

ÁGUA SUBTERRÂNEA NO PLANETA ÁGUA.

José do Patrocínio Tomaz Albuquerque
Professor Aposentado da UFCG – Hidrogeólogo e Mestre em Eng.
Civil, Área de Recursos Hídricos. patrociniotomaz@uol.com.br

RESUMO

Trabalhos, artigos e livros, publicados ou editados no Brasil e no exterior, têm considerado as águas subterrâneas como recursos hídricos muito mais abundantes que as águas superficiais que circulam na rede hidrográfica mundial. O presente trabalho pretende mostrar que esta é uma visão equivocada sobre a quantificação que se faz sobre a potencialidade e a disponibilidade de água subterrânea. Conquanto exista um grande volume estocado, da ordem de $8,34 \times 10^6 \text{ Km}^3$, nos diversos aquíferos existentes no planeta, ele não pode ser, em princípio, convertido em disponibilidades, mesmo que em percentual mínimo, sob pena de provocar desastres geotécnicos e ambientais. Isto tem ocorrido em vários sistemas aquíferos mundiais. No Brasil, o subsistema Guarani e o sistema São Francisco são exemplos, entre outros, de avaliações indevidas de suas disponibilidades, induzindo suas reservas à exploração. Na realidade, as disponibilidades ou recursos exploráveis devem ser quantificados em função do potencial de água subterrânea, que é aquele que participa do ciclo hidrológico sob a forma de recarga, escoamento e descarga anuais médias, de longo período. Estas ascendem a cerca de $14.000 \text{ Km}^3/\text{ano}$, dos quais $13.000 \text{ Km}^3/\text{ano}$ são descarregados na rede hidrográfica mundial, compondo com os $23.000 \text{ Km}^3/\text{ano}$ das águas superficiais, os $36.000 \text{ Km}^3/\text{ano}$ o escoamento fluvial desta rede. O $1.000 \text{ Km}^3/\text{ano}$ restante têm como exutórios diretos e finais, os oceanos.

Palavras chaves: sistemas aquíferos, potencialidades, reservas, disponibilidades.

ABSTRACT

Works, papers and books published in Brazil and everywhere, have pointed out that the groundwater is the most abundant source of water. The present work intends to demonstrate that there is a misunderstanding regarding the potentiality and availability of water underground. Although the global groundwater storage is of the order of $8.34 \times 10^6 \text{ km}^3$, its use, even at a minimum rate, may cause geotechnical and environmental disasters. This has been occurring in several aquifers worldwide. In Brazil, the Guarani and São Francisco systems, among others, are examples of misuse of their groundwater reserves. In fact, the availability or exploitable reserves ought to be quantitatively

Água Subterrânea no Planeta Água.

evaluated in terms of the groundwater discharging to the world-wide river network, which is part of the water cycle. The mean annual groundwater discharge is of the order of 14,000 km³/year from which 13,000 km³/year discharge to the world river systems and 1,000 km³/year, to the ocean.

Keywords: aquifer systems, potentialities, reserves, availabilities.

AS AVALIAÇÕES DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS.

Freqüentemente, a potencialidade de água subterrânea tem sido apresentada em trabalhos, artigos e livros, como o segmento milhares de vezes mais abundantes em

águas doces de lagos e rios do Planeta.

Mesmo quando se considerou água subterrânea como parte integrante do ciclo hidrológico mundial, a visão de armazenamento foi a que prevaleceu, em detrimento da condição correta do segmento que é um recurso em escoamento, anualmente renovável. É o que se

Tipo de recurso	Localização	Área (km ²)	Volumes (km ³)	Volume (% do Total)
Água doce superficial	Lagos de água doce	8,5.10 ⁵	1,25.10 ⁵	0,01
	Rios	-	1,25.10 ³	0,0001
Água doce subterrânea	Umidade e percolação do solo	1,2.10 ⁸	6,66.10 ⁴	0,005
	Água subterrânea até 800m		4,17.10 ⁶	0,31
	Água subterrânea > 800m		4,17.10 ⁶	0,31
Água doce sólida	Geleiras e calotas polares	1,8.10 ⁷	2,92.10 ⁷	2,15
Água salgada	Lagos salgados e mares interiores	7,0.10 ⁵	1,05.10 ⁵	0,008
	Oceanos	3,6.10 ⁸	1,32.10 ⁹	97,21
Vapor d'água	Atmosfera (nível do mar)	5,1.10 ⁸	1,29.10 ⁴	0,001
TOTAL			1,36.10 ⁹	100,00

Figura 1-Distribuição volumétrica dos diversos tipos de Recursos Hídricos no Planeta Terra.

relação às águas ditas superficiais do Planeta. Isto decorre da visão que se faz do segmento, de um estoque hídrico, estático e estanque, acumulado no interior de aquíferos ocorrentes no mundo.

A Figura 1 apresentada acima, mostra esta relação em termos de volume, estimada pelo U. S. Geological Survey (*in* Hidrogeologia – Conceitos e Aplicações, 1997), recorrentemente utilizada em palestras, mesas redondas, etc.

Por esta tabela, as águas subterrâneas são 3.336 vezes mais abundantes que as

depreende da Figura 2, a seguir, construída por Warr and Smith (1995) que representa o ciclo hidrológico mundial, tanto em termos de estoque (volume), quanto em termos de fluxo (vazão).

Esta figura incorpora, conforme os autores, as estimativas mais atuais sobre as quantidades de água armazenadas (em 10³ km³) em cada reservatório (representadas em números e palavras de cor preta) e as transferências médias anuais que ocorrem entre eles (em 10³ km³/ano), registradas em números e letras azuis.

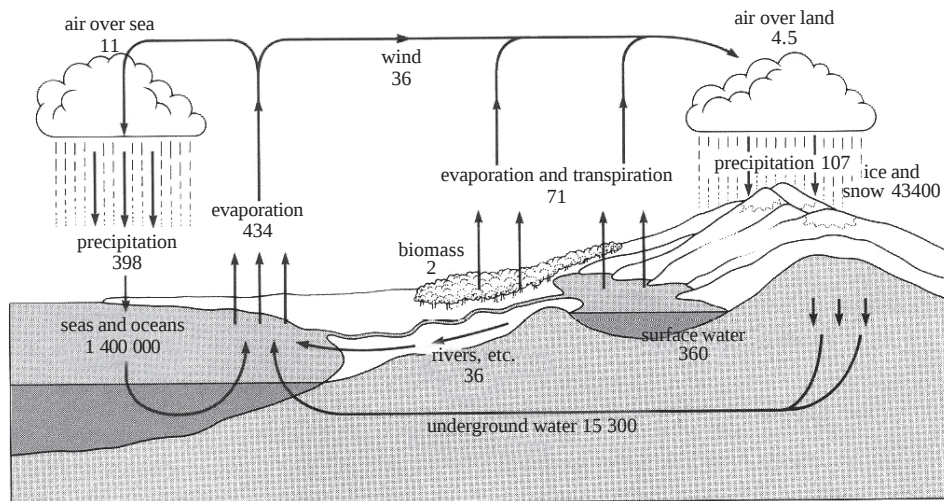


Figura 2 - O Ciclo Hidrológico Mundial, em $10^3 \text{ Km}^3/\text{ano}$, segundo Warr and Smith (1995).

