

Adaptação da metodologia de Thornthwaite e Mather para balanço hídrico em uma microbacia hidrográfica

Thornthwaite and Mather methodology for water balance adaptation applied for a small watershed

Adaptacion de la metodologia de Thornthwaite y Mather para balance hídrico en una microcuenca hidrográfica

Recebido: 26/06/2020 | Revisado: 13/07/2020 | Aceito: 20/07/2020 | Publicado: 02/08/2020

Moisés Marçal Gonçalves

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6566-1510>

Universidade Federal do Pará, Brasil

E-mail: eng.mmarcal@gmail.com

Giovanni Chaves Penner

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0335-5352>

Universidade Federal do Pará, Brasil

E-mail: gpenner@gmail.com

Rubens Takeji Aoki Araújo Martins

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5842-3263>

Universidade Federal do Pará, Brasil

E-mail: rubensmartins10@gmail.com

Resumo

A sustentabilidade ambiental da microbacia hidrográfica do igarapé Uriboquinha, com a presença de um aterro sanitário nos seus domínios, passa pela quantificação hidrológica e diversos controles ambientais. A presente pesquisa focou na geração de dados hidrológicos com uma nova abordagem do balanço hídrico climatológico por uma adaptação da metodologia de Thornthwaite e Mather. Originalmente a metodologia desenvolve o balanço hídrico indireto, partindo apenas da precipitação e da evapotranspiração como variáveis hidrológicas. Todavia entendendo-se que a vazão é uma variável hidrológica fundamental introduziu-se a mesma como uma das grandezas hídricas envolvidas no balanço. Para tanto, monitorou-se a vazão pelo período de um ano (mai/18 a abr/19) hidrológico com a metodologia do traçador salino. Com o desenvolvimento do balanço hídrico constatou-se que houveram períodos frequentes de

excedência hídrica (mai/18, ago/18, set/18 e dez/18 a abr/19) e reduzido período de deficiência hídrica (jun/18, jul/18 e out/18). O método proposto evidenciou a contribuição de cada variável no balanço hídrico onde o incremento da vazão representa diretamente a saída de água na bacia por meio do escoamento de base e escoamento superficial direto. O balanço hídrico resultante indicou condições locais condizentes com a realidade, com predomínio de elevados índices pluviométricos, mostrando-se como metodologia que pode ser utilizada para estudos envolvendo a temática de atividades poluidoras e seus respectivos monitoramentos ambientais.

Palavras-chave: Balanço Hídrico Climatológico; Medição de vazão; Thornthwaite e Mather.

Abstract

The environmental sustainability of the Uriboquinha stream small watershed, with the presence of a sanitary landfill in its domains, involves hydrological quantification and several environmental controls. The goal of the present research was hydrological data generate with a new approach to the climatological water balance by adapting the methodology of Thornthwaite and Mather. The methodology originally developed the indirect water balance, starting only from precipitation and evapotranspiration as hydrological variables. However, because of flow is a fundamental hydrological variable, it was introduced as one of the water components involved in the balance. Therefore, the flow, by saline tracer methodology, was monitored for a period of one year (May/18 to Apr/19). With the water balance built, it was found that there was a long length of time with water exceedance (May/18, Aug/18, Sep/18 and Dec/18 to Apr/19) and a short length of time with water deficiency (Jun/18, Jul/18 and Oct/18). The proposed method showed the contribution of each variable in the water balance, where the increase in flow directly represents the outflow of water in the basin through the base runoff and direct runoff. The resulting water balance indicated local conditions consistent with reality, with predominance of high rainfall, showing itself as a methodology that can be used for studies involving polluting activities and their respective environmental monitoring.

Keywords: Climatic Water Balance; Flow Measurement; Thornthwaite & Mather.

Resumen

La sostenibilidad ambiental de la microcuenca del arroyo Uriboquinha, con la presencia de un vertedero sanitario en sus dominios, implica en la cuantificación hidrológica y muchos controles ambientales. La presente investigación se centró en la generación de datos hidrológicos con un nuevo enfoque del balance hídrico climatológico mediante la adaptación de la metodología de Thornthwaite y Mather. La metodología originalmente desarrolló el balance hídrico indirecto, comenzando solo por la precipitación y la evapotranspiración como variables hidrológicas. Sin embargo, entendiendo que el caudal es una variable hidrológica fundamental, se introdujo como una de las cantidades de agua involucradas en el balance. Con este fin, el caudal se monitoreó durante un período de un año (may/18 hasta abr/19)

utilizando la metodología del marcador salino. Con el desarrollo del balance hídrico, se encontró que hubo períodos frecuentes de exceso del agua (may/18, ago/18, sep/18 y dic/18 hasta abr/19) y un período reducido de deficiencia del agua (jun/18, julio/18 y oct/18). El método propuesto mostró la contribución de cada variable en el balance hídrico, donde el aumento en el caudal representa directamente la salida del agua en la cuenca a través del flujo base y la escorrentía directa. El balance hídrico resultante indicó condiciones locales consistentes con la realidad, con predominio de altas precipitaciones, mostrándose como una metodología que puede usarse para estudios que involucran el tema de actividades contaminantes y su respectivo monitoreo ambiental.

Palabras clave: Balance Hídrico Climatológico; Medición del caudal; Thornthwaite y Mather.

1. Introdução

O presente trabalho focou na elaboração do balanço hídrico climatológico (BHC) para uma microbacia hidrográfica localizada no município de Marituba no Estado do Pará. A temática abrange o aterro sanitário localizado no município, haja vista, que quase todo o empreendimento está inserido na referida microbacia. O objetivo deste trabalho foi a geração de dados visando o ciclo hidrológico da região utilizando-se de uma nova proposta de balanço hídrico climatológico, na qual, foi formatada a partir do método empírico de Thornthwaite e Mather (1957), e contribuir para discussão de como esta ferramenta pode colaborar na gestão de recursos hídricos no aterro sanitário em Marituba-PA que se situa inserido na microbacia hidrográfica do Igarapé Uriboquinha.

Na etapa de licenciamento ambiental e projeto para a implantação do empreendimento subestimou-se os elevados índices pluviométricos na região acarretando limitações operacionais. Como consequência houve geração de considerável volume de lixiviado (chorume, principal percolato do aterro) produzido no local e também maior ineficiência do sistema de drenagem das águas pluviais. Tais elementos podem impactar de forma negativa a microbacia do Igarapé Uriboquinha provocando danos ambientais.

É fundamental que sejam levantadas e trabalhadas informações a respeito dos recursos hídricos na região para que se possam avaliar medidas mitigadoras para os impactos negativos ou danos ambientais que possam ser gerados pelo empreendimento. Desta forma, a determinação do BHC é uma ferramenta útil para auxiliar na tomada de decisão. Para Rocha, Pinheiro e Costa (2020), a gestão dos recursos hídricos é uma importante ferramenta para promover sustentabilidade hídrica.

Segundo Passos, Zambrzycki e Pereira (2017), o balanço hídrico climatológico é uma das formas de monitorar o comportamento hidrológico em uma determinada região e é uma ferramenta essencial para realização de planejamento estratégico. Já Pereira, (2005) cita que através do balanço hídrico pode-se determinar o regime hídrico de um local.

