

# AVALIAÇÃO DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA SUBTERRÂNEA DA BACIA DO RIO MACACU UTILIZANDO O HISTÓRICO DE VAZÕES DA ESTAÇÃO 59235000-MACACU

Rodrigo Menezes Raposo de Almeida<sup>1</sup>; Décio Tubbs Filho<sup>2</sup>

**Resumo** – Este artigo apresenta os resultados da utilização do método RORA implementado numa planilha eletrônica, do método RORA implementado em Fortran pelo USGS e do método PART, utilizando a estação 59235000-MACACU como base para uma primeira avaliação. Apresenta-se os valores de recarga mensal e anual, bem como as respectivas variáveis estatísticas para os métodos RORA e PART. Observa-se uma concordância no resultados dos dois métodos que se mostraram bastante eficientes para o tratamento de séries históricas longas de 1931 a 1978.

**Abstract** – This paper presents the results of RORA method implemented in a worksheet in comparison with the Rora method and PART method in Fortran from USGS. The MACACU station was used as a test for comparison. It was calculated the recharge in monthly and annual basis for the Rora and Part method. Both methods tested presented a good agreement with each other using long series of river discharge from 1931 to 1978.

**Palavras-chave** – recarga, disponibilidade, Rora, Part

---

<sup>1</sup> Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal Fluminense, Endereço: Rua Passo da Pátria, 156, Bloco D, sala 133, São Domingos, Niterói, RJ, Telefone: 21 2629 5354 E-mail: rraposo@pq.cnpq.br

<sup>2</sup> Departamento de Geociências, da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, email: tubbs@uol.com.br

## 1. INTRODUÇÃO

As águas subterrâneas se constituem em importante fonte de águas doces, para mais de 1,5 bilhões de pessoas no mundo. Por se tratar de parte essencial do ciclo hidrológico, é de extrema importância para sustentabilidade hídrica de rios, lagoas, brejos, áreas úmidas e para as comunidades aquáticas. As águas de poços e fontes vêm sendo utilizadas intensamente para diversos fins, tais como abastecimento humano, irrigação, indústria e lazer. Segundo o IBGE (2002), 15,6% dos domicílios brasileiros utilizam exclusivamente água subterrânea.

Embora o uso do manancial subterrâneo seja complementar ao superficial em muitas regiões, em outras áreas do Brasil a água subterrânea representa o principal manancial hídrico. Ela desempenha importante papel no desenvolvimento socioeconômico do país e permite o atendimento de comunidades pobres ou distantes das redes de abastecimento público, (ANA, 2009) (Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil).

Ainda que não se conheça precisamente o número de poços existentes no Brasil e tampouco o volume extraído anualmente, em termos gerais as reservas de águas subterrâneas no território nacional são significativas. Entretanto, localmente a disponibilidade subterrânea pode apresentar intensa variação e a utilização desregrada pode acarretar em danos ambientais, sociais e econômicos. Face ao intenso crescimento da utilização das águas subterrâneas nos últimos anos e a continuidade prevista deste processo, diversos são os órgãos gestores dos recursos hídricos que vem se empenhando para estabelecer critérios para a perfuração de poços tubulares e utilização das águas subterrâneas. Normalmente, o controle administrativo e legal é exercido através de procedimentos focados pontualmente no licenciamento do poço, nas extrações, nas interferências com outros poços ou minas d' águas, necessários a obtenção de alguma modalidade de outorga.

Todavia, o conhecimento hidrogeológico na maior parte das regiões, via de regra, é elementar tornando a quantificação da disponibilidade das águas subterrâneas um desafio para o gestores hídricos. Desta forma, a autorização de muitas captações de águas subterrâneas em uma mesma bacia hidrográfica pode influenciar negativamente o balanço hídrico desta bacia, além de gerar possíveis conflitos de uso.

Considerando-se a relação existente entre as águas subterrâneas e superficiais, em determinadas situações o escoamento de base dos rios pode ser adotado como valor da recarga dos aquíferos, ou mais precisamente, as reservas reguladoras ou renováveis e, portanto, parâmetros hidrológicos podem ser utilizados para estimar o potencial das águas subterrâneas. A partir das medidas de vazões efetuadas em rios, é possível estimar a recarga e a potencialidade do aquífero, e para esta finalidade existem várias técnicas, quer através do estudo das hidrógrafas, do Q7,10 ou ainda de uma fração deste, considerando o tipo de aquífero. Entre os métodos que consideram o

fluxo de base dos rios, o mais utilizado é o método de Meyboom que, entretanto, apresenta a desvantagem de necessitar de uma série longa de medidas das vazões. Uma alternativa é o método RORA (RORABAUGH, 1964), onde a curva de recessão é obtida em um único evento climático.

## 2. MÉTODO RORA E PART

Para avaliação da disponibilidade hídrica subterrânea a partir do hidrograma de uma estação fluviométrica, foi utilizado o método RORA a partir de uma planilha eletrônica, método RORA a partir de um programa em Fortran do USGS e o método PART a partir de um programa Fortran do USGS.

Foram utilizados os dados históricos da estação 59235000-MACACU, disponível na base de dados da ANA. O arquivo foi inicialmente exportado em formato ASCII e convertido para colunas de modo a permitir a sua importação e posterior tratamento numa planilha eletrônica ou conversão para o formato ASCII do USGS.

### 2.1. Método RORA em planilha eletrônica

Foi elaborada uma planilha eletrônica de modo a implementar dois métodos de representação matemática da curva de recessão.

$$Q = Q_0 e^{-at} \quad (1)$$

$$Q = Q_0 10^{-t/k} \quad (2)$$

Onde:

Q é a vazão num tempo t após o registro da vazão  $Q_0$  em  $m^3/s$ ;

a é a constante de recessão para a expressão exponencial, expressa em  $1/t$ ;

k é a constante de recessão para a expressão na base 10, expressa em dias;

t é o tempo após o início da recessão em dias.

Em seguida foram desenhados os hidrogramas da estação para todo o período de registro de modo a visualizar toda a serie de dados disponíveis. A partir do hidrograma, foram selecionadas algumas curvas de recessão mais representativas para determinação dos coeficientes de recessão a e k. O gráfico da Figura 1 ilustra as curvas de recessão que foram utilizadas para se determinar o valor da constante de recessão k na base 10 para ser utilizada na equação 2 do método RORA. Utilizando o gráfico semi-log, a constante de recessão é o numero de dias que a curva de recessão

precisa para reduzir a sua vazão em 1/10 do valor. Por exemplo, no gráfico da Figura 1, a constante de recessão  $k$  é o número de dias para a vazão reduzir de  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  para  $1,0 \text{ m}^3/\text{s}$ . Neste gráfico, observa-se que o valor médio da constante  $k$  foi de 47 dias considerando todas as curvas de recessão selecionadas.

Para utilização do método RORA manualmente, inicialmente foi elaborada uma planilha contendo as datas das leituras,  $Q$  vazão em  $\text{m}^3/\text{s}$ ,  $\Delta Q$  em  $\text{m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{\text{recessão}}$   $\text{m}^3/\text{s}$ ,  $G$  em  $\text{m}^3$ , recarga  $\text{Rec}$  (mm). O Quadro 1 ilustra a planilha de dados utilizada. As datas das leituras e as leituras foram importadas do arquivo importado da base de dados da ANA e depois convertido em colunas. O valor de  $\Delta Q$  é ajustado manualmente de modo a ajustar a curva de recessão modelada à curva de recessão observada. O valor de  $Q$  é calculado a partir da equação 2 utilizando o valor de  $k$  determinado experimentalmente para cada estação, considerando o tempo  $t$  igual a 1 dia. O valor de  $G$  é calculado a partir da equação 3, formulada por Rorabaugh (1960) para estimar a recarga resultante de um evento na bacia.

$$G = 2 \Delta Q k / 2,3026 \quad (3)$$

Onde  $G$  é o valor da recarga em  $\text{m}^3$  e  $\text{Rec}$  é o valor da recarga em altura de chuva expressa em mm.

$$\text{Rec} = G / A \quad (4)$$

Onde  $A$  é a área da bacia convertida para  $\text{mm}^2$  de modo a se obter uma altura de chuva equivalente em mm.