Apesar de constituir um avanço na quantificação e distribuição dos recursos hídricos mundiais, os autores ainda consideram as águas subterrâneas, apenas, uma reserva, sem participação no escoamento do ciclo hidrológico mundial. Seriam $15.300 \times 10^3 \text{ km}^3$ de reservas de água subterrânea, estocadas no subsolo mundial, ao passo que as águas ditas superficiais ascenderiam a cerca de $36 \times 10^3 \text{ km}^3/\text{anuais}$.

Ainda é uma visão equivocada para a avaliação, com um cotejo altamente favorável das águas subterrâneas, o que tem gerado problemas de super-exploração destes recursos, com reflexos nefastos como exaustão de aquíferos e desastres geotécnicos e ambientais.

A forma correta de avaliar as águas subterrâneas é considerá-las, como as águas superficiais, como um segmento, em escoamento, do ciclo hidrológico. Em fins da década de 1970, quando da elaboração do Plano de Aproveitamento Integrado dos Recursos Hídricos do Nordeste – 1ª fase (PLIRHINE), o vietnamita Nguyen Trac, da equipe do Bureau de Recherche Géologique et

Minière de France - BRGM chamou à atenção para o fato de que todos os trabalhos realizados no Nordeste considerarem as águas subterrâneas como um compartimento estanque. Deste compartimento, se poderiam extrair parte das reservas estocadas em aquíferos, sem que isto tivesse qualquer reflexo nas águas superficiais e no meio ambiente.

Esta era e é uma visão equivocada, sobretudo, porque as águas subterrâneas estão intimamente relacionadas com as águas superficiais e com o meio ambiente, conforme se delineia no esquema de ciclo hidrológico apresentado pelo referido PLIRHINE, aqui adotado e aperfeiçoado (Figura 3).

Este esquema introduz o conceito de sistema, definido como um conjunto de elementos de um todo, entre si relacionados e que funcionam como uma estrutura organizada, a qual se relaciona com o meio exterior. Assim, temos o sistema atmosférico que se relaciona através dos elementos precipitação (recarga) e evaporação (exutório, descarga) com os sistemas hidrográfico, aquí-

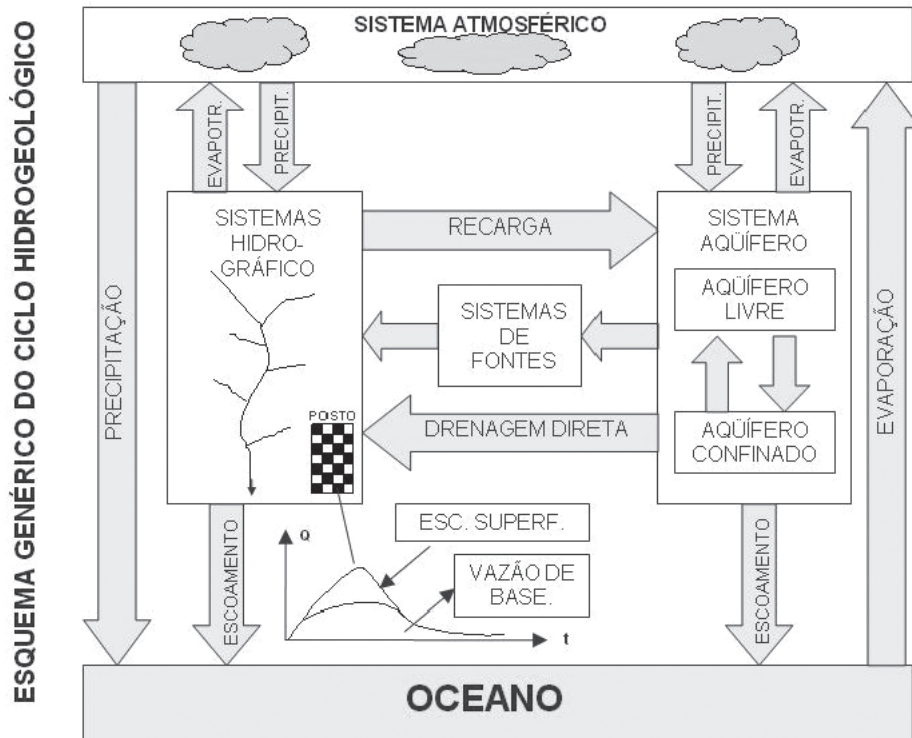


Figura 3- Esquema Sistemático do Ciclo hidrológico, Modificado do PLIRHINE.

fero e oceânico. O sistema hidrográfico se relaciona com o sistema aquífero através da drenagem ou recarga, direta ou indireta (fontes), ambos descarregando suas águas no sistema oceânico.

A relação de drenagem entre os sistemas hidrográfico e aquífero é registrada e pode ser quantificada nos hidrogramas de cursos d'água, separando-se os seus componentes superficial (dependente, diretamente, da precipitação atmosférica) e subterrâneo (resultante da contribuição de água subterrânea proveniente do sistema aquífero), a chamada vazão de base do escoamento fluvial (Figura 3).

Este escoamento fluvial é, imprópria-mente, denominado de "água superficial". Na realidade, o escoamento fluvial tem a

participação, tanto das águas superficiais, função direta das precipitações atmosféricas, quanto das águas subterrâneas drenadas do sistema aquífero. São os cursos d'água assim formados, denominados perenes ou intermitentes. Apenas, no caso de cursos d'água classificados como efêmeros, o escoamento fluvial pode ser creditado às águas superficiais, já que a contribuição subterrânea é insignificante ou nula. Esta confusão entre águas superficial e fluvial concorre para a compartimentação inadvertida das águas superficiais e subterrâneas.

