

Curso de **TRANSFERÊNCIA DE CONHECIMENTO** sobre águas subterrâneas

ÁGUAS SUBTERRÂNEAS CONCEITOS BÁSICOS

REALIZAÇÃO



Financiamento



PROJETO DE POLÍTICAS PÚBLICAS

EXECUÇÃO

Amélia João Fernandes (IPA-SIMA, coordenação)
Andrea Segura Franzini (CPRM)
Beatriz Helena Martins (Bolsista Fapesp)
Gabriel Lima Barbosa (Bolsista Fapesp)
José Luiz Albuquerque (IPT)
Marta Deucher (IPA-SIMA)
Roberto Kirchheim (CPRM)
Veridiana Martins (IGc-USP)

EQUIPE PARCEIRA

Ana Carolina Dias de Moraes (Prefeitura de Porto Feliz)
André Cordeiro (UFSCAR)
Jodhi Jefferson Allonso (DAEE)
Natália Zanetti (FABH-SMT)
Rosângela Aparecida César (CETESB)

**DEZEMBRO
2021**

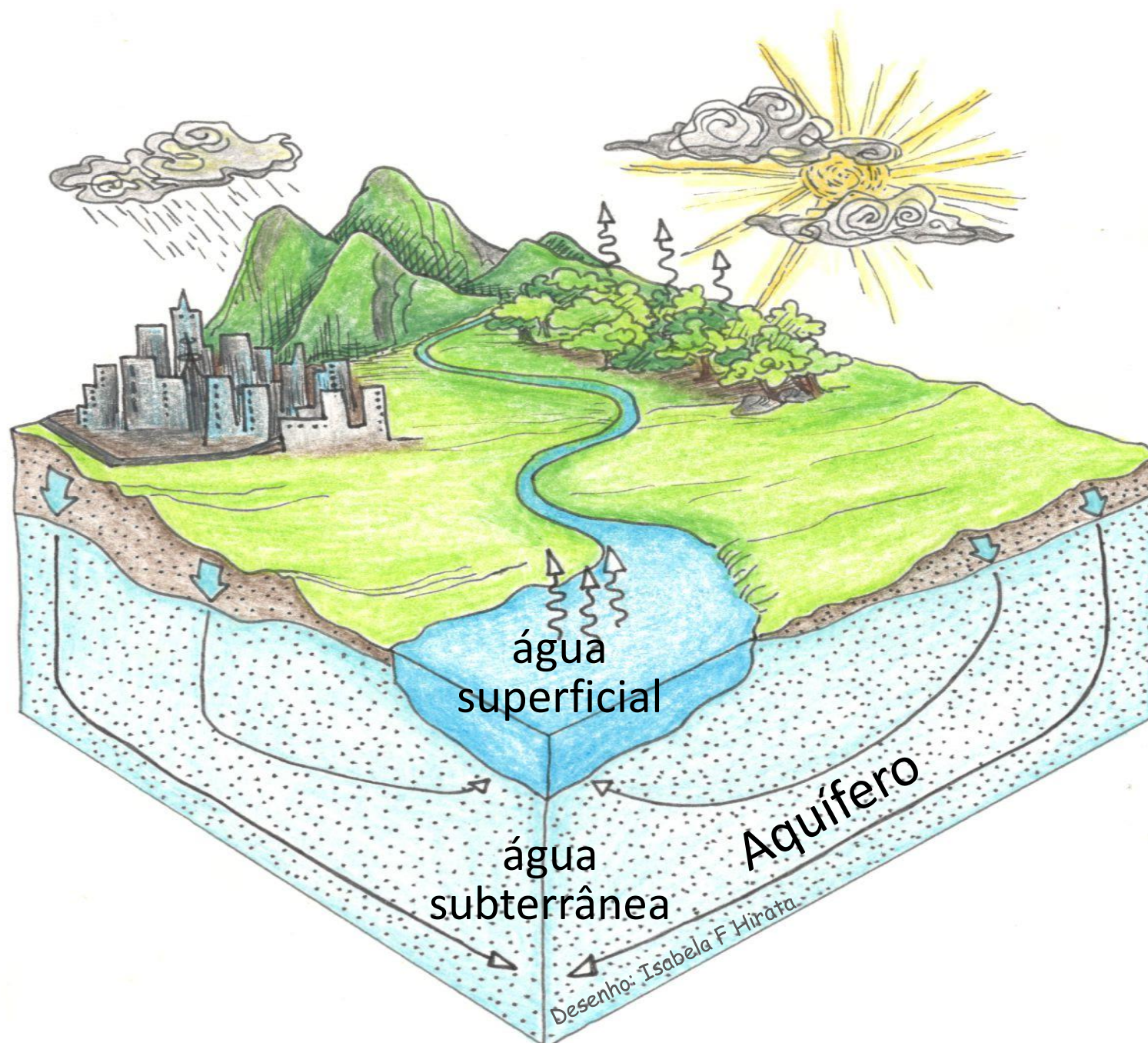


Figura 1. A água subterrânea é armazenada em aquíferos, que são grandes reservatórios situados no subsolo. A água subterrânea está em constante fluxo, de áreas mais elevadas para mais baixas. Nas regiões com chuvas mais abundantes (ex.: clima tropical) alimentam os cursos de água superficial (ex, rios) e constituem o seu fluxo de base.

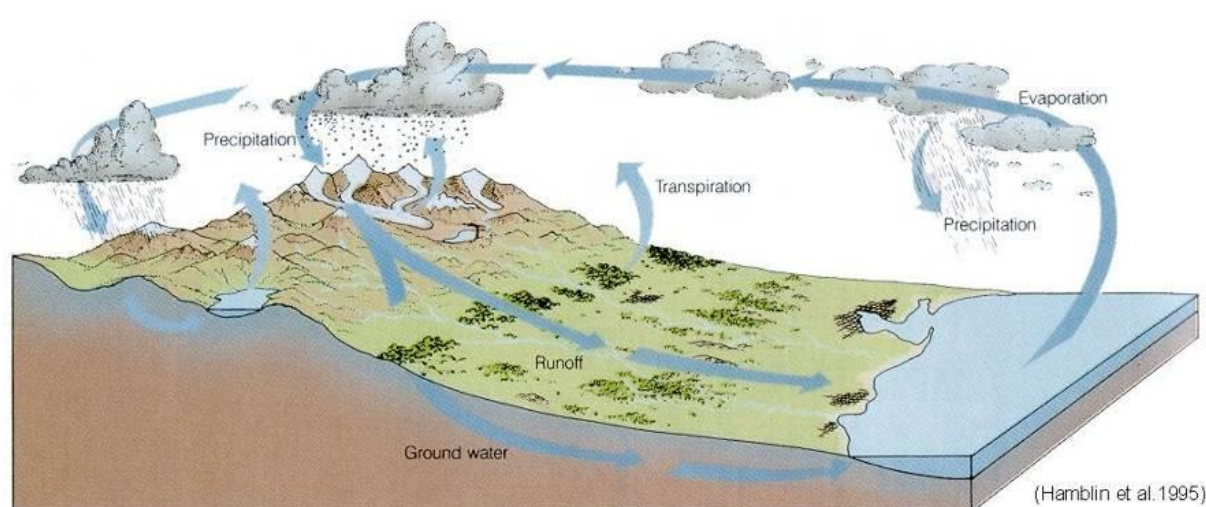


Figura 2a. A água no planeta está em constante movimento, passando de um reservatório para outro, na forma de água, vapor e até mesmo gelo. O seu movimento segue um ciclo: a água do mar evapora e sobe na atmosfera, a seguir são formadas nuvens que se deslocam para o continente. Das nuvens vem a chuva que cai sobre o continente e sobre o mar. A chuva quando cai sobre o solo e vegetação pode escoar pela superfície, alimentando diretamente os rios e lagos. Mas uma parte da chuva infiltra no solo e recarrega os aquíferos. A água dos aquíferos flui, no subsolo, e chega aos rios e lagos. A água dos rios chega ao oceano e tudo começa de novo.

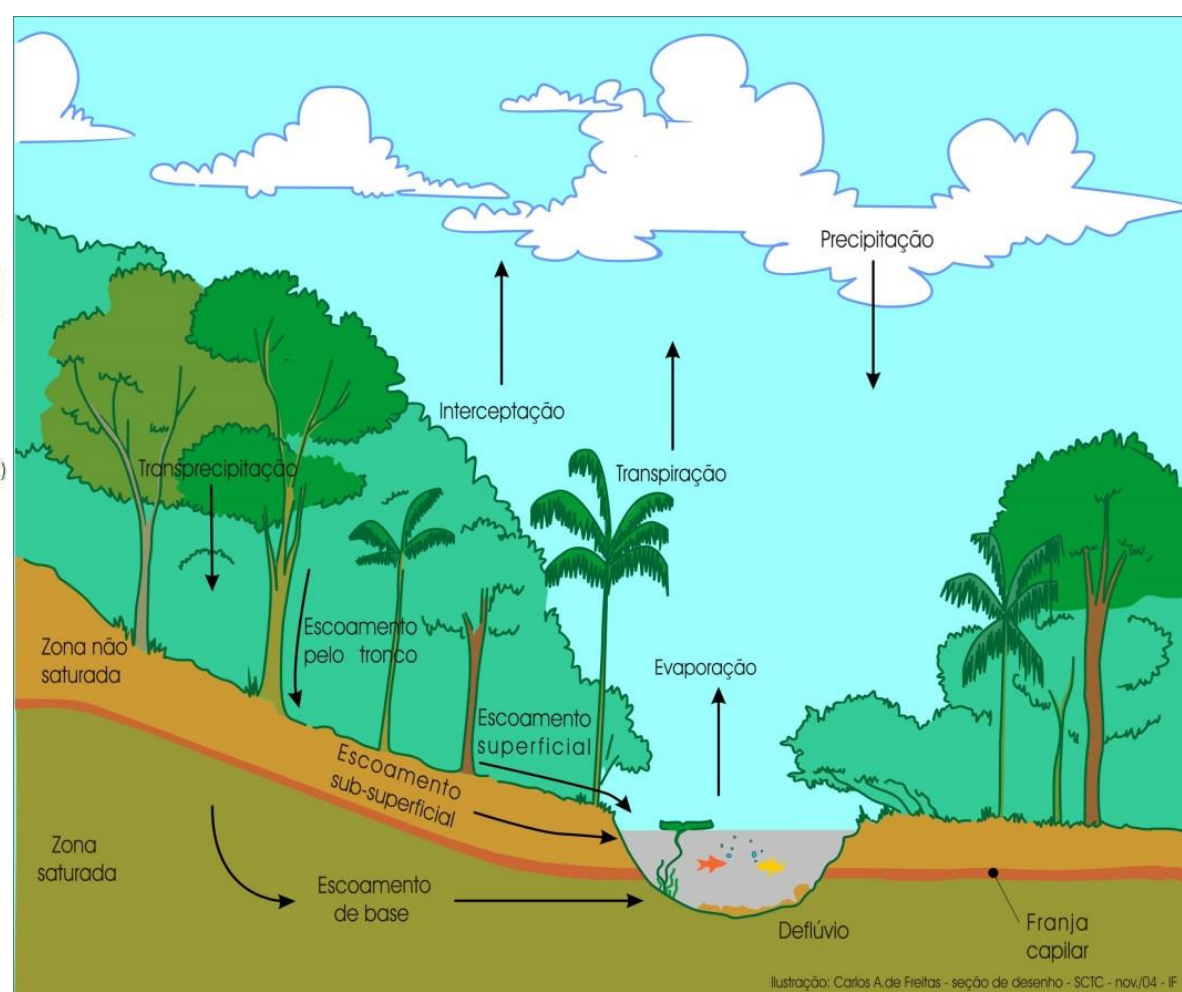


Figura 2b. No continente, a água percorre vários caminhos e isso envolve os processos de evaporação, evapotranspiração da vegetação, escoamento superficial e subsuperficial, além de fluxo no aquífero (zona saturada).

