

ARTIGO DE REVISÃO

GOMES, Marco Antonio Ferreira ^[1], PEREIRA, Lauro Charlet ^[2]

GOMES, Marco Antonio Ferreira. PEREIRA, Lauro Charlet. Cenário mundial dos recursos hídricos subterrâneos. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 05, Ed. 08, Vol. 15, pp. 79-97. Agosto de 2020. ISSN: 2448-0959, Link de acesso: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/meio-ambiente/cenario-mundial>

Contents

- RESUMO
- INTRODUÇÃO
- DESENVOLVIMENTO
- CENÁRIO DOS PRINCIPAIS AQUÍFEROS E PERSPECTIVAS FUTURAS NO MUNDO
- CENÁRIO DOS PRINCIPAIS AQUÍFEROS DO BRASIL
- OS RISCOS DE CONTAMINAÇÃO DOS AQUÍFEROS
- A SUSTENTABILIDADE DOS AQUÍFEROS PARA AS GERAÇÕES FUTURAS
- CONSIDERAÇÕES FINAIS
- REFERÊNCIAS

RESUMO

A escassez de água para consumo humano se faz presente em todo Planeta, representando um risco iminente para a sobrevivência da população mundial, sobretudo para aquela de países menos desenvolvidos. Como as águas superficiais têm sido as mais afetadas, seja pela disponibilidade reduzida, seja pela qualidade cada vez mais crítica, a busca pelas águas subterrâneas tem sido intensificada nas duas últimas décadas, tornando-as também escassas em vários países. Frente a esse cenário de degradação, torna-se urgente a adoção de medidas e ações que viabilizem a proteção dos mananciais subterrâneos, denominados *aquíferos*. Assim, o presente trabalho faz uma descrição e uma análise crítica desse cenário atual, abordando a situação dos principais aquíferos do mundo, como também do Brasil, dando ênfase aos riscos de contaminação iminentes, frente ao comportamento predatório e à

falta de visão sustentável em relação a esses mananciais subterrâneos. Aborda-se, ainda, as propostas de sustentabilidade dos aquíferos, com a exposição de vários instrumentos de ação/intervenção, tais como o controle rígido de poços tubulares profundos abertos, programas de educação ambiental, ações efetivas de reuso da água, aplicação efetiva da legislação existente sobre a manutenção da qualidade da água subterrânea e, ainda, adoção de mecanismos mais eficazes de fiscalização permanente. A metodologia adotada foi uma ampla revisão de literatura sobre o tema, fundamentada em periódicos, livros técnicos e teses de pós-graduação. Ao final do trabalho, são levantadas as situações mais preocupantes e as propostas de várias medidas para minimizar o cenário crítico dominante, com forte pressão pelo uso dos recursos hídricos subterrâneos.

Palavras-chave: Aquíferos, sustentabilidade hídrica, escassez de água, qualidade ambiental.

INTRODUÇÃO

A água subterrânea representa algo em torno de 96% de toda a água doce disponível no mundo para consumo. Estrategicamente, ela é responsável pela sobrevivência de parte significativa da população mundial. Países como Arábia Saudita, Dinamarca e Malta, por exemplo, utilizam exclusivamente a água subterrânea para o abastecimento humano. Já na Áustria, Alemanha, Bélgica, França, Hungria, Itália, Holanda, Marrocos, Rússia e Suíça, pouco mais de 2/3 da água consumida pela população é proveniente dos aquíferos, o que corresponde a valores em torno de 70% do consumo total desses países (MMA/SRH, 2007). Tal cenário coloca em risco a sustentabilidade dos aquíferos de um modo geral, considerando que outros países como EUA e Canadá possuem também alto consumo de água subterrânea.

No entanto, há poucas décadas (60 e 70), os recursos hídricos, em geral, não eram abordados com preocupação, dada a abundância e facilidade de acesso em várias regiões do Planeta, principalmente as águas superficiais. Nesse cenário, as águas subterrâneas eram interpretadas como mananciais a serem explorados em um futuro longínquo, ou seja, deveriam permanecer quase que intocáveis até segunda ordem. No entanto, o crescimento populacional mundial um pouco inferior a 1,2% (média) ao ano, de acordo com Francisco (2019), aliado ao comportamento predatório das pessoas, tem contribuído para que a água de qualidade se tornasse escassa, tanto superficial quanto subterrânea, passando nos dias

atuais a ser um bem tão precioso que se transformou em *commodity*. Tal cenário remete a uma situação de grande preocupação em nível mundial, uma vez que a maior parte da população não tem como pagar por este recurso.

Outro fato agravante, além da escassez crescente, é a distribuição desigual das águas subterrâneas ao longo do Planeta. Por exemplo, determinadas regiões do Oriente Médio, da África, como também de parte da Ásia, tem apresentado uma crise severa e persistente em relação à disponibilidade de água para abastecimento humano, tanto superficial quanto subterrânea; tal cenário piora na medida em que se agravam os problemas de saneamento básico para boa parte da população nessas regiões (VENTURI, 2016; PENA, 2019).

Frente ao exposto, o presente trabalho levanta alguns problemas e destaca cenários no mundo com foco na quantidade e qualidade da água subterrânea disponível para consumo humano. O objetivo é despertar a sociedade para uma reflexão profunda e responsável sobre a iminência de uma grave crise hídrica mundial, fortemente influenciada pelo crescimento populacional e pelas mudanças climáticas em curso em todo o Planeta. Assim, é preciso conhecer os problemas hídricos em escala global para agir em escala local (BRASIL, 2012), criando uma rede sustentável de consciência e ação em prol desse bem precioso e vital para a sobrevivência da humanidade.

DESENVOLVIMENTO

CENÁRIO DOS PRINCIPAIS AQUIFÉROS E PERSPECTIVAS FUTURAS NO MUNDO

Os aquíferos representam reservas de água subterrânea que necessitam de proteção, principalmente porque são estratégicas para as gerações vindouras, frente à crescente contaminação dos mananciais superficiais. Esse cenário mostra, portanto, o motivo pelo qual a proteção dos aquíferos é de suma importância para o futuro da humanidade.

O maior desafio da população mundial no Século XXI será o de manter protegidas as reservas de água subterrânea dentro de um ambiente sustentável, já que no cenário atual as atividades humanas têm contribuído para a diminuição expressiva desses recursos, sem o devido incremento de ações para proteção dos mesmos. Acrescente-se a isso, as condições

climáticas severas, que interferem negativamente na recarga dos aquíferos.

