados simultaneamente, foram fundamentais: a estimulação pelo fraturamento hidráulico e a perfuração de poços direcionais (Santos & Coradesqui, 2013).

No caso especial do *shale gas*, sabe-se que, o que representa hoje a rocha reservatório foi na verdade a rocha geradora durante o processo de maturação da matéria orgânica. Além de ser a geradora e o próprio reservatório constitui ainda características de rochas selantes, configurando assim um sistema petrolífero totalmente independente (Jarvie *et al.*, 2003).

Cabe aqui dois destaques sobre a geração de gás natural: (i) independentemente da origem geológica (reservatório convencional ou não convencional), o gás natural gerado é o mesmo; e (ii) o tipo de hidrocarboneto gerado será função da matéria orgânica originária e da intensidade do processo termoquímico atuante sobre esta matéria orgânica. Quando proveniente de zooplânctons e fitoplânctons de origem marinha ou lacustre, maior é a probabilidade de geração de hidrocarboneto líquido. Quando proveniente de matéria orgânica de origem vegetal (sobretudo lenhosa) maior probabilidade de formação de hidrocarboneto gasoso (Thomas, 2004).

Em relação à Bacia Sedimentar do Paraná, estudos geológicos e geoquímicos realizados ao longo das últimas décadas, como Zalán *et al.* (1991) e Milani *et al.* (2007), levaram a identificação de dois intervalos como os principais geradores de hidrocarbonetos: os folhelhos da Formação Ponta Grossa (Devoniano) e os da Formação Irati (Permiano).

De acordo com Silva (2007), a Formação Ponta Grossa é constituída por folhelhos que apresentam teor de carbono orgânico entre 0,1 a 3%, com média 0,5%, com predominância de matéria orgânica de origem marinha e/ou mista na porção oeste da bacia, e de origem continental na parte leste. O valor potencial gerador de hidrocarbonetos ( $S_2$ ) atinge um máximo de 6,6 kg HC/t de rocha e baixos valores determinados para o índice de hidrogênio (IH) decorrentes do elevado nível de evolução térmica. A matéria orgânica é do tipo II (algas marinhas ou lacustres e matéria orgânica de origem continental, como pólenes e esporos).

A Formação Irati apresenta folhelhos muito ricos em matéria orgânica amorfa, propiciando o fenômeno de geração de hidrocarbonetos líquidos. Estudos geoquímicos revelam que o teor de carbono orgânico varia entre 0,1 a 23%, com média 2%. O valor potencial gerador de hidrocarbonetos ( $S_2$ ) atinge valores de 100-200 kg HC/t de rocha. Análises de petrografia orgânica e índices de hidrogênio mostram predominância de matéria orgânica tipo I (algas marinhas ou lacustres). De modo geral, a Formação Irati apresenta baixo grau de evolução térmica, com exceção do depocentro da Bacia Sedimentar do Paraná, onde pode ter alcançado o início da janela

de geração, além das regiões onde sofreram o efeito térmico devido às intrusões ígneas (Silva, 2007).

Uma terceira unidade geológica da Bacia Sedimentar do Paraná, os folhelhos da Formação Vila Maria (Siluriano) também merecem ser interpretados como uma possível rocha geradora para o *shale gas*, porém com menor ênfase em relação às duas anteriores, principalmente porque não existem estudos sobre seu valor potencial gerador de hidrocarbonetos (ANP, 2013).

Por meio de perfis compostos de poços perfurados pela Petrobras na região, foi possível neste trabalho gerar as seções estratigráficas das **Figuras 1.5 e 1.6**, onde estão posicionados os 04 blocos exploratórios da Bacia do Paranapanema (Setor SPAR-CN, Blocos 198, 218, 219 e 220).

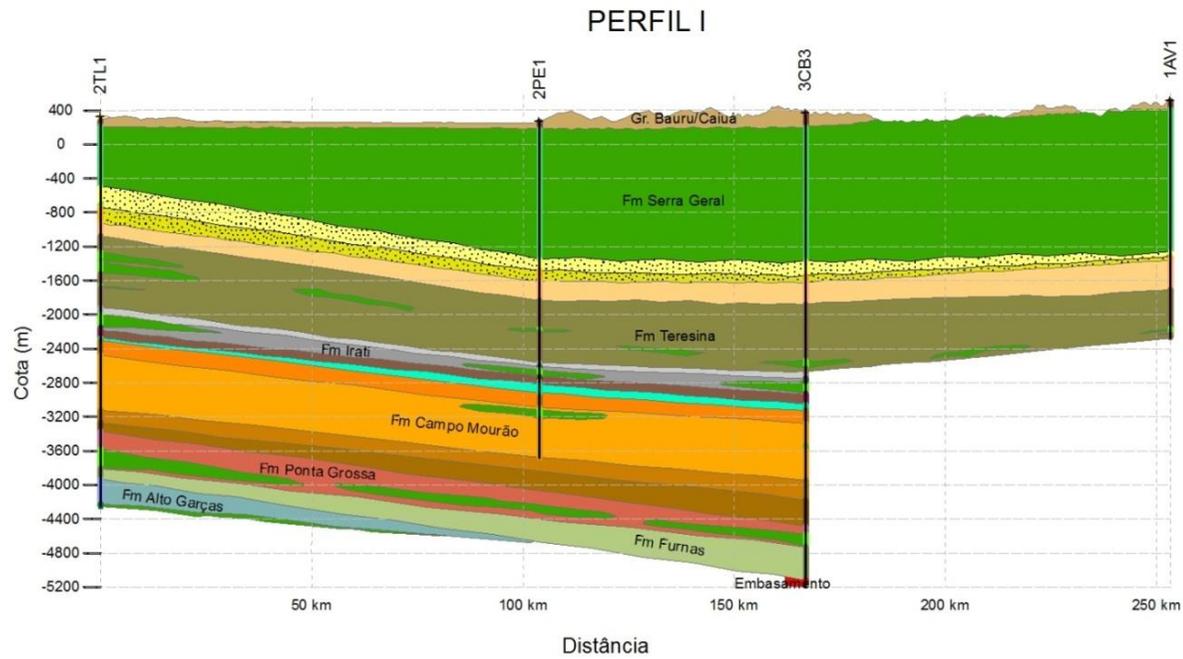
Considerando-se a análise destas seções estratigráficas (**Figuras 1.5 e 1.6**), a Formação Ponta Grossa tem sua maior espessura identificada em 411 metros, no Poço 2TB-0001-SP, na região de Taciba/SP, no Pontal do Paranapanema. A menor espessura encontrada foi no município de Tarabaí/SP, no Poço 1TI-0001-SP, com 186 metros. As suas profundidades crescem de norte para sul (**Figura 1.5**) e de leste para oeste (**Figura 1.6**), cuja maior profundidade (4.867 metros) ocorre no Poço 3CB-0003-SP, em Mirante do Paranapanema/SP, no Pontal do Paranapanema; e a menor é registrada em 3.600 metros, no limite leste do Bloco 220.

As seções estratigráficas das **Figuras 1.5 e 1.6** mostram que nesta região, a Formação Ponta Grossa é sotoposta pelos arenitos do Membro Cuiabá Paulista da Formação Lagoa Azul (Grupo Itararé). Este membro varia sua espessura desde aproximadamente 100 até 300 metros. Neste sentido, a Formação Ponta Grossa tem seu contato superior com o Aquífero Itararé que é formado pelas formações Lagoa Azul (membros Cuiabá Paulista e Tarabaí), Campo Mourão e Taciba.

É importante salientar que os arenitos do Membro Cuiabá Paulista da Formação Lagoa Azul são os piores reservatórios do Aquífero Itararé, pois apresenta alto teor de matriz (~41%) (Morenghi, 2007). Outro aspecto a ser considerado é que o Sistema Aquífero Itararé posiciona-se nesta região em grandes profundidades, entre 2.200 a 3.200 metros. Aquíferos mais produtivos e importantes para o abastecimento local, como o Bauru-Caiuá (superfície) e o Guarani (entre 800 e 1.400 metros de profundidade), são muito mais rasos e conseqüentemente com custos muito menores para serem explorados. ANP (2013) descreve que os folhelhos intraformacionais da Formação Rio Bonito e siltitos da Formação Palermo servem como rochas selantes deste sistema, reduzindo os riscos de impacto ambiental em relação às águas dos aquíferos superiores durante as possíveis atividades para a exploração de *shale gas*, excetuando-se quando da presença de descontinuidades pré-existentes que podem ser reativadas e daquelas que podem ser geradas com o *fracking* e permitirem a passagem de fluidos e gás até os aquíferos.

Na região dos 04 blocos exploratórios da Bacia do Paranapanema (Setor SPAR-CN, Blocos 198, 218, 219 e 220), a Formação Irati tem sua maior espessura em seu extremo oeste, na região do Pontal do Paranapanema, atingindo até cerca de 240 metros de espessura. Em direção leste, estas espessuras se reduzem bastante. Para Vieira (1973), na maior parte da Bacia do Paranapanema esta formação não ultrapassa 35 metros de espessura. A profundidade máxima foi de 3.128 metros no Poço 3CB-0003-SP, em Mirante do Paranapanema/SP, no Pontal do Paranapanema. A profundidade diminui em direção leste até o Bloco 220, quando atinge sua menor profundidade, de aproximadamente 1.800 metros.

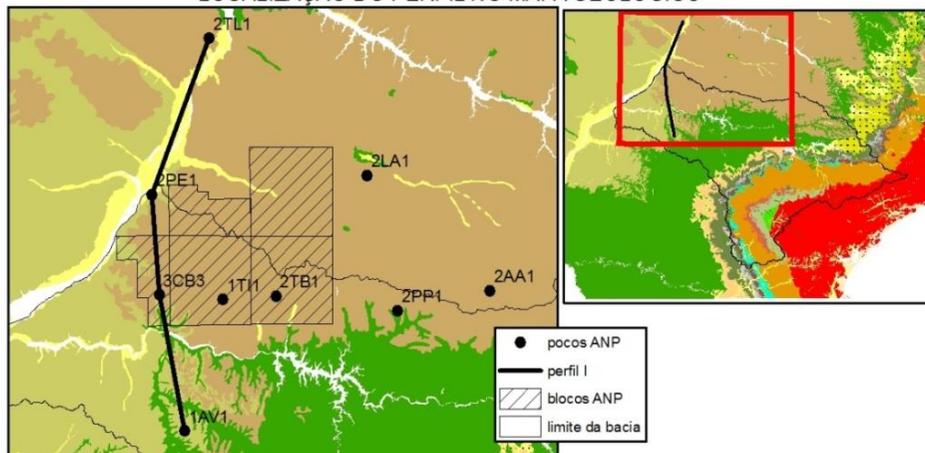
Além disso, considerando-se as seções estratigráficas apresentadas nas **Figuras 1.5 e 1.6**, nesta área a Formação Irati apresenta uma rede intrincada de soleiras intercalada neste pacote sedimentar. Estudos efetuados nos folhelhos da Formação Irati (Araújo *et al.*, 2000) mostraram que nos locais em que a espessura das soleiras é maior que a espessura dos horizontes geradores, o valor original do índice de hidrogênio cai a zero além dos níveis de carbono orgânico total (COT) serem reduzidos em 30%, em média.



#### UNIDADE ESTRATIGRÁFICA

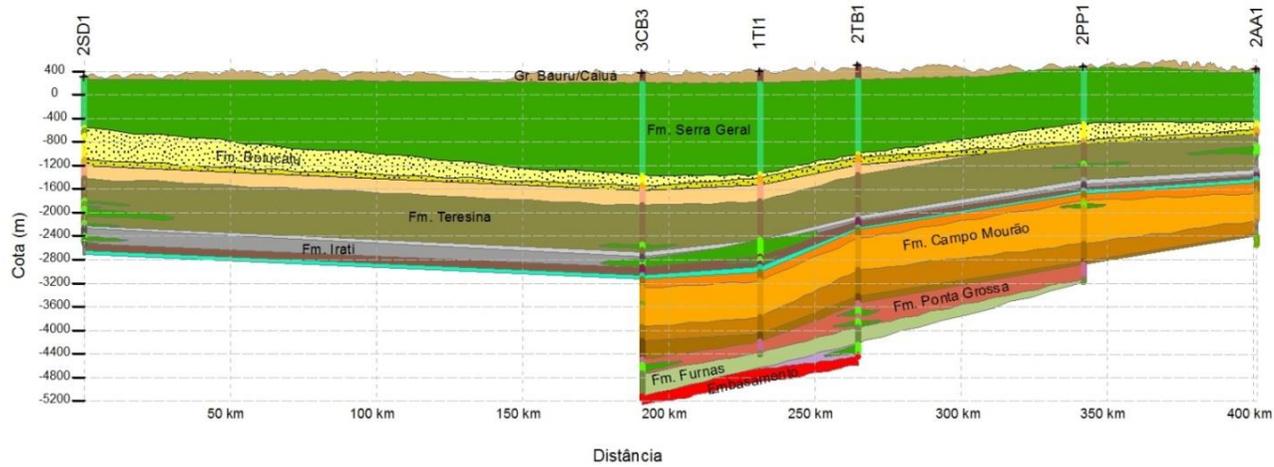
- Aluvião
- Gr. Bauru/Caiuá
- Fm. Serra Geral
- Soleiras de diabásio
- Fm. Botucatu
- Fm. Piramboia
- Fm. Rio do Rasto
- Fm. Teresina
- Fm. Serra Alta
- Fm. Irati
- Fm. Palermo
- Fm. Rio Bonito
- Fm. Taciba
- Fm. Campo Mourão
- Fm. Lagoa Azul- Mb. tarabai
- Fm. Lagoa Azul- Mb. Cuiaba Paulista
- Fm. Ponta Grossa
- Fm. Furnas
- Fm. Alto Garças
- Basalto Três Lagoas
- Embasamento

#### LOCALIZAÇÃO DO PERFIL NO MAPA GEOLÓGICO



**Figura 1.5** - Perfil Geológico NS dos 04 blocos exploratórios da Bacia do Paranapanema (Setor SPAR-CN, Blocos 198, 218, 219 e 220).

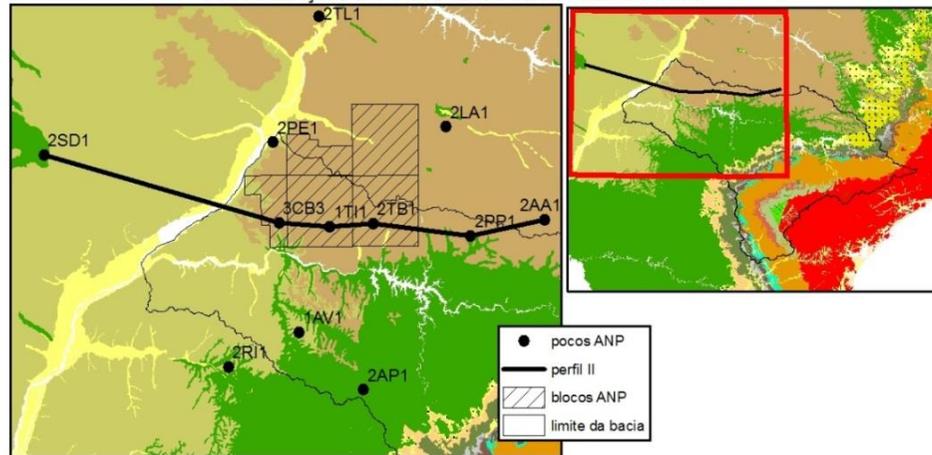
## PERFIL II



### UNIDADE ESTRATIGRÁFICA

- Aluvião
- Gr. Bauru/Caiuá
- Fm. Serra Geral
- Fm. Botucatu
- Fm. Piramboia
- Fm. Rio do Rasto
- Soleiras de diabásio
- Fm. Teresina
- Fm. Serra Alta
- Fm. Irati
- Fm. Palermo
- Fm. Rio Bonito
- Fm. Taciba
- Fm. Campo Mourão
- Fm. Lagoa Azul- Mb. tarabai
- Fm. Lagoa Azul- Mb. Cuiaba Paulista
- Fm. Ponta Grossa
- Fm. Furnas
- Fm. Vila Maria
- Fm. Alto Garças
- Basalto Três Lagoas
- Embasamento

### LOCALIZAÇÃO DO PERFIL NO MAPA GEOLÓGICO



**Figura 1.6** - Perfil Geológico EW dos 04 blocos exploratórios da Bacia do Paranapanema (Setor SPAR-CN, Blocos 198, 218, 219 e 220).

Ainda nesta região, a Formação Irati é totalmente recoberta por até algumas dezenas de metros de folhelhos e arenitos muito finos da Formação Serra Alta, a qual juntamente com as demais formações do Grupo Passa Dois compõem o principal aquífero regional, ou seja, formam um sistema hidrogeológico de pequena importância para o abastecimento da população e no desenvolvimento econômico. Além disso, este conjunto litológico, Grupo Passa Dois, devido a sua baixíssima permeabilidade, serve como rocha selante e, deste modo, os riscos de impacto ambiental sobre os recursos hídricos subterrâneos encontrados em estratos superiores (sistemas aquíferos Guarani, Serra Geral e Bauru-Caiuá) são reduzidos durante um possível processo de fraturamento hidráulico para a exploração de *shale gas*, exceto em caso de possíveis reativações de fraturas/falhas pré-existentes durante este processo, que poderão se comportar como vias para a passagem de fluidos e gás aos aquíferos superiores.

A Formação Vila Maria na área dos 04 blocos exploratórios da Bacia do Paranapanema foi encontrada apenas no Poço 2TB-0001-SP, no município de Taciba/SP, no Pontal do Paranapanema, na profundidade entre 4.723 e 4.938 metros, ou seja, com uma espessura nominal de 215 metros. Entretanto, registra-se a presença de uma soleira entre 4.741 e 4.892 metros (151 metros de espessura), representando ser este último o mais expressivo no interior deste horizonte estratigráfico e, assim, o potencial gerador de hidrocarbonetos da Formação Vila Maria na região é possivelmente pequeno.

Neste local a Formação Vila Maria é sotoposta por um espesso pacote de arenitos da Formação Furnas (Grupo Paraná), com espessura aproximada de 270 metros. Na área de estudo da Bacia do Paranapanema, este aquífero, denominado Furnas, tem importância para o abastecimento na região paulista do Alto Paranapanema e, especialmente, na porção paranaense do sul da Bacia do Rio Tibagi, ou seja, bastante distante do contexto dos 04 blocos exploratórios analisados (Setor SPAR-CN, Blocos 198, 218, 219 e 220). Na área destes blocos, as águas do Aquífero Furnas não são exploradas devido à grande profundidade em que se encontra (entre 3.200 e 5.000 metros) e a existência de aquíferos mais rasos e produtivos na região (como exemplos, sistemas aquíferos Guarani e Bauru-Caiuá). Também, sotoposta a Formação Furnas estão centenas de metros de folhelhos da Formação Ponta Grossa que podem ser considerados, para o caso específico da exploração de *shale gas* a partir da Formação Vila Maria, como rochas selantes, o que reduz os riscos de impacto ambiental sobre os recursos hídricos subterrâneos em horizontes superiores (sistemas aquíferos Guarani, Serra Geral e Bauru-Caiuá), exceto em caso de possíveis reativações de fraturas pré-existentes com o *fracking* e estas permitirem a passagem de fluidos e gás para estes aquíferos.

Uma preocupação expressa sobre o desenvolvimento do *shale gas* é que as operações de fraturamento hidráulico em formações profundas de folhelho podem ativar fraturas/falhas que se estendem muito além da formação alvo e chegar até aquíferos, permitindo que os componentes tóxicos presentes nos fluidos de fraturamento possam contaminar os aquíferos, além de riscos de abalos sísmicos de baixa magnitude. Também é importante destacar que fraturas originadas com o *fracking* podem alcançar centenas de metros. Em estudos nos EUA, Davies *et al.* (2012) mostraram a probabilidade de fraturas com extensões superiores a 350 metros em aproximadamente 1%. Relatam também a existência de probabilidade de fraturas com até 588 metros.

No oeste paulista, área em que estão os 04 blocos exploratórios da Bacia do Paranapanema, atividades neotectônicas têm sido identificadas por vários autores (Etchebehere & Saad, 2002; Santos *et al.*, 2011). Neste momento cabe destacar um fator de maior relevância para estudo para a exploração do *shale gas*: o fraturamento.

Segundo Etchebehere *et al.* (2007), no caso do Planalto Ocidental Paulista, a moda de lineamentos N350 se afigura como o mais provável tensor hidráulico da região (direção mais suscetível à abertura das fraturas, por conter o principal eixo de tensões ( $\sigma_1$ )). De outra parte, os feixes de lineamentos de 1ª ordem N315 e N40, bem como os de 2ª ordem agrupados na moda N15, podem favorecer movimentos transcorrentes dextrais para os do quadrante NW e sinistrais

para as outras duas direções, com possíveis implicações hidrogeológicas atreladas às deformações transtensivas e transtrativas, dependentes da conformação local dos planos de fraturamento.

No caso destas descontinuidades e outras estarem presentes nas áreas para a exploração do *shale gas*, uma atenção especial tem que ser dada ao modelamento do fraturamento hidráulico quanto à ativação/reativação dessas estruturas e as implicações destas na condução de fluídos do processo de *fracking* e dos folhelhos aos aquíferos.

Do ponto de vista estudos em escala local para a exploração do *shale gas*, será fundamental que estudos relativos à geologia estrutural da área e ao estado de tensões sejam adequados à escala de intervenção prevista. Da mesma forma devem ser previamente formuladas normas para o monitoramento micro-sísmico, que além de corroborar com o conhecimento das relações das fraturas com os processos de exploração, podem auxiliar, juntamente a um programa regional, na identificação de padrões anômalos de sismicidade decorrentes da atividade.

## 2. HIDROGEOLOGIA DA BACIA DO RIO PARANAPANEMA

### 2.1. CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA DA BACIA DO RIO PARANAPANEMA

Aquífero é um reservatório subterrâneo de água, caracterizado por formações geológicas permeáveis, capazes de armazenar e transmitir água em quantidades que possam ser aproveitadas como fonte de abastecimento para diferentes usos. Outras formações geológicas com permeabilidade e transmissão reduzidas funcionam como camadas semipermeáveis ou impermeáveis e não são consideradas como aquíferos, mas aquitardes ou aquicludes.

A bacia do rio Paranapanema possui aquíferos importantes, principalmente para o abastecimento da população residente nas sedes municipais e aquitardes e aquicludes em menor proporção areal. Segundo o Atlas Brasil de Abastecimento (ANA, 2010), 56,9% dos municípios com sede dentro da bacia são abastecidas exclusivamente por mananciais subterrâneos, atendendo a uma demanda de 27,2 m<sup>3</sup>/s (55% do total). Soma-se, ainda, 19,4% de sedes abastecidas por mananciais mistos (superficial + subterrâneo), atendendo uma demanda de 13,26 m<sup>3</sup>/s ou 18,7% da demanda total.

A importância dos aquíferos depende do volume de espaços vazios da rocha (porosidade) e da conexão entre eles para que a água possa circular (permeabilidade). Os aquíferos podem ser classificados quanto ao tipo de porosidade da rocha armazenadora em poroso ou granular, fraturado e cárstico. O tipo Poroso engloba as rochas sedimentares que contêm água nos espaços entre os grãos constituintes da rocha, representando, na maioria das vezes, os aquíferos de maior potencial em uma região. Seu potencial hidrogeológico dependerá do tamanho e da forma dos grãos que constituem a rocha e, de maneira geral, rochas arenosas caracterizam bons aquíferos, enquanto as de composição argilosa possuem potencial muito baixo ou nulo, constituindo os aquitardes ou aquicludes. O tipo Fraturado inclui as rochas ígneas e metamórficas, onde a porosidade, dita secundária, é representada pelo espaçamento entre as fraturas das rochas. Quanto maior a quantidade de fraturas interligadas e preenchidas com água, maior será a potencialidade do aquífero em fornecer água. Nesse tipo a produtividade dos poços é extremamente variável, pois depende da quantidade e da característica das fraturas interceptadas por determinado poço. No tipo cárstico o armazenamento da água subterrânea ocorre em espaços resultantes da dissolução de rochas calcárias.

A caracterização hidrogeológica da bacia do rio Paranapanema baseia-se no Mapa de Aquíferos Aflorantes do Brasil (ANA, 2013), assim sendo, os nomes dos sistemas aquíferos utilizados são aqueles estabelecidos nesse mapa, que diferem, em alguns casos, daqueles adotados nos Estados do Paraná e São Paulo, conforme apresentado na **Tabela 2.1**. No Mapa de Aquíferos Aflorantes do Brasil as diversas unidades geológicas/hidrogeológicas foram agrupadas ou

desmembradas em sistemas aquíferos de acordo com suas características hidrogeológicas, visando à gestão integrada dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos.

Os sistemas aquíferos na área da bacia incluem sistemas aquíferos porosos, fraturados e cárstico (**Figura 2.1** e **Tabela 2.2**). As unidades sedimentares de composição predominantemente arenosa formam aquíferos importantes, e ocupam a maior superfície areal da bacia (55%), dentre os quais se destacam os Sistemas Aquíferos Bauru-Caiuá, Guarani e Aquíferos Rio Bonito, Itararé e Furnas. Os aquíferos fraturados, por sua vez, ocupam 32% da área da bacia e são representados pelo Sistema Aquífero Serra Geral e o Aquífero Fraturado Centro-Sul enquanto o tipo cárstico, com menos de 1%, é representado pelo Carste. O Aquífero Castro foi associado ao Fraturado Centro-Sul no mapa, haja vista sua pequena representatividade na bacia. Completando as demais unidades geológicas presentes na bacia, representando cerca de 12% da área total, o Grupo Passa Dois e a Formação Palermo, as quais possuem composição argilosa e potencial hidrogeológico muito baixo, são nesta região classificados como aquíferos (material quase impermeável). As rochas da Formação Ponta Grossa constituem uma unidade hidrogeológica de baixa produtividade.

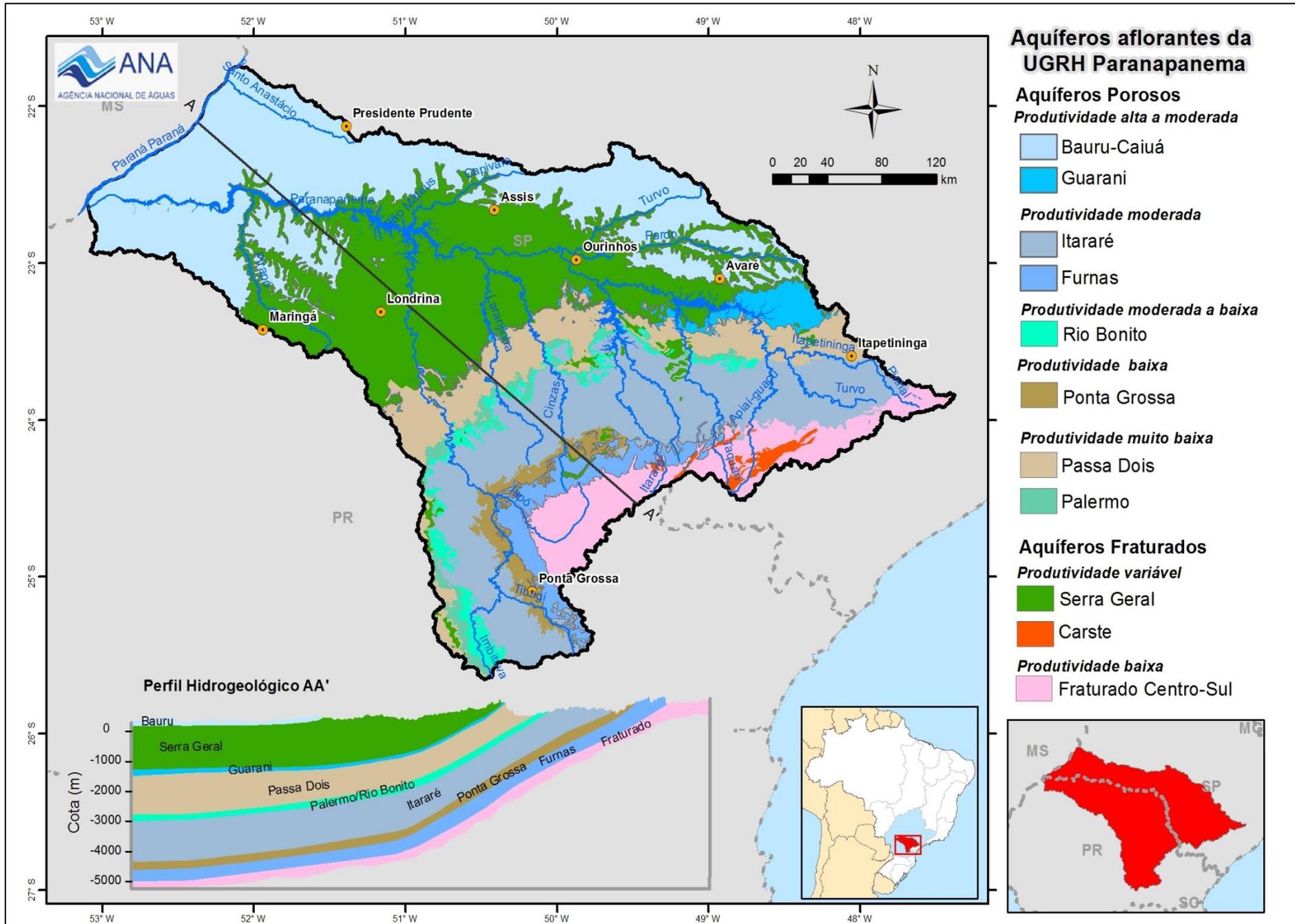
**Tabela 2.1** - Relacionamento entre os nomes dos sistemas aquíferos utilizados no Mapa de Aquíferos Aflorantes do Brasil (ANA, 2013), e nos Estados de São Paulo (DAEE *et al.*, 2005) e Paraná (AGUASPARANÁ, 2010a).

Unidade Geológica	Nome do Aquífero		
	Mapa de Aquíferos Aflorantes	São Paulo	Paraná
Unidades diversas: granitos, gnaisses e rochas metamórficas de baixo grau	Fraturado Centro-Sul Castro	Pré-Cambriano (não aflorante)	Pré-Cambriana
Unidades carbanáticas da Formação Água Clara, Grupo Itaiacoca e Subgrupo Lajeado	Carste	Pré-cambriano cárstico	Karst <sup>1</sup>
Formação Furnas	Furnas	Furnas	Paleozoica Inferior
Formação Ponta Grossa	Ponta Grossa	- (não aflorante)	
Grupo Itararé	Itararé	Tubarão	Paleozoica Médio-Superior
Formação Rio Bonito	Rio Bonito		
Formação Palermo	Palermo		Paleozoico Superior
Grupo Passa Dois	Passa Dois	Aquífero Passa Dois	
Formações Botucatu e Pirambóia	Guarani	Guarani	Guarani
Formação Serra Geral	Serra Geral	Serra Geral	Serra Geral Norte
Grupos Bauru e Caiuá	Bauru-Caiuá	Bauru	Caiuá

Conforme se observa no Mapa da **Figura 2.1** as áreas de afloramento dos aquíferos dispõem-se normalmente em faixas de direção nordeste, com inflexão para noroeste na região da unidade de gestão de Piraponema, região sudeste da bacia hidrográfica. Essas unidades arranjam-se em subsuperfície de forma que a unidade geologicamente mais nova está sobreposta à unidade mais antiga e assim subsequentemente até atingir as rochas do embasamento da bacia geológica do Paraná que representam o Aquífero Fraturado Centro-Sul e o Carste. Esse comportamento em profundidade pode ser observado no Perfil Hidrogeológico AA' no escopo do Mapa da **Figura 2.1**.

