

ARMAZENAMENTO DINÂMICO DE ÁGUA NA BACIA DO RIO PIABANHA

Lígia M. N. de Araujo^{1}; Isela L. Vásquez P.²; Mariana de Araujo Abdalad³; Janaina Gomes Pires da Silva⁴; Pedro Corrêa de Melo⁵; Fabrício Polifke⁶; Nelson Ferreira Fernandes⁷ & Otto Corrêa Rotunno Filho⁸*

Resumo – Na bacia do rio Piabanha, a estação chuvosa é bem definida, usualmente abrangendo o período de outubro a março, que concentra, em média, 70% da precipitação anual, sendo 45% apenas no trimestre dezembro-janeiro-fevereiro. Seus solos são rasos e desenvolvidos sobre embasamento de rochas graníticas fraturadas, com relevo de declividades acentuadas. Essas características contribuem para a atribuição de grande importância ao escoamento intermédio ou escoamento subsuperficial oriundo de tempestade na formação do escoamento fluvial. Durante os meses de estiagem, a vazão de base mantém-se acima dos $3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ por 130 dias ou por até 200 dias com metade desse fluxo. É investigada a variação do armazenamento de água na bacia durante o período chuvoso e sua depleção durante a estação seca. O balanço hídrico sazonal da bacia é efetuado no período de 2010 a 2015, em que ocorreram importantes eventos extremos de chuvas intensas, formados por diferentes mecanismos, e uma estiagem prolongada. Estima-se que o armazenamento de água na bacia seja da ordem de algumas centenas de milímetros, variando de 200 mm a 300 mm no período investigado.

Palavras-Chave – armazenamento subsuperficial; limiar de acumulação; zona subsuperficial fraturada hidrologicamente ativa.

DYNAMIC WATER STORAGE IN PIABANHA WATERSHED

Abstract – The Piabanha watershed has a well defined rainy season, usually along October to March when 70% of the annual amount of precipitation uses to occur, depicting 45% concentrated along the trimester December-January-February. It has shallow soils layered onto fractured granite bedrock with steep relief. These characteristics contribute to assign great importance to interflow and subsurface storm flow in the composition of stream flow. Along the dry season base flow is maintained above $3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ for 130 days or up to 200 days with half of this flow. This paper investigates the water storage variation in the watershed along the rainy season and its depletion during the dry season. The seasonal watershed water budget is analyzed along the period 2010-2015 when several important hydrologic extreme events occurred such as intense rainfall promoted by different mechanisms and a prolonged drought. The water storage is estimated around a few hundred millimeter varying from 200 mm to 300 mm within the investigated period.

Keywords – subsurface storage; storage threshold; hydrologically active bedrock zone.

¹ Agência Nacional de Águas (ANA): ligia.araujo@ana.gov.br.

² Programa de Engenharia Civil, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro: iselavp@gmail.com

³ Instituto de Geociências- IGEO, Universidade Federal do Rio de Janeiro: mariana_abdalad@yahoo.com.br

⁴ Serviço Geológico do Brasil – CPRM: janaina.silva@cprm.gov.br

⁵ Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro: pedromelo@poli.ufrj.br

⁶ COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro: briciopolifke@gmail.com

⁷ Instituto de Geociências- IGEO, Universidade Federal do Rio de Janeiro: nelsonff@acd.ufrj.br

⁸ Programa de Engenharia Civil, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro: ottorotunno@oi.com.br; otto@coc.ufrj.br

* Autor Correspondente: ligia.araujo@ana.gov.br

INTRODUÇÃO

No âmbito do projeto intitulado “Estudos Integrados de Bacias Experimentais – Parametrização Hidrológica na Gestão de Recursos Hídricos das Bacias da Região Serrana do Rio de Janeiro – EIBEX I” (COPPE, 2010), foram instaladas três bacias experimentais com sub-bacias aninhadas segundo diferentes usos e cobertura do solo, variando de 3 km² a 30 km², e duas bacias representativas na bacia do rio Piabanha, município de Petrópolis. Uma das bacias representativas tem seu exutório na estação fluviométrica de Pedro do Rio, com 429 km² de superfície, enquanto a outra encontra-se delimitada pela estação Parque Petrópolis, com 260 km².