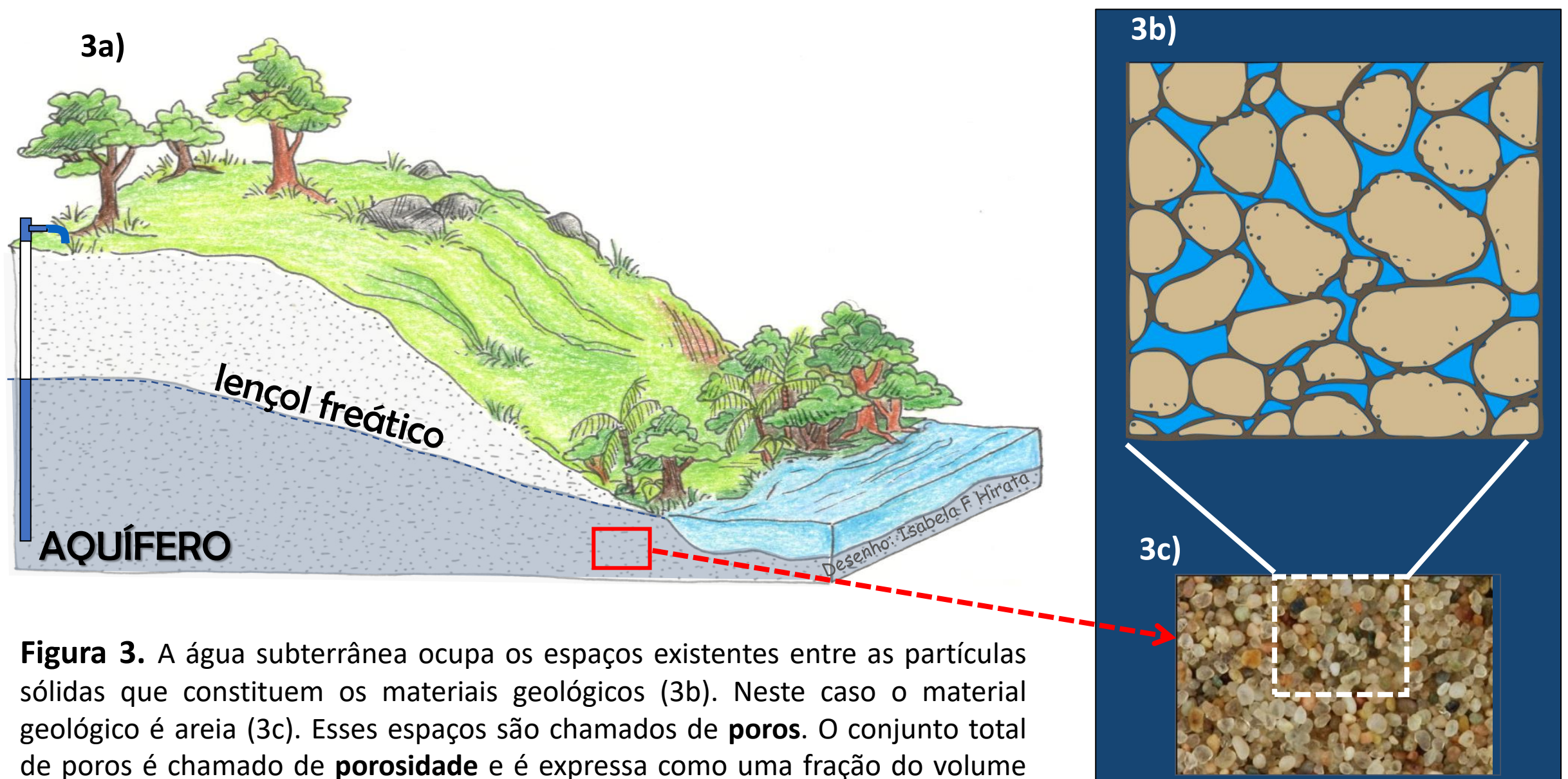


Figura 3. A água subterrânea ocupa os espaços existentes entre as partículas sólidas que constituem os materiais geológicos (3b). Neste caso o material geológico é areia (3c). Esses espaços são chamados de **poros**. O conjunto total de poros é chamado de **porosidade** e é expressa como uma fração do volume total (volume de poros/volume total) (Tabela 1). O **lençol freático** (3a) é a superfície que constitui o limite superior do aquífero livre.

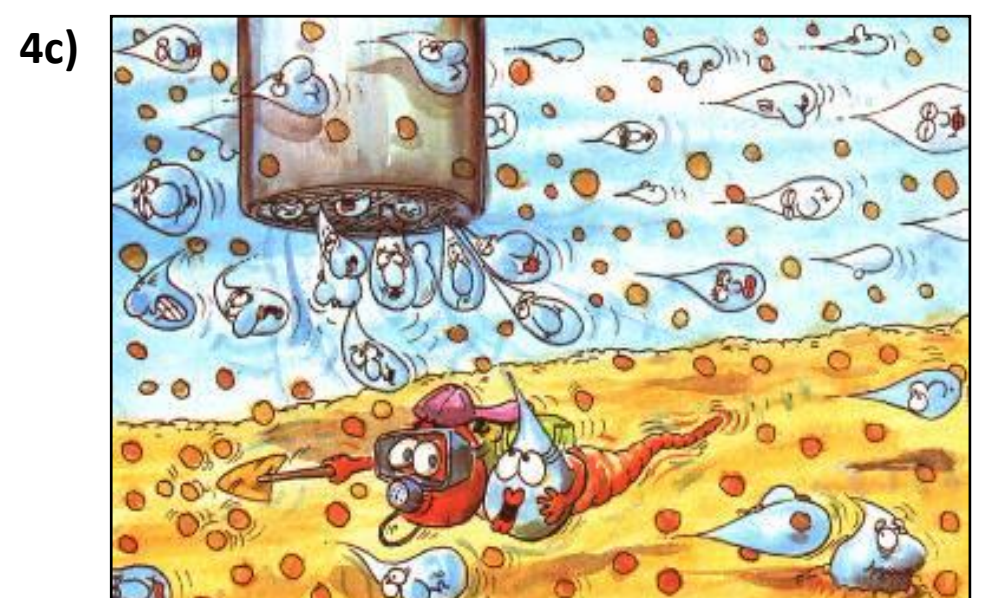
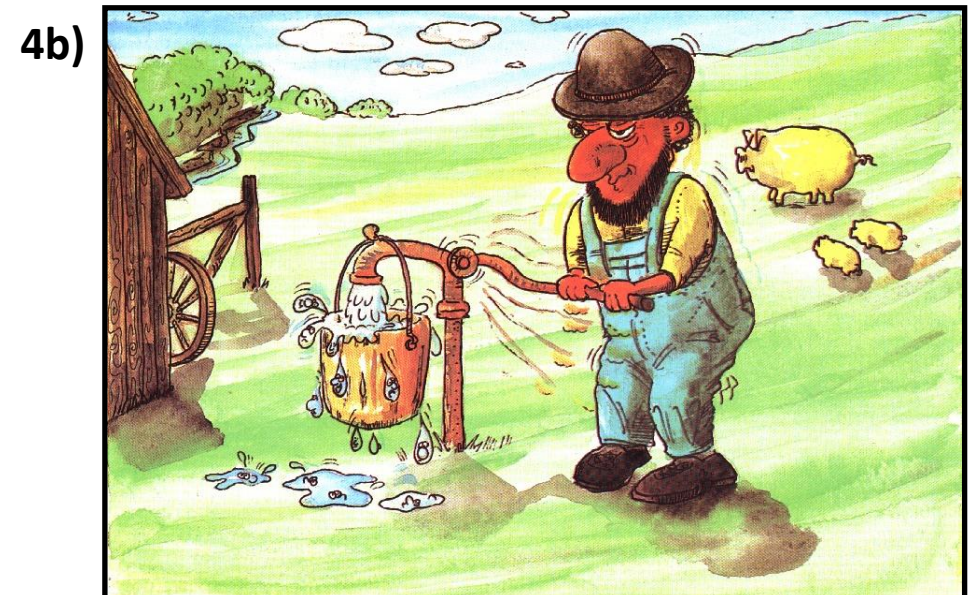


Figura 4. Aquíferos são formações geológicas capazes de armazenar e transmitir água através de seus poros (ver figuras 3, 10, 11) em quantidades que possam ser aproveitadas como fonte de abastecimento para diferentes usos. Portanto os poços perfurados em aquíferos, ao contrário dos aquitardes e aquicludes, são capazes de fornecer água em quantidade significativa (4a). No cartum ao lado (parte 4c), vemos as gotas de água serem puxadas para o poço; isto acontece quando o poço está sendo bombeado (4b). A representação em 4c, as partículas sólidas parecem boiar na água, mas na verdade essas partículas encostam umas nas outras.

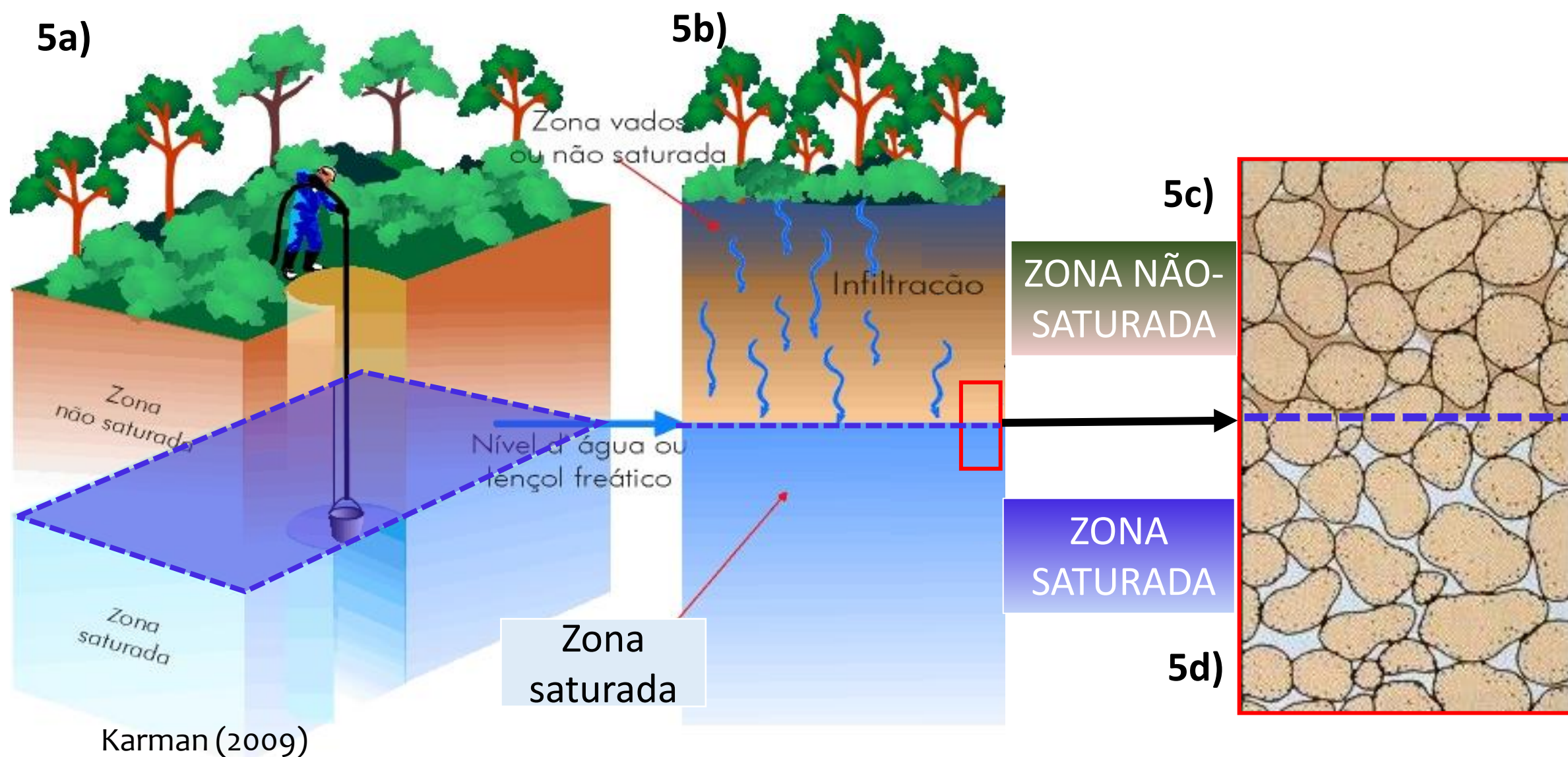


Figura 5. Um poço encontra água assim que atravessa o lençol freático (5a), que é o limite superior do aquífero. Acima do lençol freático está a zona não-saturada (5b), ou seja, a parte em que os poros dos materiais do subsolo estão preenchidos por ar e por água (5c). Abaixo do lençol freático, está a zona saturada (5b), ou seja, a parte em que todos os poros, dos materiais do subsolo, estão preenchidos por água (5d). A água da chuva, ao sofrer infiltração no solo, percorre toda a zona não-saturada antes de chegar no lençol freático. Quando isso acontece, diz-se que o aquífero sofreu recarga.