A produtividade dos sistemas aquíferos dessa região é bastante variável, caracterizada no mapa qualitativamente em função das características das rochas que os compõem e ainda relacionada às vazões dos poços que exploram águas nessas unidades. Os sistemas aquíferos/aquíferos de natureza granular ou porosos apresentam produtividade que variam de alta a moderada (Bauru-Caiuá e Guarani); moderada (Itararé e Furnas); moderada a baixa (Rio Bonito); baixa (Ponta Grossa) até de produtividade muito baixa (Passa Dois e Palermo). Aqueles

de natureza fissural ou fraturados a produtividade é variável (Serra Geral e Carste) e baixa (Fraturado Centro-Sul).



**Figura 2.1** – Mapa de Sistemas Aquíferos Aflorantes da Bacia do rio Paranapanema.

**Tabela 2.2** - Sistemas Aquíferos e demais unidades geológicas no Mapa de Aquíferos Aflorantes do Brasil (ANA, 2013), e nos estados de São Paulo (DAEE *et al.*, 2005) e Paraná (ÁGUASPARANÁ, 2010b).

<b>SISTEMAS AQUÍFEROS NA BACIA DO RIO PARANAPANEMA</b>				
<b>Sistema Aquífero</b>	<b>Área aflorante (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>% área da bacia</b>	<b>Classificação</b>	<b>Produtividade</b>
<i>Porosos</i>				
<b>Bauru-Caiuá</b>	29.572,18	27,74	Aquífero	Alta a moderada
<b>Guarani</b>	2.898,58	2,72	Aquífero	Alta a moderada
<b>Passa Dois</b>	8.953,35	8,4	Aquitarde	Muito baixa
<b>Palermo</b>	1.782,83	1,67	Aquitarde	Muito baixa
<b>Rio Bonito</b>	2.131,62	2,00	Aquífero	Moderada a baixa
<b>Itararé</b>	19.293,91	18,10	Aquífero	Moderada
<b>Ponta Grossa</b>	2.119,85	1,99	Aquífero	Baixa
<b>Furnas</b>	4.261,55	4,00	Aquífero	Moderada
<i>Fratuados</i>				
<b>Serra Geral</b>	27.528,16	25,83	Aquífero	Variável
<b>Fratuado Centro-Sul</b>	7.295,59	6,84	Aquífero	Baixa
<i>Cárstico</i>				
<b>Carste</b>	750,18	0,70	Aquífero	Variável

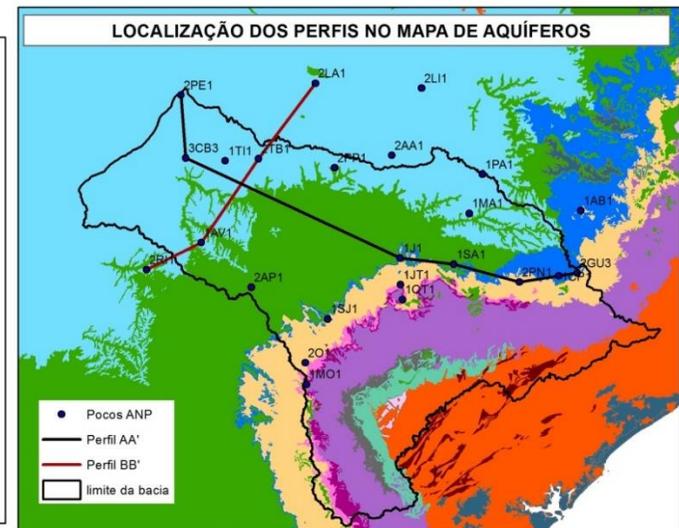
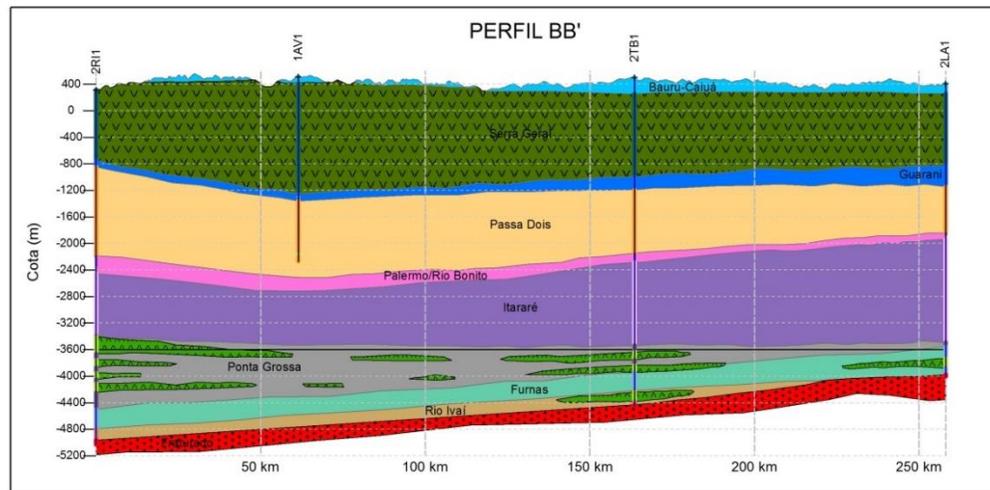
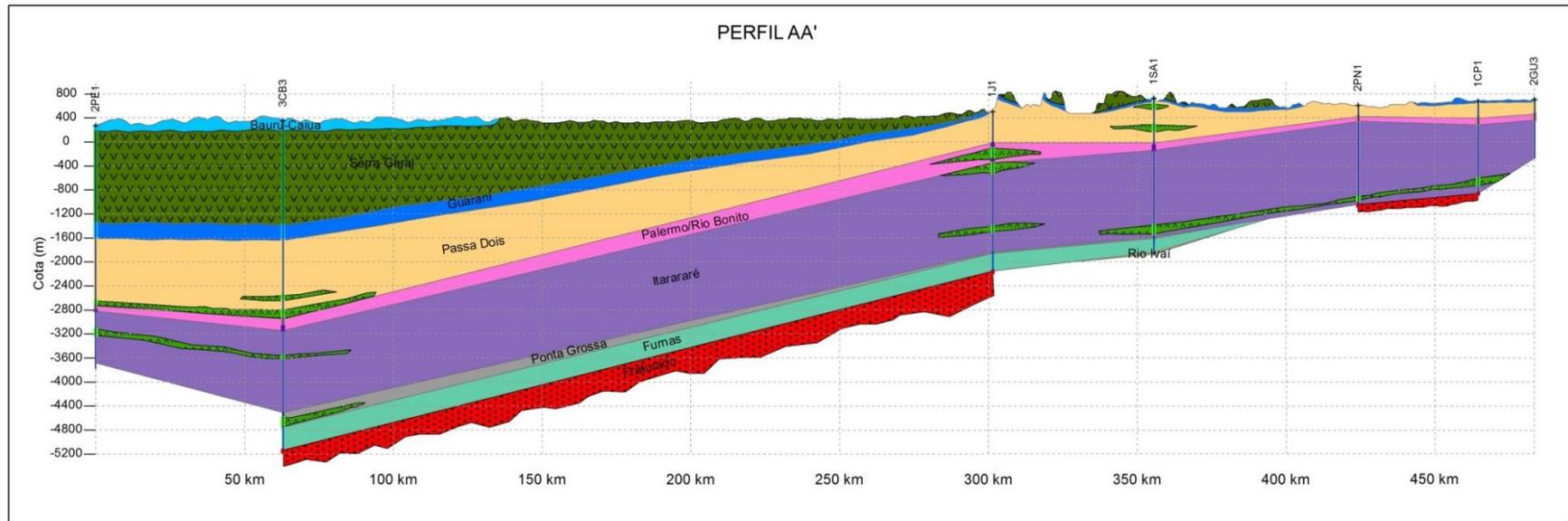
A disposição das sequências sedimentares em profundidade que compõem os sistemas aquíferos está bem representada na **Figura 2.2**, confeccionada com base em perfis de poços estratigráficos disponibilizados pela ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis). O Perfil AA', disposto perpendicularmente as áreas de afloramento das unidades, mostra que estas têm uma inclinação e aumento de espessura em direção ao rio Paraná. A espessura da sequência vulcanossedimentar registrada nesses poços pode variar de cerca de 1.500 metros (A') até mais de 5.000 metros (poço 3CB3).

Conforme se pode observar nos perfis, os sistemas aquíferos mais expressivos regionalmente, em termos de volume rochoso, são o Serra Geral e o Itararé. O Sistema Aquífero Bauru-Caiuá, por sua vez, embora não apresente um volume regional expressivo de rochas, representa uma importante unidade aquífera na bacia, haja vista ser aflorante e de fácil acesso por meio da perfuração de poços mais rasos. O Aquitarde Passa Dois também representa uma unidade hidrogeológica importante na bacia.

#### *Sistema Aquífero Bauru-Caiuá*

O Sistema Aquífero Bauru-Caiuá se estende por toda a região do Pontal do Paranapanema e parte da região de Piraponema e do Médio Paranapanema, ocupando uma área aflorante de 29.572,18 km<sup>2</sup> na bacia. É um sistema aquífero do tipo poroso e livre a semiconfinado, com espessura média de 200 metros que se sobrepõe à Formação Serra Geral. Esse reservatório subterrâneo é constituído de arenitos finos a médios, com intercalações de argilitos e siltitos, de origem predominantemente fluvial, das diversas unidades geológicas que o compõe: Araçatuba, Bauru, Caiuá, Goio Erê, Marília, Presidente Prudente, Rio Paraná, Santo Anastácio, Uberaba, segundo agrupamento efetuado no Mapa de Aquíferos Aflorantes do Brasil.

Compreende a região do planalto Paranaíba, com relevos de degradação em planaltos dissecados, planalto ocidental paulista e parte do planalto de Maringá. Os solos variam de Latossolos Vermelhos relacionados ao deserto Caiuá e Argissolos, estes predominando no Bauru aflorante na Bacia.



**Figura 2.2** – Unidades hidrogeológicas da bacia do rio Paranapanema exibidas em perfis construídos com base em poços cedidos pela ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis).

Na parte paulista da bacia do Paranapanema, a área de afloramento dos Grupos Bauru e Caiuá abrange a região do Pontal e do Médio Paranapanema, onde compreende o domínio de importantes cidades como: Presidente Prudente, Marília, e outras. Nestas e nas demais cidades circunscritas, a água subterrânea, armazenada Sistema Aquífero Bauru-Caiuá e extraída através de poços tubulares, representa a fonte principal ou alternativa de obtenção de recursos hídricos, seja para abastecimento público, industrial, comercial, rural ou doméstico.

Sendo um aquífero freático, a recarga é feita diretamente pela precipitação pluvial e o fluxo regional da água subterrânea se dá em direção às drenagens principais dos rios Turvo, e Santo Anastácio, Paraná e Paranapanema. A vazão explotável varia de 10 até 120 m<sup>3</sup>/h, com zonas de potencial mais elevado localizadas ao longo do rio Paraná e no Pontal do Paranapanema (CETESB, 2013).

Mancuso & Campos (2005) classificaram o Sistema Aquífero Bauru-Caiuá no Estado de São Paulo com base nas condições de armazenamento e circulação nas seguintes unidades hidroestratigráficas: Bauru Médio/Superior (formações Adamantina e Marília) e Bauru Inferior/Caiuá (Grupo Caiuá e Formação Santo Anastácio). Ambas as unidades ocorrem de forma livre a localmente confinada e apresentam porosidade granular e contínua, sendo esta porosidade não uniforme, para a primeira unidade, e uniforme, para a segunda.

Na *Unidade Bauru Médio/Superior*, os valores de transmissividade variam de 10 a 50 m<sup>2</sup>/dia, predominando a faixa de 10 a 30 m<sup>2</sup>/dia. A capacidade específica varia de 0,1 a 1 m<sup>3</sup>/h/m, com predomínio de valores entre 0,3 e 0,4 m<sup>3</sup>/h/m. Os valores de permeabilidade variam de 0,1 a 0,4 m/dia e a porosidade efetiva situa-se em torno de 5%.

Na *Unidade Bauru Inferior/Caiuá*, as transmissividades variam de 100 a 300 m<sup>2</sup>/dia. Os valores próximos a 300 m<sup>2</sup>/dia correspondem à área com espessuras saturadas entre 100 e 200 metros. São encontrados valores dominantes de capacidade específica entre 1 e 4 m<sup>3</sup>/h/m. Com referência a permeabilidade, os coeficientes variam de 1 a 3 m/dia, com uma porosidade entre 10 a 15%. As zonas de potencial explorável mais elevado na faixa que se estende ao longo do Rio Paraná e abrange o Pontal do Paranapanema, onde predominam intervalos de 40 a 80 m<sup>3</sup>/h (Franzini, 2010).

No Paraná o Sistema Aquífero Bauru-Caiuá aflora na região noroeste do Estado, onde ocupa parte da unidade de gestão de Piraponema.

As espessuras destes sedimentos registradas nos poços da ANP variam entre 62 e 250 metros, conforme especificado na **Tabela 2.3**.

**Tabela 2.3** – Valores de espessuras das rochas do Sistema Aquífero Bauru-Caiuá em poços da ANP na bacia do rio Paranapanema.

Poço	Município	Espessura do Sistema Aquífero Bauru-Caiuá
2PE1	Presidente Epitácio (SP)	94 metros
3CB3	Mirante do Paranapanema (SP)	175 metros
1TI1	Tarabaí (SP)	190 metros
2TB1	Taciba (SP)	250 metros
1AV1	Santa Fé (PR)	109 metros
2PP1	Paraguaçu Paulista (SP)	64 metros
2AA1	Marília (SP)	96 metros
1MA1	Mandacaia (SP)	62 metros

A espessura saturada dos arenitos do Grupo Bauru, em São Paulo, varia de 100 a 150 metros, sendo dependente da morfologia de superfície e da forma do substrato basáltico. Transversalmente aos rios principais, na direção NE-SW, as espessuras variam com valores de 50 metros nos vales e atingem, nos espigões ou nos divisores d'água, valores da ordem de 200 metros. Nas zonas onde o substrato sofreu embaciamento, os valores da espessura são da ordem de 200 metros. Inversamente, nas porções onde o substrato se apresenta sob a forma de alto

estrutural, ocorre uma diminuição na espessura da camada aquífera (DAEE, 1974, DAEE, 1976, DAEE, 1979 e Rocha *et al.*, 1979 *Apud* Barison, 2003).

No Estado do Paraná, segundo Celligoi & Duarte (2002) esse aquífero, denominado de Aquífero Caiuá, consiste geologicamente nas rochas sedimentares cretáceas pós-basálticas da Bacia Sedimentar do Paraná, que incluem o Grupo Caiuá propriamente dito, e, mais especificamente, à Formação Rio Paraná, cujos depósitos sedimentares alcançam espessuras da ordem de 270 metros e mais a Formação Adamantina, pertencente ao Grupo Bauru. Essas unidades sedimentares apresentam características litológicas relativamente homogêneas, sem grandes quantidades de argilas compactas (Celligoi, 2000), oferecendo condições para que seja um aquífero livre.

Nesse contexto, os poços perfurados mostram vazões entre 15 a 25 m<sup>3</sup>/h (Mendes *et al.*, 2002). A profundidade dos poços perfurados nesse aquífero é, em geral, limitada a 150 metros, e sua produtividade é bastante variável em razão das características construtivas de cada unidade de captação. É importante destacar a importância do Bauru-Caiuá para a região em termos de abastecimento público, uma vez que cerca de 80% da população que vive sobre este sistema aquífero é abastecida com águas deste reservatório subterrâneo (AGUASPARANA, 2010b).

Segundo Mendes *et al.* (2002), em localidades em que o Sistema Aquífero Bauru-Caiuá possui espessura superior a 100 metros, os poços apresentam um significativo aumento de produção. Esse é o caso dos poços e em operação na cidade de Loanda (PR), onde o poço que atravessou todo o pacote arenoso com 215 metros apresenta vazão de operação de 80 m<sup>3</sup>/h. Em alguns locais, o sistema aquífero se apresenta como semiconfinado, com coeficiente de armazenamento da ordem de 10<sup>-3</sup>, e em outros, como aquífero livre, com porosidade eficaz da ordem de 10 a 20%.

A relação entre o Sistema Aquífero Bauru-Caiuá (Aquífero Caiuá, no noroeste do Paraná) e o Serra Geral foi avaliado por Rosa Filho *et al.* (1987) e Bettú *et al.* (2006). No trabalho de 2006 os autores discutiram a influência estrutural no condicionamento das zonas de mesclagem de águas, assim como a compartimentação dos dois sistemas aquíferos. A comparação entre os mapas estruturais do embasamento e da superfície do Grupo Caiuá revelou a coincidência de parte das estruturas mapeadas nos dois níveis de investigação (Caiuá e Serra Geral), resultando em um arcabouço estrutural comum a essas unidades geológicas. Os alinhamentos mapeados constituem reflexo da herança tectônica do embasamento da Bacia Bauru, afetando também os arenitos do Grupo Caiuá. Ainda observaram em mapas de sólidos totais dissolvidos (STD) e do conteúdo catiônico das águas de poços produtores completados no aquífero Caiuá, indicaram zonas com características hidroquímicas do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) em seu interior, denotando a conectividade hidráulica dos dois sistemas aquíferos.

Gastmans *et al.* (2013), ao estudarem a porção da margem direita do curso médio do Rio Paranapanema (SP), descrevem que a estruturação interna dos derrames basálticos possibilita a geração de um sistema de descontinuidades particulares, definidos por diversos autores como os principais responsáveis pelo condicionamento do fluxo das águas subterrâneas no interior de aquíferos basálticos. Esse modelo foi sintetizado por Rebouças & Fraga (1988), que subdividiram cada derrame de lavas em duas unidades, de topo e base de derrames, as quais representariam a zona preferencial de circulação da água subterrânea, associada às estruturas vesiculares e ao intenso fraturamento horizontal. A conexão vertical de fluxo entre essas distintas zonas de circulação, estaria associada às diáclases existentes na porção central do derrame. Este mesmo trabalho indica a possibilidade de existência de fluxos ascendentes de águas subterrâneas provenientes do Sistema Aquífero Guarani em direção ao Sistema Aquífero Serra Geral, ao longo do Rio Paranapanema e nas proximidades da cidade de Marília (SP), podendo essas águas alcançarem o SASG.

As estruturas mapeadas resultam de esforços tectônicos atuantes durante o fim do Cretáceo e o Cenozoico (pós-deposicionais), que causaram a compartimentação dos sistemas aquíferos e a consequente geração de zonas de mesclagem hidráulica entre o SAC e o SASG, utilizando descontinuidades herdadas do embasamento. As águas predominantemente bicarbonatadas

potássicas, típicas do SAG, são mescladas com águas bicarbonatadas cálcicas do SASG, através de ascensão vertical por fraturas e em condições potenciométricas favoráveis, caracterizando zonas de conectividade hidráulica, segundo análises dos autores.

Paula e Silva *et al.* (2005) avaliaram que pelo fato de estar inteiramente aflorante, este aquífero pode facilmente ser acessado por escavações e perfurações de baixo custo, fornecendo, na maioria dos casos, a vazão desejada pelos usuários. Pela mesma razão, tem se mostrado extremamente vulnerável à infiltração de contaminantes orgânicos e inorgânicos.

### *Sistema Aquífero Serra Geral*

O Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) tem sua área de afloramento na região central da bacia, abrangendo importantes municípios no Paraná (Maringá e Londrina) e São Paulo (Assis e Ourinhos). Ocupa 25,83% da área da bacia do Paranapanema e sua ocorrência se dá na forma de uma faixa de direção nordeste, sendo mais abrangente no Paraná onde alcança larguras de até 200 km. Destaca-se em importância devido a sua grande área de ocorrência e maior produtividade, sendo o mais utilizado para abastecimento público. Sua alta produtividade deve-se à maior densidade de fraturas dos basaltos que formam o aquífero, pois nesse tipo de rocha, além das fraturas formadas por processos tectônicos, existem fraturas e vesículas originadas durante o resfriamento do magma no processo de formação da rocha.

Esse sistema compreende o Planalto de Londrina, partes dos Planaltos de Maringá e Paulista. Dominam os Latossolos Vermelhos e os Nitossolos Vermelhos (são argilosos e de boa porosidade, pode chegar até a 50%).

Na parte paulista da Bacia os basaltos da Formação Serra Geral afloram predominantemente na região do Médio Paranapanema, estendendo-se pela região centro-sul do Estado. A porção não aflorante ocorre sob as rochas do Grupo Bauru, na parte oeste do Estado. Aflora em municípios como Ourinhos, Cândido Mota e Tarumã.

A espessura das rochas do SASG aumenta progressivamente desde a região do Alto Paranapanema (Poço ANP 1SA1), para oeste, chegando a 1.744 metros (Poço 3CB3 – Mirante do Paranapanema, SP), sob as rochas do Bauru-Caiuá, no Pontal do Paranapanema, conforme pode ser observado no perfil AA' (**Figura 2.2**), confeccionado com base nos poços da ANP.

Spiller (2005), estudando o SASG no Estado, define que as vazões médias oscilam entre 10 a 25 m<sup>3</sup>/h, sendo raras as vazões mais elevadas. As capacidades específicas variam de 0,65 a 50 m<sup>3</sup>/h/m.

No Estado do Paraná, o SASG é o de maior importância ao abastecimento de pequenas e médias localidades. Segundo AGUASPARANÁ (2010a), no ano de 2008, a SANEPAR operava 469 poços neste aquífero, que produziam cerca de 72.274.337 m<sup>3</sup>/ano de água. Esse volume representava 60% da produção total de água subterrânea da SANEPAR. Para Mendes *et al.* (2002), a profundidade média dos poços da SANEPAR no SASG é de 131 metros e as vazões médias atingem 30 m<sup>3</sup>/h por poço. Entretanto, vazões consideravelmente maiores são extraídas dos poços situados nos municípios de Maringá (190 m<sup>3</sup>/h) e Londrina (140 m<sup>3</sup>/h).

A área de afloramento, em território paranaense, abrange a porção central da bacia. Neste estado, conforme descreve a AGUASPARANÁ (2010b), em função das características geomorfológicas e hidrogeológicas regionais, o SASG pode ser subdividido em Serra Geral Norte e Serra Geral Sul. Entretanto, a bacia do Paranapanema contém a unidade Serra Geral Norte, aflorante na porção centro-norte do estado.

A Unidade Serra Geral Norte possui a média de vazões dos poços de 27 m<sup>3</sup>/h para do Paranapanema (AGUASPARANÁ, 2010a). A profundidade média dos poços é de 120 metros (AGUASPARANÁ, 2012).

## *Sistema Aquífero Guarani*

O Sistema Aquífero Guarani (SAG) é constituído pelas formações Botucatu e Pirambóia, e aflora na bacia em uma estreita faixa descontínua na região nordeste, no Alto Paranapanema. Apesar de sua importância estratégica regional, é pouco utilizado na bacia, pois é pouco espesso na área aflorante e ocorre principalmente de maneira confinada (abaixo dos basaltos do Sistema Aquífero Serra Geral e das rochas do Aquífero Bauru), elevando os custos para perfuração e operação de poços. Em sua área de ocorrência predomina o ambiente da Depressão Periférica e Colinas e Latossolos Vermelho Amarelo.

Nessa estreita área aflorante o SAG tem uma largura máxima de cerca de 37 km e 50 metros de profundidade apenas, enquanto que na região em que está confinado sob o Serra Geral e Bauru-Caiuá apresenta espessuras entre 200 e 350 metros abaixo de cerca de 2 km de basaltos e rochas dos grupos Bauru e Caiuá. Tomando como referências os poços da ANP: 1MA1, 2PP1, 3CB3.

A partir da análise de dados obtidos em vários trabalhos publicados sobre o Guarani nesta região, CPRM (2012b) traz estimativas e determinações de alguns parâmetros hidrodinâmicos: *i*) permeabilidade - varia de 3,5 a 5,18 m/dia. Entretanto, valor médio de 2,25 m/dia foi encontrado por Silva (1983) a partir de datações de isótopos radiativos do Carbono-14; *ii*) transmissividade - varia de 150 a 1.296 m<sup>2</sup>/dia; *iii*) coeficiente de armazenamento - entre 0,10 e 0,25 no aquífero livre e entre  $2 \times 10^{-4}$  a  $10^{-6}$ , no confinado; *iv*) capacidade específica - apresenta valor médio aproximado de 4,5 m<sup>3</sup>/h/m; *v*) recarga direta - desde 225 a 325 mm/ano. Afirma que os dados hidrodinâmicos e geométricos para o sistema aquífero no Estado de São Paulo mostram similaridades aos apresentados pela AGUASPARANÁ (2010a), no Estado do Paraná.

Na parte paulista da bacia, o SAG abastece cidades importantes como Presidente Prudente e Marília. No Estado do Paraná, os poços perfurados nesse sistema aquífero podem apresentar grandes vazões, da ordem de 1.000 m<sup>3</sup>/hora. Existem cerca de 50 poços cadastrados no Banco de Dados Hidrogeológicos da AGUASPARANÁ, apresentando profundidade média de 320 metros e vazão média de 100 m<sup>3</sup>/hora.

Na região norte-nordeste do Paraná, entre Jacarezinho e Londrina, as águas do Guarani são captadas para o abastecimento de 14 municípios em sistemas operados pela SANEPAR. Sistemas autônomos, como os de Ibiporã, Bandeirantes e Abatiá, também utilizam poços penetrantes no Guarani para fins de abastecimento público. A título de exemplo, a SANEPAR perfurou, no ano de 2004, um poço nas imediações de Londrina e o resultado, em termos de “vazão surgente” (sem bombeamento), foi de 560 m<sup>3</sup>/h. É importante destacar, todavia, que nesta mesma cidade existe um poço (perfurado no ano de 1979) cujo teor de flúor é de 12 mg/L; neste caso, a água não é adequada ao consumo humano. Atualmente, existem 61 poços outorgados para SANEPAR nesta unidade aquífera.

## *Outras Unidades (Passa Dois, Palermo, Rio Bonito e Itararé)*

Dentre as unidades hidrogeológicas aflorantes na bacia do Paranapanema o Aquitarde Passa Dois é a de produtividade mais baixa. É constituído de rochas de granulação fina como argilitos, siltitos, folhelhos, arenitos finos, formado entre 250 e 230 milhões de anos atrás. No Estado de São Paulo é considerado como aquitarde, enquanto no Paraná, não é considerado como aquífero no Plano de Recursos Hídricos do Paraná de 2010 (AGUASPARANÁ, 2010b).

No Projeto Aquíferos (IG, 2011) é descrito como unidade hidrogeológica sedimentar, classificada regionalmente como aquioclude. Com extensão regional, encontra-se na base do Sistema Aquífero Guarani e recobre o topo do Aquífero Tubarão (Palermo, Rio Bonito e Itararé). Localmente, pode apresentar certa produtividade relacionada a fraturas na rocha, passando a ser considerado como aquitarde.

Segundo a descrição do Mapa Hidrogeológico do Brasil, Folha Paranapanema (SF-22) (CPRM, 2004), as rochas que constituem o Grupo Passa Dois são unidades eminentemente pelíticas que localmente chega a constituir aquícludes. O Aquitarde Passa Dois é utilizado ocasionalmente para abertura de poços rasos que abastecem pequenas propriedades particulares, onde apresenta uma produção muito baixa (vazão entre 1 e 5 m<sup>3</sup>/h).

O Aquitarde Passa Dois aflora em uma faixa de direção nordeste entre os Sistemas Aquíferos Guarani/Serra Geral e Palermo/Itararé. Possui uma largura média de 20 km, chegando a 50 km no Paraná. No Estado de São Paulo se estende do norte ao sul, passando na bacia do rio Paranapanema, pelas cidades de Paranapanema e Fartura.

Sua espessura na área aflorante varia entre 50 metros (Poços ANP 1JT1- Joaquim Távora-PR) a 150 metros (Poço 2PN1/ANP - Paranapanema-SP). Entretanto, na área não aflorante chega a atingir espessuras da ordem de 900 (Poço 2TB1/ANP - Tarabai, SP; Poço 1AV1/ANP – Santa Fé, PR) a 1.000 metros (Poço 3CB3/ANP-Mirante do Paranapanema, SP), constituindo a base do Sistema Aquífero Guarani. Sua espessura aumenta de sudeste para noroeste, conforme pode ser observado no Perfil AA' da **Figura 2.2**.

A região de afloramento do Aquitarde Passa Dois compreende uma série de planaltos na margem esquerda do Paranapanema, até adentrar na Depressão Periférica, na margem direita, em São Paulo. Os solos associados consistem de Neossolo Litólico, Argissolo Vermelho, Latossolo Vermelho, Argissolo Vermelho Amarelo.

Os Aquíferos Palermo, Rio Bonito e Itararé são classificados no mapa de áreas aflorantes (ANA, 2013) como sistemas individuais em função do agrupamento de unidades geológicas específicas. No Estado de São Paulo esses sistemas aquíferos são considerados como uma unidade aquífera aflorante, o Aquífero Tubarão, enquanto que no Estado do Paraná a unidade aquífera Paleozoica Média Superior representam os aquíferos Itararé e Rio Bonito e a unidade Paleozoica Superior, não considerada como aquífero, inclui os aquíferos Passa Dois e Palermo, conforme correlação apresentada na **Tabela 2.1**.

Esses sistemas têm sua área aflorante numa faixa de direção aproximadamente leste/oeste no Estado de São Paulo, a qual muda de direção próximo da divisa entre os dois estados, e finaliza suas áreas de afloramento no Paraná com a direção NW/SE. Abrangem juntos cerca de 22% da área da bacia. O Aquífero Itararé é o único que aflora de forma contínua chegando a atingir larguras da ordem de 80 km, enquanto que o Aquitarde Palermo e Aquífero Rio Bonito afloram em estreitas faixas descontínuas (5 a 15 km), com melhor representação no Paraná.

O Aquífero Itararé compreende o Planalto de Ponta Grossa a sudeste; em São Paulo formam-se colinas e morrotes, associados com Latossolos, Argissolos e Cambissolo. O Aquífero Rio Bonito compreende os planaltos de Guatá e Ponta Grossa. Suas rochas originam Latossolos e Cambissolos; enquanto que o Aquitarde Palermo abrange os planaltos de Carlópolis, Ponta Grossa e Médio Cinzas, e a Depressão periférica. Os solos são Latossolo Vermelho, Cambissolo e Argissolo Vermelho.

Segundo (IG, 2011), essas unidades são constituídas por sedimentos arenosos, siltsos e argilosos formados há mais de 250 milhões de anos em ambiente glacial (geleiras), continental e marinho.

