

Aplicação de Modelos Analíticos Para Outorga e Gestão Integrada dos Recursos Hídricos na Bacia do Rio Grande

Zoltan Romero Cavalcante Rodrigues

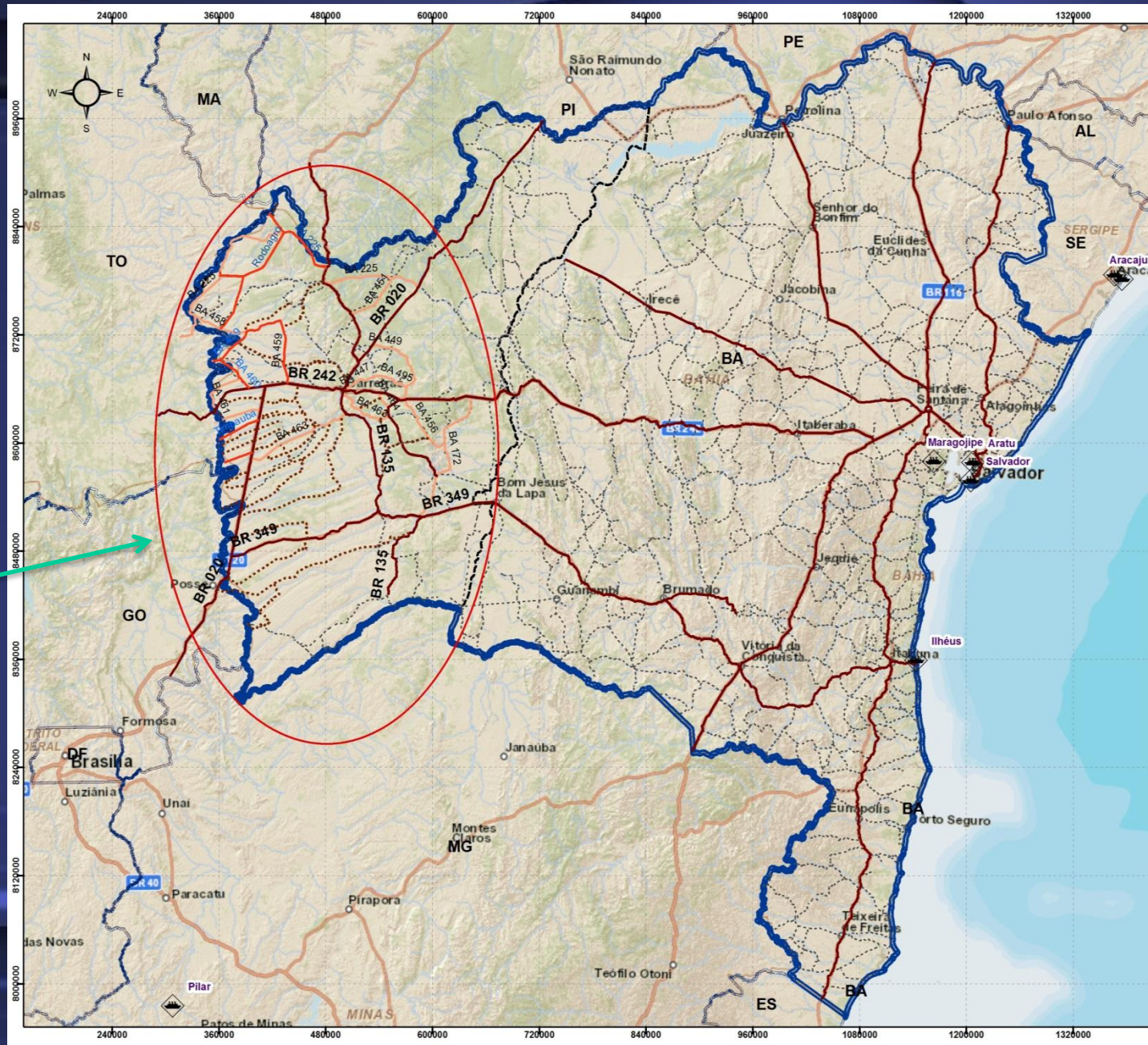
LOCALIZAÇÃO DA ÁREA

O Sistema
Aquífero Urucuia



Fonte: ANA(2013)