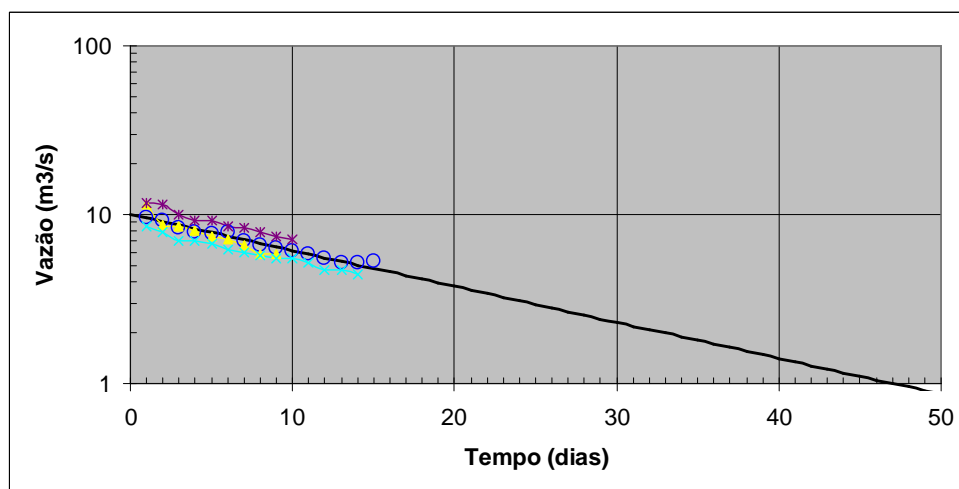


Figura 1 – Gráfico para determinação da constante de recessão  $k = 47$  dias na base 10 para a estação 59235000-MACACU.

Quadro 1 – Modelo de planilha eletrônica utilizada para calcular o método RORA.

59235000-Cach. Macacu			curva de recessão		Parametros de Rorabaugh					
A	148	km2	a (K)	20	dias	K (t1)	47	dias	11689	
			D	2,65	dias	tc	10,1	dias		
data	Q m3/s	$\Delta Q$ m3/s	$Q_{recessão}$	G (m3)	Rec (mm)	run off	$Q_{rec}$	Q acum	Desc mm	run off mm
1/1/1932	12,1		12			0,10	1036800	1036800	7,01	0,06
2/1/1932	14,2		11,4			2,79	986234,7	2023034,7	13,67	1,63
3/1/1932	10,9		10,9			0,04	938135,4	2961170,1	20,01	0,02
4/1/1932	32,5		10,3			22,17	892382	3853552,1	26,04	12,94

## 2.2. Método RORA em Fortran do USGS

Para se utilizar o programa RORA do USGS Rutledge (1994), é necessário gerar um arquivo no formato do USGS e com as unidades no sistema inglês. Para tal, foi elaborado um programa em C para converter os arquivos no formato ASCII da ANA em ASCII do USGS no sistema de unidades inglês. Após a conversão do arquivo, preparava-se os arquivos de entrada para rodar o programa RORA. Os arquivos de saída em ASCII e no sistema inglês foram importados por planilhas eletrônicas para a devida conversão para o sistema SI e posterior tratamento e interpretação.

O programa RORA usa o método do deslocamento da curva de recessão para estimar a recarga para cada pico do hidrograma, Figura 2. O processo também denominado de método Rorabaugh é baseado na medição da variação descarga potencial total do aquífero estimada num tempo crítico após o evento a partir da extrapolação a partir do pico até o período de recessão pós-pico. O método é aplicável a um longo período de registro de vazão e resulta numa estimativa da recarga média do aquífero. Análises paramétricas têm demonstrado que o programa RORA não é muito sensível a variações no índice de recessão.

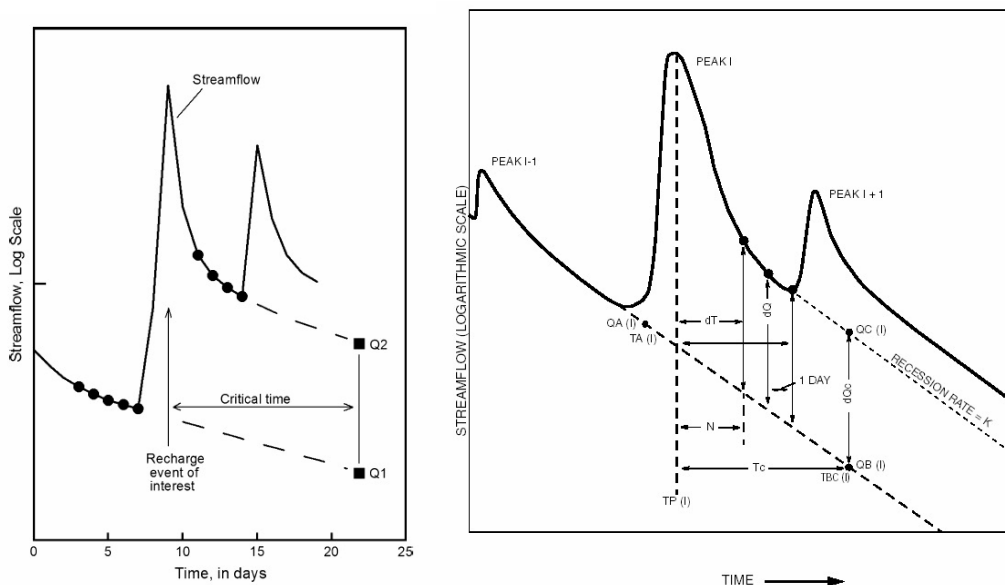
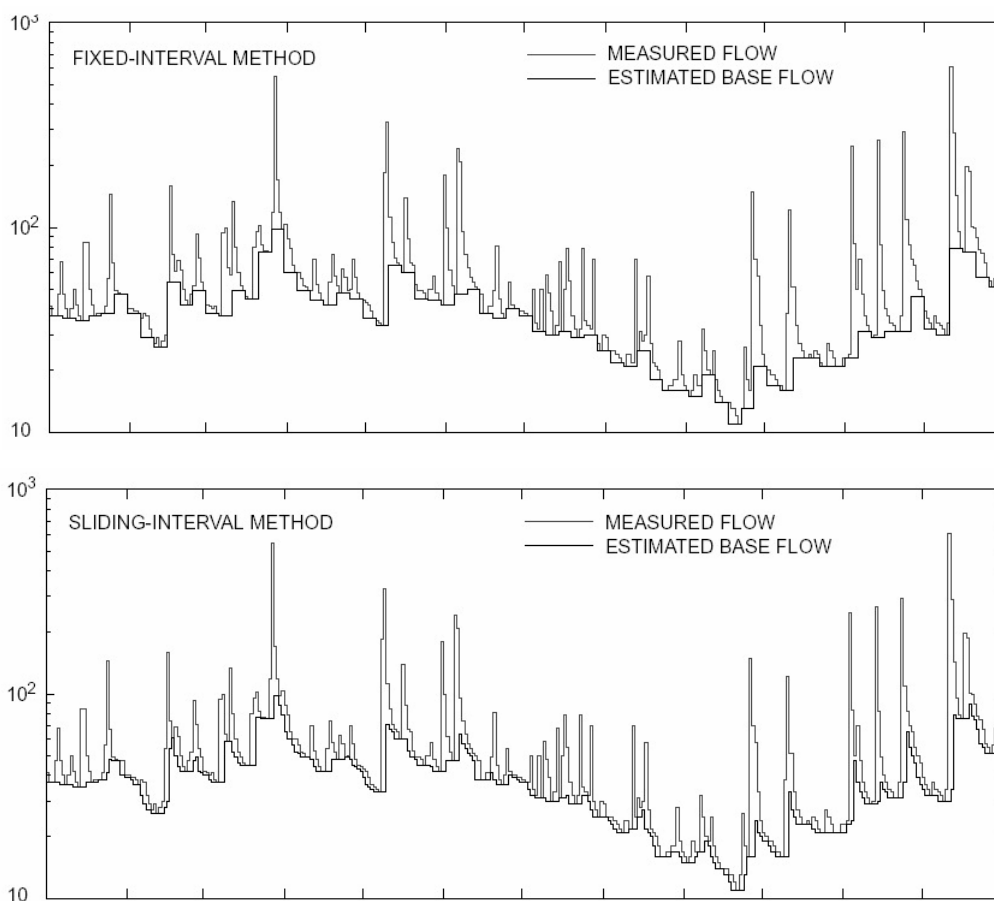