No Paraná o Aquífero Itararé é descrito no contexto da unidade aquífera Paleozoica Média Superior, constituído principalmente pelas litologias representadas por camadas de arenitos que se encontram intercaladas com diamictitos, argilitos e folhelhos várvidos. A vazão média dos poços nesse aquífero é de 9,6 m<sup>3</sup>/h. O Aquífero Rio Bonito, por sua vez, é representado por arenitos de granulação fina a média, às vezes conglomeráticos, que ocorrem intercalados com folhelhos, siltitos, argilitos e leitos de carvão. A vazão média dos poços no Estado gira em torno de 17,5 m<sup>3</sup>/h. (AGUASPARANÁ, 2010a).

Em São Paulo, o Instituto Geológico, no Projeto Aquíferos (IG 2011) caracterizou a unidade aquífera (Aquífero Tubarão) como de baixa produtividade, com vazões recomendadas inferiores a 10 m<sup>3</sup>/h por poço, podendo atingir, em alguns pontos, até 40 m<sup>3</sup>/h, contribuindo para o abastecimento de Itapetininga, por exemplo. Sua espessura atinge valores da ordem de 850 a 900

metros em sua porção aflorante, conforme registro de poços da ANP no Paraná (Poço 1MO1/ANP – Ortigueira PR; Poço 1MO2/ANP – Reserva, PR). Na região não aflorante pode chegar a 1470 metros (Poço 2AP1/ANP – Arapongas PR), próximo às cabeceiras do rio Pirapó. Em São Paulo as espessuras nas áreas não aflorantes variam de 650 metros (Poço 2GU3/ANP – Guareí, SP) a 1.600 metros (Poço 3CB4/ANP – Mirante do Paranapanema Paulista, SP) no depocento da bacia do Paraná, região oeste do Estado.

Esses sistemas são unidades de menor importância na região, mas localmente podem representar um importante manancial. Segundo Oda *et al.* (2005) o sistema Aquífero Tubarão (São Paulo) apresenta, de forma regional, baixa produtividade. Entretanto, em regiões densamente ocupadas ou com restrição de uso de água superficial, seja devido à baixa disponibilidade ou pela má qualidade, têm-se optado pelo uso de água subterrânea.

No Paraná este aquífero, a exemplo do que foi obtido em poços perfurados pela SANEPAR (Ivaí, Siqueira Campos), apresenta águas com temperaturas que variam entre 25 °C e 36 °C, sendo que a temperatura mais elevada foi constatada num poço cuja profundidade atingiu 765 m (ÁGUAS PARANÁ, 2010b).

### *Aquífero Ponta Grossa*

O Aquífero Ponta Grossa aflora na área da bacia do Paranapanema apenas no Estado do Paraná, em uma estreita faixa entre as áreas de afloramento dos Aquíferos Furnas e Itararé. Abrange apenas 2% da área da bacia. No Plano de Recursos Hídricos do Paraná esse sistema está incluído na unidade aquífera Paleozoica Inferior, a qual inclui o Aquífero Furnas e as rochas da formação Ponta Grossa. Esta última não considerada aquífero na região.

Sua área de ocorrência compreende os planaltos de Ponta Grossa, Tibagi e Jaguariaíva, onde predominam Latossolos Vermelhos.

Segundo descrito em AGUASPARANÁ (2010a), a Formação Ponta Grossa não se constitui aquífero porque as rochas, predominantemente folhelhos, apresentam baixa condutividade hidráulica. Essas rochas ocorrem interdigitadas com os arenitos do Aquífero Furnas e, quase sempre, funcionam como camadas confinantes deste. A área de ocorrência da Formação Ponta Grossa, praticamente, coincide com as áreas de ocorrência do Aquífero Furnas.

### *Aquífero Furnas*

O Aquífero Furnas é constituído predominantemente por arenitos médios a grossos, de idade devoniana, e, em sua porção basal, ocorrem níveis de conglomerados. Corresponde a unidade basal da Bacia Sedimentar do Paraná. Na bacia do rio Paranapanema ocorre em uma estreita faixa de no máximo 24 km de largura, entre os municípios de Ponta Grossa e Palmeira, no estado do Paraná, e nas proximidades da divisa entre os Estados de São Paulo e Paraná, na região de Sengés-PR e Itararé-SP. Abrange os planaltos de Jaguariaíva e do São Luiz do Purunã, onde predomina Cambissolos.

O aquífero é do tipo granular e em alguns locais fraturado, sendo explorado sob condição livre a confinada, com área de exposição total na bacia de 4.254,43 km<sup>2</sup> e espessura média de 200 metros. A porosidade primária do aquífero apresenta-se eventualmente reduzida em decorrência da presença de cimento de caulinita. Entretanto, a existência de estruturas rúpteis secundárias e a dissolução do cimento caulínítico por processos supergênicos atenuam este aspecto e conduzem a uma variação expressiva nas características hidráulicas e conseqüentemente nas vazões de exploração (CPRM, 2012c). Deste modo, esse sistema aquífero é em alguns casos de dupla porosidade, ou seja, a água circula entre os poros e entre as fraturas conectadas.

No Estado de São Paulo o Aquífero Furnas aflora somente na Unidade Hidrográfica de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Alto Paranapanema (UGRHI 14), onde ocupa, 3% da área total da mesma. Na área aflorante, ocorre na condição livre, sobrejacente ao embasamento cristalino, mas segue para oeste em profundidade, confinado por litologias do Grupo Tubarão.

Segundo CPRM (2012c), em São Paulo, na porção aflorante, a espessura média é de 100 m. Na porção confinada, dados de poços da ANP mostram que esse pacote rochoso pode variar de 205 metros, na parte leste (Poço 1MA1/ANP – Águas de Santa Bárbara), sob mais de 2.700 metros de espessuras de outras unidades aquíferas como o Serra Geral e Guarani, até 278 metros (Poço 2TB1/ANP – Taciba, SP), na região do Pontal do Paranapanema, sendo nesse caso sob mais de 4.400 metros de unidades aquíferas como o Bauru-Caiuá, Serra Geral, Guarani, entre outras.

No Paraná, por sua vez, a espessura média na porção não aflorante é de 230 metros, sobreposta por mais de 1.400 metros de rochas, conforme dados de poços da ANP da região de Tibagi (Poços 2O1 - Ortigueira e 1MO1/ANP – Reserva, PR). Na região de Piraponema, entretanto, o registro dos poços não chega a alcançar essa unidade aquífera em poços com mais de 4.300 metros de registro geológico.

É considerado como de produtividade baixa a média, com vazão explotável recomendada para a porção livre de até 10 m<sup>3</sup>/h (DAEE *et al.*, 2005). No SIAGAS, há o registro de apenas um poço que capta água no Aquífero Furnas no estado de São Paulo, no município de Itapira, fora dos limites da bacia do Paranapanema.

No Estado do Paraná, o Aquífero Furnas é considerado uma importante unidade aquífera sendo tratado como aquífero fraturado em que a porosidade está associada às fraturas e aos processos de dissolução de minerais. Admite-se um potencial hidrogeológico de 3,6 L/s/km<sup>2</sup> para esta unidade, definido a partir dos dados da vazão mínima por área de bacia (Q<sub>7,10</sub>/km<sup>2</sup>) cuja superfície tem como predomínio o Aquífero Furnas (AGUASPARANÁ, 2010a). Os poços que captam água nesse aquífero estão situados na parte sul de Tibagi, principalmente nos municípios de Palmeira, Ponta Grossa e Carambeí. A maioria encontra-se na área aflorante da unidade geológica e nas demais captações o aquífero Furnas é explotado sob as unidades Ponta Grossa e Itararé. A análise das informações de 110 poços tubulares cadastrados no Banco de Dados da AGUASPARANÁ revela profundidade média de 202 metros e vazão média de 20 m<sup>3</sup>/h, variável de 1,0 a 175,0 m<sup>3</sup>/h.

Considerando os poços constantes no SIAGAS tem-se como principais aspectos hidráulicos e construtivos: profundidade média de 173 metros; vazão média de 13 m<sup>3</sup>/h; nível estático variável de 1 a 142 metros, com média de 32,4 metros. A capacidade específica dos poços avaliados apresenta valores variáveis, com valor médio de 3 m<sup>3</sup>/h/m.

### *Aquífero Carste*

O Aquífero Cárstico presente na área da bacia do rio Paranapanema compreende conjunto de mármores calcíticos e dolomíticos, associados às unidades carbonáticas da Formação Água Clara, do Grupo Itaiacoca e do Subgrupo Lajeado. Ocorrem segundo faixas descontínuas de extensão lateral de 15 km. Na bacia do Paranapanema ocorre principalmente no Estado de São Paulo, entre os municípios de Ribeirão Grande e Apiaí, ocupando uma área de apenas 750 km<sup>2</sup> na bacia. No Estado do Paraná ocupa uma estreita faixa de cerca de 5 km de largura no município de Sengés. Nessa região ocorrem relevos de morros e serras alongadas, associados a Cambissolos e Argissolos.

Possui características de aquífero semiconfinado ou confinado devido à presença de coberturas e/ou espesso manto de alteração, resultando localmente em artesianismo (Mendes *et al.*, 2002). A vazão média (Q) dos poços é de 50 m<sup>3</sup>/h, com máximas de 220 m<sup>3</sup>/h ao longo de todo o aquífero. Entretanto, não há informações sobre este aquífero dentro dos limites da bacia do Paranapanema devido à escassez de poços e estudos nesta porção do aquífero.

### *Aquífero Fraturado Centro-Sul*

O Aquífero Fraturado Centro-Sul (AFCS) aflora numa estreita faixa de direção nordeste na região leste da bacia do Paranapanema. Ocupa apenas 6,8% da área desta bacia e abrange o extremo leste do Alto Paranapanema, Norte Pioneiro e Tibagi. É representado por rochas cristalinas antigas que compõem o embasamento da bacia geológica, como gnaisses, quartzitos e outras rochas metassedimentares. Ocorre em áreas dos planaltos de Castro, do Alto Jaguariaíva, e a leste apresenta relevo de morros. Registra-se a ocorrência de Cambissolos, Latossolos, além de Argiloso Vermelho Amarelo na região paulista de afloramento.

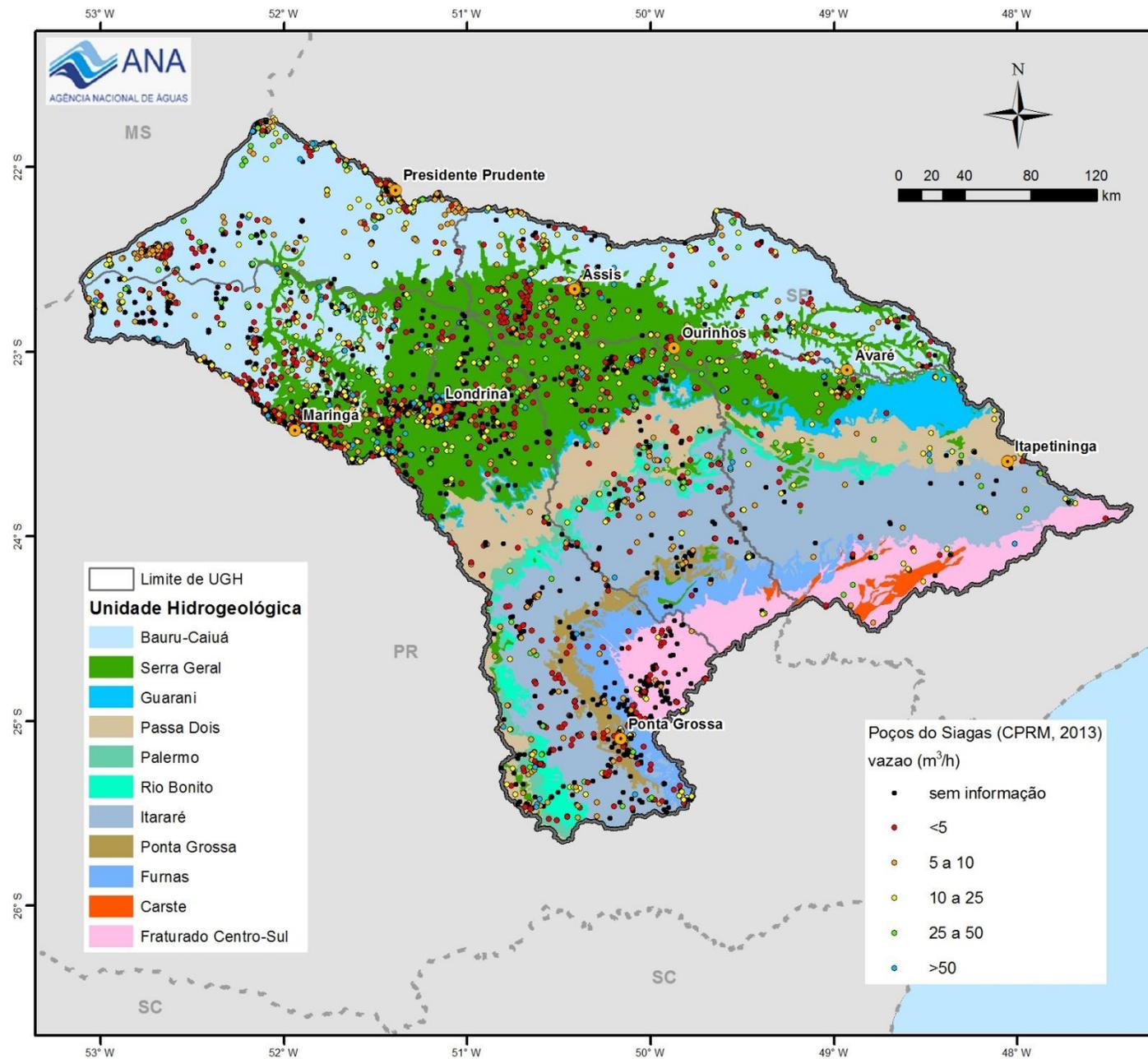
Em São Paulo, o Aquífero Fraturado Centro-Sul é constituído por rochas metamórficas pré-cambrianas, abrangendo a parte leste dos municípios de Piedade, Pilar do Sul até Apiaí. Nessa região é pouco utilizado. Já na porção paranaense da bacia abrange os municípios de Castro, Piraí do Sul e Jaguariaíva. Em geral possui baixo potencial de produção, porém, possui importância hidrogeológica local.

O Aquífero Castro, individualizado no Mapa de Áreas Aflorantes dos Aquíferos (ANA, 2013) está neste trabalho integrado com o AFCS no Mapa de Aquíferos da bacia do Paranapanema. Trata-se de um aquífero predominantemente fraturado constituído de uma sequência de rochas vulcânicas ácidas a intermediárias, e subordinadamente uma associação sedimentar inferior composta de conglomerados, seguida de arcósios, siltitos, lamitos, localmente com contribuições vulcânicas. Não há informações hidrogeológicas sobre este aquífero na bacia.

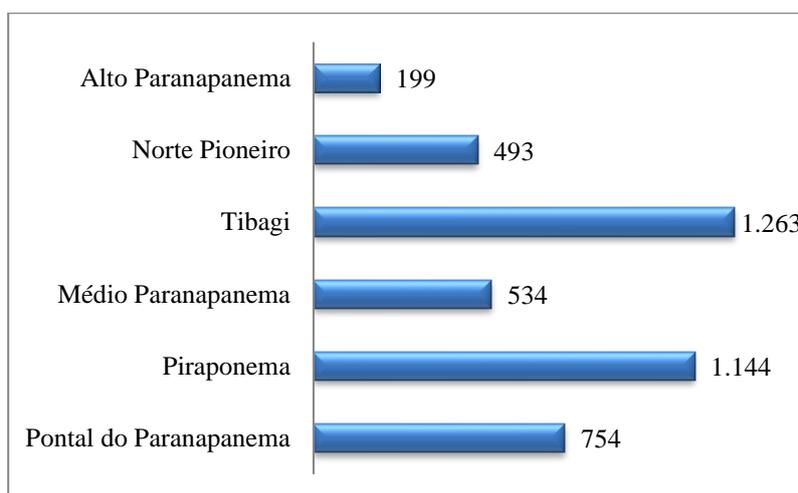
## **2.2. CADASTRO DE POÇOS E OUTORGAS DE DIREITO DE USO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NA BACIA DO RIO PARANAPANEMA**

O Mapa de Distribuição de Poços da bacia do Paranapanema foi elaborado a partir dos poços cadastrados no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) do Serviço Geológico do Brasil (CPRM), atualizado em maio de 2014 (**Figura 2.3**).

Em toda a bacia foram localizados 4.387 poços nesse cadastro, onde cerca de 34% estão no Estado de São Paulo e 66% no Paraná. As Unidades de Gestão com o maior número de poços cadastrados no SIAGAS são Tibagi (1.263 poços) e Piraponema (1.144 poços), somando mais de 50% dos poços cadastrados na bacia (**Figura 2.4**).

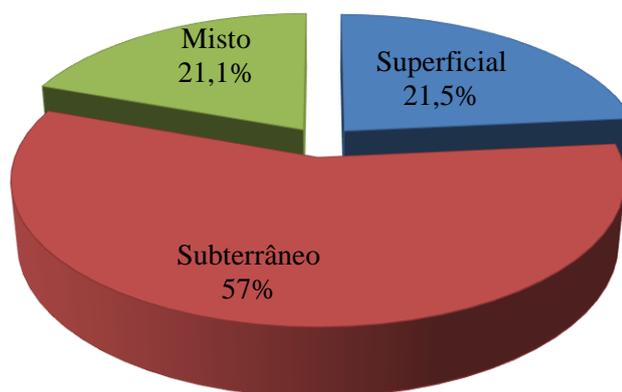


**Figura 2.3-** Mapa de distribuição de poços do SIAGAS.



**Figura 2.4** – Número de poços tubulares no cadastro do SIAGAS na bacia do Paranapanema por Unidade de Gestão Hidrográfica (UGH).

Dos 247 municípios da bacia apenas três apresentam densidade de poços próxima a 1 poço/km<sup>2</sup>, considerando a área do município contida na bacia, dentre os quais se destacam: Presidente Prudente (SP), Maringá (PR) e Sarandi (PR). Dentre os municípios situados total ou parcialmente dentro da bacia, a maioria (57%) utiliza a água subterrânea como fonte exclusiva de abastecimento público (ANA, 2010), 21,1% utilizam fontes mistas de abastecimento (superficial e subterrânea) e os demais (21,5%) fontes superficiais (**Figura 2.5**).



**Figura 2.5** – Percentual de utilização de mananciais subterrâneos, superficiais e mistos nos sistemas de abastecimento público nos municípios da Bacia do Paranapanema. Fonte: ANA (2010).

A despeito da maioria dos municípios utilizarem a água subterrânea como fonte exclusiva de abastecimento público, a maioria dos poços presentes na bacia são dedicados ao abastecimento de particulares.

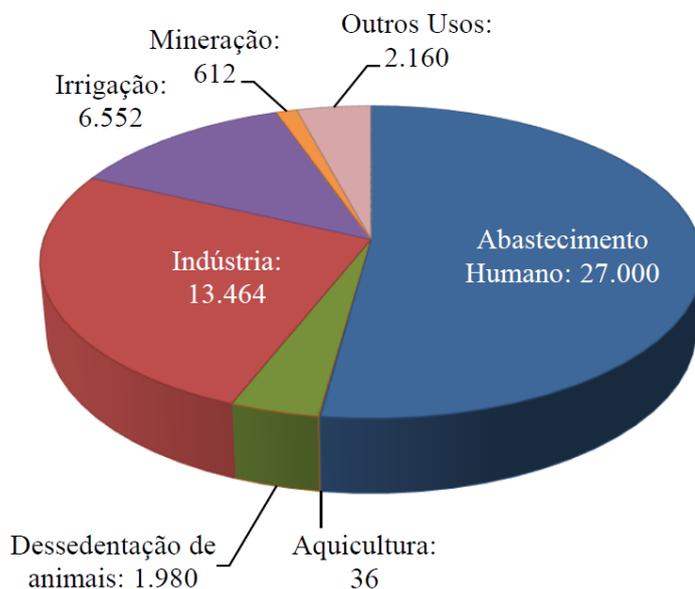
Entre os aquíferos presentes na bacia a maior quantidade de poços localizados está na área de afloramento do Sistema Aquífero Serra Geral, seguido do Bauru-Caiuá, embora considerando a sequência estratigráfica das unidades geológicas, muitos poços localizados na área de afloramento de um determinado aquífero, podem estar captando água em outro aquífero subjacente.

Em considerando as outorgas de águas subterrâneas na bacia, o cadastro dos estados contém 3.521 vigentes até junho de 2014 (para São Paulo) e 2013 (para o Paraná). Essas outorgas somam cerca de 51 mil m<sup>3</sup>/h. Nesse cadastro o Estado de São Paulo dispunha de 1.894 outorgas, destacando-se em número de outorgas os municípios de Presidente Prudente (232), Euclides da Cunha Paulista (198), Rosana (112) e Itapetininga (97). No Paraná as 1.627 outorgas somam mais

de 24 mil m<sup>3</sup>/h, onde os municípios de Londrina (156), Maringá (131) e Ponta Grossa (89) sobressaem em número de outorgas e vazão outorgada.

Dentre os usos mais comuns outorgados destacam-se o abastecimento humano e o uso na indústria (**Figura 2.6**).

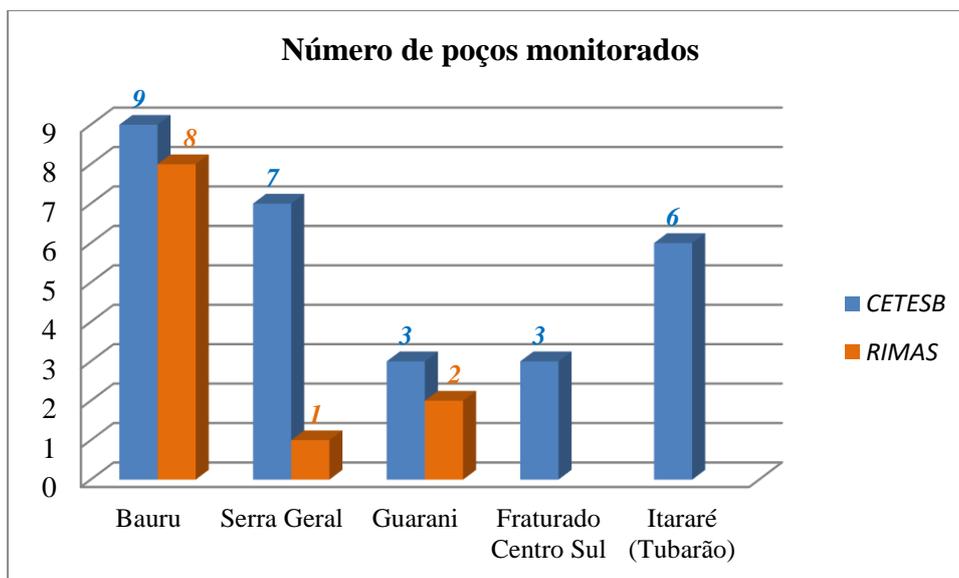
### Usos da água subterrânea outorgados (m<sup>3</sup>/h)



**Figura 2.6** – Representação dos usos da água subterrânea em vazão outorgada (m<sup>3</sup>/h) na Bacia do Paranapanema.

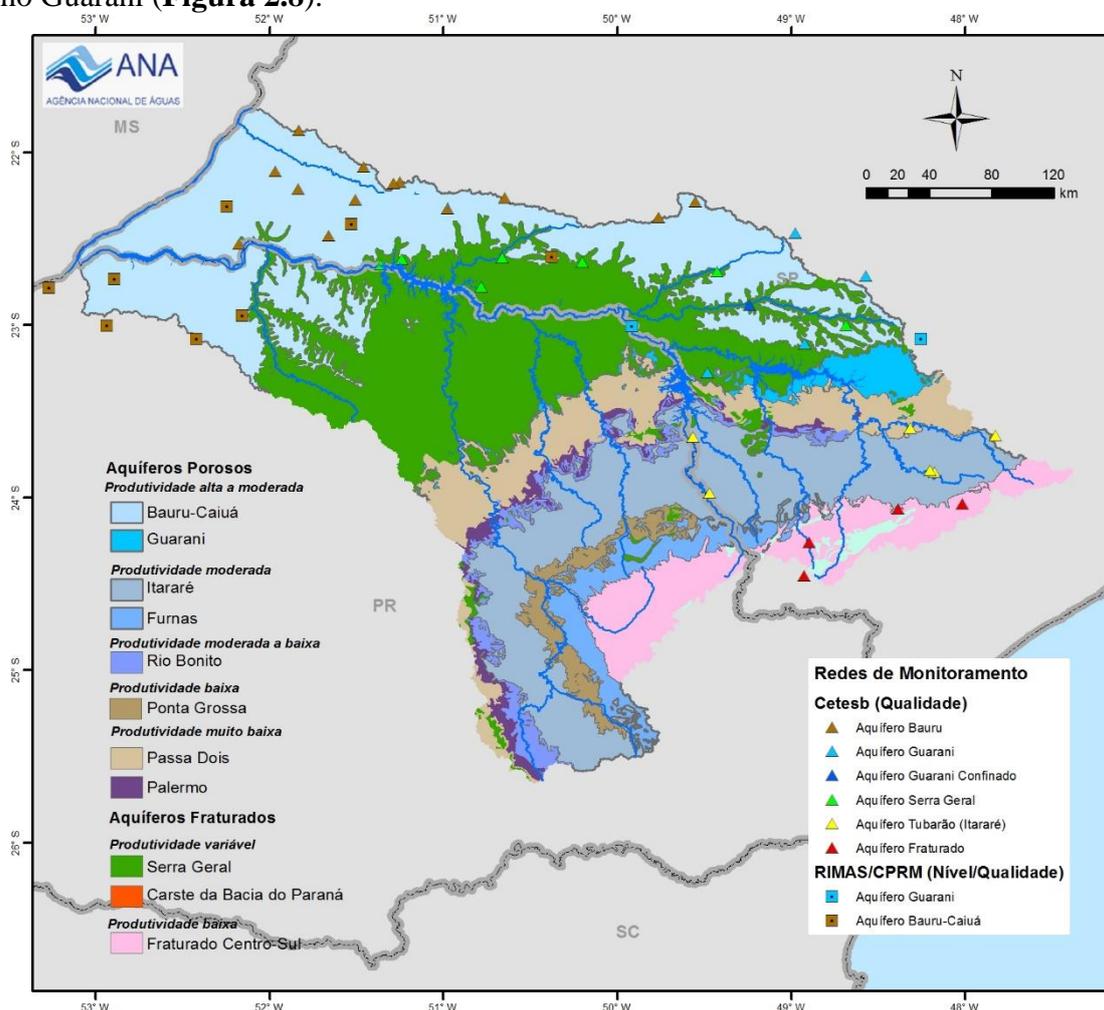
## 2.3.QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NA BACIA DO RIO PARANAPANEMA

O panorama da qualidade das águas subterrâneas na bacia do Paranapanema apresentado a seguir foi baseado em dados colhidos pela rede de monitoramento da CETESB (Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental) em São Paulo, e pela RIMAS (Rede de Monitoramento Integrado das Águas Subterrâneas) do Serviço Geológico Brasileiro (CPRM), que possui poços em São Paulo e no Paraná (**Figura 2.7**).



**Figura 2.7** – Representação do número de poços monitorados nos aquíferos da Bacia do Rio Paranapanema nas redes da CETESB e RIMAS.

A rede de monitoramento da CETESB conta com 35 poços, a qual monitora os aquíferos Bauru (Bauru-Caiuá: 13 poços), Guarani (5 poços), Serra Geral (7 poços), Tubarão (Itararé: 6 poços) e Fraturado Centro-Sul (4 poços). A RIMAS, por sua vez, monitora automaticamente o nível d'água e a qualidade em onze poços na Bacia e adjacências, sendo sete no Bauru-Caiuá e dois no Guarani (**Figura 2.8**).



**Figura 2.8** – Representação dos poços da rede de monitoramento de águas subterrânea da CETESB e RIMAS na bacia do Paranapanema.

### *Rede de Monitoramento CETESB*

O Relatório da CETESB de 2013, consultado como referência para este trabalho, apresenta os resultados do monitoramento da Rede de Qualidade das Águas Subterrâneas para o triênio 2010-2012 e os primeiros resultados da Rede de Monitoramento Integrado de Qualidade e Quantidade, operada em parceria com DAEE, e constituída por poços dedicados ao monitoramento dos aquíferos freáticos na área de afloramento do Bauru e Guarani, que se iniciou no segundo semestre de 2009. Foram consultados os resultados dos 35 poços monitorados na bacia do rio Paranapanema e adjacências.

Os resultados publicados no relatório foram obtidos por meio de campanhas sistemáticas de amostragem. Os dados foram tratados e interpretados estatisticamente para o triênio. Destas informações é possível determinar as características geoquímicas basais das águas, bem como avaliar as variações de qualidade e tendências, comparando-se com os resultados de campanhas anteriores.

Os resultados analíticos são agrupados em função dos sistemas aquíferos monitorados. É realizada a análise estatística descritiva de todos os parâmetros. As informações são tabuladas por aquífero para o Estado e para as UGRHI nas quais os pontos de monitoramento se localizam.

Os parâmetros analisados para caracterização química e avaliação da qualidade da água subterrânea bruta no período de 2010 a 2012 foram:

- Parâmetros Físicos: temperatura, sólidos dissolvidos totais e sólidos totais.
- Parâmetros Químicos: pH, alcalinidade bicarbonato, alcalinidade carbonato, alcalinidade hidróxido, condutividade elétrica, dureza total, nitrogênio nitrato, nitrogênio nitrito, nitrogênio amoniacal total, nitrogênio Kjeldhal total, carbono orgânico dissolvido, cloreto, fluoreto, sulfato e as concentrações totais de alumínio, arsênio, bário, berílio, boro, cádmio, cálcio, cobre, chumbo, cobalto, cromo, estanho, estrôncio, ferro, lítio, magnésio, manganês, níquel, potássio, sódio, titânio, vanádio e zinco.
- Parâmetros Microbiológicos: bactérias heterotróficas, *Escherichia Coli*, coliformes totais e bacteriófagos F-específicos.
- Atividade estrogênica: a partir de 2011 foi iniciada a avaliação dos interferentes endócrinos, por meio da determinação da atividade estrogênica. Interferentes endócrinos são compostos que possuem a capacidade de interferir na produção ou ação dos hormônios, podendo causar danos ao sistema reprodutor e imunológico de organismos superiores, especialmente organismos aquáticos. Estes compostos podem atingir os mananciais subterrâneos pela contaminação com esgoto doméstico ou pela percolação de pesticidas ou outros compostos aplicados no solo.

Do ponto de vista do controle de poluição das águas subterrâneas alguns instrumentos legais são utilizados para avaliar a evolução da sua qualidade. A Portaria do Ministério da Saúde nº 2.914 de 12/12/2011 estabelece os padrões de qualidade da água para o consumo humano, que são fixados com base em risco à saúde humana e, em alguns casos, em características organolépticas da água, conforme orientação da Organização Mundial da Saúde (OMS). A Lista de Valores Orientadores para Solos e Águas Subterrâneas (CETESB, 2005), que objetiva estabelecer critérios para proteção da qualidade dos solos e águas subterrâneas, foi publicada pela CETESB em 2001 e revisada e ampliada em 2005, sendo utilizada no gerenciamento de áreas contaminadas. Para as águas subterrâneas foram adotados apenas os valores de intervenção – VI, que indicam as concentrações máximas de determinadas substâncias acima das quais existe potencial de risco à saúde humana em um cenário genérico, enquanto para os solos foram também adotados os valores de referência de qualidade – VRQ e valores de prevenção – VP.