Estudos realizados pela NASA, por exemplo, no período entre 2003 e 2013, de caráter inédito, identificou um cenário preocupante para os principais aquíferos do mundo (FRANKEL, 2015).

Existem 37 aquíferos de grande importância mundial, sendo que 21 deles encontram-se sob condição de *stress* hídrico, ou seja, com extração de água superior à recarga (entrada de água pelas chuvas) de acordo com a Figura 1.

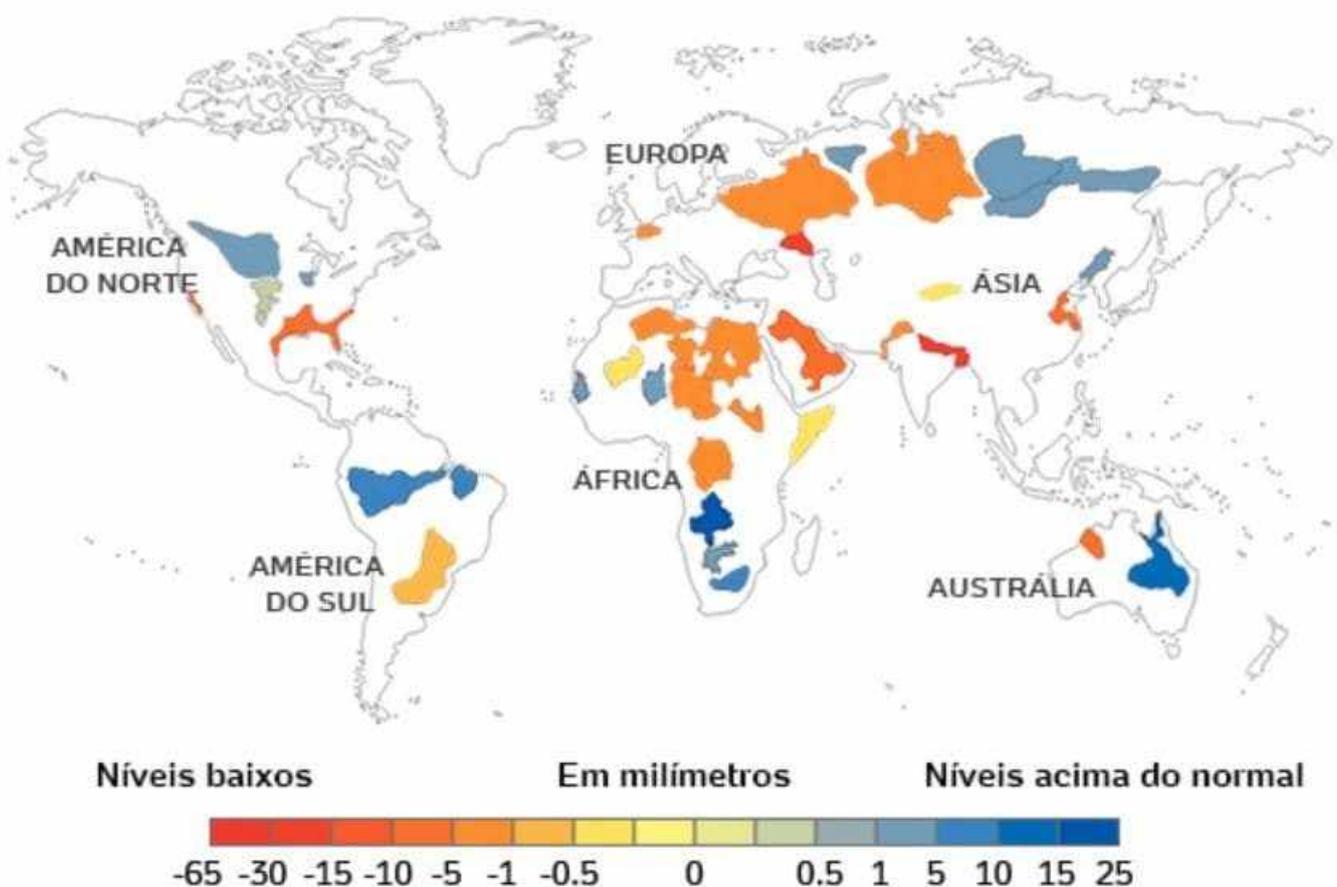
Uma análise mais apurada, no entanto, mostra que em 13 deles (21 mais críticos), apresentam condições “muito críticas” devido à super-exploração.

No entanto, de um modo geral, o cenário é preocupante em todos os 37 maiores aquíferos do Planeta, já que eles sofrem, constantemente, fortes pressões de consumo aliado a um problema de ordem climática, representado pelo desequilíbrio dos índices pluviométricos em nível global. Tal cenário interfere assim, de forma negativa, na recarga dos desses mananciais subterrâneos. (RICHEY *et al.*, 2015; FRANKEL, 2015).

Figura 1. Níveis de recarga dos 37 principais aquíferos do mundo.

Dados de satélite mostram aquíferos críticos no mundo

Mais da metade dos 37 maiores aquíferos da Terra estão com baixo nível de água



Fonte: Richey et al., 2015; Frankel, 2015.

Os aquíferos com maiores problemas em suas reservas estão localizados em regiões com os mais elevados contingentes populacionais e com pobreza acentuada, tendo como exemplos a Bacia Aquífera do Indus no noroeste da Índia, grande parte do Paquistão e uma pequena porção da China (LONG et al., 2016), o norte da África (Bacia Murzuk-Djado), com destaque para a Líbia e o Níger, e o Sistema Aquífero Árabe, considerado o mais crítico de todos, por

suprir a demanda de cerca de 60 milhões de pessoas, com 84% do uso total de água doce em toda a Península Arábica. Pela sobrecarga de uso, este aquífero tem apresentado redução significativa no seu volume, de acordo com avaliações realizadas no período entre 2003 e 2013 pela NASA. A combinação entre retirada excessiva de água e o baixo ou irregular regime anual de chuvas, têm sido a principal responsável por esse cenário extremamente crítico. Em situação semelhante, encontra-se o aquífero da Bacia do Rio Jordão, muito disputado por países como Israel, Palestina, Síria e Jordânia (VENTURI, 2016).

Os principais países da região da Península Arábica, que abrange desde a Arábia Saudita ao Iraque, passando pela Jordânia, Iêmen e Síria, apresentam déficit acentuado na disponibilidade hídrica, aumentando assim, de forma expressiva, a vulnerabilidade de toda a população (FREITAS, 2020).