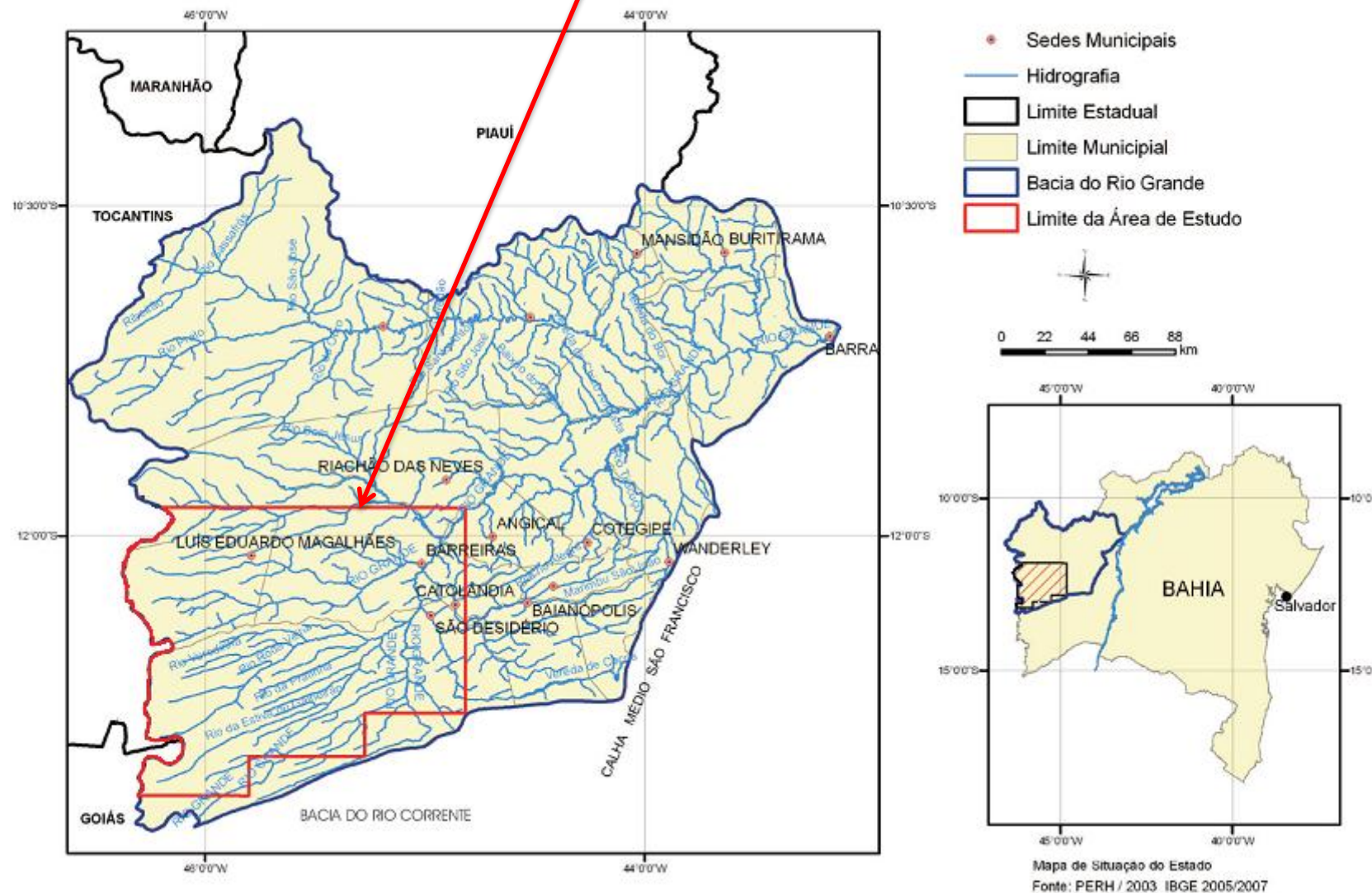
A Região Oeste do Estado da Bahia



A Bacia do Rio Grande



LOCALIZAÇÃO DA ÁREA

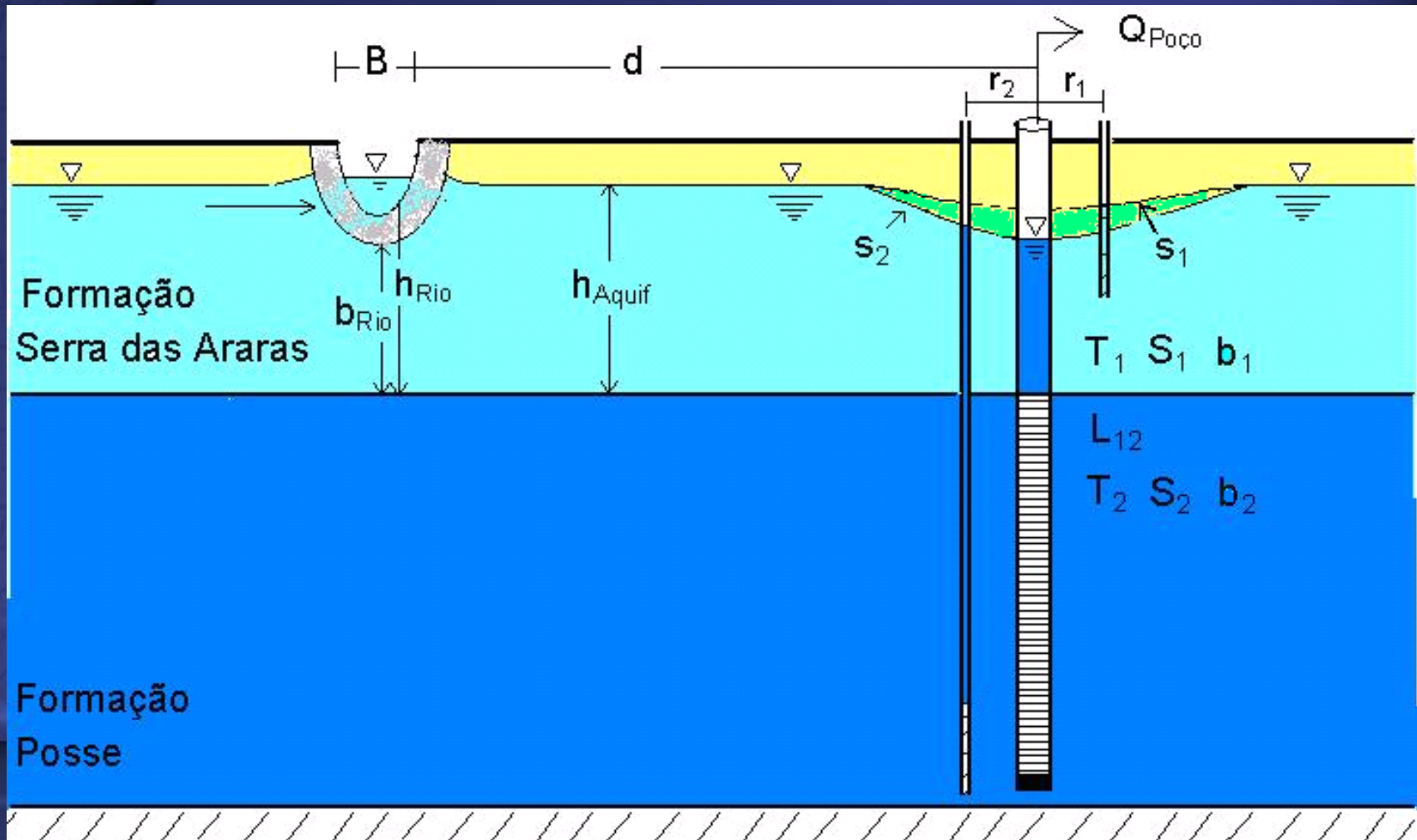


Sistema Aquífero Urucuia

O aquífero funciona como um reservatório de regularização dos rios, garantido a preservação de suas vazões nos períodos de estiagem e reduzindo o impacto das cheias nos períodos de chuvas intensas. Seus parâmetros já foram levantados em vários trabalhos científicos.

A área da bacia do rio Grande foi escolhida porque nela já foram realizadas várias modelagens numéricas com o modflow.

Representação conceitual do sistema aquífero Urucuia na bacia do rio Grande



Problema/Justificativa I

- Quando uma região é abastecida por águas superficiais e subterrâneas, alguns problemas específicos podem surgir, associados à redução de vazão dos rios devido ao bombeamento de águas subterrâneas.
- A avaliação desta interação, em muitas situações, é fundamental para a gestão de recursos hídricos e a mesma pode ser quantificada pelos modelos analíticos.

Problema/Justificativa II

- A conectividade entre as águas dos mananciais superficiais e subterrâneos são conhecidas desde o trabalho original de Boussinesq em 1877.
- Entretanto, até hoje (segunda década do século XXI), os atores envolvidos no estudo e na gestão dos recursos hídricos não conduziram este conhecimento para uma realidade prática, salvo algumas raras exceções (ABAS, 2011).

Objetivo

- Avaliar um modelo simples para quantificar os volumes retirados dos rios por poços, em virtude da conectividade hidráulica entre as águas superficiais e subterrâneas, com a finalidade de gerenciar as águas de forma integrada, evitando conflitos e maximizando o potencial para o desenvolvimento sustentável da região.

Princípio da Conservação da Massa

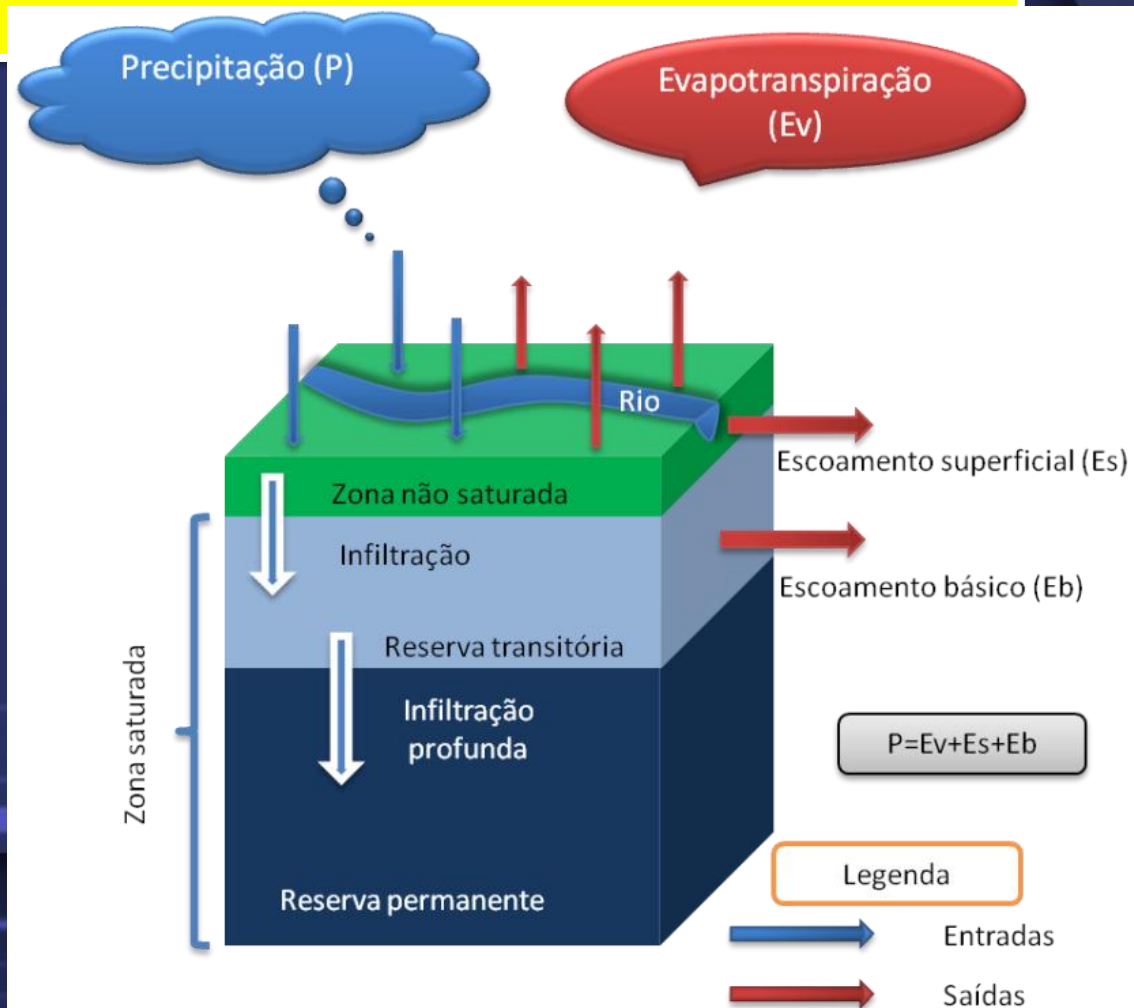
A variação e o fluxo da água em um aquífero é determinado pelo princípio da CONSERVAÇÃO DA MASSA (não se pode criar nem destruir matéria).

