

# A RECARGA DO AQUÍFERO SEDIMENTAR NA CIDADE UNIVERSITÁRIA DA USP (SÃO PAULO)

Ingo Wahnfried<sup>1</sup> & Ricardo Hirata<sup>1</sup>

**Resumo** - Três métodos de avaliação da recarga de aquíferos foram aplicados em uma planície aluvionar da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê, no campus da USP da capital: variação do nível d'água (VNA), balanço hídrico e estimativa darcyniana. Foram realizadas medições de nível de água entre setembro de 2003 e janeiro de 2004, fornecendo dados para os métodos de VNA e estimativa darcyniana. Temperatura média e pluviosidade mensais de janeiro de 2003 a janeiro de 2004 foram usadas para aplicar o método do balanço hídrico.

As recargas variaram em função da escala de tempo usada e do método de sua estimação. O método do balanço hídrico necessita de um período mínimo de observação de um ano, sendo que para 2003 a recarga obtida foi de 48 mm. VNA pode ser aplicado tanto a elevações de períodos curtos (variações episódicas de aumento do NA, como horas ou dias) como longos (variações mensais ou anuais), fornecendo dois resultados. De setembro de 2003 a janeiro de 2004 foram calculados 282 mm de recarga pela episódica, e 187 mm pela longa. Usando a estimativa darcyniana foram 66 mm, considerando os gradientes mensais médios. O balanço hídrico não detectou recarga neste período.

**Abstract** - Three different methods were used to estimate the groundwater recharge in an alluvial plain of the Upper Tietê Basin (São Paulo, Brazil) at the University of São Paulo campus: water-table fluctuation (WTF), water balance (WB) and Darcyan approach (DA). Six multi-level monitoring wells were installed, a low-to-medium density urban area subject to a humid tropical climate. Hydraulic head were monitored weekly, every third day or after rainfall events, for WTF and DA recharge estimations (September 2003 to January 2004), and for WB method, mean temperature and total rainfall were measured monthly (January 2003 to January 2004).

Different methods and different time period result in different recharge estimations. For the WB method at least one year of precipitation and temperature data are necessary. The WTF method can be estimated using short-term elevations (periods of one to three days) or long-term fluctuations

---

<sup>1</sup> LAMO – Laboratório de Modelos Físicos, Instituto de Geociências – USP; Rua do Lago, 562, Cidade Universitária, São Paulo/SP, CEP 05508-080, Tel. (11) 3091-4804, FAX (11) 3091-4207 e-mail: [iwahn@yahoo.com](mailto:iwahn@yahoo.com), [rhirata@usp.br](mailto:rhirata@usp.br)

(periods of months or years), resulting in two distinct recharge estimates. For the 5 months period, the short and long-term approaches estimated respectively 282 mm and 187 mm; DA comprised 66 mm using the monthly mean hydraulic gradient, and no recharge was detected using the WB method. This method was only useful for an year period: 2003 showed 48 mm recharge.

**Palavras-Chave** – recarga; aquífero sedimentar.

## **INTRODUÇÃO**

Os caminhos e fontes de recarga da água subterrânea em áreas urbanas são mais numerosos e complexos do que em áreas rurais. Na maior parte das cidades grandes quantidades de água são importadas de outras bacias hidrográficas para abastecimento, ocorrendo perdas na distribuição e injeção por fossas em locais sem coleta. A recarga urbana ainda é um assunto pouco pesquisado, com um pequeno número de estudos em áreas tropicais publicados (Lerner 2002)[1].

A impermeabilização da superfície é um fator redutor da recarga. No entanto, em uma área urbanizada, esta tende a ser maior do que em uma área equivalente sem impermeabilização, devido às perdas de água pela rede de água e esgoto, irrigação de jardins, entre outros (Foster *et al.* 1999)[2].

O objetivo deste estudo foi avaliar a recarga em um aquífero raso livre, com um índice baixo de ocupação, na Bacia Hidrográfica do Alto Tietê (BAT).