Para Medeiros e Holanda (2020), o balanço hídrico fornece conhecimentos detalhados dos elementos climáticos gerando informações importantes para tomadas de decisões e para elaboração de projetos pecuários, agrícolas, agronegócios, aos hortifrutigranjeiros entre visando um desenvolvimento sustentável das produções na área estudada

Vários modelos de balanço hídrico climatológico são empregados para a determinação de sistemas de irrigação, manejo de projetos de irrigação e estudos de probabilidade de ocorrências de estiagem ou excessos hídricos (Silva, Moura, Silva, Lopes, & Silva, 2011).

O balanço hídrico constitui uma forma sintética de estimativa da disponibilidade de água no solo. A partir do cômputo das entradas e saídas de água, pode-se identificar eventuais períodos de deficiência ou de excesso de água no solo (Sousa & Nery, 2002).

O BHC é determinado considerando variáveis de entrada e saída de água em uma bacia hidrográfica, em geral, são adotadas vazão e evapotranspiração como variáveis de saída e a precipitação como variável de entrada de água. A partir desta ferramenta pode-se determinar a capacidade da drenagem natural da microbacia, a evapotranspiração média e o volume total precipitado.

2. Metodologia

Neste trabalho elaborou-se uma proposta de balanço hídrico sugerindo uma adaptação na metodologia desenvolvida por Thornthwaite e Mather em 1957. O método original de Thornthwaite e Mather é uma metodologia de medição indireta, com isso, as considera-se somente evapotranspiração e precipitação como variáveis.

Nas modificações sugeridas a vazão do curso d'água é introduzida como uma das variáveis contribuintes do balanço hídrico com a justificativa de representar uma importante grandeza que reflete uma das saídas da água em uma bacia hidrográfica.

A metodologia empregada foi abordada em etapas de acordo com a forma de aquisição das variáveis hidrológicas

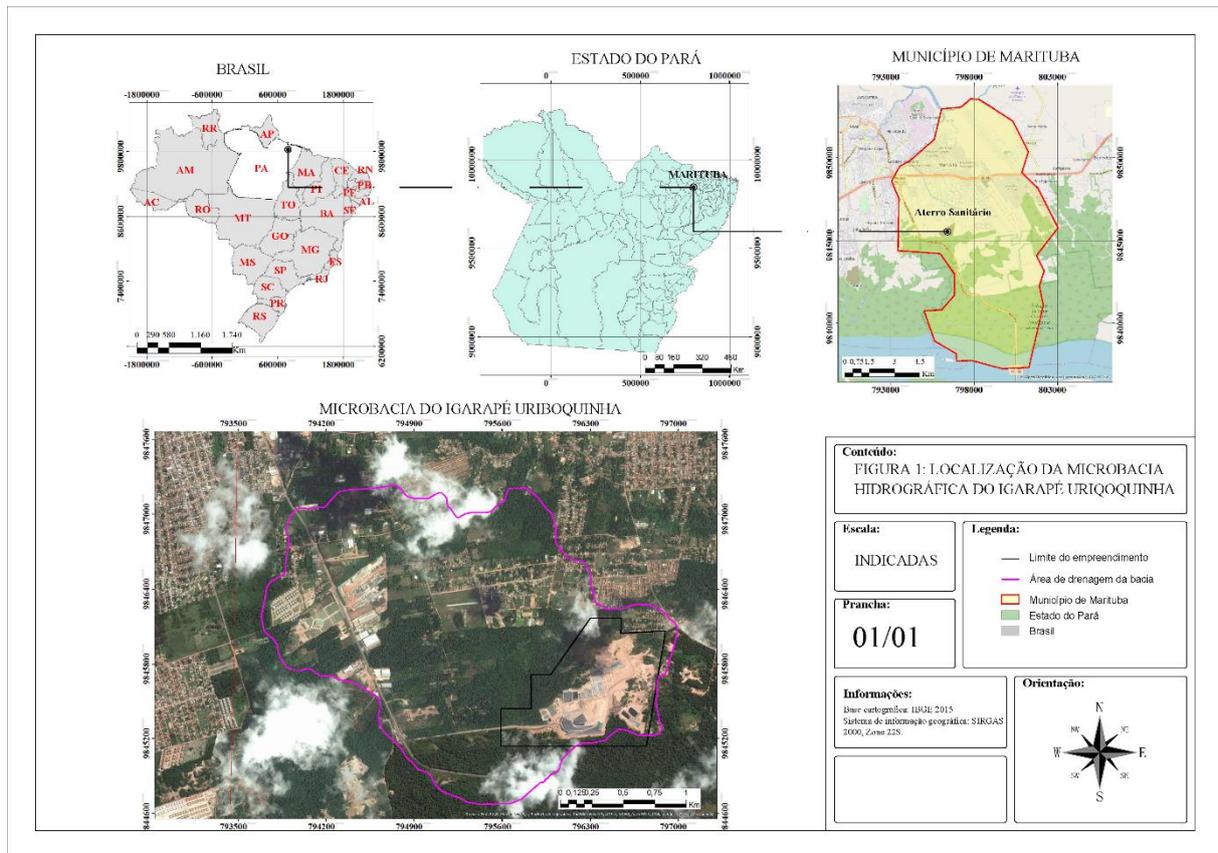
2.1 Caracterização da área de estudo

A microbacia do Igarapé Uriboquinha possui área de aproximadamente 5 km² e se situa no município de Marituba no Estado do Pará. O município de Marituba está locado na Região Metropolitana de Belém (RMB), ver Erro! Fonte de referência não encontrada.. Distante 11 km da capital (Belém), possui extensão territorial de 103 km² segundo os dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) em 2017, a população estimada foi de 127 mil habitantes, sendo o nono maior município do estado do Pará.

O empreendimento atende aos municípios constituintes da Região Metropolitana de Belém (RMB) e está situado na porção oeste do Município de Marituba. O acesso à área do empreendimento, a partir de Belém, é feito pela Rodovia BR 316, seguindo pela Alça Viária por uma distância aproximada de 4 km assim, finalmente com uma via de acesso asfaltada de aproximadamente 600 metros até o limite da propriedade do empreendimento. Apenas para referência, um ponto central aproximado da área do empreendimento é definido pelas seguintes coordenadas 796.356 mE e 9.845.426 mS, Datum WGS 1984.

Os acentuados índices pluviométricos na região, aliados as elevadas temperaturas, juntamente com a volumosa quantidade de resíduos orgânicos favorecem a produção de lixiviado no local, resultando num grande volume de efluente que precisa ser tratado. Os índices pluviométricos na região, tem em média valores superiores a 3000 mm anuais, em conformidade com os dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2019). Na Figura 1 apresenta-se um mapa de localização da bacia do Igarapé Uriboquinha.

Figura 1. Localização da microbacia do Igarapé Uriboquinha



Fonte: Autores, 2019.

2.2 Levantamento de Dados de Precipitação e Temperatura

Devido à ausência de estações meteorológicas no município de Marituba-PA os dados de temperatura média mensal e a precipitação mensal foram retirados da estação mais próxima, isto é, da estação meteorológica operada pelo INMET, localizada no município de Belém-PA, com coordenadas geográficas: latitude $-1,43^\circ$ e longitude $-48,43^\circ$, código 82191, distante 10 km em linha reta da área de interesse.

2.3 Monitoramento da Vazão Mensal

Segundo (Grison, 2008), o conhecimento do regime fluvial é fundamental em virtude de os recursos hídricos serem compreendidos como uma fonte de valor econômico e para a sobrevivência dos seres vivos, devido a isso é importante que haja um gerenciamento adequado desses recursos.

