

GESTÃO SUSTENTÁVEL DOS GRANDES AQUIFEROS

Por

Aldo da Cunha Rebouças *

1 - INTRODUÇÃO

A Terra é o único corpo do sistema solar, até agora conhecido, que possui água nos estados líquido, sólido e gasoso. Estas águas acham-se em movimento permanente através do ciclo hidrológico, porém, com dinâmicas muito variadas. As águas atmosféricas, situadas até uma altura da ordem de 15 Km (13.000 Km³), tem um tempo de residência de apenas 10-12 dias, as águas superficiais continentais acumuladas nos leitos dos rios e lagos (200.000 Km³) tem tempos de residência da ordem de meses, enquanto as águas subterrâneas (8,4 milhões Km³) participam do ciclo hidrológico numa escala de tempo que pode ser de dezenas, centenas e até milhares de anos. As águas subterrâneas estocadas nos grandes aquíferos das bacias sedimentares tem tempos de renovação que ultrapassam, com frequência, a escala da existência humana ou de vida útil dos seus projetos. Em consequência, estas reservas são consideradas como praticamente não renováveis. Contudo, os aquíferos das grandes bacias sedimentares encerram os maiores estoques de água doce subterrânea do Globo e do Brasil, são fator fundamental de regularização da componente hídrica dos ecossistemas e tem um grande alcance socio-econômico quando submetidas a um regime racional de extração (Figura 1).

A utilização das águas subterrâneas dos aquíferos confinados, cujas reservas são consideradas pouco renováveis, remonta aos primórdios da civilização, relatando-se que os chineses já perfuravam poços artesanais cerca de 3.500 anos a.C. Até meados do século XIX os poços eram perfurados com sondas a percussão, movidas a força humana e/ou animal, destacando-se os **poços jorrantes de Artois**, na França, perfurados em 1711, de onde derivou a denominação de **artesiano** para esse tipo de obra de captação. Os prazos de perfuração eram de anos. A perspectiva de obtenção de água sem custo de energia de bombeamento entusiasmou de tal forma o Governo Francês de então, que instituiu prêmios aos fabricantes de equipamentos e perfuradores quem lograssem perfurar poços profundos artesanais. O início da exploração da bacia artesianiana de Paris, desde 1780, se deu graças aos desenvolvimentos tecnológicos alcançados, possibilitando a perfuração de poços de centenas de metros de profundidade num prazo de alguns meses.

Com o desenvolvimento das perfuratrizes movidas a vapor, em meados do século XIX, para prospecção de carvão e de petróleo, teve início a construção de poços cada vez mais profundos para abastecimento de comunidades e indústrias. Atualmente não existe limite tecnológico para construção de poços profundos, já captando-se água de aquíferos situados à profundidades de até 2000 metros em vários países, tais como Brasil, Austrália, Estados Unidos, Arábia Saudita.

* Instituto de Geociências - Universidade de São Paulo

2 - DO POÇO AO SISTEMA DE FLUXOS SUBTERRÂNEOS

Até a década de 50, o objetivo básico dos estudos hidrogeológicos era a determinação da produtividade de poços individuais ou de baterias implantadas numa determinada unidade aquífera, isto é, camada litoestratigráfica ou domínio geológico específico. Como resultado, houve um grande progresso teórico e prático das técnicas de projeto, construção e hidráulica de poços.