É consenso que trabalhos de campo, com monitoramento e estudos em bacias experimentais, são fundamentais para o avanço do conhecimento dos processos hidrológicos, em especial, para a projeção de consequências de mudanças globais (BLUME *et al.* 2017).

Os dados gerados pelo projeto EIBEX permitem pesquisar processos hidrológicos que ocorrem na bacia em diferentes escalas. Assim, é objetivo deste trabalho explorar ao máximo os dados fluviométricos, pluviométricos e meteorológicos observados na bacia ao longo do histórico do projeto, na tentativa de elucidar questões não resolvidas, já apontadas em estudos anteriores (ARAUJO, 2016), relativamente ao escoamento superficial que não é adequadamente simulado com modelo hidrológico do tipo concentrado. A questão levantada seria a importância do escoamento intermédio ou subsuperficial oriundo de tempestade para a bacia do rio Piabanha, por suas características geológicas, fisiográficas e climáticas.

SAYAMA *et al.* (2011) apontam a relevância desse tipo de escoamento subsuperficial para bacias com características de topografia e clima, regiões íngremes e úmidas, semelhantes à bacia do Piabanha, e investigam o quanto de água uma bacia pode armazenar no conjunto solo - zona subsuperficial fraturada hidrologicamente ativa.

ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo é a bacia do rio Piabanha, em especial, a sub-bacia representativa com exutório em Pedro do Rio.

A pluviosidade anual é superior a 1500 mm, sendo que, em algumas regiões, pode chegar a mais de 2500 mm. A estação chuvosa é bem marcada com o início normalmente em outubro e final em março, período que concentra, em média, 70% da precipitação anual, sendo 45% apenas no trimestre dezembro-janeiro-fevereiro, o mais chuvoso (CPRM, 2011). O trimestre mais seco é junho-julho-agosto. O ano hidrológico pode ser considerado como tendo início em setembro e término em agosto do ano seguinte ao da referência.

Os solos na bacia representativa são rasos e têm porosidade relativamente alta, predominando os tipos cambissolo háplico (42%), latossolo vermelho-amarelo (22%), neossolo litólico (3%) e afloramento rochoso (27%). Desenvolvem-se sobre embasamento de rochas graníticas fraturadas com relevo de declividades acentuadas.

Com relação à cobertura vegetal, predomina a classe floresta na bacia em 51,5% de sua área.

As principais características fisiográficas da bacia são apresentadas na Tabela 1, e o perfil longitudinal, com a localização dos principais afluentes e estações fluviométricas, é apresentado na Figura 1.

Tabela 1: Características fisiográficas da bacia do rio Piabanha até Pedro do Rio. Fonte: ARAUJO (2016)

Característica	Liceu	Parque Petrópolis	Pedro do Rio
Área de drenagem (km ²)	44,5	260	429
Comprimento do talvegue (m)	11.980	27.750	38.538
Desnível máximo da bacia (m)	900	1.560	1.623
Desnível máximo do talvegue (m)	360	460	480
Declividade média (m/m)	0,124	0,118	0,108
Declividade média equivalente constante (m/m)	0,00649	0,00273	0,00276
Taxa de impermeabilização da bacia (%)	35%	23%	23%

Verifica-se que a declividade média é mais acentuada até a estação Liceu, região mais urbanizada da bacia, e que, de Parque Petrópolis em diante, praticamente se mantém, assim como a taxa de impermeabilização.