Figura 2 – Ilustração do método gráfico para determinar o valor do tempo crítico  $t_c$  após um evento de recarga ou pico do hidrograma e do valor de  $\Delta Q = (Q_2 - Q_1)$  no método RORA.

### 2.3. Método PART em Fortran do USGS

De modo similar ao programa RORA, o programa PART do USGS em Rutledge (2007) também necessita de um arquivo ASCII no formato do USGS. O método PART usa o particionamento do hidrograma para estimar o registro diário da descarga de água subterrânea no registro de vazão do rio, Figura 3. O programa procura os registros para os dias que se ajustam aos critérios de recessão antecedente, fixando o fluxo de base como sendo igual aos registros de vazão nestes dias, interpolando linearmente os registros diários de vazão para os dias que não se ajustam aos requisitos da curva de recessão anterior. O programa deve ser aplicado para um longo período de registro de vazão para resultar num valor médio razoável de descarga de água subterrânea ou de descarga efetiva. Os resultados do programa PART apresentam uma boa comparação com os resultados publicados de estimativa manual do fluxo de base efetuados nos Estados Unidos.



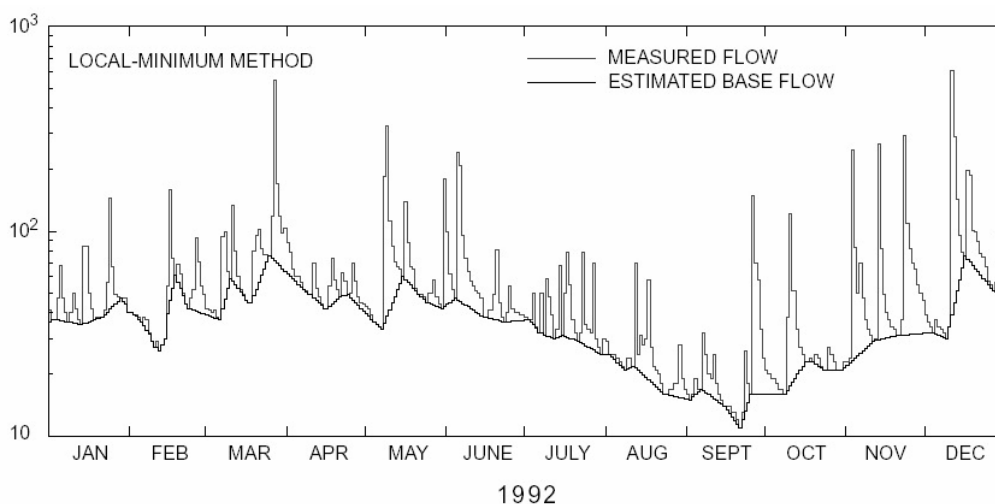


Figura 3 – Ilustração gráfica dos métodos utilizados pelo programa PART: intervalo fixo, intervalo deslizante e mínimo local, para separar fluxo de base (base flow) devido a descarga de água subterrânea do registro de vazão total (measured flow) do hidrograma.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1. Determinação das características hidrogeológicas por bacia por estação

De modo a facilitar o emprego do método RORA e do método PART, foram selecionadas as estações com dados disponíveis na bacia dos rios Caceribu, Macacu e Guapiaçu, Quadro 2. Além da relação das estações, observa-se as variáveis hidrogeológicas determinadas para algumas estações como a constante da bacia  $D$ , a constante de recessão na base  $10\text{ k}$ , o valor do tempo crítico  $t_c$  e os valores de  $\text{Desc}_{90\%}$  e  $\text{Desc}_{95\%}$ .

Quadro 2 – Estações com dados disponíveis na bacia e algumas variáveis hidrogeológicas determinadas até o momento.

Nº	Código	Nome	Altitude	Área (km <sup>2</sup> )	D dias	K dias	a dias	tc dias	Q90% m3/s	Q95% m3/s	Desc 90% mm	Desc 95% mm
1	59235000	CACHOEIRAS DE MACACU	30	148	2,7	47	20	10	2,6	2,17	55,4	46,2
2	59235002	CACHOEIRAS DE MACACU	33	146,49	2,6			0				
3	59237000	JAPUIBA	21	253,4	3,0			0				
5	59240000	PARQUE RIBEIRA	8	258	3,0			0	2,71	2,12	33,1	25,9
9	59242000	DUAS BARRAS	35	83	2,4			0,0				
10	59245000	QUIZANGA	15	352	3,2			0,0	2,76	1,98	24,7	17,7
12	59245100	ORINDI	10	66,22	2,3			0,0	0,979	0,675	46,6	32,1
15	59500014	RETA NOVA		374,4	3,2			0,0				
16	59500019	PONTE DE TANGUA		235,72	2,9			0,0				

\*  $D$  é a constante da bacia, onde  $D = 0,89 A^{0,2}$ ;  $A$  é a área da bacia em km<sup>2</sup>;  $k$  é a constante de recessão na base  $10$  em dias;  $a$  é a constante de recessão na base exponencial;  $t_c$  é o tempo crítico em dias após o pico, onde  $t_c = 0,2144 k$ ;  $Q_{90\%}$  é a vazão mínima para 90% do período de observação,  $Q_{95\%}$  é a vazão mínima para 95% do período de observação;  $\text{Desc}_{90\%}$  é a descarga de água subterrânea para manter a vazão de  $Q_{90\%}$ ;  $\text{Desc}_{95\%}$  é a descarga de água subterrânea para manter a vazão de  $Q_{95\%}$ .

### 3.2. Avaliação da recarga utilizando o método RORA em planilha eletrônica

Foi selecionado o registro do ano de 1932 da estação 59235000-MACACU para testar o método RORA em planilha eletrônica. O gráfico da Figura 4 apresenta o hidrograma e as sucessivas curvas de recessão após os picos de cheia registrados no ano. Os valores de  $\Delta Q$  foram selecionados considerando o tempo crítico  $t_c$  de 10 dias após cada pico de cheia registrado no hidrograma. Como cada  $\Delta Q$  resultava num evento de recarga diário, foi calculado um valor total de recarga mensal. O valor da descarga foi calculado a partir da integração das curvas de recessão obtidas. O valor do armazenamento é a diferença entre a recarga e a descarga e o run off é a diferença entre a vazão do hidrograma e a vazão da curva de recessão. A Tabela 1 apresenta o resumo mensal dos valores de recarga, descarga, armazenamento e run off calculados para a estação no ano de 1932.