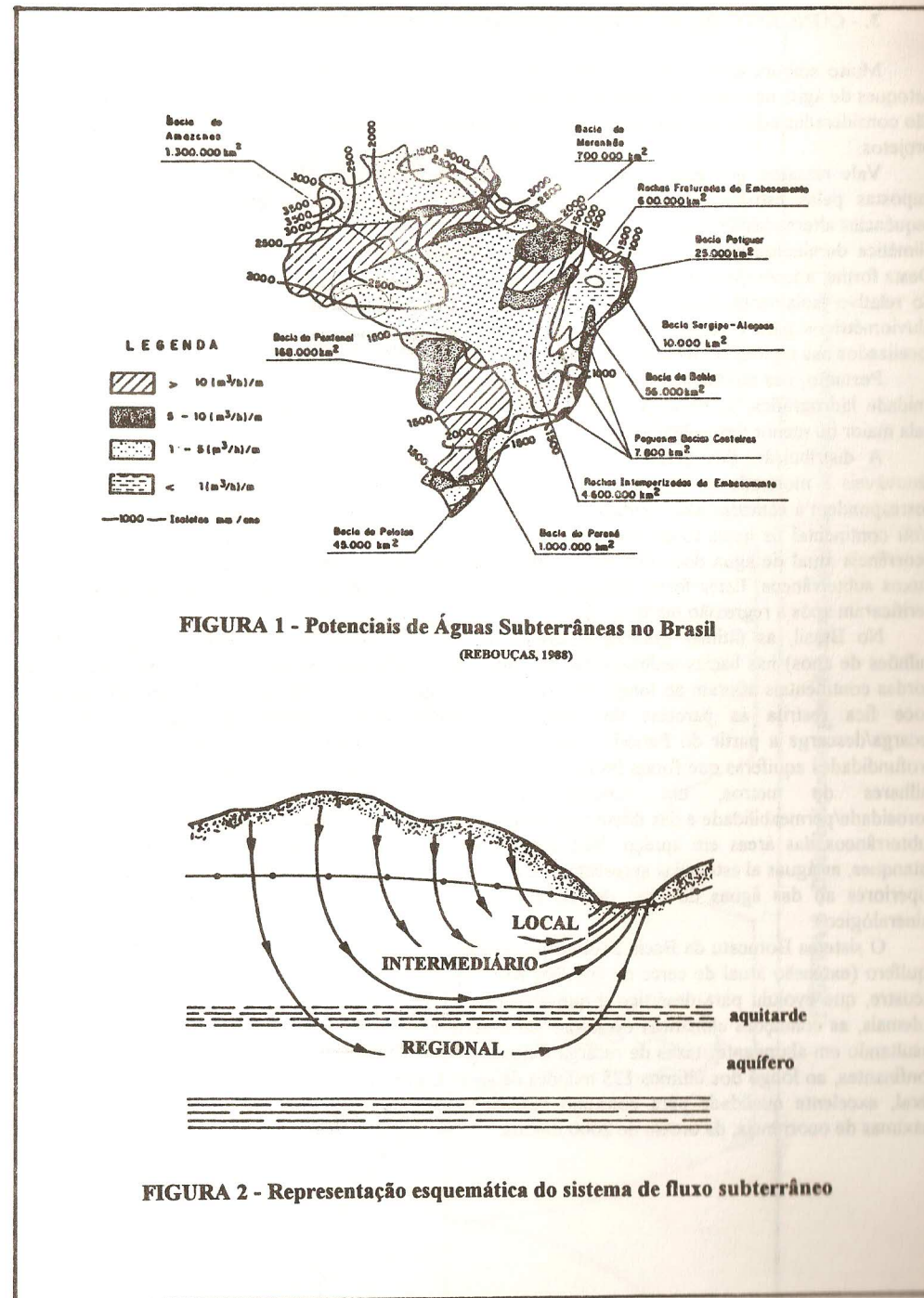
Com o desenvolvimento dos meios analíticos, mormente a partir da fase comercial dos computadores, os estudos hidrogeológicos evoluíram para uma abordagem mais sistêmica. Nestas condições, o aquífero passou a ser considerado como um sistema formado por uma ou mais unidades litoestratigráficas que apresentam continuidade hidráulica, características hidrodinâmicas com particularidades distributivas, condições de recarga, de circulação e descarga e de qualidade das águas, relativamente semelhantes.

Finalmente, a percepção de que a água do solo (faixa penetrada pelas raízes das plantas) e das zonas hídricas situadas logo abaixo, está ligada por filmes intergranulares e comanda os processos de transporte e de transformação das águas que percolam até a zona saturada, resultou na utilização do termo **zona não saturada** para designar o conjunto não saturado. Da mesma forma, a denominação clássica de **aquífero**, designando tão somente à **zona saturada capaz de proporcionar uma vazão para atendimento de uma determinada demanda**, é hoje utilizada para definir a camada ou corpo rochoso que apresenta, relativamente, as melhores características de porosidade/permeabilidade. Com efeito, entendeu-se que, enquanto porosidade/permeabilidade são propriedades intrínsecas do meio geológico, o nível de saturação é uma condição de estado, isto é, a camada aquífera poderá se apresentar totalmente saturada numa dada época e praticamente vazia numa outra ocasião.