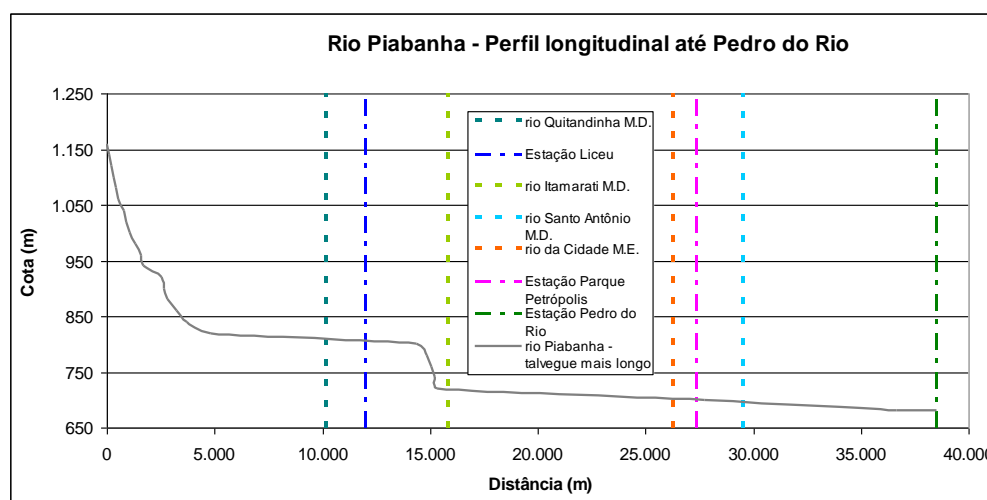


Figura 1: Perfil do rio Piabanha no caminho mais longo até Pedro do Rio. Fonte: ARAUJO (2016)

O tempo de concentração foi estimado com base nas características da Tabela 1, sendo 3 h para a estação Liceu Carlos Chagas, 6 h para Parque Petrópolis e 8 h para Pedro do Rio. Esses tempos puderam ser verificados com os dados observados de precipitação e de vazão.

METODOLOGIA

Para investigar o armazenamento dinâmico de água na bacia do rio Piabanha em Pedro do Rio, foi adotado método semelhante ao usado por SAYAMA *et al.* (2011) para bacias em região montanhosa e úmida na Califórnia, cuja diferença mais notável em relação à bacia do Piabanha seria a litologia.

O armazenamento total exato da bacia seria difícil de estimar por não se conhecerem as características nem a profundidade da camada de rocha ao longo da bacia, porém o armazenamento dinâmico ou a variação máxima do armazenamento total (dV) pode fornecer estimativa próxima da capacidade de acumulação da bacia SAYAMA *et al.* (2011).

A variação do armazenamento pode ser calculada com o balanço hidrológico da bacia ou de cada sub-bacia, conforme a disponibilidade de dados. No caso da bacia do Piabanha, seria possível

calcular, por exemplo, para a estação Liceu, para a estação Parque Petrópolis e para Pedro do Rio. Neste trabalho, são apresentados os resultados apenas para Pedro do Rio.

Foi calculado o balanço hidrológico da bacia na estação de interesse ao longo do período chuvoso conforme

$$dV(t) = \sum P(t) - Q(t) - ET(t) \quad (1)$$

com t variando do início do ano hidrológico ao final das chuvas.

Foram utilizados os dados diários com começo do cálculo no início do ano hidrológico (1 de setembro) e término ao final das chuvas, que variou a cada ano.

No balanço, foi adotada a evapotranspiração potencial de referência e não foi estimada a evapotranspiração real. Essa simplificação foi considerada aceitável, sem muita consequência para o resultado, considerando a predominância da cobertura de floresta na bacia, que teria um coeficiente de cultura igual à unidade e ainda a alta disponibilidade de umidade que satisfaz a demanda de evapotranspiração potencial ao longo de praticamente o ano todo.

A evapotranspiração potencial de referência foi obtida pelo método Penman-Monteith-FAO (Allen *et al.*, 1998), para a estação meteorológica Parque Petrópolis. No entanto, foi necessário contar com dados de outra estação próxima, porém localizada fora da bacia, a estação de Avelar em Paty do Alferes, que não dispõe dos instrumentos que produzam as variáveis necessárias ao emprego do método Penman-Monteith-FAO. Foram usados os dados de temperatura mínima média e temperatura máxima média no nível diário com o método simplificado de Camargo (1971), com vistas a estimar a evapotranspiração e a preencher as lacunas de dados.

