

PERCEPÇÕES DO REGIME HIDROLÓGICO NO CONTEXTO DE ATERRO SANITÁRIO NA AMAZÔNIA

PERCEPTIONS OF THE HYDROLOGICAL REGIME IN THE CONTEXT OF LANDFILL IN THE AMAZON

 Rafaela Nazareth Pinheiro de Oliveira Silveira ^A

 Risete Maria Queiroz Leão Braga ^B

 Lindemberg Lima Fernandes ^B

 Thatianne Maria Frota Valente ^B

 Maria de Nazaré Alves da Silva ^C

^A Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará (Unifesspa), Marabá, PA, Brasil

^B Universidade Federal do Pará (UFPA), Belém, PA, Brasil

^C Universidade Federal do Amazonas (UFAM), Manaus, AM, Brasil

Recebido em: 29/08/2023 | 6/09/2024 DOI: 10.12957/tamoios.2025.78719

Correspondência para: Rafaela Nazareth Pinheiro de Oliveira Silveira (rafaelasilveira@unifesspa.edu.br)

Resumo

A geração de resíduos sólidos urbanos representa, atualmente, um dos maiores desafios enfrentado por gestores de resíduos em todo o mundo, quanto a sua destinação e disposição ambientalmente adequada. Os aterros sanitários são grandes ferramentas de destinação final desses resíduos no Brasil e, em uma das suas técnicas de operação, necessita de uma cobertura ao final de sua vida útil. Esta cobertura fica diretamente em contato com os eventos e fenômenos hidrológicos e climatológicos, e visa mitigar impactos no meio ambiente, reduzindo o volume de percolação e protegendo os recursos hídricos e solo. Este trabalho teve como objetivo analisar a influência do regime hidrológico nas coberturas de aterros sanitários na Amazônia Paraense, em Marabá-PA. Coletou-se séries de dados diários de precipitação, insolação e temperatura de 30 anos (1991-2020), do Instituto Nacional de Meteorologia e da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, o que possibilitou verificar estatisticamente períodos chuvosos e de estiagem e, com o auxílio do Balanço Hídrico a capacidade de variação hídrica do solo, que compõe a camada da cobertura. No período estudado, foi possível atestar que o mês de março apresentou os maiores índices de precipitação pluviométrica e teve percolação, comportamento esse contrário ao do mês de agosto, o qual apresentou os maiores níveis de estiagem, com ausência de percolação. Desse modo, evidenciando a influência do regime hidrológico pluviométrico nas configurações dessas coberturas.

Palavras-chave: Hidrologia; Balanço hídrico; Cobertura de aterros; Sazonalidade das chuvas; Percolação.

Abstract

The generation of urban solid waste currently represents one of the biggest challenges faced by waste managers around the world, regarding its environmentally appropriate destination and disposal. Sanitary landfills are major tools for the final disposal of this waste in Brazil and, in one of their operating techniques, they require a cover at the end of their useful life. This coverage is directly in contact with hydrological and climatological events and phenomena, and aims to mitigate impacts on the environment, reducing the volume of percolation and protecting water resources and soil. This work aimed to analyze the influence of the hydrological regime on landfill covers in the Amazon of Pará, in Marabá-PA. Series of daily data on precipitation, sunshine and temperature were collected for 30 years (1991-2020), from the National Institute of Meteorology and the National Water and Basic Sanitation Agency, which made it possible to statistically verify rainy and dry periods and, with the aid of the Water Balance the water variation capacity of the soil, which makes up the cover layer. During the period studied, it was possible to attest that the month of March presented the highest levels of rainfall and had percolation, a behavior contrary to that of the month of August, which presented the highest levels of drought, with no percolation. Thus, highlighting the influence of the hydrological rainfall regime on the configurations of these covers.

Keywords: Local hydrology; Water balance; Landfill cover; Rainfall seasonality; Percolation.





INTRODUÇÃO

A realidade do Brasil quanto à destinação dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) ainda tem como fim os aterros sanitários, os quais configuram-se praticamente como a única técnica para lidar com os resíduos, e que ainda farão parte da nossa realidade por muitos anos (ALFAIA *et al.*, 2017; BOSCOV e HEMSI, 2020) tendo como evidências a recente aprovação da Lei Federal nº 14.026, de 15 de julho de 2020, denominado como Marco Legal do Saneamento Básico, bem como as metas de instalação de aterros sanitários com vida útil superior a 20 anos (BRASIL, 2020).

A espacialização do crescimento da implantação de aterros sanitários do Brasil, nas regiões norte e nordeste, nos últimos 10 anos, apresentou um crescimento de apenas 2%, passando de 33% para 35% dos seus RSU encaminhados para aterros sanitários. Diferentemente da região centro-oeste, que em 2019, o percentual da disposição final dos RSU foi de 41,3% em aterros sanitários, ou seja, elevou-se de 13,2% desde 2010. Já as regiões sul e sudeste apresentaram um percentual de 70% dos RSU encaminhados aos aterros sanitários (ABRELPE, 2020).

Dentre os componentes mais importantes dos aterros sanitários, pode-se citar o sistema de impermeabilização de fundo ou revestimento de fundo das células, cuja finalidade é impedir a contaminação do solo e das águas subterrâneas (KATSUMI *et al.*, 2001; ROWE, 2012; EMMANUEL *et al.*, 2020; KRISHNA e HARISH, 2021). Outro sistema primordial é o de drenagem e tratamento de líquidos e gases, haja vista que seu objetivo é evitar a contaminação do solo e das águas subterrâneas e superficiais, controlar o aumento da pressão neutra na massa de resíduos e evitar explosões resultantes da interação entre gases (MACIEL e JUCÁ, 2011; CHAVAN e KUMAR, 2018; IMBIRIBA *et al.*, 2020; ZHAN *et al.*, 2020; DUAN *et al.*, 2021).

Por fim, tem-se sistema de cobertura final, que eleva a vida útil do aterro sanitário, por tratar-se de uma camada separadora entre os resíduos e o meio ambiente, além de minimizar a emissão de gases para a atmosfera e reduzir a infiltração de água de chuva para o interior da massa de RSU (HAUSER *et al.*, 2001; ROCK *et al.*, 2012; APIWANTRAGOON *et al.*, 2015; SOBTI e SINGH, 2017; SHAIKH *et al.*, 2019; NI *et al.*, 2020; STOCK *et al.*, 2020). Esse último proporcionará a diminuição do volume gerado de lixiviado.

No entanto, ainda que os assuntos relacionados a aterros sanitários sejam discutidos na literatura mundial, pouco se sabe sobre o comportamento de uma cobertura final de aterro sanitário submetida a padrões de chuvas amazônicas. Neste sentido, no presente estudo, objetiva-se verificar a influência do regime hidrológico nas configurações das coberturas de aterros sanitários na Amazônia Paraense, no município de Marabá, localizado na porção sudeste do Estado do Pará.

REVISÃO TEÓRICA

É perceptível na literatura que, dentre os estudos realizados em aterros sanitários, poucos deles são voltados ao sistema que compõe a cobertura final, a maioria aborda sobre gestão integrada e/ou gerenciamento e até sobre reciclagem (VERGARA e TCHOBANOGLIOUS, 2012; LOMBARDI *et al.*, 2015; GONÇALVES *et al.*, 2018), além do enfoque quanto às falhas na camada impermeabilizante de base ou revestimento de fundo dos aterros sanitários (GENELLE *et al.*, 2014; GONÇALVES *et al.*, 2017; TURNER *et al.*, 2017).



Neste sentido, percebeu-se também uma lacuna relevante no que diz respeito ao comportamento de diferentes sistemas de cobertura final de aterro sanitário, de acordo com a identidade climática e pluviométrica distintas, e que poderá apresentar interferência direta no desempenho e eficiência dessa cobertura.

A ausência ou até mesmo poucas pesquisas nacionais sobre o comportamento de cobertura final do aterro sanitário, submetida a padrões de precipitações pluviométricas, pode favorecer um aumento na estimativa da quantidade de lixiviado, produzido a partir da decomposição dos RSU (GRUGNALETTI *et al.*, 2016). Para isso, é necessário pesquisar sobre as componentes do balanço hídrico e sobre o material de cobertura final para cada região que será instalado o aterro sanitário (SCALIA e BENSON, 2010; ZHAN *et al.*, 2016; BECK-BROICHSITTER *et al.*, 2018; BERGER *et al.*, 2019; STOCK *et al.*, 2020).

Já as pesquisas internacionais têm evidenciado a importância em quantificar a infiltração de água de chuva nas coberturas de aterros sanitários (KAMON *et al.*, 2003; MIJARES *et al.*, 2012; UDOH, 2012; ZHAN *et al.*, 2016; SHAIKH *et al.*, 2018; YESILLER *et al.*, 2019; STOCK *et al.*, 2020), na estimativa do volume de lixiviado gerado no interior das células de aterros (WIDOMSKI *et al.*, 2015; BECK-BROICHSITTER *et al.*, 2018).