Consequências do Princípio

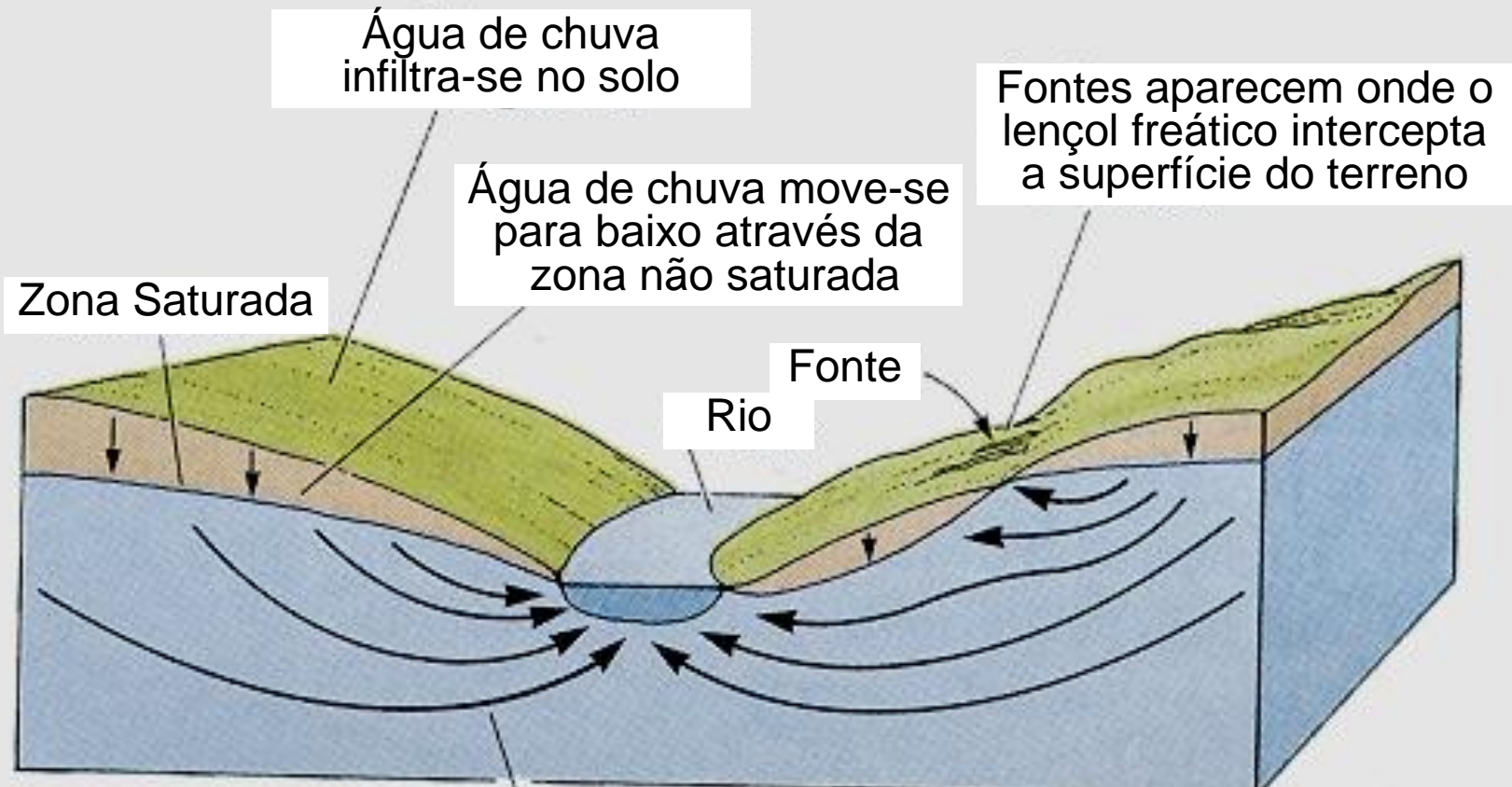
O escoamento de base dos rios (superficial) é a reserva reguladora (subterrânea). A água descarregada pelo aquífero para os rios é aproximadamente igual à recarga (equilíbrio dinâmico).

$$Rr = Eb$$

Rr = reserva reguladora
 Eb = escoamento de base



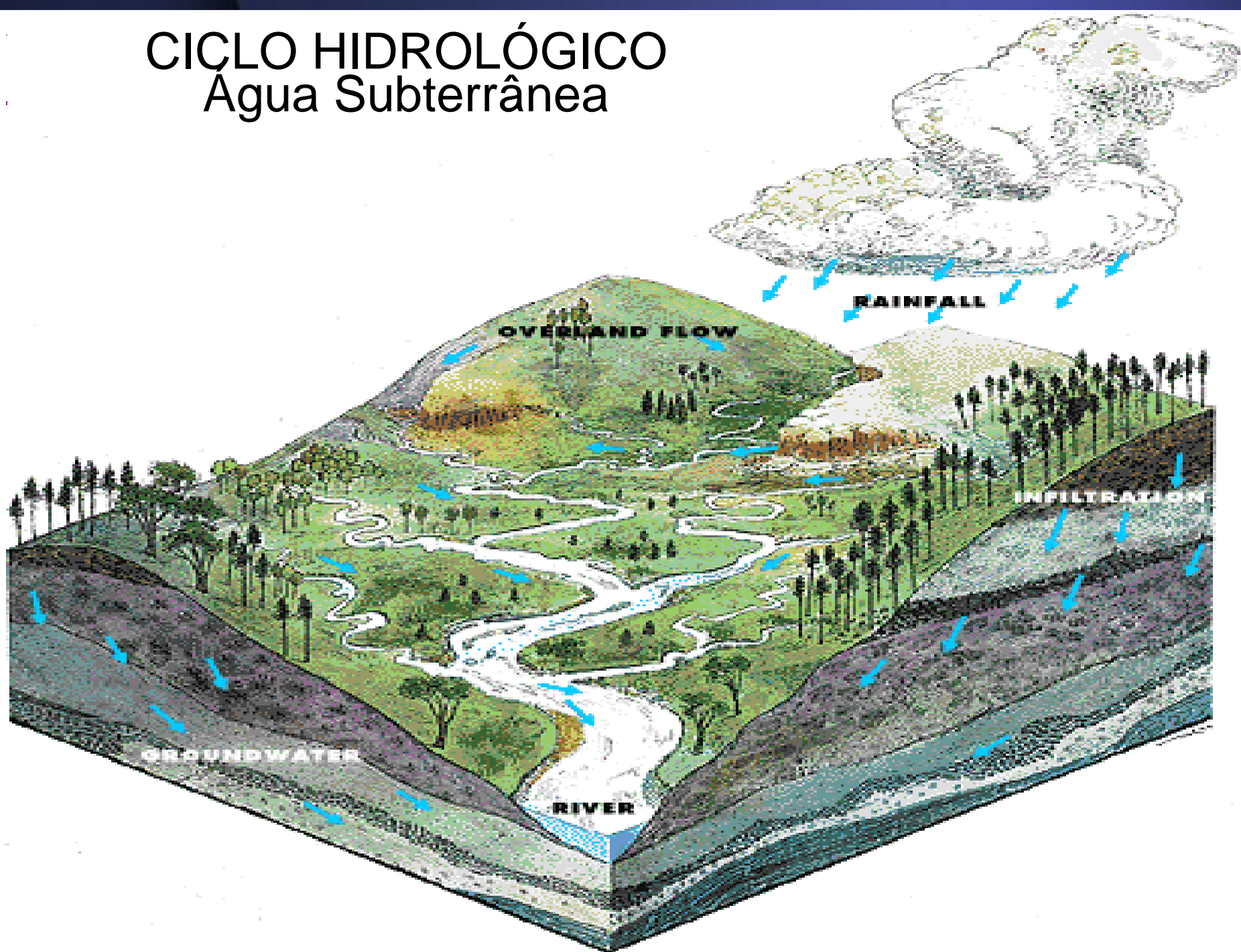
Detalhando o Problema



Na zona saturada a água subterrânea percola ao longo de caminhos curvos e emerge no rio ou fonte hidráulica mais próxima

CICLO HIDROLÓGICO

Água Subterrânea



Theis (1935) Descreveu a Retirada de Água de Um Aquífero:

"Um novo estado de equilíbrio dinâmico se alcança somente mediante um incremento na recarga (recarga induzida), uma redução da descarga, ou uma combinação de ambos os efeitos."

A este respeito,
BREDEHOEFT acrescentou:

“Geralmente, a recarga é determinada pela precipitação pluvial, que não se altera com a exploração do aquífero.”

E MAIS:

“Comumente, a descarga natural é que se altera e faz possível que o aquífero alcance um novo equilíbrio.”