Também em muitos países desenvolvidos existem problemas de reserva com os aquíferos. Nos Estados Unidos, por exemplo, a reserva subterrânea mais problemática é a do Aquífero do Vale Central da Califórnia, cuja demanda é muito significativa, principalmente para uso agrícola, já que o regime de chuvas na região é pouco expressivo para permitir a perenidade dos cursos d'água superficiais. De fato, toda a produção agrícola da Califórnia e de 25% dos EUA, depende desse aquífero, o que o torna estratégico para os americanos.

Além do Aquífero do Vale Central da Califórnia, existe o Ogallala que também é estratégico para os americanos, dada sua expressiva abrangência territorial, sendo um dos maiores da América. Ele cobre uma área de cerca de 450 mil km², envolvendo diversos estados como Dakota do Sul, Nebraska, Wyoming, Colorado, Kansas, Oklahoma, Texas e Novo México.

Cerca de 20% das terras irrigadas dos Estados Unidos são mantidas com as águas exploradas do Aquífero Ogallala (GUTENTAG *et al.*, 1984). Isso fez com que, desde 2012, fosse implantado um controle mais rígido de uso da água, visando a sustentabilidade desse manancial subterrâneo. Ao todo, os aquíferos super-explorados do Centro-Oeste americano ocupam uma área de mais de três milhões de km² (REBOUÇAS, 2015; AISTRUP *et al.*, 2017).

De acordo com estudos recentes, os aquíferos do Vale Central da Califórnia, na Bacia de Tulare e no sul do Vale de São Joaquim, podem se esgotar já na década de 2030. Com semelhante preocupação, os aquíferos no sul das *Grandes Planícies*, que fornecem água

subterrânea a uma parte dos estados do Texas, Oklahoma e Novo México, podem alcançar seus limites de exploração entre as décadas de 2050 e 2070. Pesquisas recentes usando técnicas de sensoriamento remoto, com dados do período compreendido entre 2007 e 2010 no Vale Central da Califórnia, evidenciaram uma queda significativa nos níveis de água do subsolo, principalmente na sua porção sul. A causa principal foi o endurecimento das camadas de argila, devido à exposição demasiada ao sol e às altas temperaturas, o que contribuiu para a contração de seus poros, não permitindo mais o acúmulo de água como antes. Com a capacidade de armazenamento muito reduzida, certamente não será mais possível a recuperação do volume normal de água através da recarga natural, o que significa que durante a estação chuvosa, o Vale Central não terá seus aquíferos recarregados de forma satisfatória, comprometendo assim a disponibilidade de água, principalmente nos períodos de estiagem (DE GRAAF *et al.*, 2017; OJHA *et al.*, 2018).

Com situação também crítica, mas bem menos do que os aquíferos americanos, pode-se destacar o Aquífero Núbia, localizado no norte da África, abrangendo uma porção do Egito, Sudão, Chade e Líbia. Nessa região da África Saariana, a pressão pelo uso tem aumentado muito nos últimos anos, combinada com a ausência de recarga da água subterrânea. Ainda existe muita água subterrânea disponível, da ordem de 0,66 km³, mas essa situação pode mudar no médio prazo (MAC DONALD *et al.*, 2012).

Na Europa existem aquíferos em situação semelhante ao Núbia, com destaque para o Digitalwaterway Vechte na Alemanha e na Holanda, o Praded na República Tcheca e na Polônia e o Aquífero Leste Prússia que engloba parte da Rússia, da Polônia e da Lituânia. Apesar do aumento crescente pelo consumo de água, o problema na Europa é, de fato, mais qualitativo do que quantitativo, uma vez que as geleiras, de um modo geral, suprem boa parte da demanda de seus habitantes, amenizando o assim a *pressão de uso* sobre os aquíferos (NIXON *et al.*, 2000). Também na condição intermediária de pressão por consumo está o Aquífero North China Plainna China (ZHENG *et al.*, 2010), além do Aquífero Guarani no Brasil, apesar do rebaixamento do nível de poços tubulares profundos em diversos municípios, entre eles São Carlos no interior paulista (PERRONI e WENDLAND, 2008).

Atualmente, em condição de baixa pressão pelo uso, encontram-se os Aquíferos Alter do Chão no Brasil, o Kalahari/Karoo na Namíbia/Botsuana/África do Sul e os Aquíferos da Grande Bacia Artesiana e da Bacia Murray-Darling, estes dois últimos na porção centro-leste da

Austrália. Isso ocorre porque a densidade populacional ainda não é expressiva sobre tais regiões, aliada ao regime de chuvas que permite, de forma satisfatória, a recarga anual. No caso da Austrália, apesar da concentração populacional ser elevada, onde ocorrem os dois aquíferos citados, as reservas de água são expressivas, não oferecendo assim riscos de escassez ou falta de água em um futuro próximo (HARRINGTON e COOK, 2014).

Uma estimativa para o ano de 2010, já indicava que muitos aquíferos em todo o Planeta, principalmente aqueles com características fósseis, ou seja, a água estava confinada a milhares de anos e sem condições satisfatórias de recarga, eram os responsáveis pelo fornecimento em torno de 43% de toda água usada anualmente na agricultura irrigada.

Entre os países com maior consumo de água subterrânea na agricultura estão a China, a Índia, e os EUA, com uso crescente, e quase sempre excedendo a capacidade de recarga dos aquíferos (SIEBERTH *et al.*, 2010).

Frente ao exposto, e no ritmo atual de consumo em todo o Planeta, as reservas de água subterrânea estão seriamente comprometidas e podem entrar em colapso no médio prazo, com escassez crescente de água, principalmente para consumo humano. Para se ter uma dimensão do impacto negativo causado nos aquíferos devido à exploração sem controle, ou inadequada, basta imaginar que há um século todos eles encontravam-se inexplorados ou sub-explorados. Assim, frente ao cenário atual, se fizermos uma projeção para um século à frente, ou seja, em 2120, o que a humanidade terá de reserva de água subterrânea?

CENÁRIO DOS PRINCIPAIS AQUÍFEROS DO BRASIL

As águas subterrâneas em território brasileiro vêm sofrendo ações de grande impacto negativo, sobretudo nos últimos 20 anos, com indícios de que o cenário pode se agravar em poucas décadas. Não se trata de um alarme falso ou de cunho sensacionalista, mas de fatos embasados no comportamento da sociedade, que tem se investido de forma agressiva e irresponsável na superexploração dos aquíferos. O fato é que o Brasil possui uma ótima legislação sobre a proteção dos recursos naturais, mas deixa a desejar no tocante à fiscalização, a qual deveria ser atuante de forma mais contundente e permanente, com penalidades de alto potencial de inibição.