O sistema aquífero é formado, no seu caso mais completo, por dois subsistemas ou níveis aquíferos: um superior, livre ou freático, e um inferior, semi-confinado, limitado superiormente por um pacote de ro-

chas semi-impermeáveis, saturado (aquítar-do), através do qual ocorrem trocas de recursos hídricos entre os subsistemas, função das magnitudes de suas cargas hidráulicas. A Figura 4 esclarece as relações entre os subsistemas.

As cargas hidráulicas do subsistema confinado foram admitidas serem superiores àquelas do subsistema livre, conforme se pode inferir da Figura 4. Por esta figura, verifica-se que o subsistema confinado (na realidade, semi-confinado) alimenta o subsistema livre que, por sua vez, supre o sistema hidrográfico, formando a componente “vazão de base” do escoamento fluvial.

Esta visão sistêmica permite compreender, claramente, as relações hidráulicas entre as unidades aquíferas que compõem sistemas aquíferos reais e complexos, como, por exemplo, o sistema aquífero Maranhão-Piauí, também conhecido como Parnaíba. O seu subsistema livre está contido em mais de uma formação geológica, assim como o seu subsistema confinado. No caso das relações hidráulicas intra-subsistema, elas ocorrem antes de se concretizarem as relações entre os subsistemas livre e confinado. As trocas entre as unidades aquíferas do subsistema confinado (aquíferos Serra Grande, Cabeças, Poti-Piauí, Motuca e Cor-

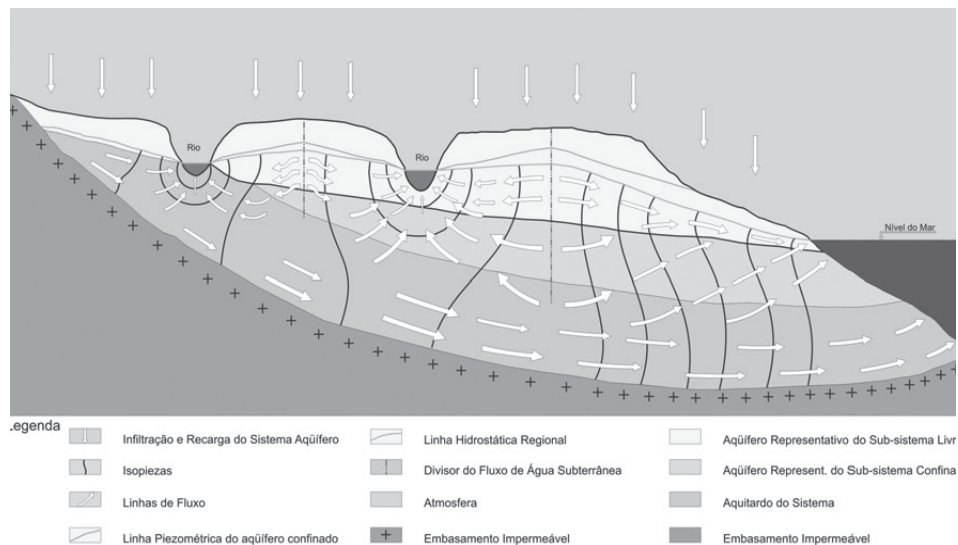


Figura 4 - Relações entre Sistemas do Ciclo Hidrológicas e Hidráulicas entre Subsistemas aquíferos, livre e confinado (semi-confinado).

Esta e outras situações podem ser visualizadas a partir da figura 4, em apreço. Por exemplo, se o subsistema inferior for hermeticamente confinado (o limite superior é um aquícludo, totalmente impermeável), o escoamento, na parte deste subsistema submetida à carga de pressão, far-se-ia, somente, para o mar, não havendo fluxo ascendente ou descendente.

da) têm uma resultante que se relaciona com o subsistema livre. Este está contido, indistinta e, até, transversalmente, em formações geológicas saturadas, total ou parcialmente, sobrepostas ou justapostas, na figura 5 representada pelo aquífero Itapecuru, mas que compreende, também, outras formações superpostas saturadas, parcial ou totalmente, a exemplo de Barreiras, aluviões e dunas.

A figura 5 esclarece esta configuração e as relações hidráulicas intra-subsistemas e entre os sistemas componentes do ciclo hidrológico.

superior, a média, também de longo período, dos níveis hidrostáticos máximos. Este volume escoaria e sairia na rede hidrográfica sobrejacente e no mar. Corresponderia, portan-

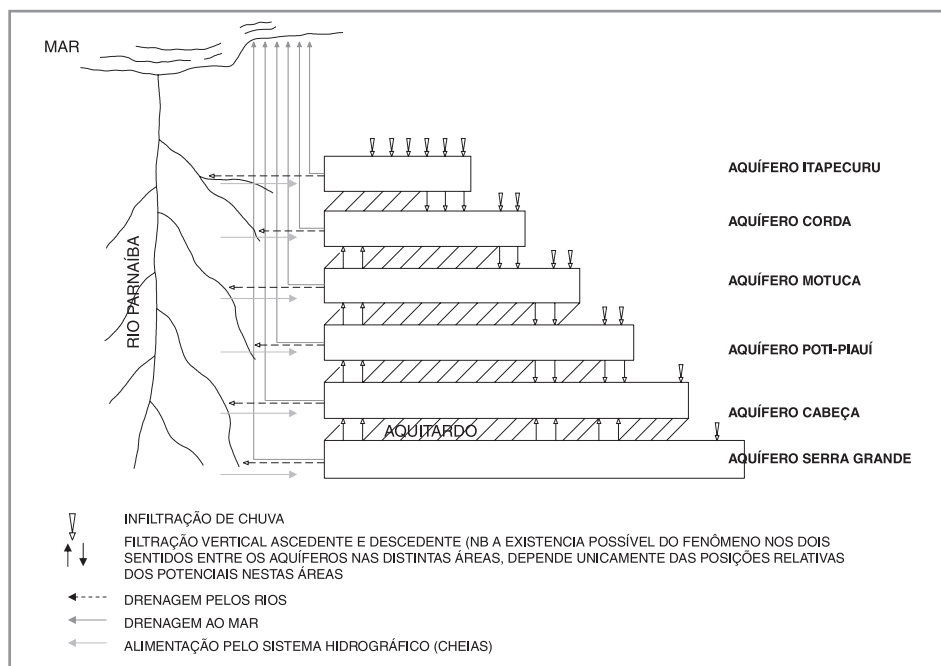


Figura 5 - Relações Hidráulicas Intra-subsistemas Aquíferos e entre Sistemas do Ciclo Hidrológico.

OPOTENCIAL DE ÁGUAS SUBTERRÂNEA.