No Brasil, há poucos artigos sobre a temática cobertura final de aterro sanitário (GONÇALVES *et al.*, 2017; COSTA *et al.*, 2018; SOUZA *et al.*, 2019), e especificamente para a região Amazônica oriental tem-se o trabalho de Imbiriba *et al.* (2020), que versa sobre a problemática de emissão de gás metano e carbônico proveniente de um aterro sanitário situado na região metropolitana de Belém-PA, e outro estudo que trata de cobertura final de aterro sanitário e balanço hídrico, com uso de resíduos da construção, para a estimativa de vazões de lixiviado (OLIVEIRA e BRAGA, 2017).

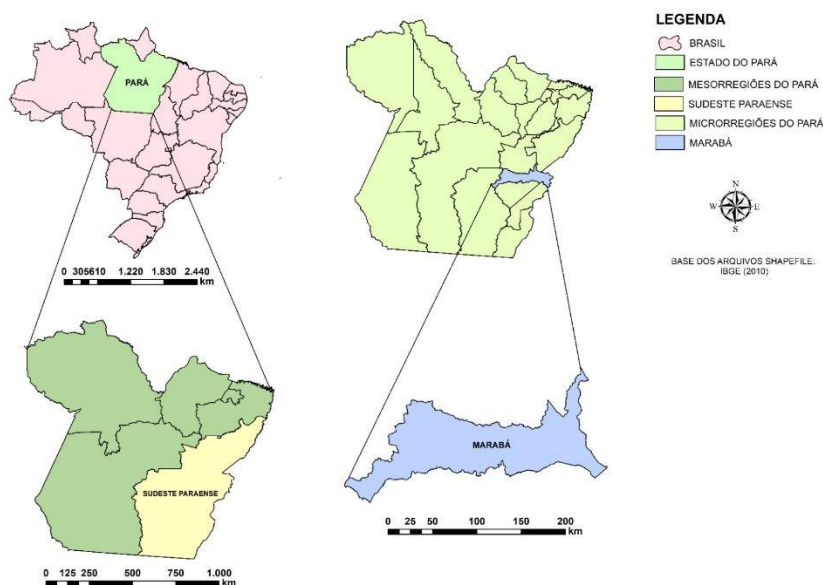
Segundo Amanajás e Braga (2012) a precipitação pluviométrica é considerada uma variável climatológica determinante para o planejamento de atividades antrópicas, assim como para o desenvolvimento social, sendo importante os estudos relacionados a quantidade e a variabilidade.

Área de estudo

A área de estudo é o município de Marabá que possui uma área de 15.128,058 km² e, segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2010), em 2010 contava com uma população de 233.669 habitantes, sendo a população estimada para o ano de 2020 de 283.542 habitantes. A seguir, apresenta-se a localização do município em zona úmida da Amazônia Paraense (Figura 1).



Figura 1- Área de estudo da pesquisa



Fonte: Autores (2023)

A região estudada apresenta clima dos tipos Am (tropical úmido e de monção) e Aw (tropical úmido), segundo a classificação de Köppen, com base, principalmente, em suas precipitações pluviométricas e em suas temperaturas. O período chuvoso de janeiro a maio, com as mais elevadas precipitações no mês de março. Segundo a classificação climática de Thorntwaite, Marabá enquadra-se em uma região de clima úmido e subúmido, com pequena ou nenhuma deficiência de água, anualmente (CPRM, 2001).

No contexto de solos e pedologia do município de Marabá, os mapas geológicos do Estado do Pará produzidos pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2001), indicam que a região apresenta depósitos sedimentares aflorantes em cortes da rodovia BR-230 de Marabá, considerados de idade cretácea superior, pertencentes à Formação Itapecuru. A Formação Itapecuru é caracterizada pela presença de Latossolo Amarelo e Latossolo Vermelho-Amarelo, textura fina a média, composta por silte-argila proporcionalmente superior à porção areia (CPRM, 2001), e corresponde cerca de 80% do tipo de solo presente na região de Marabá-PA.

METODOLOGIA

Estatística Climatológica

Para discussão dos dados climatológicos e confecção do balanço hídrico, foi consultado o banco de dados dos órgãos federais do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), os quais contam com uma vasta série de dados diários de precipitação, insolação e temperatura. Para a realização do presente trabalho, considerou-se os valores diários da série compreendida entre os anos 1991 e 2020, disponibilizados pelos dois órgãos.



As variáveis que compõem cada indicador hidrológico são apresentadas no Quadro 1, assim como a fonte de pesquisa.

Quadro 1 - Composição dos indicadores hidrológicos

Variáveis	Fonte	Série Histórica
Precipitação pluviométrica diária	INMET CONV (82562) ANA (00549002)	1991-2020
Precipitação pluviométrica mensal		
Temperatura máxima (°C)		
Temperatura mínima (°C)		
Temperatura média (°C)		
Insolação (h)		
Umidade Relativa do Ar (%)		
Vento (km/dia)		

Fonte: Autores (2023)

A regressão linear múltipla foi utilizada para os seguintes parâmetros de entrada: precipitação (mm), evapotranspiração (mm) e umidade relativa do ar (%), velocidade do vento (km/dia), tempo de insolação (h), temperaturas máximas e mínimas (°C). Após regressão encontrou-se adesão entre as variáveis com R^2 igual a 0,83.

Para estatística utilizada na climatologia e verificação do padrão de precipitação pluviométrica da área de estudo foram confeccionados gráficos de barras, box plot, histograma de frequência relativa de lâminas de chuvas, utilizou-se software Excel 2016 com extensão do XLstat, para melhor visualização dos resultados.

Balanço Hídrico Climatológico

A análise do balanço hídrico climatológico de Marabá-PA potencializou o entendimento de comportamento hidrológico de cobertura final para um aterro sanitário ao longo dos meses, ao ser imposta por padrões de precipitações pluviométricas e sazonalidade. Estimou-se a quantidade de água precipitada, armazenada no solo de cobertura, escoada superficialmente, evapotranspirada, infiltrada e percolada até os RSU, com dados climatológicos de 30 anos de série histórica do INMET e ANA.

Essa quantidade de água percolada até os RSU tem como principal consequência a maior geração de lixiviado no interior das células do aterro sanitário e que posteriormente deverá ser tratado para emissão em locais apropriados, sem danos ao meio ambiente.

O cálculo do fluxo de entrada e saída da água de chuva na cobertura do aterro sanitário adotado foi o método do balanço hídrico climatológico normal, com aplicação da metodologia de THORNTHWAITE e MATHER (1955) com estimativa da evapotranspiração potencial pelo



método de THORNTHWAITE (1948) e, por intermédio do programa computacional Balanço Hídrico Normal, e com auxílio de uma planilha eletrônica Excel elaborada e proposta por Koerner e Daniel (1997).

A sequência de cálculo utilizada foi a metodologia proposta por Thornthwaite e Mather (1955), que se encontra descrita em Koerner e Daniel (1997), sendo que no Quadro 2 apresenta-se os principais critérios para determinação dos parâmetros.

Quadro 2 - Critérios de definição de parâmetros para análise do balanço hídrico de Thornthwaite e Mather (1955)

Parâmetro, Sigla e Unidade	Critérios
Temperatura média (C°)	Dados coletados em série histórica
Índice de calor (H _m)	$H_m = (0,2 \cdot T)^{1,514}$ para $T \leq 0^\circ\text{C}$ $H_m = 0$ para $T \geq 0^\circ\text{C}$
UPET (mm)	UPET = 0 (for $T \leq 0^\circ$) UPET = 0,53 (10T/Ha) ($0^\circ < T < 27^\circ\text{C}$) UPET = 0,015 T ² + 1,093 T – 14,208 (for $T \geq 27^\circ$) $a = (6,75 \cdot 10^{-7}) \cdot H_a^3 - (7,71 \cdot 10^{-5}) \cdot H_a^2 + 0,01792 H_a + 0,49239$
Luz solar média mensal (N)	Dados coletados em série histórica
Evapotranspiração potencial (EP) (mm)	$EP = UPET \cdot N$
Precipitação Média Mensal - P (mm)	Dados coletados em série histórica
Escoamento superficial - R(mm)	$R = P \cdot C$, C de Fenn et al. (1975)
Infiltração - IN = (P - R) (mm)	$IN = P - R$
Balanço - (IN - EP) (mm)	$Balanço = IN - EP$
Perda de água acumulada - WL (mm)	$IN - PET \geq 0$, insira o valor de WL do mês anterior. $IN - PET \leq 0$, soma-se o valor de WL do mês anterior.
Água armazenada no solo - WS (mm)	$P / IN - PET \leq 0$ $WS = (WS_{max}) \cdot 10^{b \cdot (IN - PET)}$ e $b = \frac{0,455}{WS_{max}}$ $P / IN - PET > 0$ $WS = IN - PET$