Alia-se à fiscalização deficiente, a falsa premissa de que o Brasil possui água em abundância e assim, pode-se gastar ou consumir à vontade.

De fato, o país dispõe de uma imensa reserva permanente de água subterrânea, cujos valores até 2010 eram estimados em 112.300 km³ de água (1km³ corresponde a 1 trilhão de litros), distribuídos da seguinte forma por região: a) 42.830 km³ na região amazônica, b) 18.670 km³ no nordeste e c) 50.800 km³ na região centro-sul/sudeste. Essa distribuição mostrava, até então, que o conhecimento sobre os aquíferos amazônicos era praticamente inexistente.

Porém, com a realização de pesquisas mais recentes sobre os aquíferos da Amazônia, pesquisadores da Universidade Federal do Pará descobriram que o potencial de armazenamento dos mesmos chega a 162.520 km³, com destaque para o Aquífero Alter do Chão, em relação aos aquíferos Solimões e Içá.

Na prática, isso significa um aumento de 119.690 km³ em comparação com os 42.830 km³ anteriormente definidos, formando assim o que passou a ser chamado Sistema Aquífero Grande Amazônia - SAGA (ABREU, 2013; LAGES, 2016).

Com o incremento do potencial de reserva de água subterrânea em 119.690 Km³, o valor total atual estimado passa para 231.990 km³ em todo o país. De qualquer forma, somente parte dessa água poderá ser retirada, em função de alguns fatores fundamentais, tais como: a) custos elevados/inviáveis para retirada de água a grandes profundidades e b) colapso de caráter geológico, devido à formação de grandes espaços vazios, antes ocupados pela água.

Dessa forma, os estudos de caráter hidrogeológico mostram que a exploração de água subterrânea deve obedecer a alguns critérios essenciais, entre os quais se destacam: a) avaliação da entrada anual de água das chuvas (precipitação) à partir do balanço hídrico nas áreas de recarga, com a estimativa do potencial de recarregamento do aquífero, com a conseqüente formação das reservas renováveis (ativas) ou reguladoras; b) retirada anual de água, tendo por base o correspondente a 25% do volume do potencial de recarga, também conhecida por reserva explorável, principalmente para aquíferos sedimentares, que são mais vulneráveis aos colapsos de ordem geológica. O potencial de recarga anual é também conhecido por potencial renovável de água ou reserva renovável (ROCHA, 1997). Porém, em

serviços de outorga, mais recentemente, têm se adotado o valor de 20% do volume das reservas renováveis, também ditas reservas outorgáveis, a partir de uma proposta com visão mais sustentável para os aquíferos (IMASUL, 2015).

Mesmo considerando os valores reduzidos de exploração de água, citados acima, as reservas exploráveis ainda são expressivas. Por exemplo, no caso do Sistema Aquífero Guarani – SAG (região centro-sul), que apresenta potencial de recarga anual ou reserva renovável de $160 \text{ km}^3 \text{ ano}^{-1}$ possui uma reserva explorável de $40 \text{ km}^3 \text{ ano}^{-1}$, considerando 25%. No caso de 20% essa reserva passa para $32 \text{ km}^3 \text{ ano}^{-1}$. Em se tratando do Sistema Aquífero Grande Amazônia (SAGA), com volume 3,5 vezes superior ao SAG, a reserva explorável chega a $140 \text{ km}^3 \text{ ano}^{-1}$ (25% da reserva renovável) ou a $112 \text{ km}^3 \text{ ano}^{-1}$ (20% da reserva explorável).

Já, na região Nordeste, destaca-se o Aquífero Urucuia, com ocorrência dominante no oeste da Bahia, envolvendo extensa porção da margem esquerda do rio São Francisco, como também o Sistema Aquífero Serra Grande/Pimenteiras/Cabeças, integrante da Bacia do rio Parnaíba que abrange os estados do Piauí e Maranhão e parte nordeste do estado do Tocantins. Estudos de caráter hidrogeológico têm mostrado a existência de uma variação considerável na reserva explorável desses aquíferos, certamente associada às oscilações nas taxas de recarregamento, com valores entre $2,25$ e $5,24 \text{ km}^3 \text{ ano}^{-1}$ e média de $4,07 \text{ km}^3 \text{ ano}^{-1}$ para o Urucuia, de acordo com Gaspar (2006) e de $6,19 \text{ km}^3 \text{ ano}^{-1}$, de acordo com Costa *et al.* (2012) e $9,52 \text{ km}^3 \text{ ano}^{-1}$, de acordo com Aguiar (2017) para o Sistema Serra Grande/Pimenteiras/Cabeças.

Outra região do país com destaque em reservas de água subterrânea é a do Pantanal Mato-grossense, principalmente a porção correspondente ao estado do Mato Grosso do Sul. Lá ocorrem os Aquíferos da Era Cenozoico, Bauru, Serra Geral e Guarani, entre outros de menor porte, que, juntos, formam uma reserva expressiva de água subterrânea, com potencial renovável da ordem de $50 \text{ km}^3 \text{ ano}^{-1}$ e reserva explorável de $10 \text{ km}^3 \text{ ano}^{-1}$, considerando a retirada de 20% do total de recarga anual, de acordo com normas vigentes do governo estadual do Mato Grosso do Sul (MATO GROSSO DO SUL, 2010; IMASUL, 2015).

De acordo com o cenário exposto, fica evidente a grande disponibilidade de água subterrânea no país. No entanto, isso não serve como critério para permitir seu consumo de forma irracional ou descontrolada, uma vez que o recarregamento dos aquíferos possui uma

dependência direta do regime de chuvas, o qual tem se apresentado cada vez mais irregular e imprevisível frente às mudanças climáticas em curso no Planeta. Além desse aspecto, a velocidade dos fluxos subterrâneos é relativamente baixa, fazendo com que a reposição da água retirada ocorra de forma lenta. É por isso que, em muitos locais ou regiões, ocorre com frequência, o rebaixamento do nível dos poços tubulares profundos, indicando que a retirada (exploração) de água está ocorrendo em volume superior àquele que entra, via recarga, no aquífero.

Em complemento a esse cenário, existe uma distribuição desequilibrada da população em relação aos aquíferos. Por exemplo, no caso da região norte, ela detém pouco mais de 2/3 ou 70% de toda a reserva de água subterrânea do país, mas com uma população correspondente a apenas 8,9% do total.