Por outro lado, o gerenciamento integrado de uma bacia hidrográfica poderá determinar a sobre-exploração de setores aquíferos cujos níveis de água são subflorantes, como forma de recuperação de áreas excessivamente encharcadas, e realizar recarga artificial de outros domínios aquíferos cujos níveis de água são profundos, como forma de amortecimento de enchentes.

O termo **águas subterrâneas** é atualmente utilizado para designar a totalidade das águas subsuperficiais e, a partir da década de 80, a abordagem passou a considerar o **sistema de fluxos subterrâneos**, o qual engloba zona não saturada e saturada, aquíferos, aquícludes e aquitardes, processos hidrológicos, geoquímicos e microbiológicos de transporte e transformação das águas através dos ecossistemas configurados pelas unidades hidrográficas e/ou hidrogeológicas. Regra geral, numa bacia hidrográfica as áreas de recarga das águas subterrâneas são muito mais extensas do que aquelas de descarga. As áreas de descarga tem extensões variáveis entre 5 e 30 por cento da área total da bacia hidrográfica em apreço.

Efetivamente, em função do balanço dos potenciais hidráulicos determinantes dos sistemas de fluxos subterrâneos, não existe, em absoluto, água subterrânea totalmente isolada ou desconectada do ciclo hidrológico, conforme ilustra a Figura 2. Nas áreas de relevo acidentado predomina o sistema de fluxo local, enquanto que nos domínios com topografia mais suave e de planaltos, os fluxos intermediário e regional tendem a ser os mais frequentes.



3. - CONCEITO DE RECURSOS HÍDRICOS RENOVÁVEIS

Muito embora não exista água subterrânea desconectada do ciclo hidrológico, é possível existir estoques de água nos aquíferos cujo tempo de renovação é tão longo que as reservas assim constituídas são consideradas como não renováveis na escala de tempo da existência humana ou da vida útil de seus projetos.

Vale ressaltar que esta situação pode resultar, por um lado, das condições de confinamento impostas pelas estruturas geológicas, tal como ocorre nas bacias sedimentares preenchidas por sequências alternadas de espessas camadas arenosas e argilosas e, por outro lado, pela acentuada aridez climática dominante nas suas áreas de ocorrência durante, pelo menos, os últimos milhões de anos. Desta forma, a lenta renovação das reservas de águas subterrâneas dos grandes aquíferos, pode decorrer do relativo isolamento destes sistemas às fontes de realimentação, ou da inexistência de excedentes pluviométricos para recarga. Esta situação pode afetar os aquíferos, tanto livres como confinados, localizados nas regiões submetidas à condições de clima árido ou desértico nos últimos milhões de anos.

Portanto, nas tarefas de planejamento e gestão integrada dos recursos hídricos de uma região ou unidade hidrográfica, torna-se de fundamental importância a caracterização dos fatores responsáveis pela maior ou menor renovabilidade das reservas dos aquíferos subterrâneos.

A distribuição dos grandes sistemas aquíferos do mundo que apresentam reservas pouco renováveis é mostrada na Figura 3. É importante salientar que a maioria destes grandes aquíferos correspondem à camadas e/ou unidades litoestratigráficas que foram depositadas em ambiente marinho e/ou continental os quais foram afogados por transgressões marinhas posteriores. Como resultado, a ocorrência atual de água doce fica restrita às parcelas aquíferas que foram lavadas pelos sistemas de fluxos subterrâneos. Estes foram alimentados pelas infiltrações de água de origem meteórica que se verificaram após a regressão marinha.

No Brasil, as últimas grandes transgressões marinhas ocorreram no Período Cretáceo (135 milhões de anos) nas bacias sedimentares do Amazonas, Maranhão, Potiguar e outras similares, cujas bordas continentais afloram ao longo da costa oceânica atual. Nestes condições, a ocorrência de água doce fica restrita às parcelas dos sistemas aquíferos que apresentaram boas condições de recarga/descarga a partir do Período Terciário, ou seja, desde há cerca de 70 milhões de anos. As profundidades aquíferas que foram lavadas, isto é, que contem água doce, variam entre uma centena a milhares de metros, em função das características geométricas, faciológicas, de porosidade/permeabilidade e das diferenças de potenciais hidráulicos que comandam o sistema de fluxos subterrâneos das áreas em apreço. Nos compartimentos aquíferos que permaneceram praticamente estanques, as águas aí estocadas apresentam, local e ocasionalmente, teores de salinidade que podem ser superiores ao das águas do mar, devido aos longos períodos de interação com os componentes mineralógicos.

