

Hidrologia Agrícola

2ª Edição

Shakib Shahidian
Rita Cabral Guimarães
Carlos Miranda Rodrigues
António Chambel
Carlos A. Alexandre
Francisco L. Santos
Gottlieb Basch
José A. Andrade
Renato Coelho

Título: Hidrologia Agrícola

Editores: Shakib Shahidian
Rita Cabral Guimarães
Carlos Miranda Rodrigues

Primeira Edição 2012
Segunda Edição revista e ampliada 2017

ISBN: 978-989-8550-40-8

Uma edição conjunta:

Escola de Ciência e Tecnologia da Universidade de Évora
e
ICAAM - Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais Mediterrânicas

Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais Mediterrânicas (ICAAM)
Escola de Ciência e Tecnologia da Universidade de Évora
Universidade de Évora
Núcleo da Mitra
Apartado 94
7002-774 Évora

© 2017 Os autores

Impresso pela Libéris
Setembro 2017

Capítulo 6

Águas subterrâneas e agricultura

António Chambel

*ICT – Instituto de Ciências da Terra
Escola de Ciência e Tecnologia
Universidade de Évora*

1. Introdução

As águas subterrâneas têm sido usadas desde tempos imemoriais para fins relacionados com a sobrevivência humana. Essa utilização foi inicialmente feita através do recurso direto às águas de nascentes e, indiretamente, através da utilização de água em cursos de água superficiais, lagos ou pântanos dependentes de águas subterrâneas, o que sucede em muitas situações, principalmente em zonas mediterrânicas, onde os rios, nos períodos pouco pluviosos, funcionam como linhas de água de descarga dos aquíferos. Este facto sucede porque, após os episódios de precipitação, a água infiltrada no solo escoar muito mais lentamente do que a água que percola à superfície do solo. Algumas horas ou dias depois desses episódios de precipitação, as águas que escoam superficialmente já se deslocaram na sua totalidade para as linhas de água e, a partir dessa altura, toda a água que chega aos rios e ribeiros passou já pelo subsolo. Isto não significa obrigatoriamente que a água tenha atingido o nível freático do aquífero, uma vez que uma parte da mesma irá percolar o solo e sair para o meio hídrico superficial sem ter atingido o aquífero. Mas, passado algum tempo (horas, dias, semanas), uma parte da água ter-se-á deslocado verticalmente até ao aquífero, elevando o seu nível freático. Para restabelecer o equilíbrio, a água que se vai acumulando no aquífero pressiona a água que se encontra por baixo, obrigando as águas mais antigas a deslocar-se para saídas naturais (nascentes, rios, lagos, oceanos ou para outros aquíferos a jusante).

A variação anual natural dos níveis freáticos nos aquíferos tem fundamentalmente a ver com os ciclos de precipitação, podendo igualmente ser influenciados pela ligação desses aquíferos a massas de água superficiais (rios, lagos, pântanos) ou a outras massas de água subterrânea. A grande utilização de águas subterrâneas veio modificar os sistemas naturais em muitas zonas do globo, causando rebaixamentos que alteram os ciclos da natureza, muitas vezes de forma irreversível.

Em Portugal, estima-se que mais de 80% de toda a água subterrânea explorada seja usada para fins agrícolas, pelo que os maiores riscos de sobre-exploração do recurso passam por esta atividade. Ao contrário de outros países do mundo, não há ainda em Portugal muitos aquíferos em risco de sobre-exploração, embora surjam alguns sinais de preocupação em alguns deles, principalmente nas Orlas Meso-Cenozóicas Ocidental e Meridional (Figura 6.1).

Os usos de água subterrânea na agricultura têm, em relação à utilização de águas superficiais, algumas vantagens e algumas desvantagens. A principal vantagem é facto da água subterrânea poder ser obtida no local onde irá ser utilizada e por um valor relativamente baixo quando comparado com o investimento numa barragem no local ou numa área afastada, a que, neste caso, se adicionam os custos das aduções, por vezes atravessando extensões muito longas. As duas principais desvantagens poderão ser a eventual limitação de reservas renováveis de água subterrânea nesse local específico e a qualidade da mesma. Em relação a uma possível qualidade deficiente da água, esta pode ser de origem natural ou estar já influenciada por ações humanas (contaminada).

As reservas renováveis de água subterrânea são avaliadas pela diferença entre os volumes de infiltração de água nos aquíferos e as extrações somadas às descargas naturais dos mesmos. Os principais fatores que condicionam a recarga são os valores de precipitação e a sua distribuição anual, que em Portugal ocorre fundamentalmente durante o período chuvoso, entre o outono e o inverno, a permeabilidade dos solos, e a grande influência que a evapotranspiração tem no período menos chuvoso, com temperaturas muito elevadas na primavera-verão. A quantidade e qualidade da água subterrânea têm também muito a ver com a tipologia dos solos e rochas que constituem o substrato dos aquíferos. Em Portugal continental, a maioria das litologias correspondem ao grupo que é designado por rochas cristalinas, rochas duras ou rochas fraturadas, onde a circulação de água se faz fundamentalmente através de fraturas e não de poros, como é o caso de rochas de tipo arenoso. Cerca de dois terços da superfície do território português corresponde a afloramentos deste tipo de rochas, principalmente rochas ígneas (granitóides na sua maioria) e metamórficas (xistos e grauvaques na sua maioria). Essa área corresponde ao designado Maciço Antigo (Figura 6.1).

O restante terço do território continental português corresponde, do ponto de vista hidrogeológico, a rochas de dois tipos: cársicas e porosas. As rochas cársicas são rochas que têm igualmente uma permeabilidade por fratura, mas com fraturas muito alargadas por

dissolução química. É o caso das grutas em calcários e mármore, embora essas fraturas apresentem muitas vezes dimensões muito menores, apenas da ordem dos centímetros, mas suficientes para permitir a exploração de quantidades elevadas de água. As rochas porosas, soltas, do tipo areias, ou consolidadas, do tipo arenitos, apresentam uma circulação de água muito mais uniforme.

Os aquíferos cársicos e porosos são quase sempre muito mais produtivos do que os aquíferos em rochas fraturadas e, mesmo dentro de cada um dos tipos, pode haver uma grande irregularidade na distribuição do armazenamento e do movimento da água, nomeadamente quando zonas porosas têm uma grande percentagem de argilas, as quais colmatam a passagem de água subterrânea através dos poros. Na prática, o coeficiente de armazenamento, que representa o volume de água gravítica contido num determinado volume de aquífero, e a permeabilidade, que representa a facilidade com que a água se move no aquífero, condicionam a produtividade de todo o tipo de massas de água subterrânea.