Static Water Level

River

Glacial Drift

Fine Sand

Dynamic Water Level

Coarse Sand

Confining Clay

Well

Cone of Depression

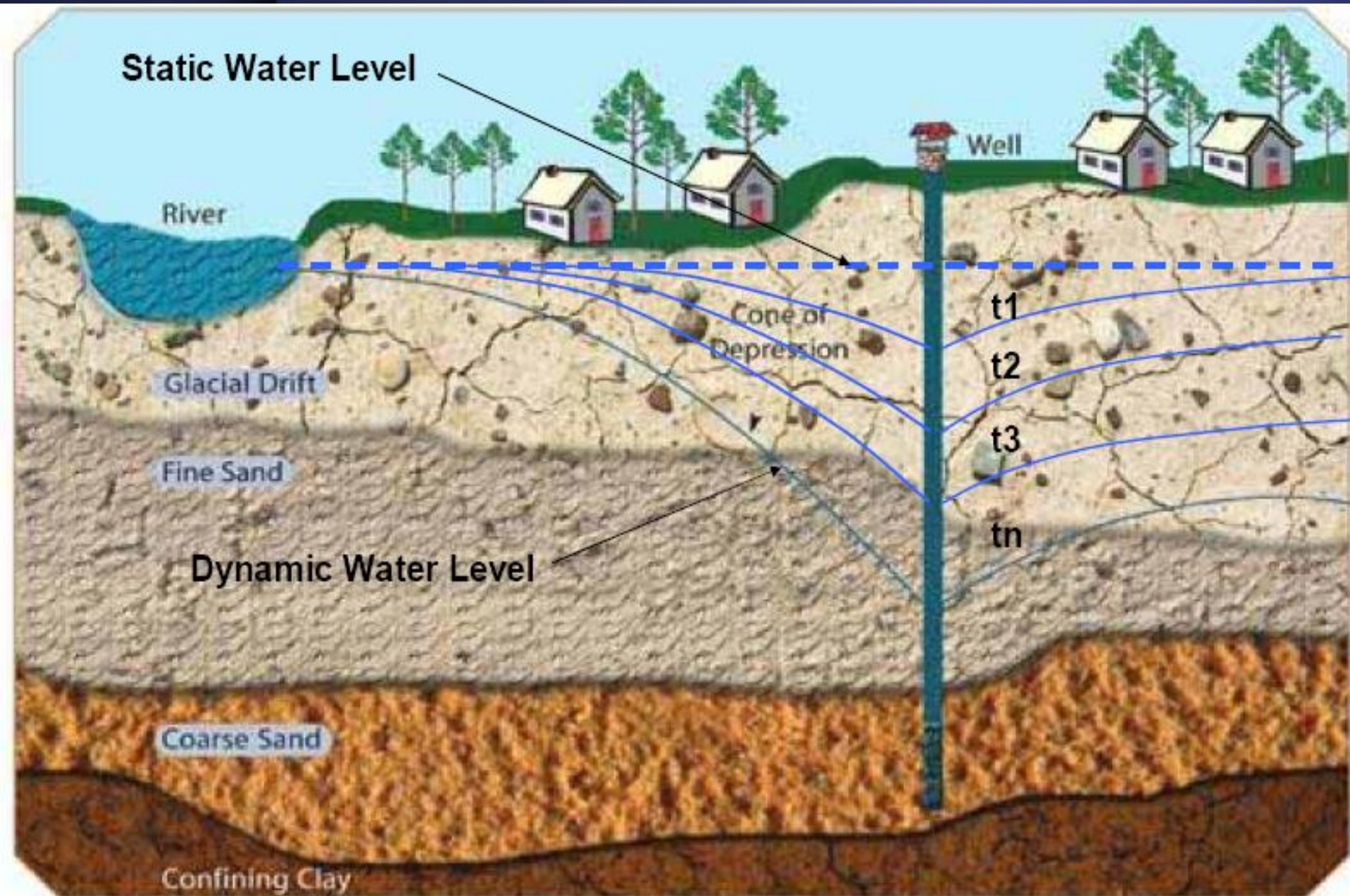
t1

t2

t3

tn

Adapted from *Groundwater and Wells*, Second Edition by Fletcher G. Driscoll, Ph.D.



DE MODO QUE:

“A captura da descarga natural é o que geralmente determina a magnitude do aproveitamento sustentável.”

ASSIM NÃO HÁ OPÇÃO:

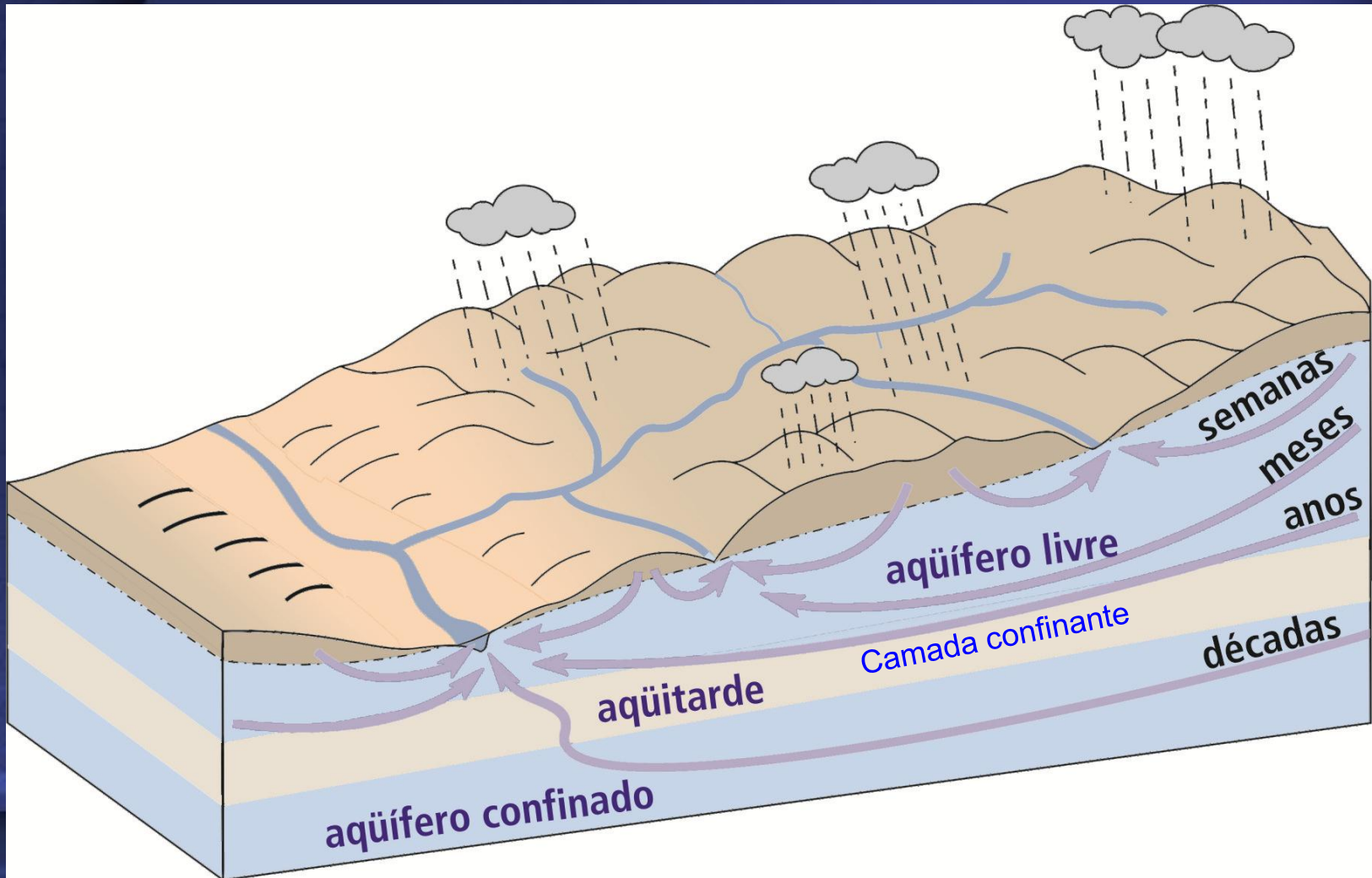
Se as entradas (recargas) são maiores que as saídas (descargas), o aquífero incrementa seu volume de água armazenada e os níveis de água se elevam.