O sistema Botucatu da Bacia Sedimentar do Paraná representa um dos raros casos de um grande aquífero (extensão atual de cerca de 800.000 Km²) que foi formado em ambiente continental, fluvial-lacustre, que evoluiu para-desértico e que nunca foi afogado por transgressões marinhas posteriores. Ademais, as condições climáticas evoluíram do desértico (Triás-Jurássico) para úmido a super úmido, resultando em abundantes taxas de recarga e descarga que se realizam através dos derrames basálticos confinantes, ao longo dos últimos 135 milhões de anos. Como resultado, as suas águas apresentam, em geral, excelente qualidade para consumo humano, industrial e agrícola até as suas profundidades máximas de ocorrência, da ordem de 2000 metros.

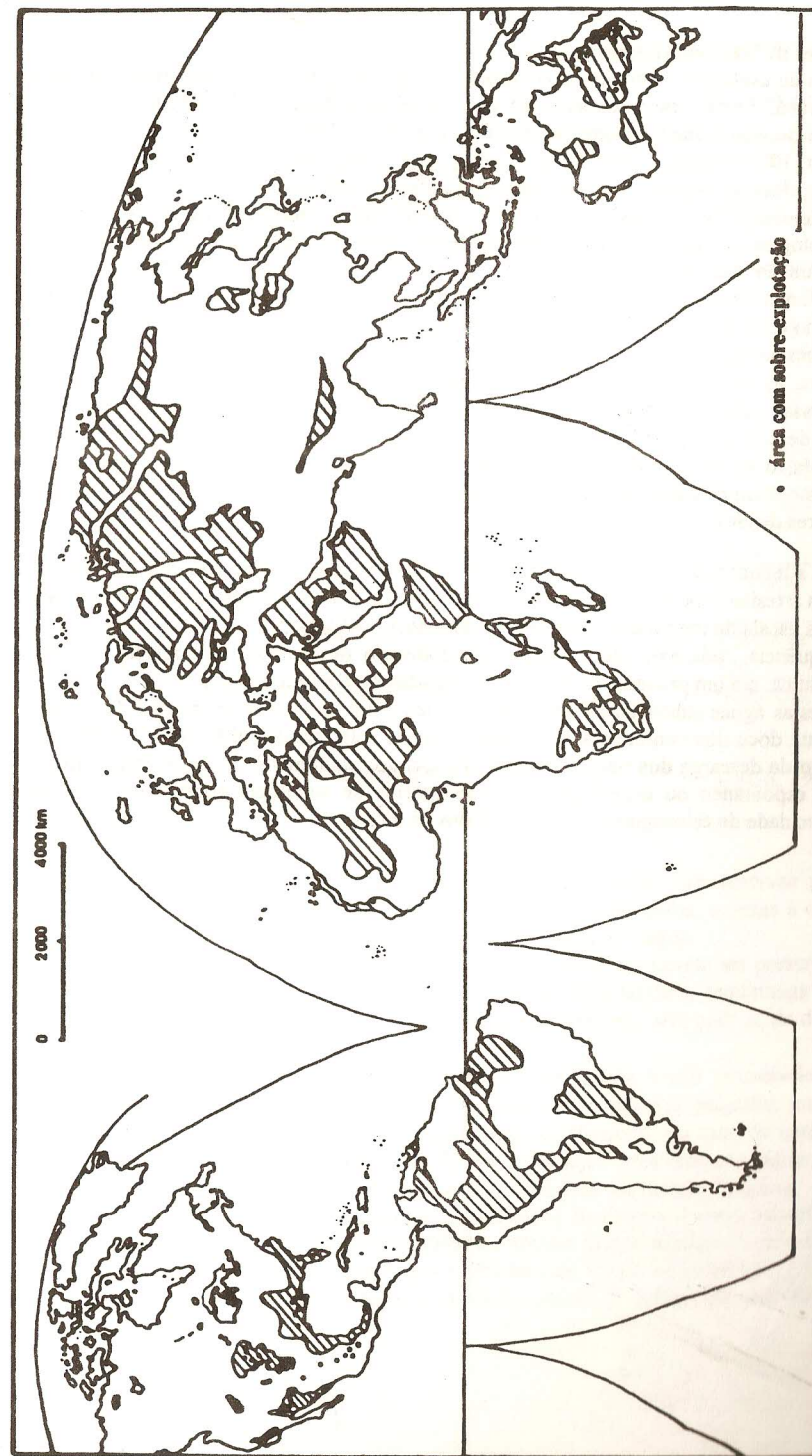


FIGURA 3 - Distribuição dos grandes aquíferos com reservas pouco renováveis

3.1. - Índices de Renovabilidade

Os métodos de avaliação de aquíferos confinados de grande porte, tais como: Botucatu na bacia geológica do Paraná, Serra Grande/Cabeças na bacia geológica do Maranhão/Piauí, Açú na bacia Potiguar, tem um desenvolvimento muito recente (Margat, 1982, 1990; Habermehl, 1980; Rebouças, 1976, 1978; Ezzat, 1977; Neuland, 1988, Pallas, 1972; Postel, 1984; USGS, 1985).

Inicialmente, deve-se ressaltar que, enquanto os aquíferos livres aluviais tem um sistema de fluxos estreitamente relacionado com os rios, os quais se comportam como verdadeiros canais de drenagem da unidade hidrogeológica em apreço, os grandes aquíferos livres ou confinados constituem meios de estocagem, em função das baixas velocidades de fluxos que variam entre ordens de grandeza de centímetros e milímetros por dia. Em consequência, os seus sistemas de fluxos subterrâneos são considerados como estando em estado de equilíbrio ou em regime permanente, isto é, liberam nas zonas de descargas as mesmas quantidades que se infiltraram por unidade de tempo nas zonas de recarga.