## **RECARGA EM ÁREAS URBANAS**

No meio urbano as mudanças impostas, como impermeabilização da superfície, a existência de sistemas de drenagem artificial e a recarga localizada em parques e áreas não cobertas, aumentam bastante a complexidade dos processos de recarga. O volume de água trazida de outras bacias usado nas cidades pode ser igual ou até maior do que a recarga natural. Com esta quantidade de água importada, existem muitas possibilidades de ocorrer recarga extra (Lerner 2002)[1]. Os tipos de recarga existentes em áreas urbanas, segundo o autor, são:

### *Recargas naturais*

- Recarga direta: é aquela que ocorre no ponto onde a água caiu, sem escoamento superficial. O método convencional para estimá-la é o balanço de umidade do solo. Pode ser feito um balanço para cada tipo de vegetação e solo, ou pode-se adaptar um valor obtido para as várias situações

presentes. Parques e jardins contribuem para um aumento deste tipo de recarga, enquanto áreas impermeabilizadas a diminuem, devendo ser levados em conta.

- Recarga localizada: é a que ocorre pontualmente, em passagens preferenciais. Não existe pesquisa para demonstrar a importância deste tipo de recarga em zonas urbanas. A maior parte das cidades tem estacionamentos, solos compactados e pátios que não têm sistema de drenagem de água pluvial. É muito provável que recarga localizada ocorra, mas não existem dados para quantificá-la. Como regra geral, ainda que não comprovada, o autor considera que uma proporção de 50% da superfície deva ser considerada como permeável nestes casos, particularmente em áreas residências.

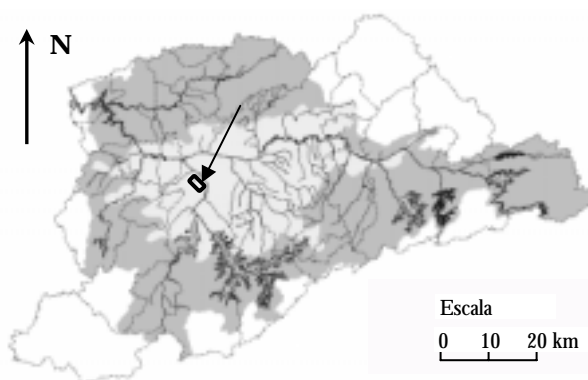
### *Recargas não-naturais*

- Sistemas de águas pluviais: o principal fator que determina recarga nestes sistemas é sua profundidade em relação ao nível de água (também observado por Yang et al. 1999)[3]. Quando estão abaixo do NA, se tornam coletores, e não fornecedores de água para recarga. Via de regra são menos significantes para recarga do que as redes de abastecimento, mas podem ser importantes fontes de poluição. Balanços hídricos nestes sistemas são muito difíceis, mas nenhum outro sistema satisfatório de estimativa é conhecido. Portanto este deve ser aplicado em conjunto com dados empíricos.
- Sistemas de esgoto: Vazamentos de sistemas de coleta de esgoto contribuem para a recarga, mas se estes não existem, o caminho mais importante são as fossas negras e tanques sépticos. Nestas situações a maior parte da água que chega a estes sistemas sépticos recarrega o aquífero.
- Sistemas de fornecimento de água: Taxas de vazamento entre 20-25% são comuns, chegando até a 50% (Lerner 1986)[4]. Mas localizar as tubulações e vazamentos, e ainda quantificá-los, é uma enorme e difícil tarefa em qualquer cidade.

No caso de Nottingham, Reino Unido, Yang *et al.* (1999)[3] descrevem como fontes de recarga mais importantes a precipitação, os vazamentos da rede de fornecimento de água e os vazamentos do sistema de esgotos (97% das residências têm sistema de coleta de esgoto, mesmo em zonas rurais). Apenas 5% da recarga se deve a perdas de água em sistemas de coleta de água pluvial. Outros processos importantes de recarga são as captações dos telhados, as quais são conduzidas para locais permeáveis, com a intenção de reduzir o volume de águas pluviais nos sistemas coletores. Lerner (2002)[1] os denomina, incluindo sistemas em maior escala, coletores de águas de tempestade. Também é relevante a irrigação de parques e áreas públicas, pelo fato da água normalmente não ser paga, costumando ser feita em quantidades excessivas.