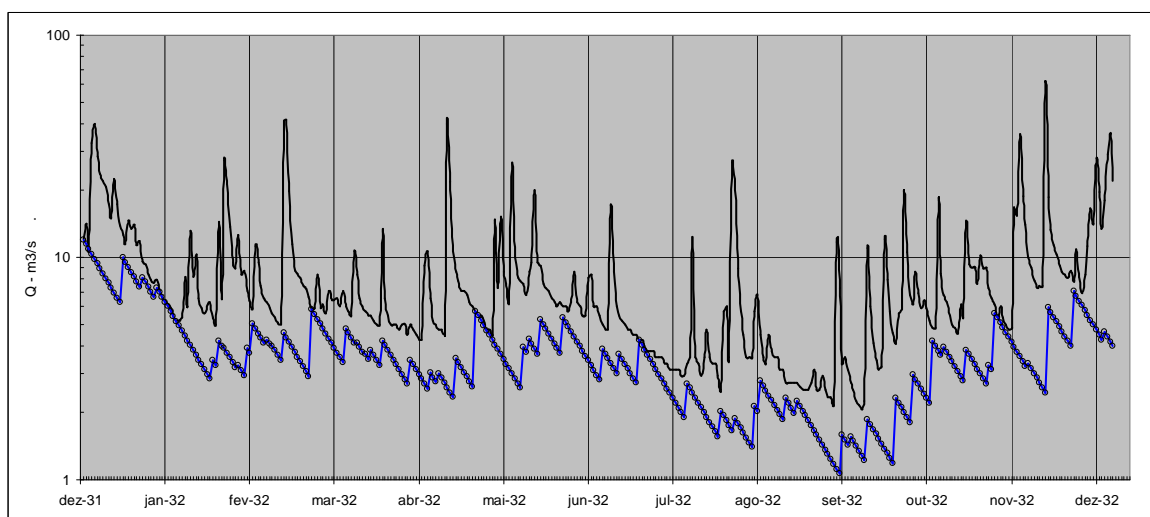


Figura 4 – Hidrograma e respectivas curvas de recessão após os sucessivos picos de recarga do aquífero para o ano de 1932 na estação 59235000-MACACU.

Tabela 1 – Consolidação dos resultados obtidos com a aplicação do método RORA em planilha eletrônica.

(mm)	jan/32	fev/32	mar/32	abr/32	mai/32	jun/32	jul/32	ago/32	set/32	out/32	nov/32	dez/32	total
recarga	145,4	77,5	151,3	104,9	132,3	138,2	87,0	81,0	39,9	125,1	120,4	91,8	1294,7
descarga	148,4	64,96	75,89	62,76	62,80	70,01	56,21	36,25	30,31	38,67	64,71	83,23	794,2
armaz/nto	-3,0	12,5	75,4	42,1	69,5	68,2	30,8	44,8	9,6	86,4	55,6	8,5	500,5
run off	118,5	85,9	98,4	39,8	93,4	75,3	30,3	67,63	27,19	80,72	95,20	183,74	996,0

A Tabela 1 e a Figura 5 apresentam os dados mensais do balanço de fluxo de água subterrânea e água superficial na bacia do rio Macacu registrado em 1932 na estação de 59235000-MACACU. Observa-se um valor total de recarga bastante elevado de 1294 mm de um total de 2290 mm no ano, resultando numa taxa de 57% de recarga na bacia. A descarga de água subterrânea foi calculada em 794 mm e o armazenamento ou perda por evapotranspiração na zona de descarga de 500 mm. Por fim, o escoamento superficial ou *run off*, foi de 996 mm no ano de 1932.



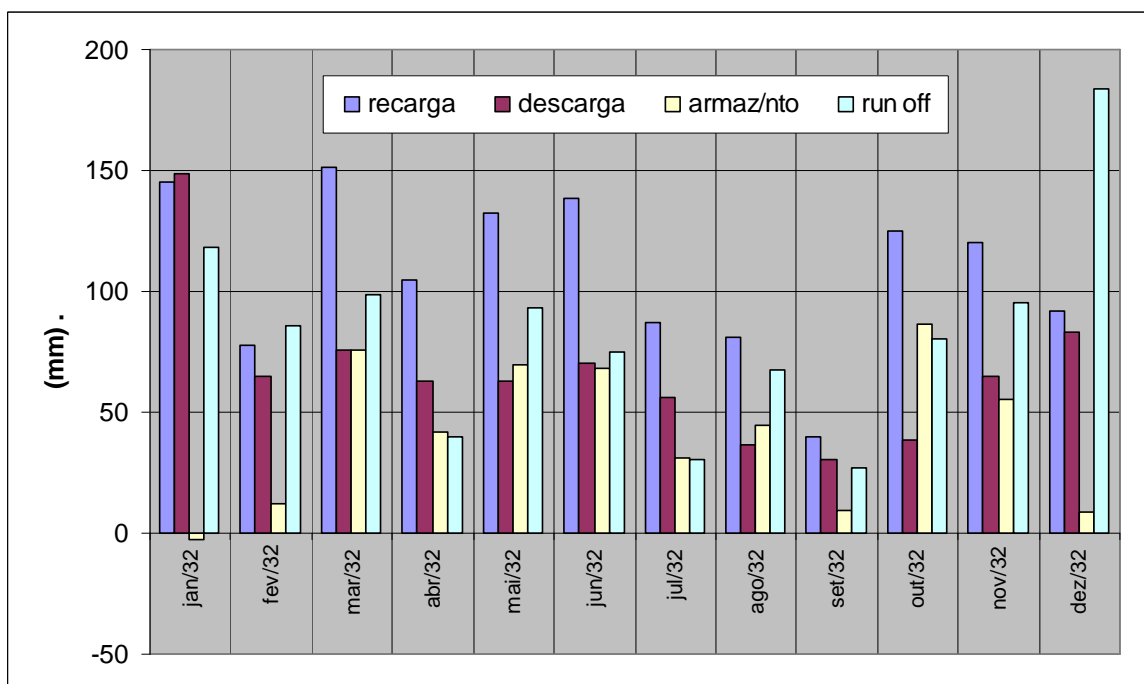


Figura 5 – Variação mensal no balanço de fluxo aquífero rio Macacu para o ano de 1932 registrado na estação 59235000-MACACU.

Ao longo do ano de 1932 observa-se que há uma redução nos valores de recarga nos meses de fevereiro, julho, agosto, setembro e dezembro, com valores inferiores a 100 mm de recarga por mês. No mês de janeiro houve um balanço entre os valores de recarga e descarga e o mês de dezembro os valores de *run off* foram muito superiores aos valores de recarga do aquífero.

Conclui-se que a utilização do método RORA no formato de uma planilha eletrônica é muito útil pois permite um detalhamento muito preciso nos resultados. Entretanto, é muito trabalhoso para ser utilizado numa série de dados muito extensa, onde não é possível nem interessante fazer uma análise mês a mês.

Com relação à bacia do rio Macacu, foi possível obter um valor bastante confiável para a constante de recessão da bacia na base 10 k com valor de 47 dias. Os valores de recarga calculados são elevados, resultando num acumulado anual de 1294 mm ou uma taxa de 57%, porém compatível com a precipitação média na bacia.

### 3.3. Avaliação da recarga utilizando o método RORA do USGS

Para utilizar o programa RORA do USGS é necessário ter um registro contínuo de pelo menos 12 meses a contar de janeiro de um determinado ano. A Figura 6 apresenta a seqüência de registros da estação 59235000-MACACU, de modo que foi necessário realizar três análises separadas que depois foram consolidadas: 1932-1935, 1938-1964 e 1967-1978.