Na Figura 6.1 podem ver-se, para além do Maciço Antigo, três outras zonas: a Bacia Meso-Cenozóica Ocidental (a norte de Lisboa, até à zona do Porto e também a Serra da Arrábida e o Sistema Aquífero de Sines, na costa do Alentejo), a Bacia Meso-Cenozóica Meridional ou Algarvia, no sul de Portugal, ambas com aquíferos cársicos, porosos ou mistos, e a Bacia Terciária do Tejo-Sado, na zona da bacia hidrográfica destes dois rios, com aquíferos fundamentalmente porosos.

Quanto ao quimismo das águas subterrâneas, este reflete um conjunto de circunstâncias e processos que partem da qualidade original da água de precipitação, da sua interação com a estrutura e composição do solo e da zona subsaturada, com as plantas e matéria orgânica com que entra em contacto durante a percolação até atingir o aquífero, e, na maioria dos casos, depende do processo mais importante, a interação com as rochas do aquífero, onde o tempo de contacto da água é maior e que, caso o tempo seja suficiente, levará a um equilíbrio químico entre a composição mineralógica das rochas e o quimismo da água subterrânea nesse aquífero. O estudo destes equilíbrios designa-se por hidrogeoquímica.

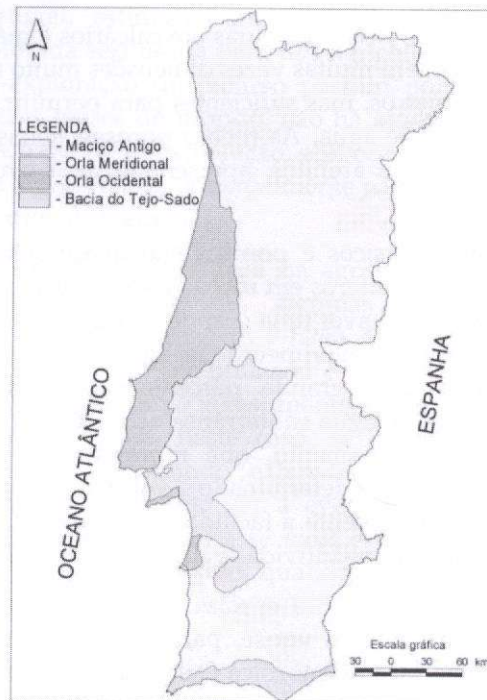


Figura 6.1. Carta das grandes unidades hidrogeológicas em Portugal continental (Almeida *et al.* 2000).

2. Caracterização dos aquíferos

Um aquífero é uma unidade tridimensional de rocha contendo água subterrânea em quantidades que possam ser exploradas. Trata-se portanto do conjunto água-rocha, com uma determinada área e uma determinada espessura, onde todos os poros e fraturas da rocha estão preenchidos com água, a designada zona saturada.

Os aquíferos situam-se por baixo da designada zona vadosa, de aeração, subsaturada ou não saturada, localizada entre o solo e o aquífero mais próximo da superfície (no caso de aquíferos sobrepostos), em que os poros e fraturas estão preenchidos com ar e água, neste caso principalmente água capilar. É uma importante zona para as águas subterrâneas, pois a maioria da infiltração dá-se através desta estrutura não saturada, interagindo com matéria mineral e orgânica até atingir o aquífero. É nesta zona que se dá uma parte importante da depuração das águas subterrâneas que são contaminadas à superfície do solo. Por ser uma zona rica em oxigénio, matéria orgânica e microorganismos que podem degradar uma parte dos agentes contaminantes, a água, na sua

passagem para o aquífero, pode ver bastante alterada a sua composição em poluentes de diversos tipos que sejam químico ou biologicamente degradáveis.

A água circula dentro dos aquíferos de modo distinto. Dentro dos aquíferos fraturados e cárnicos há um padrão de deslocação através de alinhamentos correspondentes às fraturas, com uma movimentação que pode ser muito direcional, heterogénea e aleatória. Dentro dos aquíferos de carácter poroso, o comportamento está mais próximo de um meio isotrópico e homogéneo, ou seja, há uma maior previsibilidade em relação ao comportamento dinâmico da água subterrânea.

Dentro dos aquíferos de carácter poroso, podem distinguir-se quatro tipos (Figura 6.2):

Os aquíferos livres, também designados por freáticos (Figura 6.2), que apenas apresentam uma camada impermeável na base, e têm a superfície piezométrica coincidente com o topo do aquífero; na sua superfície a água subterrânea encontra-se à pressão atmosférica e, quando se executa uma captação, a água dentro da mesma iguala a cota da água no aquífero; apresenta por cima a zona não saturada.

Os aquíferos confinados, ou cativos (Figura 6.2), que apresentam uma camada impermeável de rocha no topo (mais comumente argilas) e na base (mais comumente argilas, rochas carbonatadas ou cristalinas), e se encontram relativamente bem protegidos das infiltrações de água a partir da superfície; estes aquíferos apresentam água a pressão superior à atmosférica, o que significa que, quando se executa uma captação, a água sobe acima do teto do aquífero; o valor da elevação do nível freático em relação ao nível da água no aquífero depende do valor da pressão da água no mesmo.

Os aquíferos semiconfinados (Figura 6.2) são aquíferos de tipo intermédio entre os dois anteriores, com características de confinado quanto à pressão da água, mas que têm pelo menos num dos limites, geralmente o superior, uma camada isolante semipermeável, ou seja, que deixa passar a água, normalmente de um aquífero livre superior para o semiconfinado; este tipo de aquíferos tem duas grandes vantagens, uma recarga de água permanente e um isolamento em relação à superfície do solo, normalmente um material argiloso, que funciona como um filtro perfeito para qualquer tipo de água de menor qualidade que exista num aquífero superior e que passe essa barreira para o aquífero semiconfinado inferior.

Os aquíferos suspensos (Figura 6.2) são pequenos aquíferos acima da superfície freática dos aquíferos livres, suspensos muitas vezes acima

de camadas de tipo argiloso na zona subsaturada, e que podem abastecer, em termos agrícolas, pequenas hortas, através da utilização de poços tradicionais, mas que nunca poderão servir para grandes regadios, devido, na maioria dos casos, à sua limitada extensão horizontal e pequena espessura.