Os valores de referência de qualidade para águas subterrâneas foram publicados no Relatório de Qualidade das Águas Subterrâneas 2004–2006, para cada um dos sistemas aquíferos do Estado de São Paulo (CETESB, 2007).

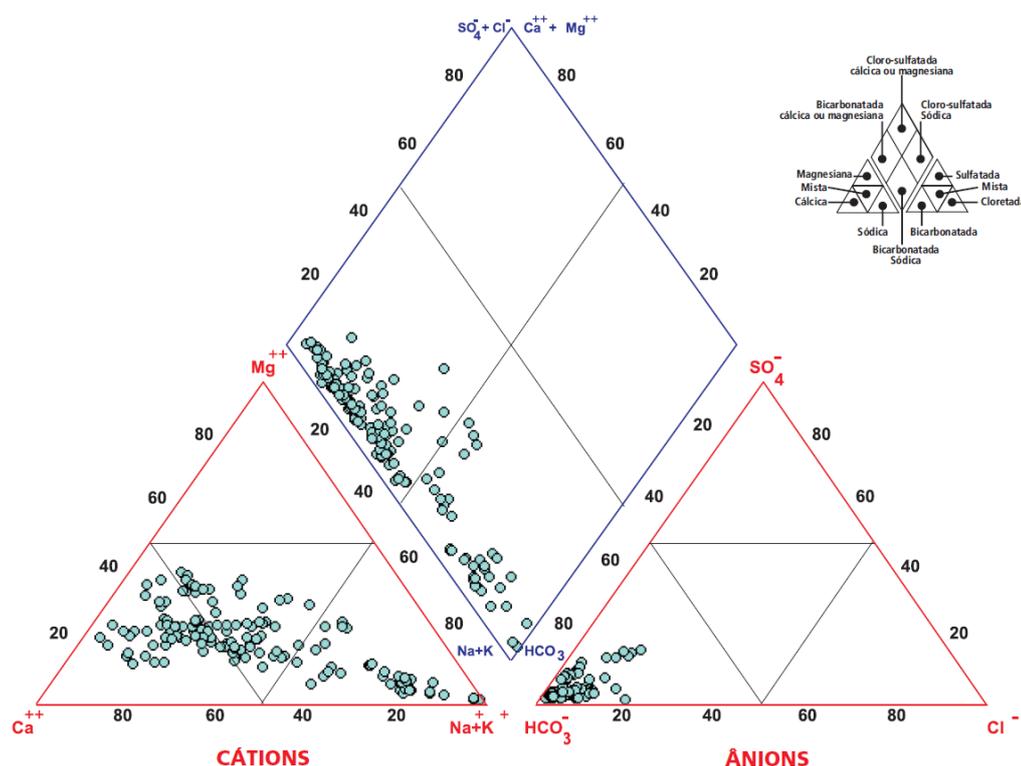
### *Qualidade das águas subterrâneas na bacia do Paranapanema no Estado de São Paulo*

A caracterização hidroquímica dos aquíferos é realizada por meio da síntese dos resultados do monitoramento no período de 2010 a 2012, com a descrição estatística das concentrações máxima e mínima, a mediana e o 3º quartil de cada parâmetro, e da classificação das águas quanto ao íon dominante, realizada a partir de Diagramas de Piper.

- *Aquífero Bauru (Bauru-Caiuá)*

Segundo a CETESB (2013), o Diagrama de Piper as águas do Aquífero Bauru pertencem a dois tipos hidroquímicos, as bicarbonatadas cálcicas e cálcio-magnésiana, que predominam, e as bicarbonatadas sódicas secundariamente (Figura 3.3). São, de modo geral, bicarbonatadas,

fracamente salinas, com condutividade elétrica inferior a 300  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , resíduo seco a 180°C inferior a 250 mg/L e sulfato inferior a 10 mg/L, com pH variando de 5,4 a 9,7.



**Figura 2.9** – Classificação das águas do Aquífero Bauru em São Paulo, segundo o Diagrama de Piper (CETESB, 2013).

O monitoramento das águas subterrâneas realizado em São Paulo pela CETESB tem evidenciado incremento nas concentrações de nitrato nas águas do Aquífero Bauru, ao longo do tempo e espaço, frente aos padrões de ocupação urbana, especialmente, nos municípios de Marília e Presidente Prudente. Um exemplo foi o estudo hidroquímico das águas subterrâneas na área urbana de Marília, que apresentou concentração de nitrato acima do Valor de Alerta (5 mg/L  $\text{N-NO}_3^-$ ) estabelecido pela CETESB e alguns, acima do padrão de potabilidade (até 16,9 mg/L  $\text{N-NO}_3^-$ ). As maiores concentrações deste contaminante foram observadas, principalmente, nos bairros mais antigos da cidade (zona central), com maior adensamento urbano. Isso sugere a vinculação entre o processo de urbanização e a carga de nitrato presente no aquífero, cuja origem provavelmente está associada às antigas fossas e vazamentos das redes coletoras de esgoto (Varnier *et al.*, 2010).

Mendes *et al.* (2002) avalia que em praticamente toda a sua área de ocorrência no Paraná, as águas do Aquífero Caiuá caracterizam-se como de ótima qualidade para o consumo humano por apresentar baixa incorporação mineral, refletindo em valores de STD em torno de 50 mg/L, pH entre 5,0 e 6,5 e teores de potássio superiores aos de sódio. A composição química resulta em águas que atendem os padrões de potabilidade, classificadas como bicarbonatadas cálcicas a mistas.

No Estado do Paraná, Celligoi & Duarte (2002) classificaram as águas desse aquífero como bicarbonatadas cálcicas ou cálcio-magnesianas, mais raramente sódicas, constatando que tal composição coaduna-se relativamente com a tipologia química para águas desse aquífero. Os valores médios dos íons principais demonstraram que as águas provenientes do Aquífero Caiuá no Paraná são, geralmente, menos mineralizadas que as dos basaltos da Formação Serra Geral.

O monitoramento de qualidade das águas do Aquífero Bauru no triênio 2010 a 2012 (CETESB, 2013) na porção paulista da bacia do Paranapanema foi feito em nove poços (**Tabela 2.4**). De um modo geral que essas águas apresentaram distinções de suas características encontrando-se variação dos resultados para pH, condutividade elétrica e sódio. Também foram

encontradas concentrações pontuais excessivas em desconformidade com os padrões para cloreto e nitrato (BA 0100P - Pirapozinho - P6, SABESP - UGRHI 22), crômio, fluoreto e, ainda de bário, sódio.

**Tabela 2.4** – Poços da rede de monitoramento da CETESB para o Aquífero Bauru em São Paulo, na bacia do Paranapanema (Período 2010 a 2012).

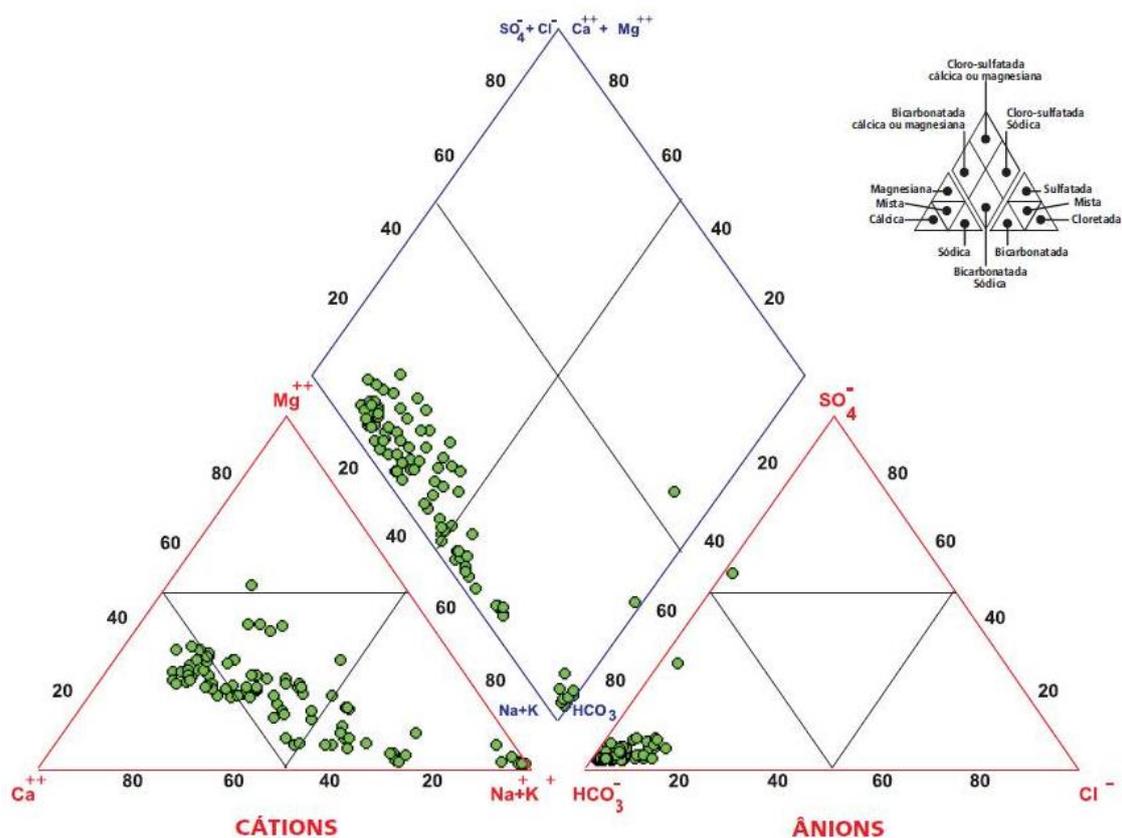
UGRHI	Município	Ponto	Descrição	Aquífero	Profundidade de captação (m)	Nível Estático (m)
17	Gália	BA0041P	P2 - Sabesp	Bauru	132 a 194	13
17	Rancharia	BA0108P	Balneário DAEE/ Prefeitura	Bauru	28 a 93	22
22	Estrela do Norte	BA0037P	P2 - Sabesp	Bauru	56 a 162	84
22	Pirapozinho	BA0100P	P6 - Sabesp	Bauru	59 a 219	13
22	Presidente Venceslau	BA0106P	DAEE/ Prefeitura Reservatório Vila Sumaré	Bauru	141 a 233	74
22	Teodoro Sampaio	BA0144P	P5 - Sabesp	Bauru	78 a 150	70
22	Regente Feijó	BA0188P	P17 - Sabesp	Bauru	85 a 269	90
22	Marabá Paulista	BA0255P	P4 - Sabesp	Bauru	64 a 194	54
22	Mirante do Paranapanema	BA0258P	P2 - Sabesp	Bauru	53 a 152	29

- *Aquífero Serra Geral*

Em CETESB (2013), a classificação das águas subterrâneas do aquífero Bauru no estado de São Paulo, segundo o diagrama de Piper indica que as águas desse aquífero são preponderantemente bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas e, secundariamente, bicarbonatadas sódicas (**Figura 2.10**).

No Paraná, de acordo com Mendes *et al.* (2002), as águas tipicamente pertencentes ao Sistema Aquífero Serra Geral possuem características físico-químicas que as classificam como bicarbonatada cálcica a bicarbonatada cálcica-magnesiana. As concentrações de STD quase sempre são inferiores a 170 mg/L e raramente se observa o íon fluoreto, que é o caso de Itambaracá, no norte do estado, que impedem o aproveitamento do aquífero para abastecimento público.

Spiller (2005) ao avaliar as águas do Sistema Aquífero Serra Geral em 79 poços do Estado de São Paulo, interpretou que o pH varia de 5,8 a 7,9, onde os valores de pH > 9 ocorrem em poços de basalto estão relacionados com presença de fraturas horizontais, brechas basálticas com amígdalas cristalizadas com zeólitas, fluorita, calcita, quartzo, calcedônia e malaquita. A condutividade elétrica varia de 20 a 200  $\mu\text{S}/\text{cm}$  em poços com fraturas subverticais e baixas vazões, ou de 60 a 450  $\mu\text{S}/\text{cm}$  em poços com fraturas horizontais, com alcalinidade dupla e presença de minerais. Esse autor concluiu que a presença do basalto vesículo-amígdoloidal associado a minerais cristalizados durante o resfriamento da lava são indicativos de uma anomalia hidrogeoquímica, com alteração de parâmetros como pH, condutividade elétrica, alcalinidade, dureza, fluoreto, entre outros.



**Figura 2.10** – Classificação das águas do Sistema Aquífero Serra Geral em São Paulo, segundo o Diagrama de Piper (CETESB, 2013).

Para AGUASPARANÁ (2010b), o pH varia entre 6,6 a 7,2 e a dureza gira em torno de 40 mg de  $\text{CaCO}_3/\text{l}$ . O teor médio de cálcio é 9 mg/L. As concentrações de magnésio variam de 3,5 a 6,5 mg/L; as de sódio, entre 1,2 a 3,7 mg/L; e, as de potássio, entre 1,5 a 3 mg/L. O teor médio de bicarbonato é 38 mg/L, o de cloreto, 1,5 mg/L e o de sulfato, 2,5 mg/L. A grande problemática sobre a qualidade das águas desse sistema aquífero está associada à proximidade de poços sem revestimento que seccionaram o Sistema Aquífero Guarani. Nesses casos, é comum se observar uma tipologia de água misturada, inclusive com teores de sódio e potássio ultrapassando teores de cálcio e magnésio. Concentrações de ferro total acima do VMP são frequentes.

No monitoramento da CETESB para o triênio 2010 a 2012 (CETESB, 2013), por sua vez, as águas do Sistema Aquífero Serra Geral, avaliado em sete poços (Tabela 3.2), nas UGRHs 17 e 22, mostram de modo geral águas pouco mineralizadas. Para os elementos alumínio, boro e chumbo as concentrações máximas ultrapassaram os valores máximos permitidos. Também foram encontradas pontualmente concentrações de nitrato acima do valor de prevenção da CETESB de 5 mg N/L, na UGRH 17 (SG 0244 P –Espírito Santo do Turvo) e na UGRH 22 (SG 0261 P - Nantes - P1, Prefeitura).

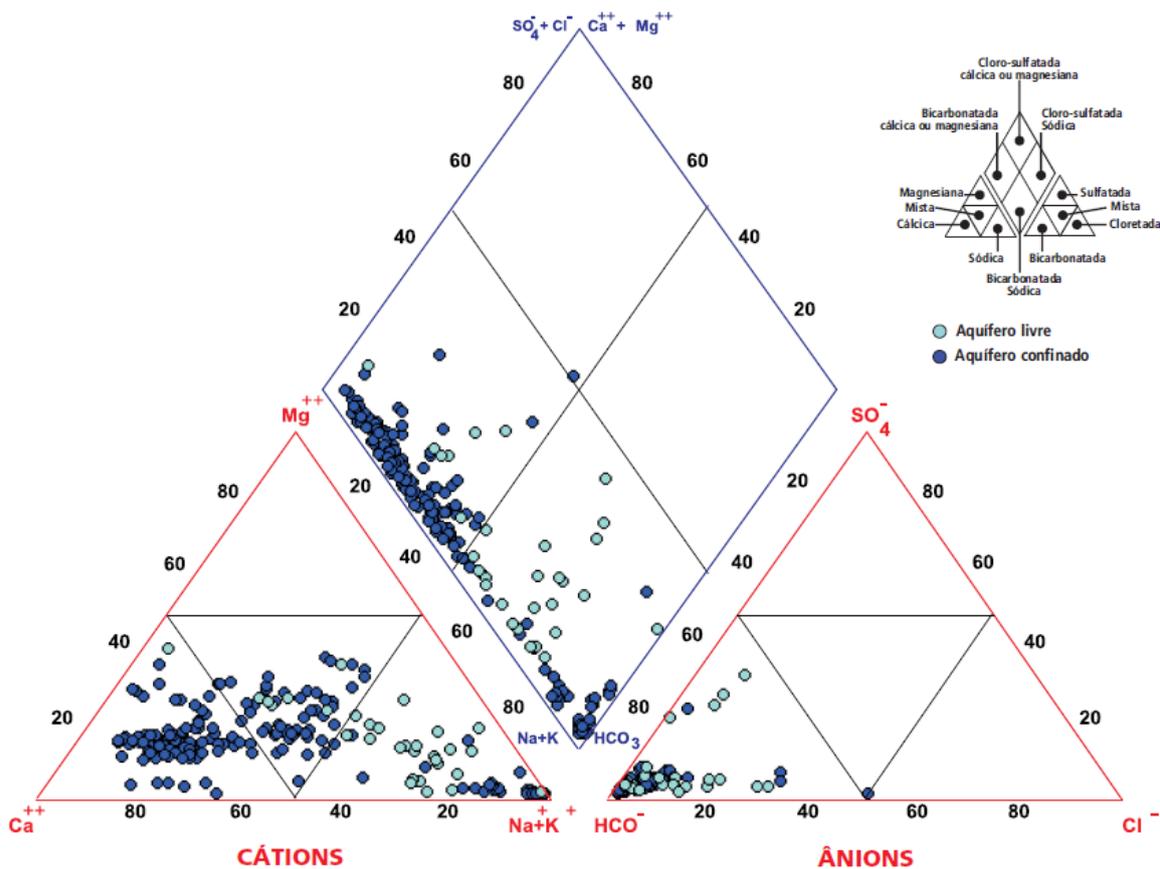
**Tabela 2.5** – Poços da rede de monitoramento da CETESB para o Sistema Aquífero Serra Geral em São Paulo, na bacia do Paranapanema (Período 2010 a 2012).

UGRHI	Município	Ponto	Descrição	Aquífero	Profundidade de captação (m)	Nível Estático (m)
17	Cruzália	SG0239P	P3 - Sabesp - Pedrinhas	Serra Geral	6 a 120	2
17	Espírito Santo do Turvo	SG0244P	P2 - Sabesp - Espírito Santo do Turvo	Serra Geral	32 a 150	4
17	Itatinga	SG0250P	P1 - Sabesp Junto à antiga estação Sorocabana - Lobo	Serra Geral	31 a 70	36
17	Maracaí	SG0256P	P1 - Sabesp. Próximo ao Ribeirão do Corvo	Serra Geral	13 a 65	5
17	Platina	SG0268P	P1 - Sabesp - Sede	Serra Geral	15 a 74	1
22	Nantes	SG0261P	P1 - Prefeitura	Serra Geral	20 a 200	*
22	Taciba	SG0284P	Usina Capivara	Serra Geral	12 a 100	15

- *Aquífero Guarani*

Segundo a classificação dada pelo Diagrama de Piper em CETESB (2013), as águas do Sistema Aquífero Guarani em São Paulo são predominantemente bicarbonatadas cálcicas ou bicarbonatadas mistas e, secundariamente, bicarbonatadas sódicas, conforme **Figura 2.11**. Observa-se também a presença de água classificada como clorossulfatada cálcica ou magnesiânica.

De acordo com Campos (1993), no Estado de São Paulo, as águas do Sistema Aquífero Guarani são predominantemente bicarbonatadas cálcicas e apresentam temperaturas de 22 a 27°C, pH de 5,4 a 9,2 e salinidade inferior a 50 mg/L, na área aflorante. Na área confinada, a temperatura varia de 22 a 59,7°C, o pH de 6,3 a 9,8 e a salinidade de 50 a 500 mg/L. As águas são predominantemente bicarbonatadas cálcicas e bicarbonatadas sódicas e, subordinadamente, sulfatadas – cloretadas sódicas. Os valores de temperatura, pH, salinidade, e de íons cloreto, sulfato e sódio, aumentam no sentido do confinamento.



**Figura 2.11** – Classificação das águas do Sistema Aquífero Guarani em São Paulo, segundo o Diagrama de Piper (CETESB, 2013).

Para AGUASPARANÁ (2010b), no Estado do Paraná, nas áreas de baixo confinamento, as águas são bicarbonatadas com predominância de cálcio e magnésio (águas doces), nas áreas de médio confinamento as águas adquirem uma variação entre bicarbonatadas e sulfatadas com predominância de sódio e potássio (sólidos totais acima de 500 mg/L) e nas áreas de alto confinamento, as águas são sulfatadas cloretadas, com sódio e potássio, onde os sólidos totais dissolvidos apresentam teores acima de 1.000 mg/L; nesses casos, as águas são salobras e não são adequadas ao consumo humano na sua condição de água bruta. As temperaturas da água variam entre 23 a 68°C em função do grau de confinamento, aumentando de leste para oeste em direção ao rio Paraná

O mesmo trabalho define que no Estado do Paraná as águas do Sistema Aquífero Guarani possuem idades que variam de 10 mil a 30 mil anos, determinadas por análises isotópicas de Carbono-14 de amostras coletadas em poços penetrantes nas zonas de alto confinamento. A média de STD é 125 mg/L e a sua variação é de 19 a 312 mg/L. O valor médio da dureza é 56 mg/L de CaCO<sub>3</sub> e varia entre 3 e 189 mg/L. O pH varia de 5,6 a 9,5, sendo 7,0 o valor da média. Os poços, cujas águas apresentam pH em torno de 7 localizam-se próximos à zona de recarga ou sofrem influência das águas do Sistema Aquífero Serra Geral sobrejacente. A presença de íon fluoreto foi detectada em apenas 21 poços. Os teores variam de 0,1 mg/L a 0,6 mg/L, sendo que a média é igual a 0,25 mg/L.

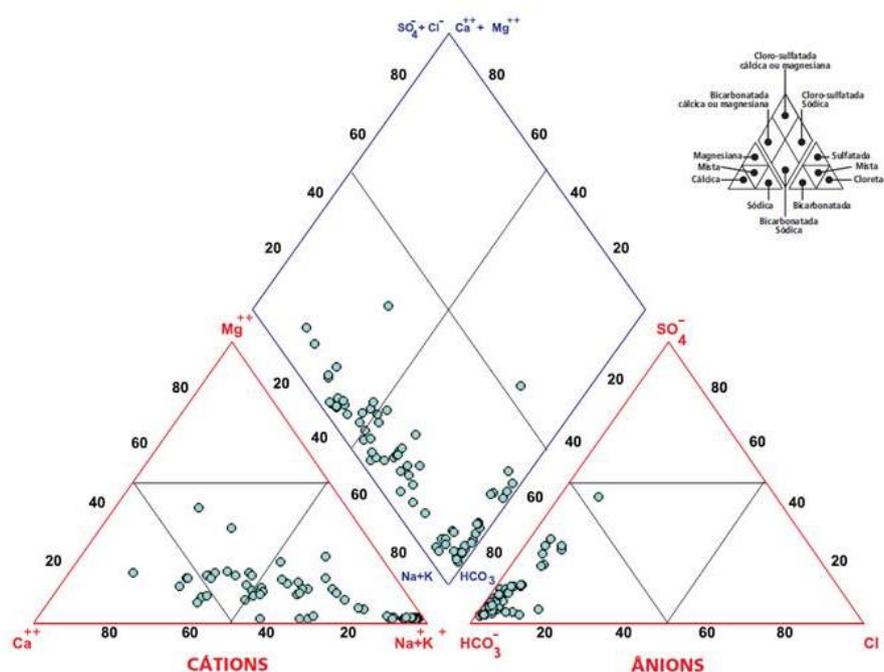
O monitoramento da CETESB, no período 2010 a 2012, de três poços no Sistema Aquífero Guarani em São Paulo (**Tabela 3.3**) mostram para o Sistema Aquífero Guarani águas fracamente salinas, com variação de resultados para pH e sódio. Para o elemento boro as concentrações máximas determinadas ultrapassaram o VMP estabelecido para esse elemento, em duas campanhas no poço da sua porção confinada.

**Tabela 2.6** – Poços da rede de monitoramento da CETESB para o Sistema Aquífero Guarani em São Paulo, na bacia do Paranapanema (Período 2010 a 2012).

UGRHI	Município	Ponto	Descrição	Aquífero	Profundidade de captação (m)	Nível Estático (m)
14	Sarutaiá	GU0136P	P1 - Sabesp	Guarani	71 a 141	8
17	Águas de Santa Bárbara	GU0225P	P2 - Sabesp - Sede - Ao lado do ginásio de esportes	Guarani Confinado	246 a 351	37
17	Avaré	GU0011P	P6 - Sabesp	Guarani	280 a 419	172

- *Aquífero Itararé (Tubarão)*

Segundo a classificação apresentada em CETESB (2013) as águas desse aquífero apresentam-se preponderantemente como bicarbonatadas sódicas e, subordinadamente, como bicarbonatadas cálcicas e cloro-sulfatadas sódicas (**Figura 2.12**). Em São Paulo, as águas desse aquífero, apresentam, de forma geral, boa qualidade para consumo humano e outros usos diversos usos (IG, 2011).



**Figura 2.12** – Classificação das águas do Aquífero Itararé (Tubarão) em São Paulo, segundo o Diagrama de Piper (CETESB, 2013).

Os seis poços monitorados no período 2010 a 2012 pela CETESB (**Tabela 2.7**) situam-se na UGRH 14 (Alto Paranapanema). Os resultados obtidos mostram que nesses seis poços da bacia as águas do Aquífero Tubarão variam de doces a fracamente salinas, sendo que nesse triênio o pH variou de 6,4 a 9,2. Os elementos para os quais foram detectadas desconformidades são boro, chumbo, ferro, fluoreto, manganês e sódio, apenas no ponto TU 0247P - Itapetinga - P1, SABESP.

**Tabela 2.7** – Poços da rede de monitoramento da CETESB para o Aquífero Itararé (Tubarão) em São Paulo, na bacia do Paranapanema (Período 2010 a 2012).

UGRHI	Município	Ponto	Descrição	Aquífero	Profundidade de captação (m)	Nível Estático (m)
14	Barão de Antonina	TU0230P	P4 - Sabesp - Sede - Margem esquerda da Água dos Pedrocas	Tubarão	*	7
14	Itapetininga	TU0055P	P2 - Sabesp	Tubarão	10 a 224	35
14	Itapetininga	TU0247P	P1 - Sabesp - Bairro Rechan	Tubarão	18 a 203	4
14	Itararé	TU0249P	P2 - Sabesp - Santa Cruz dos Lopes	Tubarão	18 a 288	73
14	São Miguel Arcanjo	TU0132P	P1A - Sabesp Pocinhos	Tubarão	30 a 59	0

- *Aquífero Furnas*

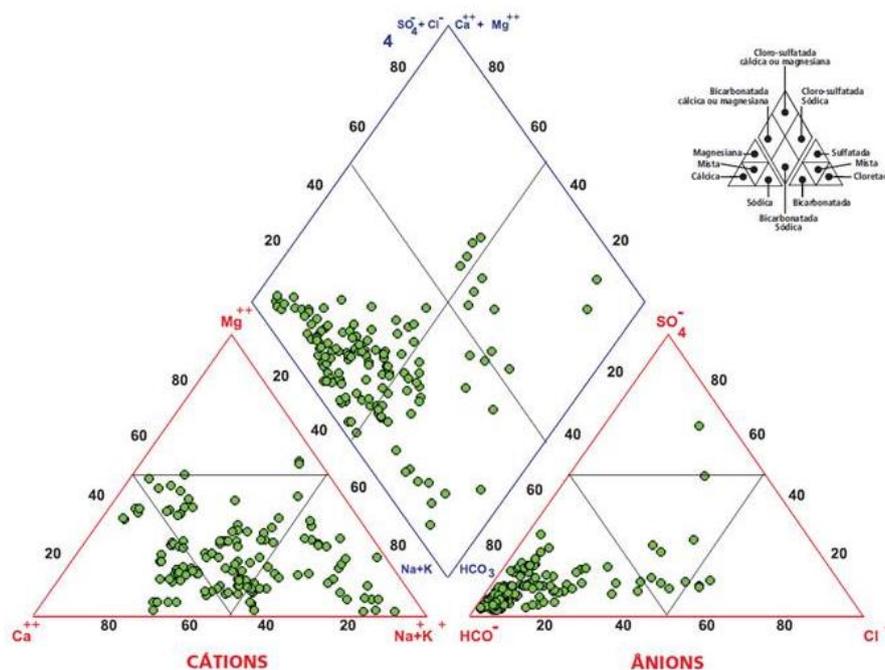
No Estado de São Paulo, estudo realizado na bacia hidrográfica do Alto Paranapanema (UGRHI 14) avaliou a vulnerabilidade do Aquífero Furnas de acordo com a profundidade do nível da água (IG, CETESB e DAEE, 1997): grau médio a alto em regiões com nível d'água pouco profundos, entre 10 e 50 metros e grau baixo-médio em áreas com nível d'água acima de 100 metros de profundidade.

No Estado do Paraná, por sua vez, o maior risco de contaminação ocorre no município de Ponta Grossa, onde o aterro municipal Botuquara está instalado sobre a área de exposição do aquífero (AGUASPARANÁ, 2010a).

- *Aquífero Fraturado Centro-Sul (Pré-Cambriano)*

A **Figura 2.13** mostra a predominância nesse aquífero de águas bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas e, subordinadamente bicarbonatadas sódicas. Também ocorrem águas cloro-sulfatadas sódicas e cloro-sulfatadas cálcicas ou magnesianas (CETESB, 2013).

Os três poços monitorados na bacia estão relacionados na **Tabela 2.8**. De um modo geral, as águas desse aquífero são pouco salinizadas. Verificou-se nos três poços concentrações de nitrogênio nitrato acima do valor de referência de qualidade (VRQ).



**Figura 2.13** – Classificação das águas do Aquífero Fraturado Centro- Sul (Pré-Cambriano) em São Paulo, segundo o Diagrama de Piper (CETESB, 2013).

**Tabela 2.8** – Poços da rede de monitoramento da CETESB para o Aquífero Fraturado Centro-Sul (Pré-Cambriano) em São Paulo, na bacia do Paranapanema (Período 2010 a 2012).

UGRHI	Município	Ponto	Descrição	Aquífero	Profundidade de captação (m)	Nível Estático (m)
14	Capão Bonito	PC0238P	P1 - Sabesp - Terreno do Sr. João Cezario Mendes - Ferreira dos Matos	Pré-Cambriano	35 a 60	1
14	Ribeirão Branco	PC0271P	P1 - Sabesp - Margem do rio Taquari-Guaçu - Itaboa	Pré-Cambriano	96 a 135	4
14	São Miguel Arcanjo	PC0131P	P1 - Sabesp Abaitinga	Pré-Cambriano	24 a 151	2

Por outro lado, esse aquífero apresenta alguns parâmetros com resultados desconformes. São encontradas concentrações elevadas para chumbo, manganês, nitrato (nos três poços e em todas as campanhas) e zinco.

#### *Rede Integrada de Monitoramento de Águas Subterrâneas (RIMAS)*

A Rede Integrada de Monitoramento de Águas Subterrâneas (RIMAS) operada e coordenada pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM) é de natureza fundamentalmente quantitativa, com registro automático das variações de nível d'água (NA). Na concepção dessa rede, entretanto, há um sistema de alerta de qualidade com medições semestrais da condutividade elétrica, pH, potencial de oxi-redução além parâmetros mínimos fixados pela Resolução CONAMA 396/2008 para o monitoramento das águas subterrâneas. Na instalação do poço de observação e a cada cinco anos, ou ainda em casos em que se verifique, a partir dos parâmetros

indicadores, variação significativa na química da água, são feitas coletas para análises físico-químicas completas.