Armazenamento de água- ΔWS	Entrar com valor do último mês anterior ao período a ser estudado
Evapotranspiração real - ET (mm)	Se $IN - PET \geq 0$, $ET = PET$ Se $IN - PET < 0$: $ET = PET + [(IN - PET) - CSW]$
Percolação - PERC (mm)	$IN - PET \leq 0$ ($PET > IN$), $PERC = 0$ $IN - PET > 0$ ($PET > IN$), $PERC = (IN - PET) - WS$
Linha de Checagem - CK (mm)	$CK = PERC + ET + WS + R$
Fluxo de percolação - Q_{nec} (m ³ /s)	$Q_{nec} = \frac{(PERC \cdot 0,001}{t)}$

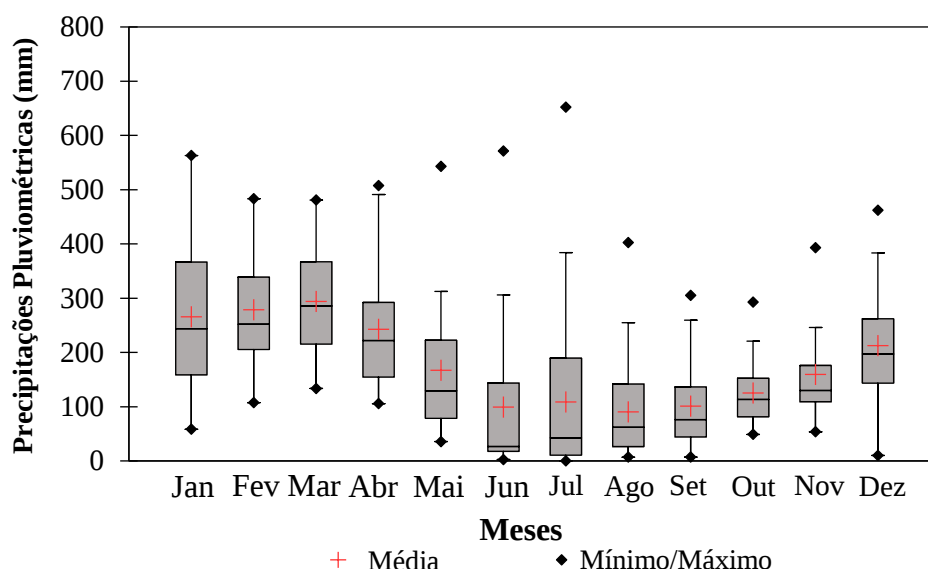
Fonte: Adaptado Koerner e Daniel (1997)

RESULTADOS

Para responder questões relacionadas à influência do balanço hídrico em cobertura final de aterros sanitários foi necessário conhecer as variáveis climáticas da região da área de estudo situada no município de Marabá-PA, tendo como dados de entrada a precipitação pluviométrica, a variabilidade temporal e a lâmina de água da chuva.

Os primeiros resultados obtidos foram relativos à estatística descritiva das precipitações pluviométricas e temperatura, baseados na série histórica de 30 anos, entre os anos de 1991 e 2020. Os dados foram obtidos por meio dos sites dos órgãos federais ANA (chuvas_C_00549002 e clima_C_00549002) e INMET (Convencional 82562) e tratados conforme mencionado no capítulo de metodologia.

Na Figura 2, apresentam-se os resultados da média da precipitação pluviométrica mensal (PPM) de Marabá-PA, entre os anos de 1991 e 2020.

**Figura 2** - Box plot da média PPM, entre 1991 e 2020.

Fonte: Autores (2023)

De acordo com a Figura 2, percebe-se que o mês com a maior média mensal de precipitação pluviométrica é o mês de março (293 mm) e o mês com menor média mensal é agosto (90 mm) ao longo de 30 anos de dados pluviométricos. Observa-se que a precipitação pluviométrica mínima do mês de março é superior à média dos meses de maior estiagem, que vai de junho a novembro, com exceção do último mês mencionado.

Em relação à variabilidade temporal ao longo dos 30 anos hidrológicos pesquisados, os meses que apresentaram maior variabilidade de precipitações pluviométricas foram os meses de janeiro e julho. No caso do mês de janeiro, as precipitações pluviométricas ficaram entre 158mm e 366mm (50%) e julho variaram de 10mm a 189mm (50%).

Destaca-se na Figura 2 o mês de março, apresentando no primeiro quartil (Q1) o valor correspondente a 215,5 mm, sendo que 25% dos valores das precipitações pluviométricas mensais ocorridas são menores (25%) e 75% maiores. Já o segundo quartil (Q2), equivalente à mediana, no qual foi de 285,9 mm, em que 50% dos valores de precipitações pluviométricas são menores, e outros 50% são maiores. No terceiro quartil (Q3) tem-se o valor de 367,1 mm onde os 25% restantes são maiores que esse quartil.

Outro destaque para evidenciar a confirmação de sazonalidade entre os meses, tem-se o mês de agosto, com a menor média mensal de precipitação pluviométrica. Nota-se que no primeiro quartil (Q1) o valor correspondente foi de 10,5mm, sendo o restante das precipitações pluviométricas mensais superiores a este valor. Já o segundo quartil (Q2), equivalente à mediana, com valor de 62,05 mm, sendo 50% dos valores de precipitações pluviométricas são menores que o mencionado. Por fim, constatou-se que, no terceiro quartil (Q3) o valor correspondente foi de 189,6 mm, com o restante, 25%, maiores que esse quartil.

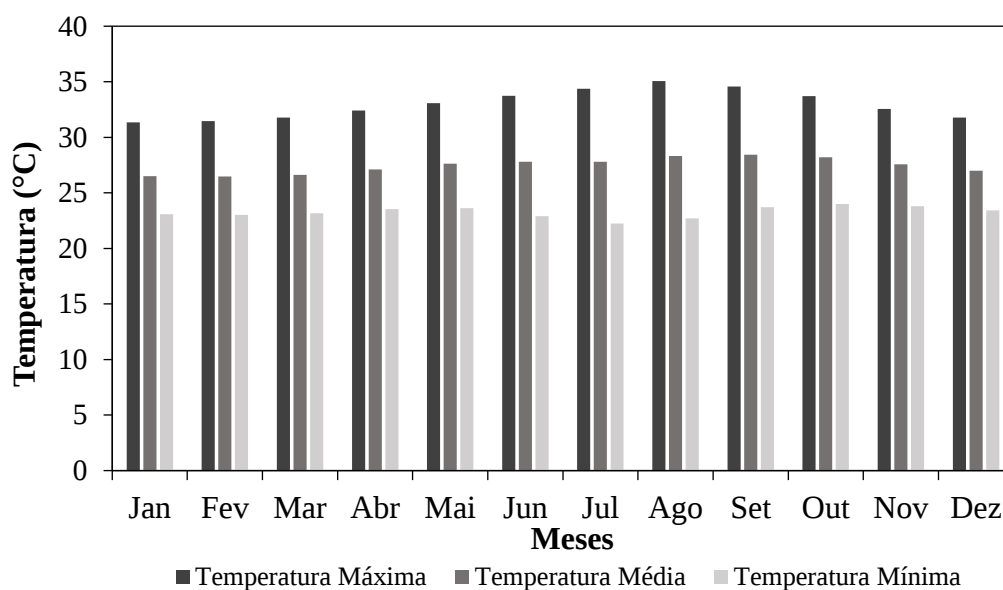


Ainda comparando os valores de precipitação pluviométrica mensal de março e julho, esse último apresenta como Q3 inferior a 189,6 mm ao comparar com o limite inferior do mês de março que é de 215 mm.

A sazonalidade amazônica fica evidente ao observar os resultados de PPM do período analisado, onde os meses com maiores médias mensais de chuva correspondem ao período de dezembro a maio e os meses menos chuvosos compreendem de junho a novembro. Para o sudeste paraense, os resultados obtidos ratificam os dados da série histórica mais antiga, entre 1960 e 1990, publicado por CPRM (2001), onde o mês de março também foi o mais chuvoso e agosto o mês com mais estiagem.

Na Figura 3 apresentam-se os resultados da estatística mensal da temperatura de Marabá-PA, entre os anos de 1991 e 2020, com base no INMET. Na Figura 3 mostra que a temperatura máxima (35 °C) ocorreu no mês de agosto, sendo a temperatura média no período 27 °C e a temperatura mínima de 22,2 °C no mês de julho.

Figura 3 - Temperatura máxima, mínima e média mensal de Marabá, 1991 a 2020.