A região centro-sul (sudeste/sul e centro-oeste), por sua vez, possui 21,9% da reserva total de água subterrânea e uma população em torno de 63,8% do total,

Já a região nordeste, possui a penas 8,1% de toda água subterrânea do país e cerca de 27,3% da população. Esses números estão explicitados no Quadro 1.

Quadro 1. Distribuição da população e da água subterrânea por região brasileira, com os respectivos valores numéricos e percentuais.

Região	População (milhões de pessoas) ³	(%)	Reservas água subterrânea (Km ³) ^{1,2}	(%)
Norte	18,62	8,9	162.520	70,0
Centro-Sul (sudeste/sul/centro-oeste)	133,15	63,8	50.800	21,9
Nordeste	56,73	27,3	18.670	8,1

Fonte: Feitosa *et al* (2008)¹; Abreu (2013)²; IBGE (2018)³.

A partir então dessas considerações, fica evidente que o Brasil possui uma reserva muito expressiva de água subterrânea, mas que pode ficar comprometida a médio e longo prazo. Apesar de existir uma legislação que contemple, de forma satisfatória, a proteção dos recursos hídricos, entre eles os subterrâneos, o país padece de uma política de gestão efetiva e integrada, com uma visão de sustentabilidade envolvendo os municípios, os estados e a

união. Isso pode ser explicado, por exemplo, pela falta de controle de perfuração de poços profundos em quase todos os estados, pela ausência de um plano de proteção das áreas de afloramento ou de recarregamento de aquíferos, pela falta de uso controlado e racional da água nos setores agrícola, urbano e industrial, que assim contribuem para o aumento da pressão de uso dos aquíferos.

OS RISCOS DE CONTAMINAÇÃO DOS AQUÍFEROS

Resíduos prejudiciais à saúde estão presentes em quase todos os aquíferos do mundo. Uma vez aberto um poço para captação de água, seja em área confinada ou de recarga de um determinado aquífero, tem-se o início do risco de contaminação que pode ocorrer das mais diversas formas e fontes de origem, seja agrícola, urbana ou industrial. Por isso mesmo, existe a necessidade de proteger tais poços, dentro do esquema denominado tecnicamente de Perímetro de Proteção de Poços (PPPs), que será abordado no próximo item deste trabalho.

Em se tratando, especificamente, de áreas de recarga de aquíferos, os riscos de contaminação são mais evidentes devido à baixa profundidade da zona saturada, uma vez que não existe nenhum pacote de rochas atuando como obstáculo ou de impedimento para a movimentação de produtos potencialmente poluidores.

Na prática, os riscos podem ser mensurados a partir de estudos de avaliação do risco potencial de contaminação que têm por base a combinação de resultados de análises de vulnerabilidade (exposição da área) e de carga contaminante (produtos químicos usados), associada às cargas pontuais e difusas, definidas como duas componentes conceituais do risco de contaminação das águas subterrâneas (FOSTER *et al.*, 2006; GOMES, *et al.*, 2008). Assim, em tais estudos adotam-se, comumente, modelos que permitem a obtenção de uma carta de risco, a exemplo do GOD - *Groundwater occurrence, Overall lithology of aquifer and Depth of watere* o POSH - *Pollutant Origin, Surcharge Hydraulically* (FOSTER *et al.*, 2002; LIMA, 2014; PEREIRA JUNIOR *et al.*, 2015).

De forma complementar a essas cartas de risco, existe uma legislação que, no caso do Brasil, é normatizada pela Resolução CONAMA nº 396, de 7 de abril de 2008, que será abordada

com maiores detalhes no próximo item do presente trabalho.

Assim, no caso dos riscos de contaminação dos aquíferos, entende-se que as avaliações descritas, se incorporadas ao processo de gestão dos recursos hídricos, principalmente pelo poder público, podem evitar a contaminação de um grande número de mananciais subterrâneos. Infelizmente, não é o que ocorre atualmente, seja no Brasil ou em diversos lugares do mundo, salvo raras exceções.

A SUSTENTABILIDADE DOS AQUÍFEROS PARA AS GERAÇÕES FUTURAS

Frente ao exposto nos itens anteriores deste trabalho, os aquíferos estão expostos a uma situação de risco de esgotamento em todos os locais do Planeta, salvo raras exceções, principalmente nos países do norte da Europa. Porém, esse quadro pode ser revertido se forem implantadas, de fato, medidas de proteção dos recursos hídricos subterrâneos, aliadas a diversas ações de caráter sustentável.

O controle rígido de abertura de poços profundos e a efetivação dos Perímetros de Proteção de Poços (PPPs), por exemplo, constituem os primeiros passos, pois além de ter maior controle sobre o consumo, estabelece uma área de proteção ou isolamento nas imediações de um poço tubular profundo, onde as atividades relacionadas ao uso e ocupação apresentam algum tipo de potencial para afetar, tanto a qualidade como a quantidade de água desse poço. Os PPPs são estabelecidos em faixas ou zonas, de acordo com a distância entre o poço e as atividades potencialmente poluidoras, como também em relação ao tempo de deslocamento de algum composto poluente até esse poço. (MIRA *et al.*, 2017).

Outras ações de proteção de aquíferos incluem os estudos de risco em suas áreas de recarga, que servem de apoio aos instrumentos de gestão com foco sustentável, citados no item anterior com os modelos GOD e POSH (FOSTER *et al.*, 2002; ALBUQUERQUE FILHO *et al.*, 2012; LIMA, 2014; PEREIRA JUNIOR *et al.*, 2015)

Aliados a esses instrumentos de gestão, encontra-se a educação ambiental, o reuso da água para diminuir a pressão de uso sobre os aquíferos, a legislação pertinente e a fiscalização constante.

A Educação Ambiental é um instrumento de grande transformação de comportamento, se bem adotado e assimilado pela população. A conscientização da importância dos recursos hídricos, em toda sua dimensão (superficial e subterrâneo), bem como da sua governança, têm na Educação Ambiental o ponto de partida para uma transformação social, aumentando a consciência do cidadão na participação política e nas decisões sobre o desenvolvimento com sustentabilidade (IBAMA, 211).

