

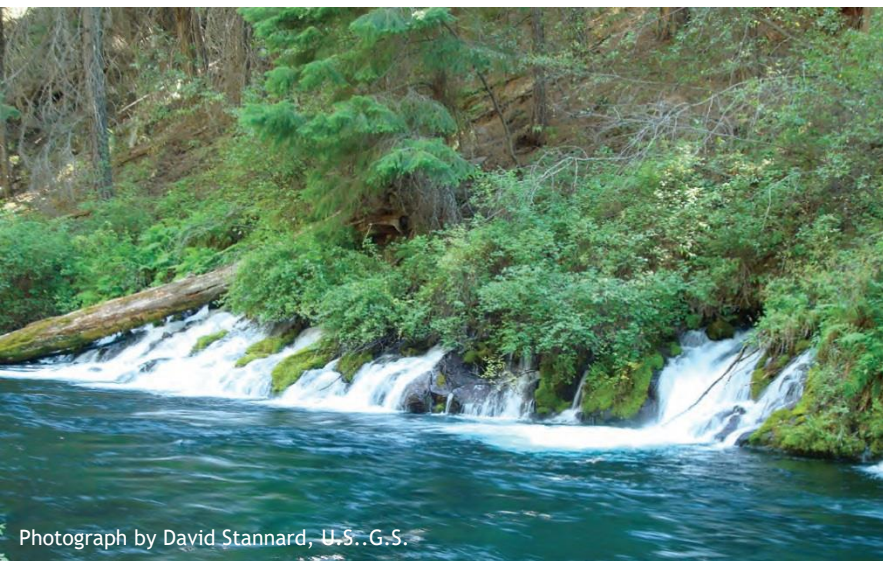
Propostas metodológicas para a gestão Integrada de recursos hídricos superficiais e subterrâneos

Fernando Roberto de Oliveira

Coordenação de Águas Subterrâneas SIP/ANA



Photograph by Stanley Leake, U.S.G.S.

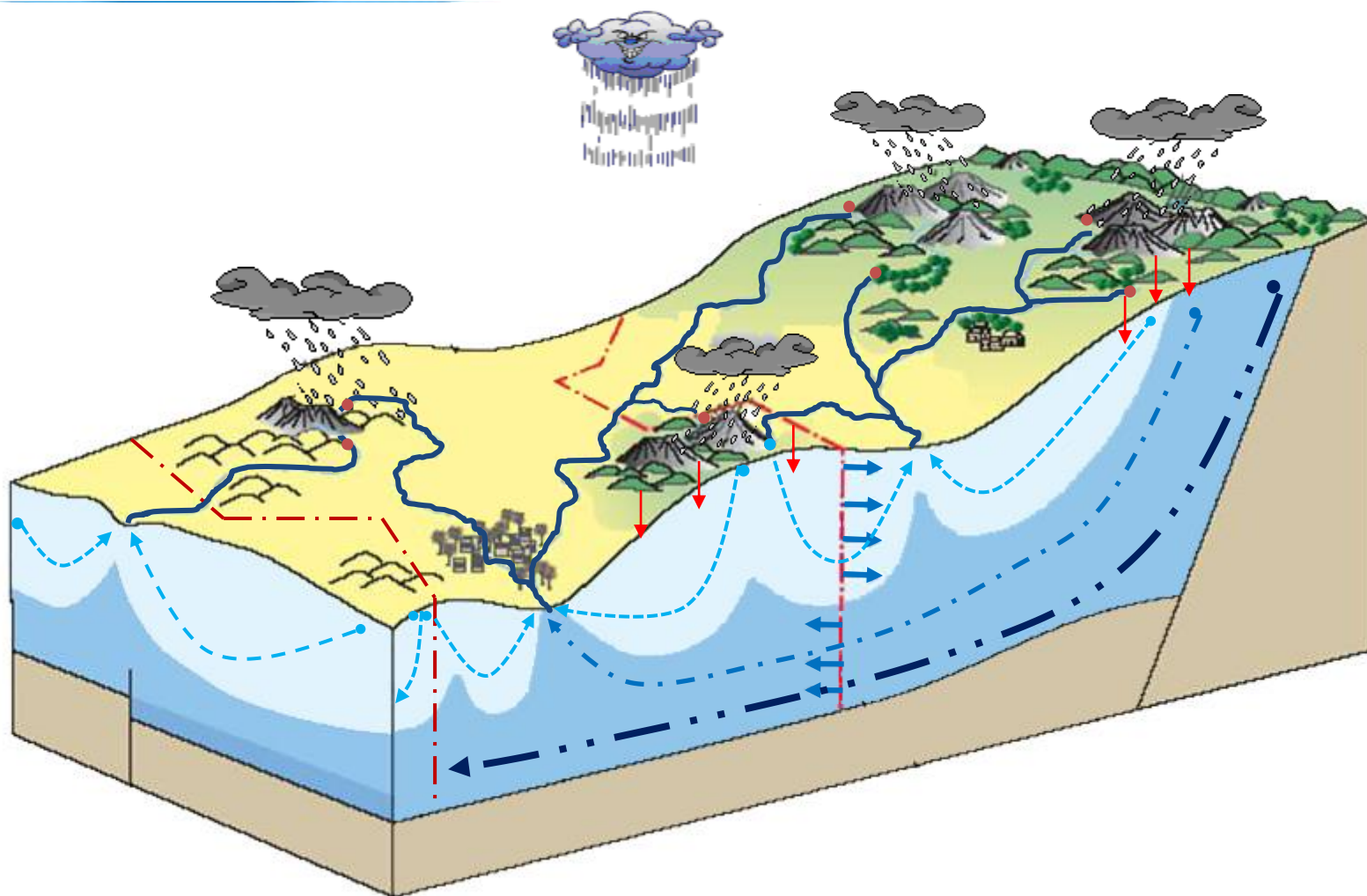


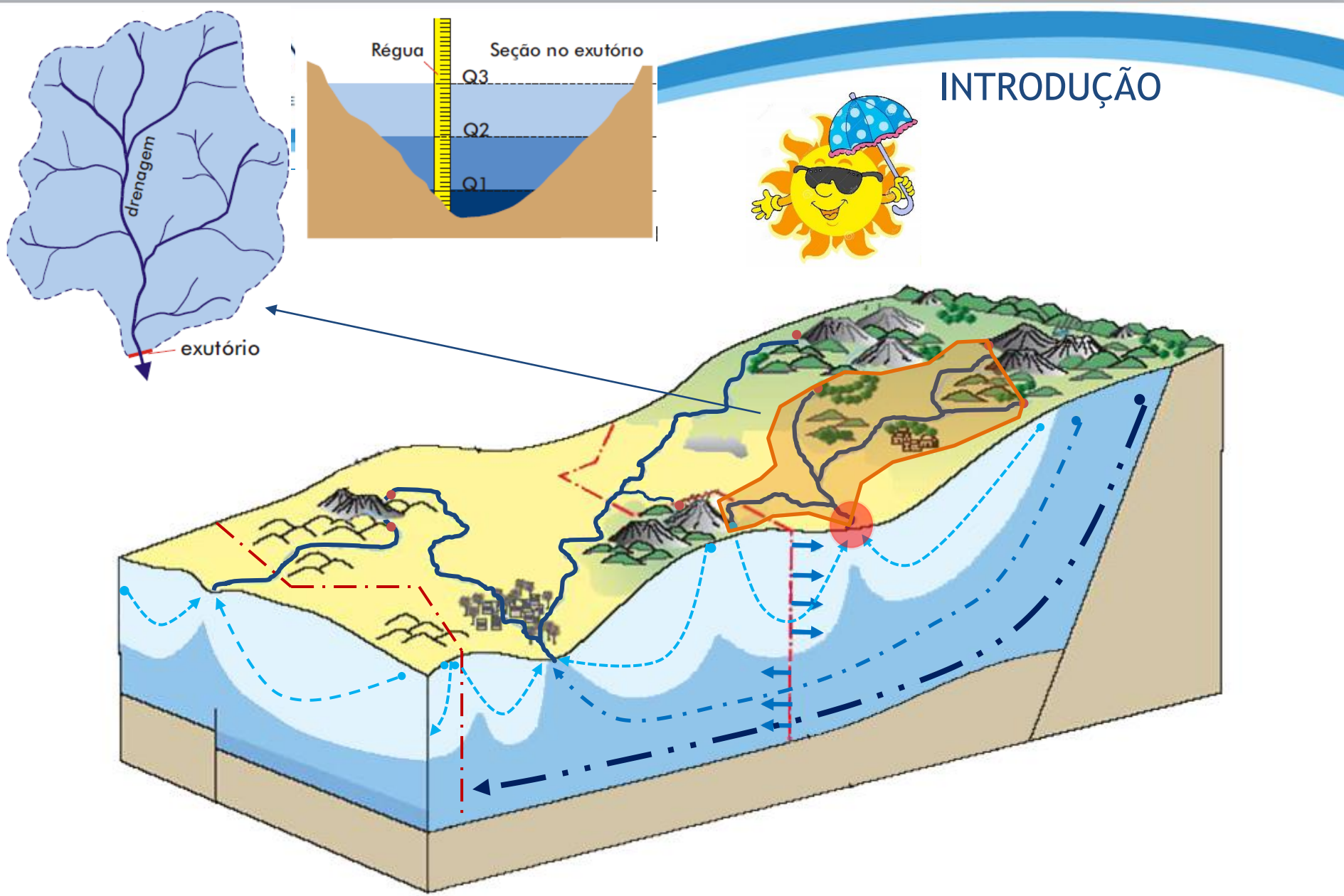
Photograph by David Stannard, U.S.G.S.

Brasília, DF- 15 de junho de 2016

Estrutura da Apresentação

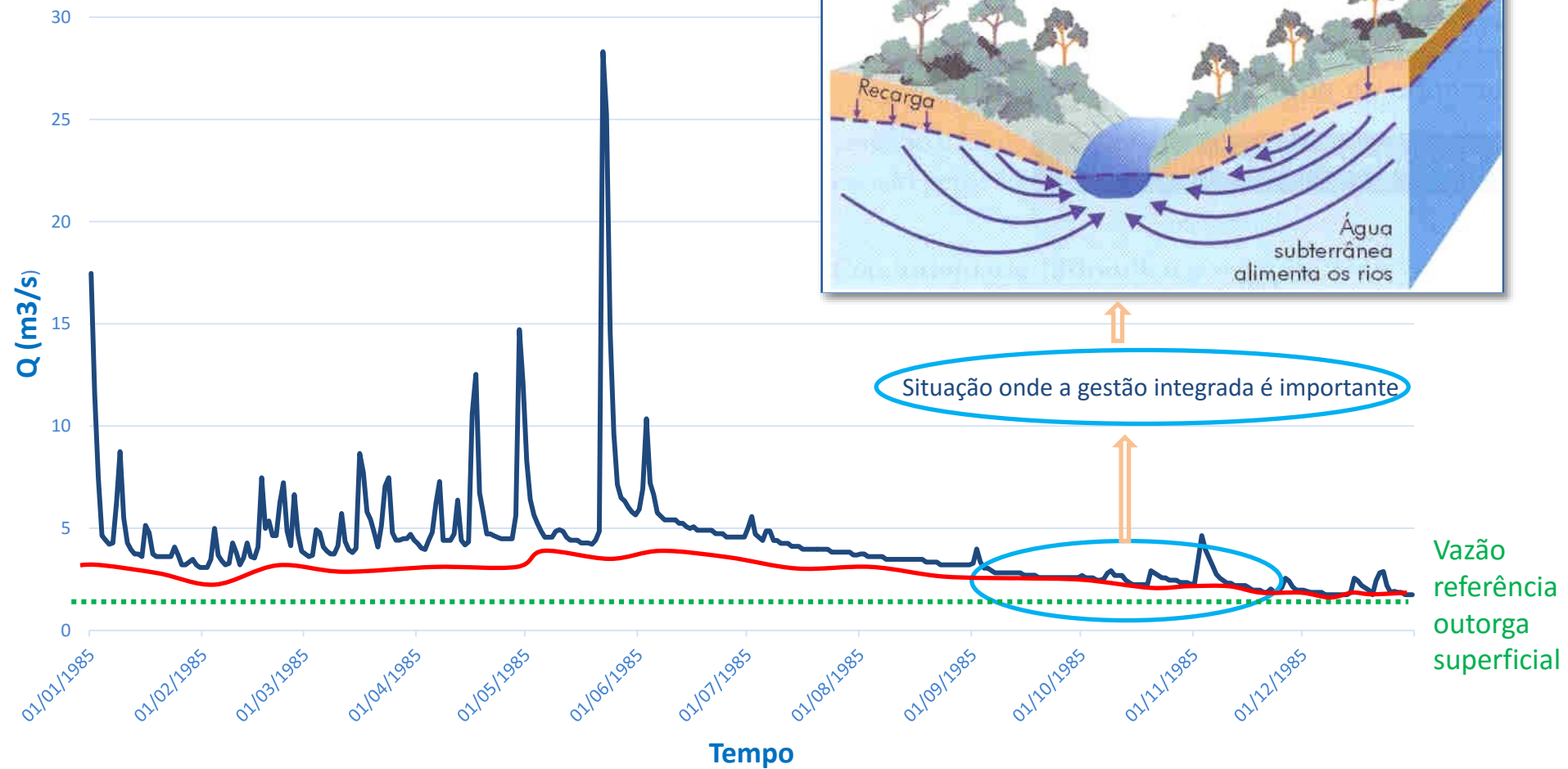
- Introdução;
- Algumas metodologias para a avaliação integrada da disponibilidade hídrica subterrânea e superficial;
- Comentários.