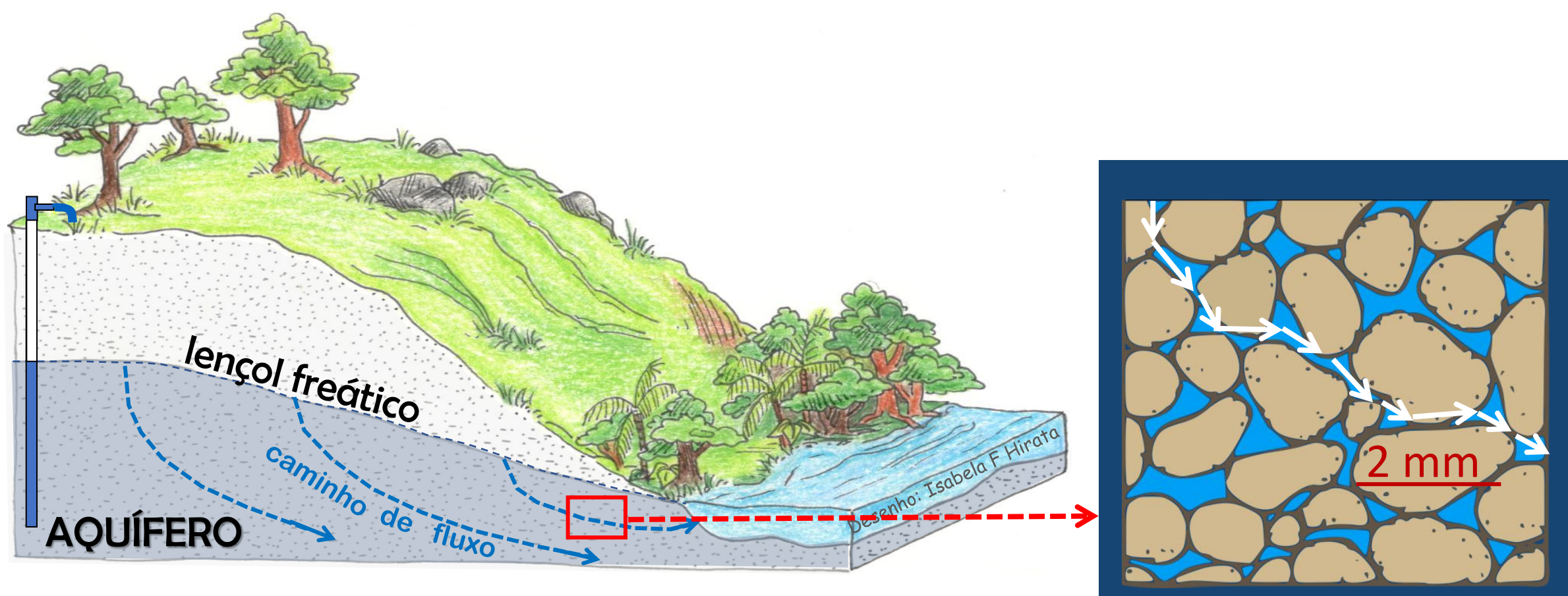


Figura 6. A água subterrânea em aquíferos está em constante fluxo de áreas mais altas para as mais baixas. Esse fluxo acontece por causa da gravidade e é possível devido ao fato de existirem poros conectados nos materiais que constituem os aquíferos. A água subterrânea flui ao longo de caminhos de fluxo que podem ser desde curtos até muito longos. Esses caminhos ligam áreas de recarga a locais de descarga. Os locais de descarga, para o aquífero livre, são os corpos de água superficial, como mostrado na figura à esquerda. A figura à direita mostra um detalhe muito ampliado de um caminho de fluxo. A água superficial dos rios flui rapidamente, mas a velocidade da água subterrânea é muito menor, e valores de mm a cm/dia são comuns. É por esse motivo que as oscilações de profundidade do lençol freático, mesmo passando por períodos de seca, são relativamente pequenas.



Figura 7. A profundidade do lençol freático oscila ao longo do ano em vista da variação da quantidade de chuva. A linha tracejada representa a profundidade média do lençol; essa é a profundidade representada no poço. A linha 1 é a que acontece depois de haver muita infiltração da água da chuva no solo, durante a estação chuvosa, causando a **recarga**. Ao final dessa estação, o lençol freático estará mais raso. A linha 2 é a que acontece depois da estação seca; o lençol freático rebaixa porque na estação seca as chuvas são escassas e não há infiltração.

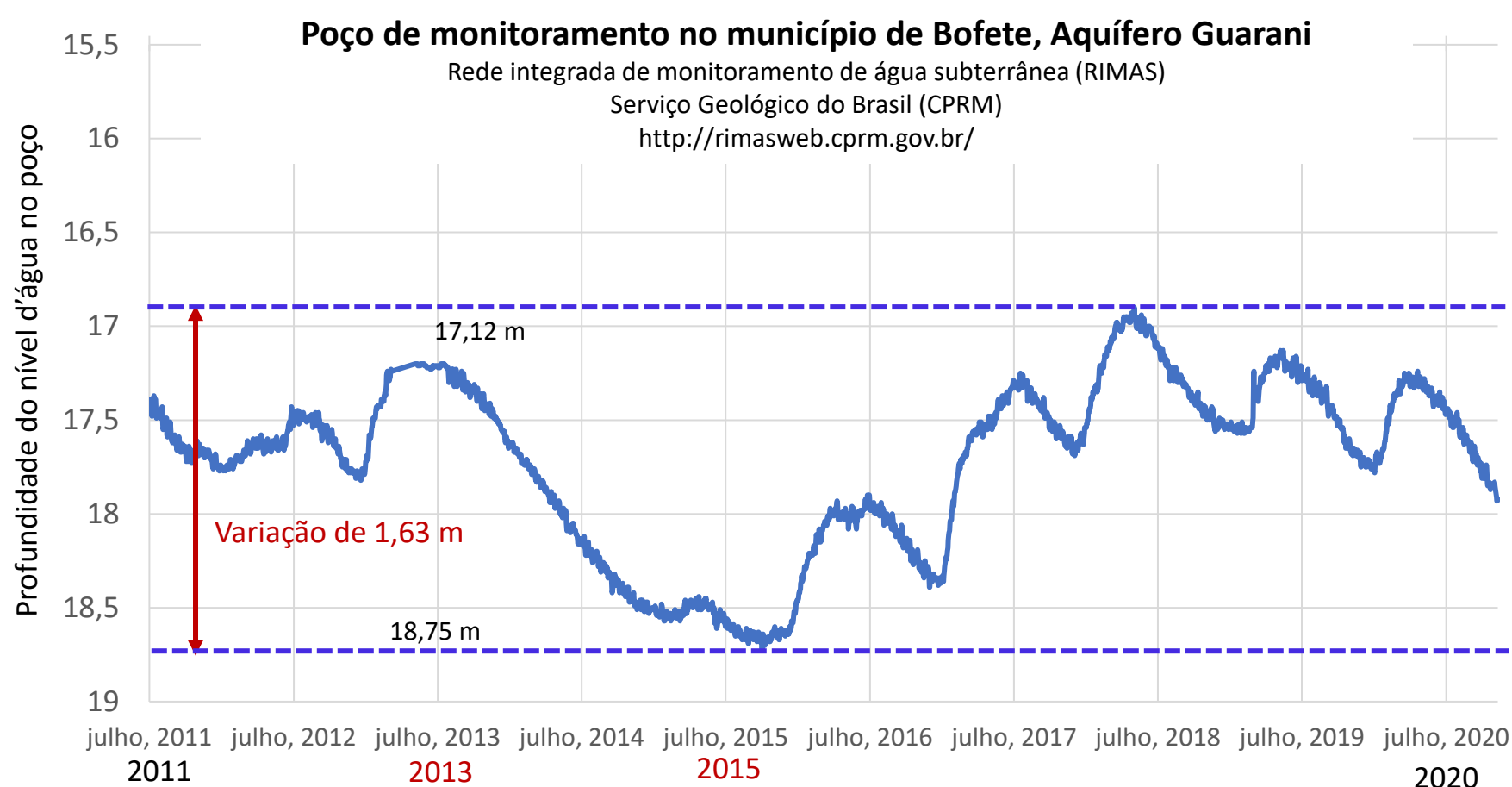


Figura 8. Para saber o valor dessas oscilações de profundidade é necessário fazer monitoramento, ou seja, medir a profundidade do nível d'água dentro de poços. É isso que o Serviço Geológico do Brasil faz através da RIMAS. O gráfico acima mostra a variação da profundidade do nível d'água (NA) no poço. Esse NA mostra a profundidade do lençol freático no local do poço. Notar que a variação do NA, em período de 10 anos, foi apenas 1,63m apesar de ter passado por um forte período de seca de 2013 a 2015.

Figura 9. Da mesma forma que no gráfico acima, este mostra a variação do NA no Poço de monitoramento no município de Bastos. Trata-se de poços da Rede integrada de monitoramento de água subterrânea (RIMAS), do Serviço Geológico do Brasil (CPRM) (<http://rimasweb.cprm.gov.br>)

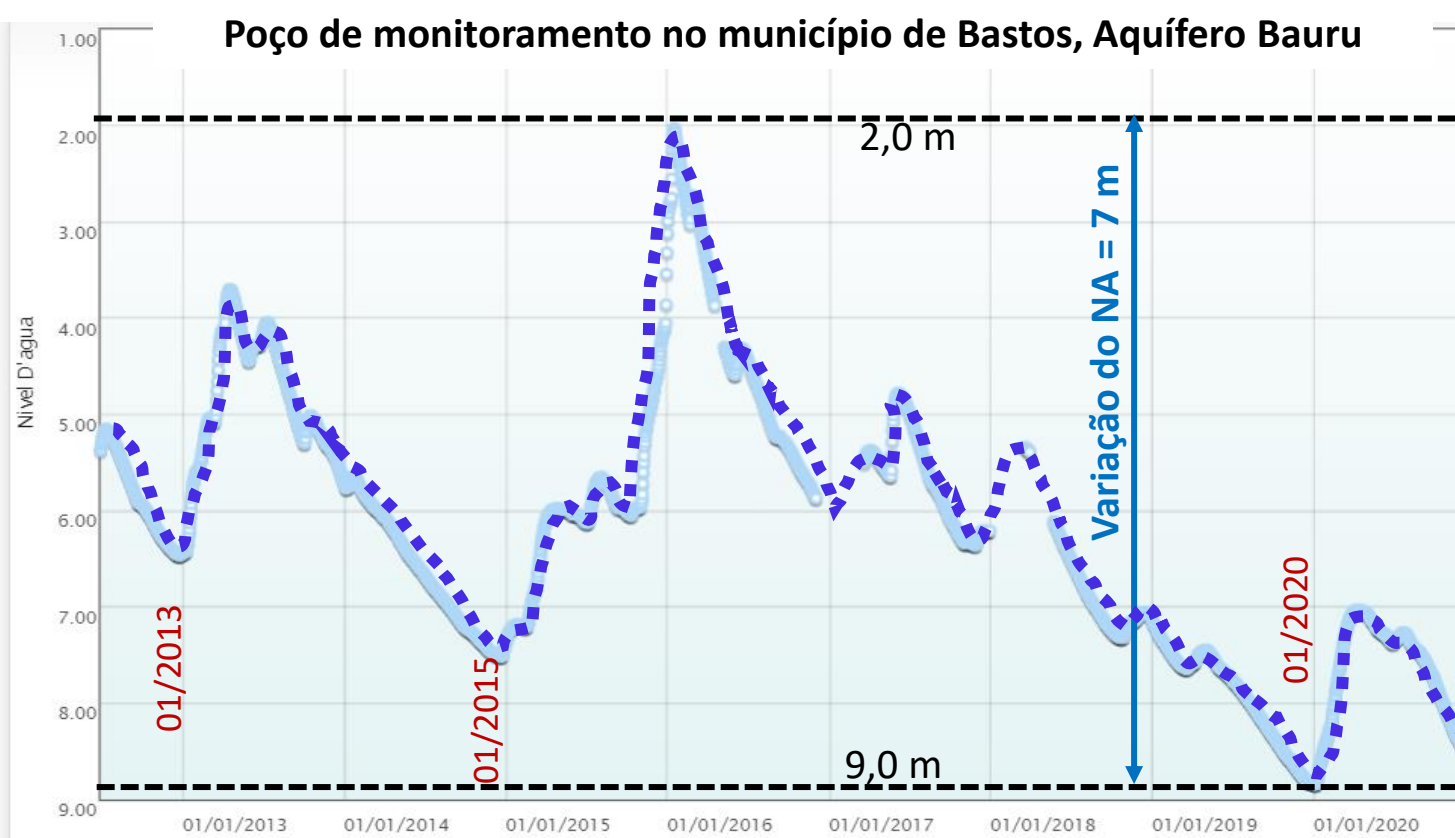


Figura 10.

- a) A areia da foto é formada por partículas cujo tamanho varia de 0,02 a 2,0 mm. Assim, existem desde areias finas até grossas. O espaços entre os grãos são chamados de poros e, no seu conjunto, são chamadas de porosidade. No caso da areia e de outros materiais sedimentares (ver nas figuras 12 e 13), a porosidade formada pelos espaços entre os grãos, sendo denominada de **porosidade intergranular**. Os poros da porosidade intergranular estão presentes em todo o material que forma o sedimento ou a rocha.
- b) Representação ampliada de uma porção da areia acima, mostrando os grãos e poros com mais detalhe. Neste caso, todos os poros estão preenchidos por água (azul).