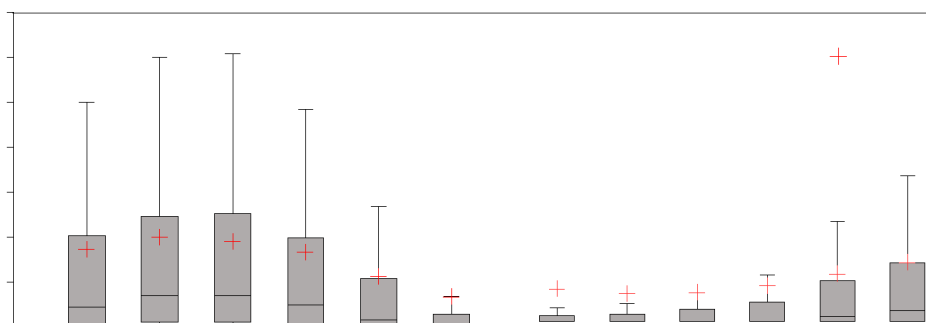


Fonte: Autores (2023)

Além dos dados de precipitação pluviométrica mensal (PPM), foi necessário um estudo dos dados de precipitação pluviométrica diária (PPD), para avaliar o comportamento das lâminas de chuvas ao longo desses trinta anos de série histórica e verificar se há disparidade vultosas durante os doze meses. Na Figura 4 apresentam-se os dados da precipitação pluviométrica diária do município de Marabá-PA para os meses de janeiro a dezembro, no período de 1991 a 2020.



Figura 4 - Precipitações pluviométricas diárias de janeiro a dezembro, entre 1991 e 2020.



Fonte: Autores (2023)

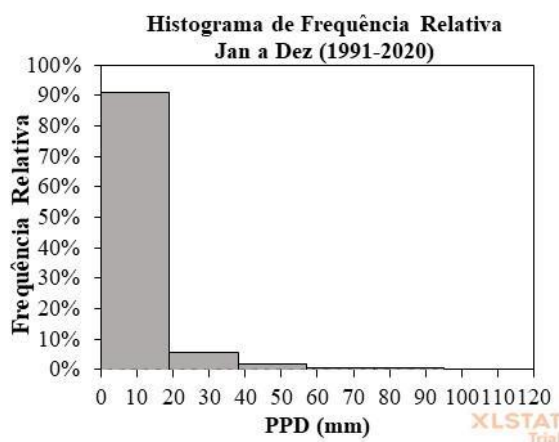
Os meses do primeiro semestre possuem maior precipitação pluviométrica diária, em destaque para os meses de fevereiro e março que apresentam maior lâmina de chuva diária, em torno de 10 mm. Porém, conta-se com 25% das chuvas de 10 a 30 mm.

Observam-se episódios de chuva com lâmina de água de 30 mm por dia, porém, com periodicidade menor, ou seja, chuvas mais espaçadas. As chuvas de maior ocorrência para esses meses se concentram em lâminas entre 3,5 mm a 12,5 mm por dia, ao longo desses 30 anos de dados. Ainda no mês de março, a média de precipitação diária é de 9,5 mm e no mês de fevereiro de 10 mm.

Já os meses de maio e junho são considerados meses que menos chovem ao comparar com os meses anteriores do primeiro semestre, e as lâminas de chuva diária variam de 5 mm e 3,5 mm, respectivamente.

Para avaliação da frequência de ocorrência de lâmina de chuva diária elaborou-se o histograma apresentado na Figura 5. Os resultados obtidos corroboram os dados apresentados na Figura 4, onde 90% das vezes que ocorreram chuvas de janeiro a dezembro, entre o período de 30 anos, foram lâminas de até 20 mm. Cerca 8% das lâminas de chuvas diárias se encontram entre 20 a 60 mm, e 2% de chuvas acima de 60 mm no município de Marabá-PA.

Figura 5 - Histograma de frequência relativa de lâminas de chuvas diárias, de 1991 a 2020.

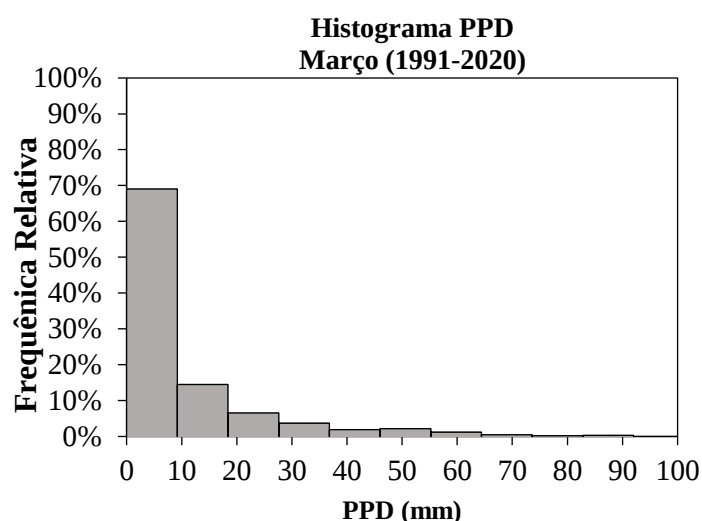


Fonte: Autores (2023)



Com um recorte para avaliar os 30 meses de março que ocorreram no período analisado, na Figura 6 são apresentadas informações da frequência relativa das lâminas de chuva de diárias, enquanto 85% das chuvas apresentam intensidade de até 20 mm.

Figura 6 - Lâminas de chuva diária do mês de março, de 1991 a 2020.

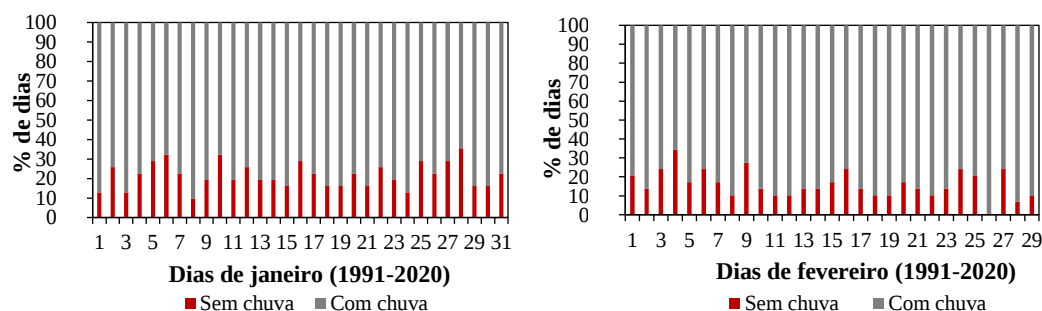


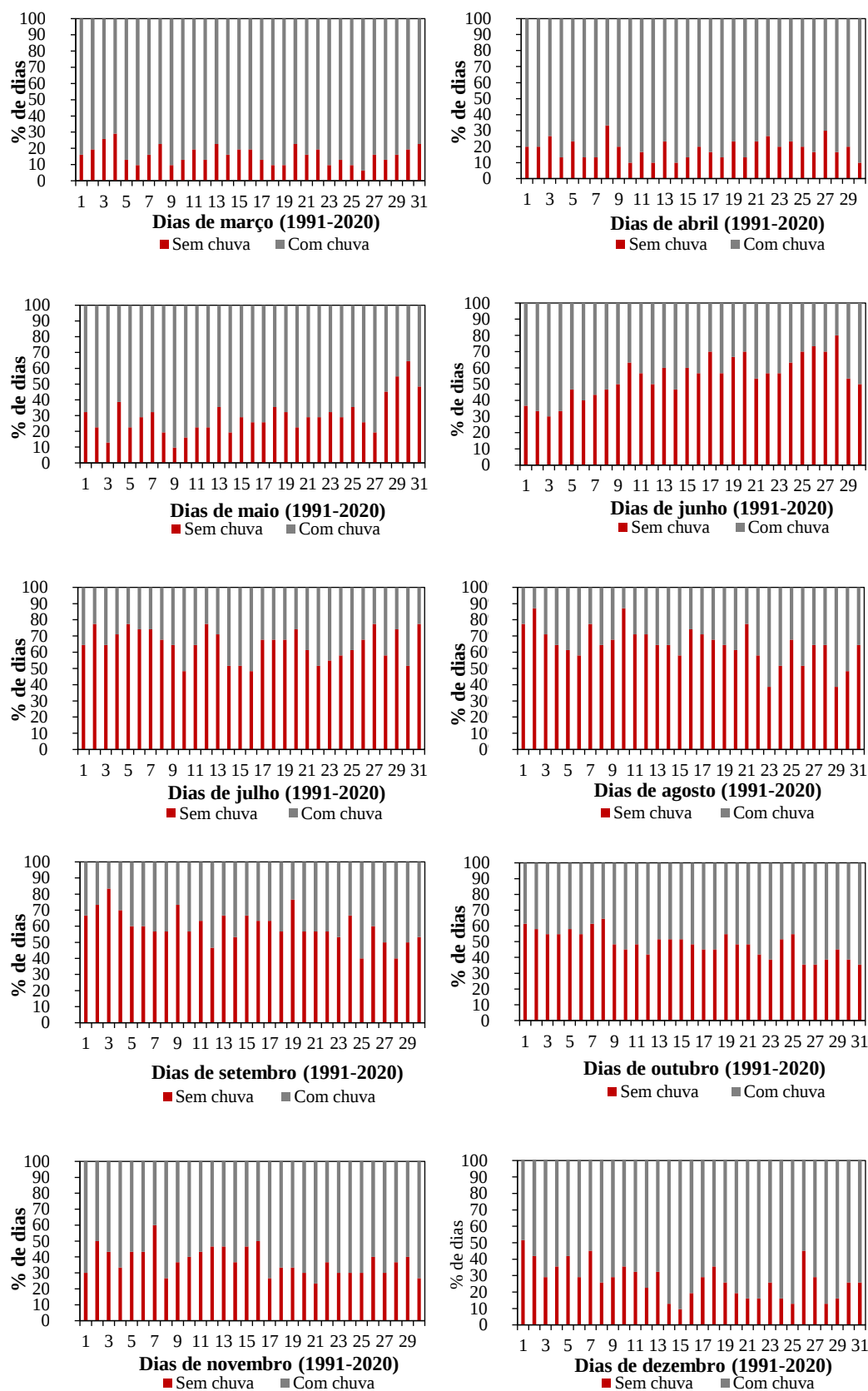
Fonte: Autores (2023)

A região amazônica tem peculiaridades de padrões de chuvas ao longo dos meses que compõem cada ano hidrológico, portanto algumas análises específicas se fazem necessárias para o entendimento dessa sazonalidade da precipitação. Na Figura 7 apresentam-se informações dos percentuais de dias que choveram e não choveram, em todos os meses do período estudado.