Essa rede monitora onze poços na bacia do rio Paranapanema e adjacências, sendo oito no Sistema Aquífero Bauru-Caiuá (3 em SP e 5 no PR), dois no Guarani (1 em SP e 1 no PR) e um poço no Serra Geral. Os poços foram consultados em agosto de 2014 no SIAGAS (Sistema de Informações de Águas Subterrâneas) da CPRM (**Tabela 2.9**).

Os registros dos poços de monitoramento dispõem da última análise química realizada no poço, o monitoramento da variação do nível d'água e da condutividade elétrica, com exceção do poço instalado no Serra Geral, em Cabrália Paulista (3500034018), que foi recentemente instalado (julho/2014) e, portanto, ainda não dispõe dessas informações no sistema. A variação do nível de água dos poços monitorados não será apresentada porque não estão consistidos no SIAGAS.

- *Sistema Aquífero Bauru-Caiuá*

As análises químicas dos oito poços da RIMAS no Sistema Aquífero Bauru-Caiuá apresentaram no geral valores dentro dos valores permitidos pela legislação. Tendo apenas o pH (valor médio: 5,57) abaixo do valor recomendado. O poço situado no município de Assis/SP apresentou teores de Ferro acima do VRQ (0,04) estabelecido pela CETESB (**Tabela 2.10**).

- *Sistema Aquífero Guarani*

As análises químicas dos dois poços da RIMAS no Sistema Aquífero Guarani também apresentaram no geral valores dentro dos valores permitidos pela legislação. Tendo apenas o pH (valor médio: 5,74) abaixo do valor recomendado. O poço situado no município de Jacarezinho/PR apresentou teores de cloreto ligeiramente acima (1,77) do VRQ (1,5) estabelecido pela CETESB (**Tabela 2.11**).

**Tabela 2.9** – Poços da rede de monitoramento da RIMAS na bacia do Paranapanema e adjacências.

Sistema Aquífero	ID SIAGAS	Município	UF	Profundidade (m)	NE (m)	Data de instalação	Monitoramento de nível	Monitoramento da condutividade elétrica
Bauru_Caiuá	3500026832	Paranavaí	PR	60,00	22,75	26/05/2010	Sim	Sim
Bauru_Caiuá	3500026833	Porto Rico	PR	60,00	7,76	24/05/2010	Sim	Sim
Bauru_Caiuá	3500026835	Paranacity	PR	60,00	48,02	29/05/2010	Sim	Sim
Bauru_Caiuá	3500027325	Assis	SP	60,00	25,51	27/10/2010	Sim	Sim
Bauru_Caiuá	3500029441	Itaúna do sul	PR	86,00	42,64	25/11/2011	Sim	Sim
Bauru_Caiuá	3500029442	Planaltina do Paraná	PR	70,00	31,99	28/11/2011	Sim	Sim
Bauru_Caiuá	3500029467	Narandiba	SP	58,00	26,24	21/11/2011	Sim	Sim
Bauru_Caiuá	3500029468	Teodoro Sampaio	SP	78,00	29,22	31/10/2011	Sim	Sim
Guarani	3500027634	Jacarezinho	PR	60,00	10,79	02/03/2011	Sim	Sim
Guarani	3500027885	Bofete	SP	60,00	18,33	23/03/2011	Sim	Sim
Serra Geral	3500034018	Cabrália paulista	SP	67,40	33,48	11/07/2014	Não	Não

**Tabela 2.10** – Análises químicas dos poços da RIMAS no Sistema Aquífero Bauru-Caiuá na bacia do Paranapanema e adjacências.

ID SIAGAS	Município	UF	pH	CE (µS/cm)	Turbidez	Ca	Cl <sup>-</sup>	F <sup>-</sup>	Fe	K	Mg	Na	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ba	Sr
3500026832	Paranavaí	PR	5,63	28,3	0,19	1,200	0,955	0,023	0,031	2,94	0,590	1,010	0,010	4,037	0,040	0,100	0,065	0,018
3500026833	Porto Rico	PR	5,54	95,1	0,32	3,610	1,880	0,025	0,032	5,63	3,870	3,190	0,010	27,462	0,096	2,617	0,210	0,038
3500026835	Paranacity	PR	5,15	17,2	0,02	0,490	0,613	0,012	0,025	1,65	0,170	0,770	0,010	2,452	0,040	0,100	0,043	0,008
3500027325	Assis	SP	5,97	29,4	2,49	2,670	0,010	0,012	0,053	0,64	0,985	0,0004	0,053	1,400	0,040	0,100	0,062	0,00002
3500029441	Itaúna do sul	PR	5,20	16,3	0,02	0,431	1,114	0,013	0,030	1,69	0,253	0,519	0,010	0,705	0,040	0,100	0,060	0,011
3500029442	Planaltina do Paraná	PR	5,32	20,0	0,02	0,231	0,713	0,017	0,026	3,43	0,150	0,621	0,010	2,090	0,040	0,100	0,034	0,006
3500029467	Narandiba	SP	5,98	58,4	1,08	1,720	1,487	0,051	0,025	1,18	3,290	2,480	0,007	28,300	0,085	0,100	0,057	0,022
3500029468	Teodoro Sampaio	SP	5,77	22,6	0,08	0,098	1,170	0,036	0,026	1,52	0,003	1,830	0,032	16,100	0,040	0,100	0,029	0,005

**Tabela 2.11** – Análises químicas dos poços da RIMAS no Sistema Aquífero Guarani na bacia do Paranapanema e adjacências.

ID SIAGAS	Município	UF	CE (µS/cm)	pH	Turbidez	Ca	Cl <sup>-</sup>	F <sup>-</sup>	Fe	K	Mg	Na	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ba	Sr
3500027634	Jacarezinho	PR	47,40	6,12	0,02	4,08	1,779	0,068	0,050	3,060	0,881	1,940	0,010	1,609	0,046	0,100	0,030	0,032
3500027885	Bofete	SP	29,80	5,36	0,90	1,35	0,696	0,024	0,028	0,799	0,729	0,645	0,041	20,400	0,040	1,066	0,062	0,013

### 3. AVALIAÇÃO DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA SUBTERRÂNEA NA BACIA DO RIO PARANAPANEMA

A avaliação da disponibilidade hídrica subterrânea da bacia do rio Paranapanema foi realizada para a parcela renovável da recarga, para todos os aquíferos que afloram nesta área. Por outro lado as reservas permanentes foram estimadas somente para o Sistema Aquífero Bauru-Caiuá, haja vista a disponibilidade de dados de níveis de água, de espessura saturada e, devido a sua importância como manancial para a região.

#### 3.1 ESTIMATIVA DE RESERVAS PERMANENTES

A Reserva Permanente (RP), considerada como o volume de água armazenado abaixo do nível de oscilação sazonal (V), foi calculada apenas para o Sistema Aquífero Bauru-Caiuá. Considerou-se para este cálculo a área de afloramento das rochas dos grupos Bauru e Caiuá na bacia do rio Paranapanema, a porosidade efetiva ( $\eta_e$ ) de 15%, conforme (DAEE, 1979b) e espessura saturada média de 100 metros, obtida com base no monitoramento dos níveis estáticos nos poços da RIMAS e referências bibliográficas (DAEE, 1974, DAEE, 1976, DAEE, 1979 e Rocha *et al.*, 1979) *Apud* Barison (2013).

$$\begin{aligned} \text{Equação (1): } R_p &= V * \eta_e * e \\ R_p &= 29572180000 * 0,15 * 100 \\ R_p &= 443.582.7000.000 \text{ m}^3 \\ \mathbf{R_p} &= \mathbf{337.581,96 \text{ m}^3/\text{s}} \end{aligned}$$

#### 3.2 ESTIMATIVA DE RESERVAS RENOVÁVEIS

A avaliação da disponibilidade hídrica subterrânea renovável na bacia do Paranapanema foi estimada utilizando metodologias distintas, com vistas a obter um resultado final para a bacia que procure contabilizar integralmente os componentes superficial e subterrâneo, de forma que o balanço hídrico possa ser elaborado tendo em conta ambas as parcelas de fluxo e permita uma visão sistêmica da bacia, essencial para a gestão sustentável e integrada dos recursos hídricos.

Nessa avaliação serão consideradas duas estimativas de disponibilidade hídrica subterrânea: por coeficiente de infiltração e precipitação (**dados de entrada**) e com base em vazões características da curva de permanência e vazões mínimas (**dados de saída**) de algumas bacias.

A primeira estimativa compreende os volumes de águas subterrâneas que anualmente são recarregados nos aquíferos livres através da infiltração de parte da precipitação pluviométrica. Os quantitativos dessa parcela estão relacionados diretamente com as características do meio físico, como geologia, solo, relevo, chuva, clima e uso e ocupação da terra. No segundo caso, onde se utiliza os dados de saída como parâmetros de cálculo, refere-se à contribuição subterrânea ao escoamento superficial total de determinada bacia. Esses dois métodos e os cálculos resultantes serão apresentados a seguir de forma mais detalhada.

### 3.2.1. ESTIMATIVA DE DISPONIBILIDADE HÍDRICA SUBTERRÂNEA POR TAXA DE INFILTRAÇÃO E PRECIPITAÇÃO – DADOS DE ENTRADA

Na estimativa da disponibilidade hídrica subterrânea utilizando a taxa de infiltração e precipitação foram empregados parte das definições contidas em ANA (2013).

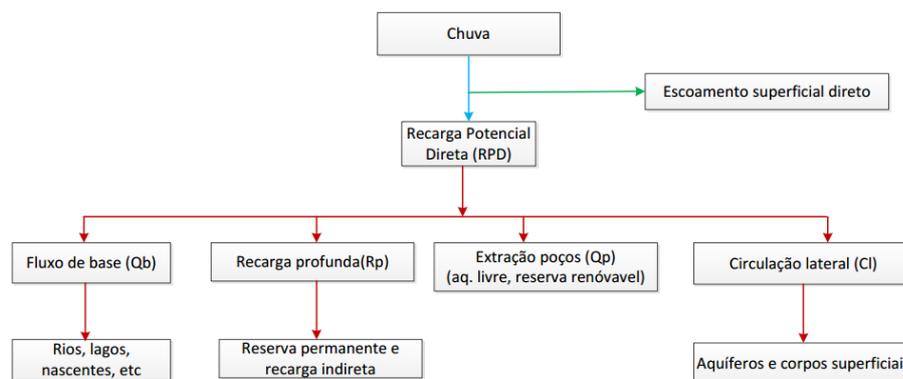
#### Recarga Potencial Direta –RPD

A RPD corresponde à parcela da precipitação pluviométrica média anual que infiltra e efetivamente chega aos aquíferos livres. Essa recarga inclui em seu cômputo o fluxo de base - parcela do escoamento superficial alimentada por água subterrânea ( $Q_b$ ), a extração atual de águas subterrâneas por poços tubulares ( $Q_p$ ), a recarga profunda ( $R_p$ ), além da parcela correspondente à circulação lateral ( $Cl$ ), conforme apresentado na Equação (2) e esquematizado na **Figura 3.1.**, todavia, tanto a recarga profunda como a circulação lateral exigem avaliações hidrogeológicas específicas, fora do alcance do presente diagnóstico, de maneira que não serão consideradas.

A estimativa da RPD foi realizada considerando os dados de literatura, para os coeficientes de infiltração para os diversos aquíferos da bacia (ANA, 2013; Celligoi & Duarte, 2009; Cutrim & Rebouças, 2004; Honorato 2013; Kiang *et al.*, 2003; Lisboa *et al.*, 2002).

A precipitação utilizada foi o valor médio da série histórica de 1970 a 2012, através da interceptação dos polígonos de chuva com as *shapes* de cada aquífero, de forma que os valores de precipitação são variáveis em um mesmo aquífero.

$$\text{Equação (2) : } RPD = Q_b + Q_p + R_p + Cl$$



**Figura 3.1** - Diagrama esquemático mostrando processo simplificado de recarga a partir da precipitação pluviométrica.

Nem todos os aquíferos da bacia apresentam dados de infiltração, de forma que, em alguns casos, foram usados dados do mesmo aquífero, mas localizados em bacias hidrográficas próximas e, preferencialmente, em contextos geológicos e climáticos semelhantes. Vale destacar que para efeitos de cálculos toda a área aflorante dos aquíferos foi considerada como área de recarga. Também se considerou que os poços extraem água subterrânea majoritariamente das reservas renováveis ou reguladoras ou ainda da recarga transitória multianual.

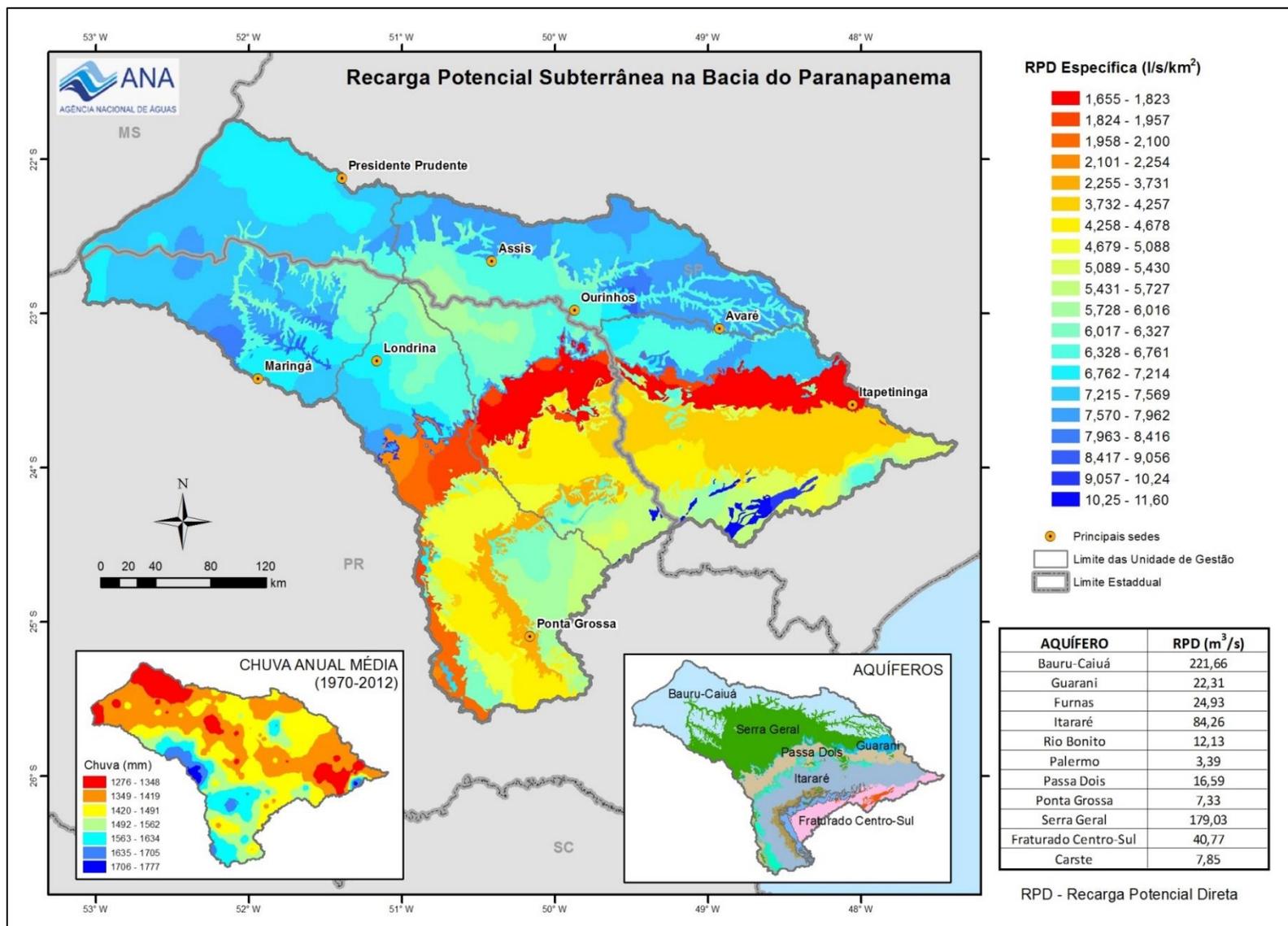


Figura 3.2 – Mapa da recarga potencial direta subterrânea por km<sup>2</sup>, que mostra a variação de acordo com os aquíferos e distribuição das chuvas.

## **Coefficiente de Sustentabilidade – CS**

O CS é o percentual máximo da Recarga Potencial Direta que pode ser explorada sem gerar efeitos adversos nos aquíferos e redução significativa das vazões de base, de forma a não comprometer a disponibilidade hídrica superficial nos períodos de estiagem, sendo variável, por aquífero. Os aquíferos que apresentam elevada contribuição do fluxo de base no escoamento superficial total demandam CS compatíveis de maneira, que ao ampliar a extração de águas subterrâneas, não impacte de forma significativa no valor da vazão basal, uma vez que este constitui o valor no qual estão ancoradas as vazões de referência utilizadas para a outorga de águas superficiais, excluída as regularizações promovidas por reservatórios.

De forma geral, aquíferos que geram vazões de base com percentuais mais elevados de participação no escoamento superficial total precisam de CS inferiores àqueles onde essa participação é menor. Considerando que parte do fluxo de base já está sendo retirado através das vazões mínimas referenciais para a outorga de águas superficiais, sugere-se que o CS não exceda a 0,4, nos cenários mais favoráveis. Nos aquíferos livres, com transmissividade elevada, onde a vazão de base representa parcela significativa do escoamento superficial, é sugerido CS de 0,2. Nos aquíferos cársticos, responsáveis pela perenização de rios indica-se CS de 0,3.

A relação  $Q_{90}/Q_{50}$ , abordada nos itens a seguir, constitui bom parâmetro indicativo para o estabelecimento dos valores de CS, uma vez que mostra a participação do escoamento subterrâneo no escoamento superficial, de forma que valores mais elevados para essa relação, tais como 0,6 e 0,7 indicam que o CS deve ser menor. O objetivo é estabelecer um teto para a extração de águas subterrâneas provenientes das reservas renováveis, com vistas a não reduzir o escoamento superficial gerado pelo fluxo de base e, portanto, não impactar na disponibilidade hídrica para a outorga superficial, especialmente nos períodos de estiagem.

## **Reserva Potencial Explotável – RPE**

A RPE equivale à parcela da RPD que pode ser explorada de forma sustentável, de forma a não interferir nas vazões superficiais mínimas referenciais para outorga, como a  $Q_{7,10}$  e a  $Q_{95}$ .

Na **Tabela 3.1** são apresentados os valores de Recarga Potencial Direta, CS e Reserva Potencial Explotável para os diversos aquíferos aflorantes na bacia hidrográfica do rio Paranapanema. Os sistemas aquíferos mais relevantes em termos de RPD e RPE são o Bauru-Caiuá, Serra Geral e Itararé, somados representam mais de 60% do total das reservas renováveis da bacia do Paranapanema.

**Tabela 3.1** - Estimativas de RPD, RPE e CS para os aquíferos da bacia do Rio Paranapanema.

Unidade Hidrogeológica	Área aflorante (Km <sup>2</sup> )	CS	CI (%)	RPD (m <sup>3</sup> /s)	RPD esp. (l/s/Km <sup>2</sup> )	RPE (m <sup>3</sup> /s)	RPE esp. (l/s/Km <sup>2</sup> )
<b>Bauru-Caiuá</b>	29.572,18	0,2	17	221,66	7,50	44,332	1,50
<b>Guarani</b>	2.898,58	0,2	17	22,32	7,70	4,464	1,54
<b>Furnas</b>	4.261,55	0,4	12	24,93	5,85	9,972	2,34
<b>Itararé</b>	19.293,91	0,4	9,5	84,26	4,37	33,704	1,75
<b>Rio Bonito</b>	2.131,62	0,4	12	12,13	5,69	4,852	2,28
<b>Palermo</b>	1.782,83	0,4	4	3,39	1,90	1,356	0,76
<b>Ponta Grossa</b>	2.119,85	0,4	7	7,33	3,45	2,93	1,38
<b>Passa Dois</b>	8.953,35	0,4	4	16,59	1,85	6,636	0,74
<b>Fraturado Centro-Sul</b>	7.295,59	0,4	12	40,77	5,59	16,307	2,24
<b>Serra Geral</b>	27.528,16	0,4	14	179,03	6,50	71,612	2,60
<b>Carste</b>	750,18	0,3	23	7,85	10,46	2,355	3,14
<b>TOTAL</b>	106.588	NA	NA	620,26	NA	198,52	NA

CS: Coeficiente de sustentabilidade, Ci: coeficiente de infiltração; RPD: recarga potencial direta; RPE: Recarga Potencial Explotável; NA=Não avaliado.

### 3.2.2. ESTIMATIVA DE DISPONIBILIDADE HÍDRICA SUBTERRÂNEA RENOVÁVEL COM BASE EM VAZÕES CARACTERÍSTICAS DA CURVA DE PERMANÊNCIA E EM VAZÃO MÍNIMA – DADOS DE SAÍDA

Na análise de disponibilidade hídrica subterrânea renovável, pelo lado da saída, foram utilizadas duas metodologias e avaliado o comportamento regulador dos aquíferos, como forma de checar os resultados gerados nos dois métodos empregados.

Há diversas metodologias para a determinação da participação do fluxo de base no escoamento superficial total, cada uma com seus pontos fortes e, claro, também debilidades. O uso de determinado método depende da quantidade e qualidade dos dados disponíveis; da extensão das séries; do tipo de avaliação, de detalhe ou regional; das ferramentas de análise disponíveis; dos objetivos da avaliação; dentre outras condições de contorno. Dentre os procedimentos mais comuns cita-se a separação de vazões em hidrogramas, por métodos gráficos e analíticos; através de filtros numéricos ou digitais; pela relação entre vazões de permanência características, como a relação  $Q_{90}/Q_{50}$ ; pelas vazões mínimas; por análise isotópica; entre outros.

No presente trabalho foram utilizados, na avaliação do fluxo de base, a relação  $Q_{90}/Q_{50}$ , em conjunto com análise do comportamento da curva de recessão e a determinação da vazão mínima  $Q_7$ . Os valores gerados nessas metodologias foram confrontados com a capacidade de regularização das vazões dos rios pelos aquíferos nos períodos de estiagem ou de menor precipitação, através da determinação da restituição subterrânea durante o período de recessão.

Como princípio geral para a aplicação das metodologias da relação  $Q_{90}/Q_{50}$  e da vazão mínima  $Q_7$ , foram selecionadas inicialmente estações fluviométricas com suas áreas de contribuição preferencialmente cobrindo um único aquífero livre, de forma que essas metodologias reflitam o comportamento de apenas uma unidade aquífera.

Todavia, como essa condição é rara na bacia, também foram consideradas as estações em que um aquífero representa, pelo menos, 83% de sua área. Os resultados das análises geradas foram considerados unicamente como representativo desse aquífero. Em havendo mais de uma estação que satisfaça essas condições, geraram-se valores médios ponderados pelas áreas das estações para os parâmetros avaliados, conforme sumarizado na **Tabela 3.2**. Mesmo em se considerando condições físicas razoavelmente homogêneas, como padrões de relevo e de solos, há variações localizadas que não são abrangidas pela análise em virtude da escala dos mapas bases disponíveis ou pela ausência de estações localizadas nessas áreas.

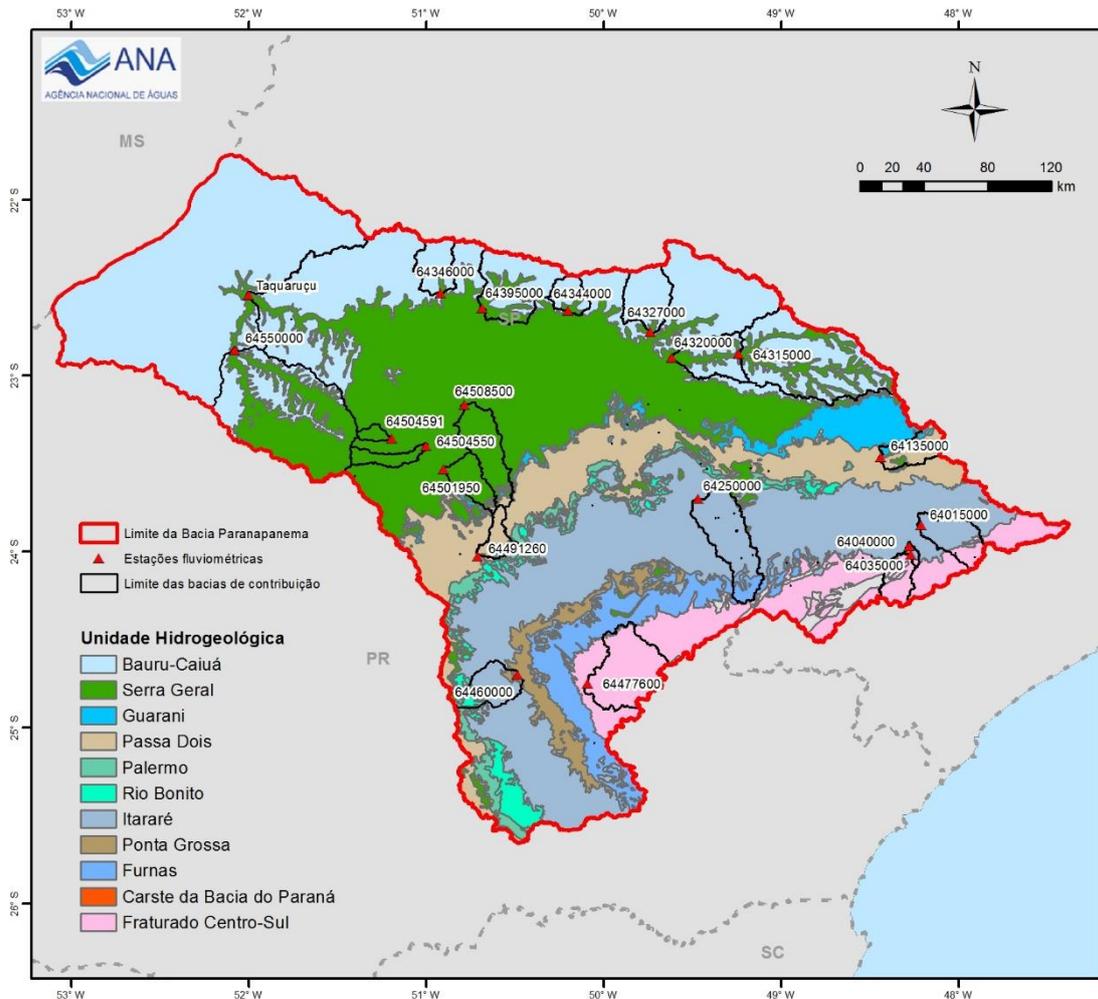
**Tabela 3.2** - Distribuição dos aquíferos livres por estações fluviométricas selecionadas inicialmente para a avaliação da contribuição do fluxo de base ao escoamento superficial total.

Estação	Anos	Área de contribuição (Km <sup>2</sup> )	Aquíferos (%)
<b>Taquaruçu</b>	34	88.921,70	todos
<b>64015000</b>	34	781,19	It (72), FCS (28)
<b>64035000</b>	33	473,91	FCS (83) AC (15) It (2)
<b>64040000</b>	34	539,56	FCS (75) AC (13) It (12)
<b>64135000</b>	34	600,22	PD (71) SAG (22) SG (8)
<b>64250000</b>	34	1.449,99	It (84) Fu (15)
<b>64315000</b>	34	3.343,91	SABC (70) SASG (30)
<b>64320000</b>	34	4.193,54	SABC (70) SASG (30)
<b>64327000</b>	34	892,05	SABC (95) SASG (04)
<b>64344000</b>	14	415,19	SABC (86) SASG (14)
<b>64346000</b>	20	651,24	SABC (94) SASG (06)
<b>64395000</b>	31	1559,05	SABC (70) SASG (30)
<b>64460000</b>	34	748,04	It (70) RB (16) PG (07) Pa (04) SASG (02)
<b>64477600</b>	34	1.579,73	FCS (98) Fu (02)
<b>64491260</b>	34	363,71	PD(85) Pa (13) RB (01)
<b>64501950</b>	11	567,81	SASG (95) SAG (03) PD (02)
<b>64504550</b>	28	332,07	SASG (100)
<b>64504591</b>	9	134,04	SASG (100)
<b>64508500</b>	34	1.052,65	SASG (91) PD (05) SAG (04)
<b>64550000</b>	26	4.495,03	SASG (66) BC (34)

SABC: Sistema Aquífero Bauru-Caiuá, SASG: Sistema Aquífero Serra Geral, It: Aquífero Itararé, SAG: Sistema Aquífero Guarani, Fu: Aquífero Furnas, RB: Aquífero Rio Bonito, PG: Aquífero Ponta Grossa, Pa: Aquífero Palermo, PD: Aquífero Passa Dois, FCS: Aquífero Fraturado Centro-Sul, AC: Aquífero Carste.

Em decorrência da alocação das estações fluviométricas e da disponibilidade de dados existentes em cada uma delas, não foi possível cobrir todos os sistemas aquíferos com comportamento livre existentes na bacia, mas os principais, como o Bauru-Caiuá, Serra Geral, Fraturado Centro-Sul e Itararé, foram contemplados com estações tendo suas áreas de contribuição, em grande proporção, representando somente uma dessas unidades.

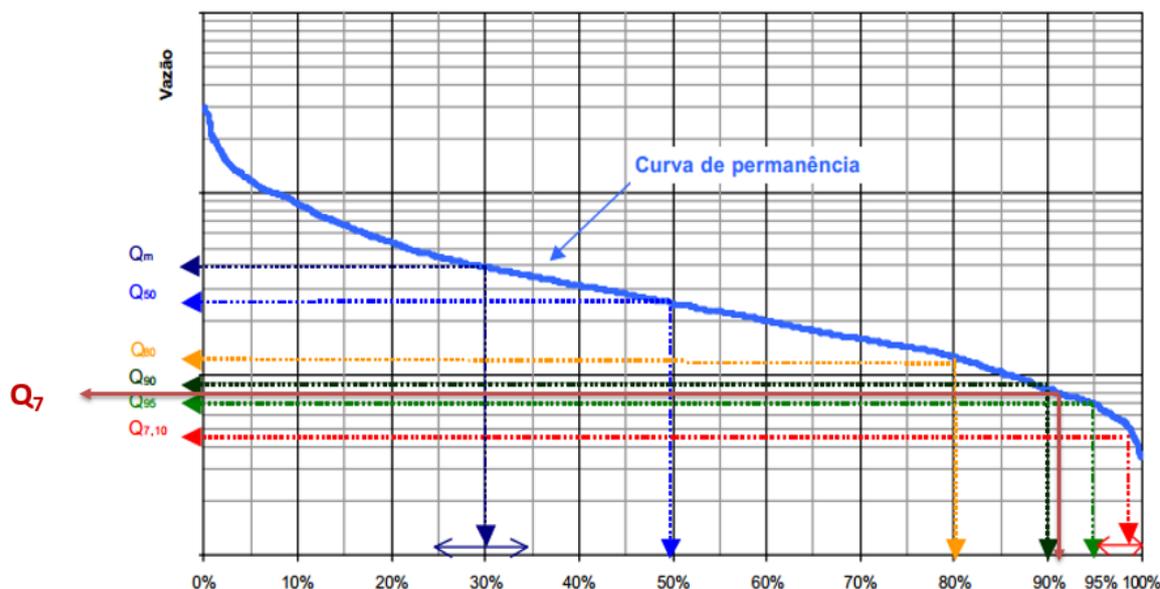




**Figura 3.4** - Mapa de aquíferos aflorantes com localização das estações fluviométricas utilizadas e respectivas áreas de contribuição.