YEAR	MONTH											
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1931	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	.
1932	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1933	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1934	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1935	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1936	.	.	.	.	.	.	.	.	X	.	X	.
1937	X	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	X
1938	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1939	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1940	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1941	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1942	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1943	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1944	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1945	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1946	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1947	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1948	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1949	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1950	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1951	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1952	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1953	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1954	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1955	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1956	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1957	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1958	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1959	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1960	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1961	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1962	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1963	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1964	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1965	.	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
1966	X	X	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1967	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1968	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1969	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1970	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1971	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1972	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1973	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1974	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1975	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1976	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1977	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1978	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.

COMPLETE RECORD = .      INCOMPLETE = X

Figura 6 – Seqüência do registro de vazão para a estação 59235000-MACACU entre 1931 e 1978.

A Figura 7 apresenta a variação da recarga anual para a estação 59235000-MACACU considerando a série histórica de 1031 a 1978. Observa-se que o ano de 1932 calculado pela planilha eletrônica resultou numa recarga de 1295 mm e utilizando o programa RORA resultou em 1197 mm, uma diferença de 8% para mais no método manual. A recarga média considerando toda a série histórica é de 1575 mm, a mediana é de 1449 mm, variando de 744 mm no ano de 1970 a 3122 mm no ano de 1943. Observa-se claramente que a década de 40 foi o período que se registrou os maiores valores de recarga do aquífero e a década de 1970 foi o período que se registrou os menores valores de recarga do aquífero.

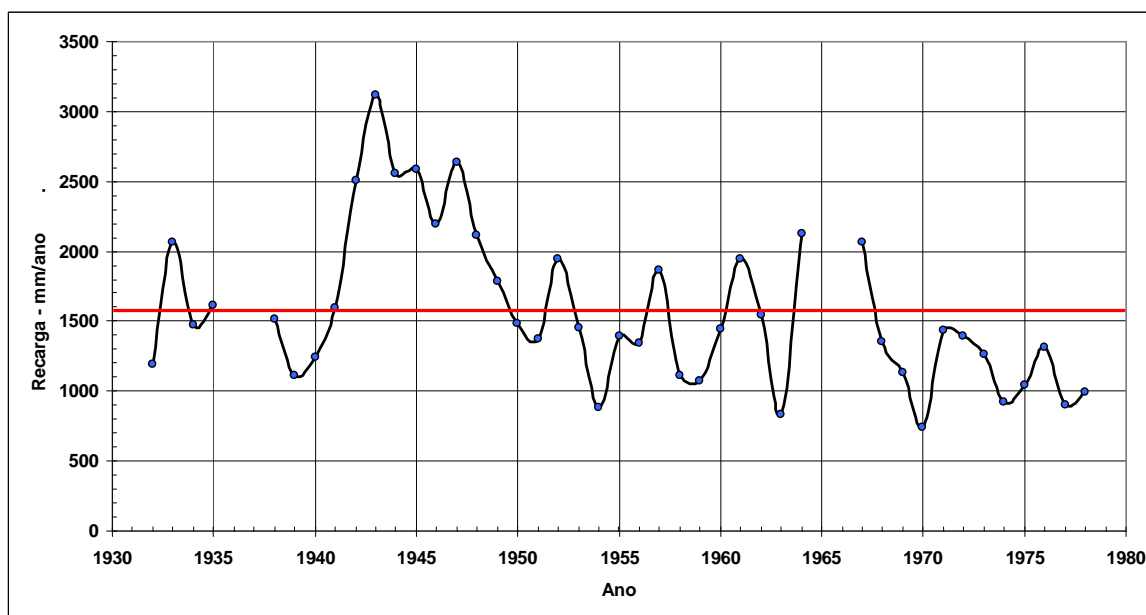


Figura 7 – Variação da recarga anual para a estação 59235000-MACACU entre 1931 e 1978.

A Tabela 2 e a Figura 8 apresentam a variação da recarga mensal de toda a série histórica para a estação 59235000-MACACU entre 1931 e 1978. Observa-se que os meses de janeiro, fevereiro e março são os meses que apresentam os maiores valores de recarga mensal ultrapassando os 500 mm. Os meses de maio a setembro são os meses que apresentam os menores valores máximos de recarga, resultando em valores inferiores a 250 mm. Em termos mínimos, os meses de janeiro, fevereiro e junho são os meses que apresentaram historicamente os menores valores de recarga, próximos ou inferiores a 10 mm. Os valores de recargas médios e medianos são bem próximos sendo que os valores médios apresentam-se ligeiramente superiores em todos os meses dos anos. A média de recarga mensal para todo o período é de 131 mm, sendo que nos meses junho a setembro os valores são inferiores a 100 mm.

Tabela 2 – Consolidação dos resultados de recarga mês a mês para toda a série histórica da estação 59235000-MACACU entre 1931 e 1978, utilizando o método RORA.

mm	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	A
MAXIMO	511,6	601,7	521,2	371,6	226,3	196,9	206,0	241,3	172,5	334,8	352,6	465,3	3122,9
MEDIA	202,8	166,8	172,6	153,2	104,0	83,1	83,6	75,2	73,5	92,5	154,3	213,1	1574,8
MEDIANA	153,7	128,5	155,7	134,1	102,6	76,7	70,9	62,7	66,8	77,2	138,4	189,0	1448,8
MINIMO	10,9	-5,3	44,2	33,5	34,5	0,0	20,1	25,1	18,0	24,9	39,9	45,2	744,0
DESV PAD	136,8	120,8	101,4	73,0	44,3	40,1	44,3	40,6	39,8	66,4	79,1	118,7	557,2

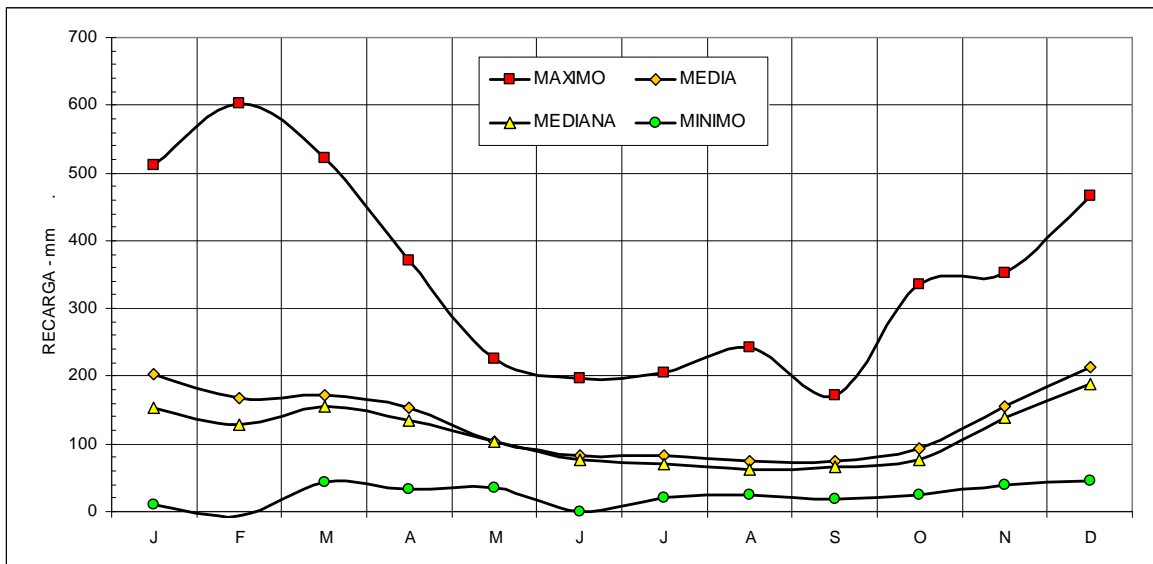


Figura 8 – Variação da recarga mensal para toda a série histórica da estação 59235000-MACACU entre 1931 e 1978.