Para as vazões em Pedro do Rio, foi estimado o deflúvio diário. Com os dados de vazão média diária da estação de Pedro do Rio, foi ainda analisado o escoamento base, ao longo de todo o seu histórico desde 1931 a 2016. Foram estimados o coeficiente de recessão e a recarga anual, estabelecendo-se as vazões inicial e final do escoamento base e o tempo de duração da recessão a cada ano, estimando-se um valor médio para essas características do escoamento base, para se ter uma ideia *a priori* do seu comportamento, sabendo-se que a depleção do armazenamento na bacia é que propicia o escoamento base perene do rio Piabanha.

A precipitação adotada na Equação 1 foi a precipitação média sobre a bacia, estimada com base nos dados de 22 estações com dados disponíveis para o período 2012-2014 e de cinco estações com dados disponíveis no período 2010-2015. Os resultados para o período comum foram comparados verificando-se que, com as 22 estações, a precipitação resultou maior 110 mm por ano em contraste com a calculada com apenas cinco estações, e com os valores máximos atenuados.

O período de dados de 2012-2013 foi especialmente interessante para a análise pela ocorrência de chuvas intensas e persistentes em março de 2013, em consequência de um fenômeno raro de grande atividade convectiva. Tal fenômeno foi identificado nas cartas de pressão ao nível médio do mar, do Centro de Hidrografia da Marinha. Formou-se um colo atmosférico, que é a região compreendida entre dois centros de alta e dois centros de baixa pressão, onde houve a confluência dos ventos em baixos níveis da atmosfera, atuantes como forçantes dinâmicas, assim como o escoamento de umidade proveniente da região Amazônica, contribuindo em conjunto para a formação convectiva entre os dias 17 e 18 de março de 2013. Ao longo desses dois dias, choveu de forma muito localizada, próximo aos divisores da bacia, o que foi verificado nos dados de 19 estações (ARAUJO, 2013) e também por meio de imagens diárias do satélite ASCAT que estima o grau de saturação do solo (ARAUJO, 2016).

Os outros dois períodos muito chuvosos ocorreram em ano de *El Niño* (2010) e durante um episódio de Zona de Convergência do Atlântico Sul – ZCAS (2011), em que as chuvas se localizaram na parte mais baixa da bacia.

Os resultados e as parcelas do balanço hídrico foram colocados em um gráfico em que foi possível identificar os limiares (patamares) mínimos e máximos do armazenamento dinâmico. Foram comparados quatro períodos chuvosos (2010-2011; 2011-2012; 2012-2013; e 2013-2014).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para o cálculo da precipitação média na bacia, foram considerados dois conjuntos de estações, 22 para um período mais restrito (2012-2014), dada a disponibilidade de dados, e cinco estações para o período 2010-2015; para a média ponderada, foram adotados os polígonos de Thiessen. As estações consideradas estão na Figura 2, e a média da bacia está na Figura 3, juntamente com os demais termos do balanço hídrico.