### 3.2.3. ESTIMATIVA DA CONTRIBUIÇÃO SUBTERRÂNEA NO ESCOAMENTO SUPERFICIAL PELA RELAÇÃO $Q_{90}/Q_{50}$

Diversos autores, entre eles Smakhtin (2001) e Welderufael & Woyessa (2010) mencionam o uso da razão  $Q_{90}/Q_{50}$  como representativo da proporção do escoamento superficial originário do armazenamento subterrâneo, sem considerar os efeitos de escala. Esta metodologia, baseada em vazões características da curva de permanência, permite uma estimativa inicial razoável para a contribuição da parcela de águas subterrâneas no escoamento superficial. Na **Figura 3.5** é apresentado gráfico com curva de permanência genérica e o posicionamento das vazões mínimas  $Q_{7,10}$  e  $Q_7$ .



**Figura 3.5** - Gráfico monologarítmico com curva de permanência e o posicionamento das vazões mínimas  $Q_{7,10}$  e  $Q_7$ .

Conjuntamente à aplicação da razão  $Q_{90}/Q_{50}$  para determinar a participação da contribuição subterrânea nas estações fluviométricas selecionadas, também foi analisado o comportamento dessas curvas quanto à sua inclinação e a amplitude das variações das vazões extremas. Com esse propósito foi escolhida uma estação para cada aquífero, as quais encontram-se destacadas em negrito na **Tabela 3.3**, além da estação de Taquaruçu, uma vez que a mesma cobre 83% da área da bacia, tendo a contribuição de todos os aquíferos aflorantes. Observa-se, entretanto que esta estação tem menor representatividade absoluta do Bauru-Caiuá, uma vez que não cobre a totalidade da porção oeste da bacia, local este onde se situa a maior ocorrência dessa unidade.

As estações que mostram valores para a relação  $Q_{90}/Q_{50}$  superiores a 0,5 apresentam curvas de permanência com menor inclinação e menor amplitude entre as vazões extremas, situação típica para o Sistema Aquífero Bauru-Caiuá, denotando elevada capacidade de regularização da vazão superficial pelo fluxo de base. Por outro lado, de forma inversa, o Aquitarde Passa Dois tem baixa capacidade de regularização das vazões, apresentando relação  $Q_{90}/Q_{50}$  de 0,31, com forte inclinação da curva e grande amplitude nas vazões extremas.

As **Tabelas 3.3** e **3.4** apresentam, respectivamente, os valores  $Q_{90}/Q_{50}$  em todas as estações fluviométricas avaliadas e somente para os aquíferos com representação areal superior a 83% da estação; enquanto as **Figuras 3.6** a **3.10** ilustram o comportamento das curvas de permanência para cada um dos aquíferos avaliados; e por fim a **Figura 3.11** mostra o comportamento geral dessa curva na estação de Taquaruçu.

Estação fluv	Área estação (km <sup>2</sup> )	Aquíferos (%)	Q <sub>mlt</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>7</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>95</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>90</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>50</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>7,10 dist</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>90</sub> /Q <sub>50</sub>	Vol 1 (m <sup>3</sup> /s)	Vol 2 (m <sup>3</sup> /s)	Rel 1	Rel 2	Q <sub>7</sub> /Q <sub>mlt</sub>	Q <sub>7,10</sub> /Q <sub>7</sub>	Q <sub>95</sub> /Q <sub>7</sub>	Q <sub>90</sub> /Q <sub>7</sub>	q <sub>7 esp</sub> (l/s/km <sup>2</sup> )	q <sub>90 esp</sub> (l/s/km <sup>2</sup> )
Taquaruçu	88.921,7	todos	1351,72	530,65	445,45	533,40	1073,00	335,75	0,50	533,40	671,96	0,99	0,79	0,39	0,63	0,84	1,01	5,97	6,00
64015000	781,19	It (72) FCS (28)	11,42	4,28	3,45	4,28	8,22	2,26	0,52	4,28	5,95	1,00	0,72	0,37	0,53	0,81	1,00	5,48	5,48
64035000	473,91	FCS (83) AC (15) It (2)	8,51	4,09	3,23	3,73	6,51	2,64	0,57	3,73	4,87	1,09	0,84	0,48	0,65	0,79	0,91	8,62	7,87
64040000	539,56	FCS (75) AC (13) It (12)	9,12	4,21	3,58	4,12	6,90	2,74	0,60	4,12	5,45	1,02	0,77	0,46	0,65	0,85	0,98	7,81	7,64
64135000	600,22	PD (71) SAG (22) SASG (8)	7,34	0,74	0,58	0,78	2,45	0,31	0,32	0,78	2,33	0,95	0,32	0,10	0,42	0,79	1,06	1,23	1,29
<b>64250000*</b>	<b>1.449,99</b>	<b>It (84) Fu (15)</b>	<b>15,25</b>	<b>5,82</b>	<b>4,45</b>	<b>5,93</b>	<b>11,40</b>	<b>2,99</b>	<b>0,52</b>	<b>5,93</b>	<b>7,93</b>	<b>0,98</b>	<b>0,73</b>	<b>0,38</b>	<b>0,51</b>	<b>0,76</b>	<b>1,02</b>	<b>4,01</b>	<b>4,09</b>
64315000	3.343,91	SABC (70) SASG (30)	45,08	22,70	19,50	22,48	38,45	13,75	0,58	22,48	26,35	1,01	0,86	0,50	0,61	0,86	0,99	6,79	6,72
64320000	4.193,54	SABC (70) SASG (30)	53,90	28,05	24,55	27,75	46,70	17,35	0,59	27,75	32,03	1,01	0,88	0,52	0,62	0,88	0,99	6,69	6,62
<b>64327000*</b>	<b>892,05</b>	<b>SABC (95) SASG (04)</b>	<b>10,31</b>	<b>5,41</b>	<b>5,20</b>	<b>5,78</b>	<b>8,66</b>	<b>3,82</b>	<b>0,67</b>	<b>5,78</b>	<b>6,89</b>	<b>0,94</b>	<b>0,79</b>	<b>0,52</b>	<b>0,71</b>	<b>0,96</b>	<b>1,07</b>	<b>6,06</b>	<b>6,48</b>
64344000	415,19	SABC (86) SASG (14)	5,21	3,24	2,64	2,95	4,45	2,38	0,66	2,95	3,46	1,10	0,94	0,62	0,73	0,81	0,91	7,80	7,11
64346000	651,24	SABC (94) SASG (06)	7,20	5,20	4,28	4,81	6,68	3,84	0,72	4,81	5,18	1,08	1,00	0,72	0,74	0,82	0,93	7,98	7,38
64395000	1.559,05	SABC (70) SASG (30)	17,89	11,29	9,03	10,34	16,42	7,97	0,63	10,34	11,27	1,09	1,00	0,63	0,71	0,80	0,92	7,24	6,63
64460000	748,04	It (70) RB (16) PG (07) Pa (04) SASG (02)	13,37	3,53	2,51	3,60	8,55	1,41	0,42	3,60	5,63	0,98	0,63	0,26	0,40	0,71	1,02	4,72	4,81
<b>64477600*</b>	<b>1.579,73</b>	<b>FCS (98) Fu (02)</b>	<b>33,45</b>	<b>7,74</b>	<b>7,37</b>	<b>9,28</b>	<b>23,93</b>	<b>3,34</b>	<b>0,39</b>	<b>9,28</b>	<b>12,97</b>	<b>0,83</b>	<b>0,60</b>	<b>0,23</b>	<b>0,43</b>	<b>0,95</b>	<b>1,20</b>	<b>4,90</b>	<b>5,87</b>
<b>64491260*</b>	<b>363,71</b>	<b>PD(85) Pa(13) RB (01)</b>	<b>5,83</b>	<b>0,66</b>	<b>0,42</b>	<b>0,68</b>	<b>2,21</b>	<b>0,16</b>	<b>0,31</b>	<b>0,68</b>	<b>1,78</b>	<b>0,97</b>	<b>0,37</b>	<b>0,11</b>	<b>0,24</b>	<b>0,64</b>	<b>1,03</b>	<b>1,81</b>	<b>1,86</b>
64501950	567,81	SASG (95) SAG(03) PD(02)	8,23	2,23	1,81	2,28	5,50	1,10	0,41	2,28	3,41	0,98	0,65	0,27	0,49	0,81	1,02	3,93	4,02
<b>64504550*</b>	<b>332,07</b>	<b>SASG (100)</b>	<b>5,63</b>	<b>2,31</b>	<b>1,75</b>	<b>2,19</b>	<b>4,22</b>	<b>1,10</b>	<b>0,52</b>	<b>2,19</b>	<b>2,92</b>	<b>1,05</b>	<b>0,79</b>	<b>0,41</b>	<b>0,48</b>	<b>0,76</b>	<b>0,95</b>	<b>6,95</b>	<b>6,60</b>
64504591	134,04	SASG (100)	2,90	1,16	0,98	1,15	2,54	0,72	0,45	1,15	1,31	1,01	0,89	0,40	0,62	0,84	0,99	8,69	8,58
64508500	1.052,65	SASG (91) PD(05) SAG(04)	15,03	5,09	4,10	4,86	10,19	2,34	0,48	4,86	7,17	1,05	0,71	0,34	0,46	0,81	0,95	4,84	4,62
64550000	4.495,03	SASG (66) SABC (34)	65,30	33,59	28,30	32,80	53,90	17,82	0,61	32,88	39,83	1,02	0,84	0,51	0,61	0,84	0,98	7,47	7,30

**Tabela 3.3** - Dados de vazões das estações fluviométricas utilizadas conforme os aquíferos aflorantes. As estações assinaladas com (\*) foram escolhidas como representativas para cada um dos respectivos aquíferos.

Vol 1 – relação  $Q_{90}/Q_{50}$  aplicada sobre o volume da  $Q_{50}$

Vol 2 – relação  $Q_{90}/Q_{50}$  aplicada sobre o volume da  $Q_{mt}$

Rel 1 – relação  $Q_7/Vol 1$

Rel 2 – relação  $Q_7/Vol 2$

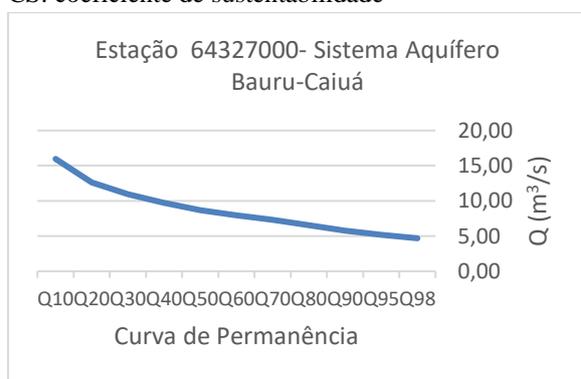
**Tabela 3.4** -. Valores médios de relações entre vazões características e para vazões específicas para aquíferos livres, na bacia do Paranapanema.

Unidade hidrogeológica	$Q_{90}/Q_{50}$	CS	$Q_7/Q_{mt}$	$Q_{7,10}/Q_7$	$Q_{95}/Q_7$	$Q_{90}/Q_7$	$q_7 \text{ esp}$ (l/s/km <sup>2</sup> )	$q_{90} \text{ esp}$ (l/s/km <sup>2</sup> )
<b>Sistema Aquífero Bauru-Caiuá</b>	0,68	0,2	0,62	0,73	0,87	0,97	7,07	6,19
<b>Sistema Aquífero Serra Geral</b>	0,47	0,4	0,36	0,51	0,80	0,98	5,17	4,14
<b>Aquífero Itararé*</b>	0,52	0,4	0,38	0,51	0,76	1,02	4,01	3,07
<b>Aquitarde Passa Dois*</b>	0,31	0,4	0,11	0,24	0,64	1,03	1,81	1,16
<b>Aquífero Fraturado Centro-Sul**</b>	0,39	0,4	0,23	0,43	0,95	1,20	4,90	4,67

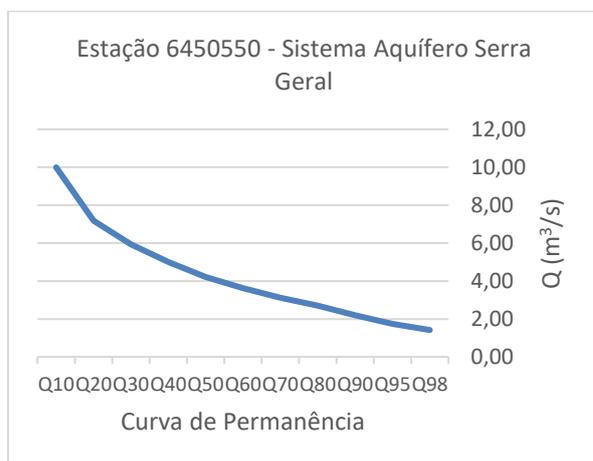
(\*) dado de uma estação fluviométrica.

(\*\*) não foram consideradas as estações fluviométricas com influência do Aquífero Carste na área de contribuição.

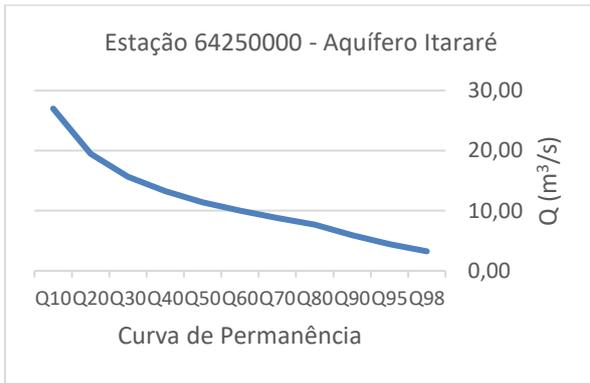
CS: coeficiente de sustentabilidade



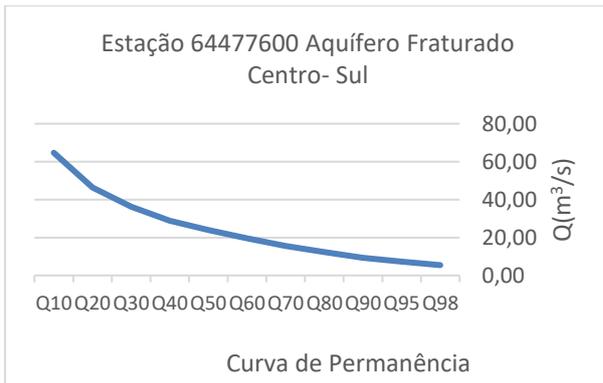
**Figura 3.6** - Curva de permanência em estação fluvial com contribuição do Sistema Aquífero Bauru-Caiuá.



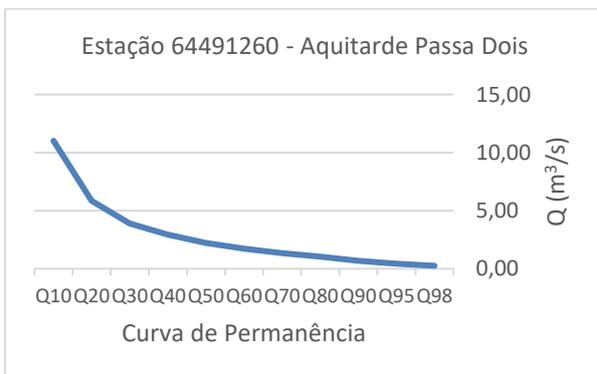
**Figura 3.7**- Curva de permanência em estação fluvial com contribuição do Sistema Aquífero Serra Geral.



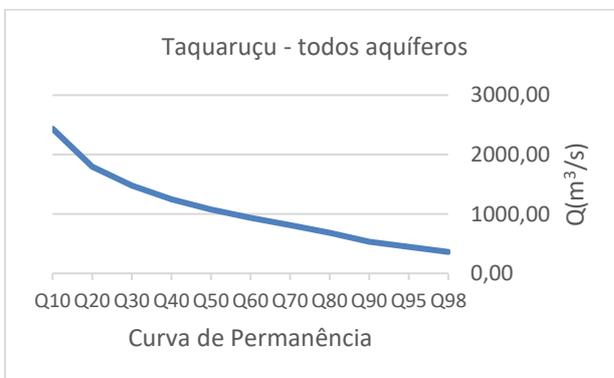
**Figura 3.8** - Curva de permanência em estação fluvial com contribuição do Aquífero Itararé.



**Figura 3.9** - Curva de permanência em estação fluvial com contribuição do Aquífero Fraturado Centro-Sul.



**Figura 3.10** - Curva de permanência em estação fluvial com contribuição do Aquitarde Passa Dois.



**Figura 3.11** - Curva de permanência em estação Taquaruçu, com contribuição de todos os aquíferos, representando cerca de 83% da área da bacia do Paranapanema.

### 3.2.4. ESTIMATIVA DA CONTRIBUIÇÃO SUBTERRÂNEA NO ESCOAMENTO SUPERFICIAL PELA VAZÃO MÍNIMA Q<sub>7</sub>

A segunda metodologia utilizada, considerando a saída do sistema, para a análise da contribuição subterrânea ao escoamento superficial total consistiu na determinação da vazão mínima Q<sub>7</sub>, a qual representa o valor médio da série histórica das vazões mínimas das médias móveis de sete dias, ao longo do período de dados das estações fluviométricas. Em sendo a vazão mínima das médias móveis de sete dias, considerada ano a ano, representa a contribuição subterrânea, uma vez que é medida em época de baixas vazões, ou seja, durante a estiagem, quando a vazão superficial é mantida pelo fluxo de base. De outra maneira, essa vazão materializa a contribuição do fluxo de base ao escoamento superficial total. Considera-se, como mencionado anteriormente, que as vazões medidas nas estações correspondem ao escoamento natural, portanto, sem regularizações.

O comportamento da relação Q<sub>7</sub>/Q<sub>mlt</sub> para os aquíferos e estações analisadas é semelhante àqueles encontrados para a Q<sub>90</sub>/Q<sub>50</sub>, com valores um pouco superiores em decorrência da Q<sub>50</sub> ser inferior à Q<sub>mlt</sub>, enquanto Q<sub>7</sub> e Q<sub>90</sub> são muito próximas, conforme já mostrado nas **Tabelas 3.3 e 3.4**.

Os volumes de contribuição subterrânea estimados pela Q<sub>7</sub> são próximos àqueles calculados pela aplicação do coeficiente da relação Q<sub>90</sub>/Q<sub>50</sub> sobre a vazão Q<sub>50</sub>, indicando melhor ajuste para esta bacia, se comparado com a proposição de Smakhtin (2001) de aplicar essa relação sobre o escoamento superficial, entendido como representado pela Q<sub>mlt</sub>, conforme pode ser observado na **Tabela 3.3**.

### 3.2.5. CURVA DE RECESSÃO

De forma a conferir a capacidade reguladora dos aquíferos representados nas áreas de contribuição das estações fluviométricas e comparar com os resultados apresentados nas metodologias de avaliação de contribuição subterrânea ao escoamento superficial total, foram analisadas as curvas de recessão de alguns rios onde a contribuição é majoritariamente de um único aquífero livre.

A recessão compreende o declínio da vazão natural de um rio considerando a ausência de precipitação, sendo condicionada por leis de decaimento exponencial, é dada pela Equação (3), conforme Domenico & Schwartz (1990), enquanto o volume subterrâneo contribuinte anualmente é estimado pela Equação (3) e a restituição pela relação do volume contribuinte anual e área de contribuição da estação, expressa na Equação (3). A recessão, em outras palavras, corresponde a contribuição subterrânea ao fluxo superficial, originária dos volumes armazenados nos aquíferos.

$$\text{Equação (3) } Q = Q_0 \cdot e^{-kt}$$

Onde:

Q= representa a vazão do rio em m<sup>3</sup>/s após um período de t (dias);

Q<sub>0</sub>=é a vazão do rio no início da recessão em m<sup>3</sup>/s;

K= é a constante de recessão

$$\text{Equação (3) } V = Q_0 \cdot 86.400/K$$

$$\text{Equação (4) } h = V/A$$

Onde:

V=volume subterrâneo contribuinte por ano selecionado em m<sup>3</sup>/ano

h=restituição em mm

A= área de contribuição da estação fluviométrica.

O regime climático na região da bacia do Paranapanema não apresenta uma estação seca bem demarcada, com ausência sazonal de chuvas, todavia os meses de menor precipitação é representado pelo trimestre junho/julho/agosto, com chuvas médias na faixa de 50-60 mm/mês. Em virtude desse comportamento climático foram selecionados; nas estações pluviométricas localizadas nas áreas de contribuição das estações fluviométricas ou, na ausência, a mais próxima dessa área; os anos mais secos e, preferencialmente, com trimestre junho/julho/agosto com menos chuva, de forma a reduzir a influência da precipitação na recessão.

Na **Tabela 3.5** são mostrados os valores de restituição subterrânea, em função da precipitação, para cada um dos aquíferos avaliados. Novamente se observa, como já ocorrido nas estimativas realizadas com a relação  $Q_{90}/Q_{50}$  e para a  $Q_7$ , o Sistema Aquífero Bauru-Caiuá se destaca com elevada contribuição, restituindo 17,3% da precipitação do ano avaliado, seguido pelo Sistema Aquífero Serra Geral, com 13,0% da precipitação do ano. Embora apresentado somente um ano na tabela, assim como nas vazões diárias das **Figuras 3.12 a 3.16**, foram elaboradas curvas de recessão para três anos, conforme a disponibilidade de dados de chuva. Os valores apresentados compreendem os anos com melhor ajuste das retas.

**Tabela 3.5** - Valores de restituição da contribuição subterrânea ao escoamento superficial total, em segmentos de aquíferos livres na bacia do Paranapanema.

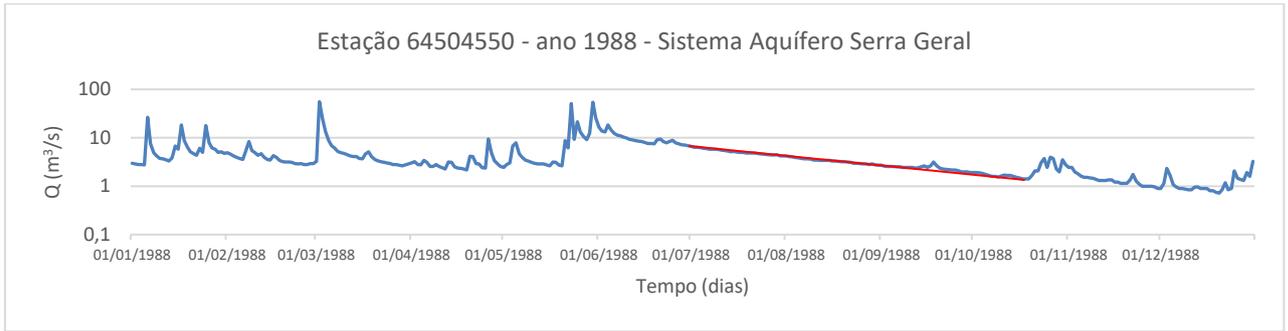
Unidades hidrogeológicas	Estação Fluviométrica	Área contribuição. (km <sup>2</sup> )	P (mm/ano)	K	Restituição/P(%)*
<b>Sistema Aquífero Bauru-Caiuá</b>	64327000	892,05	955,4	0,003998158	17,3
<b>Sistema Aquífero Serra Geral</b>	64504550	332,07	1208,6	0,013864704	13,0
<b>Aquífero Itararé</b>	64250000	1.449,99	811,4	0,00453215	9,2
<b>Aquífero Fraturado Centro-sul</b>	64477600	1.579,73	1.187,10	0,025016442	8,6
<b>Aquífero de Passa Dois</b>	64491260	363,71	932,2	0,023753555	3,5

(\*) – Relação restituição/precipitação

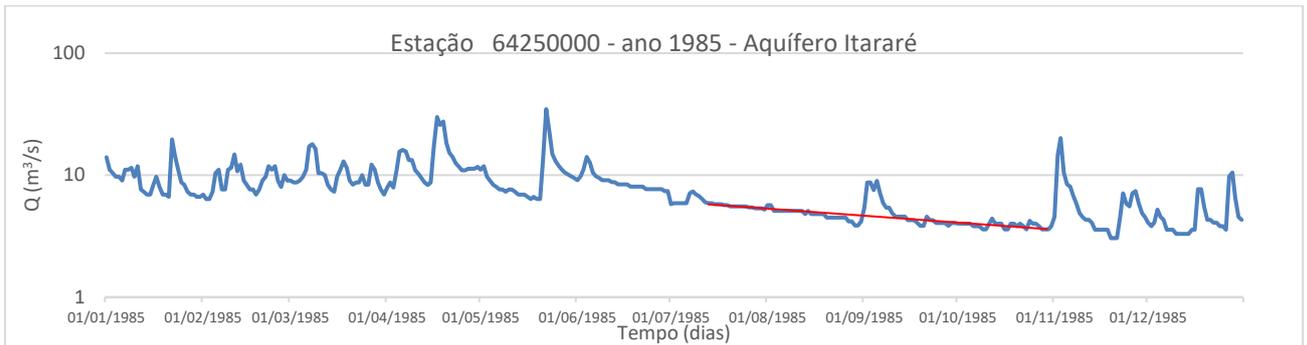
K – coeficiente de recessão



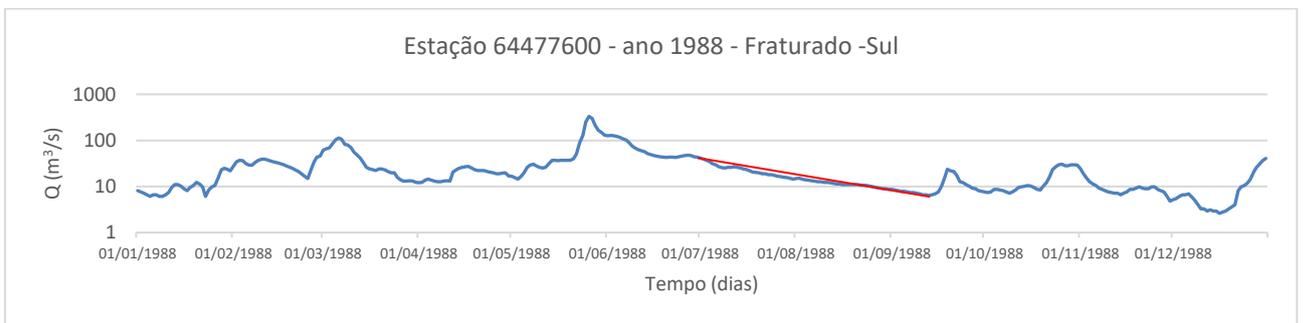
**Figura 3.12** - Curva de recessão com contribuição do Sistema Aquífero Bauru-Caiuá.



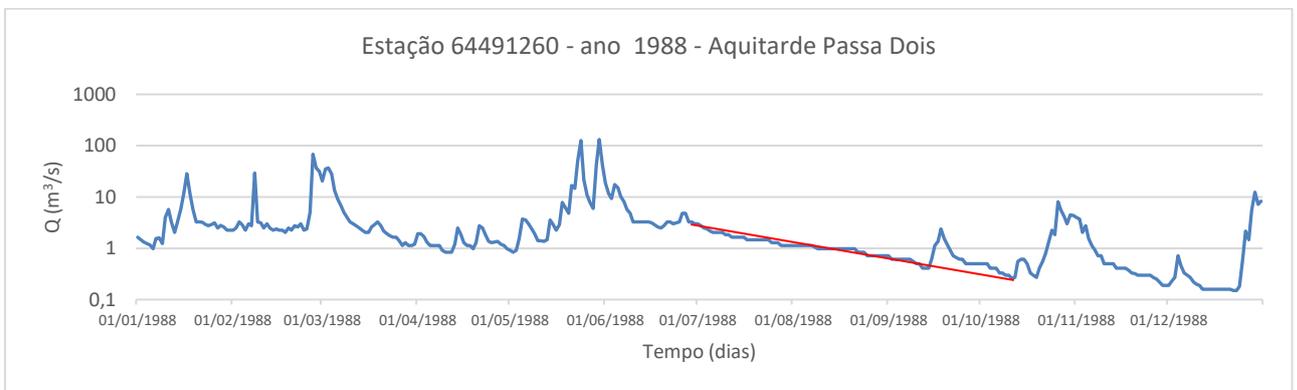
**Figura 3.13** - Curva de recessão com contribuição do Sistema Aquífero Serra Geral.



**Figura 3.14** - Curva de recessão com contribuição do Aquífero Itararé.



**Figura 3.15** - Curva de recessão com contribuição do Aquífero Fraturado Centro- Sul.



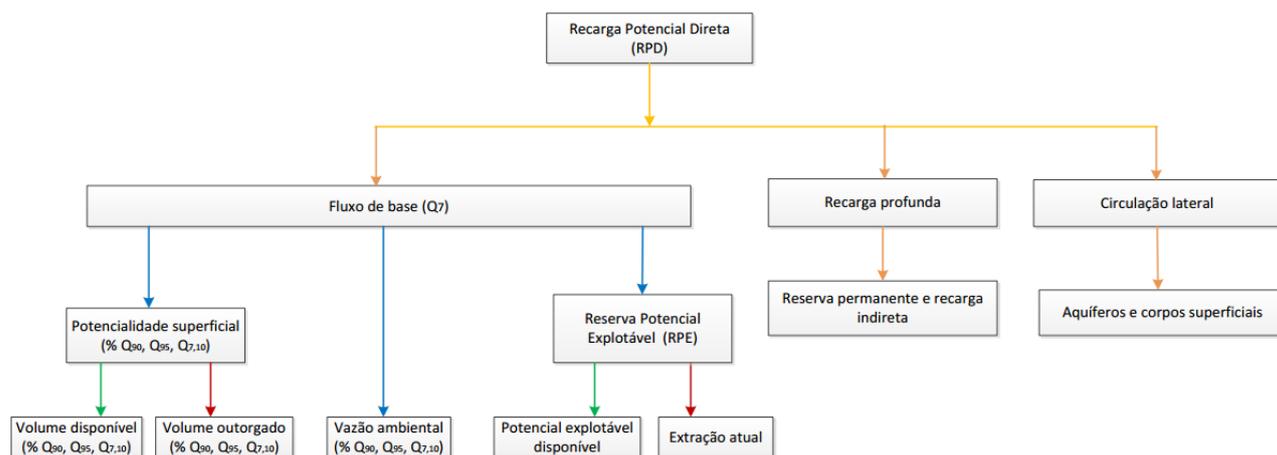
**Figura 3.16** - Curva de recessão com contribuição do Aquitarde Passa Dois.