Os aquíferos formados por sedimentos ou rochas sedimentares possuem porosidade intergranular e tem um comportamento mais homogêneo do que os aquíferos fraturados (ver abaixo). Assim, quando perfuramos poços em aquíferos de porosidade intergranular temos uma boa ideia da vazão que esse poço pode dar.

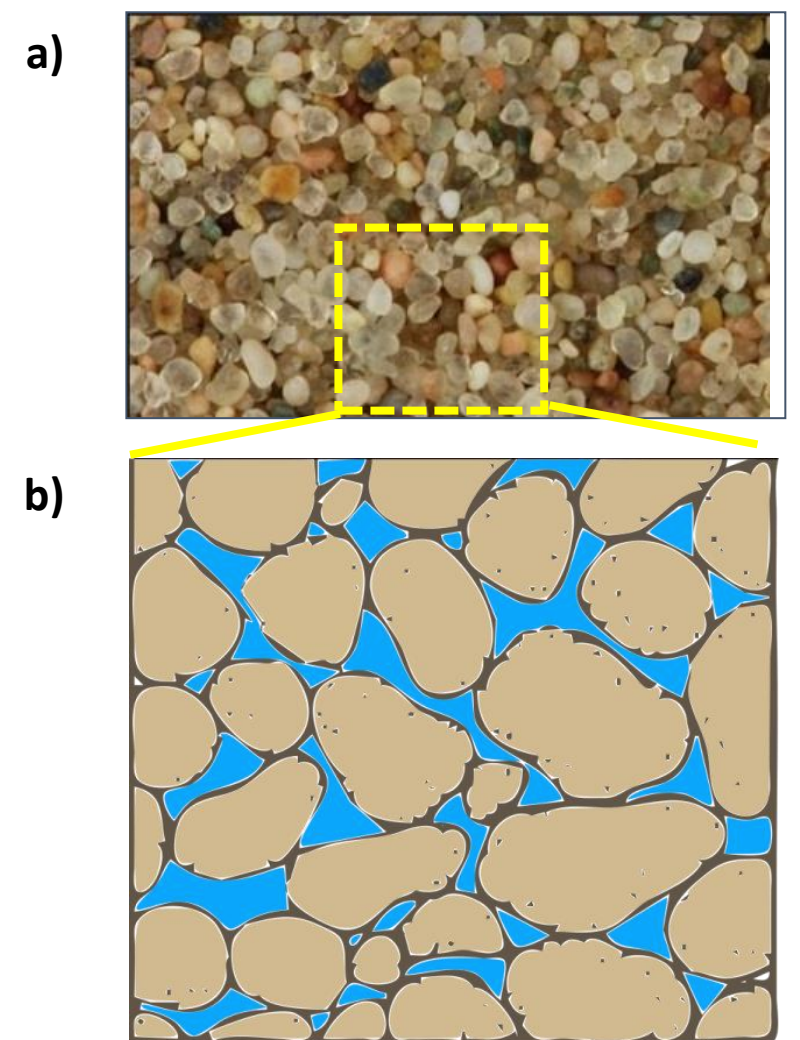
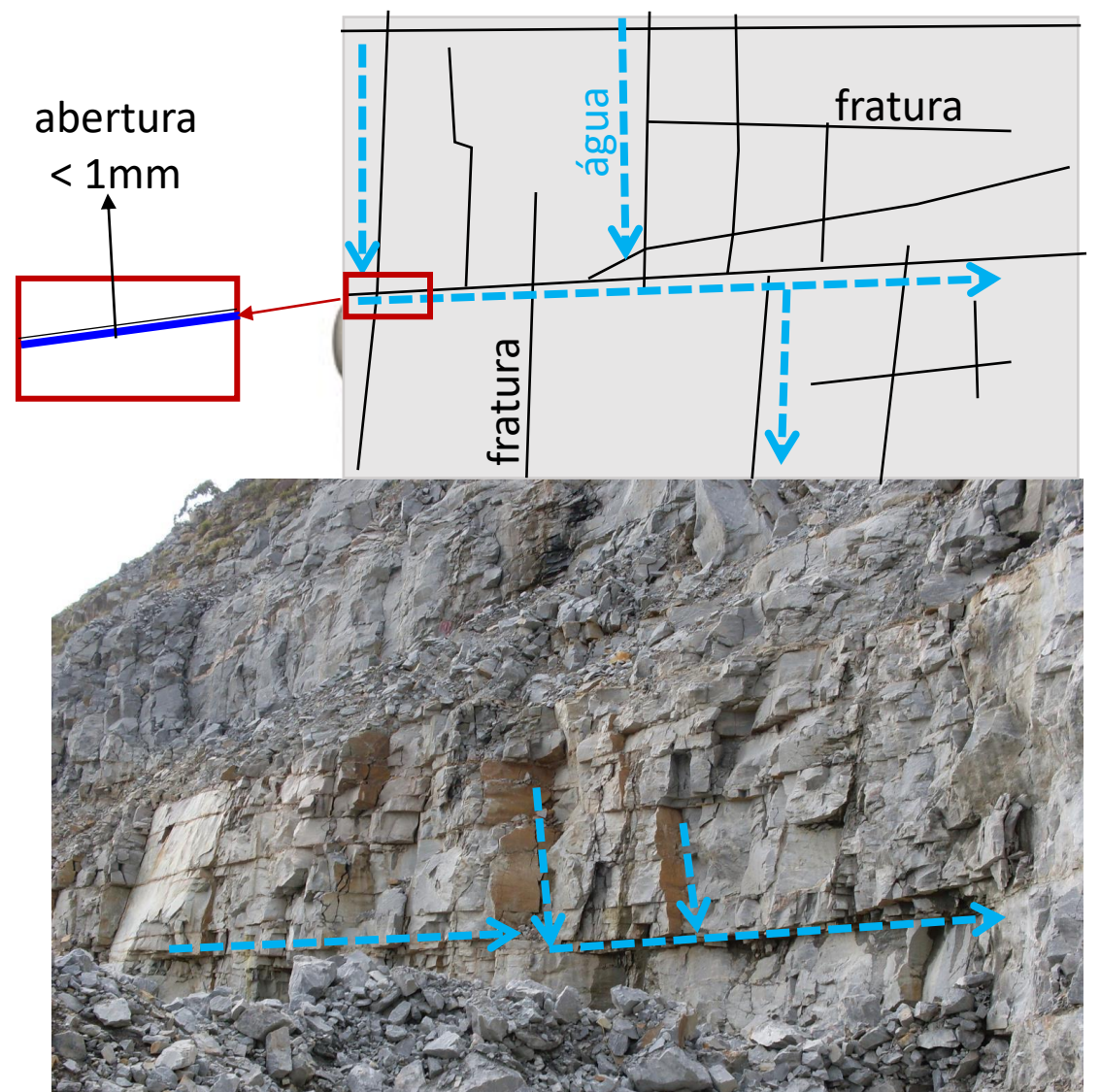
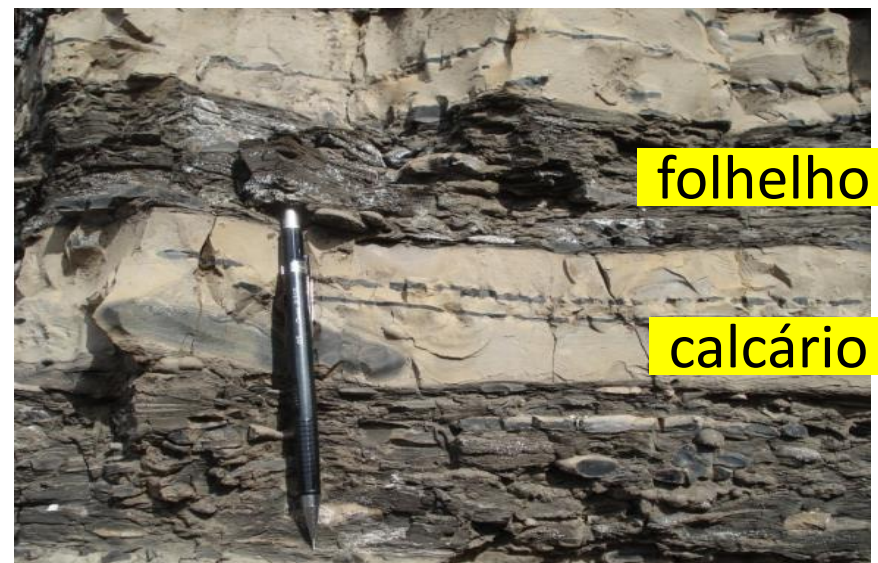
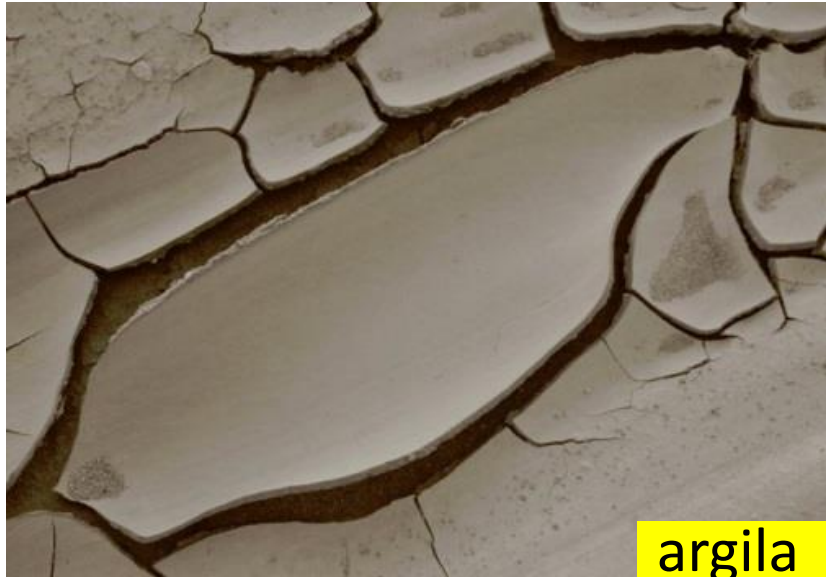


Figura 11. A foto mostra uma parede de granito em uma pedreira. Essa rocha é dura e muito compacta e não possui porosidade intergranular, pois os minerais que a formam estão todos muito juntos. Por isso, a **porosidade é dada por fraturas e os aquíferos são denominados de fraturados**. As fraturas, também chamadas de fissuras, são quebras na rocha que ocorrem na forma de planos e que na foto são vistas principalmente como linhas. Quando as fraturas tem alguma abertura, a água subterrânea ocupa esses espaços e está sempre em movimentação devido à ação da gravidade. Na foto as flechas tracejadas azuis representam esse fluxo ao longo de algumas fraturas. A distribuição dessas fraturas é muito heterogênea. Veja que na parte de baixo da foto a rocha está muito fraturada, mas na parte de cima não. A abertura das fraturas quase sempre é menor que 1 mm, mas uma pequena abertura já é suficiente para haver água e fluxo. No entanto, a maioria das fraturas são completamente fechadas e secas.



ROCHAS

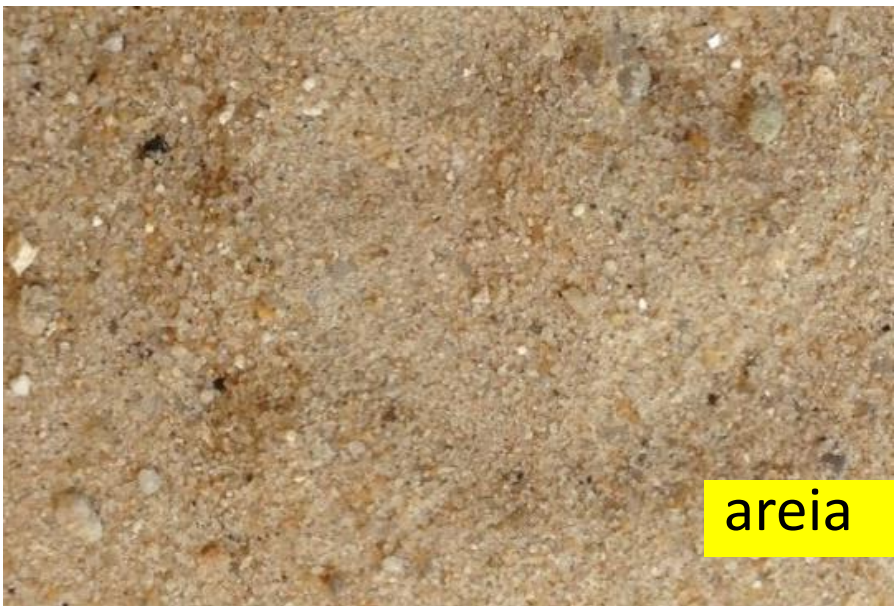
SEDIMENTOS



**MATERIAIS IMPERMEÁVEIS
AQUICLUDE PASSA DOIS**

Figura 12. A argila e o silte são sedimentos formados por partículas muito finas e quando esses materiais são muito compactados, a argila se transforma em uma rocha chamada argilito ou em folhelho, e o silte passa a ser siltito; essas são rochas sedimentares. Esses materiais possuem porosidade intergranular, mas os **poros também são muito pequenos e pouco conectados**, e isso faz com que a água se movimente extremamente devagar, ou seja a **permeabilidade é baixa**. A **argila e os argilitos** são materiais de **muito baixa permeabilidade**, pois a água neles contida praticamente não flui. Os **siltitos** são materiais de **baixa permeabilidade**. Assim, camadas de **argilitos e siltitos** constituem **aquicludes e aquitardes**, ou seja, são camadas **confinantes**. Poços perfurados nesses materiais não darão água, portanto **argilitos e siltitos não formam aquíferos**. Tais poços produzem água apenas quando houver fraturas permeáveis. Calcários, como da foto acima também possuem muito baixa permeabilidade e formam camadas confinantes. Na Bacia Sorocaba e Médio Tietê, o Aquiclude Passa Dois é formado por essas rochas: folhelhos, calcários, siltitos.