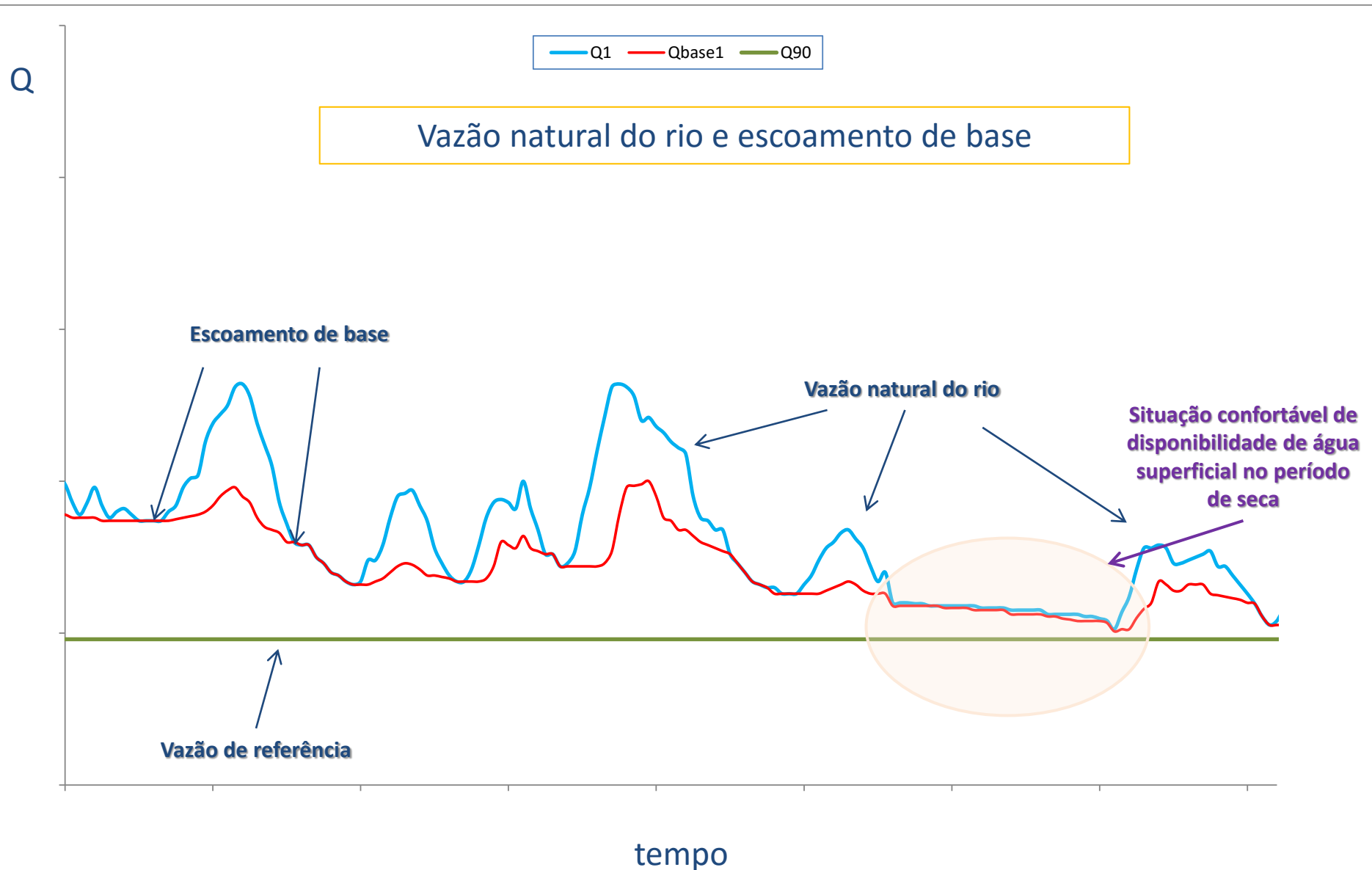




Visão sistêmica do ciclo hidrológico

(Puri, 2002; ANA, 2010)





Hidrograma com separação de escoamentos

(ANA, 2013)

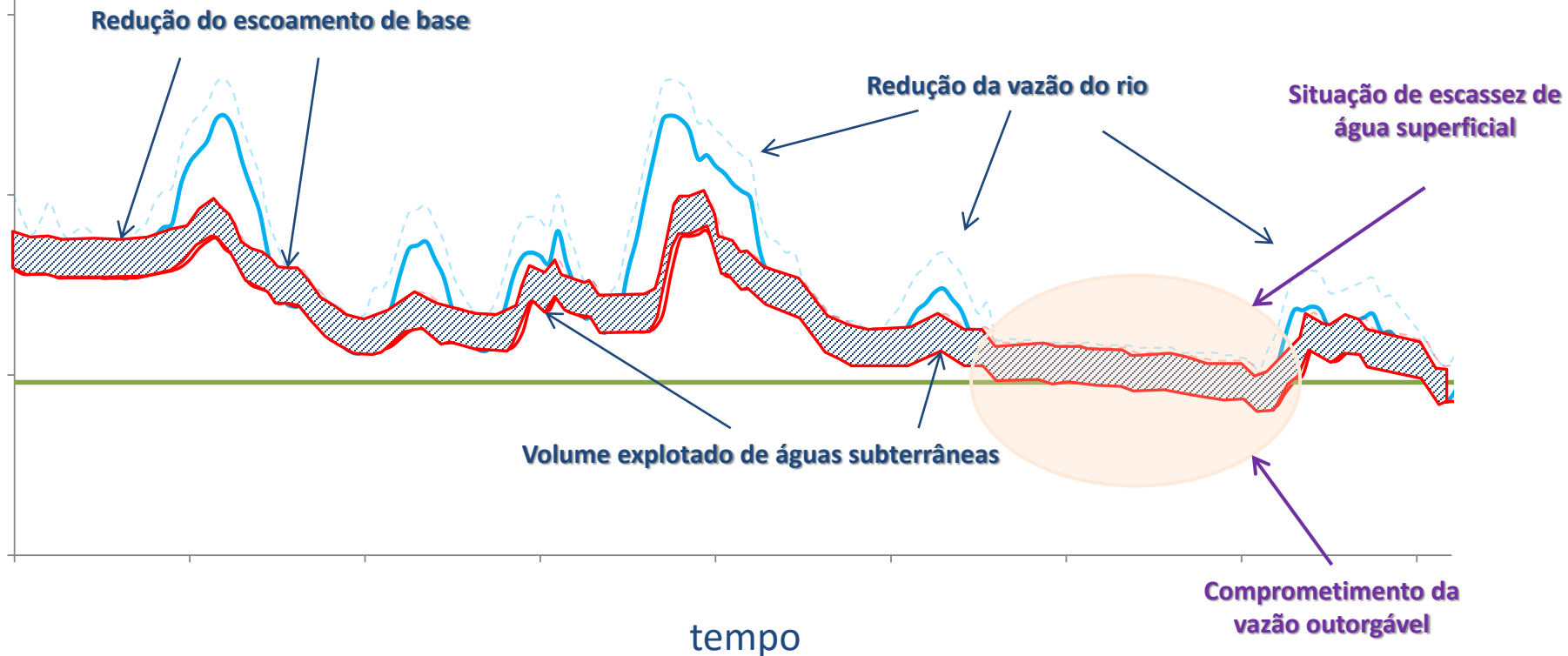
Redução do escoamento de base devido à exploração de águas subterrâneas



Redução da vazão natural do rio

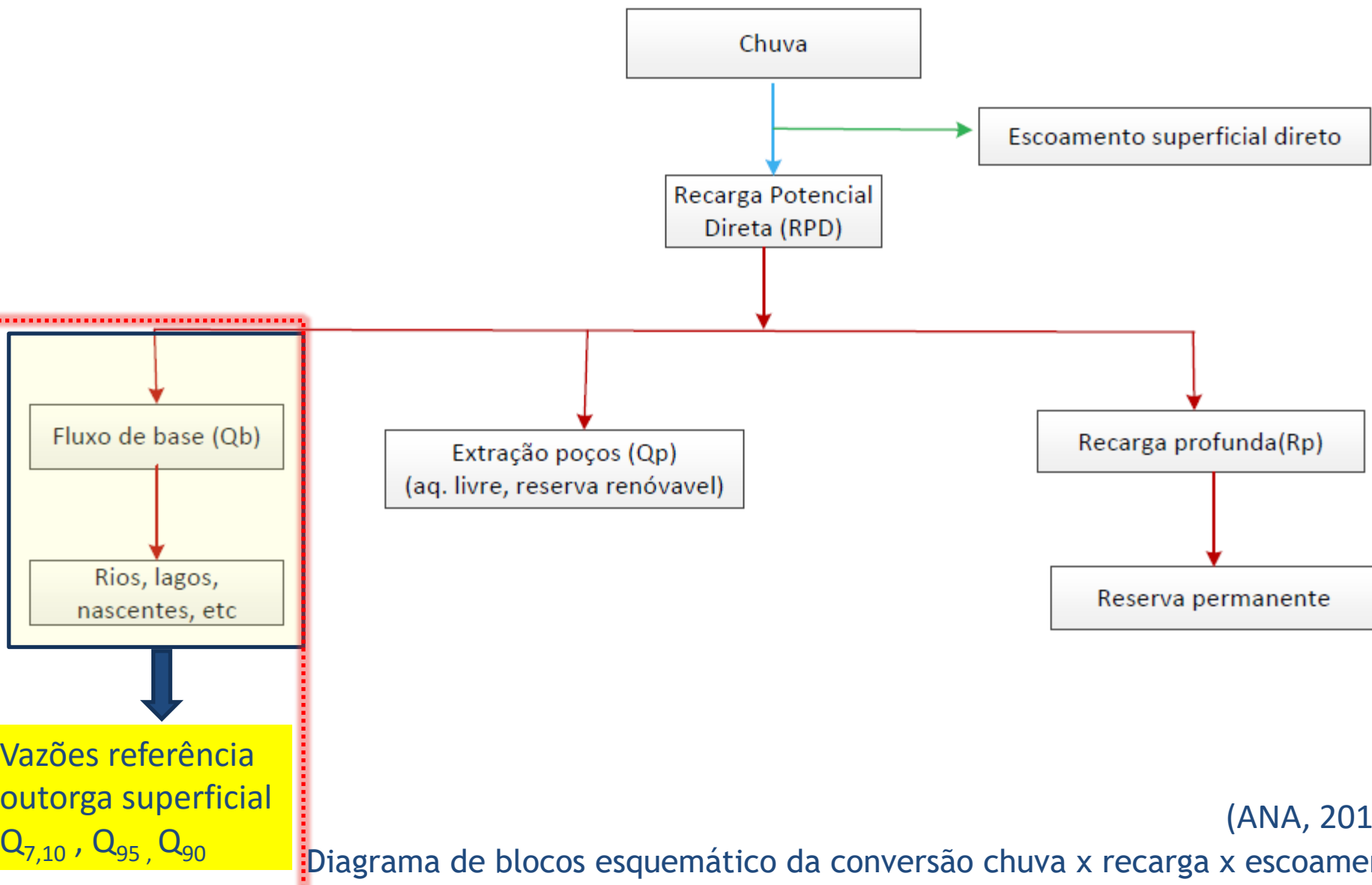
Q

Q1 Q2 Qbase1 Qbase2 Q90



Hidrograma com separação de escoamentos

(ANA, 2013)