## ÁREA DE ESTUDO

A área experimental na qual foi realizado este trabalho está localizada no Campus da Universidade de São Paulo da capital, entre as coordenadas UTM 7.392 e 7.395 km norte, e 322 km e 325 km leste (*datum* Córrego Alegre/MG) (Figura 1). É uma zona de recarga do Aquífero São Paulo, associada às formações sedimentares São Paulo e Itaquaquacetuba. O local é recoberto em sua maior parte por vegetação rasteira, do tipo gramínea, com baixo índice de ocupação: somente 20% da área do Campus é construída. Para a observação dos níveis freáticos foram implantados seis poços de monitoramento multi-nível, conforme descrito na tabela 1. Os dados meteorológicos necessários para a aplicação do método do balanço hídrico foram fornecidos pelo Laboratório de Climatologia e Biogeografia da Geografia/USP.



**Figura 1** - Localização do Campus da USP na BAT

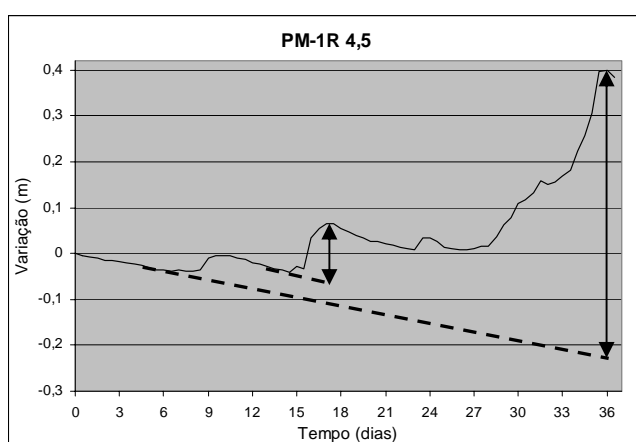
**Tabela 1** - Diâmetros dos poços e profundidade dos filtros; PM-R= poço de monitoramento localizado ao lado da Raia; PM-C = poço de monitoramento localizado ao lado do CRUSP

Poço	Diâmetro do revestimento (polegadas)	Profundidade dos filtros (m)
PM1R	1"	3,50 a 4,50
		6,50 a 7,50
PM2R	1"	12,50 a 13,50
		3,65 a 4,65
PM3R	1"	3,65 a 4,65
		6,33 a 7,33
PM4R	1"	12,50 a 13,50
		4,50 a 4,90
PM1C	1"	3,35 a 4,35
		6,50 a 7,50
PM2C	1"	3,35 a 4,35
		6,50 a 7,50

## CÁLCULOS DE RECARGA

### *Variação do Nível de Água*

O cálculo de recarga por este método foi feito de duas formas: levando-se em conta variações de NA causados para cada evento de forte precipitação, e variações mensais, ou seja, diferença do nível freático observada entre o começo e o fim de um mês (Figura 2). O valor do  $S_y$  adotado foi o obtido por Johnson (1967 *apud* Healy & Cook 2002)[5] em compilação de 17 estudos, quantificando a vazão específica para sedimentos, desde argila até conglomerado. No estudo a areia argilosa possui  $S_y$  de 0,07, e a areia com seixos 0,25, as quais são as litologias existentes na profundidade de implantação dos filtros dos poços.



**Figura 2** - N.A. medido a cada 12 horas por transdutor a partir de 23/12/03, com correção barométrica

A diferença nos resultados fica evidente nas tabelas 2 e 3. Se for levado em conta cada episódio de subida de nível, a recarga é bem superior. Isso se dá principalmente pela descarga que ocorre após cada elevação, que só é contabilizada quando o cálculo é feito em períodos que as incluam. Ou seja, a recarga obtida com a somatória das elevações episódicas sempre apresentará valores maiores do que aquela feita pelas elevações em períodos maiores. Considerando as variações de NA nos poços mais rasos, a somatória das mensais representou 67 % da feita com as episódicas neste estudo.

Diferença significativa de recarga também foi observada comparando os níveis mais rasos com os mais profundos. No PM1R, para o cálculo por variações episódicas no mês de janeiro, o primeiro apresentou recarga de 292 mm, o segundo, 18 mm. É importante que em aquíferos multicamadas o cálculo da recarga se faça pelos níveis mais rasos, onde a água de recarga efetivamente chega.