Desta forma, as taxas de renovação das reservas dos grandes aquíferos (livres ou confinados) podem ser expressas pela relação entre as recargas anuais que recebem e suas respectivas reservas permanentes ou de estoque. Inversamente, esta relação pode ser referida em termos de tempo de renovação, ou seja, o tempo necessário para que a cumulada dos fluxos de entrada iguale o estoque total. Conforme mostram os dados da Tabela 2, os tempos de renovação podem variar entre centenas e dezenas de milhares de anos.

Portanto, é a lentidão de sua renovação ou escassez das recargas que faz com que as reservas dos grandes aquíferos artesianos ou livres, mormente aqueles localizados em regiões de clima árido, pareçam não renováveis na escala de tempo dos projetos de utilização.

Em consequência, toda extração engendra um acelerado desequilíbrio em relação às recargas resultando, na prática, em um processo de progressivo esgotamento a longo prazo.

Contudo, estas águas subterrâneas desempenham, em geral, um papel primordial de suprimento dos fluxos de água doce dos continentes, sendo responsáveis pela regularização entre 30-40% dos 43 bilhões de m³/ano de descarga dos rios do mundo. O papel dos aquíferos é de 2 a 3 vezes superior ao efeito regulador espontâneo ou estimulado dos reservatórios de superfície construídos nos rios do mundo, cuja capacidade de estocagem é de 2.500 bilhões de m³.

Tabela 2 Tempos de renovação das reservas de grandes aquíferos do mundo

Sistema Aquífero	Taxa Média Anual de Renovação	Tempo de Renovação (anos)	Referência
Gde Bacia Artesiana da Austrália	5.10^{-5}	20.000	Habermehl, 1980
Bacia Artesiana Arábia Saudita	3.10^{-5}	33.000	Neuland, 1988
Bacia Artesiana Argélia, Tunísia	$1,4.10^{-5}$	70.000	Forkasiewicz & Margat, 1982 Pallas, 1972
Bacia Aretisana-Egito e Líbia	$1,7.10^{-4}$	6.000	Ezzat, 1977
Bacia Artesiana de Paris-França	5.10^{-5}	20.000	Margat, 1990
High Plains Texas-USA (aquífero livre)	5.10^{-4}	2.000	Postel, 1984 USGS, 1985
Aq. S. Sebastião B. Bahia-Brasil	$2,5.10^{-4}$	4.000	Rebouças et al. 1967
Aquífero Botucatu B. Paraná-Brasil	$3,4.10^{-3}$	300	Rebouças, 1976
Aquífero Açú, B. Potiguar-Brasil	$1,3.10^{-4}$	7.500	Rebouças et al, 1967
Aq. Cabeças/Serra Gde. B. Maranhão-Brasil	$1,3.10^{-5}$	1.000	Rebouças, 1978
Arizona-USA (aquífero livre)	$2,5.10^{-4}$	4.000	USGS, 1985