(ANA, 2014)

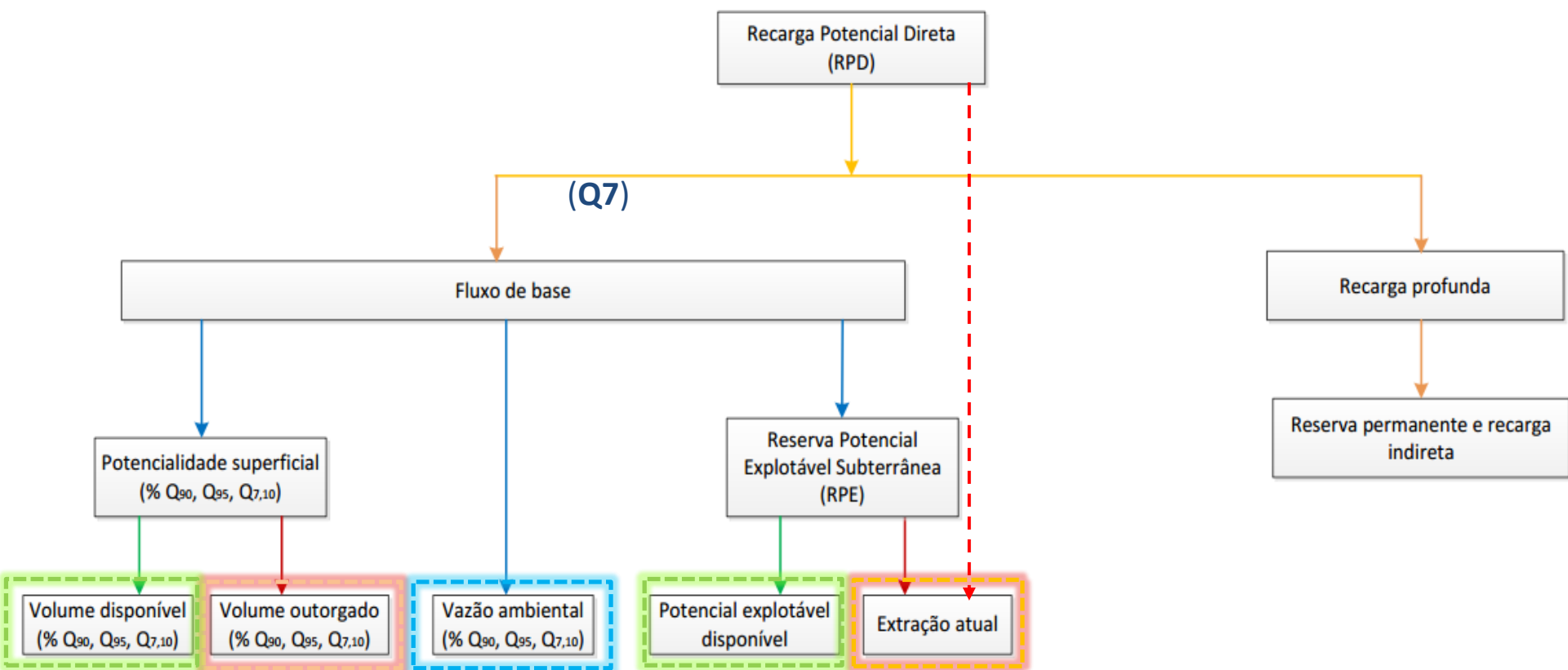
Diagrama de blocos esquemático da conversão chuva x recarga x escoamento

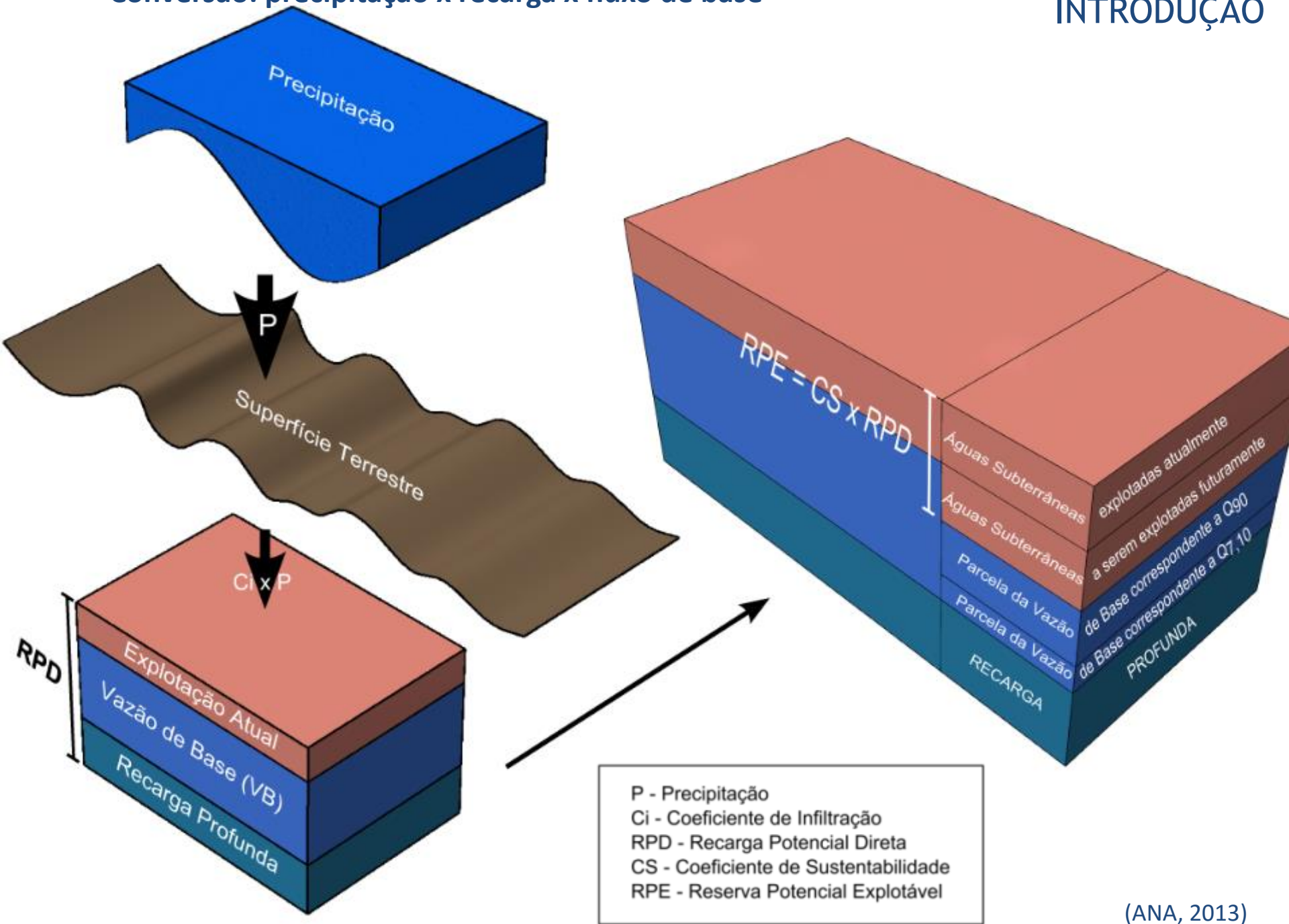
Dados de entrada ➡

Recarga (RPE = RPD X CS)

Dados de saída ➡

Fluxo de base





O que e como quantificar?

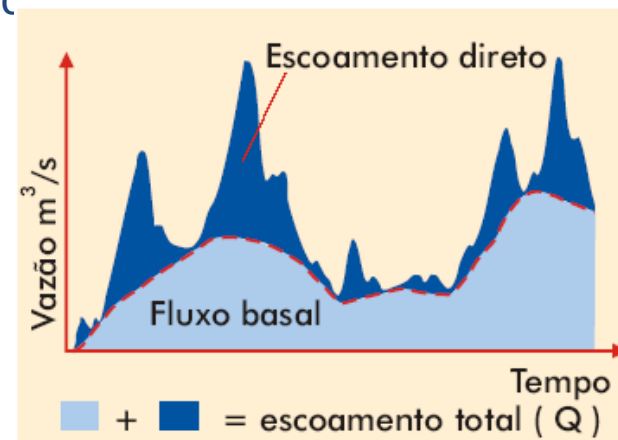
➤ Recarga

- Balanço hídrico
- Taxa de infiltração
- Variação níveis poços
- Isótopos
-

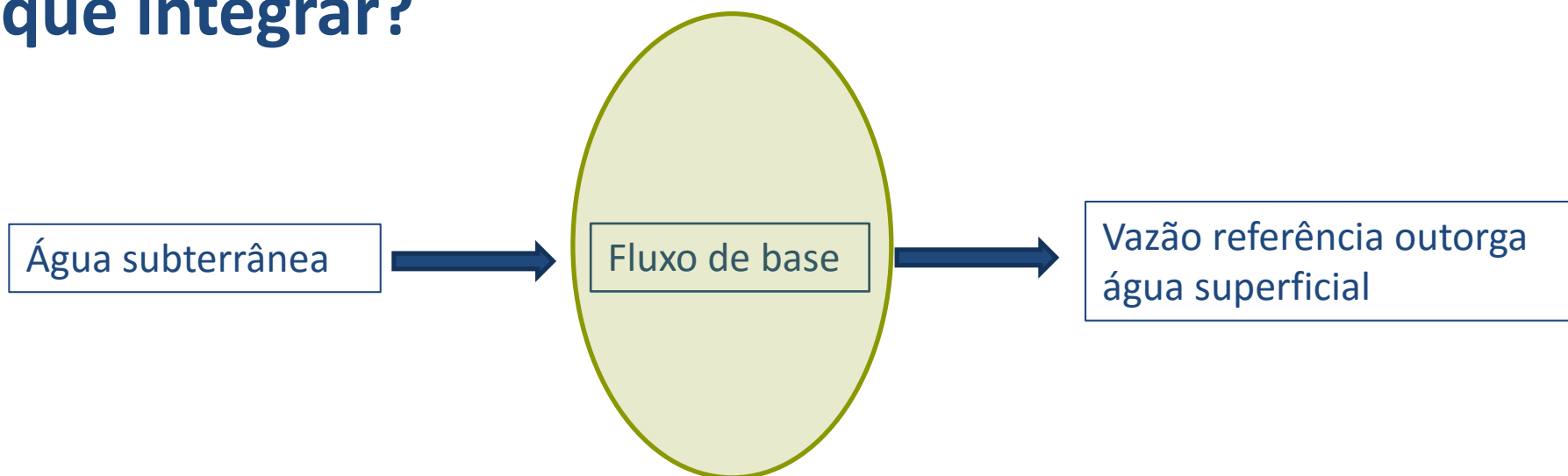
➤ Fluxo de base

- Vazões mínimas (Q_7 , $Q_{7,10}$; Q_{90} , Q_{95})
- Relações curva permanência Q_{90}/Q_{50}
- Curva recessão
- Separação hidrogramas (métodos gráficos)
- Métodos Numéricos
-

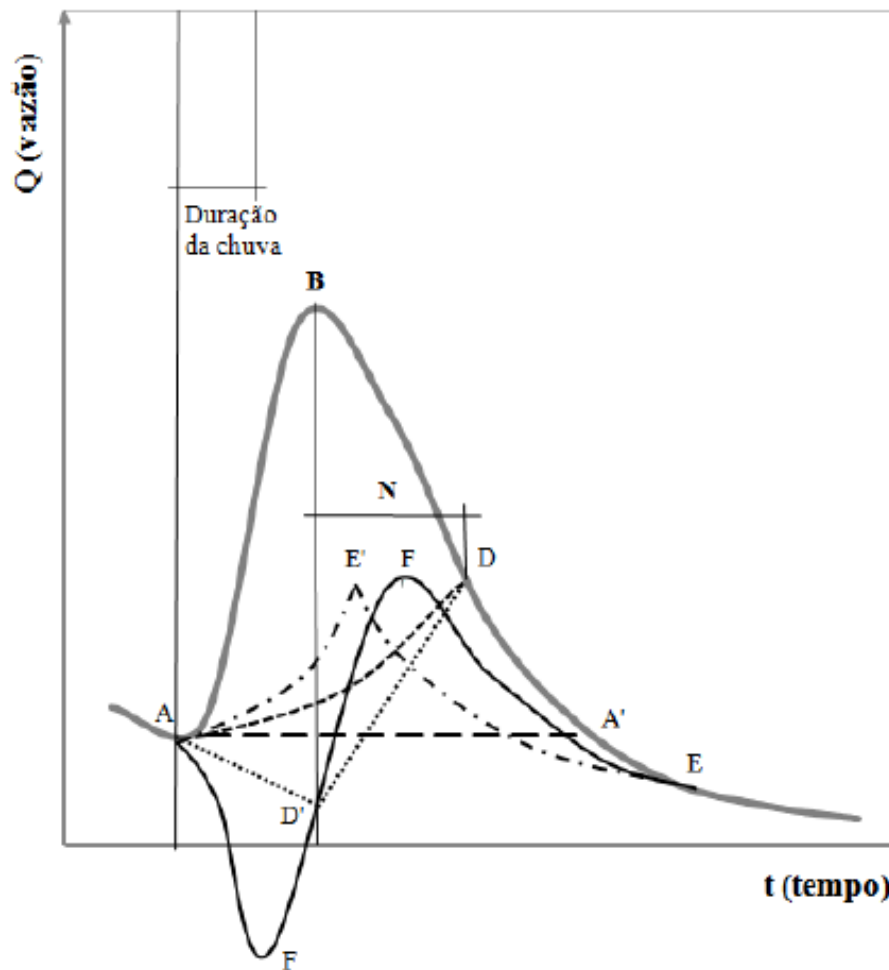
SEPARAÇÃO DE ESCOAMENTO



O que integrar?