O gráfico da Figura 9 apresenta a distribuição acumulada da frequência de recarga considerando todos os meses da série histórica da estação 59235000-MACACU entre 1931 e 1978. Observa-se que a recarga mensal considerando uma probabilidade de 95% de ocorrência é de 33,6 mm e uma probabilidade de 90% é de 40,6 mm, valores relativamente inferiores aos obtidos no Quadro 2 para a mesma estação admitindo que toda a vazão nos períodos de seca prolongada é resultante do fluxo de base e que são respectivamente 46 mm e 55 mm. Esta diferença também pode ser explicada pois o método utilizado no Quadro 2 leva em conta valores diários enquanto que o método de RORA considera os valores mensais de recarga.

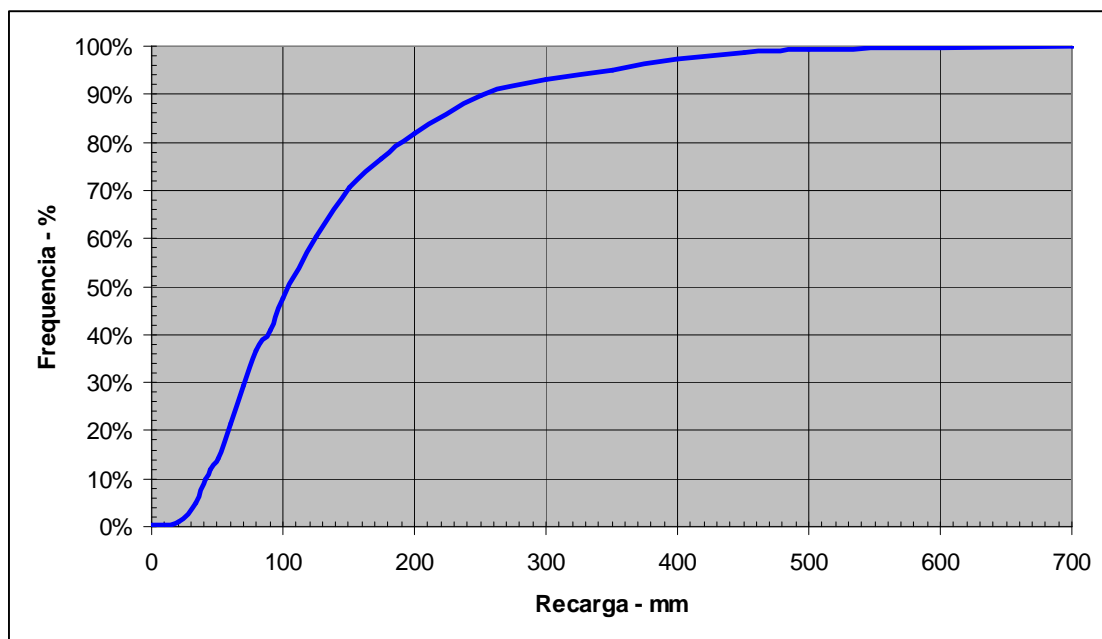


Figura 9 – Frequência acumulada da recarga mensal para toda a série histórica da estação 59235000-MACACU entre 1931 e 1978.

### 3.4. Avaliação da recarga utilizando o método PART do USGS

O gráfico da Figura 10 apresenta a separação do hidrograma resultante da aplicação dos três métodos de separação do PART considerando toda a série histórica de 1931 a 1978. O gráfico da Figura 11 apresenta um detalhe da separação do hidrograma somente para o ano de 1932. Observa-se que para períodos longos de recessão os três métodos utilizados para separação do hidrograma são semelhantes., por exemplo em janeiro, maio, junho e julho de 1932. As maiores divergências entre os métodos é percebida melhor nos períodos de picos sucessivos como os que ocorreram em outubro e novembro de 1932.

A Tabela 3 e o gráfico da Figura 12 apresentam os valores máximos, médios, mínimos e desvio padrão das descargas mensais para toda a série histórica. Observa-se que os meses de janeiro, fevereiro, março e dezembro foram os meses que apresentaram os maiores valores de descargas mensais, superiores a 350 mm. Os demais meses apresentaram descargas máximas entre 150 mm e 270 mm. Com relação aos valores mínimos de descarga, observa-se que os meses de fevereiro, agosto, setembro e outubro apresentaram os menores valores, inferiores a 30 mm. Em termos médios, observa-se que os valores médios e a mediana dos meses são bem próximos, sendo que o primeiro é ligeiramente superior, resultando em valores médios de 116 mm. Em termos médios, os meses que apresentaram menores valores de recarga, inferior a 100 mm foram os meses de junho a outubro.

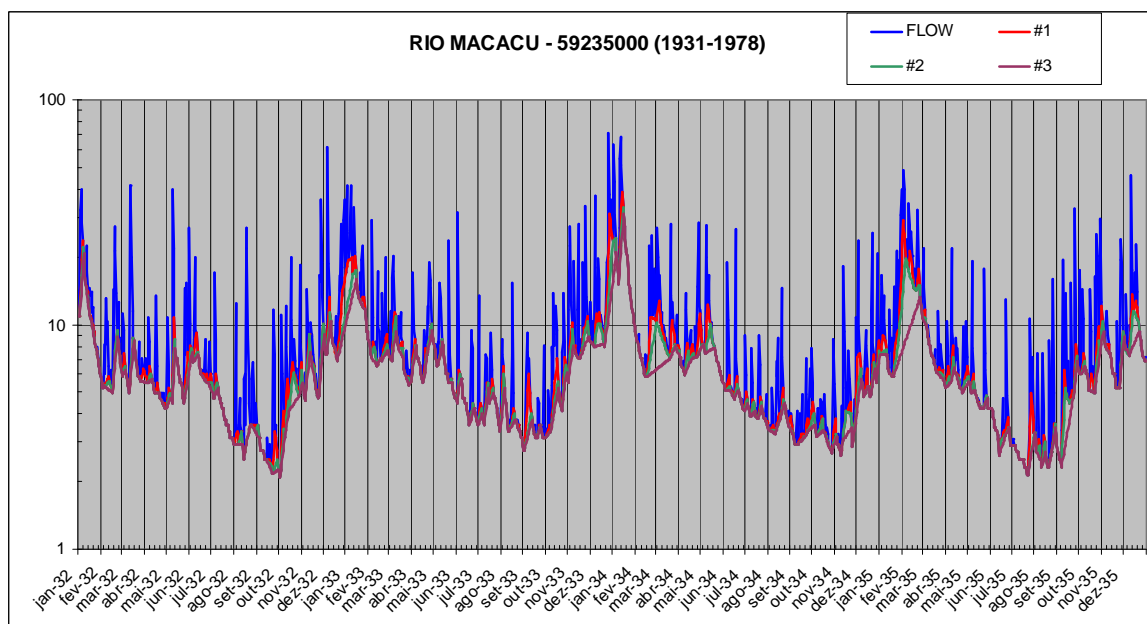


Figura 10 – Separação do hidrograma utilizando os três métodos do PART para a estação 59235000-MACACU entre 1931 e 1978.