Define-se potencialidade ou, simplesmente, potencial a vazão média do escoamento subterrâneo de longo período que sai à rede hidrográfica (vazão de base) sobreposta ao sistema, subsistema e seus aquíferos, acrescidos do fluxo subterrâneo que atinge o oceano, no caso de sistemas aquíferos serem costeiros. Esta saída contempla, também, a filtração vertical ascendente originada pela carga de pressão de aquíferos semi-confinados sotopostos.

Este potencial é, também, denominado de reserva reguladora. As reservas reguladoras são, em aquíferos livres, aquelas situadas acima da média de uma série de longo período, do nível hidrostático mínimo, tendo por limite

to, à soma da vazão de base com a vazão de escoamento natural (VEN), sub-superficial.

Em aquíferos confinados e semi-confinados, estas reservas renováveis corresponderiam à vazão do escoamento natural ou/e à soma desta vazão com o volume de filtração ascendente, respectivamente. Este volume de filtração é a parte da reserva sob pressão do subsistema aquífero confinado, cedida ao subsistema livre.

Algumas considerações devem ser feitas sobre o potencial de água subterrânea. Em primeiro lugar, ele não pode ser explorado em sua totalidade. No caso da vazão de base, em razão dela atender a demanda ecológica natural. Esta demanda está relacionada com a manutenção dos regimes hidro-

lógicos dos rios ou outros elementos potamográficos (lagoas, fontes, etc.) e com a preservação das condições de fluxo da zona de subsaturação do subsistema aquífero livre e, por extensão, com a manutenção das características ambientais naturais, particularmente aquelas ligadas à manutenção de biomas. Ela é, no mínimo, equivalente à média das vazões mínimas de cursos d'água perenes, capaz de assegurar a continuidade do regime da rede hidrográfica e, por conseguinte, da vida vegetal e animal dela dependente. Evidentemente, a exploração excessiva de qualquer unidade ou subsistema do sistema aquífero poderá acarretar consequências desastrosas aos recursos hídricos subterrâneos, superficiais e ao meio ambiente.

Em relação à vazão do escoamento sub-superficial ao mar, a sua exploração por poços deve guardar certa distância em relação à linha da costa e/ou um limite de rebaixamento, de forma a manter a situação original do escoamento subterrâneo, do interior para o litoral. A sobre-exploração das águas subterrâneas da vazão do escoamento natural (VEN) acarretará a redução do escoamento de base e a interiorização interface água doce - água salgada e, até, das marés. Há indícios de que isto está acontecendo na bacia Pernambuco-Paraíba, em áreas das regiões metropolitanas do Recife e João Pessoa, onde os níveis piezométricos apresentam-se bastante aprofundados pela exploração intensiva dos poços nestas áreas, como, de resto, tem ocorrido em outras partes do planeta.

AS RESERVAS DE ÁGUA SUBTERRÂNEA.

Além do potencial, os aquíferos são portadores de um outro contingente de recursos hídricos que, ao contrário do potencial, não é, em sua totalidade, anualmente renovável. É a reserva de água subterrânea. Ela se acha acumulada nos espaços vazios entre os

grãos dos minerais formadores das rochas ou em outro tipo de porosidade, formando um volume que, embora interaja com o potencial, se mantém constante através dos tempos. Formada em tempos geológicos pretéritos, a reserva não apresenta idade cronológica coincidente com a idade das formações que a contém, porque, por sua interação com o potencial, é rejuvenescida com a recarga e circulação do potencial em seu interior.

São dois os tipos de reserva (Albuquerque e Rego, 1998): a intersticial ou intergranular que, nos aquíferos confinados, satura toda a espessura da rocha e cujo volume depende da sua porosidade efetiva, e a reserva sob pressão, em que o volume acumulado é determinado pelo produto da carga de pressão, área aquífera e coeficiente de armazenamento, este um parâmetro hidráulico que é função das propriedades elástico-compressivas do conjunto água-rocha. Este coeficiente é responsável pela projeção da carga hidráulica para além do limite superior do aquífero confinado, podendo dotá-lo de condições de jorro ou não, dependendo da magnitude do peso do pacote de rochas (saturadas ou não) a ele sobreposto e da condição da carga de pressão assim gerada suplantando a cota do terreno sobrejacente.

A reserva intersticial é significativa no comportamento hidrostático dos aquíferos livres, podendo, em parte, ser explorada por poços, na dependência dos reflexos desta exploração no comportamento do regime hidrológico do sistema hidrográfico a ele associado ou conectado e, por extensão, na preservação de ecossistemas hídricos. A reserva sob pressão tem uma ação importante nos aquíferos confinados, podendo ser explorada dentro dos mesmos limites impostos pela relação água subterrânea-água superficial, desde que, pela dimensão da carga hidráulica, participe do potencial dos recursos hídricos subterrâneos. Em outras palavras, a exploração de reservas está condicionada pelos reflexos que esta exploração causa no

potencial de água subterrânea, que pode ser exaurido em caso de se ultrapassarem os limites, de modo a afetar o meio ambiente.

Costuma-se, ainda, classificar as reservas em permanentes ou seculares e reguladoras ou renováveis.

As permanentes não dependeriam ou não variariam com a recarga e as reguladoras, ao contrário, sofreriam o efeito da parcela das precipitações atmosféricas convertida em infiltração efetiva. No caso de aquíferos confinados ou semi-confinados, as reservas permanentes permanecem armazenadas, independentemente da vazão do escoamento natural. As reservas permanentes correspondem, neste caso, às reservas intersticiais de aquíferos confinados ou semi-confinados, anteriormente definidas, também denominadas de volume de saturação. No caso de aquíferos livres, estas reservas são aquelas localizadas na sua zona de saturação, abaixo da profundidade média, de longo período, do nível hidrostático mínimo, registrado em poços de observação.

Na realidade, não existe reservas permanentes, se o conceito permanente se refere ao

tempo. Se fossem permanentes, as águas subterrâneas de aquíferos teriam as mesmas datas de suas formações, o que, efetivamente, não acontece. Na realidade, as águas subterrâneas são, sempre, mais jovens que as formações que as contêm. Agora, elas devem ser permanentes, mas no sentido de que, em princípio, nunca devem ser mobilizadas, a não ser que medidas compensadoras devam ser tomadas, como, por exemplo, a recarga artificial adicional.

As reservas reguladoras são, em aquíferos livres, aquelas situadas acima deste nível hidrostático mínimo, tendo por limite superior, a média, também de longo período, dos níveis hidrostáticos máximos. Este volume escoaria e sairia na rede hidrográfica sobrejacente e no mar. Corresponderia, portanto, à soma da vazão de base com a vazão de escoamento natural (VEN), sub-superficial.