SEDIMENTOS



MATERIAIS PERMEÁVEIS
AQUIFERO GUARANI
AQUÍFERO TUBARÃO



ROCHAS

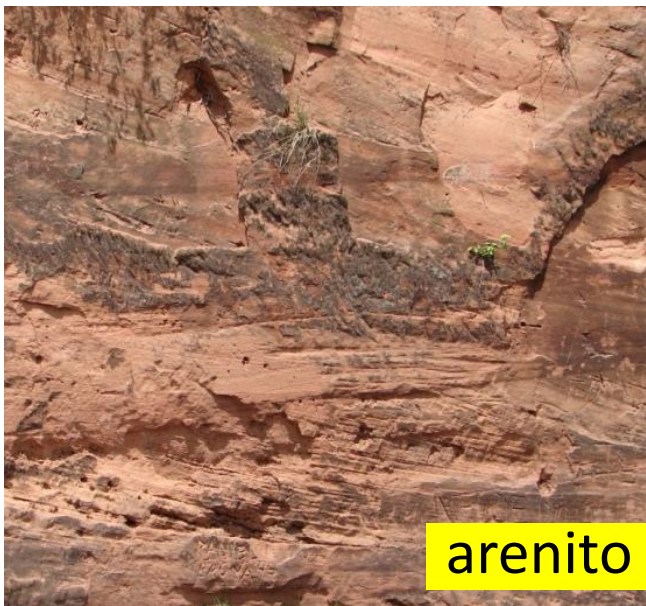


Figura 13. A areia e o cascalho são sedimentos formados por partículas finas até grossas e quando esses materiais se tornam rochas (ganham coesão) por processos que ocorrem em profundidades de alguns quilômetros, a areia se transforma em arenito e o cascalho em conglomerado; essas são rochas sedimentares e possuem **porosidade intergranular**. De um modo geral, os seus **poros são abundantes, relativamente grandes e conectados**, e por isso a água se movimenta mais rapidamente, ou seja a **permeabilidade da areia, cascalho, arenito e conglomerado é elevada**. Por isso camadas formadas por esses materiais são **aquíferos** e os **poços** que as atravessam darão **boas vazões**. Na Bacia Sorocaba e Médio Tietê, o Aquífero Guarani é formado basicamente por arenitos. O Aquífero Tubarão contem arenitos e conglomerados, mas contem também siltitos e argilitos, por isso seu comportamento é muito heterogêneo e as vazões não são tão elevadas quanto as do Guarani. O Tubarão também contem camadas de lamitos (mistura de areia, argila e silte) que são de permeabilidade intermediária.



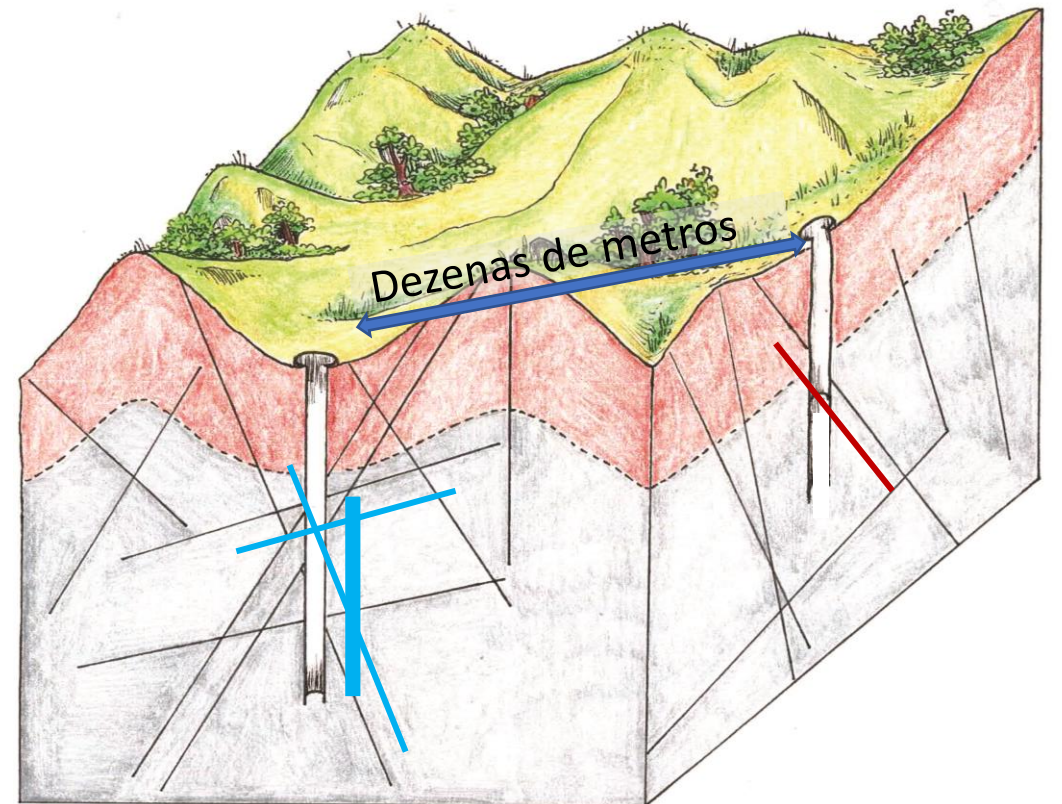
Figura 14. Tamanhos relativos do grão

Tabela 1. Diâmetro das partículas e porosidade total nos sedimentos e rochas sedimentares

Sedimentos (*)	Diâmetro da partícula (mm)	Porosidade total dos sedimentos (%)	Rochas Sedimentares (**)	Porosidade total das rochas (%)
Cascalho	> 2,0	24 – 38	Arenito	5 – 30
Areia grossa	0,2 – 2,0	31 – 46	Siltito	21 – 41
Areia fina	0,02 – 0,2	26 – 53	Calcário/Dolomito	0 – 40
Silte	0,002 – 0,02	34 – 61	Calcário cárstico	0 – 40
Argila	< 0,002	34 – 60	Folhelho	0 – 10

Fontes: Iritani & Ezaki (2014)
(*) Domenico & Schwartz (1998); (**) Fetter (1994)

Figura 15. Poços que atravessam aquíferos fraturados, podem ter desde boas vazões (variando principalmente entre 5 e 30 m³/h) até vazões muito baixas (menos que 1m³/h), podendo haver poços secos). O poço da direita é produtivo, pois atravessou 2 fraturas permeáveis (traços azuis), mas o poço da esquerda é seco, pois atravessou apenas uma fratura muito fechada e seca (traço vermelho). Veja que essa variação pode acontecer em distâncias de apenas algumas dezenas de metros. A perfuração em aquíferos fraturados é arriscada e é necessário utilizar técnicas que aumentem a chance do poço ser produtivo. Na Bacia Sorocaba e Médio Tietê, há 2 aquíferos fraturados: o Cristalino, formado por granitos, gnaisses, xistos etc., e o Serra Geral, formado por basaltos.



Fraturas verticais muito longas em granito.
Ubatuba, SP

Fraturas horizontais, permeáveis e muito longas em basalto. Ribeirão Preto, SP.
Projeto FRATASG, IG



Fotos: Projetos FRATASG I e II (IG)
Região de Ribeirão Preto a Avaré



Figura 16. Na parte de cima da figura, você vê o mapa da bacia Sorocaba e Médio Tietê, e se você viajar ao longo da linha preta, saindo de sudeste e chegando no extremo noroeste, você vai passar por todos os aquíferos e aquícludo dessa bacia. Você começa sua viagem passando pelo Aquífero Cristalino (Ibiúna-Ib até Sorocaba), depois pelo Aquífero Tubarão (Sorocaba-So até Tatuí), em seguida o Aquícludo Passa Dois (onde fica Pereiras-Pe), e então pelo Aquífero Guarani (Conchas-Co) e Serra Geral (Botucatu-Bo). Mas quando pensamos em aquíferos, precisamos também olhar em profundidade, e isso se faz olhando um corte, no desenho de baixo. Esse corte (ou seção) mostra que os aquíferos são como camadas inclinadas e, dependendo de onde está um poço, ele pode cortar mais de um aquífero. Por exemplo, em algumas regiões de Sorocaba os poços podem atravessar o Tubarão e o Cristalino.

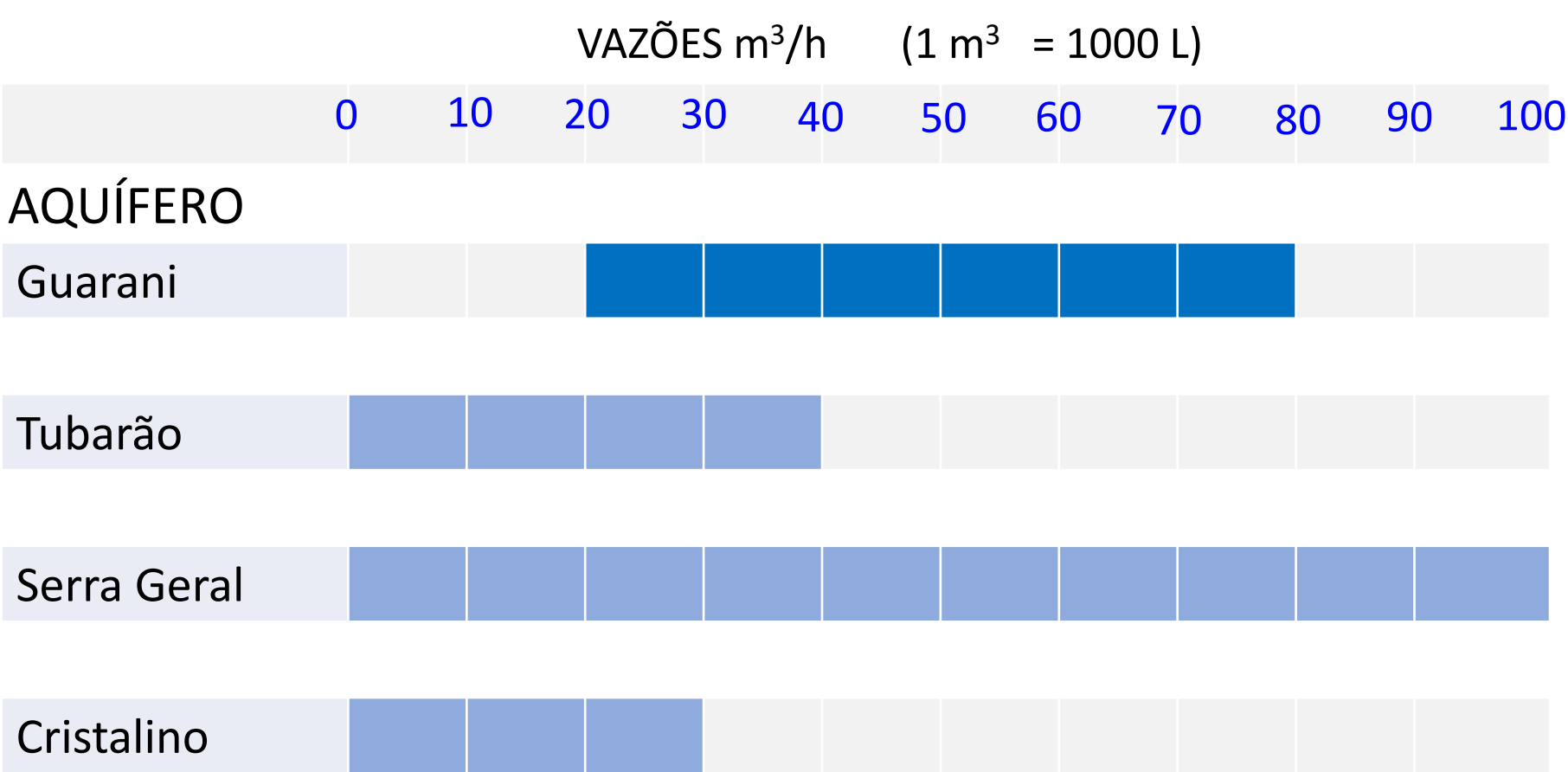


Figura 17. Vazões indicadas pelo Mapa de Águas Subterrâneas (Governo do Estado de São Paulo, 2005) para os quatro aquíferos que ocorrem na Bacia Sorocaba e Médio Tietê.