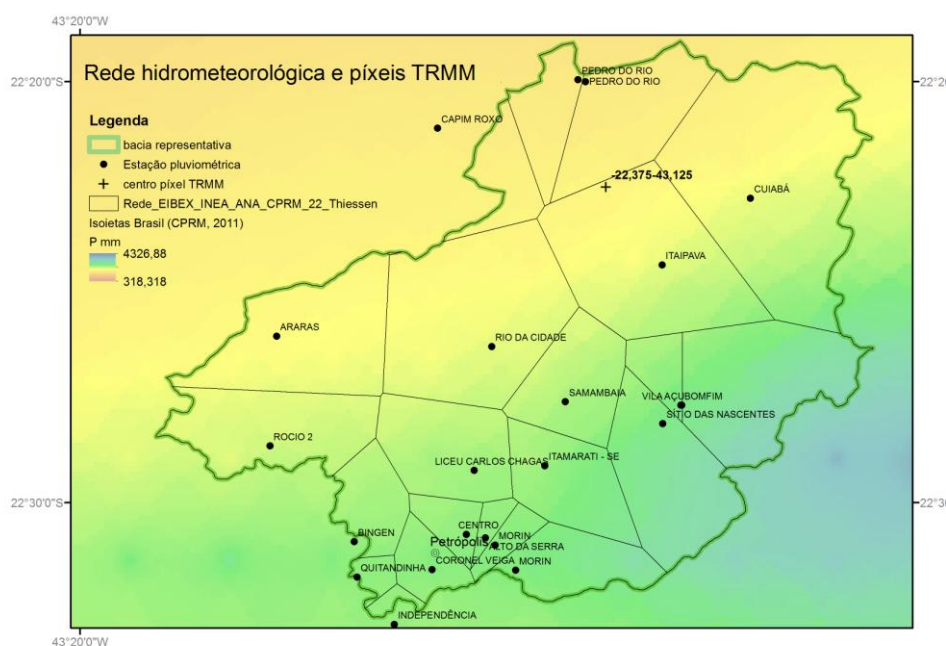


Figura 2 – Estações pluviométricas para estimativa da precipitação média sobre a bacia

A estação Independência, localizada fora da bacia, apresenta a maior pluviosidade de todas as estações. Ela foi considerada no cálculo da precipitação média por estar muito próxima ao divisor da bacia.

No período analisado (2010-2015), a vazão máxima ($179 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) aconteceu no dia 18/03/2013, mesmo dia da precipitação máxima média sobre a bacia (97 mm para 5 estações ou 78 mm para 22 estações). Nesse período, a recarga variou de $5,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a zero, e a vazão mínima variou de $4,24 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a $3,02 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, enquanto o tempo de duração da recessão foi, em média, 119 dias. Na Figura 3, é possível observar o esvaziamento da bacia na recessão do escoamento base, do ano de 2010 até o ano de 2015.

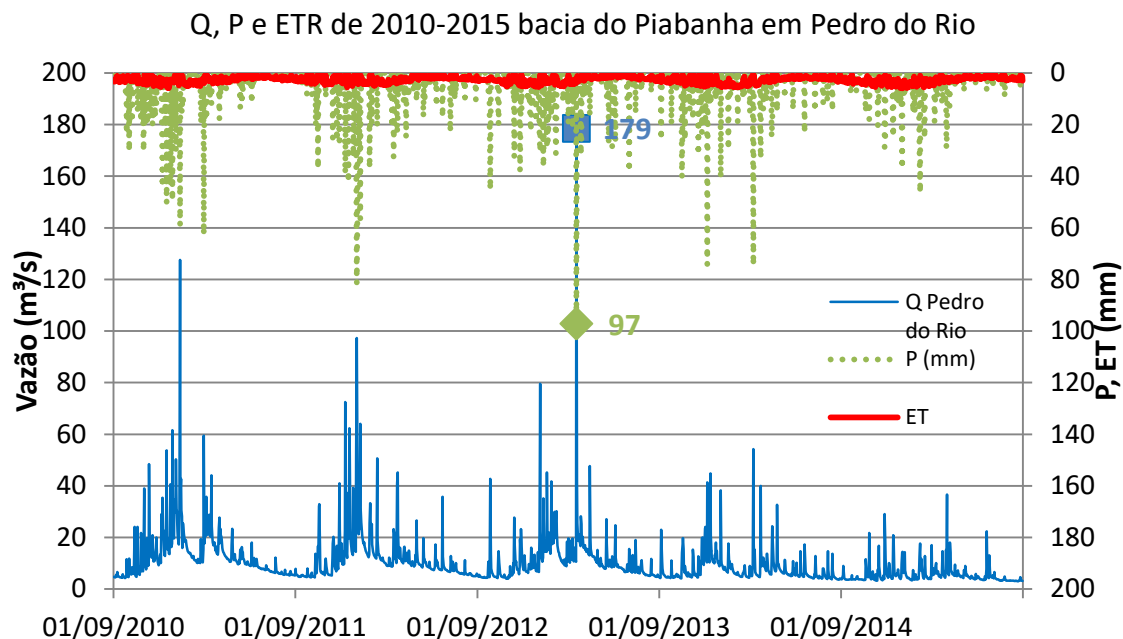


Figura 3 – Termos do balanço hídrico para o período 2010-2015

A variação do armazenamento total da bacia foi verificada para os quatro períodos úmidos entre 2010 e 2015. No entanto, são mostrados apenas dois períodos, o mais úmido e o mais seco.