A Figura 6 mostra a relação hidroestratigráfica e hidráulica entre as reservas e o sistema hidrográfico, expressão do potencial de água subterrânea. A reserva sob pressão participa, indiretamente, do escoamento de base, na medida em que supre o subsistema livre.

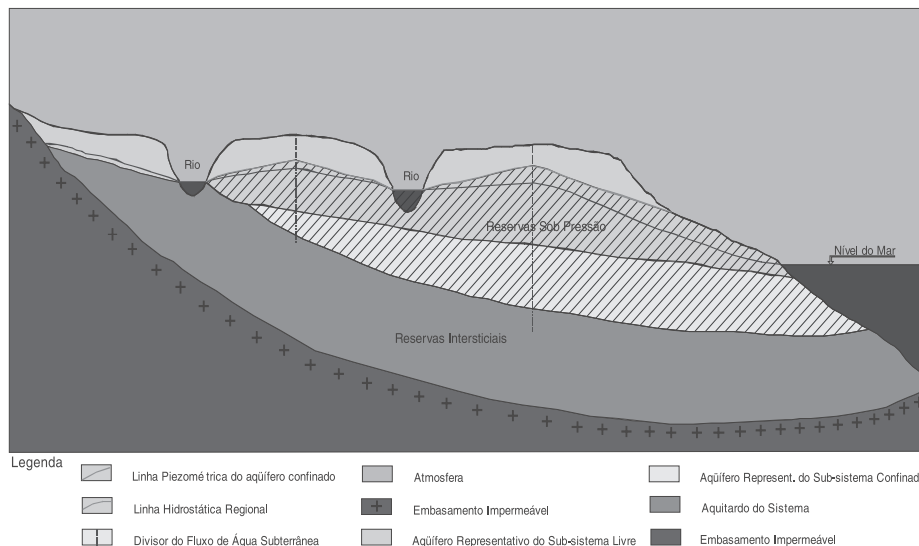


Figura 6- Relação hidro-estratigráfica e hidráulica entre reservas de subsistemas livre e confinado e o sistema hidrográfico. Fonte: Albuquerque (2005).

Em aquíferos confinados e semi-confinados, estas reservas renováveis corresponderiam à vazão do escoamento natural ou/e à soma desta vazão com o volume de filtração ascendente, respectivamente. Este volume de filtração é o que constitui a reserva sob pressão. Também, estas reservas, pelos motivos já considerados, não devem ser, totalmente, exploradas, já que uma parcela destas reservas atende, naturalmente, as demandas ecológicas de biomas nos quais se inserem.

AS DISPONIBILIDADES OU RECURSOS EXPLOTÁVEIS DE ÁGUA SUBTERRÂNEA.

Todas estas considerações nos levam à conclusão de que, ao fim de tudo, os recursos explotáveis de água subterrânea, também denominados de disponibilidades máximas (Albuquerque e Rego, 1998), restringem-se, conforme registrado anteriormente, a uma parcela do potencial. Esta parcela pode ser captada diretamente dos subsistemas livres e/ou confinados (ou semi-confinados), ou, indiretamente, das reservas sob pressão de subsistemas confinados ou semi-confinados, nunca se devendo penetrar nas reservas intersticiais destes últimos subsistemas, pois são águas que participam da estrutura dos terrenos que as contém e explorá-las acarretará efeitos danosos aos subsistemas (compactação de aquíferos), à rede hidrográfica sobreposta (redução da sua vazão de base) e ao meio ambiente (extinção de biomas, penetração da cunha salina, etc., etc.). A disponibilidade é, portanto, uma parcela do potencial, não se devendo contar, em princípio e nos casos gerais, com a exploração, mesmo de pequenas parcelas das reservas intersticiais de aquíferos confinados. Em relação aos aquíferos livres, a parcela das reservas intersticiais denominadas de reservas reguladoras, situada entre os níveis máximos e

mínimos médios pode ser explorada, desde que sejam anualmente, em média, repostas. Em outras palavras, que participem do ciclo hidrológico, constituindo o potencial de água subterrânea anualmente renovável.

Alguns autores defendem a adoção de “um limite econômico de exploração para cada aquífero, anterior ao seu limite físico, imposto pela profundidade do nível potenciométrico, que determinaria sua disponibilidade e sua sustentabilidade”, considerando-se, atualmente, que o limite da descarga explotável de um sistema aquífero é determinado pelos componentes de fluxo subterrâneo incorporados pelo seu próprio desenvolvimento. Sendo assim, a disponibilidade física seria definida pela recarga natural do sistema (influxos) e pelo aumento da própria recarga (incremento dos influxos), diminuição da descarga natural (redução dos defluxos) e remoção de uma parcela da água armazenada. Dentro deste contexto, na quase totalidade dos aquíferos confinados, pode-se visualizar que esse limite físico seria bastante elevado.

Aqui reside o grande equívoco sobre disponibilidades de águas subterrâneas sob a ótica do limite econômico. A transformação de uma parcela armazenada em aquíferos confinados em descarga explotável é, em princípio, totalmente desaconselhada, seja em escala de poço, seja de aquífero. Na escala de poço, os textos contidos em livros didáticos determinam como limite de rebaixamento máximo, conforme exposto anteriormente (e, conseqüentemente, como descarga máxima explotável), a profundidade da base da camada ou formação confinante ou semi-confinante. Isto é para evitar que se explorem as águas armazenadas no interior do aquífero. À escala de aquífero, esta condição limite é necessária, mas não é suficiente para estabelecer os limites físicos que definem a sua explorabilidade. Estes limites estão relacionados com a conexão hidráulica que existe, não somente com outras unidades aquíferas su-