Para Clarke e Dias, 2002, a importância dos dados de vazão é estimar a ocorrência de eventos hidrológicos que possam dificultar o gerenciamento de recursos hídricos, assim como, prever vazões futuras que podem influenciar diretamente no planejamento e gestão de recursos hídricos.

Neste projeto acompanhou-se a vazão efetuando-se a medição em campo uma vez por mês, assumiu-se está como a vazão representativa do mês. Para a medição da vazão utilizou-se a metodologia do traçador salino, também conhecida como método da diluição salina (Bolognesi, Gottardi, & Maglionico, 2006; Azizian, 2019).

A vazão é um parâmetro hidráulico que pode ser determinado pelo uso de traçadores em experimento de campo, mas para isso é necessário a mistura completa do traçador com o corpo hídrico, pois caso essa condição não seja atendida, torna-se imprópria para a estimativa da mesma (Silva, Peclly, & Azevedo, 2017).

A determinação de vazão pelo uso de traçadores, de acordo com a NBR 13.404 (ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1995), é realizada a partir da introdução de substâncias químicas no escoamento de um curso d'água, de forma a definir a velocidade e/ou a concentração no mesmo.

Este método consiste na aferição da condutividade elétrica no meio, onde primeiramente prepara-se a solução salina em um reservatório de volume conhecido. A solução salina é lançada em um ponto a montante e os registros de condutividade elétrica são coletados a jusante do trecho considerado.

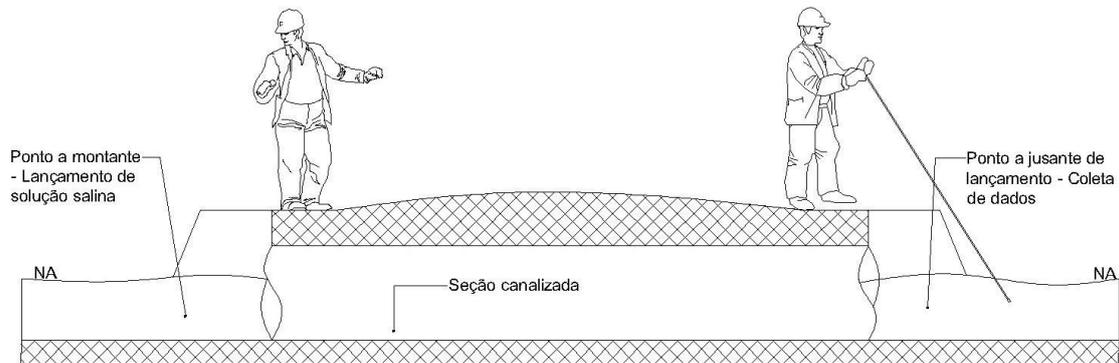
Para a determinação da vazão pelo método de traçadores tem-se as seguintes variáveis: $C_{recipiente}$ que é a concentração da solução salina em mg/L, C_{rio} é a concentração salina no corpo hídrico em mg/L, $V_{recipiente}$ é o volume do reservatório conhecido em litros, C_t é a concentração medida observada na leitura em mg/L e dt é o intervalo de leitura em segundos. O cálculo para a determinação de vazão (Q) foi realizado a partir da Equação 1.

$$Q = \frac{(C_{recipiente} - C_{rio}) \cdot V_{recipiente}}{\int_0^{\infty} (C_t - C_{rio}) \cdot dt} \quad (\text{Equação 1})$$

A vazão é calculada em l/s (litros por segundo), no entanto, o trabalho desenvolveu-se tratando-se como vazão mensal, para tanto, a unidade foi convertida em mm/mês (dividindo-se pela área da bacia) para aplicação na equação do balanço hídrico. Em campo a aquisição de

dados foi feita com o equipamento *Vernier Model: LQ2-LE* conectado ao sensor de condutividade elétrica, medida em $\mu\text{S}/\text{cm}$. Na Figura 1 ilustra-se a ideia do lançamento da solução salina e coleta de dados de condutividade elétrica.

Figura 1. - Ilustração de lançamento de solução salina e coleta de dados.



Fonte: Autores, 2019.

2.4 Estimativa de Evapotranspiração

A metodologia desenvolvida por Thornthwaite e Mather (1957) foi usada para estimativa de evapotranspiração. Em 1948, C.W. Thornthwaite desenvolveu um método empírico para a estimativa de evapotranspiração potencial, a partir de dados de temperatura média do ar e do fotoperíodo, consistindo em investigações realizadas em áreas secas nos Estados Unidos.

Em 1957, C. W. Thornthwaite e J. C. Mather publicaram uma versão mais avançada do balanço hídrico climático na qual a hipótese anteriormente assinalada foi aperfeiçoada. Nessa nova versão, a capacidade de armazenamento do solo torna-se variável e estabelecida em função de suas propriedades (capacidade de campo e ponto de murcha permanente) na camada explorada pelas raízes das plantas nele presentes (Varejão-Silva, 2006)

A capacidade de armazenamento no solo (CA) é adotada, independentemente do tipo de solo, com base apenas na cultura predominante na região, para tanto assume-se que CA varia entre: 25 e 50 mm para hortaliças, 75 e 100 mm para culturas anuais, 100 e 125 mm para culturas perenes e 150 e 300 mm para espécies florestais (Pereira, Angelocci, & Sentelhas, 2007). Especificamente neste caso considerou-se a capacidade de armazenamento de 150 mm devido a área da microbacia manter grande parte de sua vegetação natural.

A estimativa de evapotranspiração deve obedecer aos critérios estabelecidos por Thornthwaite e Mather construindo-se uma planilha onde a primeira coluna T (°C) é a temperatura média mensal do ar referente ao mês J (J=1, 2, 3... 12) e i é índice mensal de calor, E é a evapotranspiração não ajustada, C é o fator de correção, EP₀ é a evapotranspiração de referência estimada, P é o total pluviométrico referente ao mês designado (Mês J=1, 2, 3... 12), P – EP₀ é a diferença entre a precipitação mensal e a evapotranspiração de referência.

As colunas NEG ACM e ARM devem ser preenchidas simultaneamente. O NEG ACM (negativo acumulado) configura a soma de todas as parcelas mensais de água para a evapotranspiração que foram solicitadas ao solo. A variável ARM (armazenamento de água) configura a quantidade de água ainda presente no solo. Para o início do preenchimento dessas variáveis deve-se identificar o último mês do período de maior pluviosidade.

As demais variáveis representam: ALT é a alteração da quantidade de água existente no solo para cada mês, ETR é a evapotranspiração real estimada, EXC e DEF representam o excedente e a deficiência hídrica, respectivamente.

2.5 Elaboração de balanço hídrico

O balanço hídrico consiste na somatória de todas as entradas e saídas de água em uma unidade de gestão como a bacia hidrográfica. Baseia-se em efetuar a contabilidade hídrica no solo, até a profundidade explorada pelas raízes, computando-se, sistematicamente, todos os fluxos hídricos positivos e negativos (Varejão-Silva, 2006).

Segundo Amorim Neto (1989), balanço hídrico é definido como a contabilidade hídrica de entrada e saída de água no solo, a entrada de água é traduzida pela precipitação e a saída pela evapotranspiração potencial.