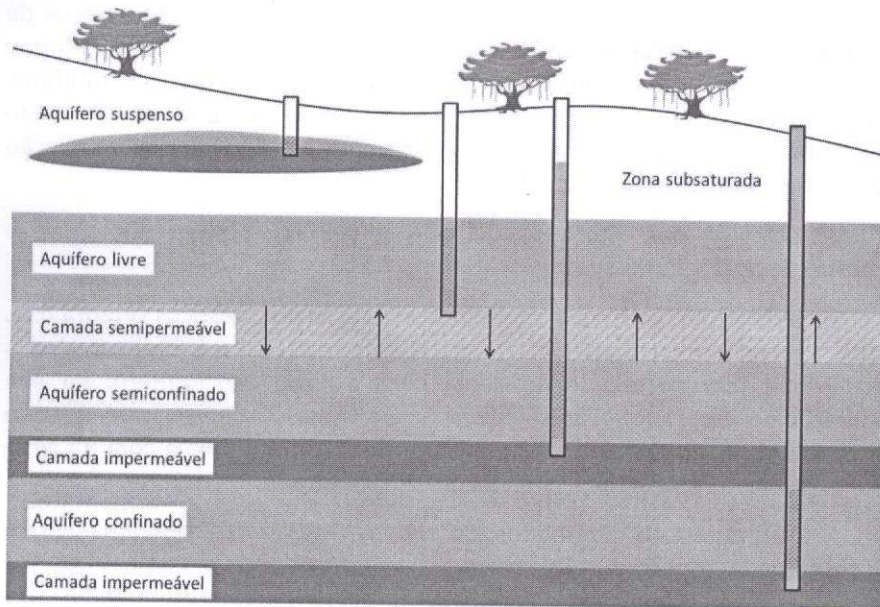


Figura 6.2. Tipos de aquíferos em rochas sedimentares porosas. Cada captação apresenta a zona de entrada de água (tubos-ralo) apenas no aquífero onde capta, encontrando-se isolada quando atravessa os restantes aquíferos.

Os níveis de água atingidos nas diversas captações representam as pressões em cada aquífero (Figura 6.2). Pode verificar-se neste caso que tanto nos aquíferos suspensos como nos livres os níveis nas captações correspondem aos níveis de água no aquífero. No caso dos aquíferos semiconfinados e confinados, a água encontra-se a pressão superior à atmosférica, levando a que os níveis dentro das captações se encontrem acima do topo dos aquíferos respetivos (Figuras 6.2). Neste caso, as captações designam-se por artesianas. Na captação que capta o aquífero confinado verifica-se que a água sobe mesmo acima do terreno. Neste caso, a captação designa-se por artesianas repuxante e a água escoará para fora da captação sem necessidade de bombeamento. Na camada semipermeável os movimentos de água podem ser de cima para baixo ou de baixo para cima, embora, no caso concreto da Figura 6.2, a pressão apenas permita a passagem de água de baixo para cima (o aquífero semiconfinado apresenta o nível freático acima do nível do aquífero livre). Normalmente a água só se deslocará do aquífero superior para o inferior

quando se criam subpressões no aquífero inferior, nomeadamente por desequilíbrios aquando de extrações de água nos aquíferos inferiores.

Os aquíferos livres, semiconfinados e confinados têm muitas vezes características hidráulicas e produtividades que permitem a utilização da água para fins agrícolas em áreas extensas. Em relação aos aquíferos suspensos, apenas permitem a rega de pequenas hortas.

Em relação aos aquíferos fraturados e cársicos, aplicam-se também estas classificações, mas com muita parcimónia, pois a situação é muito mais complexa e pode variar muito de um ponto do aquífero para outro e de captação para captação. Nas rochas fraturadas há alguns aquíferos definidos e identificados, mas a maioria do território português é classificado como sector pouco produtivo, ou seja, com produtividades médias esperadas, em exploração, inferiores a 1 l/s. Nestes casos, a exploração de água subterrânea para a agropecuária cingir-se-á à rega de pequenas hortas e à sua utilização na pecuária, não existindo volumes que possam garantir regadios extensos. Exceções são aquíferos como os Gabros de Beja ou o Aquífero de Évora, como exemplo. Para mais referências no Alentejo, consultar ERHSA 2001.

3. Características hidráulicas dos recursos hídricos subterrâneos

Os recursos hídricos subterrâneos, em termos da sua caracterização quantitativa, são identificados por três parâmetros hidráulicos:

O Coeficiente de Armazenamento (S), que corresponde, em percentagem, ao volume de água gravítica contida num determinado volume do aquífero (água mais a rocha que a contém); por exemplo, um valor de 0,10 indica que, em cada m³ de aquífero (água mais rocha), existem 100 l de água que pode ser explorada (gravítica); são comuns valores entre inferiores a 0,01 para rochas fraturadas e até 0,30 em rochas sedimentares porosas, podendo excepcionalmente rochas vulcânicas do tipo pedra-pomes ter valores superiores a 0,80.

O Coeficiente de Permeabilidade, ou Condutividade Hidráulica (K), que corresponde na prática à facilidade com que água atravessa o meio subterrâneo, é normalmente dado em m/s ou m/dia e corresponde ao volume de água (m³) que atravessa cada m² de aquífero, em cada unidade de tempo, respetivamente por segundo ou por dia; valores inferiores a 1 m/dia podem ser encontrados em rochas ígneas e metamórficas, e valores superiores às centenas podem ser representativos de rochas sedimentares porosas.

A Transmissividade (T), que corresponde à quantidade de água que um aquífero pode transmitir, ou seja, ao volume de água (m^3) que passa por metro linear de aquífero numa determinada unidade de tempo, e é geralmente apresentada em m^2/s ou m^2/dia ; tem uma relação direta com a Condutividade Hidráulica, através da fórmula $T = Kb$, em que b é a espessura do aquífero; para que haja um aproveitamento total do volume de água que um aquífero pode transmitir, é necessário que a captação seja completa, ou seja, que perfure toda a espessura saturada do aquífero, o que nem sempre sucede, quer devido a erro de construção, quer a constrangimentos técnicos.

Aquando da sua exploração, o conhecimento do Coeficiente de Armazenamento (S) e da Transmissividade (T) tornam-se essenciais para perceber como se vai comportar quer a captação, quer o aquífero.

Durante a extração de água num aquífero homogéneo e isotrópico, os níveis dentro da captação baixam, rebaixando ao mesmo tempo o nível freático em redor da captação e elevando sucessivamente o valor do gradiente hidráulico em redor da mesma. O gradiente hidráulico corresponde à diferença de cotas do nível freático entre dois pontos da superfície livre das águas no aquífero em função da distância entre os dois pontos. Para os mesmos parâmetros hidráulicos, quanto maior for o gradiente hidráulico, maior será a velocidade com que a água se irá deslocar para a captação.

O rebaixamento do nível freático em redor da captação ganha o formato de um cone invertido, tanto mais profundo quanto maior o caudal extraído, maior o tempo decorrido e menor a Transmissividade e o Coeficiente de Armazenamento do aquífero (Figura 6.3). Em aquíferos isotrópicos e homogéneos será de esperar que, ao fim de algum tempo, geralmente horas, dias ou mesmo semanas ou meses, esse cone de rebaixamento que se vai criando estabilize. O cone de rebaixamento é real para os aquíferos livres e representa a pressão da água em cada ponto nos aquíferos confinados.