**integração entre as componentes
subterrânea e superficial**



LEGENDA

- Vazão total
- A F F E - Suposição válida para caso em que predominam aquíferos confinados.
- A D' D - Prolongamento da recessão anterior ao pico de escoamento até o ponto D' , abaixo do pico, e prolonga até o ponto D , situado N dias após o pico
- A D - Alguns autores utilizam este método como uma simplificação do anterior.
- . - . A E' E - Prolongamento da recessão após o pico de escoamento, do ponto E até o ponto E' , e unir com o ponto A .
- - - A A' - Supõe o escoamento de base constante durante o evento de cheia.

Estimativa do escoamento de base por intermédio da vazão mínima Q_7

VAZÃO MÍNIMA Q_7

- ❑ A vazão Q_7 representa o valor médio da série histórica das vazões mínimas das médias móveis de sete dias, ao longo do período de dados das estações fluviométricas.
- ❑ Em sendo a vazão mínima das médias móveis de sete dias, considerada ano a ano, representa a contribuição subterrânea, uma vez que é medida em época de baixas vazões, ou seja, durante a estiagem, quando a vazão superficial é mantida pelo fluxo de base.
- ❑ Materializa a contribuição do fluxo de base ao escoamento superficial total.
- ❑ Calculado a partir de séries de vazões naturais ou naturalizadas, sem a influência de regularizações, quando estas ocorrem, devem ser filtradas .

P1- Série de vazões diárias

Dia	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
1	26,1	12,5	10,0	26,6	7,5	7,3	6,3	6,3	11,0	5,9	6,5	13,2
2	25,6	11,8	8,8	20,8	7,5	7,3	6,3	6,0	8,1	8,0	6,5	12,4
3	21,2	12,4	8,7	16,5	7,5	7,2	6,2	6,0	6,8	12,3	6,5	10,1
4	34,2	11,4	8,7	14,1	7,3	7,1	6,2	5,7	6,2	13,3	7,4	8,6
5	40,2	11,9	8,7	14,1	7,3	7,1	6,2	5,7	5,8	10,3	12,0	7,8
6	33,3	13,6	9,0	14,2	7,2	7,1	6,2	5,7	5,6	6,8	16,2	10,2
7	32,0	12,7	10,1	15,2	7,1	7,0	6,2	5,7	5,6	6,4	16,8	7,7
8	30,5	13,9	10,9	16,2	7,1	7,0	6,0	5,7	5,9	6,2	16,0	7,3
9	20,8	14,6	10,4	13,6	7,0	7,0	6,0	5,5	6,3	6,3	8,9	7,8
10	16,4	15,5	10,6	11,6	7,0	6,8	6,0	5,5	5,8	7,0	8,7	7,8
11	16,0	15,1	12,6	10,9	7,0	6,8	6,0	5,5	5,5	7,1	10,2	7,7
12	15,0	12,6	13,8	10,8	7,1	6,8	6,0	5,5	5,5	6,5	8,3	10,2
13	14,0	12,0	13,1	10,6	9,3	6,8	6,0	5,5	5,5	6,7	9,0	10,6
14	14,0	14,3	13,0	10,4	10,1	6,8	6,0	5,5	5,6	8,3	14,9	10,2
15	17,2	15,9	10,7	9,9	10,9	6,8	6,2	5,5	6,2	6,6	17,3	9,9
16	20,6	12,4	10,0	9,5	9,4	6,8	6,2	5,5	6,8	6,0	18,1	12,8
17	16,8	12,2	8,6	9,4	10,1	6,7	6,2	5,4	7,3	5,8	16,8	25,2
18	12,8	15,2	8,9	9,2	10,9	6,7	6,3	5,3	7,1	5,9	13,5	23,0
19	11,6	16,8	8,7	9,0	10,1	6,7	5,9	5,3	6,2	6,1	13,4	20,2
20	12,6	13,7	14,6	8,9	8,7	6,7	5,9	5,3	5,9	8,0	14,6	19,2
21	11,6	11,2	11,0	8,6	8,1	6,7	5,8	5,5	5,6	11,5	13,7	18,6
22	13,0	10,4	10,1	8,4	8,0	6,6	5,7	5,3	5,5	16,0	14,1	16,2
23	14,8	10,0	10,1	8,4	7,8	6,5	5,9	5,3	5,5	18,5	13,2	14,2
24	19,0	9,9	9,4	8,2	8,0	6,5	6,0	5,3	5,6	17,7	10,8	13,6
25	20,4	9,9	8,7	8,0	7,9	6,5	6,3	5,5	5,8	13,2	10,1	13,0
26	24,7	9,9	8,2	8,0	7,7	6,5	6,7	5,5	5,7	9,1	10,1	12,8
27	17,4	9,9	9,3	8,0	7,8	6,3	6,5	5,5	5,7	7,8	8,4	11,6
28	14,8	9,5	10,7	7,8	8,1	6,3	6,2	5,5	5,8	6,5	8,0	14,4
29	13,0		25,2	7,7	7,8	6,3	6,2	5,9	6,0	6,5	8,4	17,0
30	15,4		26,6	7,7	8,0	6,3	6,7	6,3	5,9	6,2	11,9	18,2
31	14,6		29,1		7,7		6,5	10,2		6,2		21,2

P 2- Cálculo das médias móveis

Ano 2001		Média Móvel		Média Móvel
Dia	Agosto	7 dias	Setembro	7 dias
1	6,3		11,0	7,8
2	6,0		8,1	7,8
3	6,0		6,8	7,2
4	5,7	5,9	6,2	7,0
5	5,7	5,8	5,8	6,3
6	5,7	5,7	5,6	6,0
7	5,7	5,6	5,6	5,9
8	5,7	5,6	5,9	5,8
9	5,5	5,6	6,3	5,7
10	5,5	5,5	5,8	5,7
11	5,5	5,5	5,5	5,7
12	5,5	5,5	5,5	5,7
13	5,5	5,5	5,5	5,8
14	5,5	5,5	5,6	6,0
15	5,5	5,4	6,2	6,3
16	5,5	5,4	6,8	6,4
17	5,4	5,4	7,3	6,4
18	5,3	5,4	7,1	6,4
19	5,3	5,4	6,2	6,3
20	5,3	5,4	5,9	6,2
21	5,5	5,4	5,6	5,9
22	5,3	5,4	5,5	5,7
23	5,3	5,4	5,5	5,7
24	5,3	5,4	5,6	5,6
25	5,5	5,4	5,8	5,7
26	5,5	5,5	5,7	5,7
27	5,5	5,6	5,7	5,8
28	5,5	6,3	5,8	
29	5,9	7,1	6,0	
30	6,3	7,5	5,9	
31	10,2	7,7		

5,4

5,6

P3- Quadro com os valores de Q_7 para todos os anos da série

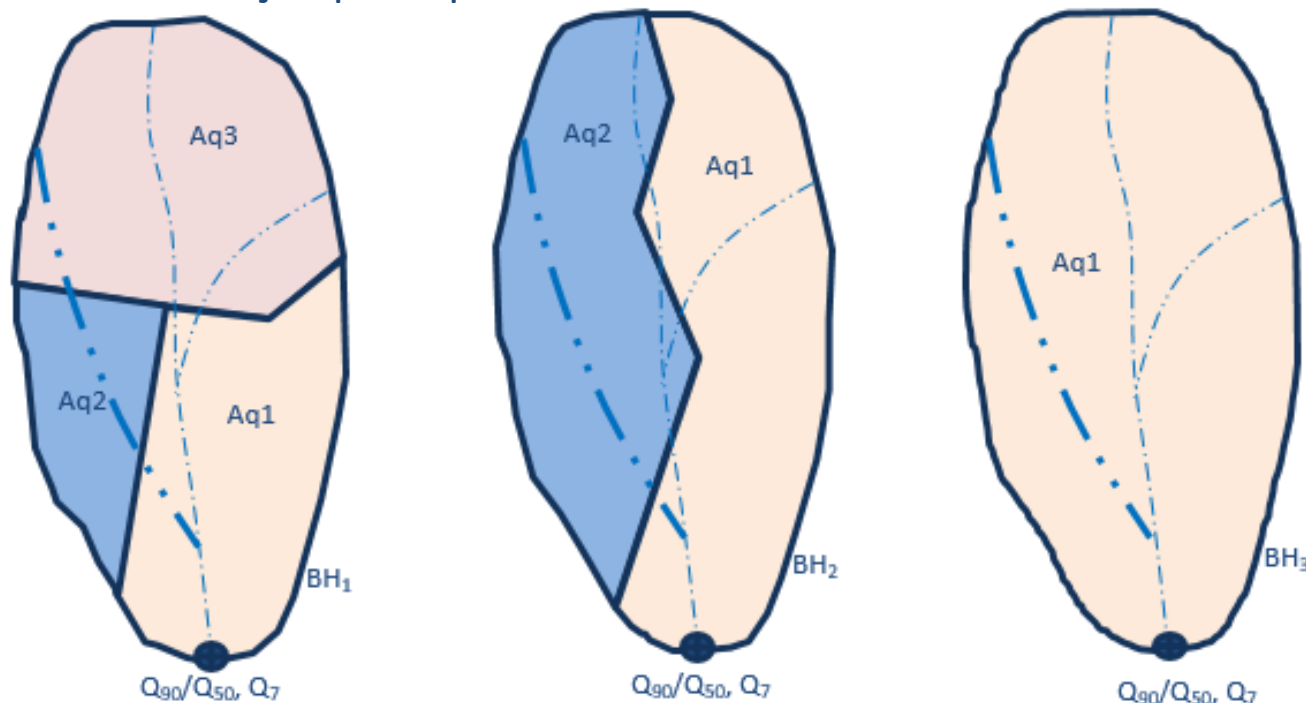
Série de valores de média móvel de 7 dias, para cada ano

Ano	$Q_7 (\text{m}^3 \text{s}^{-1})$	Ano	$Q_7 (\text{m}^3 \text{s}^{-1})$	Ano	$Q_7 (\text{m}^3 \text{s}^{-1})$
1933	5,4	1956	5,8	1979	6,6
1934	5,2	1957	6,2	1980	6,7
1935	6,8	1958	6,1	1981	6,7
1936	6,0	1959	5,2	1982	8,0
1937	6,0	1960	5,6	1983	11,5
1938	7,5	1961	5,8	1984	4,9
1939	5,3	1962	6,4	1985	5,9
1940	5,9	1963	4,6	1986	5,4
1941	5,3	1964	4,5	1987	6,9
1942	6,1	1965	6,7	1988	7,3
1943	7,2	1966	6,9	1990	6,5
1944	5,6	1967	6,6	1991	7,1
1945	5,8	1968	4,6	1992	6,6
1946	6,4	1969	5,7	1993	5,6
1947	8,0	1970	6,1	1994	5,0
1948	4,9	1971	4,7	1995	5,0
1949	4,2	1972	6,9	1996	6,8
1950	6,7	1973	6,4	1997	6,4
1951	6,3	1974	5,6	1998	5,8
1952	6,5	1975	4,7	1999	4,9
1953	4,2	1976	7,1	2000	5,9
1954	4,2	1977	6,2	2001	5,4
1955	3,6	1978	5,4	Q_7 (média)	6,4