Para quantificação dos dias secos e chuvosos foi considerado como dia com chuva aquele em que a estação meteorológica acusou lâmina de precipitação acima de 0,1 mm.

Figura 7 - Porcentagem dos dias que chovem e dos dias que não chove por mês, no período de 1991 a 2020. (Fonte: Autores, 2023)







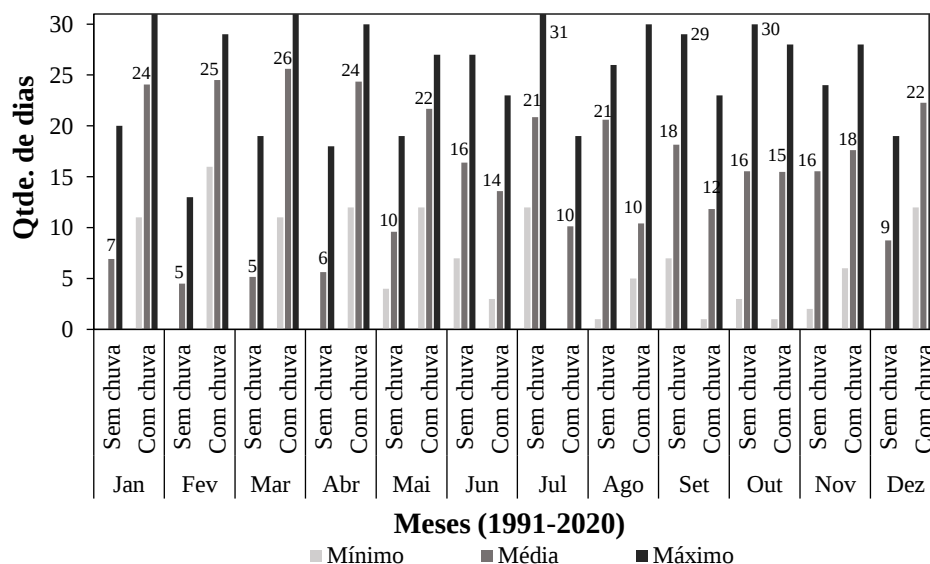
Essa análise permitiu assegurar os padrões de chuvas na cidade de Marabá, possuindo o comportamento de maiores dias chuvosos nos meses de dezembro a maio, com médias em torno 78% dos dias desses meses, e apenas 22% dos dias ficam sem chover. Enquanto para os meses de junho a novembro, 44% dos dias desses meses ocorrem episódios de chuva com lâminas de chuva predominantemente até 5 mm (sendo 90% das lâminas de chuva entre de 0,2 mm a 5 mm) e 56% dos dias ficam sem chover.

Ao analisar o mês de março observou-se um comportamento semelhante a uma “senoide”, com muitos picos médios coincidentes de múltiplos de 4 dias. Ou seja, os dias 4, 8, 13, 16, 20, 21, 30 e 31 foram os dias dos meses de março que mais tiveram episódios de estiagem ao longo dos 30 anos da série. Em compensação, os dias 6, 9, 12, 18, 19, 23, 26 e 28 foram os dias que mais tiveram ocorrência de chuva nessa série.

Como o período analisado são 30 anos, a amostra total de 30 possíveis ocorrências de chuva por dia no mês de março, e os dias que mais tiveram incidência de chuva citados anteriormente foram de 27 ou 28 vezes, com exceção do dia 26 de março que ao longo de 30 vezes o mês de março, 29 vezes choveu e apenas dois meses ficaram sem chuva, que foram nos anos de 1992 e 1994.

Nota-se que os meses de julho e agosto apresentaram maior média de dias sem chuva, em torno de 65%, isso corresponde a 20 dias sem chuva do total de 31 dias para cada um dos meses (Figura 8). Enquanto o mês de março se encontra com a maior média de dias com chuva, cerca de 84%, equivalente a 26 dias com chuva do total de 31 dias (Figura 8).

Figura 8 - Mínimo, média e máximo de dias sem chuva e com chuva por mês.



Fonte: Autores (2023)

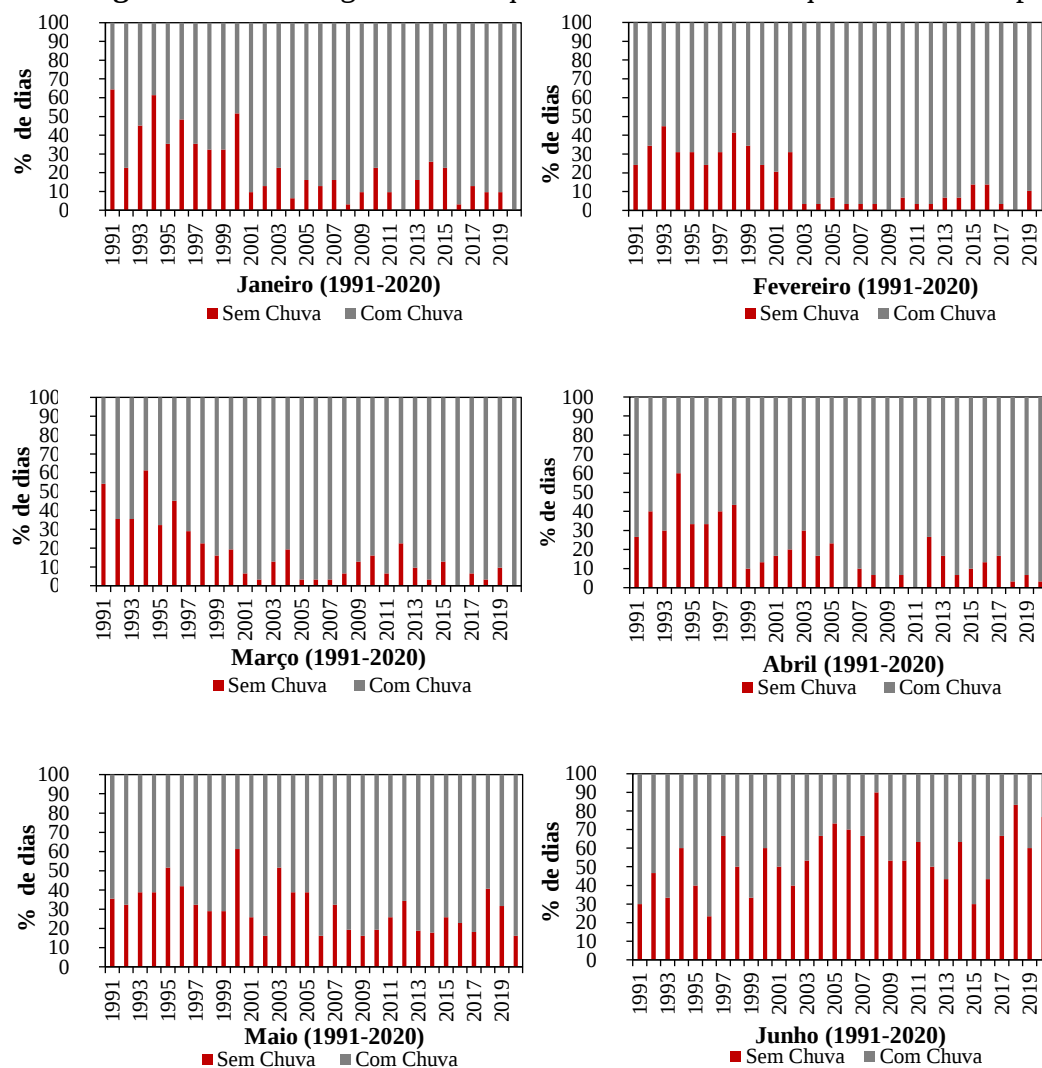
Para todos os meses a média de dias com chuva se apresentou maior do que comparado em período anterior, de 1992 a 2012, pesquisado por Hoffmann *et al.* (2018). O autor também encontrou lâmina de chuva média diária de 18 mm, enquanto nesta pesquisa a média de lâmina de chuva diária foi de 6 mm, analisada em outro período mais recente de 1991 a 2020. Os casos de divergências podem ser justificados, em função do que critério utilizado por cada autor, onde