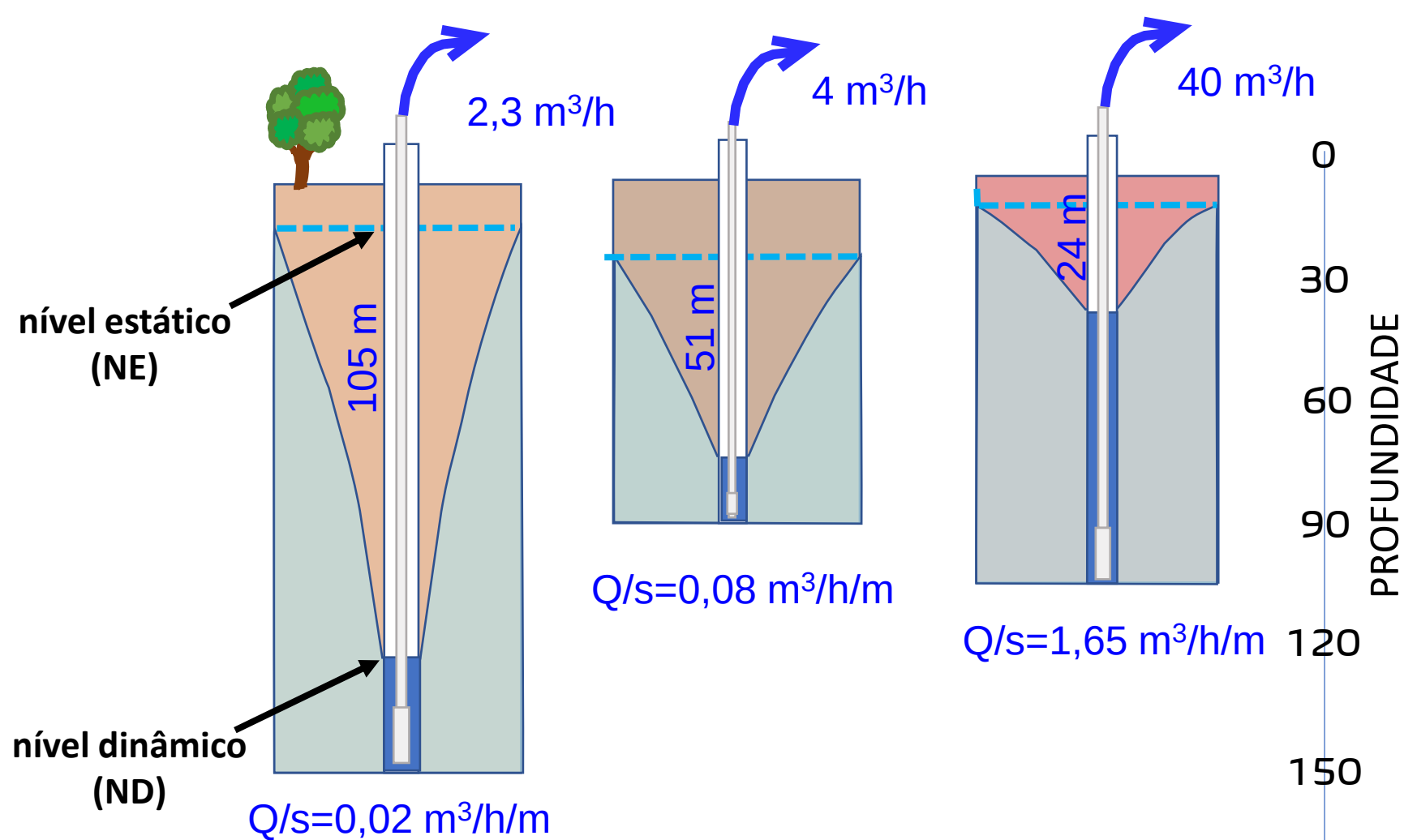


Figura 18. Os três cones de rebaixamento representados acima foram desenhados com base em dados de poços reais que exploram o Aquífero Tubarão, do cadastro SIAGAS do Serviço Geológico do Brasil. Trata-se de poços que exploram o Aquífero Tubarão. Nota-se que os cones de rebaixamento formados nos testes de vazão podem ter profundidade muito variada (desde 20 até 100m). A capacidade específica (Q/s , m³/h/m), de cada poço é a vazão praticada no teste de bombeamento sobre o rebaixamento do nível d'água no poço. Esse rebaixamento é o nível estático (NE-profundidade do nível d'água encontrado assim que a perfuração do poço é terminada) menos o nível dinâmico (ND- profundidade do nível d'água no final do teste, quando não ocorre mais rebaixamento). Quanto mais permeáveis são os materiais, menor será o rebaixamento. Como o Aquífero Tubarão é formado por rochas permeáveis e rochas impermeáveis (ver abaixo), a vazão será variada; da mesma forma os rebaixamentos também são variados.

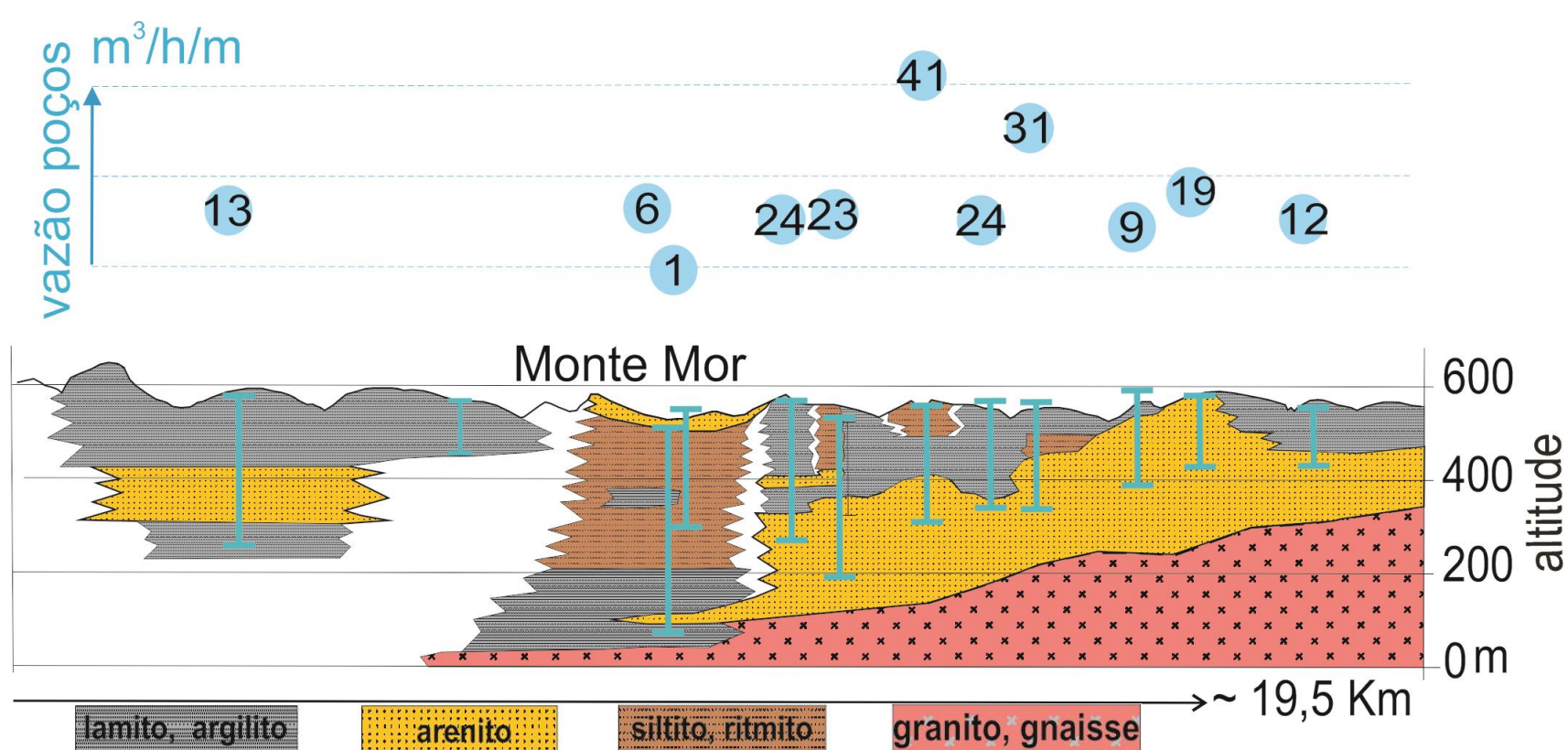
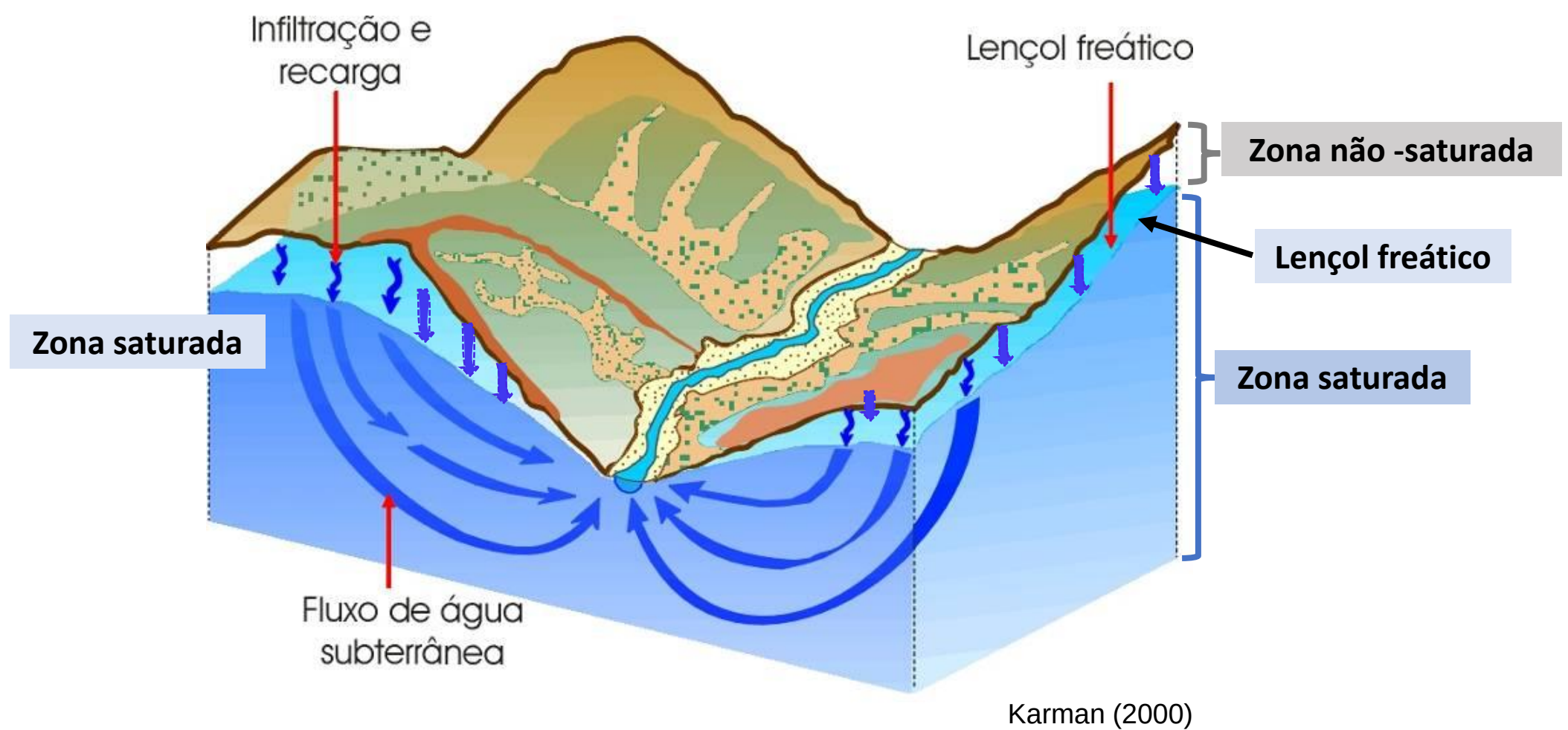


Figura 19. Esta é uma seção geológica em que se vê a altitude do terreno (linha de cima) e as camadas de diferentes materiais geológicos, como se fosse um bolo de várias camadas descontínuas. Esta seção é no Aquífero Tubarão, que está sobre a camada do Aquífero Cristalino (granito, gnaiss). A permeabilidade é variada, pois há arenitos, siltitos e argilitos. Assim a vazão dos poços (bolazinhas azuis) é variada, desde 1 m³/h/m até 41 m³/h/m. A profundidade dos poços (barras azuis) também é variada.