**Tabela 2 - Cálculo de recarga por variações episódicas do NA**

Poço/Mês	Recarga (mm)							
	1R 4,5	1R 7,5	1R 13,5	2R 4,5	3R 4,5	3R 7,5	3R 13,5	4R 4,5
Set.	0	0	0	0	0	-	0	-
Out.	29	6	0	24	19	-	0	-
Nov.	57	10	14	24	29	3	11	3
Dez.	55	20	22	49	52	14	18	40
Jan.	292	37	18	153	170	49	30	107
Total	433	74	70	249	270	66	88	151

**Tabela 3 - Cálculo de recarga por variação mensal do NA**

Poço/Mês	Recarga (mm)							
	1R 4,5	1R 7,5	1R 13,5	2R 4,5	3R 4,5	3R 7,5	3R 13,5	4R 4,5
Set.	0	0	0	0	0	-	0	-
Out.	8	4	4	18	20	-	2	-
Nov.	15	5	13	10	18	-	12	-
Dez.	20	4	14	18	10	6	12	33
Jan.	155	41	35	135	133	38	34	130
Total	198	53	66	180	180	43	60	163

### Balanço hídrico

A técnica de balanço hídrico usada é a definida por Thornthwaite (1948)[6], adaptada por Fenn *et al.* (1975)[7]. Na Tabela 4 são demonstrados os resultados do cálculo com planilha *Microsoft Excell*, para o qual foram usados os dados de precipitação e temperatura de 2003 e janeiro de 2004:

**Tabela 4 - Cálculo do balanço hídrico**

Parâmetro (mm)	2003												2004
	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Jan.
ET Pot.	114,0	121,0	96,0	80,0	56,0	57,0	50,0	43,0	59,0	72,0	86,0	106,0	104,0
P	245,0	117,6	125,0	53,5	23,3	8,8	5,1	21,7	26,1	73,9	61,3	146,5	250,3
C' (ou f)	0,10	0,10	0,10	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,10	0,10
Qoff	24,5	11,8	12,5	2,7	1,2	0,4	0,3	1,1	1,3	3,7	3,1	14,7	20,1
I	220,5	105,8	112,5	50,8	22,1	8,4	4,8	20,6	24,8	70,2	58,2	131,9	180,9
I-ET Pot.	106,5	-15,2	16,5	-29,2	-33,9	-48,6	-45,2	-22,4	-34,2	-1,8	-27,8	25,9	76,9
ΣNEG(I-ET Pot.)	0,0	-15,2	0,0	-29,2	-63,0	-111,7	-156,8	-179,2	-213,4	-215,2	-243,0	0,0	0,0
Suz	120,0	81,0	97,5	70,5	50,4	31,1	19,9	16,0	11,4	11,2	8,5	34,3	111,2
ΔSuz	82,7	-39,0	16,5	-27,0	-20,1	-19,3	-11,2	-4,0	-4,6	-0,2	-2,7	25,9	76,9
ET real	114,0	121,0	96,0	80,0	56,0	57,0	50,0	43,0	59,0	72,0	86,0	106,0	104,0
ΔSgw	23,8	23,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Recarga total (mm)	47,6												0,0

Sendo:

- ET Pot.: Evapotranspiração Potencial;
- P : Precipitação;
- C' (ou f): Coeficiente de infiltração, em função da declividade e tipo de terreno;
- Qoff: Fluxo, em superfície, para fora da área de estudo;
- I: Infiltração;
- ΣNEG: Somatória dos resultados negativos da subtração I-EPot;
- Suz: Armazenamento de água na zona não saturada;
- ΔSuz: Variação do armazenamento de água na zona não saturada;
- ET real: Evapotranspiração real;
- ΔSgw: Variação do armazenamento de água na zona saturada, correspondente à recarga mensal.