E

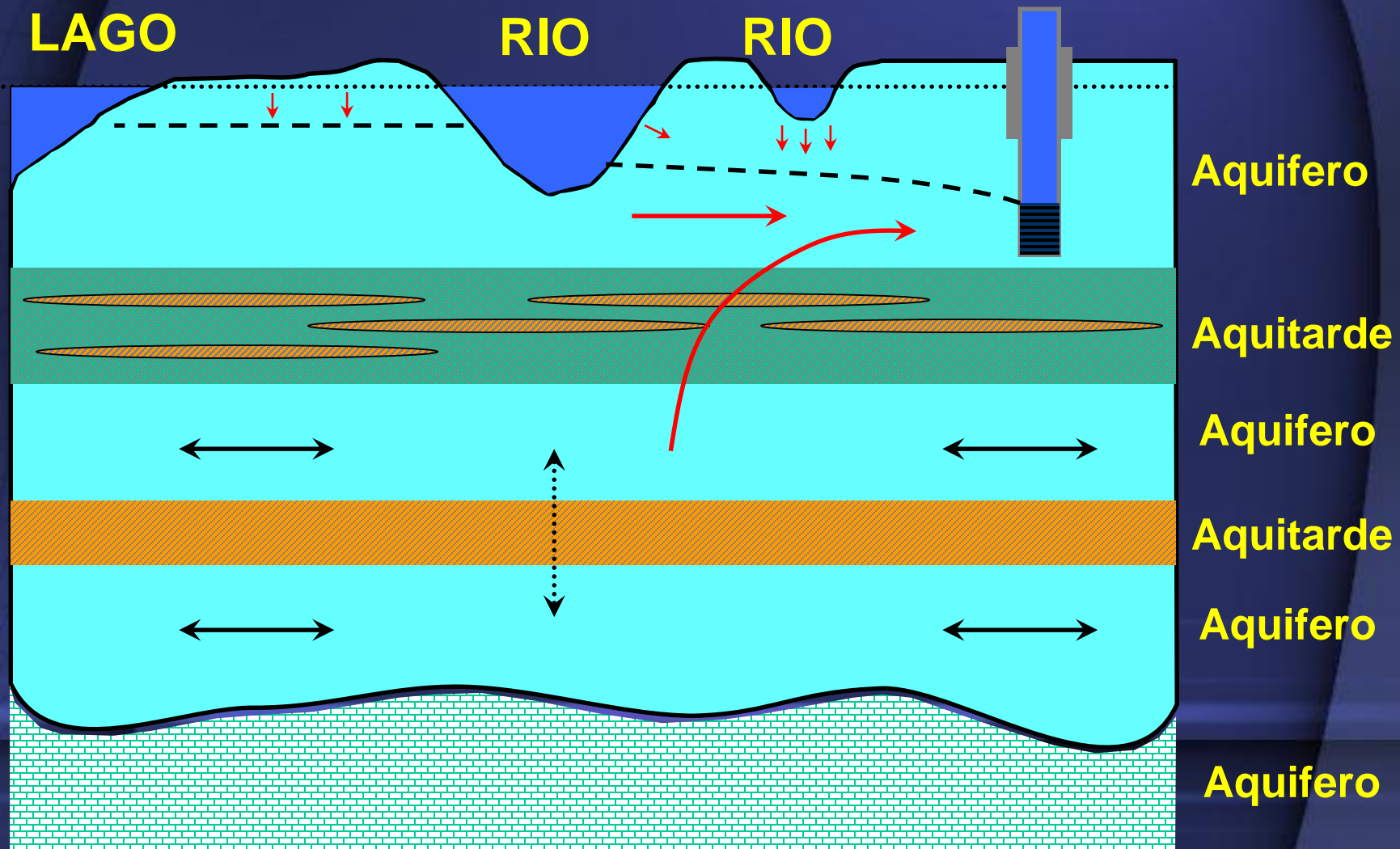
Se as entradas (recargas) são menores que as saídas (descargas), se reduz a quantidade de água armazenada no aquífero e os níveis de água diminuem.

Causa Temporal da Ilusão de Separação

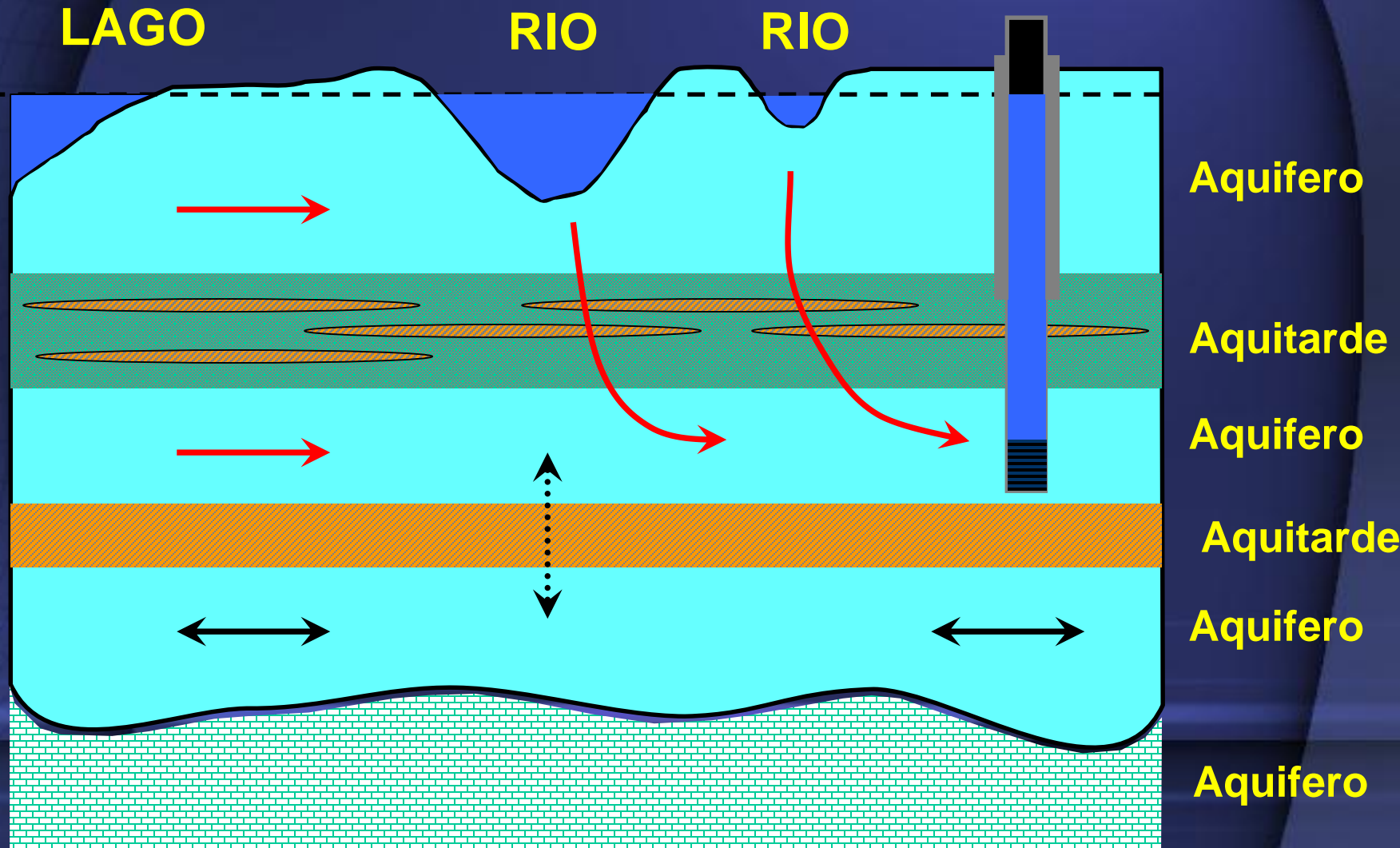
Quanto tempo a água leva para sair do aquífero?



Influência nas águas superficiais (1)



Influência nas águas superficiais (2)



Resumo dos parâmetros hidrológicos do SAU

| Rio | Área (km²) | P (mm/ano) | Eb (mm/ano) | Es (mm/ano) | Et (mm/ano) | Ev (mm) |
|--------------------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Pandeiros | 3.346 | 1.100 | 192,39 | 42,06 | 234,45 | 865,55 |
| Carinhanha | 11.338 | 1.075 | 298,78 | 29,95 | 328,73 | 746,27 |
| Coxá | 2.301 | 1.050 | 148,50 | 17,00 | 165,50 | 884,50 |
| Corrente | 23.578 | 1.120 | 210,91 | 15,58 | 226,49 | 893,51 |
| Grande | 28.130 | 1.300 | 167,55 | 10,60 | 178,15 | 1121,85 |
| Preto | 13.270 | 1.250 | 201,90 | 17,46 | 219,36 | 1030,64 |
| Médias Pond | | 1194 | 204,22 | 17,28 | 221,50 | 972,32 |

Relações hidrológicas do SAU

| Rio | Índices | | | | |
|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | Eb/P | Es/P | Et/P | Ev/P | Eb/Et |
| Pandeiros | 0,17 | 0,04 | 0,21 | 0,79 | 0,82 |
| Carinhanha | 0,28 | 0,03 | 0,31 | 0,69 | 0,91 |
| Coxá | 0,14 | 0,02 | 0,16 | 0,84 | 0,90 |
| Corrente | 0,19 | 0,01 | 0,20 | 0,80 | 0,93 |
| Grande | 0,13 | 0,01 | 0,14 | 0,86 | 0,94 |
| Preto | 0,16 | 0,01 | 0,18 | 0,82 | 0,92 |
| Média | 0,17 | 0,01 | 0,19 | 0,81 | 0,92 |

P=precipitação
 Eb=escoamento de base
 Es=escoamento superficial
 Et=escoamento total (Eb+Es)
 Ev=evapotranspiração

FONTE: ANA (2013)