### 3.3. GESTÃO INTEGRADA DE RECURSOS HÍDRICOS SUPERFICIAIS E SUBTERRÂNEOS

O objeto da estimativa da contribuição de águas subterrânea ao escoamento superficial dos rios da bacia do Paranapanema é trazer informações iniciais de forma a possibilitar a elaboração de balanço hídrico integrado, no qual seja possível segregar as parcelas superficiais e subterrâneas no escoamento superficial total, tendo em conta que ao efetuar uma dada retirada, seja superficial, no âmbito dos Estados ou da União; ou da parcela subterrânea, no caso dos Estados; estar-se-á interferindo em um mesmo "volume comum", uma vez que Estados e União adotam vazões de referência para as outorgas superficiais lastreadas no fluxo de base, e que o volume de água subterrânea explorado compreende essencialmente uma parcela das reservas renováveis, portanto, ambos os volumes são parcelas da vazão basal.

É importante ter em conta que ao extrair águas subterrâneas das reservas renováveis, estar-se-á, ao longo do tempo, modificando o escoamento de base dos rios, exceto quando há reservatórios de regularização, essas vazões referenciais sofrerão depleção ao longo do tempo e podem ser críticas nos períodos de estiagem. Assim, é essencial, especialmente em bacias onde a vazão média de longo período ( $Q_{mlt}$ ) tem significativa contribuição do fluxo de base, que o balanço hídrico seja contabilizado conjuntamente, de forma que as parcelas alocadas das reservas subterrâneas exploráveis (RPE) sejam abatidas do montante disponível no fluxo de base, refletindo, por sua vez, nas vazões mínimas referenciais para outorgas superficiais.

A **Figura 3.17** ilustra Modelo Esquemático mostrando as interdependências entre Recarga, Fluxo de Base, Reserva Potencial Explotável (RPE), Potencialidade Superficial e os volumes comprometidos e aqueles disponíveis superficiais e subterrâneos. Vale destacar que no presente trabalho os volumes correspondentes à recarga profunda e circulação lateral não foram estimados, mas estão compreendidos na diferença entre a Recarga Potencial Direta (RPD) e o Fluxo de Base, considerado neste trabalho como  $Q_7$ .



**Figura 3.17.** Diagrama ilustrando as interdependências entre Recarga, Fluxo de Base, Reserva Potencial Explotável Subterrânea (RPE) e Potencialidade Superficial.

A extração atual dos poços tubulares, por sua vez, faz parte do volume representado pela vazão basal, todavia os dados disponíveis não permitem a sua separação por aquífero, de forma que não estão representados junto àquela vazão, embora conceitualmente considerem-se parcela da mesma, assim serão acrescidos àquela parcela para efeitos de contabilidade hídrica final.

As metodologias utilizadas para a estimativa do fluxo de base nas diversas estações fluviométricas da bacia, considerando a contribuição exclusiva ou majoritária de um único aquífero livre por estação, mostram valores e comportamento de curvas de permanência e de recessão coerentes entre si para cada aquífero. O Sistema Aquífero Bauru-Caiuá é o de maior capacidade de regularização ou o que gera a maior contribuição do fluxo de base ao escoamento superficial, em torno de 67% nas estações avaliadas. No outro extremo, o Aquitarde Passa Dois gera aporte somente de 31% do escoamento superficial.

Os resultados da avaliação do fluxo de base pelo método da vazão mínima  $Q_7$  e da relação  $Q_{90}/Q_{50}$ , corroborado pelo comportamento das curvas de permanência e de recessão, mostram claramente o potencial de regularização das vazões superficiais dos diversos aquíferos livres presentes na bacia. Evidentemente os valores estimados para o fluxo de base, no lado da saída, estão em sintonia com as estimativas da Recarga Potencial Direta (RPD) elaboradas por intermédio de taxas de infiltração e precipitação, no lado da entrada. Há pequenas discordâncias, previsíveis, uma vez que se tratam de estimativas gerais, onde valores amostrais localizados, como taxa de infiltração, são empregados para a totalidade de cada aquífero. A própria extrapolação dos valores calculados para  $Q_7$  e  $Q_{90}/Q_{50}$  de algumas áreas de contribuição em cada aquífero, com poucas centenas de  $\text{km}^2$ , para a totalidade das áreas aflorantes dessas unidades, algumas com mais de duas dezenas de milhares de  $\text{km}^2$ , implicam em generalizações, que podem ocasionar alguma disparidade no balanço entre os valores finais de entrada e saída.

A RPD traz um bom indicativo de entrada de água no sistema aquífero-rio, distribuídos entre os aquíferos livres (reserva renovável e permanente), aquíferos confinados e rios, estes últimos como uma parcela da reserva renovável. O volume “comum” entre os meios subterrâneo e superficial é a porção da reserva renovável expressa pelo fluxo de base, refletida pela vazão mínima  $Q_7$ , portanto, é o volume alvo para gestão integrada de águas subterrâneas e superficiais. As condições de contorno para essa assertiva é de que as extrações de águas subterrâneas ocorrem na reserva renovável, por conseguinte, válido somente para aquíferos livres, e não há extrações nas reservas permanentes. Nas situações onde o escoamento superficial é regularizado por barramentos e estruturas afins será necessário abater o valor regularizado do balanço hídrico integrado.

Das estimativas realizadas para a determinação da contribuição de águas subterrânea ao escoamento superficial total, a vazão mínima  $Q_7$  foi escolhida como referencial inicial para a integração da gestão entre os componentes subterrâneo e superficial do ciclo hidrológico. A grande vantagem é que essa vazão constitui um valor extraído de forma direta das séries históricas de vazões.

Nas **Tabelas 3.6 e 3.7** são apresentados os valores estatísticos de tendência central para as relações entre a vazão mínima  $Q_7$  e algumas vazões de referência utilizadas para outorga de águas superficiais. Observa-se que o valor de  $Q_7$  é muito próximo ao da  $Q_{90}$ , exceto para o Sistema Aquífero Fraturado Centro-Sul. Vale destacar que na estação de Taquaruçu, que cobre 83% da área da bacia, essas vazões diferem em apenas 0,5%, sinalizando para forte aderência destas vazões.

**Tabela 3.6** - Distribuição estatística dos dados de tendência central para as relações entre a vazão  $Q_7$  com algumas vazões referenciais para outorga de água superficial na bacia do Paranapanema, avaliadas em 19 estações fluviométricas.

Parâmetros	$Q_{90}/Q_7$	$Q_{95}/Q_7$	$Q_{7,10}/Q_7$	$Q_7/Q_{mt}$
<b>Média</b>	0,99	0,82	0,56	0,41
<b>Mediana</b>	0,99	0,81	0,61	0,41
<b>Desvio Padrão</b>	0,07	0,07	0,13	0,16
<b>Variância</b>	0,00	0,01	0,02	0,03
<b>Máximo</b>	1,20	0,96	0,74	0,72
<b>Mínimo</b>	0,91	0,64	0,24	0,10
<b>Est. Taquaruçu*</b>	1,01	0,84	0,63	0,39

(\*) Estação Taquaruçu cobre 83% da área da bacia do Paranapanema

**Tabela 3.7** - Distribuição estatística dos dados de tendência central para as relações entre a vazão  $Q_7$  e vazões referenciais para outorga de água superficial na bacia do Paranapanema, avaliadas em 18 estações fluviométricas.

Parâmetros <sup>(1)</sup>	$Q_{90}/Q_7$	$Q_{95}/Q_7$	$Q_{7,10}/Q_7$	$Q_7/Q_{mt}$
<b>Média</b>	0,98	0,81	0,56	0,42
<b>Mediana</b>	0,99	0,81	0,61	0,44
<b>Desvio Padrão</b>	0,05	0,07	0,13	0,16
<b>Variância</b>	0,00	0,00	0,02	0,03
<b>Máximo</b>	1,07	0,96	0,74	0,72
<b>Mínimo</b>	0,91	0,64	0,24	0,10
<b>Est. Taquaruçu*</b>	1,01	0,84	0,63	0,39

(1) estatística excluindo a estação fluviométrica 64477600

(\*) Estação Taquaruçu cobre 83% da área da bacia do Paranapanema

Em vinte estações para as quais foram realizados os cálculos das diversas vazões e relações entre vazões, somente a estação 64477600, conforme mostrado na **Tabela 3.3**, com cobertura de 98% do Aquífero Fraturado Centro-Sul, apresentou discrepância significativa na relação  $Q_{90}/Q_7$ . Duas outras estações, a 64035000 e 64044000, com participação desse Aquífero respectivamente de, 83% e 75%, apresentam  $Q_{90}/Q_7$  de 91% e 98%, portanto, próximos dos valores médios gerais para essa relação. Nessas estações os valores do fluxo de base são significativamente superiores ao da estação utilizada como referência para essa unidade aquífera, indicando contribuição do aquífero Carste, o qual apresenta elevada taxa de infiltração, muito provavelmente mascarando esses valores.

A **Tabela 3.8** sintetiza os dados de disponibilidade hídrica subterrânea na bacia do Paranapanema e as potencialidades de águas superficiais, ambas por unidade hidrogeológica, tendo como referências a Recarga Potencial Direta (RPD) e a vazão mínima  $Q_7$ , considerada como indicadora do fluxo de base na bacia.

A **Tabela 3.8** mostra que os principais sistemas aquíferos em termos de volume de RPD são o Bauru-Caiuá, Serra Geral e Itararé, quando apresentado por área. Já o Carste é o mais relevante quando considera a produção específica, seguido do Guarani, Bauru-Caiuá e Serra Geral. Quanto à RPE o Bauru-Caiuá tem reservas explotáveis próximas ao Itararé, todavia como aquele aquífero responde por elevada parcela da

vazão de base do escoamento superficial, a sua exploração fica limitada por um CS menor.

**Tabela 3.8** - Síntese dos dados de disponibilidade hídrica subterrânea na bacia do Paranapanema e potencialidades de águas superficiais, ambas por unidade hidrogeológica.

Unidade Hidrogeológica	Área aflorante (Km <sup>2</sup> )	CS	CI ( % )	RPD (m <sup>3</sup> /s)	RPD esp. (l/s/km <sup>2</sup> )	RPE (m <sup>3</sup> /s)	RPE esp. (l/s/km <sup>2</sup> )	Q7 (m <sup>3</sup> /s)	Q7 esp. (l/s/km <sup>2</sup> )	Q95 (m <sup>3</sup> /s)	Q95 esp. (l/s/km <sup>2</sup> )	Pot. sup <sup>(1)</sup> (m <sup>3</sup> /s)
Bauru-Caiuá	29.572,18	0,2	17	221,66	7,50	44,33	1,50	209,08	7,07	183,05	6,19	164,74
Guarani	2.898,58	0,2	17	22,32	7,70	4,46	1,54	ND	ND	ND	ND	ND
Furnas	4.261,55	0,4	12	24,93	5,85	9,97	2,34	ND	ND	ND	ND	ND
Itararé	19.293,91	0,4	9,5	84,26	4,37	33,70	1,75	77,37	4,01	59,17	3,07	43,66
Rio Bonito	2.131,62	0,4	12	12,13	5,69	4,85	2,28	ND	ND	ND	ND	ND
Palermo	1.782,83	0,4	4	3,39	1,90	1,36	0,76	ND	ND	ND	ND	ND
Ponta Grossa	2.119,85	0,4	7	7,33	3,46	2,93	1,38	ND	ND	ND	ND	ND
Passa Dois	8.953,35	0,4	4	16,59	1,85	6,64	0,74	16,21	1,81	10,43	1,16	9,57
Fraturado Centro-Sul	7.295,59	0,4	12	40,77	5,59	16,31	2,24	35,75	4,9	34,04	4,67	19,44
Serra Geral	27.528,16	0,4	14	179,03	6,50	71,61	2,60	142,32	5,17	113,97	4,14	70,71
Carste	750,18	0,3	23	7,85	10,46	3,73	4,97	ND	ND	ND	ND	ND
<b>TOTAL</b>	<b>106.587,80</b>	<b>NA</b>	<b>NA</b>	<b>620,26</b>	<b>NA</b>	<b>198,52</b>	<b>NA</b>	<b>480,72</b>	<b>NA</b>	<b>400,65</b>	<b>NA</b>	<b>308,13</b>

(1) = Q<sub>7</sub>-RPE (m<sup>3</sup>/s) referente somente aos 05 aquíferos com dados disponíveis de Q<sub>7</sub>

NA= Não avaliado

ND=Não disponível

CS: Coeficiente de sustentabilidade, CI: coeficiente de infiltração; RPD: recarga potencial direta;

RPE: Recarga Potencial Explotável.

Na metodologia de balanço entre entradas e retiradas, com os dados disponíveis, a disponibilidade hídrica subterrânea representa a diferença entre a RPE e o volume extraído desse manancial ou do montante outorgado. Entendimento semelhante vale para a superficial, entre potencialidade superficial e volume outorgado. Já o balanço integrado, considera que o volume disponível para outorga superficial, corresponde à parcela resultante da subtração entre vazão Q<sub>7</sub> e a RPE. Na Tabela 3.9 são sumarizados os dados de balanço hídrico por componente e distribuídos de forma segmentada nas UGRHs da bacia do rio Paranapanema. Os dados de outorga são aqueles apresentados em SPR (2014).

Na **Tabela 3.9** observa-se que o balanço entre disponibilidade e retiradas é negativo somente na bacia do Alto Paranapanema, nas demais a situação é de relativo conforto. Deve-se observar que nas bacias do Alto Paranapanema, Norte Pioneiro e Tibagi, falta acrescentar às estimativas de potencialidade superficial os volumes gerados por cinco unidades aquíferas, em decorrência da não existência de estações fluviométricas com área de contribuição cobrindo preferencialmente essas unidades,

conforme a metodologia adotada. Exemplificando, na bacia do Alto Paranapanema, as unidades hidrogeológicas que não tiveram seus aportes estimados para a potencialidade superficial (Guarani, Furnas, Rio Bonito, Palermo e Carste) somam 3.988,95 km<sup>2</sup>, se considerarmos somente aquelas de maiores produtividades (Guarani, Carste e Furnas) a área é de 3.462,12 km<sup>2</sup>, representando cerca de 15% da área dessa bacia. Vale destacar, ainda, que o balanço considerou o volume superficial outorgado e não somente o volume extraído, ou seja, as estimativas são conservadoras.

Os valores consolidados na **Tabela 3.9** representam uma proposta metodológica para ser avaliada conjuntamente entre as instituições de gestão envolvidas na bacia do Paranapanema e o Comitê. Certamente precisará ser desenvolvido maior detalhamento, em especial pela ausência de estações fluviométricas cobrindo vários aquíferos e a melhoria da representatividade dos atuais, como melhor distribuição das estações. A representatividade do balanço hídrico também evoluirá à medida que os dados de extração de águas subterrâneas referenciem claramente qual (i) o aquífero explorado, não somente em qual unidade o poço está locado em superfície; (ii) o volume outorgado; e (iii) o regime de bombeamento. Para o futuro, as novas estações fluviométricas devem ser locadas considerando a área, preferencialmente, de um único aquífero aflorante, de maneira que os dados de vazões reflitam a capacidade de armazenamento de apenas um aquífero.

A escolha do CS é ponto crítico na gestão integrada de águas subterrâneas e superficiais uma vez que é o indicador das parcelas exploráveis provenientes das reservas renováveis. O estabelecimento do CS necessariamente deve considerar como fator chave a participação da vazão de base no escoamento superficial, além de condições de circulação e ambientais específicas.

Para efeitos de cenarização, a comparação entre a vazão  $Q_{95}$  com o fluxo basal  $Q_7$ , na média das estações avaliadas, conforme mostrado nas **Tabelas 3.6** e **3.7**, situa-se em torno de 81%. Por outro lado, a potencialidade superficial indicada na **Tabela 3.9** é menor que a  $Q_{95}$  nas seis UGRHs da bacia e também em todas as unidades hidrogeológicas onde foi possível efetuar essa contabilidade.

**Tabela 3.9** - Balanço integrado global da bacia do Paranapanema.

UGRH	Unidades hidrogeológicas	Área aflorante (Km <sup>2</sup> )	CS	CI (%)	RPD (m <sup>3</sup> /s)	RPD esp. (l/s/km <sup>2</sup> )	RPE (m <sup>3</sup> /s)	RPE esp. (l/s/km <sup>2</sup> )	Q <sub>7</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>7</sub> esp. (l/s/km <sup>2</sup> )	Pot. sup <sup>(1)</sup> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>95</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>95</sub> esp. (l/s/km <sup>2</sup> )	Vol. 2 <sup>(2)</sup> (m <sup>3</sup> /s)	Vol. 3 <sup>(3)</sup> (m <sup>3</sup> /s)	Vol. 4 <sup>(4)</sup> (m <sup>3</sup> /s)	Vol. 5 <sup>(5)</sup> (m <sup>3</sup> /s)
Alto Paranapanema	Bauru-Caiuá	384,15	0,2	17	3,00	7,81	0,60	1,56	2,72	7,07	2,12	2,38	6,19				
	Guarani	2.205,50	0,2	17	16,71	7,58	3,34	1,52	ND	ND	ND	ND	ND				
	Furnas	578,16	0,4	12	3,29	5,70	1,32	2,28	ND	ND	ND	ND	ND				
	Itararé	8.698,19	0,4	9,5	36,09	4,15	14,43	1,66	34,88	4,01	20,45	26,68	3,07				
	Rio Bonito	295,77	0,4	12	1,55	5,23	0,62	2,09	ND	ND	ND	ND	ND				
	Palermo	231,06	0,4	4	0,41	1,76	0,16	0,70	ND	ND	ND	ND	ND				
	Passa Dois	3.140,59	0,4	4	5,53	1,76	2,21	0,70	5,68	1,81	3,47	3,66	1,16				
	Fraturnado Centro-Sul	3.668,17	0,4	12	20,15	5,49	8,06	2,20	17,97	4,90	9,91	17,11	4,67				
	Serra Geral	2.844,43	0,4	14	18,65	6,56	7,46	2,62	14,71	5,17	7,24	11,78	4,14				
	Carste	678,46	0,3	23	7,09	10,44	2,13	3,13	ND	ND	ND	ND	ND				
<b>TOTAIS</b>	<b>22.724,48</b>	NA	NA	<b>112,46</b>	NA	<b>40,33</b>	NA	<b>75,96</b>	NA	<b>43,19</b>	<b>61,60</b>	ND	<b>1,3</b>	<b>48,97</b>	<b>39,03</b>	<b>-5,78</b>	
Médio Paranapanema	Bauru-Caiuá	9.967,13	0,2	17	76,60	7,69	15,32	1,54	70,47	7,07	55,15	61,70	6,19				
	Serra Geral	6.789,52	0,4	14	43,38	6,39	17,35	2,56	35,10	5,17	17,75	28,11	4,14				
	<b>TOTAIS</b>	<b>16.756,65</b>	NA	NA	<b>119,97</b>	NA	<b>32,67</b>	<b>4,09</b>	<b>105,57</b>	NA	<b>72,90</b>	<b>89,81</b>	ND				
Pontal Paranapanema	Bauru-Caiuá	11.530,15	0,2	17	83,92	7,28	16,78	1,46	81,52	7,07	64,73	<b>71,37</b>	6,19				
	Serra Geral	810,61	0,4	14	5,10	6,29	2,04	2,52	4,19	5,17	2,15	<b>3,36</b>	4,14				
	<b>TOTAIS</b>	<b>12.340,76</b>	NA	NA	<b>89,02</b>	NA	<b>18,83</b>	NA	<b>85,71</b>	NA	<b>66,88</b>	<b>74,73</b>	ND				
Norte Pioneiro	Guarani	391,42	0,2	17	3,01	7,68	0,60	1,54	ND	ND	ND	ND	ND				
	Furnas	1.401,46	0,4	12	8,15	5,82	3,26	2,33	ND	ND	ND	ND	ND				
	Itararé	4.396,99	0,4	9,5	19,36	4,40	7,74	1,76	17,63	4,01	9,89	13,48	3,07				
	Rio Bonito	544,36	0,4	12	2,94	5,40	1,18	2,16	ND	ND	ND	ND	ND				
	Palermo	579,28	0,4	4	1,05	1,81	0,42	0,72	ND	ND	ND	ND	ND				
	Ponta Grossa	512,96	0,4	7	1,76	3,43	0,70	1,37	ND	ND	ND	ND	ND				
	Passa Dois	2.951,05	0,4	4	5,28	1,79	2,11	0,72	5,34	1,81	3,23	3,44	1,16				
	Fraturnado Centro-Sul	1.245,79	0,4	12	6,85	5,50	2,74	2,20	6,10	4,90	3,37	5,81	4,67				
Serra Geral	4.574,44	0,4	14	28,31	6,19	11,33	2,48	23,65	5,17	12,32	18,94	4,14					

	Carste	70,01	0,3	23	0,75	10,64	0,22	3,19	ND	ND	ND	ND	ND				
	<b>TOTAIS</b>	<b>16.667,76</b>	<b>NA</b>	<b>NA</b>	<b>77,45</b>	<b>NA</b>	<b>30,31</b>	<b>NA</b>	<b>52,73</b>	<b>NA</b>	<b>28,81</b>	<b>41,67</b>	<b>ND</b>	<b>1,47</b>	<b>6,55</b>	<b>28,84</b>	<b>22,26</b>
Tibagi	Bauru-Caiuá	10,99	0,2	17	0,08	7,52	0,02	1,50	0,08	7,07	0,06	0,07	6,19				
	Guarani	301,60	0,2	17	2,60	8,63	0,52	1,73	ND	ND	ND	ND	ND				
	Furnas	2.281,98	0,4	12	13,49	5,91	5,39	2,36	ND	ND	ND	ND	ND				
	Itararé	6.198,68	0,4	9,5	28,82	4,65	11,53	1,86	24,86	4,01	13,33	19,01	3,07				
	Rio Bonito	1.291,52	0,4	12	7,65	5,92	3,06	2,37	ND	ND	ND	ND	ND				
	Palermo	972,49	0,4	4	1,93	1,99	0,77	0,80	ND	ND	ND	ND	ND				
	Ponta Grossa	1.606,94	0,4	7	5,57	3,47	2,23	1,39	ND	ND	ND	ND	ND				
	Passa Dois	2.861,61	0,4	4	5,78	2,02	2,31	0,81	5,18	1,81	2,87	3,33	1,16				
	Fraturnado Centro-Sul	2.381,76	0,4	12	13,77	5,78	5,51	2,31	11,67	4,90	6,16	11,11	4,67				
	Serra Geral	7.043,60	0,4	14	47,36	6,72	18,94	2,69	36,42	5,17	17,47	29,16	4,14				
	Carste	1,73	0,3	23	0,02	10,58	0,01	3,17	ND	ND	ND	ND	ND				
		<b>TOTAIS</b>	<b>24.952,90</b>	<b>NA</b>	<b>NA</b>	<b>127,05</b>	<b>NA</b>	<b>50,28</b>	<b>NA</b>	<b>78,20</b>	<b>NA</b>	<b>39,90</b>	<b>62,68</b>	<b>ND</b>	<b>2,55</b>	<b>10,77</b>	<b>47,73</b>
Pirapone ma	Bauru-Caiuá	7.680,11	0,2	17	58,05	7,56	11,61	1,51	54,30	7,07	42,69	47,54	6,19				
	Serra Geral	5.466,32	0,4	14	36,23	6,63	14,49	2,65	28,26	5,17	13,77	22,63	4,14				
	<b>TOTAIS</b>	<b>13.146,43</b>			<b>94,28</b>	<b>NA</b>	<b>26,10</b>	<b>NA</b>	<b>82,56</b>	<b>NA</b>	<b>56,46</b>	<b>70,17</b>	<b>ND</b>	<b>2,69</b>	<b>4,8</b>	<b>23,41</b>	<b>51,66</b>
<b>TOTAL BACIA PARANAPANEMA</b>		<b>106.588,98</b>	<b>ND</b>	<b>ND</b>	<b>620,25</b>	<b>NA</b>	<b>198,52</b>	<b>NA</b>	<b>480,73</b>	<b>NA</b>	<b>308,14</b>	<b>400,66</b>	<b>ND</b>	<b>14,23</b>	<b>89,59</b>	<b>184,29</b>	<b>218,55</b>

ND= não disponível

NE= não avaliado

(1)=**Q<sub>7</sub> - RPE** . Potencialidade superficial, referente somente aos 05 aquíferos com dados disponíveis de Q<sub>7</sub>

(2)=volume outorgado de água subterrânea até 2012-2013, considera a vazão nominal do poço

(3)=volume outorgado de água superficial, até 2012-2013, inclui ANA, SP e PR.

(4)=**RPE - vol. outorgado de águas subterrâneas**. Volume disponível de águas subterrâneas

(5)= **(1) - (3)**, volume disponível de água superficial, inclui os valores de vazão ecológica



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUASPARANÁ (2012) Site acessado em dezembro de 2012. Disponível em: <http://www.aguasparana.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=59>.
- ÁGUAS PARANÁ (2010a) Instituto de Águas do Paraná & SEMA/PR – Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. 2010. Elaboração do Plano Estadual de Recursos Hídricos: Diagnóstico das Disponibilidades Hídricas Subterrâneas. Produto 1.2 – Parte A. 122p. e anexos.
- ÁGUAS PARANÁ (2010b) Instituto de Águas do Paraná & SEMA/PR – Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. 2010. Elaboração do Plano Estadual de Recursos Hídricos: Diagnóstico das Disponibilidades Hídricas Subterrâneas. Produto 1.2 – Parte B. 122p. e anexos.
- Almeida, F.F.M. (1986) Distribuição Regional e Relações Tectônicas do Magmatismo Pós-Paleozóico no Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 16, n. 4, p. 325-349.
- Almeida, F.F.M.; Poncano, W.L.; Dantas, A.S.L.; Carneiro, C.D.R.; Melo, M.S.; Bistrichi, C.A. (1981) Mapa Geológico do Estado de São Paulo, escala 1:500.000 - Nota Explicativa. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 126 p.
- ANA (2013) Mapa das Áreas Aflorantes dos Aquíferos e Sistemas Aquíferos do Brasil, Escala 1:1.000.000 e estimativas das Reservas Potenciais Explotáveis dos principais aquíferos aflorantes. Nota Técnica nº 19/2013/GESUB/SIP. Brasília, 8 p.
- ANA (2010) Atlas Brasil: abastecimento urbano de água. Brasília. Disponível em: <http://atlas.ana.gov.br/Atlas/forms/Home.aspx>.
- ANP (2013) Bacia do Paraná (Apresentação power point). Seminário Técnico-Ambiental da 12ª Rodada de Licitações de Petróleo e Gás, Rio de Janeiro, ANP, 82 p.
- Araújo, L.M.; Trigüis, J.A.; Cerqueira, J.R.; Freitas, L.C.S. (2000) The Atypical Permian Petroleum System of the Paraná Basin, Brazil. *In: MELLO, M.R.; KATZ, B.J. (Eds.). Petroleum Systems of South Atlantic Margins, AAPG Memoir*, v. 3, p. 377-402.
- Assine, M.L. (1996) Aspectos da Estratigrafia das Sequências Pré-Carboníferas da Bacia do Paraná no Brasil. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 207 p.
- Assine, M.L.; Soares, P.C.; Milani, E.J. (1994) Sequências Tectono-Sedimentares Mesopaleozóicas da Bacia do Paraná. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, v. 24, n. 2, p. 77-89.
- Assine, M.L.; Alvarenga, C.J.S.; Perinotto, J.A.J. (1998) Formação Iapó: Glaciação Continental no Limite Ordoviciano/Siluriano da Bacia do Paraná. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, v. 28, n. 1, p. 51-60.
- Barizon, M. R. (2003) Estudo hidrogeoquímico da porção meridional do sistema aquífero Bauru no estado de São Paulo. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro. 153p.
- Batezelli, A.; Saad, A.R.; Fúlfaro, V.J.; Corsi, A.C.; Landim, P.M.B.; Perinotto, J.A.J. (2005). Análise de Bacia Aplicada às Unidades Mesozoicas do Triângulo Mineiro (Sudeste do Brasil): Uma Estratégia na Prospecção de Recursos Hídricos Subterrâneos. *Revista Águas Subterrâneas. ABAS*. São Paulo. Vol. 19, p 61-73.
- Bettú, D. F.; Ferreira, F. J. F.; Salamuni, E. & Fernandes, L. A. (2006) Compartimentação Estrutural e Conectividade dos Sistemas Aquíferos Caiuá e

- Serra Geral no Noroeste do Paraná – BRASIL. *Revista Brasileira de Geofísica* (2006) 24(3): 393-409.
- Caltabeloti, F.C. (2011) *Alojamento e Deformação de Plútons Graníticos da Extremidade Nordeste da Suíte Intrusiva Cunhaporanga (Domínio Apiaí - Faixa Ribeira, PR)*. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 98 p.
- Campanha, G.A. (2002) O Papel do Sistema de Zonas de Cisalhamento Transcorrentes da Configuração da Porção Meridional da Faixa Ribeira. Tese (Livre-Docência) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 105 p.
- Campanha, G.A.C.; Gimenez Filho, A.; Caetano, S.L.V.; Pires, F.A.; Dantas, A.S.L.; Teixeira, A.L.; Dehira, L.K. (1985) Geologia das Folhas Iporanga (SG.22-X-B-V-2) e Gruta do Diabo (SG.22-X-B-VI-1), Estado de São Paulo. São Paulo, IPT/Pró-Minério, Relatório 22-352.
- Celligoi, A & Duarte, U. 2009. Determinação da reserva reguladora do aquífero Caiuá no estado do Paraná utilizando as curvas de recessão do Rio das Antas. *Águas Subterrâneas*, v.23, n.01, p.13-20.
- Cutrim, A. O. & Rebouças, A. C. 2004. Estudo da recarga do Aquífero Furnas na cidade de Rondonópolis-MT. *ÁGUAS SUBTERRÂNEAS*, São Paulo, Brasil - eISSN 2179-9784. Suplemento – XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas.
- Campanha, G.A.C.; Gimenez Filho, A.; Caetano, S.L.V.; Pires, F.A.; Dantas, A.S.L.; Teixeira, A.L.; Dehira, L.K. (1986) Geologia e Estratigrafia da Região das Folhas Iporanga e Gruta do Diabo, Vale do Ribeira, São Paulo. XXXIV Congresso Brasileiro de Geologia, Goiânia, SBG, v. 2, p. 1058-1073.
- Campanha, G.A.C.; Sadowski, G.R. (1998) Cinturão Ribeira: tectônica e questões pendentes sobre sua evolução. XL Congresso Brasileiro de Geologia, Belo Horizonte, SBG, p. 17.
- Campos, H.C.N.S. (1993). Caracterização e Cartografia das Províncias Hidrogeoquímicas do Estado de São Paulo. Tese (Doutorado). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. São Paulo, 117 p.
- Campos, J.E.; Ferreira, L.M.R.; Albuquerque Filho, J.L.; Kakazu, M.C. (2002). Síntese do Conhecimento Hidrogeológico da Bacia Sedimentar de São Paulo. XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. ABAS. Florianópolis. 1 CD ROM.
- Campos, J.E.; Albuquerque Filho, J.L. (2005). Aquífero São Paulo. In: Rocha, G. (Coord.): Mapa de Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo, Escala 1:1.000.000. Nota Explicativa. DAEE/ IG/ IPT/CPRM. São Paulo, p. 52-56.
- Carestiato, G.L. (2014) Estudo dos Impactos que o Desenvolvimento da Exploração e Produção de Shale Gas causa na Oferta e Consumo de Gás Natural e sua Relação com a Precificação do mesmo, analisando o caso dos EUA. Projeto Final (Graduação em Geologia do Petróleo) - Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 119 p.
- Celligoi, A. & Duarte, U. (2002) Hidrogeoquímica do Aquífero Caiuá no Estado do Paraná. *Boletim Paranaense de Geociências*, n. 51, p. 19-32, 2002. Editora UFPR.
- Celligoi, A. (2000) Hidrogeologia da Formação Caiuá no estado do Paraná. São Paulo, 95p. (Tese de Doutorado Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo).
- CETESB (2013) Relatório de qualidade das águas subterrâneas do Estado de São Paulo 2010-2012. Série Relatórios/CETESB, Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental de São Paulo, São Paulo. 242 p.
- CETESB (2012) Site acessado em dezembro de 2012. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/agua/Qualidade-da-?gua-Subterranea/12-Serra-Geral>.