3.2. - Gestão Sustentável

Atualmente, a exploração dos grandes aquíferos confinados, com reservas pouco renováveis, constitui a base do desenvolvimento agrícola de várias regiões do globo, sujeitas à condições de clima árido ou semiárido e/ou intensa degradação da qualidade dos rios e lagos.

Em que medida e em que condições as reservas dos aquíferos devem ser preservadas tão somente como reguladoras dos fluxos hídricos dos ecossistemas, mas também exploradas como recurso de grande alcance sócio-econômico, são questões a serem respondidas pela política de desenvolvimento da região em apreço.

Regra geral, a distinção entre recursos naturais renováveis e não renováveis é bem nítida: no primeiro caso há regeneração dos estoques na escala de tempo dos projetos; no segundo caso os estoques extraídos não se reconstituem na escala humana. Portanto, no caso da água, onde a natureza nos proporciona ao mesmo tempo estoques e fluxos, a distinção entre recursos hídricos renováveis e não renováveis depende da duração das atividades econômicas na escala humana. Ademais, reservas estáticas e dinâmicas não são independentes e a diferença fundamental entre matérias primas minerais não renováveis e água subterrânea é que não existe estoques desconectados do ciclo hidrológico.

É possível existir estoques de água nos aquíferos cujo tempo de renovação é tão longo que estes passam a ser considerados como não renováveis na escala de tempo da existência humana ou do

interesse de seus projetos. Por outro lado, a exploração das reservas dos aquíferos induz dinâmica nos fluxos, propiciando condições de recarga onde anteriormente não existia, reduzindo o transbordamento de seus fluxos e as perdas por evapotranspiração.

Outro fato a considerar é que a exploração dos aquíferos com reservas ditas não renováveis, cujo início se deu no século XVII, nunca obedeceu a critérios racionais de planejamento ou gestão. Bem ao contrário, imperou a improvisação e a busca de lucro fácil derivado da obtenção de água com baixo custo energético (poços jorrantes), como teve início nos idos de 1780 na Bacia de Paris.

Nos regiões de clima árido (África, Meio Oeste Americano, Califórnia, Austrália) a exploração foi influenciada pela visão otimista do século XIX que apostava na inesgotabilidade dos recursos e na capacidade ilimitada dos ecossistemas de absorver os impactos dos processos produtivos. A conjunção de poderosos meios técnicos e financeiros conduziu ao modelo de "mineração", isto é, segundo uma estratégia deliberada de esgotamento até a profundidade técnica-econômica dos equipamentos de bombeamento, conforme ilustram os dados da Tabela 3.

Segundo esta estratégia minerária a metodologia de avaliação das reservas de águas subterrâneas explotáveis foi fundada sobre o caráter praticamente não renovável do recurso, os parâmetros geométricos e de porosidade útil dos materiais aquíferos e hipóteses sobre o abaixamento máximo dos níveis da ordem de 100 m, sem levar em conta os sistemas de fluxos subterrâneos e suas conexões com o regime hidrológico da região em apreço. Nesta ótica, o volume explotável do aquífero de Nubia (Egito e Líbia) foi avaliado em 600 bilhões m³ (Ezzat, 1977) e em 550 bilhões de m³ dos aquíferos da Arábia Saudita (Neuland, 1988). As avaliações de cenários de exploração baseados no comportamento hidrodinâmico dos aquíferos da Argélia e Tunísia indicaram que 15 e 20 bilhões de m³ seriam extraídos das reservas, respectivamente em 1970 e no ano 2000 (Pallas, 1972). Esta abordagem tem em conta um plano realizável de implantação de poços para produção de uma determinada capacidade específica e não um rebaixamento uniforme. Qualquer que seja o método de cálculo, a avaliação das reservas explotáveis é inseparável da gestão previsional (Margat, 1990).