A Figura 4 mostra o período 2012-2013, o de maior armazenamento. Verifica-se que o armazenamento chegou acima dos 200 mm em 2013 e foi positivo ao longo de quase todo o ano.

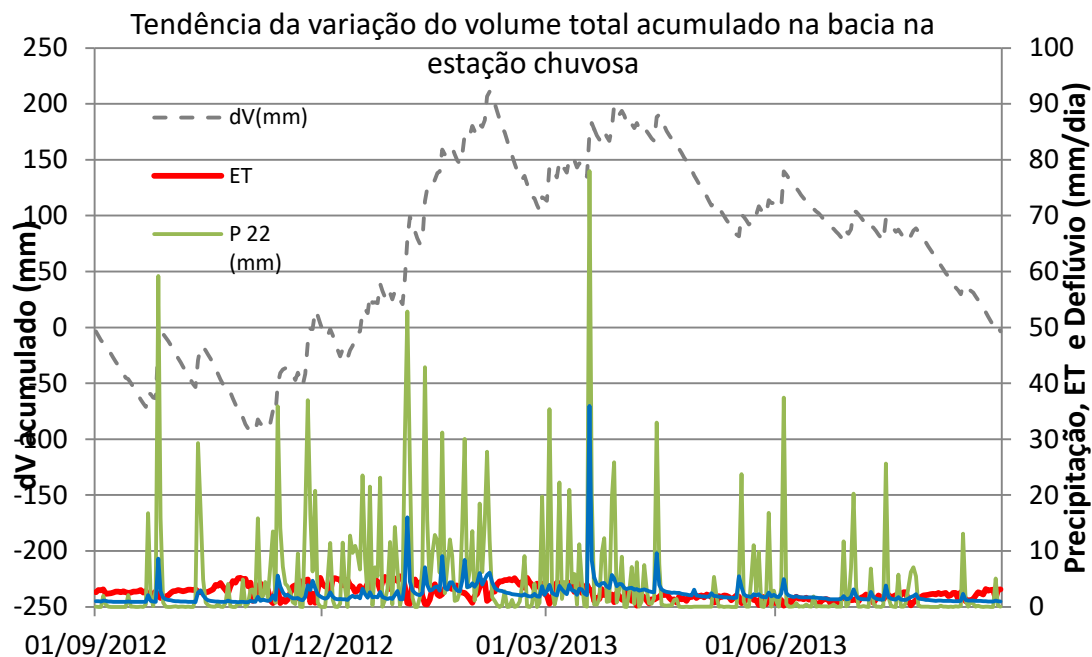


Figura 4 – Variação do armazenamento total na bacia no período 2010-2015

A Figura 5 ilustra o período 2014-2015, que é o de maior deplecionamento do reservatório da bacia, correspondente à estiagem prolongada da região sudeste do Brasil.