No caso do reuso da água, como meio de alívio de pressão sobre a demanda por água subterrânea, trata-se de um procedimento mais do que urgente. Existem muitos exemplos sobre o uso racional da água em todo o mundo nas mais diversas atividades. No entanto, em termos percentuais, esses exemplos representam muito pouco, principalmente devido à falta de investimentos, minimamente necessários, por parte do setor público, como nos casos das ETES (Estações e tratamento de esgotos), como também na falta de incentivo para as construções de caráter ecológico, principalmente porque os custos de construção/adaptação são mais elevados do que aqueles que usam técnicas convencionais, sejam residenciais, comerciais ou industriais. No Brasil, os casos mais frequentes de uso e reuso da água estão associados às atividades industriais, uma vez que a legislação ambiental tem sido muito rígida com esse segmento (TORRES *et al.*, 2018).

A legislação, por sua vez, também se constitui em instrumento disciplinador do uso e manejo dos recursos naturais, no presente caso a água subterrânea. No caso do Brasil, a legislação baseia-se em uma normativa sobre as áreas de recarga de aquíferos, denominada de Resolução CONAMA nº 396, de 7 de abril de 2008 (CONAMA, 2008), a qual estabelece que a manutenção da qualidade da água subterrânea possui dependência direta de ações relacionadas às áreas de proteção de aquíferos, conhecidas por Perímetro de Proteção de Poços (PPPs), considerando os seguintes artigos:

Art. 1 Definir critérios ou normas para proteger e conservar os aquíferos em todo o país, com o objetivo de eliminar a super exploração ou exploração descontrolada, como também as atividades que possam colocar em risco a qualidade da água, levando em conta, particularmente, as áreas de uso restrito que constam no §2º do art. 6º da Resolução CNRH nº 22.

Art. 2 Os órgãos gestores deverão promover estudos hidrogeológicos, conduzidos

por entidades públicas ou privadas, de acordo com critérios de abrangência e de escalas adequadas nas seguintes categorias:

I - estudos hidrogeológicos regionais para delimitar as áreas de recarga dos aquíferos e definir suas zonas de proteção;

II - estudos hidrogeológicos regionais, para identificar as potencialidades, disponibilidades e vulnerabilidades dos aquíferos, visando a utilização das águas subterrâneas, em especial nas áreas com indícios de super exploração, poluição ou contaminação, que poderão determinar áreas de restrição e controle de uso de água subterrânea, abrangendo os seguintes aspectos:

a) os recursos hídricos disponíveis para exploração considerando, dentre outros fatores, a descarga de base dos rios;

b) o risco de instabilidade geotécnica, em especial nas áreas de aquíferos cársticos, bem como o uso e ocupação do solo; e

c) a sustentabilidade de exploração, em áreas de aquíferos costeiros, visando evitar a salinização pela intrusão marinha.

III - estudos hidrogeológicos locais para a delimitação de perímetros de proteção de fontes de abastecimento, devendo considerar:

a) as características do aquífero;

b) a proteção sanitária da fonte de abastecimento;

c) a distância em relação a fontes potenciais de contaminação; e

d) as interferências por captações no entorno.

A fiscalização, por sua vez, tem papel de grande relevância no processo de sustentabilidade dos aquíferos, por inibir a ação predatória e irracional sobre os recursos hídricos subterrâneos. Deve existir em todas as esferas de poder, de forma enérgica e com poder de

policiamento. Pessoas e entidades privadas também podem e devem participar como fiscais em uma rede integrada de fiscalização. No Brasil, a fiscalização da água subterrânea, sobretudo em relação à outorga de poços profundos, fica a cargo dos órgãos estaduais que exigem, além das leis específicas de cada estado, o cumprimento da Lei nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, com o documento final aprovado pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) em 30 de janeiro de 2006. Esse documento contém diversas resoluções, entre as quais se destacam a CNRH nº 15, de 11 de janeiro de 2001, que estabelece as diretrizes gerais para a gestão das águas subterrâneas e a CNRH nº 16, de 8 de maio de 2001, que estabelece critérios gerais para outorga de direito de uso dos recursos hídricos (HAGER *et al.*, 2008; ANA, 2009; GRANZIERA e GRANZIERA, 2014).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O cenário apresentado neste trabalho em relação aos recursos hídricos subterrâneos exige a necessidade urgente de ações para minimizar o desperdício, como também da implantação de programas de controle de exploração da água subterrânea em todo o Planeta. O discurso sobre a necessidade de medidas enérgicas de controle de uso da água subterrânea já não tem mais efeito sobre a mudança espontânea de comportamento das pessoas.

Mesmo as ações urgentes têm um tempo limitado, a partir do qual o cenário de escassez torna-se irreversível, condição que afetará praticamente metade da população mundial em poucas décadas.

O crescimento populacional caminha no sentido contrário à disponibilidade hídrica em todo o mundo, e isso tem um custo muito alto, sobretudo em relação à sobrevivência das gerações futuras.

Ao longo dos últimos 20 anos, por exemplo, os cenários críticos sobre escassez hídrica, vêm sendo debatidos e expostos, com alertas por parte de vários grupos da comunidade científica mundial. Porém, as iniciativas e tomadas de decisão, inerentes aos gestores públicos, não tiveram êxito, mostrando, na prática, que não ocorreu qualquer avanço significativo em relação ao consumo consciente e racional da água.

No caso do Brasil, o reuso da água, uma atitude prudente, necessária e urgente, teve poucos avanços em décadas; tampouco evoluíram ou foram colocados em prática, projetos voltados para o aproveitamento da água das chuvas sob várias condições de precipitação e comprovadamente viáveis, como também aqueles de implantação de estações de tratamento de esgotos ou resíduos sólidos urbanos (ETE's) em todas as cidades brasileiras acima de 50.000 habitantes, com previsão a partir de 2012. Essa deficiência de tratamento dos resíduos sólidos tem sido a responsável, por exemplo, pela predominância dos odores fétidos em grande parte dos cursos d'água urbanos de muitas cidades brasileiras.

Esse conjunto de problemas ou limitações, expostos, evidencia o quanto estão fragilizadas ou ineficientes as condições de proteção ou mesmo de gestão dos recursos hídricos, não só no Brasil, mas em escala global.

Para os aquíferos, os problemas expostos, representam uma ameaça devido à grande pressão pelo uso da água subterrânea, uma vez que esse recurso encontra-se, ainda, em condições de relativa abundância em muitos lugares, aliada à qualidade quase sempre muito boa para consumo humano direto, ou seja, sem a necessidade de tratamento prévio.