### *Estimativa darcyniana*

A condutividade hidráulica horizontal da zona saturada do aquífero do meio foi determinada através de slug tests (Freeze & Cherry 1979)[8]. Com auxílio do software Aquifer Test for windows, v.2.52, da Waterloo Hydrogeologic, Inc., pelo método de Hvorslev (1951)[9], foram determinadas as seguintes condutividades hidráulicas horizontais (Tabela 5):

**Tabela 5** - Condutividades hidráulicas horizontais medidas nos poços

Poço	Condutividade hidráulica (m/s)
PM1R4,5	$1,21 \times 10^{-5}$
PM1R7,5	$7,78 \times 10^{-6}$
PM1R13,5	$1,96 \times 10^{-8}$
PM2R4,5	$1,23 \times 10^{-5}$
PM3R4,5	$2,45 \times 10^{-5}$
PM3R13,5	$1,58 \times 10^{-6}$

Estes valores são em parte inferiores àqueles obtidos por Iritani (1993)[10], os quais variam de  $10^{-4}$  m/s (filtro instalado em areia conglomerática) a  $10^{-5}$  m/s (filtro instalado em lamito) para os poços de monitoramento de até 20 m de profundidade.

Foi considerada, para efetuar os cálculos de recarga, uma seção com 40m de profundidade (espessura saturada do aquífero) e extensão de 2.500 m (dimensões da zona de descarga junto à Raia Olímpica). A vazão que passa por esta seção, dividida pela área do campus, tem como resultado a recarga.

Aplicando-se a lei de Darcy, obtém-se uma recarga de 11 mm/mês para setembro, 14 mm/mês para outubro, 9 mm/mês para novembro, 7 mm/mês para dezembro de 2003 e 25 mm/mês para janeiro de 2004, usando os gradientes médios mensais (Tabela 6).

Comparativamente, usando valores de condutividade e gradiente hidráulico em situações de estiagem e chuva de Iritani (1993)[10], o valor da recarga máximo é de 31 mm/mês, para a mesma seção do aquífero mencionada acima.

### **COMPARAÇÃO DE ESTIMATIVAS DE RECARGA**

Iritani (1993)[10], estudando a hidrogeologia do *campus* universitário da USP, utilizou a estimativa darcyniana para avaliar a recarga em 250 mm/ano. Menegasse-Velázquez (1996)[11] calculou, através do método de VNA, uma recarga de 60 mm/ano em uma área residencial de classe média na BAT, com situação geológica semelhante à da USP.

Hirata *et al.* (2002)[12] sustentam que devem ser acrescidos à recarga natural na BAT as antrópicas não-intencionais, associadas à perda das redes públicas de água e de esgoto. Isto

representa 15,8 m<sup>3</sup>/s dos 64 m<sup>3</sup>/s distribuídos para a área da BAT, divididos em 19,7% do total do abastecimento de perdas físicas na distribuição de água, 5% em perdas da rede de esgoto e 30% por injeção em sistemas de saneamento *in situ*, como fossas negras e sépticas, chegando a 498 Mm<sup>3</sup>/ano. Somando as recargas natural e antrópica os autores estimaram um total de 410 mm/ano em áreas urbanizadas da BAT.

No presente trabalho o balanço hídrico registrou o menor valor de recarga, de 48 mm/ano, devido a pouca precipitação registrada em 2003: 908 mm. Em função disto a água precipitada não foi suficiente para vencer a evapotranspiração e a capacidade de campo para chegar ao armazenamento. Assim também não registrou recarga entre setembro de 2003 e janeiro de 2004.

Pela estimativa darcyniana foi registrada recarga de 66 mm no período de cinco meses, calculada pelo gradiente médio observado. Em setembro, quando foram contabilizados somente 26 mm de chuva, a recarga calculada por este método totalizou 11 mm. Esta deve ser oriunda, em parte, de descarga da água armazenada no aquífero, fugas da rede de esgoto e de abastecimento.

Na Tabela 6 são mostrados os resultados de recarga dos três métodos:

**Tabela 6** - Recargas mensais calculadas segundo os três métodos, e precipitações, em milímetros, para 2003/2004

	Balanço hídrico	VNA (médias) *		Estimativa darcyniana	Precipitações
		episódicas	mensais		
Set.	0	0	11	26	0
Out.	0	24	14	74	15
Nov.	0	28	9	61	14
Dez.	0	49	7	147	20
Jan.	0	181	25	250	138
Total	0	282	66	558	187
Anual (2003)	48	-**	-**	908	-**

\* Foram usadas as médias das variações de nível dos poços mais rasos;

\*\* Dados não disponíveis.