perpostas ou sotopostas ao aquífero explorado de que fala, mas, e principalmente, com os recursos hídricos fluviais, com os quais os aquíferos confinados, direta ou indiretamente, estão, hidraulicamente, conectados, conforme foi explicada neste texto e suas ilustrações. Tendo em mente esta situação, os rebaixamentos da carga piezométrica (vale dizer, da sua descarga explorável) estão sujeitos a outros limites, impostos por estas conexões, que têm, em uma análise mais acurada, a ver com a sustentabilidade do meio ambiente, mais intimamente com a vida vegetal e, por extensão, com as demais formas de vida do planeta (aquíferos confinados têm carga de pressão que os tornam alimentadores de aquíferos superpostos, inclusive, participando da potencialidade de freáticos e de cursos d'água. Portanto, os limites físicos são os que relacionam os aquíferos confinados ou livres com os recursos hídricos superficiais e com o meio ambiente. Assim, as cargas que podem ser consumidas deverão ser, sempre, inferiores àquelas ditas por limites econômicos. O limite estabelecido pelo custo de produção de um aquífero será, assim sempre maior que o limite físico, desde que este tenha sido determinado corretamente. As sustentabilidades do recurso natural água e do meio ambiente a eles relacionados assim o exigem. A degradação e a exaustão dos recursos naturais sempre teve, tem e terá a ver com a visão econômico-financeira do problema da "mais valia". Um exemplo (existem muitos outros no mundo) é o que aconteceu na exploração do "High Plain Aquifer", também conhecido como Ogallala Aquifer, nos Estados Unidos (Postel, 1999): enquanto o custo de produção compensou, aprofundou-se o rebaixamento para manter as vazões demandadas. Resultado: exaustão do aquífero, alteração no regime hidrológico de rios (alguns secaram), terrenos cederam, até que, quando o custo não mais compensava, abandonaram a exploração do aquífero. Por-

tanto, deve-se ter em mente que os recursos naturais renováveis devem ser vistos, em termos administrativos e exploratórios, como recursos ambientais, antes de uma conotação econômico-financeira. Por traz do economicismo ou, pior, do financeirismo, existe um recurso natural que, como tal, deve ser administrado. Até se pode admitir, em casos especialíssimos, mas de forma eventual, ultrapassar um pouco este limite (imperativos de ordem humana e social), mas, nunca, de forma duradoura.

EXEMPLOS DE EXPLORAÇÃO ILIMITADA DE ÁGUA SUBTERRÂNEA E SEUS REFLEXOS.

Além dos exemplos citados nesta palestra e texto, dois casos de super-exploração de aquíferos estão em curso no Brasil: o Guarani e o São Francisco.

O Guarani, inicialmente identificado como uma unidade aquífera foi, posteriormente, elevado à categoria de sistema, por verificarem que, além do Botucatu, ele era constituído pelos arenitos saturados da Formação Pirambóia. Na realidade, o Guarani constitui um subsistema (é uma parte de um todo), ora confinado, ora semi-confinado, componente de um sistema aquífero mais amplo, que denomino de "Sistema Bacia do Paraná". Este subsistema é muito complexo e deve englobar todas as superseqüências que formam a Bacia Sedimentar: Rio Ivaí (formações Alto Garças, Iapó e vila Maria), Paraná (formações Furnas e Ponta Grossa e Gondwanas I (formações Lagoa Azul, Aquidauana, Campo Mourão, Taciba, Rio do sul, Dourados, Rio Bonito, Tatuí, palermo, Irati, Serra Alta, Corumbatá, Teresina, Pirambóia e Sanga do Cabral) II (formação Santa Maria) e parte de Gondwana III (formação Botucatu). Todas estas formações destas superseqüências contêm contêm clásticas, com os níveis grosseiros formando unida-

des aquíferas e os finos desempenhando o papel, ora de aquíferos, ora de aquíferos, na dependência de suas permeabilidades. Nos trechos semi-confinados deve se processar a conexão hidráulica entre as unidades aquíferas, componentes das diversas formações e grupos lito-estratigráficos integrantes das superseqüências citadas, sempre com as unidades inferiores alimentando as superiores, já que as cargas hidráulicas daquelas são, indubitavelmente, superiores às destas, por motivos óbvios.

A superseqüência Bauru, composta das diversas formações eólicas, forma o subsistema livre (contido, também nos depósitos quaternários, mormente os aluviais)

mação constitui zonas aquíferas do tipo livre, semelhantes àsquelas do Cristalino do Brasil. Nestes casos, estas zonas aquíferas podem integrar o subsistema livre Bauru. Este subsistema é o principal supridor da vazão de base da rede hidrográfica sobrejacente (bacias dos rios Paraná, Uruguai, Apa, etc.). A participação do subsistema Guarani nesta descarga (que existe) é menor, a julgar pelas suas permeabilidades muito baixas, da ordem de $K = 3,0 \times 10^{-5}$ m/s e gradientes hidráulicos modestos, de 0,1%, na parte sob confinamento, conforme se pode inferir do Mapa de Nível Piezométrico Aparente (sic) do aquífero Guarani no Estado de São Paulo, apresentado na figura 7.



Figura 7- Nível Piezométrico Aparente (sic) do Aquífero Guarani. Fonte: Mapa de Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo, 2005, Nota Explicativa, p.43.

do sistema Bacia do Paraná, aqui denominado Bauru. Ele é separado do subsistema confinado/semi-confinado, aqui mantida a denominação Guarani, pela Formação Serra Geral, componente superior da Gondwana III.

A Formação Serra Geral, de rochas magmáticas, constitui-se, original e regionalmente, em um aquífero. Localmente, em função de apresentarem áreas com dupla porosidade (vesicular, associada à porosidade de fraturas de origens diversas: colunares, de resfriamento e de alívio de tensão), esta for-

O subsistema Guarani também contribui de forma indireta, para o escoamento basal, através da filtração vertical ascendente, desde as unidades mais inferiores do subsistema, até a unidade Botucatu, e, desta, se condições de permeabilidade permitir, para o sistema hidrográfico, via subsistema livre. O condicionamento de fluxo vertical ascendente resultante das magnitudes das cargas hidráulicas destes subsistema, apresentado em estudo hidrogeológico inserido em vários trabalhos sobre a bacia (Rebouças, 1999; Geo-

logia do Continente Sul-Americano, Cap. V, 2004; Nota Explicativa ao mapa de Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo, 2007) está mostrado no corte hidrogeológico das Figuras 8 e 9, a seguir apresentadas.

Pode-se inferir da Figura 9 que, por força das cargas de pressão, muito superiores às cargas hidrostáticas dos aquíferos livres que a unidade Botucatu do subsiste-

pluviais que escapam à evapotranspiração e ao escoamento superficial direto, avaliada, também, por Rebouças em 26 Km³/ano, no âmbito das áreas de afloramento das unidades Pirambóia e Botucatu. A esta recarga acresce-se a contribuição da filtração vertical ascendente, ainda não quantificada.

Os recursos exploráveis do Subsistema Guarani foram estimados por Rebouças (1999),



Figura 8- Localização do Traço do Corte Hidrogeológico (NE-SW) na Bacia do Paraná.