A proteção dos aquíferos, sob uma perspectiva sustentável, passa necessariamente pelo controle/proteção das áreas de recarga, quando existir, e também pelos poços tubulares profundos abertos, considerando um limite de exploração diário como também a adoção de faixas, zonas ou perímetros de proteção desses poços contra potenciais fontes de contaminação, denominadas de (PPP); tais procedimentos têm sido adotados desde a década de 80, com sucesso, nos países mais desenvolvidos do bloco europeu, a exemplo da Alemanha Federal, Áustria, Bélgica, Holanda, Finlândia, Noruega e França.

A exposição feita até aqui no presente trabalho, embora de forma sintética e globalizada, retrata uma realidade delicada em que se encontram os aquíferos em todo o Planeta e que pode, assim, trazer sérias consequências para uma parcela considerável da população mundial. Afinal, o recurso água é indispensável para manutenção da vida, apesar da negligência da maioria dos países.

De forma conclusiva, é preciso reavaliar o procedimento atual de exploração dos aquíferos, com adoção de normas rígidas de controle, aliadas a outros meios de uso racional e

equilibrado das águas superficiais, no sentido de minimizar a pressão pelo uso dos aquíferos.

No caso específico do Brasil, além da adoção de procedimentos de proteção dos poços citados, que se restringe praticamente ao estado de São Paulo, seria oportuno o incentivo à ocupação de áreas menos povoadas, no sentido de se buscar maior equilíbrio na relação: densidade populacional x disponibilidade hídrica. Essa sim, embora mais difícil e onerosa, seria a melhor opção para aliviar a pressão de uso dos aquíferos da região centro-sul do país.

REFERÊNCIAS

ABREU, F. A. M.; CAVALCANTE, I.N.; MATTA, M. A. S. O sistema Aquífero Grande Amazônia – SAGA: um imenso potencial de águas subterrâneas no Brasil. Anais do III Congresso Internacional de Meio Ambiente Subterrâneo. São Paulo: ABAS, 2013. 4p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Legislação de recursos hídricos no Brasil com foco na fiscalização dos usos. Brasília: ANA, 2009. 117p.

AGUIAR, R. B. Caracterização sistemática do Aquífero Serra Grande na porção nordeste da Bacia Sedimentar do Parnaíba. Universidade Federal do Ceará. Centro de Ciências, Programa de Pós-Graduação em Geologia. Fortaleza, 2017. 169 fl.: il. Color. Tese (Doutorado).

AISTRUP, J. A.; BULATEWICZ, T.; KULCSAR, L. J.; PETERSON, J. M.; WELCH, S.M.; STEWARD, D. R. Conserving the Ogallala Aquifer in southwestern Kansas: from the wells to people, a holistic coupled natural-human model Joseph. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21, p: 6167–6183, 2017.

ALBUQUERQUE FILHO, J. L.; CARVALHO, A. M.; IKEMATSU, P.; BARBOSA, M. C.; IRITANI, M.; PRESSINOTTI, M. M. N.; ROCHA, G.; DA SILVA, M. P. M.; THEODOVICZ, A. Diretrizes para o desenvolvimento e proteção ambiental da área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani no estado de São Paulo, Brasil. *Boletín Geológico y Minero*, v.123, n.3, p. 353-366. 2012.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Articulação Institucional e Cidadania Ambiental. Departamento de Cidadania e Responsabilidade Socioambiental. Coordenação da Agenda 21. Agenda 21 brasileira: avaliação e resultados. Brasília: Ministério do Meio

Ambiente, 2012. 87 p. il.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. Resolução CONAMA nº 396, 2008. p. 308 – 318.

COSTA, Waldir Duarte; SIQUEIRA, Luis; DIAS, Ricardo Ribeiro; CARY, Lise; ROCHA, Wilton José da Silva. A gestão das águas subterrâneas na região Sudeste do estado de Tocantins. XVII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Oct. 2012, Bonito, Brasil. pp.PAP011783, 2012.

DE GRAAF, I. E. M.; VAN BEEK, R.; GLEESON, T.; MOOSDORF, N. ; SCHMITZ, O.; SUTANUDJAJA, E. H.; BIERKENS, M. F. P. A Global-Scale Two-Layer Transient Groundwater Model: Development and Application to Groundwater Depletion, *Advances in Water Resources* (2017), doi: 10.1016/j.advwatres.2017.01.011.

FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMÉTRIO, J. A. Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações. 3ª ed. rev. e ampl. – Rio de Janeiro: CPRM: LABHID, 2008. 812 p.

FOSTER, S.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D’ELIA, M.; PARIS, M. Proteção da qualidade da água subterrânea: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais. Banco Internacional de Reconstrução e Desenvolvimento/ Banco Mundial, 2006. 114 p.

FOSTER, S.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D’ELIA, M.; PARIS, M. Groundwater Quality Protection: A Guide for Water Service Companies, Municipal Authorities and Environment Agencies. World Bank, GWMAE. Washington, 2002. 101 p.

FRANCISCO, W. C. “O crescimento populacional no mundo”; Brasil Escola. Disponível em <<https://brasilecola.uol.com.br/geografia/o-crescimento-populacional-no-mundo.htm>>. Acesso em 04 de abril de 2019.

FREITAS, Eduardo de. “Oriente Médio e a escassez de água”; Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/geografia/oriente-medio-escassez-agua.htm>. Acesso em 06 de abril de 2020.

FRANKEL, T. C. “Nasa data shows the world is running out of water”. *The Independent*,

17/VI/2015.

GASPAR, M. T. P. Sistema Aquífero Urucuia: caracterização regional e proposta de gestão. Brasília: UNB/Instituto de Geociências. 2006. 204 p. (Tese de Doutorado nº 76).

GOMES, M. A. F. (Ed.). 2008. Uso agrícola das áreas de afloramento do Aquífero Guarani no Brasil: implicações para a água subterrânea e propostas de gestão com enfoque agroambiental. EMBRAPA, Brasília, 417 p.

GRANZIERA, M. L. M.; GRANZIERA, B. M. Desafios na gestão da água subterrânea. In: Suplemento Anais do VXIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Belo Horizonte:ABAS, 2014. p.1-14.

GUTENTAG, E. D.; HEIMES, F. J.; KROTHER, N. C.; LUCKEY, R. R.; WEEKS, J. B. Geohydrology of the High Plains Aquifer In Parts of Colorado, Kansas, Nebraska, New Mexico, Oklahoma, South Dakota, Texas and Wyoming. U. S. Geological Survey Professional Paper; 1400-B. 1984. 63p.

HAGER, F. P. V.; D'ALMEIDA, M. L. Legislação aplicada às águas subterrâneas. In: Anais do VX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Natal: ABAS, 2008. P. 1 -16.