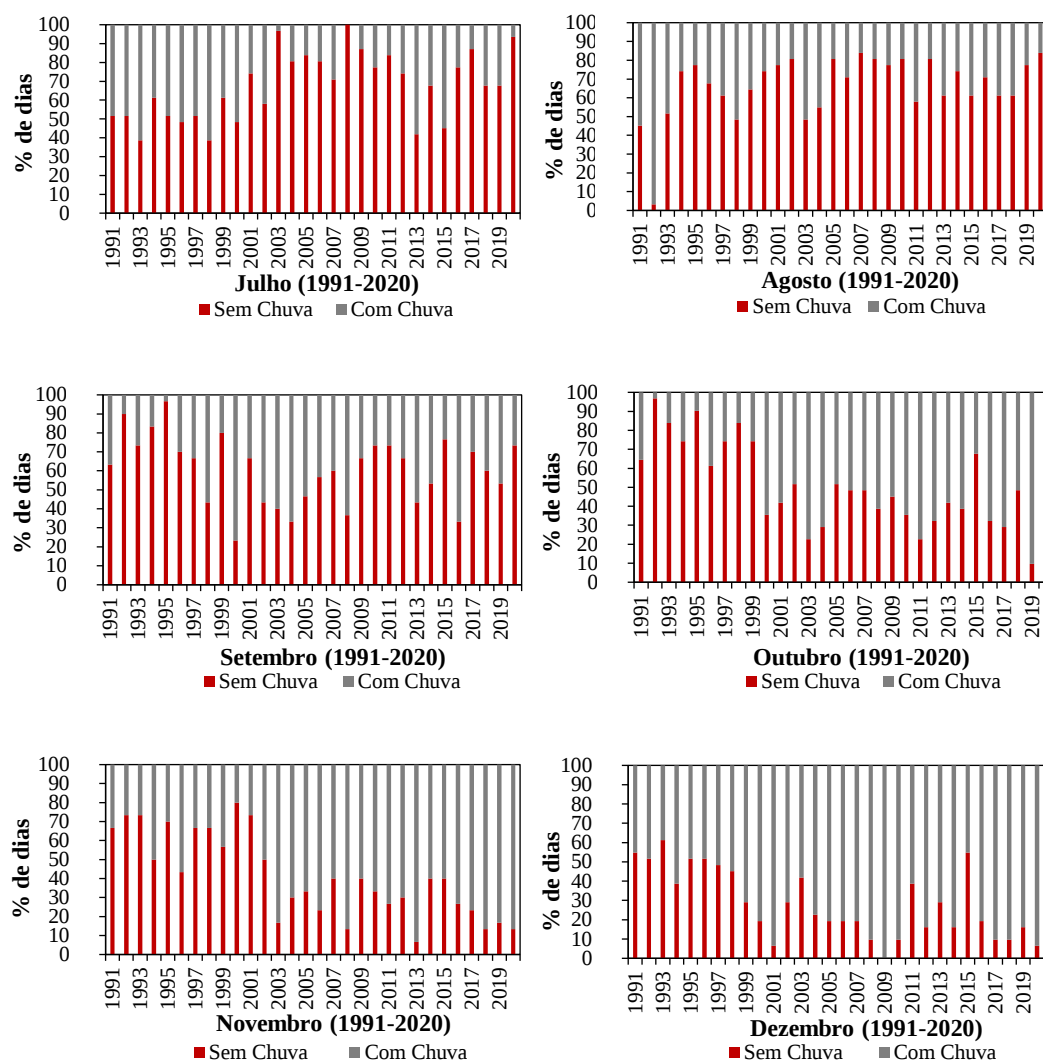


o primeiro previu que os dias que chovem ocorreram para lâminas de chuva superiores a 5 mm, enquanto para esta pesquisa o critério foi de lâminas acima de 0,1 mm.

Na Figura 9 apresentam-se os meses com períodos maiores de dias sem chuva que foram os meses de julho, setembro e outubro, respectivamente com a quantidade de dias sem chuva de 31 dias (em 2008), 29 dias (em 1995) e 30 dias (em 1992).

Figura 9 - Porcentagem de dias que chovem e dos dias que não chovem por mês.





Fonte: Autores (2023)

A Figura 9, especificamente no mês de março, apresenta dois cenários bem distintos ao longo dos anos, sendo o primeiro cenário de 1991 a 2020 quando o mês de março ainda apresentava equilíbrio entre os dias de chuva e de estiagem, uma média de 64% dos dias de março que choveram, ou seja, 20 dias choveram e 11 dias ficaram sem chuva.

Enquanto o segundo cenário mostra ocorrência de chuva ainda maior quando comparado ao primeiro cenário, uma vez que 92% dos dias de março choveram, ou seja, uma média de 28 dias com chuva e 3 dias com ausência de chuva.

Nos anos 2002, 2005 a 2007, 2014 e 2018, durante o mês de março apenas 1 dia na média não choveu, enquanto, nos anos de 2016 e 2020, todos os dias tiveram ocorrência de chuva no mês de março.

E o único ano que teve mais dias sem chuva, comparado aos dias com chuva, foi março de 1994, pois foram 13 dias com chuva e 18 dias sem ocorrência de chuva.



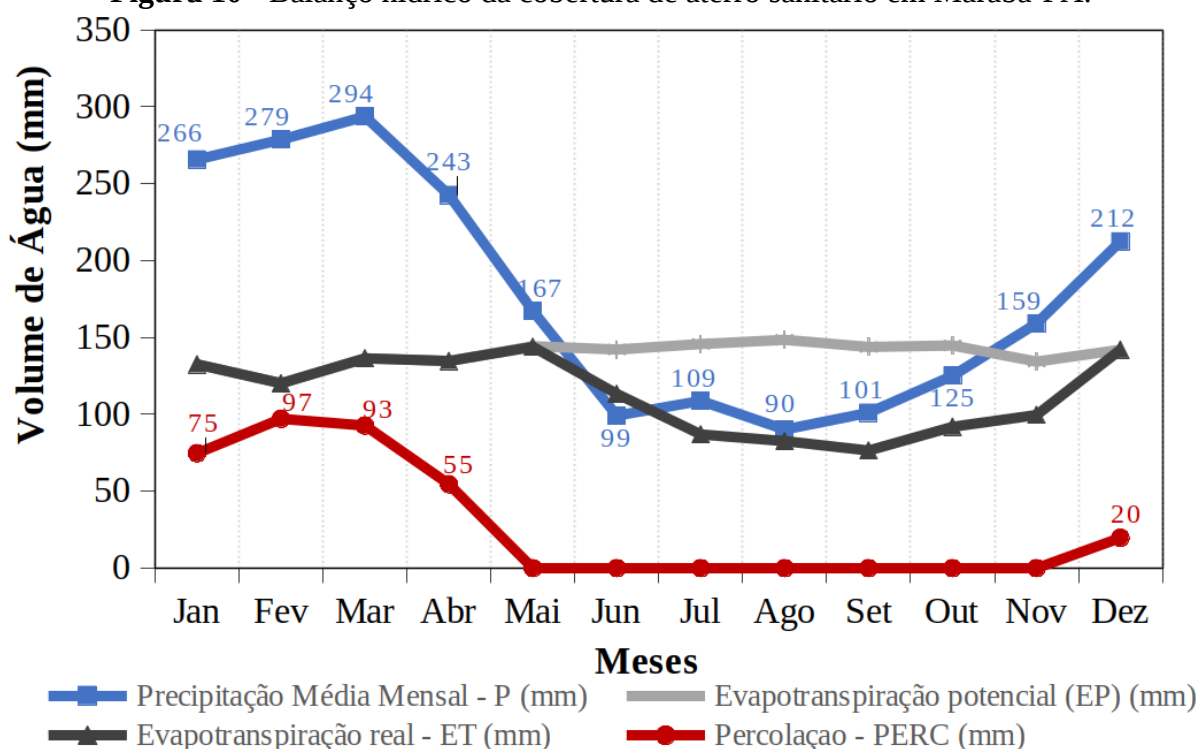
Investigar o comportamento de cada mês é interessante, pois torna possível compreender os ciclos das chuvas, e isso serve como ferramenta para estudos específicos de cada região.

No caso de obras civis nessas regiões com precipitações pluviométricas acentuadas, essa variável climática é primordial no cálculo do balanço hídrico, assim como a quantidade de água que irá contribuir no dimensionamento das estruturas que irão receber essa chuva e, no caso específico desta pesquisa, o valor potencial e/ou real da água que chegará na cobertura final de aterro sanitário localizado em Marabá-PA.