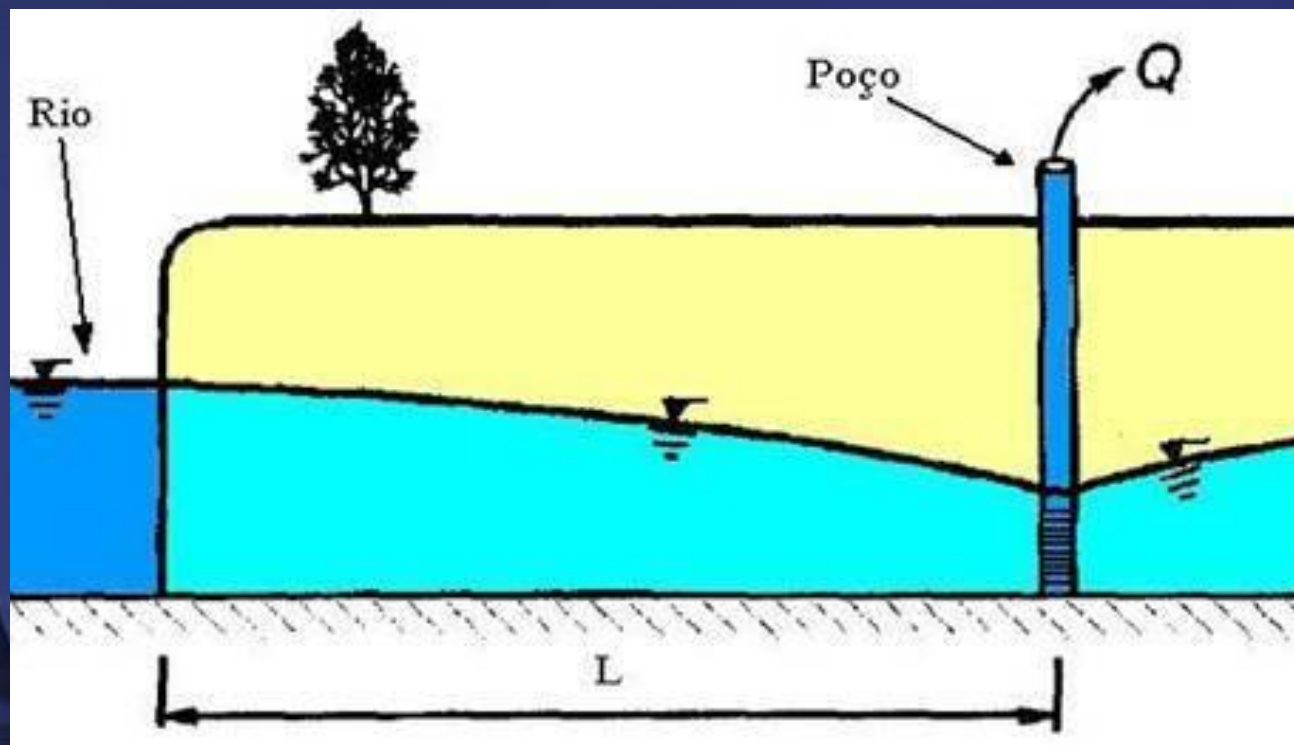
Soluções Analíticas “Tipo 1”

Theis (1941) apresentou a primeira solução analítica para este problema, que mais tarde foi reescrita por Glover & Balmer (1954) e posteriormente foi popularizada por Jenkins (1968) que acrescentou o conceito de SDF (stream depletion factor) no estudo da interferência rio/aquífero.

Esta solução é chamada em alguns trabalhos como Modelo de Theis, em outros como **Modelo de Glover**, Modelo de Glover & Balmer e ainda como **Modelo de Jenkins**.

Soluções Analíticas “Tipo 1”

Para o caso de um aquífero homogêneo de comprimento L , perfeitamente conectado ao aquífero, fig. 1, foram apresentadas várias soluções.



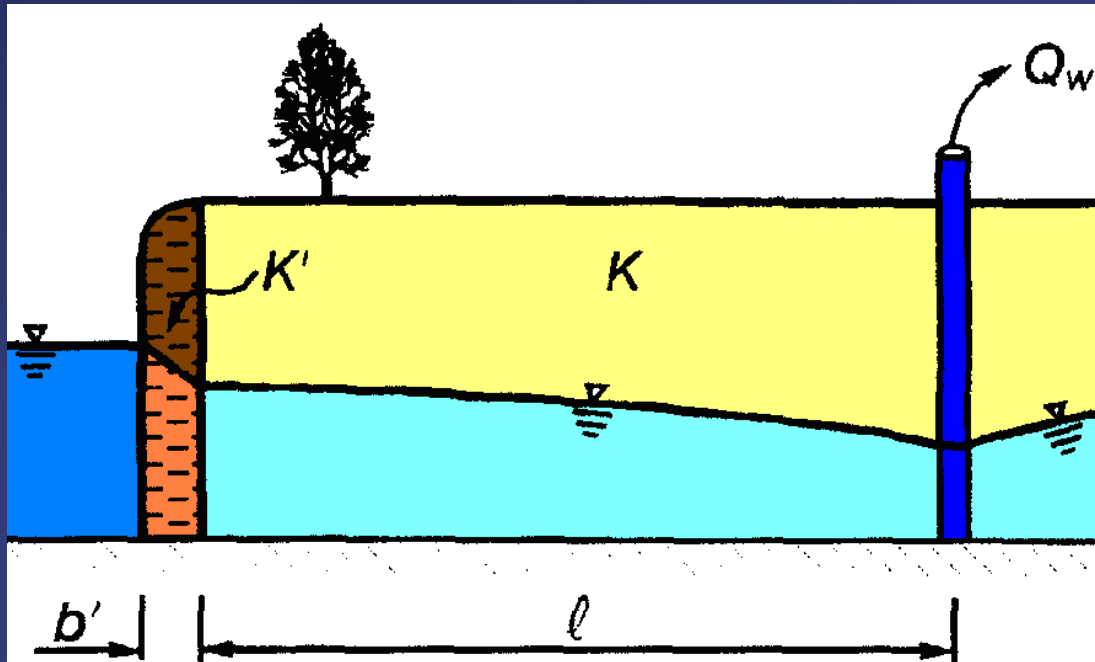
Entre as quais destacamos as seguintes:

Soluções Analíticas “Tipo 1”

✓ Ferris et al. (1962); Buras (1963); Cooper & Rorabaugh (1963); Rorabaugh (1963); Glover (1964); Buras & Bear (1964); Singh (1968); Singh (1969); Hall & Moench (1972); Moench & Kiesel (1970); Marino (1973); Sahuquillo (1983); Gill (1985); Wallace et al. (1990); entre outros...

Solução Analítica do “Tipo 2”

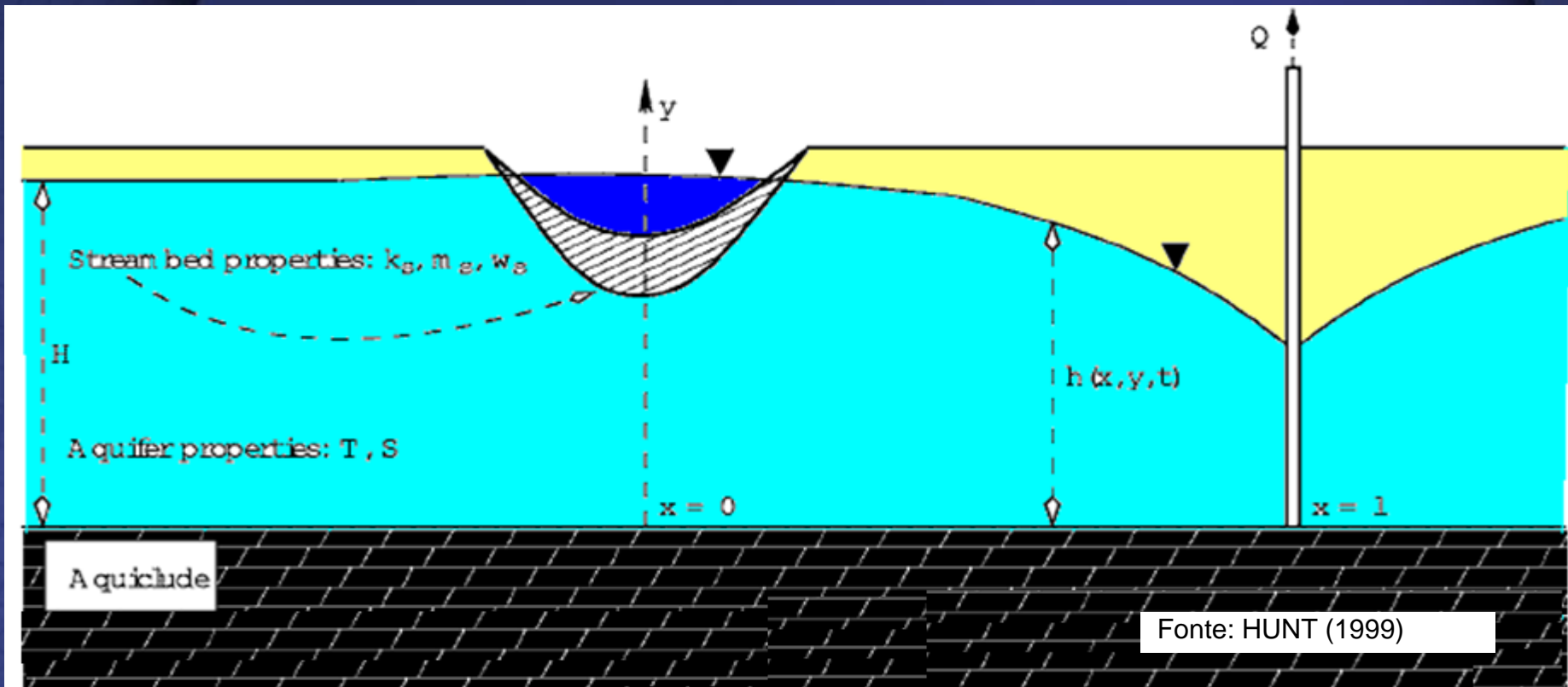
Considerando canais totalmente penetrantes e camadas com diferentes permeabilidades.