No início da extração, a água subtraída ao aquífero pela exploração é, em volume, superior à que entra na captação e os níveis vão continuar a descer, cada vez mais lentamente, até que se atinge um ponto em que a água que está a ser extraída estará em completo equilíbrio com a água que entra através das paredes da captação. Nesta altura o cone de rebaixamento estabiliza e pode manter-se durante dias ou meses nessa situação, caso a exploração continue ao mesmo ritmo. Haverá um formato de cone de rebaixamento estabilizado distinto, em cada captação, para diferentes valores de caudal de exploração.

Para além da profundidade do cone de rebaixamento, outra das características que importa reconhecer é o valor do raio de influência, ou seja, até que distância horizontal se estende esse cone de rebaixamento. Dentro dessa distância, qualquer outra captação localizada no mesmo aquífero será afetada através do rebaixamento do nível da água, mesmo quando se encontra em repouso. O valor desse rebaixamento dependerá do formato do cone e da proximidade à captação em extração. Esta situação pode ser particularmente gravosa para poços tradicionais de pequena profundidade, que podem ficar sem água devido à exploração em furos próximos em aquíferos livres.

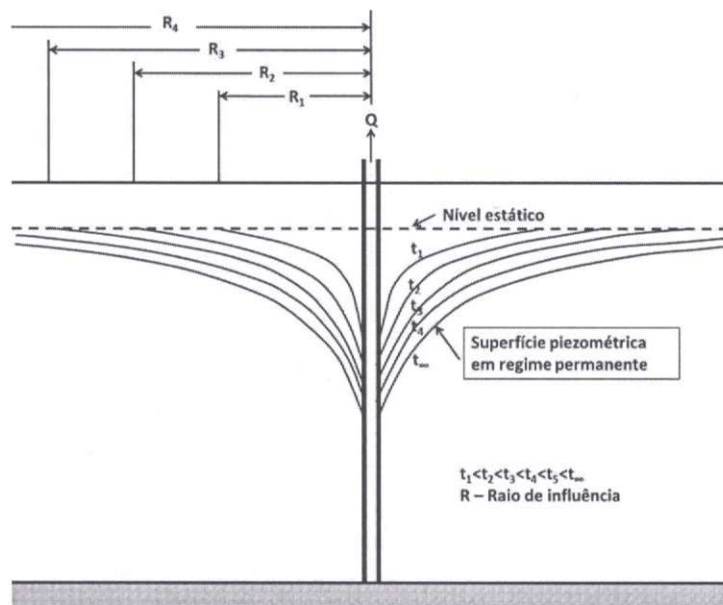
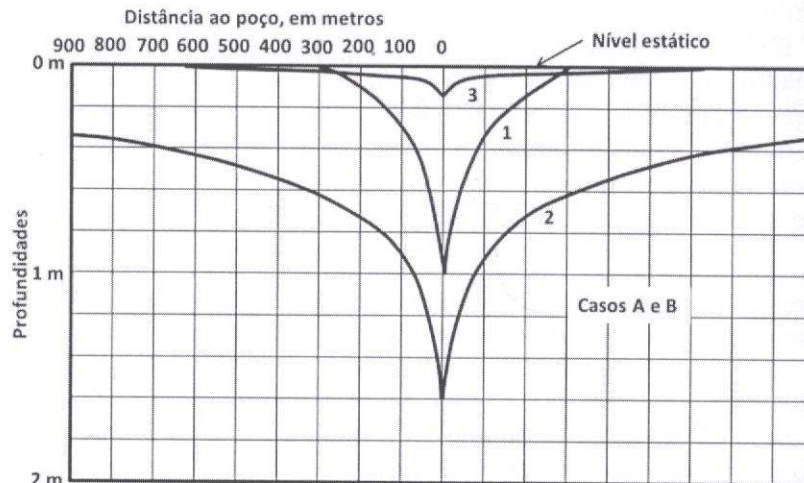


Figura 6.3. Cones de rebaixamento sucessivos numa captação em extração (Custodio e Llamas 1983). O cone mais baixo corresponde a um regime permanente, com estabilização do cone em função do caudal de exploração.

Ensaio de caudal em captações (Figura 6.4) mostram que, como seria de esperar, e para um mesmo caudal de extração, num aquífero com um Coeficiente de Armazenamento (S) baixo e valores de Transmissividade (T) também baixos, as extrações vão provocar um cone de rebaixamento muito profundo e um raio de influência muito alargado, motivado por um armazenamento limitado de água no aquífero e pela dificuldade de deslocamento da água no meio rochoso (exemplo da curva 2 na Figura 6.4). Quando S e T são de valor elevado, o cone de rebaixamento é muito reduzido em profundidade e em extensão, com um raio de influência mais limitado (exemplo da curva 3 na Figura 6.4).

Situações intermédias registam-se nas restantes duas situações extremas, um S reduzido e um valor de T elevado levará a um cone com grande extensão horizontal, mas com profundidade mais reduzida, e um S muito elevado e um valor de T reduzido levará a um cone profundo e um raio de influência mais curto (exemplo da curva 1 na Figura 6.4).



Caso	Curva	Transmissividade m ² /dia	Coefficiente de armazenamento	Caudal m ³ /dia	Duração do bombeamento - dias	Raio de influência - m
A	1	365	0,2	50	22	300
	2	365	0,002	50	22	3000
B	1	365	0,2	50	22	300
	3	3650	0,2	50	22	630

Figura 6.4. Cones de rebaixamento previstos para diferentes valores de S e T. (Custodio e Llamas 1983). Com o mesmo tempo de bombeamento, o cone torna-se mais profundo e muito mais extenso quando diminui o coeficiente de armazenamento. Ao aumentar a transmissividade, o cone de rebaixamento torna-se muito menos profundo.

4. Uso da água subterrânea na agricultura

O uso de água subterrânea na agricultura é muito comum, principalmente quando não há um acesso fácil ou pouco dispendioso a recursos hídricos de origem superficial. Os recursos hídricos subterrâneos são usados em todo o território português, ou seja, em todos os tipos de aquíferos e mesmo em zonas de baixa produtividade que existem em Portugal. Significa isto que existem regadios baseados em águas subterrâneas em condições muito distintas em relação à produtividade dos aquíferos e, logo, às características, quantidade e disposição das captações.

Nas orlas Meso-Cenozóicas Ocidental e Meridional e na Bacia do Tejo-Sado é possível encontrar grandes regadios com base numa ou em poucas captações, com produtividades que podem ultrapassar aos 100 l/s cada.