Portanto, o balanço hídrico representa a somatória de todas as entradas e saídas de água no sistema. A variável de entrada compreende-se como a precipitação na bacia do Igarapé Uriboquinha, as variáveis de saídas compreendem a evapotranspiração na bacia e a vazão do curso d'água. A Equação 2 expressa uma equação geral do balanço das variáveis para a determinação do Balanço Hídrico Climatológico.

$$\sum Ent. + Saídas = Vol_{Precip} - Vol_{ETR} - Vol_{Vazão} \quad (Equação 2)$$

Para o presente caso adaptou-se a metodologia de Thornthwaite e Mather, acrescentando como variável a vazão medida no curso d'água, ou seja, a versão adaptada do método consiste na elaboração do balanço hídrico climatológico com a presença de dados fluviométricos.

Nesta versão, a vazão representa uma importante variável para o BHC, tendo em vista que o escoamento da água é gerado em função de duas contribuições. A primeira ocorre pela descarga do aquífero subterrâneo oriundo do escoamento subsuperficial formando o escoamento de base (EB), a segunda fonte é o escoamento superficial direto (ESD) gerado na área da bacia.

Segundo Zanin, Bonumá, & Chaffe (2013), a água proveniente do aquífero livre pode vir a abastecer outro aquífero (percolação ou recarga profunda) ou então ressurgir na superfície através de rios efluentes ou nascentes e a transição do escoamento de base para o escoamento superficial é observado pela feição de nascente constitui um importante processo hidrológico.

Durante estações secas, o fluxo de água nos diversos tipos de mananciais é mantido pelas reservas de armazenamento do solo durante a estação chuvosa (aquífero livre), esse fluxo é denominado escoamento de base (EB) e é caracterizado por apresentar menores variações temporais do que o escoamento superficial (Coelho, Pontes, Batista, Mello, & Silva, 2015).

O aquífero livre flui subterraneamente acompanhando o desenho do relevo, com o tempo alguns pontos desgastam-se pela erosão, permitindo o brotamento das águas subterrâneas dando origem a um curso d'água.

Para (Soares, 2015), as nascentes são de fundamental importância, uma vez que a maioria delas pode fornecer água durante o ano inteiro, mesmo em períodos de estiagem, assim como são responsáveis pela formação dos cursos d'água.

Por conseguinte, compreende-se a importância da vazão como uma das variáveis fundamentais para o BHC e nota-se que a mesma responde diretamente pelas alterações ocorridas no armazenamento subterrâneo. Portanto, introduzir essa variável para a metodologia de Thornthwaite e Mather pode apresentar valores representativos para o entendimento do comportamento hidrológico na região.

Para ter-se o BHC mensal utilizou-se as variáveis em milímetros (mm). Com a adaptação do método de Thornthwaite e Mather, substituiu-se $P - E_{Po}$ pela Equação 2, onde, se introduz a vazão como um elemento do balanço hídrico. Essa mudança afetará as variáveis ARM real, ALT, EXC e DEF.

A variável, armazenamento de água no solo (ARM real), é diretamente influenciada pela vazão referente aos períodos de seca (menor pluviosidade) no qual processa-se o escoamento de água no curso d'água alimentado predominantemente pelo escoamento de base através da água acondicionada no solo durante o período chuvoso.

A alternância de água no solo (ALT) expressa o comportamento no armazenamento, o solo se comporta como um reservatório em que advém recarga e descarga de água, esta grandeza representa as variações neste armazenamento real (ARM real), se esta alternância do armazenamento real for negativa interpreta-se como retirada de água no solo, caso seja positiva indica que houve reposição, caso não haja alteração (ALT=0) o solo estará com sua capacidade preenchida.

As grandezas excedência (EXC) e deficiência (DEF) expressam diretamente os períodos de abundância hídrica e estiagem. O excedente hídrico é determinado através do seguinte balanço Equação 2 – ALT para os meses em que não haja solicitação do armazenamento de água no solo, do contrário não há excedente hídrico. A deficiência hídrica é estabelecida por meio da relação $|Equação\ 2| - |ALT| + Vazão$ para os meses em que $Equação\ 2 < 0$, do contrário não há déficit hídrico. As variáveis NEG ACM, ARM e ETR não devem sofrer alterações com a adição da vazão no balanço.

O NEG ACM, como referido, expressa todas as solicitações exigidas ao solo através do processo de evapotranspiração, desta forma, a vazão não deve influenciar nesta grandeza. A evapotranspiração real (ETR) é determinada da seguinte forma: se $P - E_{po} > 0$, então a evapotranspiração real será igual a evapotranspiração potencial (E_{po}), do contrário ETR será igual $P + |ALT| - Vazão$, isso em decorrência da evapotranspiração ser maior que a precipitação, logo, isto implica que a demanda por evapotranspiração é igual a somatória da chuva mensal e das solicitações de água exigidas ao solo indicadas pelas alterações no armazenamento real (ALT real), no entanto, as diferenças no armazenamento também há demanda da transição do escoamento de base para a vazão no curso d'água, com isso precisa-se extrair o valor da vazão da variável ALT real para se determinar a evapotranspiração real ETR.

As variáveis NEG ACM e ARM são preenchidas simultaneamente, e se relacionam diretamente, portanto, ambas se conjugam unicamente com o processo de evapotranspiração da bacia, desta maneira o ARM também não é influenciado pela vazão. Para se determinar o NEG ACM deve-se atender as seguintes condições:

- Se $P-EPo > 0$, então $NEG ACM = CA * LN (ARM_k/CA)$, sendo que k representa o mês atual. Se esta hipótese não for verdadeira, têm-se que, $NEG ACM = P - E_{po} - NEG ACM_{k-1}$, sendo que $k - 1$ representa o mês anterior. Para se determinar o armazenamento ARM apresentam-se as seguintes condicionantes:
- Se $P-EPo < 0$, então $ARM = CA * e^{NEG ACM_k/CA}$, sendo que k representa o mês atual. Se esta hipótese não for verdadeira, considera-se que, se $ARM_{k-1} + P-EPo < CA$, então têm-se que $ARM_k = ARM_{k-1} + P-EPo$. No entanto, se nenhuma das hipóteses anteriores for verdadeira assume-se que o solo possui sua capacidade de armazenamento toda preenchida, portanto nesta condição a variável, ARM, é igual a capacidade máxima de armazenamento de água no solo CA.

O ARM real representa o armazenamento de água no solo considerando as vazões do período seco. Neste período há o predomínio do escoamento de base onde a água armazenada no subsolo é convertida em vazão. Isto posto, compreende-se que o aquífero livre está recebendo solicitações de água, destarte, o solo está cedendo água para o aquífero superficial através da transição do fluxo de base para o escoamento superficial. O armazenamento real é expresso pela relação $ARM_k - Vazão_k$, sendo está vazão referente ao mês k de estiagem onde há predomínio do escoamento de base. Caso essa condição não seja atendida, então o armazenamento real (ARM real) é igual ao armazenamento estimado (ARM).

3. Resultados e Discussão

3.1 Monitoramento de Vazão e dados de Temperatura e Precipitação

Como citado, os dados de temperatura e precipitação foram obtidos da estação meteorológica INMET código 82191. Na Tabela 1 estão arrolados valores das variáveis de entrada para o balanço hídrico: precipitação, temperatura e vazão.