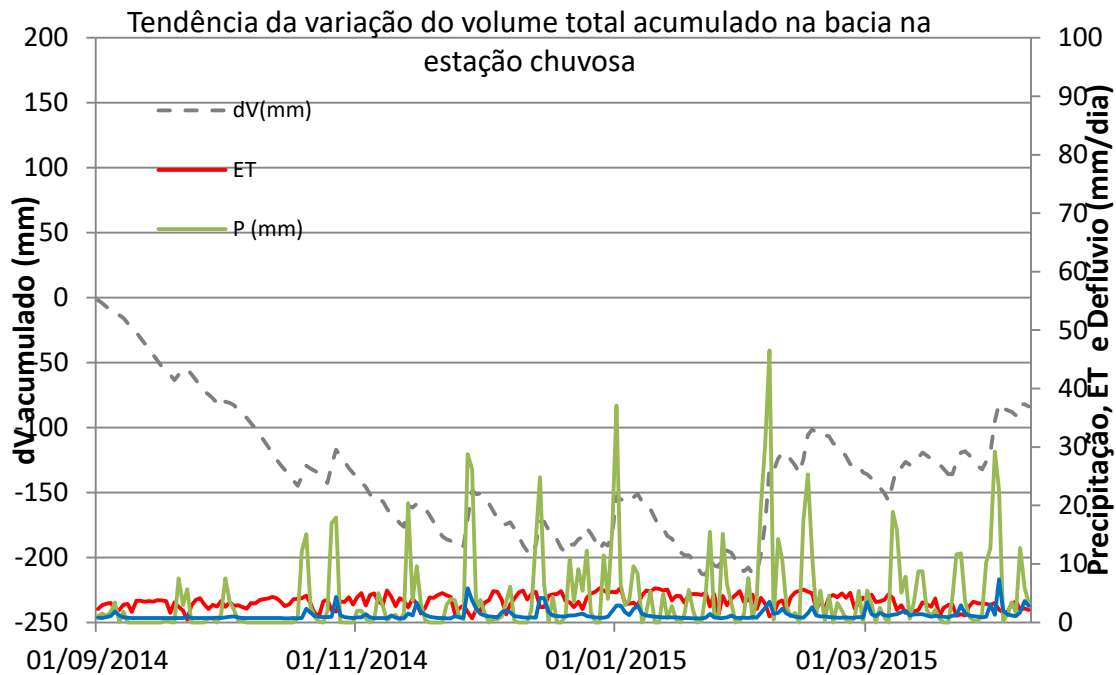


Figura 5 – Variação do armazenamento total na bacia no período 2014-2015

Durante 2014-2015, o reservatório deplecionou até 213 mm, mantendo-se em déficit ao longo de todo o período 2014-2015. Sempre que ocorreu alguma chuva houve algum alívio para o reservatório da bacia. Nesse período, as vazões mantiveram-se próximas dos $3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e não houve qualquer dia com mais de 50 mm de chuva.

As vazões associadas à variação do armazenamento (Figura 6) evidenciam limiares de armazenamento a partir dos quais algumas vazões acontecem.

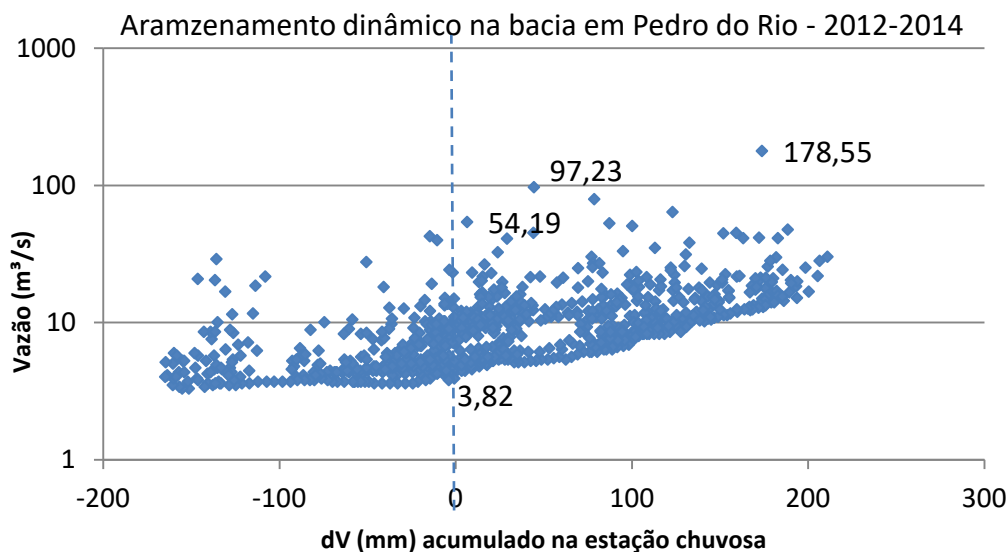


Figura 6 – Vazão e variação do armazenamento total na bacia em Pedro do Rio

Observa-se que, com variações positivas de armazenamento, ocorrem vazões acima de $50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e vazões do escoamento base acima de $3,82 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, ou ainda, que vazões acima de $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ocorrem com armazenamento superior a 100 mm.