Nestas condições o único modelo identificado na pesquisa foi elaborado por Hantush em 1964.

Solução Analítica do “Tipo 3”

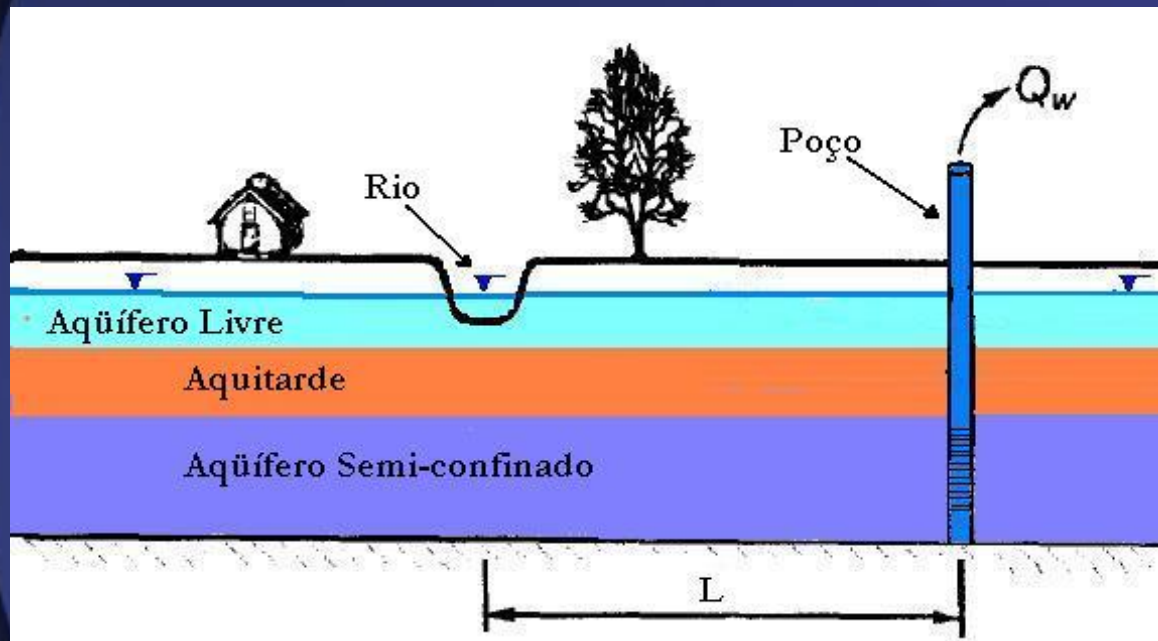
Considerando canais parcialmente penetrantes e um leito de rio com diferente permeabilidade:



Bochever (1966); Hunt (1999); Zlotnik and Huang (1999);
Zlotnik et al. (1999); Butler et al (1999)

Soluções Analíticas “Tipo 4”

Considerando canais parcialmente penetrantes e camadas intermediárias com diferentes permeabilidades.



Para esta abordagem também existem vários modelos desenvolvidos, entre os quais destacamos os seguintes:

Soluções Analíticas “Tipo 4”

Zhang (1992); Zlotnik et al. (1999); Butler et al. (2001); Chen & Yin (2001); Chen & Shu (2002); Hunt (2004); Zlotnik (2005); Hunt & Smith (2008); Hunt (2008); Butler et al. (2008); Scott (2009) Zlotnik & Tartakovsky (2009); Christensen et al. (2009); Christensen et al. (2010); Huang et al. (2010); entre outros...

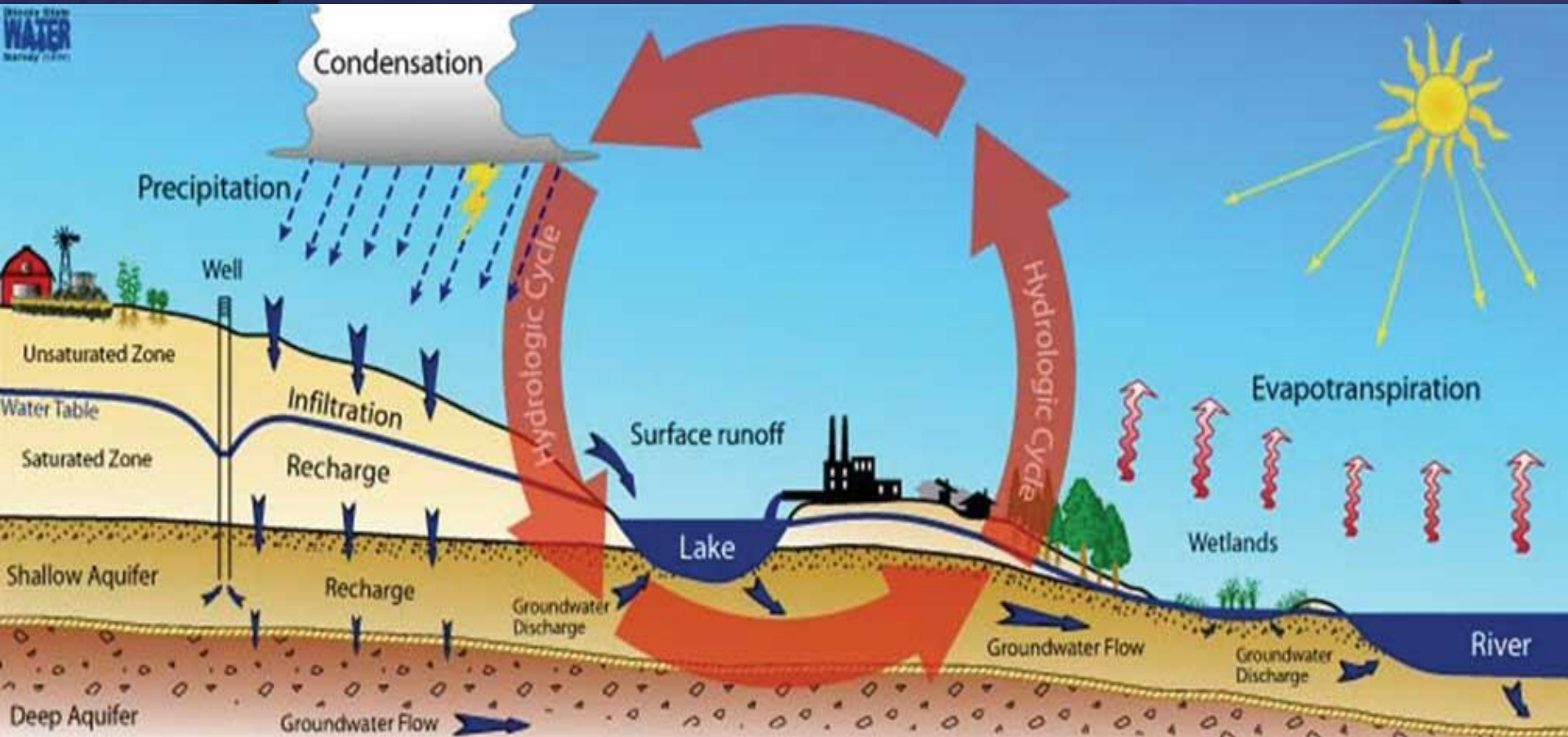
Observa-se que os Tipos 3 e 4 são facilmente utilizáveis como Tipos 1 e 2.

Conclusão de Todos os Pesquisadores do “Tipo 4”

Mesmo em um aquífero semi-confinado (não importando a espessura do aquitarde), a drenagem vertical, com o tempo, se torna uma parte significativa da taxa de bombeamento. Este intervalo de tempo pode ser de algumas horas a alguns meses.

O impacto nas drenagens superficiais sofre um retardo temporal um pouco maior que nas condições de Tipo 1.

Existe uma Única água e sua quantificação é essencial



Modelos analíticos apresentam várias vantagens nesta quantificação.