Q_7 (média)= média dos valores de Q_7 dos anos da série (1933 a 2001)

$Q_{7,10} = 4,54 \text{ m}^3/\text{s}$

Qual a contribuição por aquífero?



$$(Q_{90}/Q_{50}, Q_7) BH1 = \sum (P1Aq1) + (P2Aq2) + (P3Aq3)$$

$$(Q_{90}/Q_{50}, Q_7) BH2 = \sum (P1Aq1) + (P2Aq2)$$

$$(Q_{90}/Q_{50}, Q_7) BH3 = Aq1$$

Aq1= aquífero 1 - peso aquífero ($P1$) = ($A1$, $K1$, $ne1$, $dec1$)

Aq2= aquífero 2 - peso aquífero ($P2$) = ($A2$, $K2$, $ne2$, $dec2$)

Aq3= aquífero 3 - peso aquífero ($P3$) = ($A3$, $K3$, $ne3$, $dec3$)

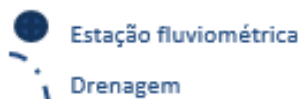
BH1—bacia hidrográfica 1

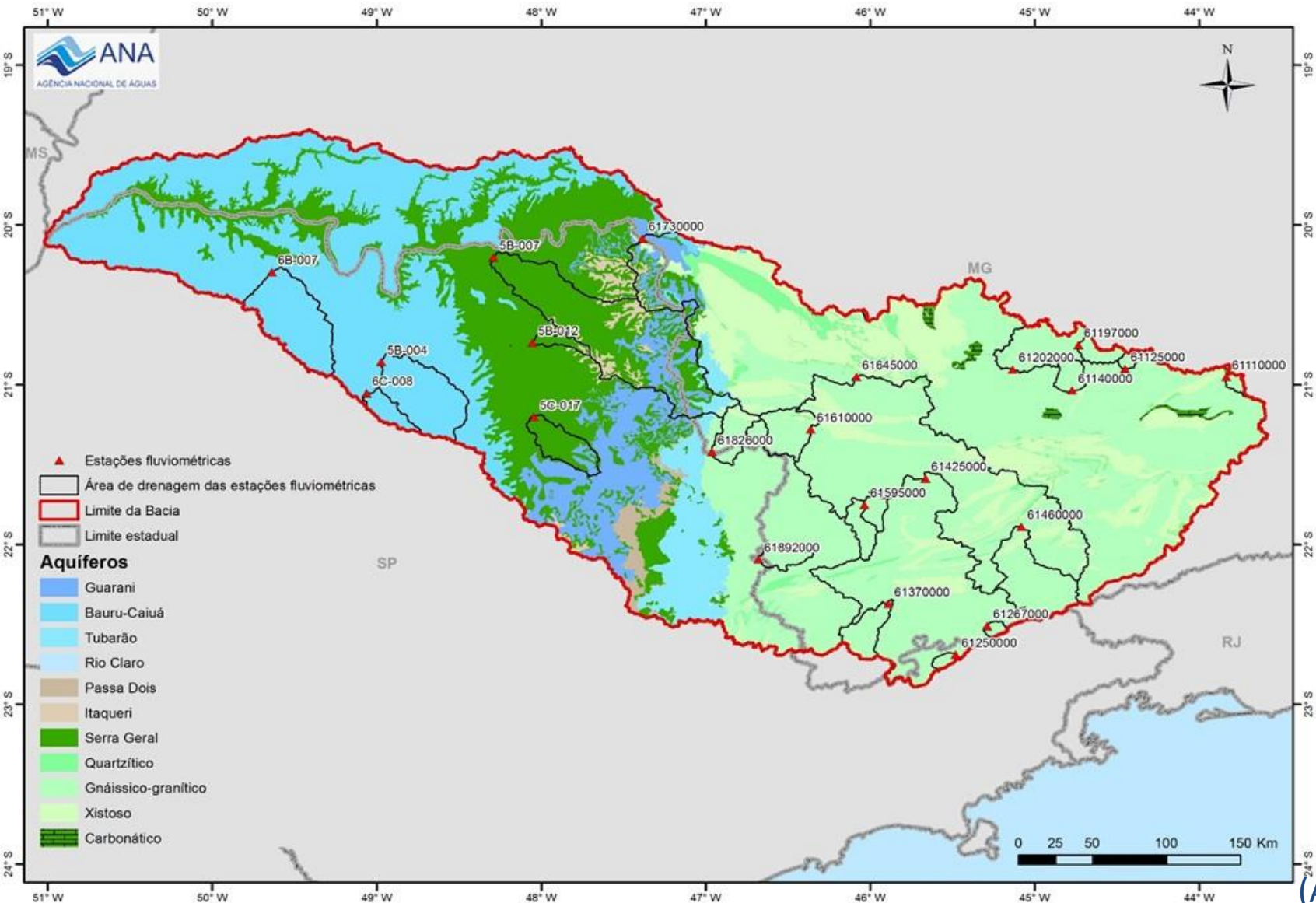
A1= área aflorante do aquífero 1 na bacia hidrográfica

K1 = condutividade hidráulica do aquífero 1

ne1= porosidade eficaz do aquífero 1

dec1 =declividade da área aflorante do aquífero 1





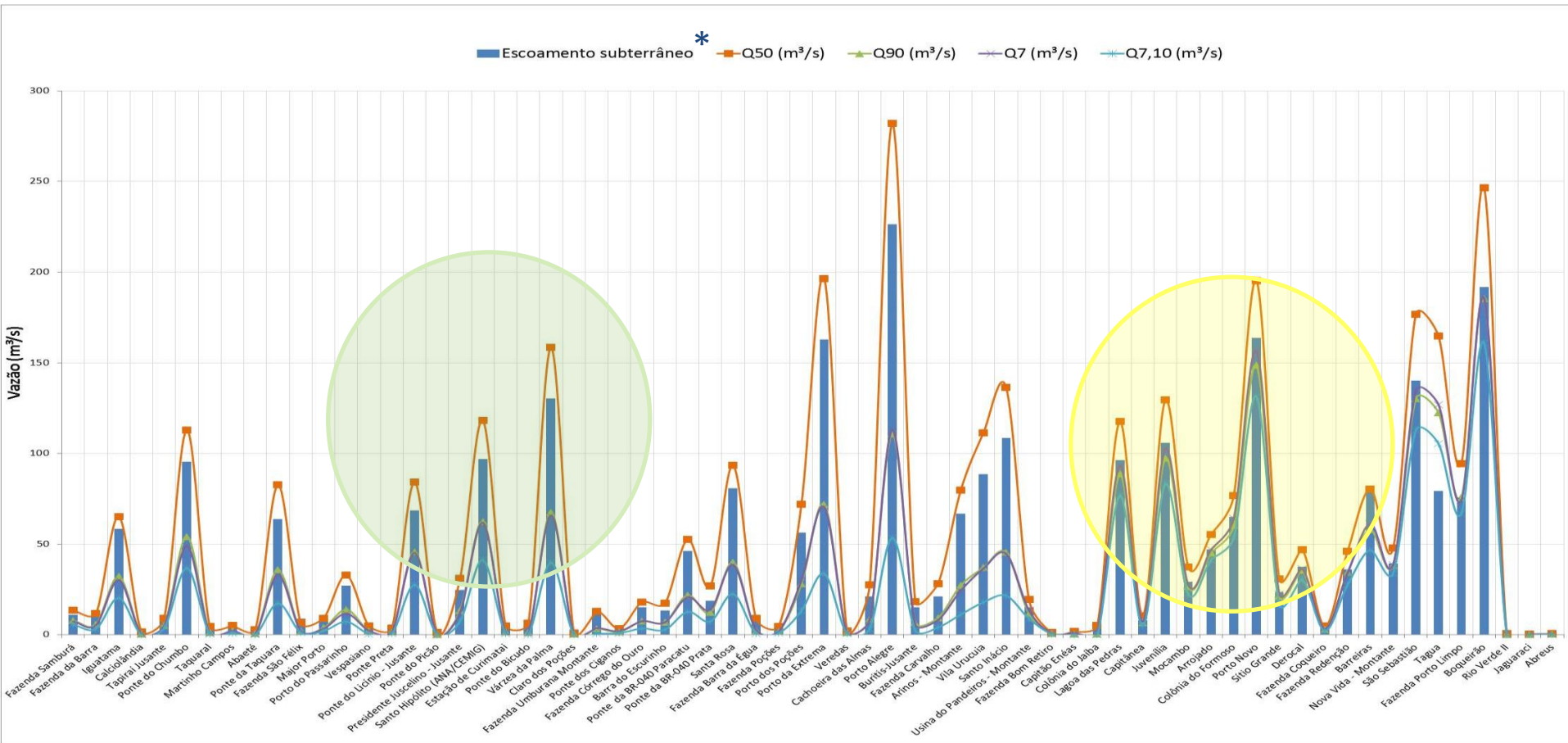
Distribuição estatística dos dados de tendência central para as relações entre a vazão Q_7 com algumas vazões referenciais para outorga de água superficial estações fluviométricas

Parâmetros (N=27)	Q_{90}/Q_7	Q_{95}/Q_7	$Q_{7,10}/Q_7$	Q_7/Q_{mlt}
Média	1,02	0,85	0,59	0,37
Mediana	1,04	0,87	0,61	0,39
Desvio Padrão	0,14	0,15	0,11	0,10
Variância	0,02	0,02	0,01	0,01
Máximo	1,49	1,24	0,77	0,52
Mínimo	0,59	0,29	0,35	0,12
Estação Rifaina *	1,10	0,97	-	0,36

(*) Estação Rifaina (61730000) cobre 43% da área da **Bacia do Grande**.

Parâmetros (N=19)	Q_{90}/Q_7	Q_{95}/Q_7	$Q_{7,10}/Q_7$	Q_7/Q_{mlt}
Média	0,99	0,82	0,56	0,41
Mediana	0,99	0,81	0,61	0,41
Desvio Padrão	0,07	0,07	0,13	0,16
Variância	0,00	0,01	0,02	0,03
Máximo	1,20	0,96	0,74	0,72
Mínimo	0,91	0,64	0,24	0,10
Est. Taquaruçu*	1,01	0,84	0,63	0,39

(*) Estação Taquaruçu cobre 83% da área da **bacia do Paranapanema**



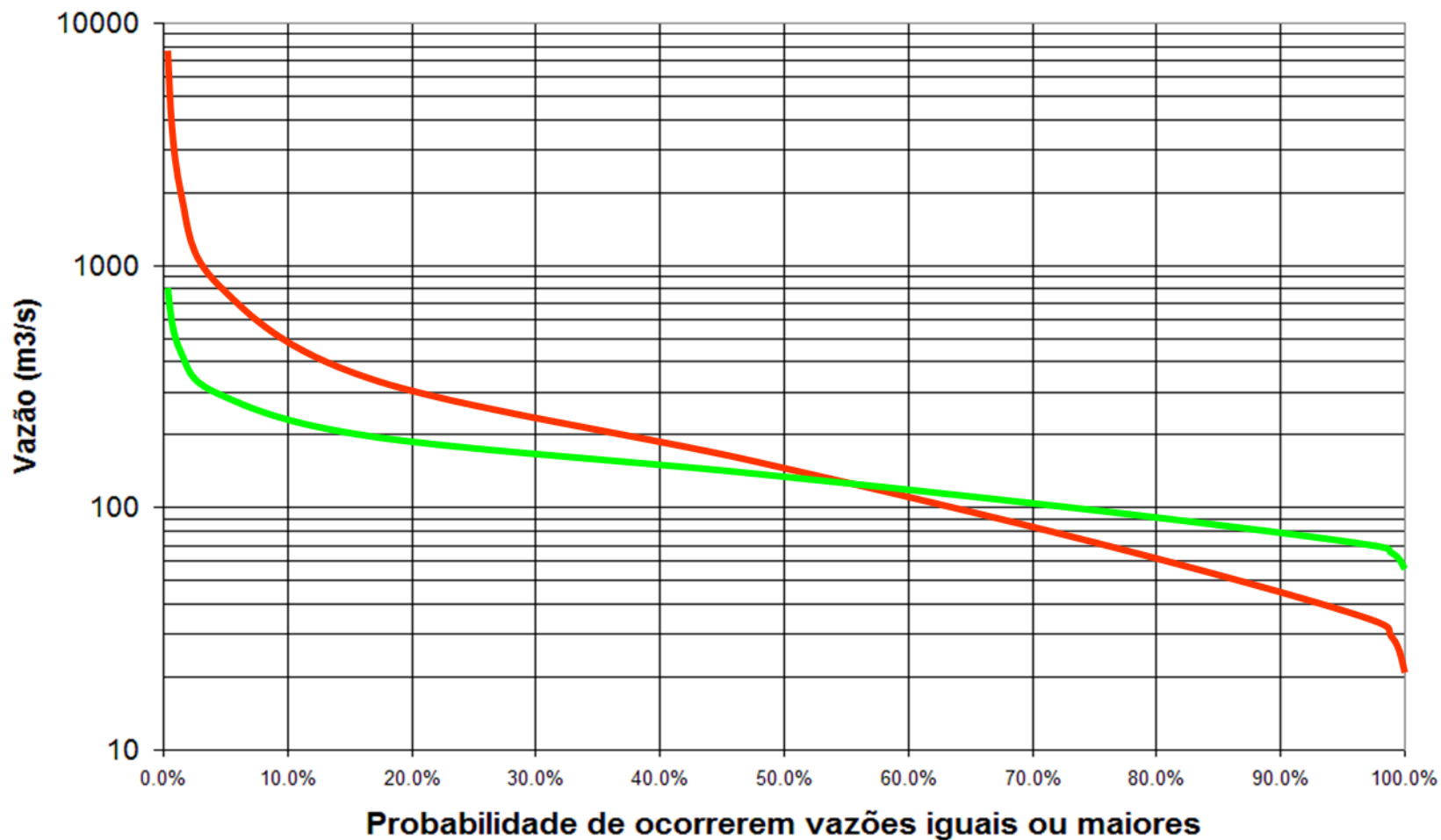
(* escoamento subterrâneo calculado por filtros)