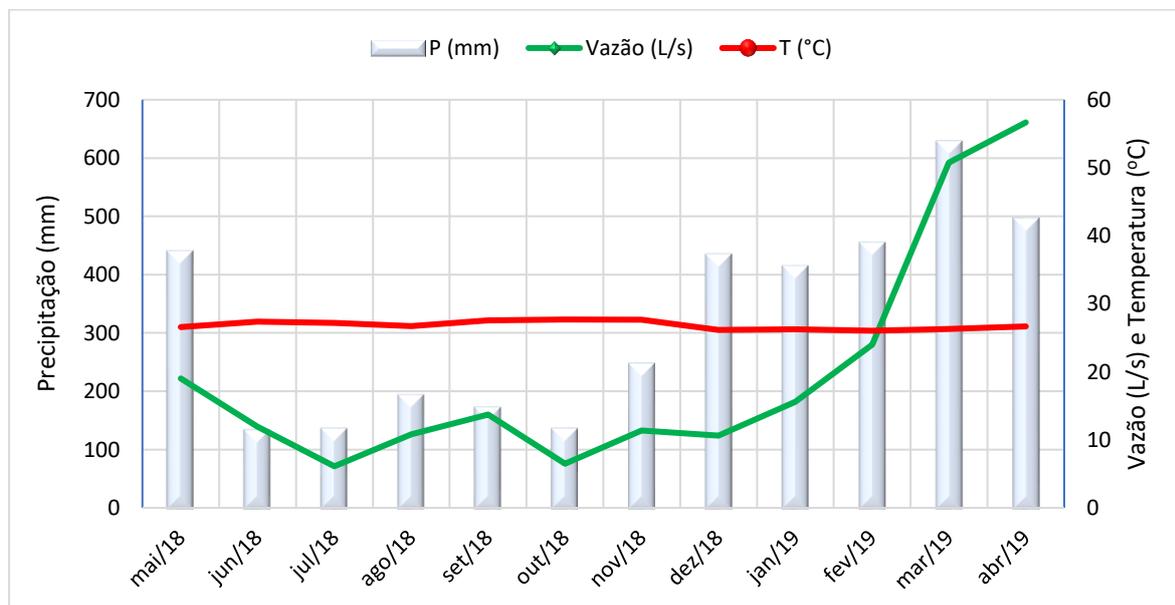
Tabela 1. Dados de precipitação, Temperatura e Vazão.

DADOS DE PRECIPITAÇÃO, TEMPERATURA E VAZÃO												
Período	mai/18	jun/18	jul/18	ago/18	set/18	out/18	nov/18	dez/18	jan/19	fev/19	mar/19	abr/19
P (mm)	438,2	132,8	135	192,5	170,9	134,7	246,1	432,8	413	453	626	494,5
T (°C)	26,6	27,4	27,2	26,7	27,6	27,7	27,6	26,1	26,2	26,0	26,3	26,7
Vazão (L/s)	19,0	11,9	6,1	10,8	13,7	6,4	11,3	10,6	15,6	24,0	50,8	56,7

Fonte: Autores, 2019

Pela Tabela 1 nota-se que a temperatura apresentou reduzida variação dentro do período avaliado, com valores elevados, comuns na região norte. Para a precipitação observa-se elevados índices pluviométricos, a vazão elevou-se conforme elevação das chuvas mensais. Na Figura 2 esboçou-se o comportamento do índice pluviométrico, temperatura e vazão no decorrer dos meses.

Figura 2. Comportamento das variáveis de entrada: Precipitação, Temperatura e Vazão.



Fonte: Autores, 2019.

Pela Tabela 1 nota-se que a temperatura apresentou reduzida variação dentro do período avaliado, com valores elevados, comuns na região norte. Para a precipitação observa-se elevados índices pluviométricos, a vazão elevou-se conforme elevação das chuvas mensais. Na Figura 2 esboçou-se o comportamento do índice pluviométrico, temperatura e vazão no decorrer dos meses.

Figura 2 favorece a observação da variabilidade dos parâmetros de entrada ao longo dos meses. Com isso, têm-se que a temperatura é um fator importante para a evapotranspiração, pois se manteve com pouca variabilidade e possui índices elevados tendo como mínima de 26 °C no mês de fevereiro de 2019 e máxima de 27,7 °C no mês de outubro de 2018, onde se registrou um dos menores índices pluviométricos.

Outra constatação referente a Figura 2 é a relação direta do aumento do escoamento superficial, com o aumento dos índices pluviométricos, por se tratar de uma microbacia e a resposta acaba sendo mais rápida a resposta.

Com o regime de chuvas abundante, as condições de escoamento de base são minimizadas, tendo em conta o aumento da quantidade de água disponível para a recarga do aquífero o solo tende a estar saturado. Estando o aquífero livre com sua capacidade completamente preenchida goza-se de outra condição, parte da chuva que precipita na região torna-se escoamento superficial direto (ESD), que deságua grande parte no próprio curso d'água, convertendo-se em vazão.

3.2 Evapotranspiração e Elaboração do BHC

O balanço hídrico climatológico conforme modificação no modelo desenvolvido por Thornthwaite e Mather (1957) com o incremento da vazão, para a microbacia hidrográfica do Igarapé Uriboquinha é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2. Elaboração do Balanço Hídrico Climatológico, modificação do método de Thornthwaite e Mather.

Local: Bacia do Igarapé Uriboquinha		CA= 150 mm													
Latitude: -1,39 Graus		Período: Jun/18 a Maio/2019													
Período Mês/Ano	T °C	I	C	P mm	EPO mm	Vazão mm	∑Ent. e Saíd.	NEG ACM mm	ARM mm	ARM real mm	ALT mm	ETR mm	EXC mm	DEF mm	
mai/18	26,6	12,5	30,8	438,2	138,8	10,2	289,2	0,0	150,0	150,0	0,0	138,8	289,2	0,0	
jun/18	27,4	13,1	29,8	132,8	143,1	6,2	-16,5	-16,5	134,4	128,2	-21,8	148,4	0,0	0,9	
jul/18	27,2	13,0	30,8	135,0	144,8	3,2	-13,1	-29,6	123,2	120,0	-8,2	140,0	0,0	8,1	
ago/18	26,7	12,7	30,9	192,5	142,1	5,7	44,7	0,0	150,0	150,0	30,0	142,1	14,7	0,0	
set/18	27,6	13,3	30,0	170,9	143,9	7,5	19,5	0,0	150,0	150,0	0,0	143,9	19,5	0,0	
out/18	27,7	13,3	31,1	134,7	149,1	3,2	-17,6	-17,6	133,4	130,1	-19,9	151,3	0,0	1,0	
nov/18	27,6	13,3	30,1	246,1	144,7	5,3	96,1	0,0	150,0	150,0	19,9	144,7	76,2	0,0	
dez/18	26,1	12,2	31,2	432,8	130,7	5,9	296,2	0,0	150,0	150,0	0,0	130,7	296,2	0,0	
jan/19	26,2	12,3	31,2	413	132,5	8,3	272,2	0,0	150,0	150,0	0,0	132,5	272,2	0,0	
fev/19	26,0	12,2	28,1	453	116,0	12,9	324,1	0,0	150,0	150,0	0,0	116,0	324,1	0,0	
mar/19	26,3	12,3	31,0	626	132,9	26,4	466,7	0,0	150,0	150,0	0,0	132,9	466,7	0,0	
abr/19	26,7	12,6	29,9	494,5	137,6	30,4	326,5	0,0	150,0	150,0	0,0	137,6	326,5	0,0	
Total	-	140,3	-	3869,5	1656,2	125,2	-	-	-	-	-	1658,9	2085,3	10,0	

Fonte: Autores, 2019.