Balanço hídrico climatológico

Nesta pesquisa, com o emprego do balanço hídrico, determinou-se a quantidade (em mm) das parcelas que formam esse balanço de água, como a evapotranspiração real, a infiltração e a percolação, assim como outros fatores que são influenciados pelos diferentes meses do ano no município de Marabá-PA. Esse balanço tem muita influência dos dados de entrada, valores de precipitações pluviométricas, e que neste caso, optou-se pela temporalidade mensal, conforme a Figura 10.

Figura 10 - Balanço hídrico da cobertura de aterro sanitário em Marabá-PA.



Fonte: Autores (2023)

Ao analisar a influência da sazonalidade das precipitações pluviométricas dos meses mais chuvosos (dezembro a maio), esses meses apresentaram maiores valores de



evapotranspiração real médio de 135 mm, enquanto os meses de estiagem (junho a novembro) indicaram 96 mm.

Ainda sobre o período mais chuvoso, o mês que apresentou maior valor de evapotranspiração real foi o mês de maio, com 144 mm, motivado por ser o mês com menor precipitação pluviométrica, também apresentou menores valores de infiltração e escoamento superficial, somada a maior temperatura que foi de 27,62 °C. Esse conjunto de fenômeno favoreceu ao valor máximo de evapotranspiração real e o único mês dentro do período chuvoso que a percolação foi nula, conforme por ser observada na Figura 10.

Em relação ao período de maior estiagem de Marabá-PA, foram os meses responsáveis por menores valores de precipitação pluviométrica mensal, assim como menores valores de evapotranspiração real, com média em torno de 114 mm. Com destaque o mês de setembro que obteve o menor valor que foi de 76 mm e percolação nula, igual aos demais meses pertencentes do período de estiagem (Figura 10).

Apesar da média da precipitação pluviométrica do mês de março ser superior ao mês de fevereiro, o último apresentou percolação um pouco maior, isso se deve aos valores de luz solar, uma vez que para fevereiro o valor adotado foi de 27,9 N, enquanto para março foi de 30,9 N. Essa variável interfere diretamente no resultado da evapotranspiração potencial e no balanço (IN-EP).

Nota-se que, a percolação está diretamente relacionada à quantidade de precipitação pluviométrica mensal, atingindo valores nulos nos meses com menos chuva, a partir do mês de maio na transição de um período mais chuvoso para um menos chuvoso. Comportamento semelhante ocorreu na pesquisa de Silva *et al.* (2021), em Boa Vista-RR, onde só ocorreu percolação nos meses com excedente hídrico, ou seja, quando a precipitação pluviométrica excede os valores de evapotranspiração.

Isso ocorre devido à perda de água acumulada nestes meses, o que resulta em um balanço negativo de água no solo. Esse balanço negativo é resultado da escassez de eventos de chuvas e/ou chuva com lâmina de água não suficiente para saturar o solo e assim ocorrer a percolação, além do aumento da temperatura nesses meses, o que provoca uma evaporação maior que o precipitado neste mês, deixando os solos nesses meses ainda mais secos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho utilizou-se da análise dos dados climatológicos no período de 30 anos, tornando-se possível constatar que os maiores índices pluviométricos estão presentes no mês de março, sendo os meses de estiagem aqueles entre junho e novembro. Já em termos de variabilidade da precipitação pluviométrica, janeiro foi o que apresentou o maior valor significativo.

Em consonância, considerando as condições da sazonalidade na Amazônia, observou-se que os dias mais chuvosos da cidade de Marabá estão localizados entre os meses de dezembro a maio. Destacando-se novamente a grande incidência pluviométrica no mês de março, o qual apresentou incidência de mais de 20 vezes em todos os anos estudados. Situação adversa a dos meses de junho e agosto, considerados como parte do período de estiagem, apresentaram, em média, mais de 20 dias de estiagem ao longo do período analisado.



O método de balanço hídrico permitiu determinar que haverá percolação nos meses em que ocorreram excedente hídricos, ou seja, quando a precipitação excede os valores de evapotranspiração.

A respeito das camadas de cobertura final, concluiu-se que, estas devem, prioritariamente, compor um sistema com vida útil prolongada e serem capazes de suportar variações bruscas de sazonalidade. Para tal, tem-se como ferramenta fundamental o Balanço Hídrico Climatológico, responsável por dispor sobre níveis de acúmulo e de evaporação hídrica.

Portanto, evidencia-se a proeminência climatológica da região, sendo de suma importância sua análise prévia para o dimensionamento de obras na engenharia, em uma região com alto índice pluviométrico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Universidade Federal do Pará pelo apoio à pesquisa de doutorado desenvolvida que culminou neste artigo científico.

REFERÊNCIAS

- ABRELPE. "Panorama dos Resíduos no Brasil", Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, p. 45, 2020. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama/>. Acesso em 20 mar.2023.
- ALFAIA, R. G. de S. M., COSTA, A. M., CAMPOS, J. C. "Municipal solid waste in Brazil: A review", Waste Management and Research, Esse artigo será muito útil no item 2.1. do referencial teórico da qualificação. Que faz do Panorama dos RSU no mundo e no Brasil, v. 35, n. 12, p. 1195–1209, 2017. DOI: 10.1177/0734242X17735375.
- AMANAJÁS, J. C.; BRAGA, C. C.. Padrões espaço-temporal pluviométricos na Amazônia Oriental utilizando análise multivariada. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 27, p. 423–434, 2012.
- ANA - Agência Nacional de Águas. Portal HidroWeb - Rede Hidrometeorológica Nacional. <<http://www.snirh.gov.br/hidroweb>>. Acessado em 1 de fevereiro de 2022.
- APIWANTRAGOON, P., BENSON, C. H., ALBRIGHT, W. H. "Field hydrology of water balance covers for waste containment", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 141, n. 2, 2015. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001195.
- BECK-BROCHSITTER, S., GERKE, H. H., HORN, R. "Assessment of leachate production from a municipal solid-waste landfill through water-balance modeling", Geosciences (Switzerland), v. 8, n. 10, 2018. DOI: 10.3390/geosciences8100372.
- BERGER, K., GROENGROEFT, A., GEBERT, J. "20 Years Performance Measurements of a Landfill Cover System with Components Constructed from Pre-Treated Dredged Sediments", Waste Management, v. 100, p. 230–239, 2019. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.09.016.
- BOSCOV, M. E. G., HEMSI, P. S. "Some topics of current practical relevance in environmental geotechnics", Soils and Rocks, v. 43, n. 3, p. 461–495, 2020. DOI: 10.28927/sr.433461.
- BRASIL. Novo Marco Legal de Saneamento. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Presidência da República, Departamento da Casa Civil. Brasília, 2020. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm. Acesso em: 07 de fev. 2022
- CHAVAN, D., KUMAR, S. "Reduction of methane emission from landfill using biocover as a biomitigation system: A review", Indian Journal of Experimental Biology, v. 56, n. 7, p. 451–459, 2018.
- COSTA, A. M., ALFAIA, R. G. DE S. M., CAMPOS, J. C. "Landfill leachate treatment in Brazil – An overview", Journal of Environmental Management, v. 232, n. November 2018, p. 110–116, 2019. DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.11.006.
- CPRM. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil - PLGB. Marabá – Folha SB.22-X-D, Estado do Pará, Maranhão e Tocantins. Escala 1:250.000. Projeto de mapeamento geológico/metalogenético sistemático, p. 119, 2001.
- DUAN, Z., SCHEUTZ, C., KJELDSEN, P. "Trace gas emissions from municipal solid waste landfills: A review", Waste Management, v. 119, p. 39–62, 2021. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.09.015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.09.015>.
- EMMANUEL, E., ANGGRAINI, V., RAGHUNANDAN, M. E., ASADI, A. "Utilization of marine clay as a bottom liner material in engineered landfills", Journal of Environmental Chemical Engineering, v. 8, n. 4, p. 104048, 2020. DOI: 10.1016/j.jece.2020.104048. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104048>.
- GENELLE, F., SIRIEIX, C., RISS, J., DABAS, M., BÉGASSAT, P. "Detection of landfill cover damage using geophysical methods", Near Surface Geophysics, v. 12, n. 5, p. 599–611, 2014. DOI: 10.3997/1873-0604.2014018.