Neste estudo, o valor de recarga que mais se aproxima daquele obtido por Hirata *et al.* (2002)[12] é o de VNA episódico, com 282 mm em 5 meses de observação.

Estes valores também estão de acordo com aqueles obtidos por Foster *et al.* (1999)[2], oscilando entre 300 e 700 mm/ano independentemente da situação climática, em estudos de outras localidades urbanizadas na América Latina e Ásia.



## CONCLUSÕES

O método mais sensível dos três analisados para registrar recarga em áreas urbanizadas é o de VNA, medida em cada variação episódica. Para este método, porém, se faz necessária a implantação de uma boa rede de monitoramento em locais com NA representativo da área de estudo. Não capta, no entanto, fluxos constantes causados por fugas de redes e injeção em sistemas de saneamento *in situ*, uma vez que estes não causam oscilação do nível freático. Neste caso a estimativa darcyniana é mais apropriada, pois se baseia no fluxo de água causado pelo gradiente do nível freático. Está sujeito, porém, a imprecisões em função da grande variação natural da permeabilidade.

O balanço hídrico somente é adequado para intervalos de tempo iguais ou superiores a um ano, principalmente por causa do balanço de umidade no solo. Apesar de fornecer valores mensais, é um método pouco sensível para avaliações desta duração. E caso as chuvas sejam de pouca intensidade, distribuídas ao longo do ano, dificilmente registrará recarga.

Para a área estudada, o método com o melhor resultado foi o da variação do nível de água, usando as oscilações episódicas. Nos cinco meses avaliados (setembro de 2003 a janeiro de 2004) registrou 282 mm de recarga, valor equivalente àqueles mencionados por Foster *et al.* (1999)[2] e Hirata *et al.* (2002)[12].

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [7]FENN,D. HANLEY, K., DE GEARE, T. 1975. *Use of the Water Balance Method for predicting leachate generation from solid waste disposal sites*. US Environmental Protection Agency Report.
- [2]FOSTER, S., MORRIS, B., CHILTON, J. 1999. *Groundwater in urban development – a review of linkages and concerns*. In: Ellis J.B. (ed.) *Impacts of urban growth on surface water and groundwater quality*. IAHS Publ. p.259:3-12.
- [8]FREEZE, R.A. & CHERRY, J.A. 1979. *Groundwater*. Englewood Cliffs, N.J. Prentice-Hall. p.604.
- [5]HEALY, R.W., COOK, P.G. 2002. *Using groundwater levels to estimate recharge* In: *Hydrogeology Journal*. v.10 (1). february 2002. Springer-Verlag, Berlin. p.91-109.
- [12]HIRATA, R., FERRARI, L.C.K.M., FERREIRA, L. PEDE, M. 2002. *La explotación de las aguas subterráneas en la cuenca hidrográfica del Alto Tietê: cronica de una crisis anunciada*. Boletim Geológico Minero. Madrid, Espanha. v. 113(3) p.273-282.
- [9]HVORSLEV, M.J. 1951. *Time Lag and Soil Permeability in Ground-Water Observations*. Bull. No. 36. Waterways Exper. Sta. Corps of Engrs. U.S. Army, Vicksburg, Mississippi. p.1-50.

- [10]IRITANI, M.A. 1993. *Potencial Hidrogeológico da Cidade de São Paulo*. Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo. Dissertação de Mestrado. p.108.
- [4]LERNER, N.D. 1986. *Leaking pipes recharge groundwater*. Groundwater 24(5), p654-662.
- [1]LERNER, D.N. 2002. *Identifying and quantifying urban recharge: a review*. Hydrogeology Journal 10:143-152.
- [11]MENEGASSE-VELÁSQUEZ, L.N. 1996. *Efeitos da Urbanização Sobre o Sistema Hidrológico: Aspectos da Recarga no Aquífero Freático e o Escoamento Superficial*. Inst. de Geociências, Universidade de São Paulo. São Paulo. Tese de Doutorado. p124.
- [6]THORNTHWAITE, C.W. 1948. *An approach toward a rational classification of climate*. Geograph. Rev. 38: 55-94.
- [3]YANG Y., LERNER D.N., BARRETT M.H., TELLAM JM. 1999. *Quantification of groundwater recharge in the city of Nottingham, UK*. Environ Geol 38(3):p.183-198.