O período de menor pluviosidade aconteceu entre os meses de junho a novembro de 2018, ver Tabela 2, coincide com o intervalo dos menores índices fluviométricos. Neste balanço hídrico, nota-se que a vazão é a variável que menos influencia no regime hidrológico desta bacia uma vez que possui valores relativamente reduzidos quando comparada as demais variáveis constituintes equacionadas e apresentou pouca variação ao longo do tempo.

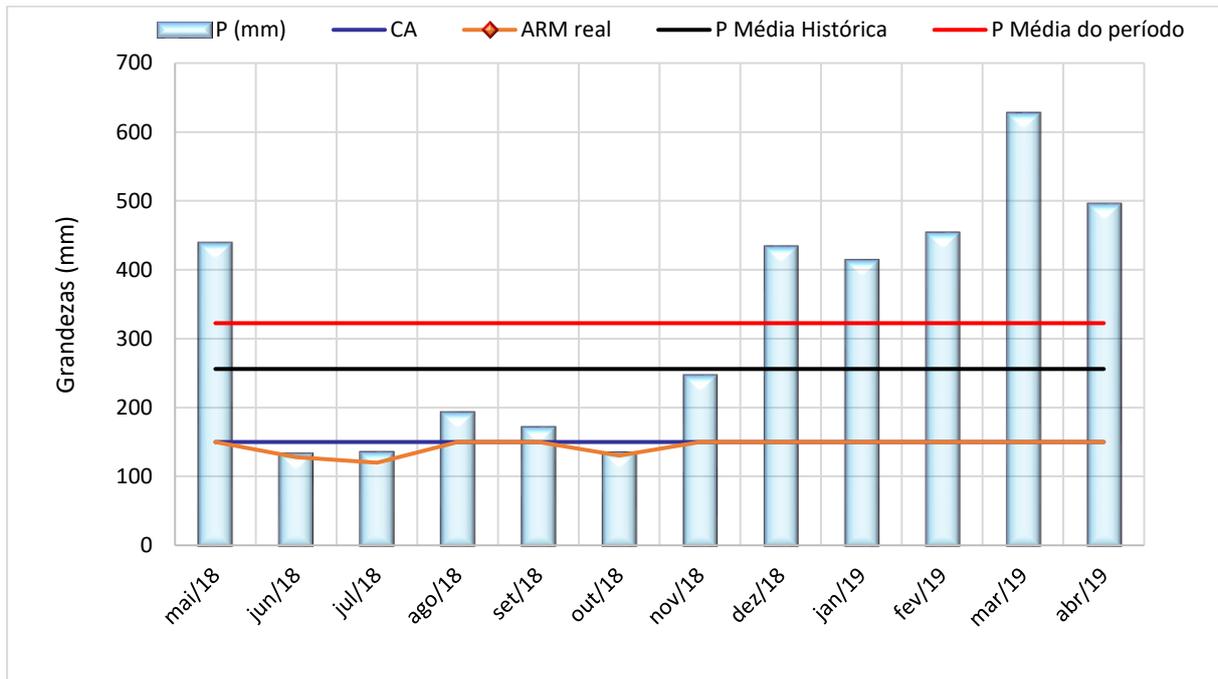
A evapotranspiração estimada apresentou pouca variação para o período avaliado, em função dos dados de temperatura serem bastante uniformes, desta forma o parâmetro mais sensível do balanço hídrico foi a precipitação.

A precipitação mensal é o principal parâmetro do equilíbrio hídrico, nos meses de junho a novembro, a precipitação e a evapotranspiração potencial (EPo) e real (ETR) alcançaram valores próximos, isso em decorrência do período seco, então a quantidade de água precipitada na bacia é equivalente a evapotranspiração. Neste período o solo sofre as maiores solicitações de água, ou seja, haverá alteração no armazenamento de água em virtude do predomínio do escoamento de base para o curso d'água.

A capacidade de armazenamento (CA) de água no solo é controlada em função da descarga do aquífero livre onde parte da água armazenada se converte em vazão. Esse processo

ocorre devido ausência e/ou redução na recarga do aquífero livre que é abastecido pela precipitação, com a diminuição dos índices pluviométricos, no período de seca, houve alternância no armazenamento de água (ARM real), ver Figura 3. Pode-se observar que o armazenamento teve pequenas alterações atingindo valor mínimo de 120 mm.

Figura 3. Alterações no armazenamento de água no solo.



Fonte: Autores, 2019.

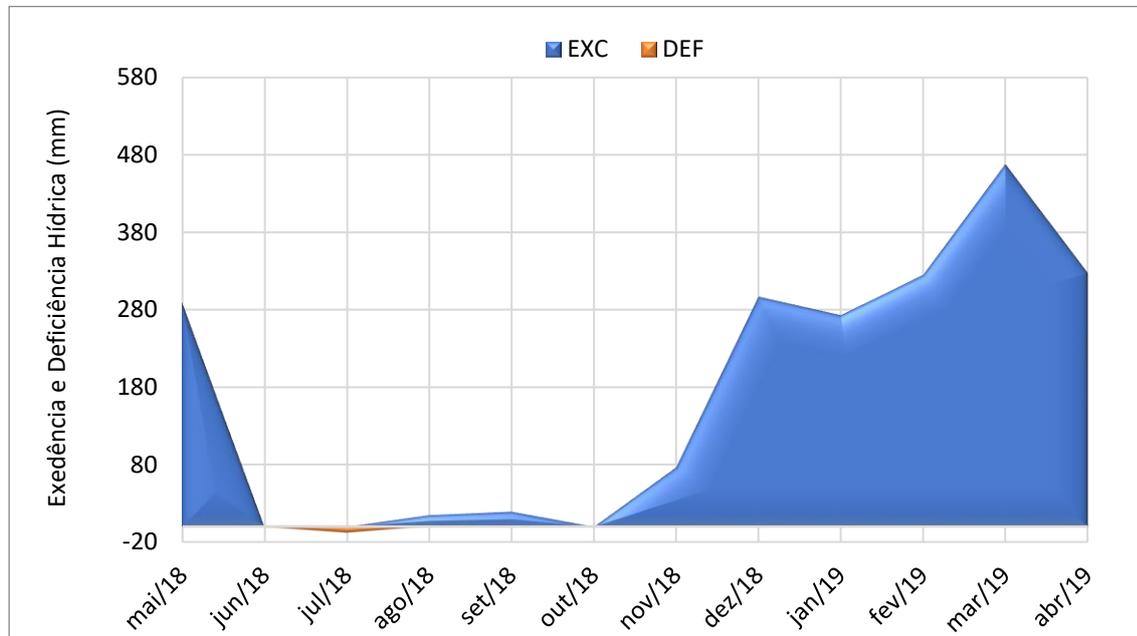
A capacidade de armazenamento de água apresentou reduzida variação dentro do período estudado, também em função do período chuvoso apresentar valores acima da média histórica, tal fato fez com que o solo passasse muito mais tempo na sua saturação máxima, favorecendo uma maior recarga do aquífero livre. Ainda com relação a Figura 3 nota-se que nos meses de junho, julho e outubro o solo apresentou o armazenamento de água comprometido, atingindo valores inferiores à sua capacidade máxima adotada que é de 150 mm.