- GONÇALVES, A. T. T., MORAES, F. G. MARQUES, G. L., LIMA, J. P., LIMA, R. D. S. "Urban solid waste challenges in the BRICS countries: a systematic literature review", *Revista Ambiente e Água*, v. 13, n. 2, p. 1–20, 2018. DOI: 10.4136/1980-993X. Disponível em: http://www.ambi-agua.net/seer/index.php/ambi-agua/article/view/2018/pdf_2.
- GONÇALVES, F., SOUZA, C. H. U. DE, TAHIRA, F. S., TEIXEIRA, R. S. "Incremento de lodo de ETA em barreiras impermeabilizantes de aterro sanitário", *Revista DAE*, v. 65, n. 205, p. 5–14, 2017. DOI: 10.4322/dae.2016.018.
- GRUGNALETTI, M., PANTINI, S., VERGINELLI, I., LOMBARDI, F. "An easy-to-use tool for the evaluation of leachate production at landfill sites", *Waste Management*, v. 55, p. 204–219, 2016. DOI: 10.1016/j.wasman.2016.03.030. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.030>.
- HAUSER, V. L., WEAND, B. L., GILL, M. D. "NATURAL COVERS FOR LANDFILLS AND BURIED WASTE", *Journal of Environmental Engineering*, v. 127, n. 9, p. 768–775, 2001.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo 2010. Disponível em <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pa/maraba/pesquisa/23/26170>. Acesso: 15 de janeiro de 2023
- IMBIRIBA, B. C. D. O., RAMOS, J. R. D. S., DE SOUSA SILVA, R., CATTANIO, J. H., DO COUTO, L. L., MITSCHKEIN, T. A. "Estimates of methane emissions and comparison with gas mass burned in CDM action in a large landfill in Eastern Amazon", *Waste Management*, v. 101, p. 28–34, 2020. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.09.029. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.09.029>.
- INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. 2023. Disponível em <https://portal.inmet.gov.br/servicos/bdmep-dados-hist%C3%B3ricos>. Acesso em 10 de junho de 2023.
- KAMON, M., INAZUMI, S., KATSUMI, T., INUI, T. "Water interception of landfill cover systems under unsaturated conditions", *Soils and Foundations*, v. 43, n. 2, p. 1–16, 2003. DOI: 10.3208/sandf.43.2_1.
- KATSUMI, T., BENSON, C. H., FOOSE, G. J., KAMON, M. "Performance-based design of landfill liners", *Engineering Geology*, v. 60, n. 1–4, p. 139–148, 2001. DOI: 10.1016/S0013-7952(00)00096-X.
- KOERNER, R. M., DANIEL, D. E., "Final Covers for Solid Waste Landfills and Abandoned Dumps," Thomas Telford, London, 1997, pp. 34-89.
- KRISHNA, V. R., HARISH, P. K. R. "Optimizing the liners thickness to design a landfill", *Materials Today: Proceedings*, v. 43, p. 2331–2336, 2021. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.01.678. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.678>.
- LOMBARDI, L.; CARNEVALE, E.; CORTI, A. A review of technologies and performances of thermal treatment systems for energy recovery from waste. *Waste Management*, v. 37, p. 26–44, 2015.
- MACIEL, F. J., JUCÁ, J. F. T. "Evaluation of landfill gas production and emissions in a MSW large-scale Experimental Cell in Brazil", *Waste Management*, v. 31, n. 5, p. 966–977, 2011. DOI: 10.1016/j.wasman.2011.01.030.
- MIJARES, R. G., KHIRE, M. V., JOHNSON, T. "Field-scale evaluation of lysimeters versus actual earthen covers", *Geotechnical Testing Journal*, v. 35, n. 1, 2012. DOI: 10.1520/GTJ103577.
- NI, J. J. et al. Two-year evaluation of hydraulic properties of biochar-amended vegetated soil for application in landfill cover system. *Science of the Total Environment*, v. 712, p. 136486, 2020.
- OLIVEIRA, R. F. de, BRAGA, R. M. Q. L. "Sistema De Cobertura Final De Um Aterro Sanitário Para a Rmb De Belém-Pa Com Emprego De Resíduos Da Construção Civil", *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, v. 6, n. 3, p. 573, 2017. DOI: 10.19177/rgsa.v6e32017573-596.
- ROCK, S., MYERS, B., FIEDLER, L. "Evapotranspiration (ET) covers", *International Journal of Phytoremediation*, v. 14, n. SUPPL., p. 1–25, 2012. DOI: 10.1080/15226514.2011.609195.
- ROWE, R. K. "Third Indian Geotechnical Society: Ferroco Terzaghi Oration Design and Construction of Barrier Systems to Minimize Environmental Impacts Due to Municipal Solid Waste Leachate and Gas", *Indian Geotechnical Journal*, v. 42, n. 4, p. 223–256, 2012. DOI: 10.1007/s40098-012-0024-4.
- SCALIA IV, J., BENSON, C. H. "Effect of permeant water on the hydraulic conductivity of exhumed GCLs", *Geotechnical Testing Journal*, v. 33, n. 3, 2010. DOI: 10.1520/GTJ102609.
- SHAIKH, J., BORDOLOI, S., YAMSANI, S. K., SEKHARAN, S., RAKESH, R. R., SARMAH, A. K. "Long-term hydraulic performance of landfill cover system in extreme humid region: Field monitoring and numerical approach", *Science of the Total Environment*, v. 688, p. 409–423, 2019. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.06.213.
- SHAIKH, J., YAMSANI, S. K., SEKHARAN, S., RAKESH, R. R. "Performance Evaluation of Profile Probe for Continuous Monitoring of Volumetric Water Content in Multilayered Cover System", *Journal of Environmental Engineering (United States)*, v. 144, n. 9, 2018. DOI: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001424.
- DA SILVA, A. F., PIMENTEL, F. A., NETO, J. A. C., DE NÓBREGA, S. L., PEREIRA, A. S. Estimativa da produção de percolato do aterro de disposição de resíduos sólidos de Boa Vista por meio de metodologias empíricas. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales. Investigación, desarrollo y práctica*, v. 14, n. 2, p. 623, 6 ago. 2021.
- SOBTI, J., SINGH, S. K. "Techno-economic analysis for barrier materials in landfills", *International Journal of Geotechnical Engineering*, v. 11, n. 5, p. 467–478, 2017. DOI: 10.1080/19386362.2016.1232634.
- SOUZA, H. P. de, SOARES, A. B., ELIAS, D. D. S. "Ensaio de infiltração em modelos experimentais de coberturas secas utilizando cinzas de carvão mineral da Termelétrica do Pecém", *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 24, n. 4, 2019. DOI: 10.1590/s1517-707620190004.0849.
- STOCK, C., GORAKHKI, M. H., BAREITHER, C. A., SCALIA, J. "Hydrologic Comparison of Prescriptive and Water Balance Covers", *Journal of Environmental Engineering (United States)*, v. 146, n. 7, 2020. DOI: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001733.



- THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical review*, v. 38, n. 1, p. 55–94, 1948.
- THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. The water balance. *OECD Observer*, v. 3, p. 101, 1955.
- TURNER, D. A., BEAVEN, R. P., WOODMAN, N. D. "Evaluating landfill aftercare strategies: A life cycle assessment approach", *Waste Management*, v. 63, p. 417–431, 2017. DOI: 10.1016/j.wasman.2016.12.005. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2016.12.005>.
- UDOH, F. D. "Evaluation of the hydraulic conductivity of cover systems for mineral waste capping projects", *Journal of Industrial Pollution Control*, v. 28, n. 1, p. 1–8, 2012.
- VERGARA, S. E., TCHOBANOGLOUS, G. *Municipal Solid Waste and the Environment: A Global Perspective*. [S.l.: s.n.], 2012. v. 37.
- WIDOMSKI, M. K., BROICHSITTER, S. B., ZINK, A., FLEIGE, H., HORN, R., STĘPNIEWSKI, W. "Numerical modeling of water balance for temporary landfill cover in North Germany", *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, v. 178, n. 3, p. 401–412, 2015. DOI: 10.1002/jpln.201400045.
- YESILLER, N., HANSON, J. L., RISKEN, J. L., BENSON, C. H., ABICHOU, T., DARIUS, J. B. "Hydration Fluid and Field Exposure Effects on Moisture-Suction Response of Geosynthetic Clay Liners", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 145, n. 4, 2019. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002011.
- ZHAN, L. T., WU, T., FENG, S., LAN, J. W., CHEN, Y. M. "A simple and rapid in situ method for measuring landfill gas emissions and methane oxidation rates in landfill covers", *Waste Management and Research*, v. 38, n. 5, p. 588–593, 2020. DOI: 10.1177/0734242X19893007. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0734242X19893007>.
- ZHAN, T. L. T., QIU, Q. W., XU, W. J. "Analytical solution for infiltration and deep percolation of rainwater into a monolithic cover subjected to different patterns of rainfall", *Computers and Geotechnics*, v. 77, p. 1–10, 2016. DOI: 10.1016/j.compgeo.2016.03.008

COMO CITAR ESTE TRABALHO

SILVEIRA, Rafaela. BRAGA, Risete. FERNANDES, Lindemberg. VALENTE, Thatianne. DA SILVA, Maria de Nazaré. *Percepções do Regime Hidrológico no Contexto de Aterro Sanitário na Amazonia*. *Revista Tamoios*, São Gonçalo, v. 21, n. 1, p. 302-321, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.12957/tamoios.2025.78719>. Acesso em: DDMMM.AAAA.