Karman (2000)

Figura 20. Este bloco-diagrama, que mostra tanto a superfície do terreno, como o que está abaixo do solo, ilustra as características de um aquífero livre, que também pode ser chamada de aquífero freático. As características do aquífero livre são:

- O limite superior é o lençol freático.
- Os poços perfurados no aquífero livre mostram a profundidade do lençol freático no local do poço.
- A água da chuva infiltra no subsolo e recarrega diretamente o aquífero. Essa infiltração é representada pelas flechas verticais azuis na zona não-saturada. Note que a infiltração (e recarga) acontece em toda a superfície do terreno, exceto nos vales de rios, onde acontece a descarga.
- A água subterrânea do aquífero livre flui de áreas mais altas para áreas mais baixas e sofre descarga nos vales. Portanto, existe conexão entre o aquífero livre e as drenagens (rios, ribeirões, córregos etc.)
- O aquífero livre contribui para o fluxo de base dos rios e é em parte responsável pela vazão dos rios durante as estiagens
- Este tipo de aquífero sustenta parte da vegetação, principalmente próximo a rios e em áreas úmidas (serviços ecossistêmicos – parte da segurança hídrica)
- É um aquífero vulnerável, pois não há camada confinante acima dele; dessa forma os contaminantes chegar nele facilmente com a infiltração da água da chuva.

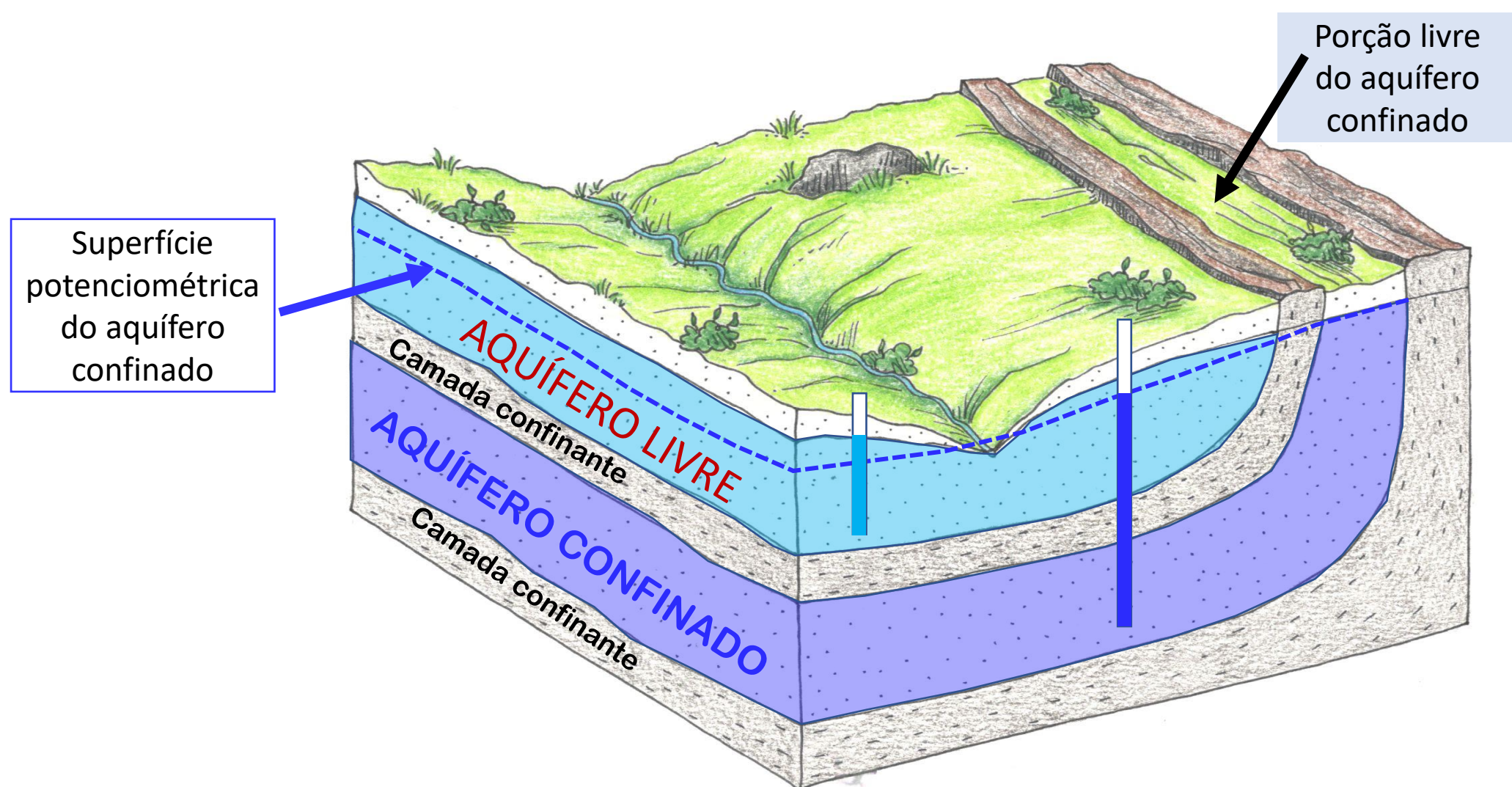


Figura 21. Este bloco-diagrama, que mostra tanto a superfície do terreno, como o que está abaixo do solo, ilustra as características de um aquífero confinado. Suas características são:

- O limite superior é uma camada confinante. Esse aquífero possui uma área livre que pode ter extensão muito menor que a parte confinada.
- A água da chuva infiltra e recarrega o aquífero apenas na sua parte livre.
- A água subterrânea do aquífero confinado não tem conexão com rios, lagos etc.).
- A água subterrânea nesse aquífero está sob pressão, e o nível d'água dentro dos poços, que exploram apenas o aquífero confinado, será acima do contato entre a camada confinante e o aquífero (veja o poço que explora o aquífero confinado). O nível d'água mostrará a superfície potenciométrica do aquífero confinado, ou seja, mostrará a sua pressão no local. É por isso que existem poços jorrantes ou artesianos; eles acontecem em locais em que a superfície potenciométrica está acima da superfície do terreno.
- É um aquífero pouco vulnerável, pois a camada confinante oferece uma proteção, impedindo que os contaminantes cheguem nele.

Figura 22. Um **aquífero suspenso** é semelhante ao livre, mas ocorre apenas localmente. Ele tem as seguintes características:

- A água da chuva passa pela zona não-saturada e recarrega o aquífero.
- Seu limite superior corresponde ao lençol freático local (este é descontínuo)
- É limitado na base por camada de baixa permeabilidade

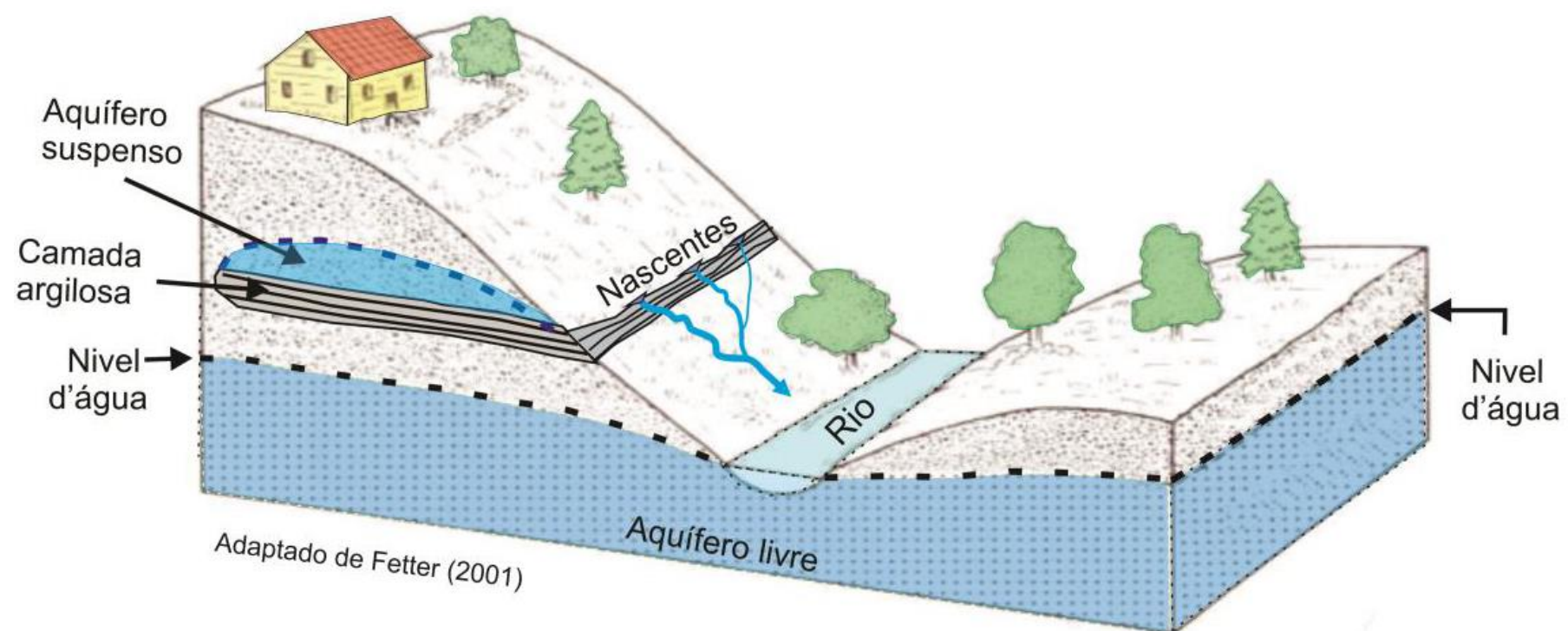
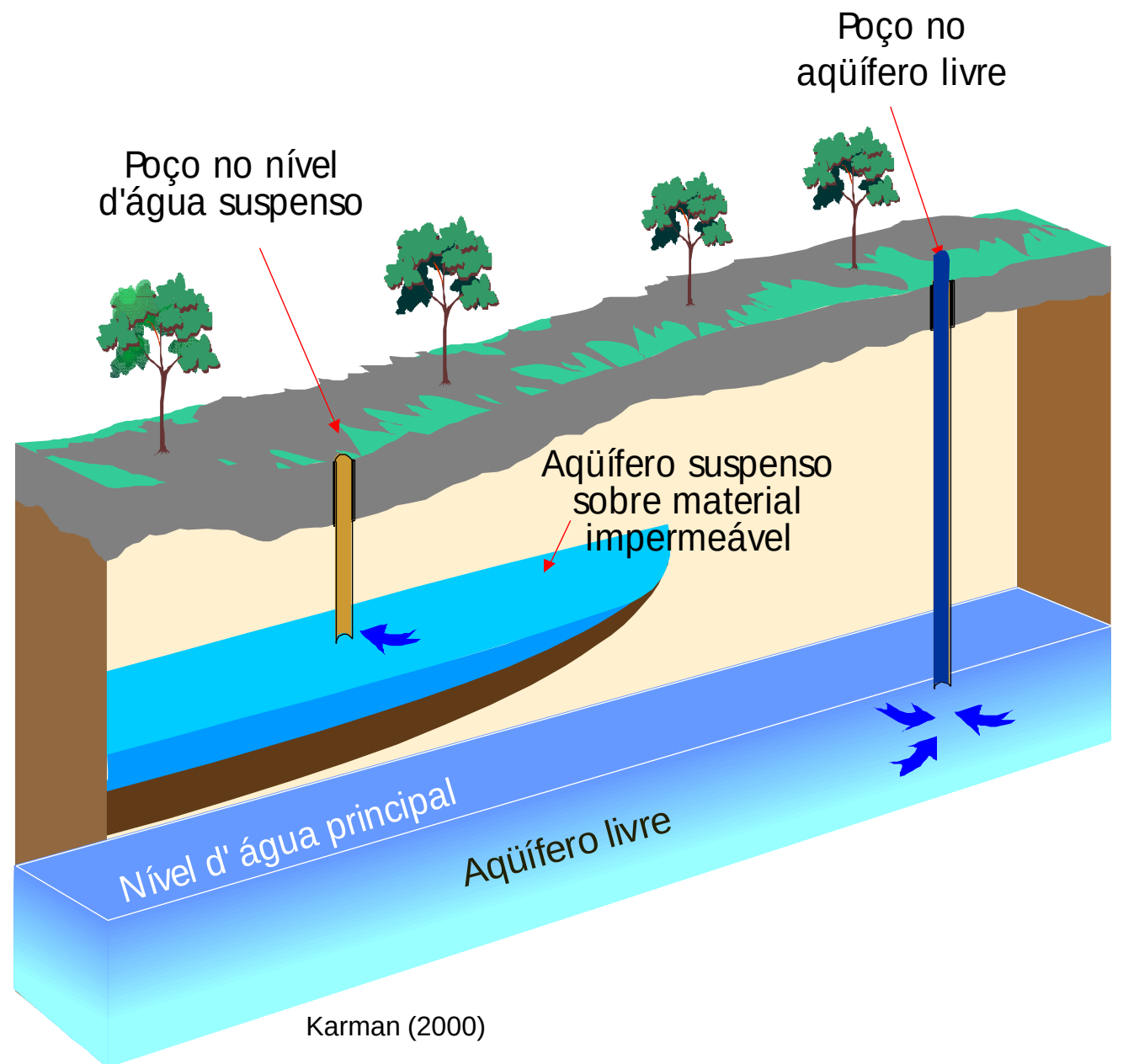


Figura 23. É comum que o **aquífero suspenso** leve à existência de nascentes. As nascentes se formam quando a superfície do terreno intercepta um aquífero suspenso.