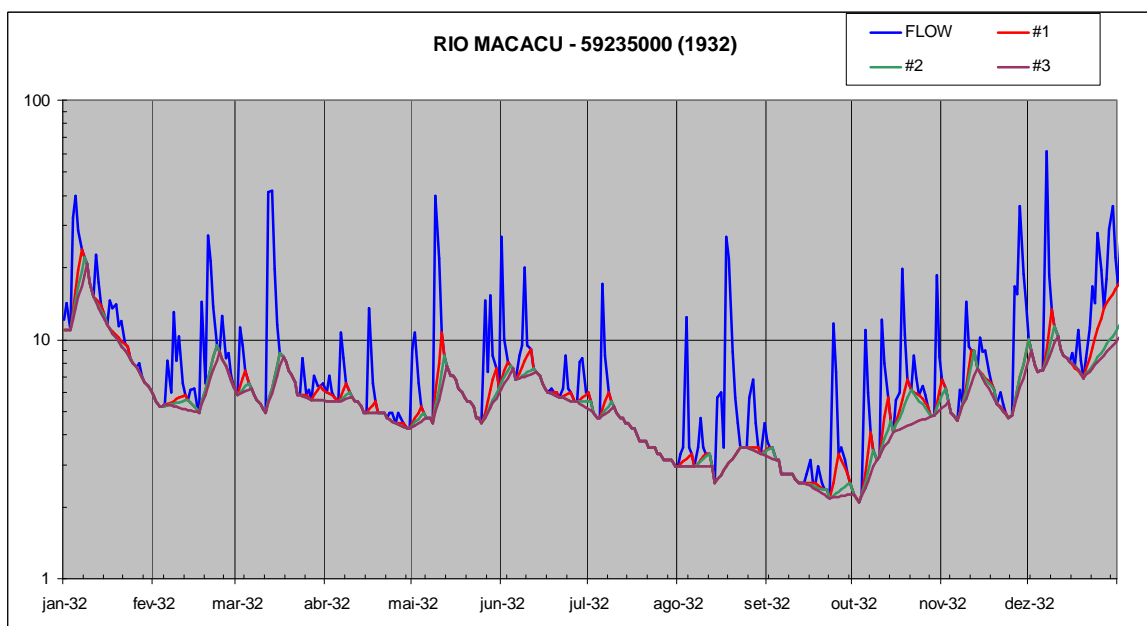


Figura 11 – Separação do hidrograma utilizando os três métodos do PART para a estação 59235000-MACACU no ano de 1932.

Tabela 3 – Consolidação dos resultados de descarga mês a mês para toda a série histórica da estação 59235000-MACACU entre 1931 e 1978, utilizando o método PART.

mm	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	YEAR
MAXIMO	462,5	402,8	366,5	236,2	206,0	181,6	159,8	154,7	155,2	220,5	271,3	392,9	2739,9
MEDIA	184,6	156,4	162,5	137,7	114,5	87,0	78,5	67,8	63,4	73,9	105,3	164,0	1395,4
MEDIANA	165,6	128,3	139,2	126,2	109,2	82,3	71,4	62,2	62,2	67,3	95,3	139,2	1283,5
MINIMO	40,4	29,0	49,8	46,2	38,1	34,3	39,9	27,4	24,4	21,6	33,8	54,6	659,4
DESV PAD	88,0	84,7	77,9	53,6	40,3	31,8	32,4	30,3	29,4	40,4	48,8	84,5	497,7

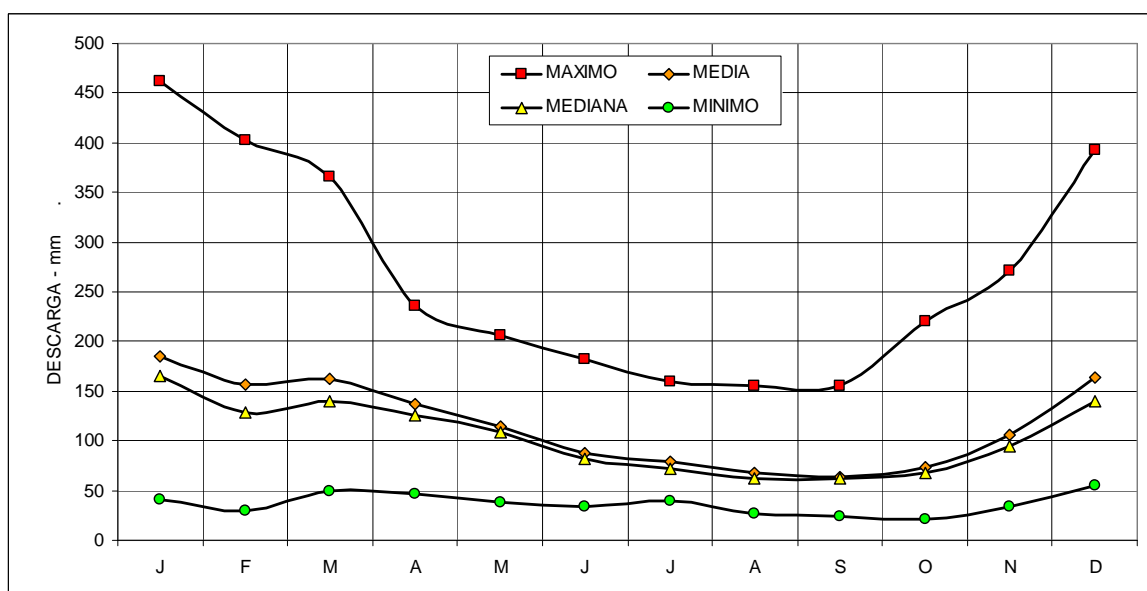


Figura 12 – Variação da descarga mensal para toda a série histórica da estação 59235000-MACACU entre 1931 e 1978, utilizando o método PART.

O método PART resultou num valor mínimo de descarga de 659 mm no ano de 1970 e valor máximo de descarga de 2740mm no ano de 1943. O valor médio de descarga para todo período da

série histórica foi de 1395 mm e a mediana foi de 1283 mm com um desvio padrão de 498 mm. De modo similar ao obtido no método RORA, a década de 1970 foi o período que apresentou os menores valores de descarga de água subterrânea, resultando num valor médio de 1230 mm entre 1970 e 1978. A década de 40 foi o período que apresentou os maiores valores de descarga de água subterrânea resultando num valor médio de 2492 mm.

### 3.5. Comparação dos métodos

Os gráficos da Figuras 13 e 14 apresentam os dados comparativos dos métodos do RORA e PART. Observa-se que em termos médios o método do RORA apresenta valores cerca de 11% a 12% maiores. Este valor é coerente uma vez que nem toda água de recarga descarrega na drenagem, parte desta água pode ser perdida por evapotranspiração nas porções onde o aquífero freático está mais próximo da superfície. Em termos mensais, observa-se que há uma concordância entre os dois métodos utilizados em todo período analisado.

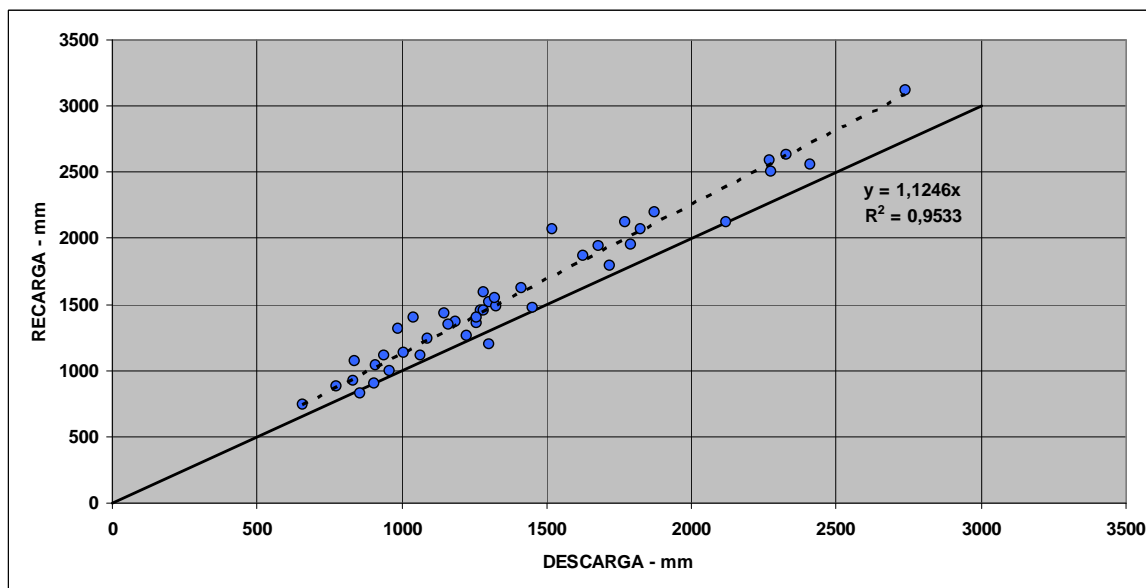


Figura 13 – Comparação dos métodos RORA e PART para cálculo da recarga e descarga respectivamente.