CONCLUSÕES

A metodologia foi eficaz em estimar o armazenamento dinâmico da bacia que parece variar de 200 mm a 300 mm. Verificou-se um limiar de armazenamento a partir do qual as vazões podem chegar acima dos $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. No entanto, é preciso ainda experimentar a metodologia para bacias de diferentes tamanhos (Liceu com $44,5 \text{ km}^2$ e Parque Petrópolis com 260 km^2), além de investigar a influência de fatores fisiográficos. A densidade atual de estações pluviométricas automáticas na bacia do Piabanha parece adequada. No entanto, a rede completa deve ser avaliada quanto à sua representatividade espacial, com análise multivariada do tipo análise de componentes principais, visando à sua otimização e a eventual relocação de alguma estação. A estimativa da precipitação média sobre a bacia poderá ser aperfeiçoada considerando mais estações ou as mais representativas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem, inicialmente, ao CNPq, pela bolsa de estudos concedida ao segundo autor. Agradecimentos são estendidos à FAPERJ, por meio dos projetos FAPERJ – Pensa Rio – Edital 34/2014 (2014-2017) – E-26/010.002980/2014 e FAPERJ nº E_12/2015, bem como ao suporte oferecido pelo CNPq por meio do projeto Edital nº 12/2016 – Processo 306944/2016-2 e projeto Edital Universal nº 14/2013 – Processo 485136/2013-9. Especial reconhecimento à CPRM e à ANA pelo apoio ao estudo.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D. & SMITH, M., 1998, *Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements)*. FAO Irrigation and Drainage Paper Nº 56. FAO, Roma.
- ANA, 2015, Hidroweb - Sistema de informações Hidrológicas. Disponível em: <http://hidroweb.ana.gov.br/>. Acesso em 1/05/2015.
- ARAUJO M. N. de, ABDALAD, M, A, SATO, A. M., ARAUJO, A. A. M., AVELAR, A. S., COELHO NETTO, A. L., ROTUNNO FILHO, O. C., 2013, Chuvas Intensas Recorrentes na região da serra do mar/RJ. In: *Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, XX*, Bento Gonçalves, ABRH. 1CD-Rom.
- ARAUJO, LMN, 2016, “Identificação de padrões hidrológicos de precipitação e de umidade do solo na bacia hidrográfica do rio Piabanha/RJ”. In: COPPE/UFRJ – Rio de Janeiro, Brasil;
- BLUME, T, VAN MEERVELD, I, WEILER M. 2017, The role of experimental work in hydrological sciences – insights from a community survey, *Hydrological Sciences Journal*, 62:3, 334-337, DOI: 10.1080/02626667.2016.1230675
- CAMARGO, A., 1971, *Balanço hídrico no Estado de São Paulo*. 3.ed. Campinas: Instituto Agrônomo, 1971. 24p. (Boletim, 116)
- COPPE/UFRJ, 2010, Projeto – EIBEX-I - Estudos Integrados de Bacias Experimentais – Parametrização Hidrológica na Gestão de Recursos Hídricos das Bacias da Região Serrana do Rio de Janeiro – Relatório 2, COPPE/UFRJ, Fundação COPPETEC..
- CPRM, 2011, Isoietas Médias Anuais de 1977 a 2006 na escala 1:5.000.000. In: Atlas Pluviométrico do Brasil. Maceió. CD e <<http://www.cprm.gov.br/publique/Hidrologia/Mapas-e-Publicacoes/Atlas-Pluviometrico-do-Brasil-1351.html>>. Acesso: 2/06/2017.
- SAYAMA, T, MCDONNELL, J J, DHAKAL, A, SULLIVAN, K, 2011, How much water can a watershed store? *Hydrol. Process.* 25, 3899–3908.