Nas zonas de rochas fraturadas as produtividades são relativamente baixas, mesmo dentro dos aquíferos principais, e obrigam à execução de captações múltiplas quando se pretendem regadios já com alguma dimensão. É comum verem-se conjuntos de furos, por vezes mais de 10, a serem utilizados para rega de áreas extensas na região do Alentejo. Devido à produtividade reduzida, as captações deveriam ser executadas afastadas entre si, para que pudessem ser exploradas em contínuo durante o maior intervalo de tempo possível, o que raramente acontece. Os efeitos conjugados da exploração múltipla de captações em zonas agrícolas são conhecidos (Figura 6.5) e provocam rebaixamentos por vezes muito acentuados numa extensa zona. Esses rebaixamentos são muitas vezes problemáticos, também pelos efeitos que têm em nascentes ou ecossistemas que dependam de águas subterrâneas, pois as nascentes correspondem a afloramentos do nível freático, e quando os níveis descem (imagem inferior na Figura 6.5), essas nascentes deixam de ter água, pelo menos nas alturas mais secas do ano hidrológico.

Caso a situação de rebaixamento possa ser compensada pela recarga anual a partir da precipitação ou de rios permanentes próximos, os níveis serão recuperados todos os anos e a situação não será muito problemática. Mas, quando os valores de exploração ultrapassam claramente os valores de recarga, entra-se numa situação designada por sobre-exploração, onde os níveis freáticos se vão tornando cada vez mais profundos. Em aquíferos porosos esta situação tem consequências que podem levar ao abatimento do solo em metros ou dezenas de metros, por ajustamento dos grãos componentes das rochas, principalmente das suas frações mais finas (argilas, siltes), fenómeno associado à falta da pressão original induzida pela presença da água. Esta situação de abatimento dos níveis do solo, designada por subsidência, ocorre já em muitos países do mundo, sendo talvez o caso mais conhecido o da Cidade do México, onde as extrações de água para rega e abastecimento público levaram a rebaixamentos do nível freático da ordem das dezenas de metros, com os respetivos abatimentos de terrenos a registarem valores entre alguns metros e uma dezena de metros nalguns locais. Este fenómeno também pode afetar as zonas cársticas, mas, neste caso, o processo pode ser muito mais rápido, com quedas abruptas do teto de grutas em regiões calcárias, por falta de sustentação provocada pela ausência da pressão da água extraída das mesmas.

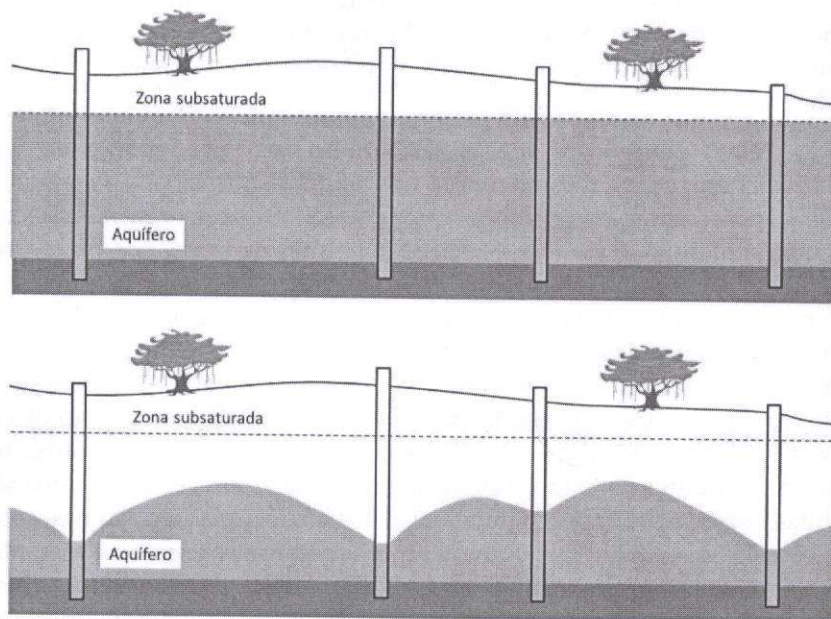


Figura 6.5. Rebaixamento previsível numa situação de sobre-exploração em zona de rega. Figura superior: situação natural. Figura inferior: situação de sobre-exploração.

Em rochas fraturadas, esse abatimento não é comum, mas as fraturas ficam vazias, o que pode levar, até certo ponto, ao que se designa por recarga induzida, ou seja, a um aumento da capacidade de recarga em períodos pluviosos, caso a permeabilidade do solo o permita. As zonas aquíferas desprovidas de água conseguirão armazenar mais água nesses anos do que em condições naturais, por haver maior espaço útil de armazenamento disponível.

5. Gestão da quantidade da água subterrânea em aquíferos e captações

A identificação da quantidade de água subterrânea disponível para qualquer uso numa captação é efetuada através de ensaios de caudal. Estes ensaios realizam-se após execução da perfuração e respetiva instalação do seu revestimento, com recurso à introdução de uma bomba, submersível no caso dos furos, ou externa, no caso de poços.

Considerando como exemplo as captações mais usuais na atualidade, os furos (captações executadas por meios mecânicos em que a profundidade é muito maior que o diâmetro), um ensaio de caudal

inicia-se pela extração da água subterrânea com uma bomba submersível, medindo-se os rebaixamentos dentro da captação em função do tempo decorrido desde o início do bombeamento. No caso de existirem furos próximos, estes podem ser usados como piezômetros de observação, permitindo a obtenção de dados mais rigorosos através das medições dos rebaixamentos no nível da água subterrânea nos mesmos. Destes ensaios de caudal resulta não só o desenho dos cones de rebaixamento que levam à identificação dos parâmetros hidráulicos do aquífero, K, T e S, tal como se mostrou no ponto 3, mas também a definição dos caudais de exploração, através de um equilíbrio sustentável entre os valores de extração e os rebaixamentos produzidos. Esta informação deverá ser conjugada regionalmente com os valores de infiltração, não devendo as extrações ultrapassar, por razões ecológicas, os 80 a 90% dos valores de recarga anual do aquífero. Se isso suceder, o aquífero pode entrar em sobre-exploração, os níveis de água subterrânea deixam de ter a capacidade para recuperar os níveis anuais médios e, ao longo dos anos, dá-se a um abatimento do nível freático, o que, como foi explicado no ponto 4, pode também levar, no caso de aquíferos porosos, a situações de subsidência.

Para evitar a situação de sobre-exploração, há necessidade de haver um controlo dos níveis piezométricos nos aquíferos, o que se faz através de uma rede de vigilância ativa, permitindo atempadamente perceber os riscos de exploração excessiva e tomar medidas para evitá-los.

6. Qualidade da água subterrânea para rega

O uso de água para rega tem sido desde há muito tempo uma forma de aumentar a produção agrícola. Em particular nos países de clima mediterrânico, o uso de água subterrânea na agricultura apresenta especificidades a nível da afetação dos solos que têm a ver com a deposição de sais à sua superfície, o que pode levar a uma perda de qualidade dos mesmos.