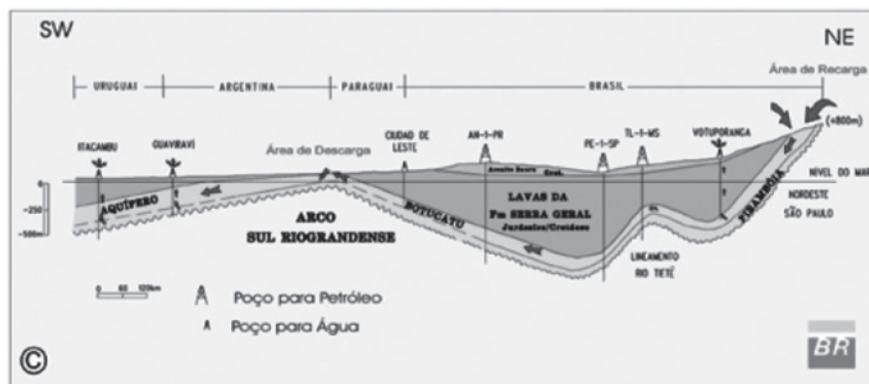


Figura 9 - Corte Hidrogeológico Mostrando Poços Jorrantes Captando o Subsistema Aquífero Guarani.

ma Guarani não recebe recarga proveniente do subsistema livre Bauru (significativamente das unidades Bauru-Caiuá), estimada por Rebouças em 140 Km³/ano.

A recarga deste subsistema se processa pela infiltração da parte das águas

transcritos por Assine et al in Geologia do Continente Sul-Americano (2004), em 40 Km³/ano, com base na contribuição da pretensa filtração vertical descendente do Caiuá-Bauru, valor este também admitido pelos autores do projeto homônimo. Nesta

determinação, os autores não levaram em consideração a demanda ecológica natural (que deve ser suprida para manutenção das condições ambientais) e, ainda qualificaram o sistema confinado coma a maior reserva de água subterrânea do Planeta, induzindo pessoas e órgãos a uma exploração desenfreada do subsistema Guarani. No caso, os 37.000 Km³ (Assine et al, 2004) ou 48.000 Km³ (Rebouças,1999) acumulados nos interstícios dos grãos das formações aquíferas confinadas ou semi-confinadas como reservas ditas permanentes, não devem nem ser tocadas. A sua exploração aconselhada ou inadvertida acarretará efeitos geotécnicos e ambientais indesejáveis.

No primeiro caso, ocorrerá a compactação do subsistema Guarani, pela redução da pressão neutra e aumento conseqüente da pressão efetiva exercida pelo peso de todo o pacote de rochas e água sobreposto, com ação sobre o esqueleto sólido do subsistema que, assim, terá suas porosidades, total e efetiva, reduzidas, conforme assinala a equação 1 seguinte:

$$d\sigma_e = -d_p \cdot (1), \text{ em que:}$$

$d\sigma_e$ representa a pressão efetiva e
 d_p é a pressão neutra.

Em termos ambientais, o máximo que se pode explorar deste subsistema aquífero é o volume contido sob pressão, dado pela equação 2, a seguir:

$$V_p = A_p \cdot \bar{h}_p \cdot S \quad (2), \text{ na qual:}$$

V_p é o volume sob pressão,
 A_p a área do aquífero sob pressão, $\bar{h}_p$ é a carga piezométrica, medida a partir da capa (topo) do aquífero e S é o coeficiente de armazenamento deste aquífero.

Deve-se ter em mente que este volume a ser retirado não deve afetar a parte da vazão de base que atenderia a demanda ecológica natural.

O segundo grande exemplo de exploração indevida de aquíferos é o do sistema São Francisco, em sua parte situada a montante do reservatório de Sobradinho. Ele é constituído de várias unidades aquíferas, sendo o Urucuia-Areado o seu principal componente, já que contribui com 676,5 m³/s (51%) dos cerca de 1.200 m³/s da vazão de base que aflui ao reservatório de Sobradinho. Os aquíferos Bambuí e Aluvial (aqui não representado por problemas de escala) respondem pelos restantes 49% de contribuição. O mapa hidrogeológico da Figura 10 mostra a localização destes aquíferos em relação ao reservatório de Sobradinho.

Ocorre que estes reservatórios subterrâneos vêm sendo intensivamente explorados para fins de irrigação nas bacias dos rios Grande, Corrente, Urucuia, etc. que se constituem nos principais drenos naturais das águas subterrâneas do Urucuia-Areado. Esta exploração acarretará, sem dúvida, a redução da vazão de base desses rios e, conseqüentemente, do São Francisco, diminuindo sua contribuição à Sobradinho, tanto em termos de potencial (vazão média de longo período), quanto em termos de vazão regularizada com garantia de 100%. Isto acarretará reflexos nefastos na geração de energia e no projeto de transposição que têm nestas vazões de Sobradinho o suporte fundamental destes empreendimentos. Portanto, cai por terra o argumento de que a transposição seria realizada para dar segurança hídrica ao abastecimento de múltiplos usos do Nordeste Setentrional, entre eles e, principalmente, o abastecimento urbano. Por outro lado, a ocorrência de novos racionalamentos e, mesmo, colapsos energéticos tornar-se-á mais factível e freqüente, como, até hoje, não tem acontecido.

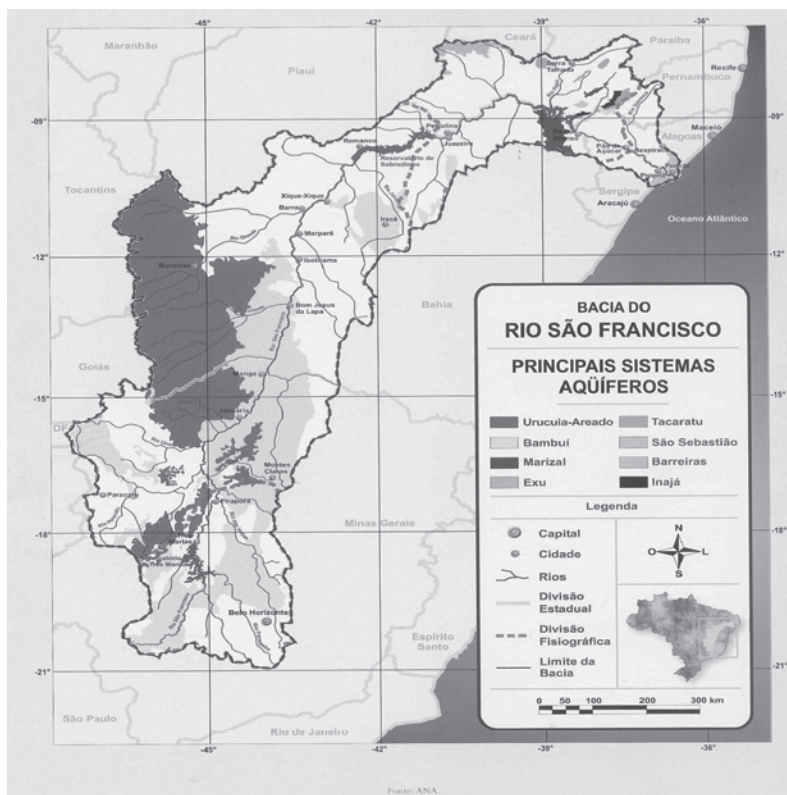


Figura 10- Mapa Hidrogeológico da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco.