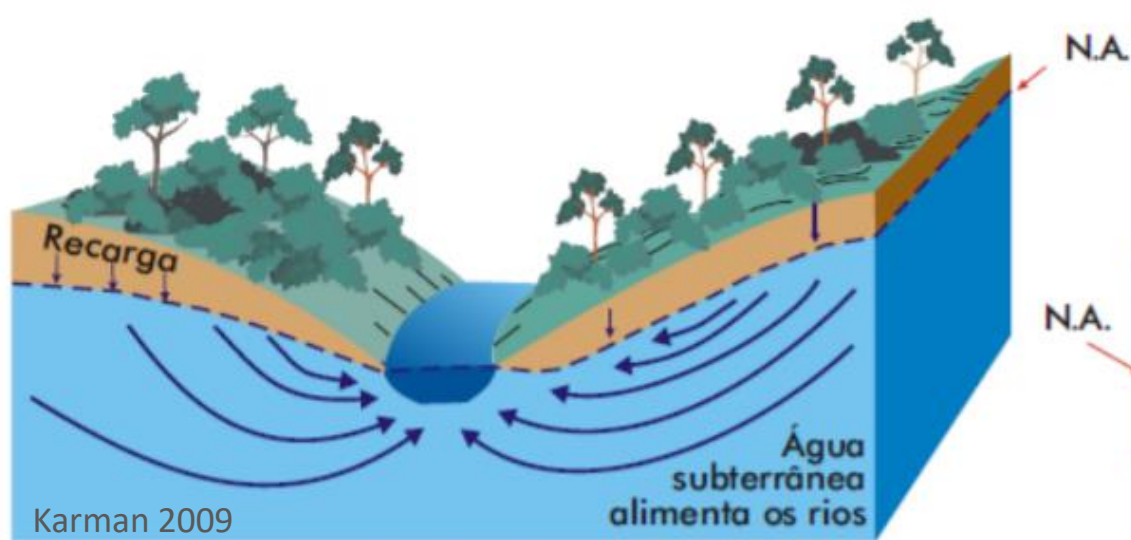


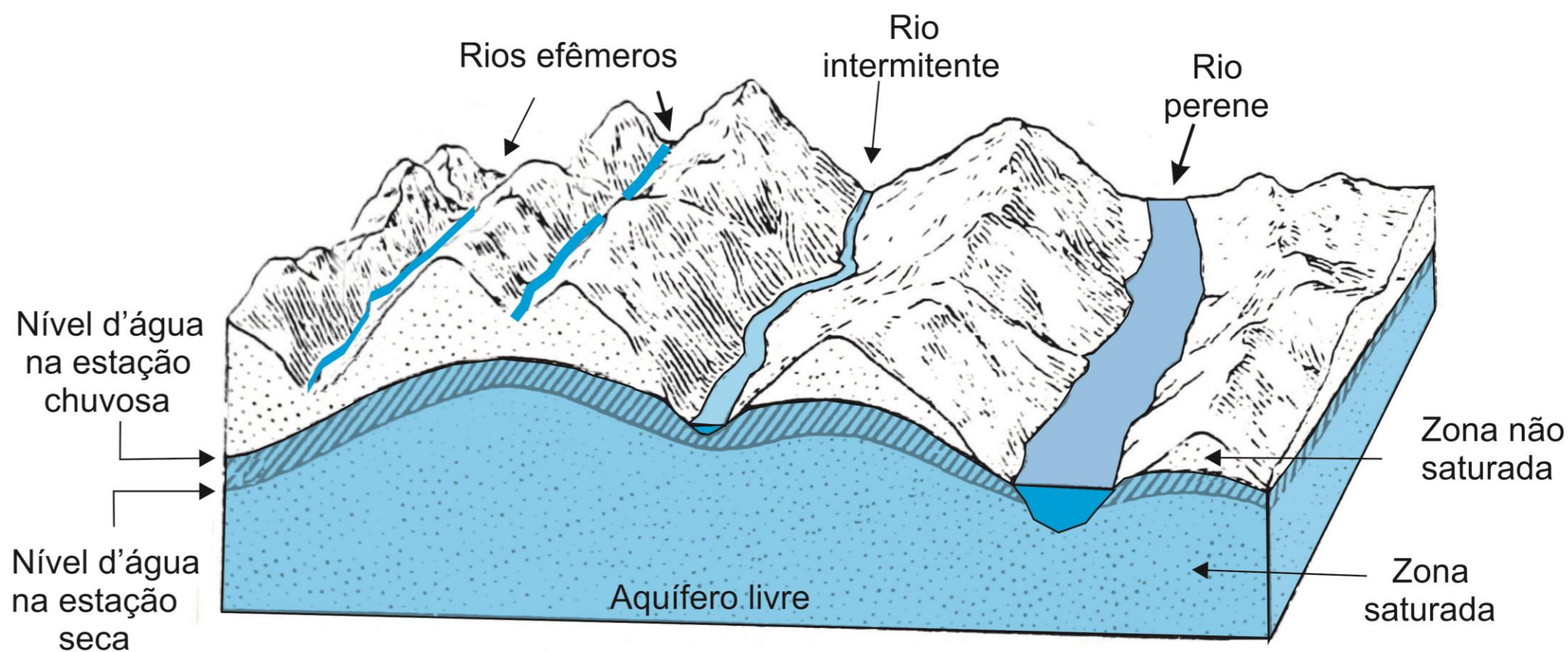
Figura 24. Esta paisagem úmida em que os aquíferos sofrem descarga nos rios (rios efluentes), ou seja contribuem para o fluxo de base, é favorecida pelas seguintes condições:

- Chuvas abundantes e regularmente distribuídas ao longo do tempo promovem uma infiltração maior, pois, a velocidade de infiltração acompanha o volume de precipitação.
- Presença de vegetação e de terrenos com pouca declividade, pois isto favorece a infiltração e a recarga do aquífero.



Figura 25. Esta paisagem seca, em que os aquíferos sofrem são alimentados pelos rios (rios influentes) é favorecida pelas seguintes condições:

- Chuvas escassas e muitas intensas e rápidas desfavorecem a infiltração e promovem intenso escoamento superficial
- Ausência de vegetação e presença de terrenos com maior declividade, também favorecem o escoamento superficial. Assim quase toda a água da chuva vai parar diretamente (sem passar pelo subsolo) nos rios. A erosão pode ser um fenômeno muito importante.



Adaptado de Bigarella (2003)

Figura 26. Os rios tem uma relação direta com o aquífero livre e, em função da oscilação da profundidade do lençol freático ao longo do ano, haverá os cursos d'água perenes, intermitentes e efêmeros. Em porções mais baixas do terreno, o lençol freático é mais raso, e mesmo com as oscilações anuais, o rio sempre terá conexão com o aquífero e não seca; neste caso o rio é perene. Em porções mais elevadas do terreno, o lençol freático em geral é um pouco mais profundo e, após a estação seca ele estará mais profundo e os cursos d'água (em geral os menores) poderão perder conexão com o aquífero e ficarão secos, até chegar novamente a estação chuvosa; estes são os cursos d'água intermitentes. Há locais ainda em que os cursos d'água nunca tem conexão com o aquífero; neste caso, esses cursos terão água apenas imediatamente um evento chuvoso. Estes são os cursos d'água efêmeros.

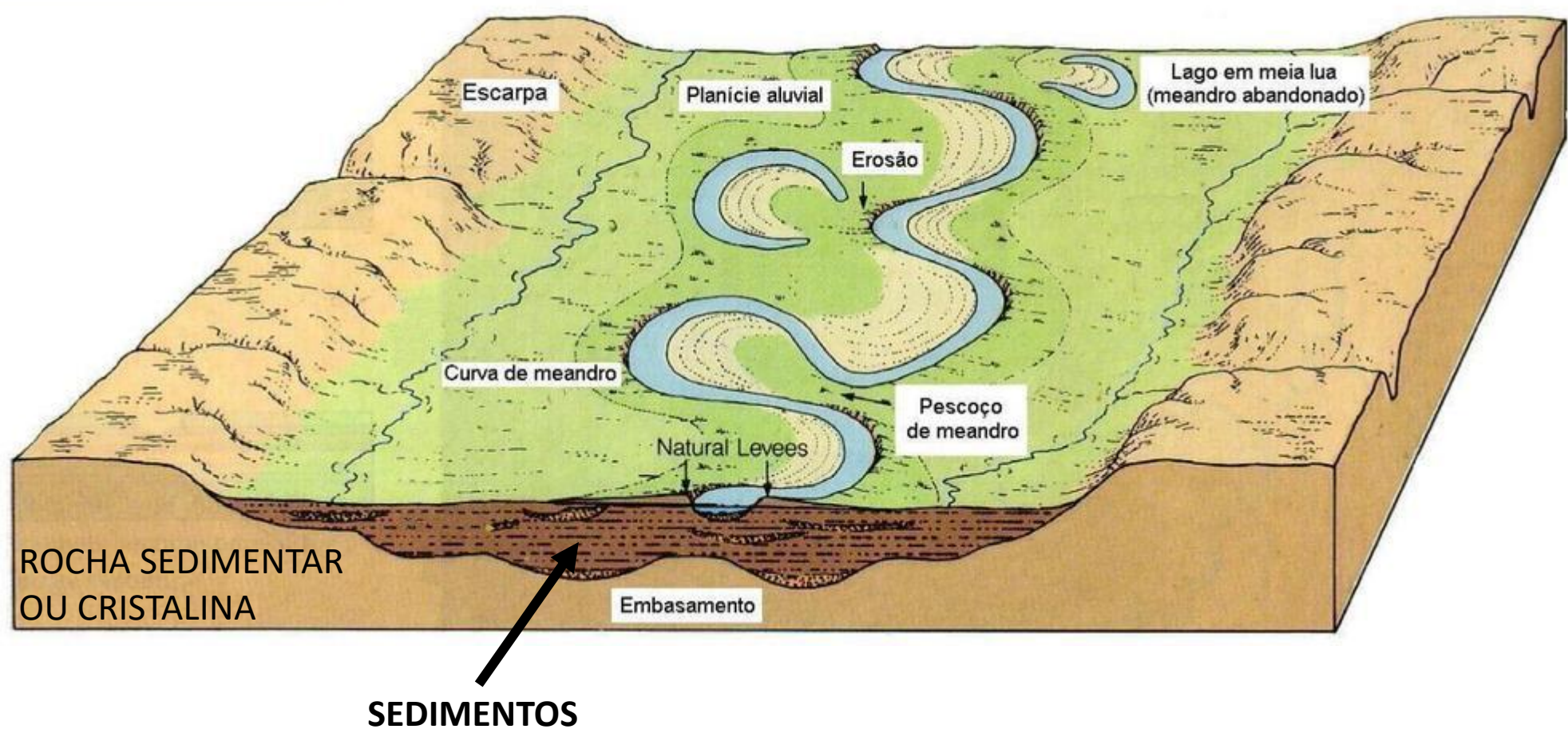


Figura 27. Planície aluvial, onde o subsolo é constituído de sedimentos que repousam sobre rochas sedimentares ou cristalinas. A foto é do Rio Paraitinga, no Vale do rio Paraíba do Sul. Neste caso os morros são constituídos de rochas cristalinas e os sedimentos da planície estão sobre essas rochas. Fonte: CONCEITOS DO MEIO FÍSICO PARA O NOVO CÓDIGO FLORESTAL , Instituto Geológico (IG*) 2012. O Instituto Geológico atualmente pertence ao Instituto de Pesquisas Ambientais – SIMA.