Constatou-se ainda que a precipitação média do período avaliado (323 mm) é superior à precipitação média histórica (256 mm), exposto isto, entende-se que o solo passou mais tempo saturado e as alterações na sua capacidade cumulativa poderiam ser menores em um ano hidrológico mais próximo da média.

Quando o solo atinge a sua saturação máxima haverá predomínio de escoamento superficial, esse escoamento se converte em vazão. Pelo quantitativo das variáveis constituintes

do balanço hídrico foi possível determinar a ocorrência de excedente hídrico ou deficiência hídrica para a microbacia hidrográfica, vide Figura 4.

Figura 4. Contabilização hídrica: Excedência e Deficiência Hídrica.



Fonte: Autores, 2019.

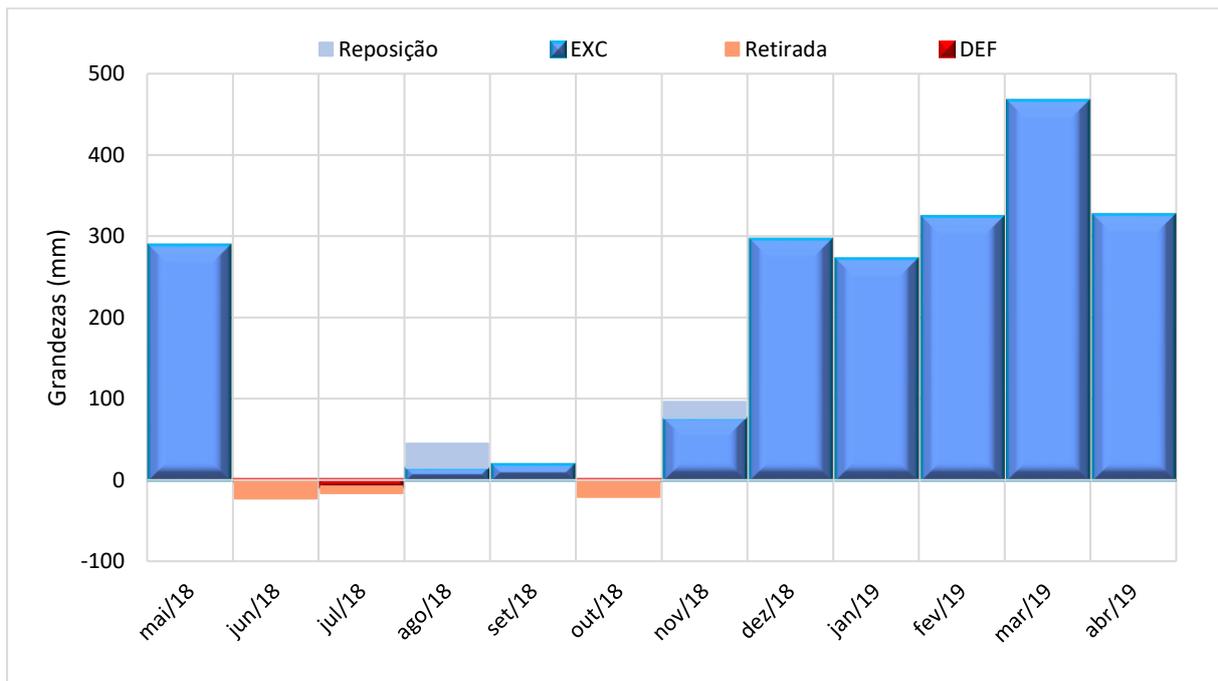
Houve predominância de excedência hídrica na microbacia do Igarapé Uriboquinha, ver Figura 4, certamente provocado pelos elevados índices pluviométricos que contribuíram diretamente para o excesso de água na bacia.

Com relação ao aterro sanitário situado na região de interesse, as abundantes precipitações do período considerado, associadas a cobertura ineficiente do maciço de resíduos e grande frente de trabalho para recebimento dos resíduos implicam em maior volume de lixiviado (chorume) produzido. Adicionalmente ocorreu maior potencial de sólidos carreados pelo sistema de drenagem superficial do empreendimento que foi constatado visualmente nas campanhas de medição de vazão.

Como as variáveis de saída de água na bacia não acompanharem proporcionalmente os elevados índices pluviométricos, nos meses de junho e outubro houve praticamente um equilíbrio hídrico, ou seja, não houve grande discrepância entre a excedência e deficiência hídrica, ver Figura 4.

Outra informação que se pode destacar na Tabela 2 é a quantificação dos momentos em que houveram recarga do aquífero livre e em quais houveram perda de água, ou seja, em quais meses o escoamento de base foi predominante, ver Figura .

Figura 5. Quantificação das variáveis hídricas: Reposição, Excedência, Retirada e Deficiência hídrica.



Fonte: Autores, 2019.

Conforme a Figura 5, os momentos em que houveram retirada e reposição de água na bacia, estas demandas hídricas representam as exigências de água feitas para o solo. Nota-se, em virtude de o solo estar na maior parte do tempo atingindo a sua saturação máxima, essas exigências representam muito pouco da quantidade de água na bacia.

No caso das chuvas intensas há dominância de escoamento superficial direto (ESD) com a chuva convertendo-se diretamente em vazão. Para os meses de junho, julho e outubro de 2018 ocorreu liberação de água pelo aquífero para o sistema e desta forma avançando-se no escoamento de base, portanto nesses meses aconteceram retirada de água. Nos meses de agosto e novembro de 2018 houve reposição de água no aquífero subterrâneo, nesses meses pode-se dizer que se sucedeu efetiva recarga no aquífero livre.

A determinação de retirada e reposição de água é atribuída a coluna ALT da Tabela 2, se o valor de ALT for maior que zero ($ALT > 0$) então o aquífero livre recebeu abastecimento de

água, tendo em vista, um saldo positivo na variação de água. Se ALT for menor que zero ($ALT < 0$), então a variação de água no solo é negativa, isto implica na perda de água do aquífero livre, denomina-se então de retirada de água armazenada subsolo.

Nos meses de maio de 2018 e de dezembro de 2018 a abril de 2019 observa-se que o subsolo estava com sua capacidade de armazenamento de água máxima, portanto há excesso hídrico na bacia, conseqüentemente não há alteração representativa no armazenamento de água no subsolo, isto é, tudo que entra por infiltração acaba sendo descarregado com escoamento básico.

Ficou evidente que na maior parte do ano hidrológico foi observado um excedente hídrico, tal excedente decorreu em função dos elevados índices pluviométricos, quantidade de chuva essa que no período considerado mostrou-se acima das médias históricas em vários meses.

Adicionalmente, com a elaboração do balanço hídrico climatológico (BHC) para a microbacia hidrográfica do Igarapé Uriboquinha pode-se fazer ponderações acerca da temática do aterro sanitário localizado em Marituba-PA.

O balanço hídrico desenvolvido e aplicado neste trabalho permite quantificar os recursos hídricos e entender o comportamento das variáveis hídricas à gestão de recursos hídricos. As informações geradas podem ser utilizadas na gestão de águas do aterro sanitário na estimativa de geração de chorume, elaborando planos para redução da quantidade gerada, quantificação de efluente a ser tratado e o lançamento do mesmo.

O monitoramento da vazão permite avaliar o recurso disponível para diluição de efluente e entender a quantidade máxima que o empreendimento pode lançar no corpo hídrico, haja vista que, talvez somente uma parcela do efluente gerado possa ser lançada em virtude dos reduzidos valores de vazão.