Separação de escoamentos em 59 estações fluviométricas da bacia do São Francisco, cobrindo o Alto, Médio e Sub-Médio São Francisco

RELAÇÃO Q_{90}/Q_{50}

Curva de permanência

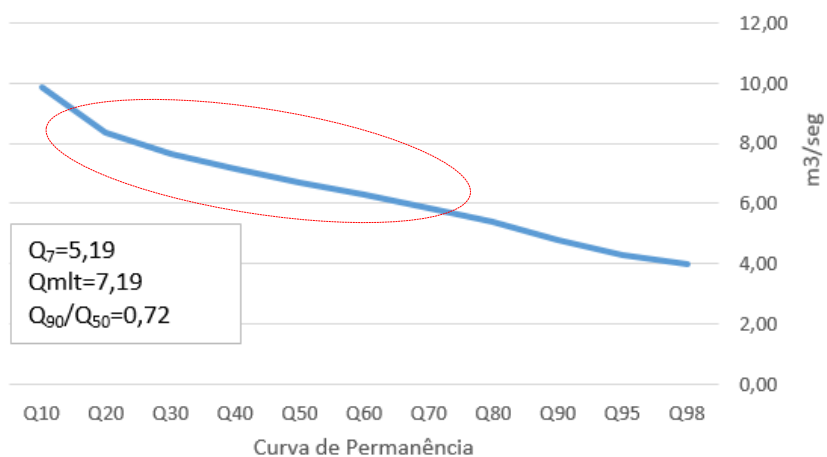
- Representa de modo gráfico, a relação entre a magnitude e frequência com que as vazões são igualadas ou superadas em um dado período de tempo.
- Fornece uma simples, mas concisa, visão gráfica do comportamento hidrológico de uma bacia, quanto à variabilidade das vazões ao longo do tempo.



Forma da curva de permanência da indica o regime do rio, que é função da geologia relevo, área, solo, chuva, clima, urbanização, etc.

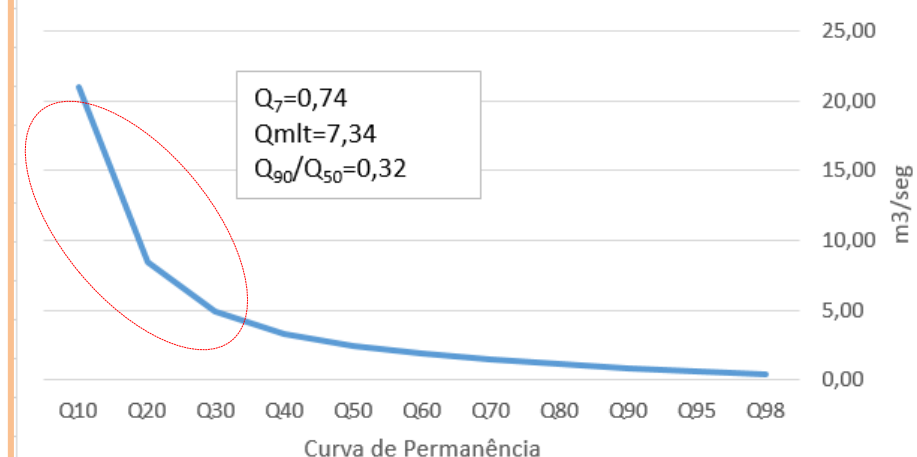
- ❑ A relação Q_{90}/Q_{50} , derivada de vazões características da curva de permanência, indica a **proporção da contribuição da água subterrânea no escoamento** ou o percentual do fluxo de base, sem considerar os efeitos de escala da bacia.
- ❑ **Referências.**
 - Lyne & Hollick (1979)
 - Smothikin (2001)
 - Welderufael & Woyessa (2010)
- ❑ Cálculo da relação Q_{90}/Q_{50} nas diversas estações disponíveis na bacia, deve considerar a com demarcação das áreas de contribuição

Estação 64346000 BC



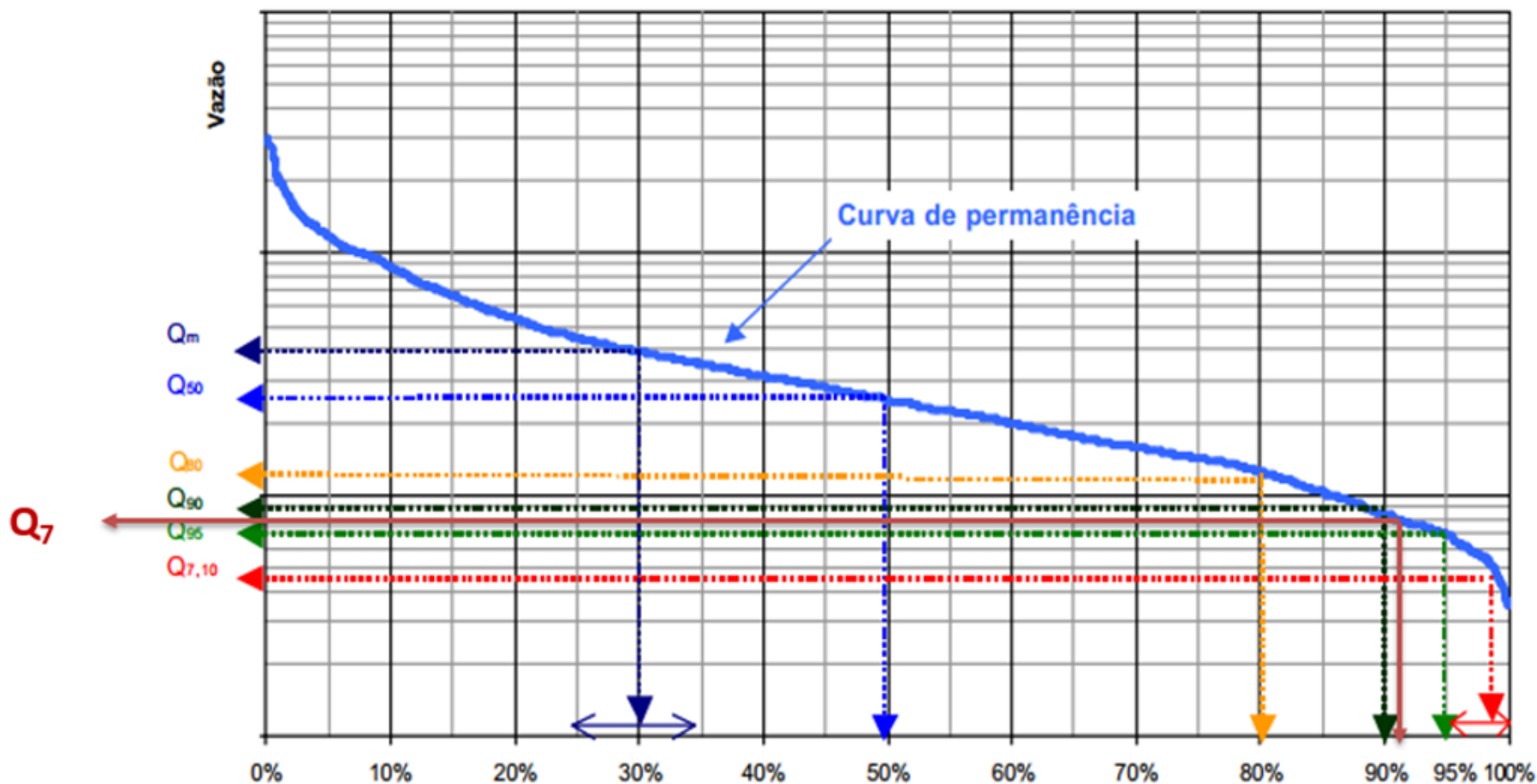
Aquífero com elevadas porosidade e permeabilidade, fluxo de base é parcela importante do escoamento superficial médio

Estação 64135000 PD



Aquífero com baixa permeabilidade, fluxo de base pouco significativo para o escoamento superficial médio.

Forma da curva de permanência em rios alimentados por diferentes aquíferos



Relação de vazões mínimas versus típicas da curva de permanência

- ❑ **United States Geological Survey (USGS):** O programa HYSEP (Sloto & Crouse 1996) fornece três métodos numéricos para separar o escoamento direto e a vazão de base.
- ❑ O método considera que a separação do hidrograma ocorrerá durante a ocorrência de eventos de cheias, até quando o escoamento superficial cessar. A partir daí considera-se que o hidrograma é totalmente sustentado pela vazão de base.
- ❑ Algoritmo usado pelo HYSEP para estimar o tempo de duração do escoamento superficial é baseado na relação empírica $N=A^{0,2}$

Métodos do HYSEP:

- ☐ Métodos do Intervalo Fixo (MIF);
- ☐ Intervalo Deslizante (MID) ;
- ☐ Método do Mínimo Local (MML).

Método de separação		Contribuição subterrânea
Q ₉₀ /Q ₅₀		79%
Hysep MIF/MID		94%
Hysep MML (Pimentel et al, 2000)		91%
Filtro Arnold et al (1995, 1999)	1ª passada	95%
	2ª passada	92%
	3ª passada	89%
Filtro do Institute of Hydrology		96%

Obs. MIF = Método do Intervalo Fixo; MID = Método do Intervalo Deslizante; MML = Método do Mínimo Local.

Comparação dos valores da contribuição subterrânea ao escoamento superficial no sistema aquífero Urucuia, no rio das Fêmeas, 1984 a 1995, conforme diferentes métodos.