O regime pluviométrico em Portugal, com chuvas abundantes no inverno e quase ausência de precipitação no verão, quando há mais necessidade de água por parte das plantas, leva a que, para um normal desenvolvimento das culturas agrícolas, tenha de se recorrer à rega nos meses menos pluviosos, que são também os que apresentam as temperaturas mais elevadas ao longo do ano. Esta situação leva a que muita da água de rega se evapore. Como as águas subterrâneas apresentam algum grau de mineralização, proveniente da dissolução de minerais das rochas que atravessam e de eventuais episódios de poluição associados, a sua exposição à superfície do solo leva, por evaporação, à

deposição dos sais na sua superfície. O processo ocorre porque a água evapora no estado quase puro, deixando sobre o solo, ou na proximidade da superfície, todo o excesso de sais que possui. Daqui pode resultar uma diminuição das capacidades produtivas do solo, por mineralização da sua camada superior.

A Figura 6.6A mostra um dos fenómenos que podem ocorrer à superfície do solo quando água subterrânea com conteúdo muito reduzido em oxigénio dissolvido é exposta à presença de oxigénio. A oxigenação da água leva à deposição do cálcio sob a forma de carbonato de cálcio (CaCO_3).

Na Figura 6.6B observa-se o fenómeno da calcificação sob o solo, normalmente na zona de interface variável do nível freático (nível mais profundo em alturas menos pluviosas e mais superficial em alturas de pluviometria mais acentuada), onde o efeito da evapotranspiração se faz sentir (geralmente até cerca de 2 m de profundidade). A entrada de oxigénio na água, associada a fenómenos de evaporação, leva à deposição de níveis de CaCO_3 no subsolo, criando um nível claro sob o solo, designado por nível de calcretos. Este fenómeno prejudica a qualidade do solo e a sua produtividade e é particularmente visível nas zonas mais elevadas, por exposição provocada por erosão, acelerada pelos processos agrícolas de movimentação do solo.

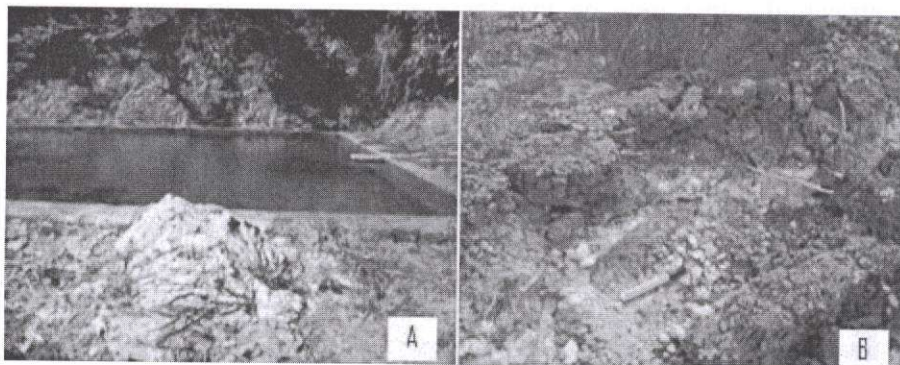


Figura 6.6. Deposição de carbonato de cálcio numa nascente (A) e sob o solo (calcretos, B) na zona dos Gabros de Beja (fotos: Jorge Duque).

A salinidade da água e do solo são problemas cada vez mais presentes, principalmente em países com clima árido e semiárido. Para além da salinização dos solos, também as culturas mais sensíveis são muito afetadas por este fenómeno. A acumulação de alguns tipos de iões no interior das plantas pode levar a situações extremas de toxicidade, que levará, no extremo, à morte das mesmas. Os iões que podem causar mais problemas de toxicidade são o anião Cl^- e os catiões Na^+ e B^{3+} , embora

outros iões possam também causar problemas, como os SO_4^{2-} e HCO_3^- ou os metais pesados (Carmona Rodrigues 1999, Trautmann 2009).

A classificação das águas subterrâneas para rega é geralmente feita através da análise de um diagrama criado pelo United States Salinity Laboratory Staff (Richards *et al.* 1954). Nesse diagrama, foi criado um coeficiente que relaciona a abundância de sódio em função do cálcio e magnésio:

$$TAS = \frac{Na}{\sqrt{Ca + Mg}} \quad (6.1)$$

com os valores de Na , Ca e Mg expressos em meq/l, cujo resultado é contraposto ao dos valores de condutividade elétrica (CE) da mesma amostra de água (Figura 6.7). Daqui resulta uma série de classes cruzadas que, quanto maior o risco para os solos, obrigará a maiores cuidados nos procedimentos de rega. Por exemplo, classes altas de salinidade podem ser combatidas através de uma rega com excesso de água, para, ao mesmo tempo, ajudar a lixiviar os solos.

Risco de Alcalinização:

- S₁ - Risco baixo de alcalinização
- S₂ - Risco médio de alcalinização
- S₃ - Risco alto de alcalinização
- S₄ - Risco muito alto de alcalinização

Risco de Salinização:

- C₁ - Risco baixo de salinização
- C₂ - Risco médio de salinização
- C₃ - Risco alto de salinização
- C₄ - Risco muito alto de salinização

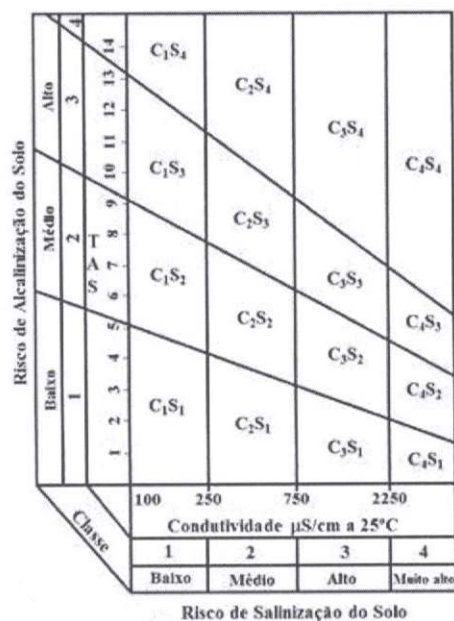


Figura 6.7. Diagrama de qualidade da água para uso agrícola (Richard *et al.* 1954), que mostra o risco que representa para os solos a utilização de água subterrânea.

Este diagrama, apesar da sua importância para comparar águas e para identificar os problemas que o seu uso pode acarretar quando

aplicadas a um solo, não deverá no entanto ser o único critério para tomar a decisão de as usar ou não. Há muitas outras variáveis que devem entrar nesta equação, como o tipo e porosidade dos solos, o tipo de culturas agrícolas a regar ou a quantidade de água a utilizar e tipo de rega.