Atualmente parte do efluente tratado é utilizado para umedecer as vias de acesso de veículos suprimindo a poeira evitando que se tornem partículas em suspensão no período seco, prática essa que é pouco significativa devido à grande quantidade de dias com chuva ao longo do ano. A outra parte do efluente tratado é encaminhado a outras localidades através de caminhões pipas. O controle da vazão do curso d'água visando o lançamento de parte do efluente tratado abateriam custos com o transporte de efluente. Evidentemente que um eventual lançamento de efluentes tratados deve ser tratado de forma específica num pedido de outorga de lançamento.

4. Considerações Finais

Durante o período avaliado a microbacia hidrográfica do Igarapé Uriboquinha transcorreu maior período de excesso hídrico. As demandas de água exercidas sobre o solo estão diretamente relacionadas com os índices pluviométricos que ficaram acima da média histórica durante o ano hidrológico em questão. Nos meses caracterizados como, período seco, avaliou-se que as demandas referentes ao subsolo foram relativamente reduzidas, todavia, em anos com índices pluviométricos mais próximos da média essa exigência certamente terá maior proporção.

O método utilizado para a determinação de vazão representou bem as alterações desta variável ocasionadas pelo aumento do regime de chuvas e a relação chuva x vazão fica mais evidente, quanto maior o volume precipitado para determinado mês, maior foi a vazão medida na microbacia.

Através da modificação proposta na metodologia de Thornthwaite e Mather constatou-se em quais meses o aquífero livre cedeu água para o escoamento de base e também os meses em que houve recarga no aquífero. Para o período avaliado houve pouca deficiência hídrica na bacia. A capacidade de armazenamento da bacia não conteve significativa variação, isso traduz que as demandas hídricas exigidas pelo subsolo foram mínimas.

Para a presente pesquisa foi medida a vazão do curso d'água uma vez por mês, em função da dificuldade de deslocamento até o trecho do igarapé, portanto considerou-se essa com a vazão representativa do mês. Vale ressaltar que, quanto mais medições forem realizadas em campo, maior será a representatividade do método.

Pode-se em trabalhos posteriores buscar aprimoramento do método, assim como comparar os resultados obtidos com estudos de recarga de aquífero de modo a acompanhar a variação hídrica no solo. Este método não se aplica em rios que sofram influência de maré.

A compreensão das variáveis hidrológicas pode auxiliar na tomada de decisão para o gerenciamento de atividades com potencial poluidor como o aterro sanitário localizado em Marituba-PA, o conhecimento dos índices pluviométricos subsidia, por exemplo, na estimativa de lixiviado produzido no local.

A geração da série histórica de dados de vazão pode contribuir em estudos para solicitação de outorga de captação e/ou lançamento para o efluente tratado. Com o excesso de chuvas na microbacia e na ausência de medidas que possam mitigar os impactos negativos que

podem ser gerados pelo empreendimento, a qualidade da água do Igarapé Uriboquinha pode ser afetada.

Os principais impactos negativos provindos do empreendimento para o curso d'água é o risco de transbordamento das bacias de chorume que com o excesso de chuva que pode ocasionar em contaminação do solo, aquífero subterrâneo e água superficial, não esquecendo da quantidade de sólidos carregados através da água pluvial pelo sistema de drenagem superficial evidenciada durante as medições de vazão.

O resultado do balanço hídrico forneceu resultados proporcionais às condições locais dominada pelo elevado índice pluviométrico mostrando que esta metodologia pode ser utilizada para estudos posteriores envolvendo a temática de empreendimento similares.

Referências

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 13403: Medição de vazão em efluentes líquidos e corpos receptores - Escoamento livre.*, (1995).

Amorim Neto, M. S. (1989). *COT34_Balanço hidrico.pdf*. Petrolina/PE.

Azizian, A. (2019). Comparison of salt experiments and empirical time of concentration equations. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Water Management*, 172(3), 109–122. <https://doi.org/10.1680/jwama.17.00048>

Clarke, R. T., & Dias, P. L. Si. (2002). *As Necessidades de Observação e Monitoramento dos Ambientes Brasileiros quanto aos Recursos Hídricos*, .0–41.

Coelho, G., Pontes, L. M., Batista, M. L., Mello, C. R., & Silva, A. M. (2015). Relação entre o escoamento de base e os diferentes sistemas hidrogeológicos do estado de Minas Gerais relation. *Águas Subterrâneas*, 257–267. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Grison, F. (2008). *Uso do ADCP como ferramenta de apoio no traçado e extrapolação de curva-chave !a bacia hidrográfica do Rio Cubatão do Norte*. Universidade Federal de Santa Catarina.

IBGE. (2017). Retrieved from <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pa/marituba.html>

INMET. (2019). INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. Retrieved from <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home2/index>

Medeiros, R. M., & Holanda, R. M. de. (2020). Balanço hídrico sequencial para Lagoa Seca – Paraíba – Brasil. *Research, Society and Development*, 9. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i7.4691> Medeiros,

Passos, M. L. V., Zambrzycki, G. C., & Pereira, R. S. (2017). Balanço hídrico climatológico e classificação climática para o município de Balsas-MA. *Scientia Agraria*, 18(1), 83–89.

Pereira, A. R. (2005). Simplificando o balanço hídrico de Thornthwaite-Mather. *Bragantia*, 64, 311–313. <https://doi.org/10.1590/s0006-87052005000200019>

Pereira, A. R., Angelocci, L. R., & Sentelhas, P. C. (2007). *Meteorologia agrícola* 306, 192. Retrieved from http://www.leb.esalq.usp.br/leb/aulas/lce306/MeteorAgricola_Apostila2007.pdf

Rocha, G. S., Pinheiro, A. V. R., & Costa, C. E. A. S. (2020). Gestão dos Recursos Hídricos no Município de Parauapebas (PA): Avaliação dos Usos, Alteração dos Cenários e Possíveis Impactos. *Research, Society and Development*, 9. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i4.3042> Gestão

Silva, A. O., Moura, G. B. A., Silva, Ê. F. de F., Lopes, P. M. O., & Silva, A. P. N. (2011). Análise espaço-temporal da evapotranspiração de referência. *Revista Caatinga*, 24, 135–142.

Silva, P. V. R. M., Pecly, J. O. G., & Azevedo, J. P. S.. (2017). Uso de traçadores fluorescentes para determinar características de transporte e dispersão no Rio Piabanha (RJ) para a modelagem quali-quantitativa pelo HEC-RAS. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 22. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522017150187>

Soares, G. C. D. S. (2015). *Cadeia causal da degradação de nascentes na bacia hidrográfica do Rio Gramame - Paraíba*. Universidade Federal da Paraíba Centro.

Sousa, P., & Nery, T. (2002). Análise da variabilidade anual e interanual da precipitação pluviométrica da região de Manuel Ribas , Estado do Paraná. *Acta Scientiarum*, 24(6), 1707–1713.

Varejão-Silva, M. A. (2006). Meteorologia E Climatologia. In *Versão digital* (Versão dig, Vol. 1). Recife.

Zanin, P. R., Bonumá, N. B., & Chaffe, P. L. B. (2013). Características hidrogeológicas de nascentes situadas em diferentes modelados de relevo. *XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, 1–8. Bento Gonçalves.

Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito

Moisés Marçal Gonçalves – 40%

Giovanni Chaves Penner – 40%

Rubens Takeji Aoki Araújo Martins – 20%