- CETESB (2007) Relatório de qualidade das águas subterrâneas do Estado de São Paulo 2004-2006. Série Relatórios / Secretaria de Estado do Meio Ambiente/CETESB, Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental de São Paulo. São Paulo. 199 p.
- CETESB (2005) Decisão de Diretoria nº 195-2005- E, de 23 de nov. de 2005. Dispõe sobre a aprovação dos valores orientadores para solos e águas subterrâneas no Estado de São Paulo. Em substituição aos valores orientadores de 2001, e dá outras providências. [http://www.cetesb.sp.gov.br/solo/relatorios/tabela\\_valores\\_2005.pdf](http://www.cetesb.sp.gov.br/solo/relatorios/tabela_valores_2005.pdf)
- CPRM (2004) Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo, Sistema de Informações Geográficas – SIG. 46 folhas na escala 1:1.000.000. CPRM, Brasília, 41 CD-ROMs.
- CPRM (2012) Projeto Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas: Relatório Diagnóstico Aquífero Furnas nos Estados de São Paulo, Mato Grosso do Sul e Paraná. Bacia Sedimentar do Paraná / Maria Cecília de Medeiros Silveira, Maria Antonieta Alcântara Mourão, Coord. CPRM, Belo Horizonte, v. 12, 35 p.
- CPRM (2012a). Projeto Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas: Relatório Diagnóstico Sistema Aquífero Bauru-Caiuá no Estado de Minas Gerais. Bacia Sedimentar do Paraná. José do Espírito Santo Lima, Cláudia Sílvia Cerveira de Almeida, Maria Antonieta Alcântara Mourão, Coord. CPRM. Belo Horizonte, Vol. 13, 35 p.
- CPRM (2012b). Projeto Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas: Relatório Diagnóstico Sistema Aquífero Furnas nos Estados de São Paulo, Mato Grosso do Sul e Paraná. Bacia Sedimentar do Paraná. Maria Cecília de Medeiros Silveira, Maria Antonieta Alcântara Mourão, Coord. CPRM. Belo Horizonte, Vol. 12, 35 p.
- Cray, J.; Colbath, G.K.; Faria, A.; Boucot, A.J.; Rohr, D.M. (1985) Silurian-Age Fossils from the Paleozoic Paraná Basin, Southern Brazil. *Geology*, v. 13, p. 521-525.
- Davies, R.J.; Mathias, S.A.; Noss, J.; Hustof, S.; Newport, L. (2012) Hydraulic Fractures: How Far Can They Go? *Marine and Petroleum Geology*, v. 37, p. 1-6.
- DAEE, IG, IPT e CPRM (2005) Mapa de águas subterrâneas do Estado de São Paulo : Escala 1:1.000.000. Nota explicativa. Coordenação geral: Gerôncio Rocha. São Paulo.
- DAEE (1979) Estudo de Águas Subterrâneas - Regiões Administrativas 10 e 11 - Presidente Prudente e Marília. São Paulo: DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA – DAEE, 1979b. v.1 e 2.
- DAEE (1975). Estudo de Águas Subterrâneas – Região Administrativa 1 - Grande São Paulo. .DAEE. São Paulo. 3 vol.
- Domenico, P. A. e Schwartz, F. W. (1990) Physical and Chemical Hydrogeology. John Wiley & Sons, Singapore.
- Etchebehere, M.L.C.; Saad, A.R. (2002) Feições de Liquefação no Vale do Rio do Peixe, Região Ocidental Paulista - Implicações Paleossísmicas. *Geociências*, v. 21, n. 1-2, p. 43-56.
- Etchebehere, M.L.C.; Saad, A.R.; Bistrichi, C.A.; Garcia, M.J.; Silva, M.F.; Bedani, E.F. (2007) Modelo de Evolução Geológica da Região do Atual Município de Atibaia (SP) durante o Cenozóico. *Revista Universidade de Guarulhos - Geociências*, v. 6, n. 1, p. 4-31.
- Faleiros, F.M. (2008) Evolução de Terrenos Tectono-Metamórficos da Serrania do Ribeira e Planalto Alto Turvo (SP, PR). Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 306 p.

- Faria, A. (1982) Formação Vila Maria - Nova Unidade Litoestratigráfica Siluriana da Bacia do Paraná. *Ciências da Terra*, v. 3, p. 12-15.
- Fernandes, L.A. (2006) Caiuá Desert Sedimentary Environments and Facies (Caiuá Group, Late Cretaceous, Brazil). IV Congresso Latinoamericano de Sedimentología, XI Reunión Argentina de Sedimentología, San Carlos de Bariloche. Asociación Argentina de Sedimentología; International Association of Sedimentologists, p. 97.
- Fernandes, L.A.; Coimbra, A.M. (2000) Revisão Estratigráfica da Parte Oriental da Bacia Bauru (Neocretáceo). *Revista Brasileira de Geociências*, v. 30, n. 4, p. 723-734.
- Fernandes, A.M.; Perrotta, M.M.; Salvador, E.D.; Azevedo, S.G.; Gimenez Filho, A.; Paulon, N. (2009) Potencial dos Aquíferos Fraturados do Estado de São Paulo: Condicionantes Geológicos. *Águas Subterrâneas*, v. 21, n. 1, p. 65-84.
- Fiumari, S.L. (2004) Caracterização do Sistema Hidrogeológico Bauru no Município de Araguari - MG. Dissertação (Mestrado). Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 122 p.
- França, A.B., Potter, P.E. (1988) Estratigrafia, Ambiente Depositional e Análise de Reservatório do Grupo Itararé (Permocarbonífero), Bacia do Paraná (Parte 1). *Boletim de Geociências da Petrobras*, v. 2, p. 147-191.
- Franzini, A. S. (2010) Avaliação hidrogeológica em área de assentamento. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas. 97p.
- Frasca, M.H.B.O.; Figueiredo, M.C.R.; Almeida, M.A.; Coutinho, J.M.V. (1990) Petrografia e Geoquímica da Formação Água Clara - Região de Araçáiba, SP. *Boletim IG. USP, Série Científica*, v. 21, p.73-92.
- Gama Junior, E. (1979) A Sedimentação do Grupo Passa Dois (Exclusive Formação Irati): Um modelo geomórfico. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 9, n. 1, p 1-16.
- Gastmans, D., Menegário, A. A. & Moura, C. C. (2013) Hidrogeoquímica das Águas Subterrâneas do Aquífero Serra Geral na Porção Centro Sul do Estado de São Paulo. *Revista Águas Subterrâneas* 27(3): 27-44.
- Gesicki, A.L.D. (2007) Evolução Diagenética das Formações Pirambóia e Botucatu (Sistema Aquífero Guarani) no Estado de São Paulo. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 175 p.
- Garcia, M.A.; Ribeiro, H.J.P.S.; Souza, E.S.; Triguís, J.A. (2011) Correlação entre a Faciológica e a Geoquímica Orgânica dos *Tar Sands* da Formação Pirambóia, Triássico da Bacia do Paraná, Fazenda Betumita, no Estado de São Paulo. *Geociências*, v. 30, n. 3, p. 357-369.
- Giacomeli, H.; Azzi, A.A.; Zanardo, A. (2009) Tipos de silicificação reconhecidos no nordeste da Bacia do Paraná. XI Simpósio de Geologia do Sudeste, São Pedro (SP), SBG, 1 p.
- Gimenez Filho, A. (1993) Evolução do Complexo Granítico Três Córregos a Noroeste de Apiaí - SP. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 118 p.
- Gimenez Filho, A.; Teixeira, W.; Figueiredo, M.C.H., Trevizoli Júnior, L. (1995) Geologia, Petrografia e Litogeoquímica do Complexo Granítico Três Córregos na Região de Barra do Chapéu e Ribeirão Branco, SP. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 25, p. 92-106.

- GOIÁS (2006). Hidrogeologia do Estado de Goiás. Leonardo de Almeida, Leonardo Resende, Antônio Passos Rodrigues, José Eloi Guimarães Campos, Coord. Secretaria de Indústria e Comércio. Goiânia. 232 p.
- Grahn, Y. (1992) Revision of Silurian and Devonian Strata of Brazil. *Palinology*, v. 16, p. 35-61.
- Gray, J.; Colbath, G.K.; Faria, A.; Boucot, A.J.; Rohr, D.M. (1985) Silurian-Age Fossils from the Paleozoic Paraná Basin, Southern Brazil. *Geology*, v. 13, p. 521-525.
- Guedes, E.; Heilbron, M.; Vasconcelos, P.M.; Valeriano, C.M.; Almeida, J.C.H.; Teixeira, W.; Thomaz Filho, A. (2005) K-Ar and <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar Ages of Dikes Emplaced in the Onshore Basement of the Santos Basin, Resende Area, SE Brazil: Implications for Parque Estadual Intervalles the South Atlantic Opening and Tertiary Reactivation. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 18, p. 371-382.
- Hackspacher, P.C.; Dantas, E.L.; Spoladore, A.; Fetter, A.H.; Oliveira, M.A.F. (2000) Evidence of Neoproterozoic Backarc Basin Development in the Central Ribeira Belt, Southeastern Brazil: New Geochronological and Geochemical Constraints from the São Roque-Açungui Groups. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 30, p. 110-114.
- Heilbron, M.; Pedrosa-Soares, A.C.; Campos Neto, M.; Silva, L.C.; Trouw, R.A.J.; Janasi, V.C. (2004) A Província Mantiqueira. *In: MANTESSO-NETO, V., BARTORELLI, A., CARNEIRO, C.D.R.; BRITO NEVES, B.B. (Eds.). O Desvendar de Um Continente: A Moderna Geologia da América do Sul e o Legado da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*, p. 203-234.
- Hirata, R.C.A.; Ferreira, L.M.R. (2001). Os Aquíferos da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê: Disponibilidade Hídrica e Vulnerabilidade à Poluição. *Revista Brasileira de Geociências*. Vol. 1, n. 31, p. 43-50.
- Holz, M.; França, A.B.; Souza, P.A.; Iannuzzi, R.; Rohn, R. (2010) A Stratigraphic Chart of the Late Carboniferous/Permian Succession of the Eastern Border of the Paraná Basin, Brazil, South America. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 29, p. 381-399.
- Honorato, T. Z. 2013. Utilização da curva de recessão na bacia do rio Taquara: Uma análise metodológica de aplicação na gestão de recursos hídricos subterrâneos. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Trabalho de Conclusão de Curso. 68p.
- IAP/SEMA (2010) Diagnóstico das Disponibilidades Hídricas Subterrâneas, Plano Estadual de Recursos Hídricos do Paraná.
- Iritani, M.A.; Ezaki, S. (2008) As Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo. Secretaria de Estado do Meio Ambiente -SMA. São Paulo, 104 p.
- Jordão, A.M. (1997). Estudos Hidrogeológicos do MS – SANESUL/TAHAL. 1. Evolução Estrutural e História Geológica. X Encontro Nacional de Perfuradores de Poços. ABAS. Campo Grande, p. 105-124.
- Jacomó, J.C.P. (2014) Os Hidrocarbonetos Não Convencionais: Uma Análise da Exploração do Gás de Folhelho na Argentina á Luz da Experiência Norte Americana. Dissertação (Mestrado) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 145 p.
- Janasi, V.A.; Leite, R.L.; Vanschmus, W.R. (2001) U-Pb Chronostratigraphy of the Granitic Magmatism in the Agudos Grandes Batholith (west of São Paulo) - Implications for Evolution of the Ribeira Belt. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 14, p. 363-376.

- Jarvie, D.M.; Hill, R.J.; Pollastro, R.M.; Wavrek, D.A.; Bowker, K.A.; Claxton, B.L.; Tobey, M.H. (2003) Evaluation of unconventional natural gas prospects: The Barnett Shale fractured shale gas model (abs.): 21st International Meeting on Organic Geochemistry, September 8–12, 2003, Krakow, Poland, Book of Abstracts, Part II, p. 3-4.
- Kiang, C. H.; Teixeira, A. J. & Vidal, A. C. 2003. Aspectos hidrogeológicos e hidroquímicos das regiões dos municípios de Mogi mirim, Mogi Guaçu e Itapira. São Paulo, UNESP, Geociências, v. 22, N. Especial, p. 63-73.
- King, G.E. (2012) Hydraulic Fracturing 101: What Every Representative, Environmentalist, Regulator, Reporter, Investor, University Researcher, Neighbor, and Engineer Should Know About Estimating Frac Risk and Improving Frac Performance in Unconventional Gas and Oil Wells. SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference, 6–8 February, The Woodlands, Texas, USA. Society of Petroleum Engineers. SPE-162842-MS.
- Lange, F.W.; Petri, S. (1967) The Devonian of Paraná Basin. *Boletim Paranaense de Geociências*, n. 21-22, p. 63-98.
- Lastoria, G.; Sinelli, O.; Kiang, C.H.; Hutcheon, I.; Paranhos Filho, A.C.; Gastmans, D. (2006). Hidrogeologia da Formação Serra Geral no Estado de Mato Grosso do Sul. *Revista Águas Subterrâneas*. Vol. 20, n. 1, p. 139-150. Estado do Meio Ambiente – SMA. São Paulo, 104 p.
- Lisboa, A.; Rosa Filho, E. F. ; Hindi, E. C. ; Till, H. . Uso sustentável do Aquífero Carste de Curitiba. In: XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2002, Florianópolis. *Anais do XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*. São Paulo: ABAS, 2002. v. 1. p. 100-111
- Maack, R. (1941) Algumas Observações a Respeito da Existência e da Extensão do Arenito Superior São Bento ou Caiuá no Estado do Paraná. *Arquivos do Museu Paranaense*, v. 1, p. 107-129.
- Maack, R. (1950) Notas Complementares à Apresentação Preliminar do Mapa Fitogeográfico do Estado do Paraná (Brasil). *Arquivos de Biologia e Tecnologia*, Curitiba, v. 7, p. 351-362.
- Machado, F.B.; Nardy, A.J.R.; Oliveira, M.A.F. (2007) Geologia e Aspectos Petrológicos das Rochas Intrusivas e Efusivas Mesozóicas de Parte da Borda Leste da Bacia do Paraná no Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 37, n. 1, p. 64-80.
- Mancuso, M.A.; Campos J.E (2005) Aquífero Bauru. In: Rocha, G. (Coord.): Mapa de Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo, Escala 1:1.000.000. Nota Explicativa. DAEE/ IG/ IPT/CPRM. São Paulo, p. 32-39.
- Marini, O.J.; Trein, E.; Fuck, R.A. (1967) O Grupo Açungui no Estado do Paraná. *Boletim Paranaense de Geociências*, v. 23/25, p. 43-103.
- Marques, L.S. (2001) Geoquímica dos Diques Toleíticos da Costa Sul-Sudeste do Brasil: Contribuição ao Conhecimento da Província Magmática do Paraná. Tese (Livre-Docência) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 86 p.
- Massoli, M. (2007) Caracterização Litofaciológica das Formações Pirambóia e Botucatu, em Subsuperfície, no Município de Ribeirão Preto (SP), e sua Aplicação na Prospecção de Águas Subterrâneas. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 173 p.
- Melo, M.S.; Giannini, P.C.F. (2007) Sandstone Dissolution Landforms in the Furnas Formation, Southern Brazil. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 32, p. 2149-2164.

- Melo, M.S.; Guimarães, G.B.; Pontes, H.S.; Massuqueto, L.L.; Pigurim, I.; Bagatim, H.Q.; Giannini, P.C.F. (2011) Carste em Rochas Não-Carbonáticas: O Exemplo dos Arenitos da Formação Furnas, Campos Gerais Do Paraná/Brasil e as Implicações para a Região. SBE, Campinas, Espeleo-Tema, v. 22, p. 81-97.
- Mendes, E. A. A.; Nakandakare, K. C., Souza, A. M., Fernandes, A. M. P., Silveira, E. L., Feltrin, J.; Guarda, M, J. Mananciais Subterrâneos no Estado do Paraná. XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Florianópolis, 2002.
- Mendes, E. A.A.; Nakandakare, K.C.; Souza, M.A.; Fernandes, A.M.P.; Silveira, E.L.; Feltrin, J.; Guarda, M.J. (2002). Mananciais Subterrâneos no Estado do Paraná. XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. ABAS. Florianópolis, 1 CD ROM.
- Milani, E.J.; Melo, J.H.G.; Souza, P.A.; Fernandes, L.A.; França, A.B. (2007) Bacia do Paraná. In: MILANI, E.J.; RANGEL, H.D.; BUENO, G.V.; STICA, J.M.; WINTER, W.R.; CAIXETA, J.M.; PESSOA NETO, O.C. (Eds.). Bacias Sedimentares Brasileiras - Cartas Estratigráficas. Boletim de Geociências da Petrobras, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 265-287.
- Milani, E.J.; Ramos, V.A. (1998). Orogenias Paleozoicas no Domínio Sul-Occidental do Gondwana e os Ciclos de Subsidiência da Bacia do Paraná. Revista Brasileira de Geociências, SBG. Vol. 28, p. 473-484 e 527-544.
- Milani, E.J. (1997) Evolução Tectono-Estratigráfica da Bacia do Paraná e seu Relacionamento com a Geodinâmica Fanerozóica do Gondwana Sul-Occidental. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2 v., 255 p.
- Milani, E.J.; França, A.B.; Schneider, R.L. (1994) Bacia do Paraná. Boletim de Geociências da Petrobras, Rio de Janeiro, v.8, n. 1, p. 69-82.
- Milani, E.J.; Zalán, P.V. (1998) Brazilian Geology Part I: The Geology of Paleozoic Cratonic Basins and Mesozoic Interior Rifts of Brazil. In: 1998 AAPG International Conference & Exhibition, Rio de Janeiro, Brasil. Short Course Notes, 184 p.
- MINEROPAR (2007) Mapeamento Geológico da Folha de Ponta Grossa (1:100.000). Governo do Estado do Paraná, Relatório Final, 169 p.
- Monteiro, G.C. (2013) Estudo de Gás de Folhelho na Formação Ponta Grossa, Bacia do Paraná. Projeto Final (Graduação em Geofísica) - Universidade Federal Fluminense, Niterói, 53 p.
- Moreira, M.I.C.; Borghi, L. (1999) Fácies Sedimentares e Sistemas Depositionais das Formações Alto Garças e Vila Maria na Região de Chapada dos Guimarães (MT), Borda Noroeste da Bacia do Paraná. Revista Brasileira de Geociências, v. 29, n. 3, p. 419-428.
- Morenghi, C.L. (2007) Arcabouço Estratigráfico e Potencial de Armazenamento em Arenitos Permocarboníferos do Grupo Itararé na Região do Alto Estrutural de Pitanga, Centro-Leste do Estado de São Paulo. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 105 p.
- Moro, R.P.X. (1993) A Bacia Ordoviciano do Grupo Castro - PR. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 157 p.
- Moro, R.P.X.; Brito Neves, B.B. (2004) Nota Explicativa do Mapa Geológico da Formação da Formação Camarinha - PR. *Boletim Paranaense de Geociências*, v. 55, p. 43-51.
- Northfleet, A.A.; Medeiros, R.A.; Mühlmann, H. (1969) Reavaliação dos Dados Geológicos da Bacia do Paraná. Boletim Técnico da Petrobras, Rio de Janeiro, v.12, n.3, p. 291-346.

- Oda, G. H.; Iritani, M. A.; Ferreira, L. M. R.; Silva, A. H. da; Rocha, G. A. (2005) Proposta Metodológica para Exploração Racional do Sistema Aquífero Tubarão no Estado de São Paulo. XIV Encontro Nacional de Perfuradores de Poços II Simpósio de Hidrogeologia do Sudeste.
- Oliveira, L.A. (2002). O Sistema Aquífero Bauru na Região de Araguari/MG: Propostas de Gestão e Parâmetros Dimensionais. Dissertação (Mestrado). Instituto de Geociências. Universidade de Brasília. Brasília. 120 p.
- Oliveira, L.A. (2005). Aspectos Hidrológicos das Sequências Pré-Cenozoicas nas Regiões Sul e Sudoeste do Estado de Goiás. Monografia de Seminário II. Instituto de Geociências. Universidade de Brasília. Brasília. 25 p.
- Oliveira, L.A. (2009). O Sistema Aquífero Guarani no Estado de Goiás: Distribuição, Caracterização Hidrodinâmica, Hidroquímica, Composição Isotópica e CFCs. Tese (Doutorado). Universidade de Brasília, Instituto de Geociências. Brasília, 188 p.
- Oliveira, L.A.; Campos, J.E.G. (2004). Parâmetros hidrogeológicos do sistema Aquífero Bauru na região de Araguari/MG: fundamentos para a gestão do sistema de abastecimento de água. *Revista Brasileira de Geociências*. SBG. Vol 34, n. 2, p. 213-218.
- Oliveira, M.A.F.; Nardy, A.J.R.; Maniesi, V. (2002) Petrologia e Litogeoquímica das Rochas Metabásicas da Região de Cajamar (SP). *Geociências*, v. 21, n. 1-2, p. 33-42.
- Paraguassu, A.B. (1968) Contribuição ao Estudo da Formação Botucatu: Sedimentos Aquosos, Estruturas Sedimentares e Silicificação. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 131 p.
- Paula e Silva, F; Kiang, C.H.; Caetano-Chang, M.R. (2005). Hidroestratigrafia do Grupo Bauru (K) no Estado de São Paulo. *Revista Águas Subterrâneas*. ABAS. São Paulo. Vol. 19, n. 2, p 19-36.
- Perinotto, J.A.J.; Fulfaro, V.J. (2001) Depósitos de Carvão Permianos Pós-Glaciais da Bacia do Paraná no Estado de São Paulo, Brasil. *Revista Universidade de Guarulhos - Geociências*, v. 6, n. 6, p. 56-63.
- Piccirillo, E.M.; Melfi, A.J. (1988) *The Mesozoic Flood Volcanism of the Paraná Basin: Petrogenetic and Geophysical Aspects*. Instituto Astronômico e Geofísico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 600 p.
- Prazeres Filho, H.J. (2000) Litogeoquímica, Geocronologia (U-Pb) e Geologia Isotópica dos Complexos Graníticos Cunhaporanga e Três Córregos, Estado do Paraná. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 180 p.
- Prazeres Filho, H.J. (2005) Caracterização Geológica e Petrogenética do Batólito Granítico Três Córregos (PR-SP): Geoquímica Isotópica (Nd, Sr, Pb), Idades (ID-TIMS, Shrimp) e  $\delta^{18}O$  em Zircão. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 207 p.
- Rebouças, A.C. & Fraga, C.G.(1988) Hidrogeologia das rochas vulcânicas do Brasil. *Revista Água Subterrânea* n° 12. Agosto de 1988. p 30-55.
- Renne, P.; Ernesto, M.; Pacca, I.G.; Coe, R.S.; Glen, J.M.; Prévot, M.; Perrin, M. (1992) The Age of Paraná Flood Volcanism, Rifting of Gondwanaland, and the Jurassic-Cretaceous Boundary. *Science*, v. 258, p. 975-979.
- Ricomini, C.; Gimenez Filho, A.; Almeida, F.F.M. (1984) Considerações sobre a Estratigrafia do Permo-Triássico na Região da Serra do Cadeado, Paraná. XXXIII Congresso Brasileiro de Geologia, Rio de Janeiro, p. 754-764.

- Rosa Filho, E.F.; Hindi, E.C.; Rostirolla, S.P.; Ferreira, F.J.F.; Bittencourt, A.V. (2003) Sistema Aquífero Guarani – Considerações Preliminares sobre a Influência do Arco de Ponta Grossa no Fluxo de Águas Subterrâneas. *Águas Subterrâneas*, v. 17, n. 1, p. 91-111.
- Rosa Filho, E.F., Salamuni R. & Bittencourt A.V.L. (1987) Contribuição ao estudo das águas subterrâneas nos basaltos do estado do Paraná. *Bol. Paran. Geoc.* 37:22-52.
- SANESUL (1998). Estudos Hidrogeológicos de Mato Grosso do Sul. Relatório Final. SANESUL/TAHAL. Campo Grande. 736 p.
- Santos, P.R.D.; Coradesqui, S. (2013) Análise de Viabilidade Econômica da Produção de Shale Gas: Um Estudo de Caso em Fayetteville. Projeto Final (Graduação em Geologia do Petróleo) - Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 103 p.
- Santos, L.F.F.; Guedes, I.C.; Etchebehere, M.L.C. (2011) Análise Neotectônica do Pontal do Paranapanema (SP) Mediante aplicação de Parâmetros Fluviomorfométricos. *Geociências*, v. 30, p. 491-507.
- Schneider, R.L.; Mühlmann, H.; Tommasi, E.; Medeiros, R.A.; Daemon, R.F.; Nogueira, A.A. (1974) Revisão Estratigráfica da Bacia do Paraná. XXVIII Congresso Brasileiro de Geologia, Porto Alegre. SBG, v. 1, p. 41-65.
- Siga Júnior, O. (1995) Domínios Tectônicos do Sudeste do Paraná e Nordeste de Santa Catarina: Geocronologia e Evolução Crustal. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 212 p.
- Siga Júnior, O. (2010) Geocronologia da Porção Sul do Terreno Apiaí: Implicações Tectônicas. Tese (Livre-Docência) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 89 p.
- Siga Júnior, O.; Basei, M.A.S.; Nutman, A.; Sato, K.; McCreath, I.; Passarelli, C.R.; Liu, D. (2011) Registros Magmáticos Extensionais e Colisionais no Terreno Apiaí, Sul-Sudeste do Brasil: Integração de Dados U-PB - Zircão. *Geologia USP. Série Científica*, vol.11, n.3, p. 149-175.
- Siga Júnior, O.; Basei, M.A.S.; Sato, K.; Prazeres Filho, H.J.; Ciry, L.F.; Weber, W.; Passarelli, C.R.; Harara, O.M.; Reis Neto, J.M (2003) U-Pb (Zircon) Ages of Metavolcanic Rocks From the Itaiacoca Group: Tectonic Implications. *Geologia USP. Série Científica*, v. 3, n. 1, p. 39-49.
- Siga Júnior, O.; Basei, M.A.S.; Passarelli, C.R.; Sato, K.; Cury, L.F.; McCreath, I.; Basei, M.A.S. (2009) Lower and Upper Neoproterozoic Magmatic Records in Itaiacoca Belt (Paraná-Brazil): Zircon Ages and Lithostratigraphy Studies. *Gondwana Research*, v. 15, p. 197-208.
- Silva, C.G.A.D. (2007) Caracterização Geoquímica Orgânica das Rochas Geradoras de Petróleo das Formações Irati e Ponta Grossa da Bacia do Paraná. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 212 p.
- Silva, R.B.G. (1983). Estudo Hidroquímico e Isotópico das Águas Subterrâneas do Aquífero Botucatu no Estado de São Paulo. Tese (Doutorado). Instituto de Geociências – Universidade de São Paulo. São Paulo. 133 p.
- Smakhtin, V.U. (2001). Low Flow hydrology: a review. *Journal of Hydrology*, v.240, p.147-186.
- Spiller, L.E. (2005). Estruturas Armazenadoras e Qualidade das Águas Subterrâneas do Aquífero Serra Geral em São Paulo. II Simpósio de Hidrogeologia do Sudeste. ABAS. Ribeirão Preto, 1 CD ROM.
- Takahashi, A. (2005). Aquífero Guarani. In: Rocha, G. (Coord.): Mapa de Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo, Escala 1:1.000.000. Nota Explicativa. DAEE/ IG/ IPT/CPRM. São Paulo, p. 39-45.

- Teixeira, A.L. (2000) Análise das Bacias da Transição Proterozóico-Fanerozóico do Estado de São Paulo e Adjacências. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 158 p.
- Thomas, J.E. (2004) Fundamentos de Engenharia de Petróleo. 2ª Edição, Editora Interciência, Rio de Janeiro, 272 p.
- Ulbrich, H.H.G.J.; Ulbrich, M.N.C.; Ferreira, F.J.F.; Alves, L.S.; Guimarães, G.B.; Fruchting, A. (2009) Levantamentos Gamaespectrométricos em Granitos Diferenciados. I: Revisão da Metodologia e do Comportamento Geoquímico dos Elementos K, Th e U. Geologia USP. Série Científica, v. 9, n. 1, p. 33-53.
- Varnier, C.; Iritani, M.A.; Viotti, M.; Oda, G.H.; Ferreira, L.M.R. (2010) Nitrato nas Águas Subterrâneas do Sistema Aquífero Bauru, Área Urbana do Município de Marília (SP). Revista do Instituto Geológico. São Paulo. Vol. 31, n. 1, p. 1-21.
- Velasquez, L.N.M.; Branco, O.E.A.; Carvalho Filho, C.A., Minardi, P.S.P.; Cota, S.D.S.; Bomtempo, V.L.; Camargos, C.C.; Rodrigues, P.C.H.; Fiumari, S.L. (2008). Caracterização Hidrogeológica dos Aquíferos Bauru e Serra Geral e Avaliação das Reservas do Aquífero Bauru no Município de Araguari, Minas Gerais. XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. ABAS. Natal, 1 CD ROM.
- Vieira, A.J. (1973) Geologia do Centro e Nordeste do Paraná e Centro-Sul de São Paulo. XXVII Congresso Brasileiro de Geologia, Aracaju, SBG, v. 3, p. 259-277.
- Virgens, G.B. (2011) Revisão Bibliográfica dos Folhelhos com Gás da Formação Barnett, Texas, EUA: Um Exemplo de Reservatório Não Convencional. Projeto Final (Graduação em Geologia) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 85 p.
- Welderufael, W.A. e Woyessa, Y.E. (2010). *Stream flow analysis and comparison of base flow separation methods. Case study of the Modder River Basin in Central South Africa*. European Water . V.31. p. 03-12.
- Zalán, P.V.; Wolff, S.J.; Conceição, J.C.J.; Astolfi, M.A.M.; Vieira, I.S.; Appi, V.T.; Zanotto, A.O. (1987) Tectônica e Sedimentação da Bacia do Paraná. III Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia, Curitiba, SBG, p. 441-473.
- Zalán, P.V.; Wolff, S.J.; Conceição, J.C.J.; Marques, A.; Astolfi, M.A.M.; Vieira, I.S.; Appi, V.T.; Zanotto, A.O. (1991) Bacia do Paraná. In: RAJA GABAGLIA, G.P.; MILANI, E.J. (Eds.). Origem e Evolução de Bacias Sedimentares, Ed. Gávea, Petrobras, p.135-168.