7. Contaminação de águas subterrâneas por atividades agrícolas

De todas as atividades do Homem, a que mais influencia a qualidade geral das águas subterrâneas é a agricultura, pela sua expressão em termos de ocupação do solo. Não se trata da atividade mais perigosa em termos de contaminação das águas subterrâneas, mas sim a mais extensiva do ponto de vista territorial. Entre as atividades principais que podem causar degradação da qualidade dos recursos hídricos subterrâneos estão o uso de fertilizantes e pesticidas e o armazenamento ou espalhamento de resíduos de animais ou plantas sobre o terreno. Os efeitos mais extensivos correspondem à aplicação de fertilizantes inorgânicos ou orgânicos. Quando, às atividades agrícolas, se juntam as atividades pecuárias, a situação pode ser ainda mais intensa, dependendo da concentração de cabeças de gado no território.

Os três nutrientes principais requeridos pelas culturas agrícolas são o azoto (N), o fósforo (P) e o potássio (K), e os fertilizantes são categorizados em função desses conteúdos. As taxas anuais de aplicação de fertilizantes variam muito de região para região e de cultura para cultura, e, porque os fertilizantes são usados ano após ano, será de esperar que em muitas áreas, parte dos N, P ou K sejam arrastados através da zona não saturada, acabando por atingir as águas subterrâneas, por infiltração, e migrem ao longo dos aquíferos, de acordo com o seu regime de fluxo (Freeze e Cherry 1979).

Com uma mobilidade muito elevada, o N, na forma de NO_3^- , é o contaminante mais comum na água subterrânea em zonas agrícolas. Isto sucede porque a mobilidade do NO_3^- nos sistemas de fluxo subterrâneo é muito superior à das espécies dissolvidas de fósforo e porque fenómenos de troca catiónica levam a uma mobilidade muito reduzida do K^+ na maior parte dos materiais geológicos (Freeze e Cherry 1979).

Quanto aos pesticidas, o desenvolvimento de produtos cada vez mais degradáveis leva a que, atualmente, as consequências para as águas subterrâneas não pareçam muito significativas. As análises para deteção de pesticidas na região do Alentejo não têm obtido resultados positivos, o que pode ser explicado por três motivos: o grau de degradação dos pesticidas é já muito eficaz, não se estão a procurar os componentes corretos (não é fácil saber os pesticidas que estão a ser usados numa

determinada área em determinado tempo) ou deveriam ser pesquisados os produtos de degradação desses pesticidas e não os compostos originais, o que não sucede atualmente.

7.1 Comportamento hidroquímico do azoto (N)

O contaminante mais comum identificado na água subterrânea é o azoto dissolvido, na forma de nitrato (NO_3^-). Este contaminante provém de atividades agrícolas, de áreas de deposição ou passagem de resíduos orgânicos na superfície ou sob o solo e afeta as águas subterrâneas em praticamente todo o mundo. O nitrato existe em ambientes naturais nas águas subterrâneas, proveniente da decomposição de matéria orgânica, plantas ou animais existentes na natureza, mas raramente ultrapassa os 2-3 mg/l. Quando estes valores são ultrapassados, está-se geralmente na presença de contaminação. Apesar do NO_3^- ser a forma principal de ocorrência do azoto na água subterrânea, o azoto dissolvido ocorre igualmente sob a forma de amônio (NH_4^+), amônia (NH_3), nitrito (NO_2^-), azoto (N_2), óxido nitroso (N_2O) e azoto orgânico (Freeze e Cherry 1979). Na Figura 6.8 pode observar-se o ciclo do azoto, com as suas fontes, processos e percursos, até atingir o meio hídrico subterrâneo.

A presença de nitratos em excesso nas águas subterrâneas tem origem em fontes de nitrato à superfície do solo, na zona do solo, ou em zonas do subsolo onde tenham sido enterrados ou passem (caso das águas residuais em povoações) resíduos ricos em azoto. Nalgumas situações, o NO_3^- que entra nas águas subterrâneas tem origem como NO_3^- em resíduos ou fertilizantes aplicados sobre o solo. Estas origens são designadas como fontes diretas de nitratos. Noutros casos o NO_3^- origina-se a partir da conversão de azoto orgânico ou NH_4^+ , que ocorrem naturalmente ou são introduzidos na zona do solo por atividades humanas. O processo de conversão de azoto orgânico em NH_4^+ é conhecido por amonificação. Através do processo de nitrificação, o NH_4^+ é convertido em NO_3^- , por oxidação. Ambos os processos ocorrem normalmente na zona não saturada, entre o solo e o nível freático, principalmente em zonas ricas em matéria orgânica e oxigénio (Freeze e Cherry 1979).

Nas concentrações geralmente existentes nas águas subterrâneas o NO_3^- não se encontra limitado por constantes de solubilidade, o que, em conjunto com a sua forma iónica, o torna extremamente móvel em águas subterrâneas. Em água subterrânea extremamente oxidante, o NO_3^- é a forma estável do azoto dissolvido e move-se no meio hídrico subterrâneo sem transformação e com pouca ou nenhuma retardação, podendo, em aquíferos livres relativamente superficiais, migrar a distâncias

consideráveis do seu local de origem (Freeze e Cherry 1979). Este é o motivo por que este tipo de contaminação se designa por difusa, uma vez que as concentrações de nitrato encontradas num determinado local do aquífero podem provir de distâncias elevadas, sendo muito difícil atribuir a essa contaminação uma origem precisa quando se trata de zonas agrícolas.