HARRINGTON, N.; COOK, P. Groundwater in Australia. National Centre of the Groundwater Research and Training, Australia. 2014. 46 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Síntese de indicadores sociais: uma análise das condições de vida da população brasileira: 2018 / IBGE, Coordenação de População e Indicadores Sociais. – Rio de Janeiro: IBGE, 2018. 151 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA). Política de águas e Educação Ambiental: processos dialógicos e formativos em planejamento e gestão de recursos hídricos. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Recursos Hídricos e Meio Ambiente Urbano; (organização) Franklin de Paula Júnior e Suraya Modaelli. – Brasília: MMA, 2011. 120 p.: il. Color.

INSTITUTO DE MEIO AMBIENTE DE MATO GROSSO DO SUL (IMASUL). Disponibilidade hídrica subterrânea. Secretaria de Estado de Meio Ambiente, Desenvolvimento Econômico, Produção

e Agricultura Familiar. 2015. Acesso:
www.imasul.ms.gov.br/disponibilidade-hidrica-subterranea/

LAGES, A. S. Sistema aquífero grande Amazônia: um estudo sobre a composição química das águas das cidades de Itacoatiara e Manacapuru-AM. 2016. 86f. Tese (Doutoramento em Química) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2016.

LIMA, D. R. Avaliação do risco de contaminação das águas subterrâneas do Sistema Aquífero Serra Geral no município de Bento Gonçalves. Porto Alegre: UFRS, 2014. 74p. Monografia (Graduação do Curso de Engenharia Ambiental).

LONG, D.; CHEN, X.; SCANLON, B. R.; WADA, Y.; HONG, Y.; SINGH, V. P.; CHEN, Y.; WANG, C.; HAN, Z.; YANG, W. Have GRACE satellites overestimated groundwater depletion in the Northwest India Aquifer? *Scientific Reports*, 6, 14/IV/2016.

MAC DONALD, A. M.; BONSOR, H. C.; DOCHARTAIGH, B. É. Ó.; TAYLOR, R. G. Quantitative maps of groundwater resources in Africa. *Environmental Research Letters*, 7. 2012. 7p.

MATO GROSSO DO SUL. Secretaria de Estado de Meio Ambiente, do Planejamento, da Ciência e Tecnologia e Instituto de Meio Ambiente de Mato Grosso do Sul. PERH-MS. Campo Grande, MS: Editora UEMS, 2010. 194 p.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano (MMA/SRH). Águas subterrâneas – um recurso a ser conhecido e protegido. Brasília: MMA/ABAS/PETROBRÁS. 2007. 40 p.

MIRA, T.; LOUSADA, G.; TUBBS FILHO, D.; SOUSA, G. M. Integração entre áreas de proteção de poços, vulnerabilidade de aquíferos e uso e cobertura do solo como plano de gestão de recursos hídricos: um estudo de caso dos poços de Seropédica/RJ. *Revista Continentes (UFRRJ)*, ano 6, n. 10, 2017. P. 124 – 144.

NIXON, S. C.; LACK, T. J.; HUNT, D. T. E. Recursos hídricos na Europa: uma utilização sustentável? Situação, perspectivas e questões. Agência Europeia do Ambiente. Relatório de avaliação ambiental 7. 2000. 36 p.

OJHA, C.; SHIRZAEI, M.; WERTH, S.; ARGUS, D. F.; FARR, T. G. Sustained Groundwater Loss in California's Central Valley Exacerbated by Intense Drought Periods. *Water Resources Research*, 2018; DOI: 10.1029/2017WR022250.

PENA, Rodolfo F. Alves. "Consumo de água no mundo"; Brasil Escola. Disponível em <<https://brasilecola.uol.com.br/geografia/consumo-agua-no-mundo.htm>>. Acesso em 18 de marco de 2019.

PEREIRA JUNIOR, L. C.; SOARES, H. L. T.; CASTRO, S. S. VULNERABILIDADE NATURAL E RISCO DE CONTAMINAÇÃO DO AQUÍFERO BAURU NO MUNICÍPIO DE RIO VERDE - GO. *Águas Subterrâneas* (2015) 29 (2):129-145.

PERRONI, J.C.A.; WENDLAND, E. C. Avaliação das condições de ocorrência e exploração do Sistema Aquífero Guarani em São Carlos - SP. *Águas Subterrâneas*, v. 22, n. 01, p. 13-24, 2008.

REBOUÇAS, A. *Uso inteligente da água*. São Paulo: Escrituras Editora e Distribuidora Ltda. 2015. 207p.

RICHEY, A. S.; THOMAS, B. F.; LO, Min-Hui; REAGER, J. T; FAMIGLIETTI, J. S.; VOSS, K.; SWENSON, S. ; RODELL, M.. Quantifying renewable groundwater stress with GRACE. *Water Resources Research*, 2015.P. 5217 - 5238.

ROCHA, G. A. O grande manancial do Cone Sul. *Estudos Avançados*, 11(30), IEA/USP, p. 191-212, 1997.

SIEBERT, S.; BURKE, J.; FAURES, J. M.; FRENKEN, K.; HOOGEVEEN, J.; DÖLL, P.; PORTMANN, F. T. "Groundwater use for irrigation - a global inventory", *Hidrology and Earth System Sciences*, 14, 1863-1880, 12/X/2010.

TORRES, T. L.; OLIVEIRA, J.C.; BAUM, C. A.; BECEGATO, V. A.; HENKES, J. A. Gestão do uso da água na indústria: aplicação de reuso e recuperação. *R. gest. sust. ambient.*, Florianópolis, v. 7, n. 2, p. 370 - 385, abr/jun, 2018.

VENTURI, L. A. B. *Água no Oriente Médio: o fluxo da paz*. São Paulo: Editora Sarandi. 2016.

224 p.

ZHENG, C.; LIU, J.; CAO, G.; KENDY, E.; WANG, H.; JIA, Y. (2010). Can China Cope with Its Water Crisis?-Perspectives from the North China Plain. Ground water. 48. 350-4. 10.1111/j.1745-6584.2010.00695_3.x.

^[1] Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas (UFV, 1994); Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas (UFV, 1987); Graduação (Bacharelado) em Geologia (UFMT, 1982).

^[2] Doutorado em Engenharia Agrícola. Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas. Especialização em Curso Internacional em Sensoriamento. Graduação em Engenharia Agrônômica.

Enviado: Maio, 2019.

Aprovado: Agosto, 2020.