Tabela 3 Níveis de extração das reservas pouco renováveis de grandes aquíferos

Localização	Tipos Dominantes de Aquíferos	Período Extração	Total Extraído 10 ⁹ m ³	Percentual da Reserva Permanente
Arizona- USA	Fossa aluvial (L)	1920-1980	225	89
Meio Oeste-USA	Ogallala High Plains (L)	1940-1980	507	38
Califórnia-USA	San Joachim Valley (L)	1961-1978	490	4
Austrália	Gde. Bacia Artesiana (C)	1880-1973	35	71
Argélia	Cont. Intercalar e Terminal (C)	1900-1981	28	14
Arábia Saudita	Conjunto (L/C)	~1985	7,4/ano	88
China	Planície do Ho Pei (L/C)	1960-1980 1980	150 a 200 12	10
México	Bacia do México (30/C)	~1980 1983	7,35/ano 1,6	49 37

Fonte: Margat, 1990 (L) livre, (C) confinado

5 - CONCLUSÃO

Como uma base real de desenvolvimento sócio-econômico, as reservas de águas subterrâneas dos grandes sistemas aquíferos, embora relativamente pouco renováveis, devem ser exploradas em benefício máximo da coletividade das regiões onde ocorrem. Considerando que as suas águas se encontram relativamente melhor protegidas dos agentes de contaminação e que apresentam, em geral, qualidade adequada para consumo, sem tratamento prévio, constituem recurso estratégico por excelência para abastecimento humano. Tendo em vista as comprovadas interligações hidráulicas com os sistemas aquíferos sobrepostos e a existência de excedentes pluviométricos ou de reuso para recarga, a exploração racional devidamente conjugada pelo planejamento e gestão integrada (recursos hídricos, formas de uso e ocupação do meio ambiente, recarga artificial via reuso) da área deverá ampliar a sua viabilidade como um manancial renovável. Os efeitos de sobreexploração já registrados decorrem, na maioria dos casos, da falta de aplicação de regras básicas de planejamento e gestão e deficiências técnicas/operacionais dos poços.

Considerando que os usuários são geralmente numerosos (agricultores, industriais, comunidades locais), a definição de objetivos e regras de uso e proteção integrada dos recursos hídricos da região em apreço, se impõe como tarefa prioritária.

6 - REFERÊNCIAS

- EZZAT, M., 1977, The development of the Egyptian Western desert (50 years-1975-2025), Sacramento Conf. Vol 1. p 45-57.
- FORKASIEWICZ, J., MARGAT, J., 1982, L'exploitation des réserves d'eau souterraine en zones aride et semi-aride, 4^e Conf. Intl. sur la planification e la gestion des eaux. Marseille, Vol. 1 p 701.
- HABERMEHL, MA. A., 1980, The great artesian basin, Australia, Jour. Austr. Geol. Geophys. No 5.
- MARGAT, J., 1990, Les gisements d'eau souterraine, La Recherche, No 221, p 590-96.
- NEULAND, H., 1988, Foodstuff production target in arid zones: issues an prospects from the Arabian peninsula, IWRA/AIRE, 6th Cong. Ottawa, Vol III, p 115.
- PALLAS, P., 1972, Les ressources en eau du Sahara Septentrional, Nature et Ressources, UNESCO, VIII, No 3, 10p.
- POSTEL, S. 1984, Water: rethinking management in an age of scarcity, Worldwatch paper, 62, p 21
- REBOUÇAS, A. C., GASPARY, J., 1967, As águas subterrâneas do Nordeste- Estimativas preliminares, Ser. Hidrogeologia, No 1 SUDENE, 31p
- REBOUÇAS, A. C., 1976, Recursos hídricos subterrâneos da bacia do Paraná-Análise de Pré-Viabilidade, Tese de L. Doc. Inst. Geoc. USP, 143p.
- REBOUÇAS, A. C., 1978, Le grand bassin hydrogéologique du Maranhão-Brésil, Mem. Assoc. Intl. Hydrogéol., XI Conf. Hydrogéologie des grands bassins sédimentaires, Budapest, p 448-58.
- USGS, 1985, National water summary, 1984, Water Supply Paper, No 2275.