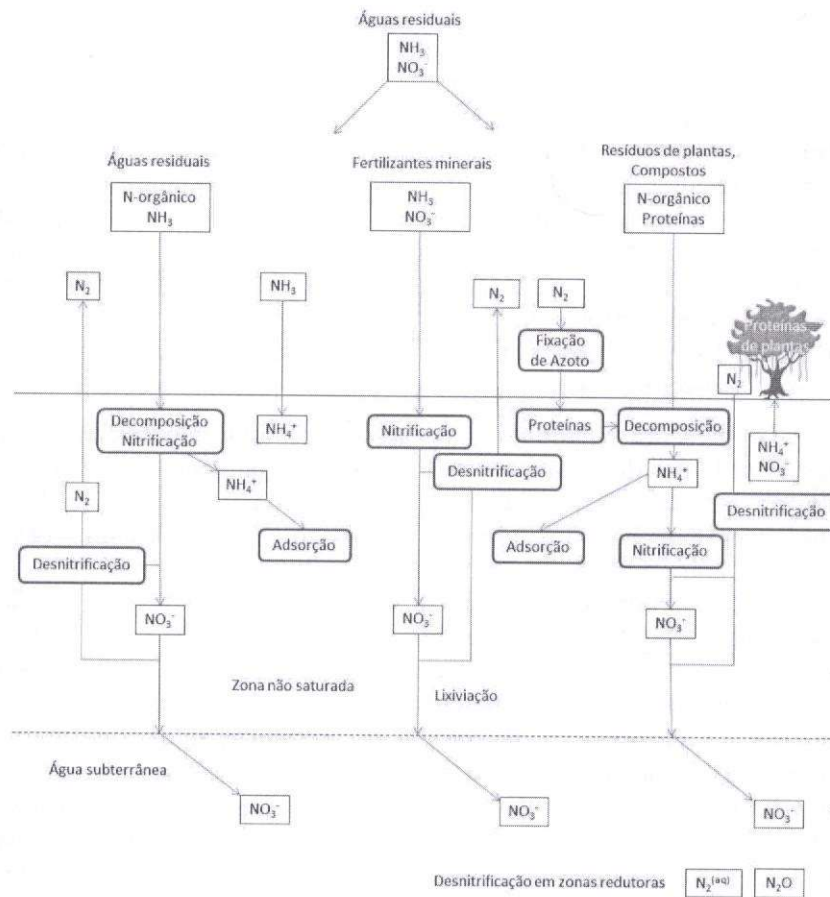


Figura 6.8. Fontes e percursos do azoto no ambiente subterrâneo (Freeze e Cherry 1979). Uma grande parte do contaminante NO₃⁻ provém de atividades agrícolas ou agropecuárias.

Em condições especiais pode ocorrer um processo de desnitrificação natural dentro das águas subterrâneas (Figura 6.8), como é o caso de um declínio do potencial redox no aquífero, um processo em

que o NO_3^- é reduzido a N_2O ou N_2 (Freeze e Cherry 1979), através por exemplo deste processo químico (Appelo e Postma 1996):



em que o CH_2O representa a matéria orgânica.

Os produtos destas reações, N_2O ou N_2 , existem como espécies dissolvidas na águas subterrâneas e, caso a água se mova para a zona subsaturada, através de capilaridade e transpiração, uma porção do N_2O ou N_2 pode perder-se para o ar do solo (Freeze e Cherry 1979).

A fim de acelerar este processo de desnitrificação tem sido estudada a possibilidade de realizar tratamentos de remediação em aquíferos com base na introdução, em certas condições, de matéria orgânica nos mesmos, nomeadamente de açúcar, processo que no entanto é difícil, quer pela dispersão deste tipo de poluição, quer pelos custos que teria este tipo de tratamento. Alguns produtos considerados contaminantes em processos industriais, como os resultantes do processamento de hidrocarbonetos, têm também sido considerados como possibilidade para uso em processos de desnitrificação, uma vez que têm na sua base cadeias de carbono.

Do ponto de vista da qualidade da água subterrânea, a desnitrificação é um processo desejável. O incremento de concentração das espécies dissolvidas N_2O e N_2 não são prejudiciais para a água de consumo, enquanto concentrações superiores a 50 mg/l de NO_3^- ultrapassam o limite permitido para consumo público, tornando-se a água inadequada para consumo de gado a concentrações superiores a 450 mg/l.

8. Conclusões

A utilização de água subterrânea em agricultura tem a grande vantagem de, em função das características hidrogeológicas locais:

Poder garantir o abastecimento em água a partir de uma origem local;

Em caso de necessidade urgente, poder garantir esse abastecimento num período relativamente curto, pois a obra hidráulica de captação de água subterrânea é de curta duração;

Poder garantir o abastecimento a um custo relativamente baixo, quando comparado com captações de origem superficial;

Mas apresenta, por outro lado, algumas desvantagens:

A relativa pouca produtividade de algumas formações geológicas;

A possibilidade de sobre-exploração do aquífero, caso a exploração de água ultrapasse em 80 a 90% a capacidade de recarga anual do aquífero, valores limite que se considera permitirem a continuidade das funções ecológicas das águas subterrâneas;

A possibilidade de contaminação do aquífero através das águas de rega em excesso, que retornam ao aquífero; embora aqui não haja distinção entre a rega por águas subterrâneas ou superficiais, como as superficiais apresentam quase sempre valores de nitratos relativamente baixos, a recirculação para o aquífero das águas de rega em excesso quando estas têm origem em águas subterrâneas é geralmente mais prejudicial do que a recirculação a partir de águas superficiais;

As águas subterrâneas, como um recurso abundante (mais de 97% das águas doces do globo), são usadas para fins agrícolas em todas as zonas do mundo onde a agricultura é possível, mas a sua importância relativa é muito maior em zonas áridas e semiáridas, onde a escassez de água superficial ou a irregularidade da sua distribuição temporal, como é o caso das áreas de clima mediterrânico, faz com que o recurso subterrâneo se torne essencial para uma agricultura sustentável.

9. Exercícios

1. Com base no diagrama de Figura 6.7 (tire cópia), identifique o risco de salinização e de alcalinização para os solos, em caso de rega, com águas subterrâneas com as seguintes características:

	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1500	200	800	15000
Na (mg/l)	120	23	143	1800
Ca (mg/l)	80	13	250	2400
Mg (mg/l)	30	4	66	600

10. Referências bibliográficas

- Almeida C., Mendonça J., Jesus M.R., Gomes A. 2000. *Sistemas Aquíferos de Portugal Continental*. Instituto da Água/Centro de Geologia da Universidade de Lisboa, 3 Volumes, 671 p.
- Appelo, C.A.J., Postma, D. 1996. *Geochemistry, Groundwater and Pollution*. A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 536 p.

- Carmona Rodrigues A. (1999). A Qualidade da Água na Rega. *A Agricultura Portuguesa, a Água e o Ambiente*, 1º Seminário do IHERA e da APRH, com o patrocínio da CNPID, Fomento Gráfico, 75-108.
- Custodio E., Llamas R. (1983). Hidrología Subterránea. Ediciones Omega, S.A., Barcelona, Espanha, Vol. 1 e 2, 2350 p.
- ERHSA, 2001. Projecto Estudo dos Recursos Hídricos Subterrâneos do Alentejo. CCDR Alentejo.
- Freeze R.A., Cherry J.A. (1979). *Groundwater*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., EUA, 604 p.
- Trautmann R.R. 2009. Disponibilidade de Boro para a Cultura de Soja em resposta a doses e fontes do Nutriente e potenciais de Água no Solo. Dissertação de Mestrado em Agronomia, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Brasil, 81 p.
- Richards, L., Allison, L., Bernstein, L., Bower, C., Brown, J., Fireman, M., Hatcher, J., Hayward, H., Pearson, G., Reeve, R. & Wilcox, L. (1954) - *Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils*. Unit. Stat. Salinity Lab. Staff, L. Richards Ed., 160 p.