Rio	Posto	Período	Avaliação da Contribuição		
			Q90/Q50	HYSEP MIF/MID	HYSEP MML
Fêmeas	46455000	1984 a 1995	79%	94,4%	91%
Carinhanha	45210000	1979 a 2011	73%	91%	89%
Arrojado	45770000	1977 a 2002	83%	93,7%	92%
Corrente	45840000	1977 a 2003	78%	94,4%	93,5%

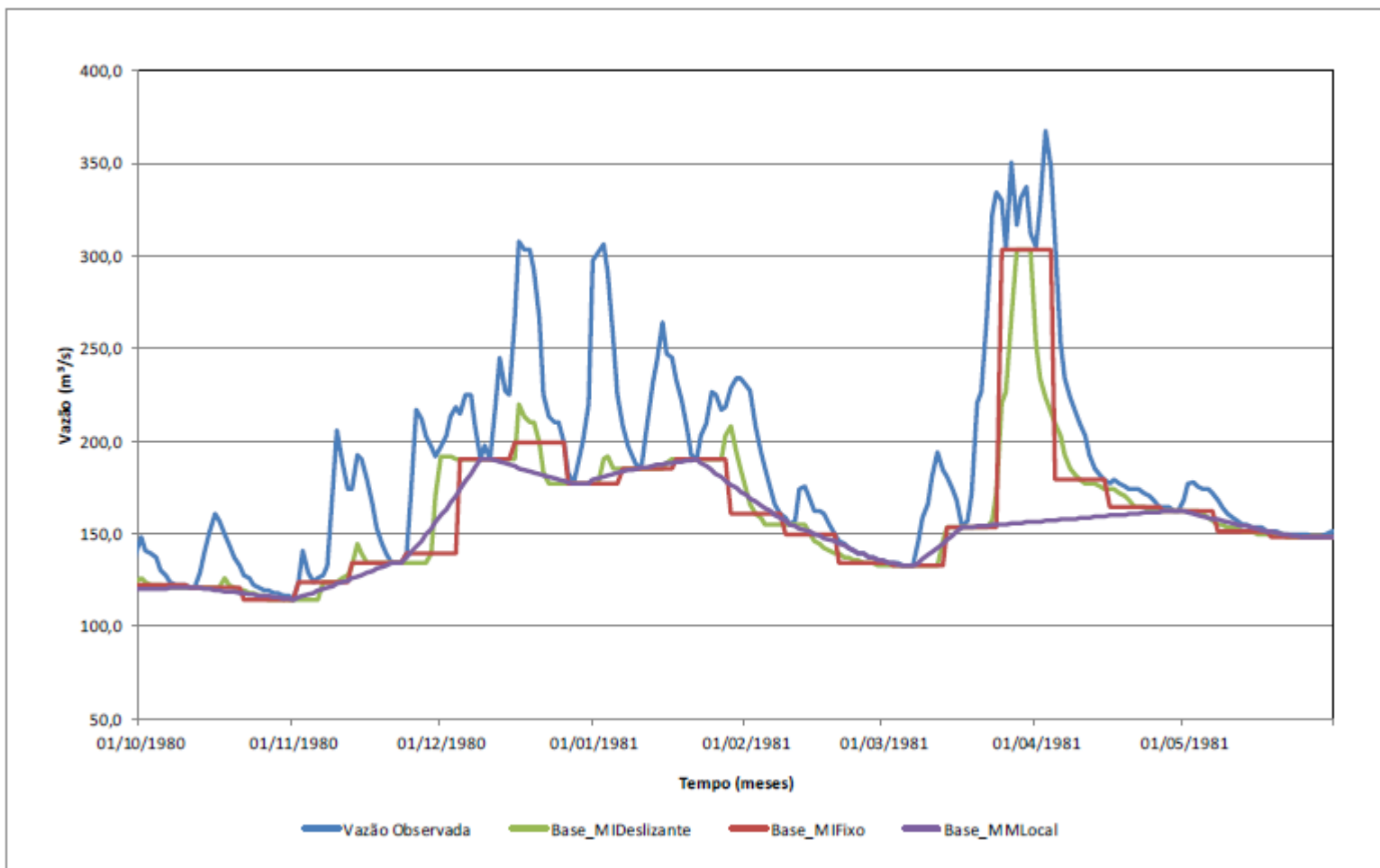
Comparação dos valores da contribuição subterrânea ao escoamento superficial segundo método Hysep e relação Q₉₀/Q₅₀, em 04 estações no sistema aquífero Urucuia.

(ANA, 2014)

Ano	MIF			MML			MID		
	Qbase (mm)	Qbase (m³/s)	Qbase (%)	Qbase (mm)	Qbase (m³/s)	Qbase (%)	Qbase (mm)	Qbase (m³/s)	Qbase (%)
1979	393,0	158,61	88,76	389,9	157,35	88,06	397,1	160,24	89,68
1980	402,6	162,05	89,99	401,5	113,94	89,73	404,6	162,82	90,42
1981	394,8	159,35	90,15	384,3	155,11	87,75	392,7	158,49	89,66
1982	386,0	155,76	91,62	378,5	152,74	89,84	386,5	155,97	91,74
1983	377,9	152,53	90,28	359,9	145,26	85,98	377,7	152,44	90,23
1984	314,1	126,43	91,41	313,6	126,20	91,25	314,2	126,47	91,44
1985	299,3	120,79	90,20	291,6	117,66	87,86	296,7	119,73	89,40
1986	322,7	130,22	92,48	318,9	128,70	91,40	321,3	129,65	92,08
1987	282,3	113,94	91,27	282,9	114,18	91,46	280,8	113,32	90,77
Média	352,5	142,19	90,68	346,8	134,57	89,26	352,4	142,13	90,60

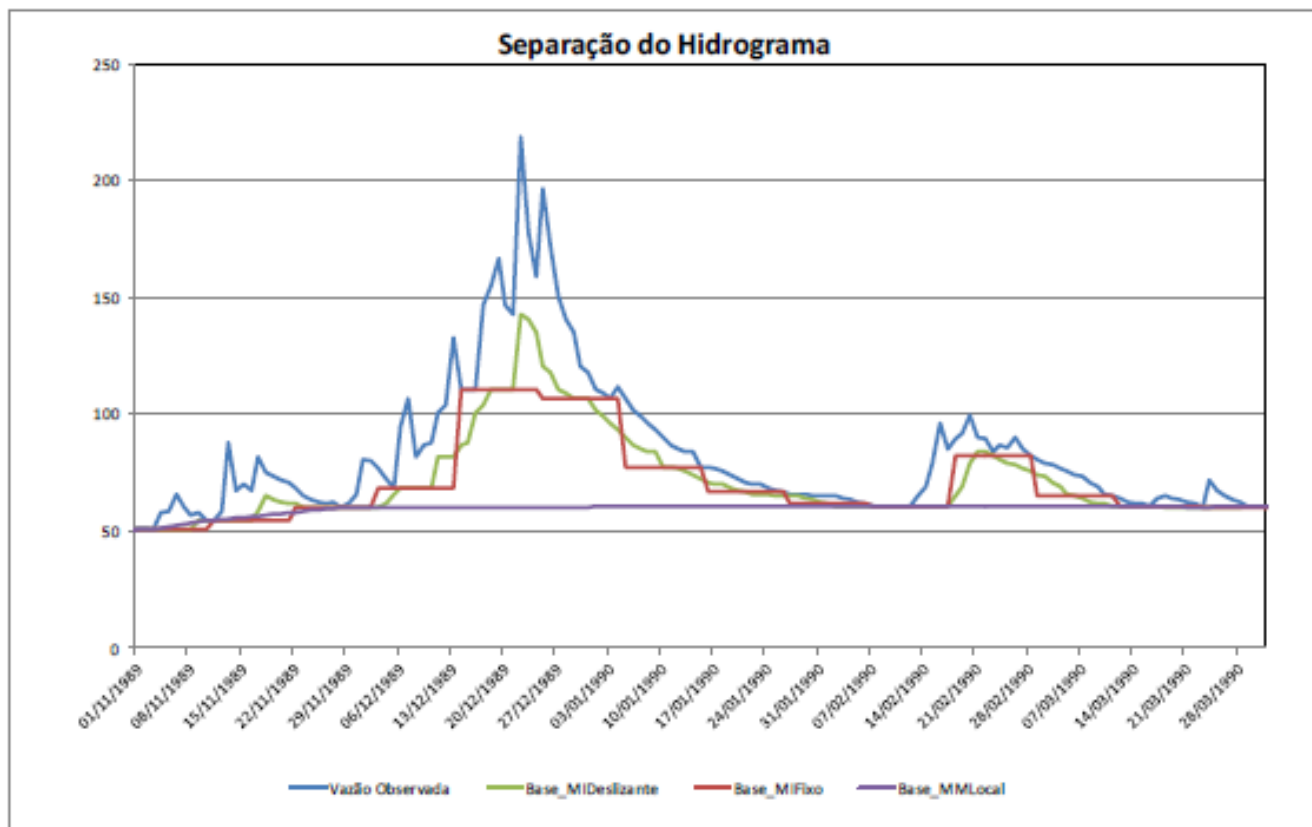
Posto 4521000 – Lagoa das Pedras – rio Carinhanha

Comparação dos Métodos HYSEP



Posto 4521000 – Lagoa das Pedras – rio Carinhonha

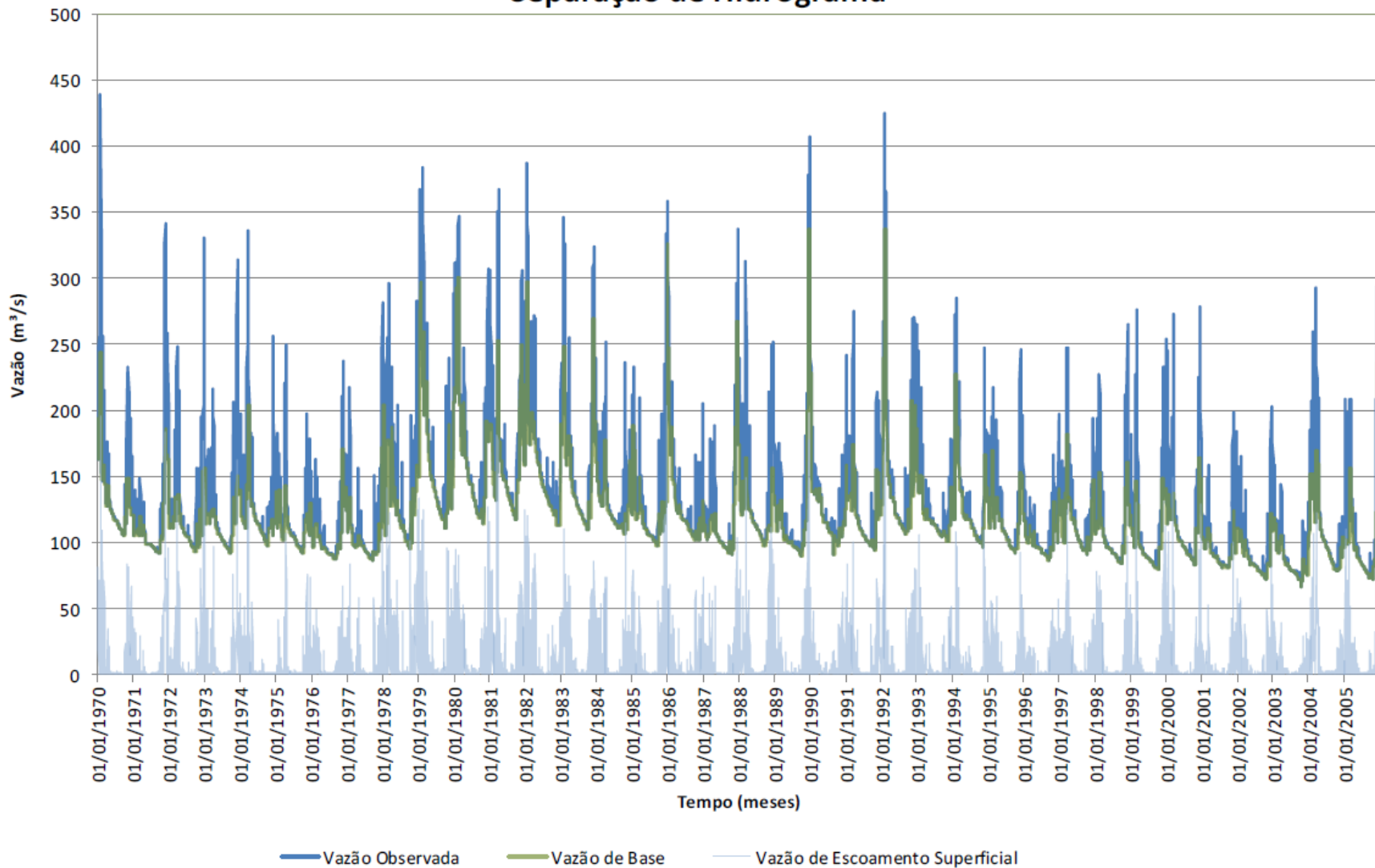
Separação dos escoamentos em Hidrograma - Comparação dos Métodos HYSEP



Posto 45770000 – Arrojado – rio Arrojado

Separação dos escoamentos em Hidrograma - Comparação dos Métodos HYSEP

Separação de Hidrograma



- A integração deve facilitar a gestão no **momento mais crítico** do “hidrograma”;
- Metodologias para as estimativas de escoamento de base devem ser de fácil aplicabilidade, considerando **realidade atual da gestão** de recursos hídricos;
- Métodos gráficos muito **subjetivos** e **inviáveis** para grande **quantidade** de dados;
- HYSEP tende a superestimar, se comparado com Q_7 ;
- A vazão **Q_7** , conforme os dados avaliados, até o momento, é “**conservadora**” enquanto indicativo de escoamento de base.