Fonte: Relatório Final do Programa de Ações Estratégicas para o Gerenciamento Integrado da Bacia do Rio São Francisco e da sua Zona Costeira (2004).

CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.

É preciso ter a consciência de que água subterrânea é um segmento do ciclo hidrológico, intimamente relacionadas com as águas fluviiais. A exploração de um segmento tem reflexos imediatos na exploração do outro. Sem o conhecimento desta relação quantitativa, a gestão de recursos hídricos ficará seriamente comprometida, resultando em problemas futuros. Pouca gente sabe que as captações a fio d'água, com base em vazões mínimas (por exemplo $Q_{7,10}$) ou vazões de permanência garantidas, são, na verdade, captações de água sub-

terrânea que devem ser consideradas na exploração, juntamente com a retirada por poços, de suas disponibilidades. Neste sentido, a contribuição das águas superficiais (aquelas dos fluxos dos rios dependentes, direta e imediatamente, das precipitações atmosféricas) ao escoamento fluvial somente podem ser captadas por barragens superficiais. Ao não fazê-lo, estas águas se perdem aos oceanos.

Conclui-se, por tudo o que aqui foi exposto, que as águas subterrâneas não podem ser vistas, em termos de potencialidades, como volumes estocados em aquíferos, mas como o contingente deste armazenamento colocado, naturalmente, em circu-

lação. Neste sentido, mundialmente, esta vazão que circula (média de longo período) situa-se em torno de 14.000 Km³/ano (equivalente à sua recarga, admitindo-se um regime hidrológico de equilíbrio), sendo que 13.000 Km³/ano constituem a descarga aos rios e algo como 1.000 Km³/ano tem como destino final os oceanos. A Figura adaptada de Warr & Smith (1995), traduz a proposição aqui justificada.

Portanto, o potencial de água subterrânea é muito menor (apenas, 60,87%) que o de água superficial, este da ordem 23.000 Km³/ano, constituindo o primeiro componente do potencial fluvial de 36.000 Km³ anuais, do qual participa com algo como 36%.

Conforme se discorreu neste texto, apenas parte deste potencial deve ser convertida em disponibilidades, já que a demanda ecológica natural deve ser suprida pelo escoamento de base. Esta demanda é aqui estimada em uma vazão situada em torno de 40% a 50% deste fluxo, ou seja, os recursos explotáveis de água subterrânea, no planeta Terra, atingem cifras entre 5.600 e 7.000 bilhões de metros cúbicos anuais.

No caso do subsistema Guarani, as disponibilidades situam-se entre 13 e 16 (ou alguma coisa mais) Km³/ano. Em relação ao sistema São Francisco, toda a disponibilidade, de 1.200 m³/s, está comprometida com a vazão de regularização do reservatório de Sobradinho e não deveria ser objeto de exploração nenhuma em locais situados a montante deste reservatório.

Finalmente, uma palavrinha sobre o Cristalino da região semi-árida brasileira. Este sistema aquífero tem potencial insignificante ou, mesmo, nulo, o que é atestado pelo regime da rede hidrográfica sobreposta, de natureza efêmera. Isto significa que as suas disponibilidades, repousam na exploração das reservas (função de seus tipos de porosidade, entre as quais se sobressai o de fraturas), ainda não quantificá-

veis no estágio atual de seu conhecimento, em razão, principalmente, de dificuldades relacionadas à avaliação dimensional. A exploração de reservas do sistema Cristalino, localizados no semi-árido, tem acarretado a exaustão de poços, pela dificuldade de recarga de suas zonas aquíferas, em razão da severidade do clima, principalmente e de sua exploração excessiva. Mas, em relação ao meio ambiente natural da Caatinga, esta exploração não apresenta efeitos negativos, já que o bioma está adaptado à escassez superficial e subterrânea de recursos hídricos. Isto também é válido para o sistema aquífero aluvial, podendo-se explorar parte de suas reservas que são, facilmente, repostas, em razão das condições favoráveis de recarga, ditadas pela alta permeabilidade destas formações.

Referências Bibliográficas.

- Albuquerque, J. P. T.; Rego, J.C., 1998. Conceitos e definições para Avaliação e Gerenciamento Conjunto de Recursos Hídricos Superficiais e Subterrâneos. In Anais do IV Simpósio dos Recursos Hídricos do Nordeste, Campina Grande – PB.
- Albuquerque, J. P. T., 2004. Sustentabilidade de Aquíferos. In Anais do VII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste e Livro de Resumos, São Luís – MA.
- Feitosa, F.A.C.; Manoel Filho, J. (Coordenadores). Hidrogeologia Conceitos e Aplicações, CPRM-LABHID/UFPE, Cap. 14, Fortaleza, 1997.
- Gonçales, V. G.; Giampá, C. E. Q. (Editores). Águas Subterrâneas e Poços Tubulares Profundos, Signus Editora, São Paulo, 2006.
- Mantesso-Neto, V.; Bartorelli, A.; Carneiro, C. Dal Ré; Brito-Neves, B. B. (Organizadores): Geologia do Continente Sul-Americano (Cap. V), Beca Produções Culturais Ltda., São Paulo, 2004.

- Rebouças, A. C.; Braga, B.; Tundisi, J. G. (Organização e Coordenação Científica). *Águas Doces no Brasil*, Cap. 4, p. 135: Aquífero Guarani, Escrituras editora, São Paulo, 1999.
- Rocha, G. - DAEE (Coordenação Geral). *Mapa de Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo – Nota Explicativa*, DAEE-IPT-CPRM, São Paulo, 2005.
- SUDENE, BRASIL, 1980 – Plano de Aproveitamento Integrado dos Recursos Hídricos do Nordeste do Brasil – Fase I, Recursos Hídricos I, Águas Subterrâneas, Volume VII, Recife – PE.
- Warr, K.; Smith, S.: *Changing Climate*, The Open University, Thanet Press Limited, Margate, Kent, London, U. K., 1995.