Cálculo da Interferência

Rio/Aquífero I

- Na prática internacional, os órgãos gestores e as ações judiciais relativas a direitos de uso da água, utilizam basicamente dois modelos. O primeiro, chamado aqui de Modelo de Theis, 1941 (Tipo 1) escrito desta forma por Glover & Balmer (1954):

$$\frac{\Delta Q}{Q_w} = \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{SL^2}{4Tt}} \right)$$

Cálculo da Interferência

Rio/Aquífero II

O segundo modelo cuja utilização tem aumentado muito na última década, tanto nos EUA, quanto em países da Oceania são os de Hunt 1999 e 2004 (Tipo 3 e 4), assim escritos pelo próprio autor:

$$\frac{Q_s}{Q} = \operatorname{erfc} \left\{ \sqrt{\frac{SL^2}{4Tt}} - \exp \left(\frac{\lambda^2 t}{4ST} + \frac{\lambda L}{2T} \right) \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{\lambda^2 t}{4ST}} + \sqrt{\frac{SL^2}{4Tt}} \right) \right\}$$

$$s_w(x, y, t) = \frac{Q}{4\pi T} \left\{ E_1 \left[\frac{(L-x)^2 + y^2}{4Tt/S} \right] - \int_0^\infty e^{-\theta} E_1 \left[\frac{(L+|x| + 2T\theta/\lambda)^2 + y^2}{4Tt/S} \right] d\theta \right\}$$

Soluções Para a Outorga

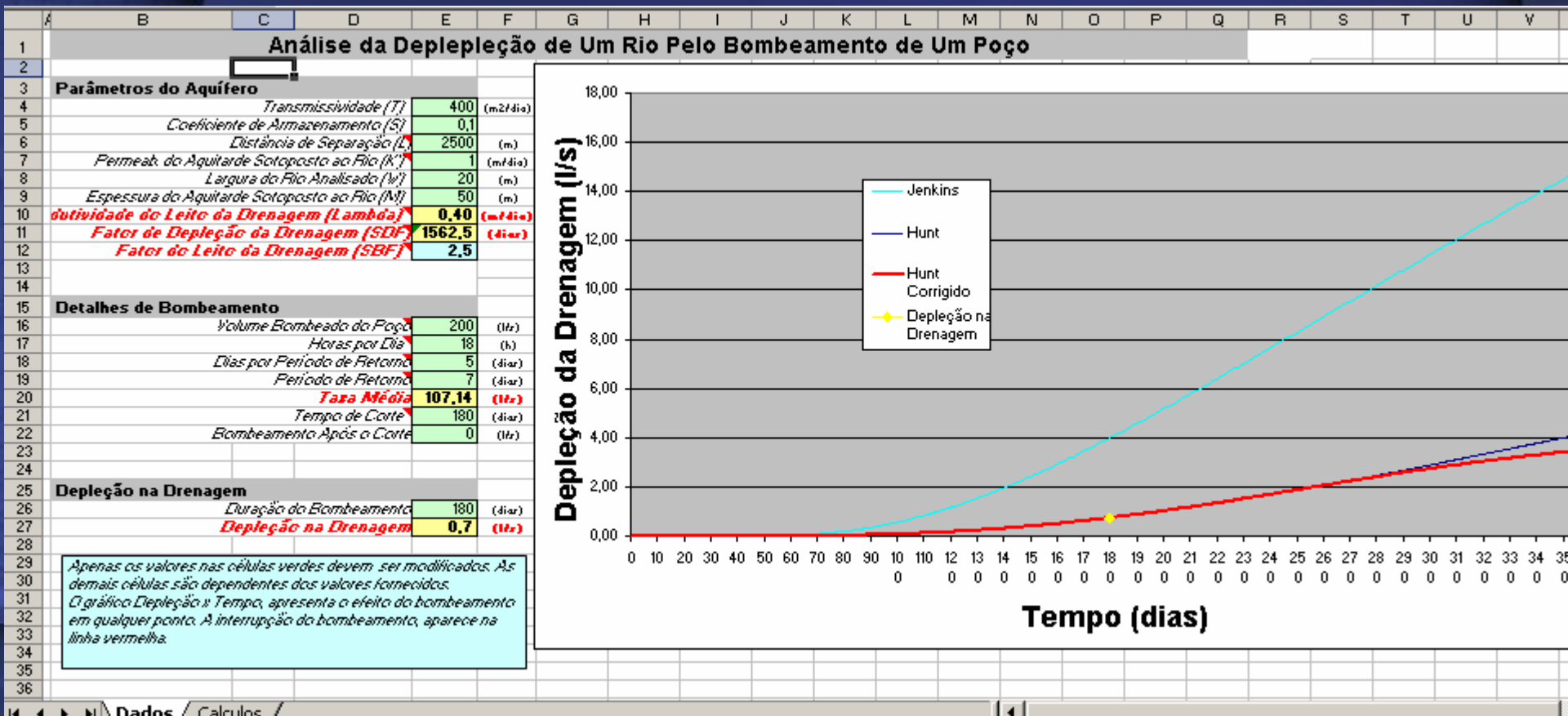
- Estes modelos já foram avaliados por dezenas de pesquisadores, vários deles citados na pesquisa. Aqui cito Schuster (2003), por ter realizado vários estudos na área estudada.
- Todos os autores que analisaram ou utilizaram os métodos analíticos são unânimes em dois pontos:
 - Métodos analíticos são de fácil utilização e;
 - Exageram na depleção produzida pelo poço no rio.

Soluções Para a Outorga

- Diante das vantagens da utilização destes modelos analíticos para a avaliação das interferências rio/aquífero, podemos utilizá-los nos procedimentos de outorga, desde que o cálculo possa ser realizado de forma simples e rápida.
- Para tanto foram elaboradas macros que possibilitam sua solução rápida em planilhas eletrônicas como o Microsoft-Excel ou o BrOffice-Calc.

Soluções no Excel - Theis e Hunt

Nesta pesquisa, foram aproveitados os recursos do excel e utilizadas macros para efetuar os cálculos.



Resultados Obtidos I

Na aplicação dos modelos analíticos (Theis e Hunt), foram utilizados os mesmos dados das modelagens numéricas e comparados os resultados.

Os valores mostraram-se bastante coerentes (analíticos e numéricos). Indicando que os impactos são minimizados, quando os poços são afastados 4.000 metros do rio mais próximo e 7.000 metros entre si, com uma vazão máxima de 500 m³/h por poço.

Nestas condições os rios e o aquífero estariam consideravelmente protegidos.

Resultados Obtidos II

Estes resultados não podem ser aplicados, pois na prática inviabilizam a utilização de água subterrânea na região (de fato seria possível perfurar apenas 40 poços em todo o Sistema Aquífero Urucuia na Bahia, sendo 16 na bacia do Grande).

Mais adequado é avaliar o volume que cada poço depleciona do rio e abater este volume de futuras outorgas de água superficial.

Os modelos analíticos demonstraram poder calcular isto rapidamente para cada poço ou conjunto de poços.

Resultados Obtidos III

As outorgas para uso da água subterrânea no Sistema Aquífero Urucuia, de acordo com os registros do INGÁ (2010), totalizavam um volume de aproximadamente $9,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Valor relativamente baixo em comparação com os volumes de água estimados para o escoamento de base da região, estimado em $677 \text{ m}^3/\text{s}$, e mesmo para o rio Grande ($168 \text{ m}^3/\text{s}$) (ANA, 2013).

As retiradas, mesmo no pior cenário analisado, estariam comprometendo menos de 2% do escoamento de base regional, não devendo impactar fortemente na vazão dos rios, em escala regional.

Resultados Obtidos IV

Para atender as necessidades econômicas, sociais e ambientais, sugerimos algumas etapas lógicas para a utilização integrada dos recursos hídricos:

- 1) Estabelecer presença de conexão hidráulica;
- 2) Avaliar o potencial de uso das águas subterrâneas, considerando o impacto aceitável nos rios e;
- 3) *Realizar avaliações integradas.*

Resultados Obtidos V

Redefinir os termos técnicos:

- *Reserva reguladora; potencialidade; rendimento ou; aproveitamento sustentável (não levam em conta as águas superficiais nem que a recarga de água subterrânea pode diminuir.*
- *Na verdade estes termos se referem a taxas de bombeamento seguras, se não se usar água superficial.*
- *O aproveitamento sustentável deve levar em conta o escoamento de base e as condições de secas mais severas.*

Finalizando - Áreas onde os modelos analíticos apoiam a gestão integrada

- Minimizando a tradicional separação institucional da água superficial e subterrânea, que resulta fundamentalmente em barreiras de comunicação
- Reconhecendo que a sustentabilidade deve permitir incrementos na demanda de água para atividades econômicas e desenvolvimento humano.
- Reduzindo riscos nas decisões de gestão – *como responder a grandes demandas.*

Muito Obrigado a Todos...