- Determinar a **vazão de base** e sua quantificação no escoamento superficial é quesito **essencial** para a gestão **integrada**;
- A integração deve facilitar a gestão no **momento mais crítico** do “hidrograma”;
- Metodologias para as estimativas de escoamento de base devem ser de **fácil aplicabilidade**, considerando **realidade atual da gestão** de recursos hídricos;
- A unidade territorial de gestão de recursos hídricos (inclusive integrada!) é a **bacia hidrográfica**;
- A **Outorga** e os **Planos** são os instrumentos da PNRH com maior impacto quanto **à gestão integrada** e que podem apresentar resultados práticos de forma mais imediata;
- **Fortalece a articulação** União e Estados e entre Estados.

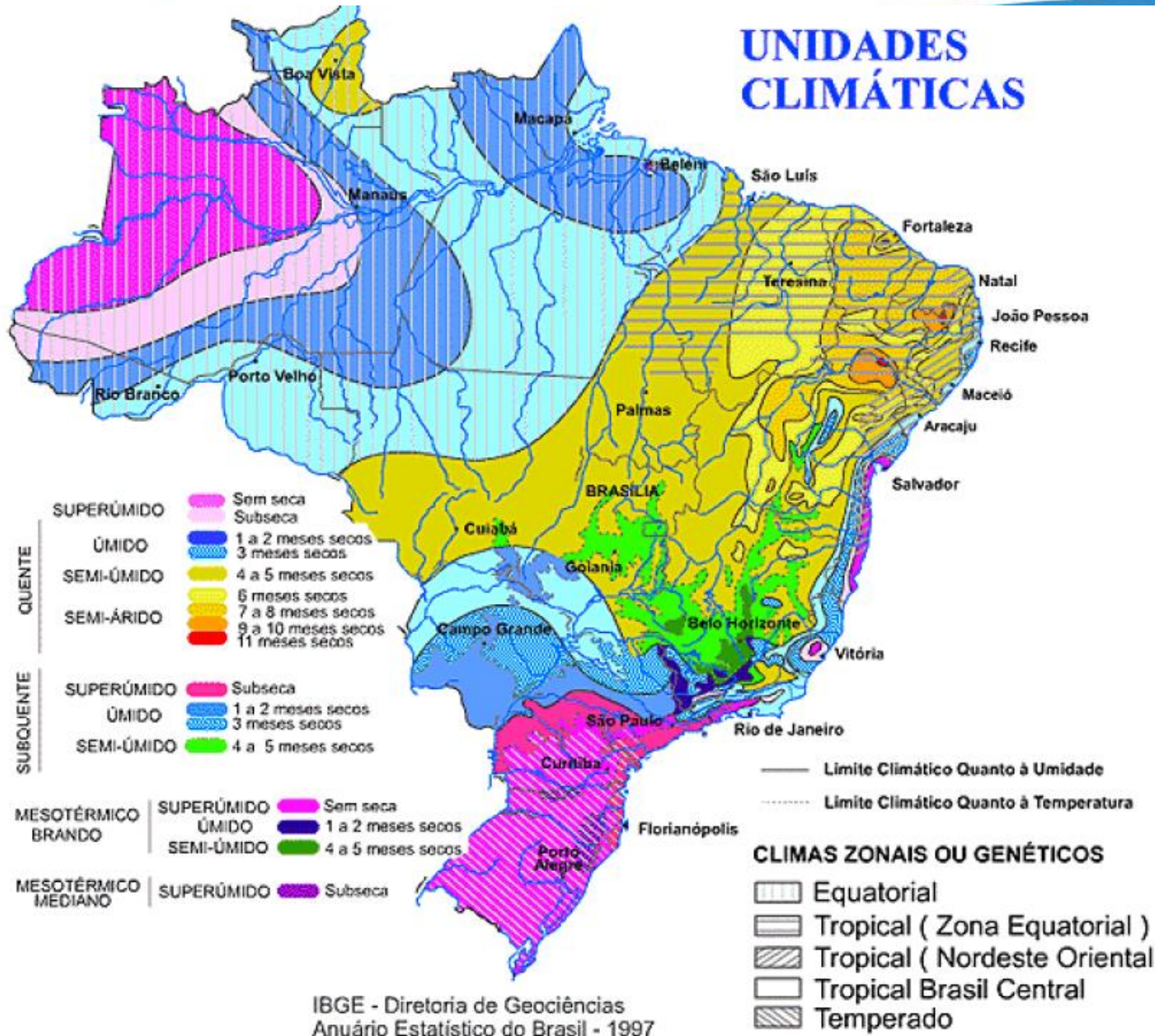
Obrigado!

Coordenação de Águas Subterrâneas – COSUB/SIP

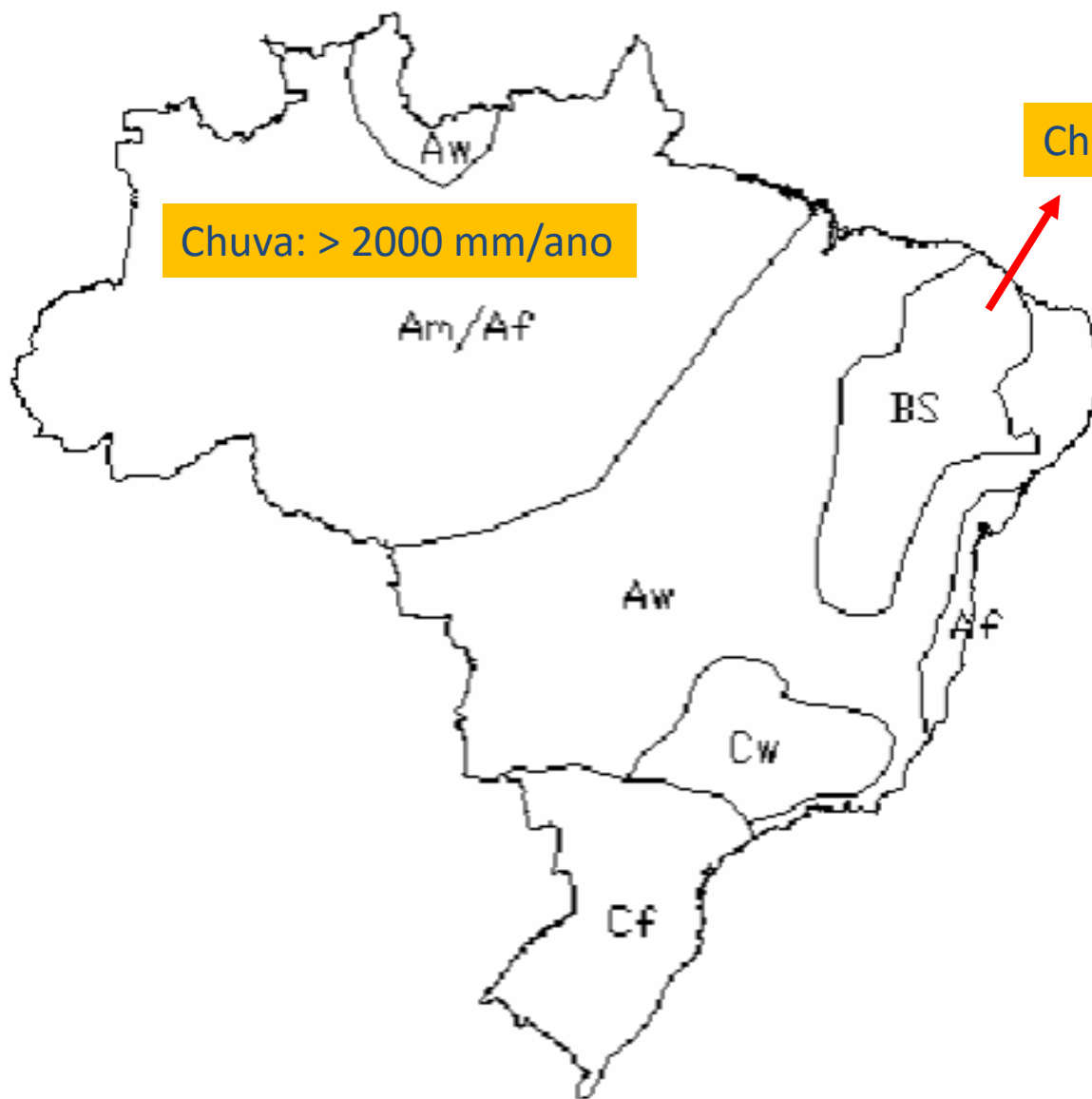
fernando@ana.gov.br

www.ana.gov.br

UNIDADES CLIMÁTICAS



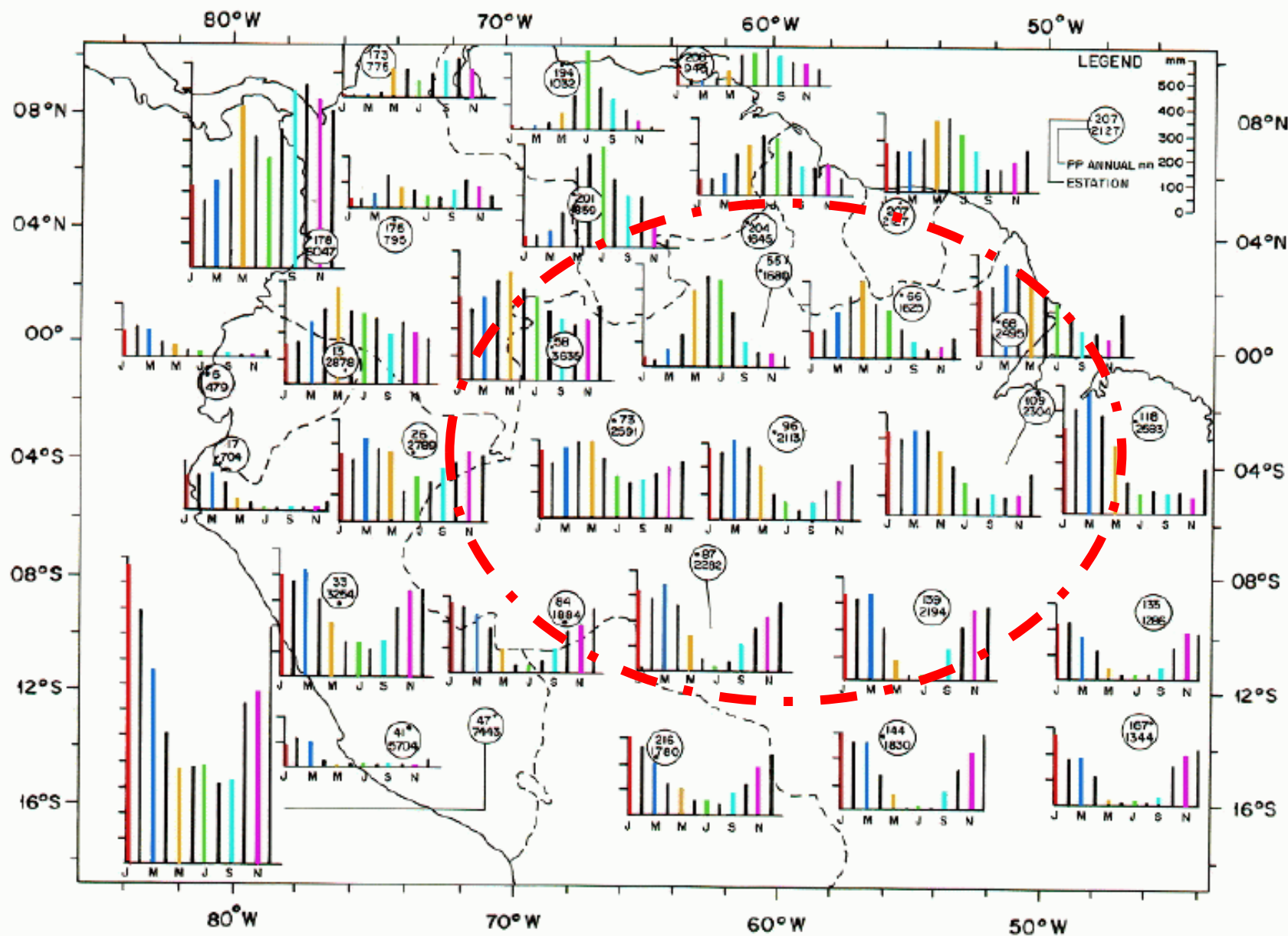
Diferenciação das regiões quanto ao número de meses secos no ano



Chuva: > 2000 mm/ano

Chuva: 360-760 mm mm/ano

classificação climática de Köppen para o Brasil



Clima na Amazônia (Fisch *et al*, 1998)



Cristalino semiárido com
precipitação < 800 mm (Portaria
MI 89/2005)