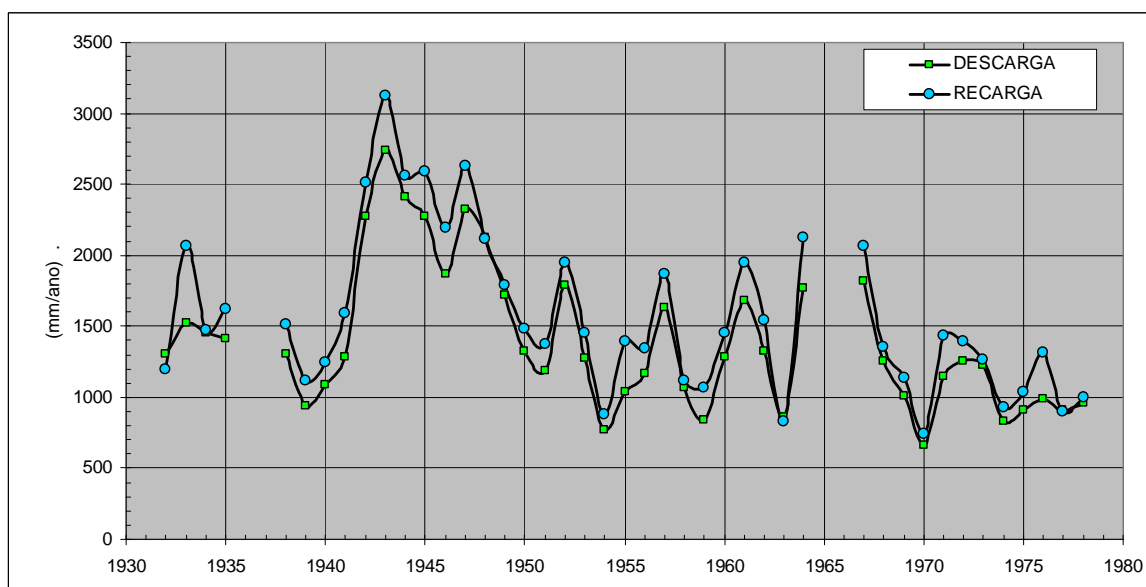


Figura 14 – Comparação dos métodos RORA e PART ano a ano.

## 4. CONCLUSÕES

### 4.1. Métodos para avaliação da disponibilidade hídrica subterrânea a partir das séries de vazões

A aplicação do método RORA utilizando planilha eletrônica só é razoável quando a série histórica é pequena pois é muito trabalhoso, porém permite um detalhamento minucioso dos resultados.

A aplicação do método RORA utilizando o programa do USGS é extremamente vantajoso e eficiente, principalmente quando a série histórica é longa.

A aplicação do método de separação do hidrograma utilizando o programa PART é extremamente eficiente e permite um detalhamento dia a dia do hidrograma.

### 4.2. Avaliação da disponibilidade hídrica subterrânea da Bacia do Macacu a partir dos dados da estação 59235000-MACACU

A disponibilidade hídrica subterrânea da bacia do rio Macacu estimada a partir da série de vazões da estação 59235000-MACACU resultou em valores médios anuais muito elevados, entre 1575 mm para o método RORA e 1395 mm para o método PART. Os valores mínimo anuais de recarga foram de 744 mm e os valores mínimos de descarga foram de 659 mm.

Em termos de regime, observa-se que há uma coerência dos meses mais chuvosos dezembro, janeiro, fevereiro e março com os maiores valores de recarga e descarga. Em termos médios,



observa-se uma recarga de 131 mm/mês e uma descarga de 116 mm/mês. Os valores mínimos de recarga são de 24 mm/mês e os valores mínimos de descarga são de 36 mm/mês.

## **5. AGRADECIMENTOS**

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Projeto Macacu “Planejamento Estratégico da Região Hidrográfica dos Rios Guapi-Macacu e Caceribu-Macacu”, realizado através do Programa PETROBRAS Ambiental. Agradecemos também a aluna do curso de graduação em engenharia civil, Ana Carolina Campilho da Silva que muito nos auxiliou na formatação final deste trabalho.

## **6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

RUTLEDGE, A.T. (1998). U.S. GEOLOGICAL SURVEY Water-Resources Investigations Report 9. Computer Programs for Describing the Recession of Ground-Water Discharge and for Estimating Mean Ground-Water Recharge and Discharge from Streamflow Records—Update. A Contribution of the Regional Aquifer-System Analysis Program. 98-4148.

RORABAUGH, M.I., 1964, Estimating changes in bank storage and ground-water contribution to streamflow: International Association of Scientific Hydrology, Publication 63, p. 432-441.

RORABAUGH, M.I. and Simons, W.D., 1966, Exploration of methods relating ground water to surface water, Columbia River basin--Second phase: U.S. Geological Survey Open-File Report, 62 p.

RUTLEDGE, A.T., 1993, Computer programs for describing the recession of ground-water discharge and for estimating mean ground-water recharge and discharge from streamflow records: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 93-4121, 45 p.

RUTLEDGE, A.T. and Daniel, C.C., 1994, Testing an automated method to estimate ground-water recharge from streamflow records: *Ground Water*, v. 32, no. 2, p. 180-189.

RUTLEDGE, A.T. and Mesko, T.O., 1996, Estimated hydrologic characteristics of shallow aquifer systems in the Valley and Ridge, the Blue Ridge, and the Piedmont Physiographic Provinces based on analysis of streamflow recession and base flow: U.S. Geological Survey Professional Paper 1422-B, 58 p.

MEYBOOM, P., 1961, Estimating ground-water recharge from stream hydrographs: *Journal of Geophysical Research*, v. 66, no. 4, p. 1,203-1,214.

NATHAN, R.J., and McMahan, T.A., 1990, Evaluation of automated techniques for base flow and recession analysis: *Water Resources Research*, v. 26, no. 7, p. 1,465-1,473.

- NUTBROWN, D.A., and Downing, R.A., 1976, Normal-mode analysis of the structure of baseflow-recession curves: *Journal of Hydrology*, v. 30, p. 327-340.
- Olmsted, F.H. and Hely, A.G., 1962, Relation between ground water and surface water in Brandywine Creek basin Pennsylvania: U.S. Geological Survey Professional Paper 417-A, 21 p.
- PETTYJOHN, W.A., and Henning, Roger, 1979, Preliminary estimate of ground- water recharge rates, related streamflow and water quality in Ohio: Columbus, Ohio, Ohio State University Water Resources Center, Project Completion Report 552, 323 p.
- PETRAS, Ivan, 1986, An approach to the mathematical expression of recession curves: Pretoria, South Africa, Hydrologic Research Institute, Water S.A., v. 12, no. 3, p. 145-150.
- PINDER, G.F., and Jones, J.F., 1969, Determination of the ground-water component of peak discharge from the chemistry of total runoff: *Water Resources Research*, v. 5, no. 2, p. 438-445.
- RIGGS, H.C., 1964, The base-flow recession curve as an indicator of ground water: *International Association of Scientific Hydrology*, Publication 63, p. 352-363.