

RELAÇÕES EMPÍRICAS ENTRE CARACTERÍSTICAS DA CHUVA E RECARGA EPISÓDICA DA ÁGUA SUBTERRÂNEA NO AQUIFERO LIVRE DO CAMPUS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

GIOVANNI CHAVES PENNER⁽¹⁾

Professor Doutor na Faculdade e Programa de Pós Graduação (PPGESA) em Engenharia Sanitária e Ambiental Universidade Federal do Pará (UFPA).

ERLANO HÉLIO DE SOUZA E SILVA⁽²⁾

Formando em Engenharia Sanitária e Ambiental pela Universidade Federal do Pará (UFPA) e bolsista da Fundação Amparo e Desenvolvimento da Pesquisa (FADESP).

JOÃO GUSTAVO ROCHA⁽³⁾

Graduando de Engenharia Sanitária e Ambiental pela UFPA e bolsista da Fundação Amparo e Desenvolvimento da Pesquisa (FADESP).

NEYSON MARTINS MENDONÇA⁽⁴⁾

Professor Doutor na Faculdade e Programa de Pós Graduação (PPGESA) em Engenharia Sanitária e Ambiental Universidade Federal do Pará (UFPA).

MURILO CESAR LUCAS⁽⁵⁾

Professor Doutor na Universidade de Campinas (UNICAMP).

Endereço⁽¹⁾: Rua Augusto Corrêa, N°1 Guamá – Belém – Pará – Brasil, CEP: 66075-110, e-mail: erlano.silva@itec.ufpa.br

RESUMO

Este trabalho procura investigar e compreender as interações hidrogeológicas da região estudada por meio da realização de monitoramento sistemático e coleta de dados. A pesquisa visa contribuir para do diagnóstico das relações de chuva e recarga, tornando-o mais eficiente e preciso, para que possa otimizar a gestão hídrica na região, considerando as especificidades climáticas locais e os impactos na disponibilidade das águas subterrâneas. A metodologia adotada para este estudo incluiu o monitoramento contínuo dos níveis de água subterrânea no campus da Universidade Federal do Pará (UFPA), utilizando transdutores. Este monitoramento de alta resolução temporal foi essencial para capturar as rápidas variações nos níveis de água, especialmente em resposta as chuvas. Os dados de precipitação foram coletados pela estação meteorológica da UFPA, e, em conjunto com os níveis de água obtidos, foi aplicada a metodologia do *Episodic Master Recession* (EMR) para estimar a recarga episódica do aquífero, utilizando a relação entre as taxas de recarga e a precipitação, conhecida como *Recharge to Precipitation Ratios* (RPR). Além disso, foi realizado um estudo sobre a sazonalidade das precipitações, classificando os períodos chuvosos e menos chuvosos. Para estimar o rendimento específico do aquífero (S_y), foi utilizado um valor entre 0,094 e 0,106 determinado através de teste de bombeamento, correlacionando as variações no nível de água com os picos de precipitação. A análise estatística da relação entre as variáveis de precipitação e recarga foi realizada utilizando o coeficiente de correlação de Pearson, bem como mostrar o comportamento da medidade de ajuste (R^2), permitindo avaliar a intensidade e direção da relação linear entre tais variáveis. Os resultados mostraram que, em 2023, o período chuvoso foi de janeiro a junho, enquanto em 2024 foi de janeiro a maio. A análise dos níveis de água revelou que, no período chuvoso, a recarga do aquífero se torna perceptível a partir de 18 mm de precipitação, enquanto no período seco a precipitação necessária para a elevação significativa do nível foi de 29 mm. Observou-se também que chuvas de longa duração, especialmente com mais de 8 horas de duração, mostraram-se importantes para a recarga, permitindo maior tempo de infiltração. O estudo também destaca a importância de considerar a duração das chuvas na previsão da recarga.

Palavras-chave: Recarga do aquífero, Precipitação, Variação dos níveis, Monitoramento.

1. INTRODUÇÃO

A gestão das águas subterrâneas é um desafio global cada vez mais evidente, especialmente em um contexto de crescente demanda por recursos hídricos e de intensificação dos efeitos das mudanças climáticas. Em diversas regiões do mundo, a utilização dos aquíferos subterrâneos representa uma solução essencial para o abastecimento humano, industrial e agrícola, sobretudo em áreas com infraestrutura hídrica limitada ou com difícil acesso a fontes superficiais. Para tanto, é necessário compreender os processos de recarga e os fatores que influenciam a disponibilidade e a qualidade desses recursos é fundamental para a gestão sustentável (MANZIONE, 2015).

Nesse cenário, as águas subterrâneas desempenham uma função fundamental na Engenharia Sanitária e Ambiental, sendo essenciais para o fornecimento de água potável, especialmente em regiões com infraestrutura hídrica limitada (CAMPOS et al., 2023). No contexto brasileiro, a distribuição de água doce é notoriamente desigual, uma vez que o país concentra aproximadamente 13% de toda a água recurso hídrico do mundo. No entanto, essa abundância não se traduz em acessibilidade para grande parte da população, visto que cerca de 80% desse volume encontra-se na Região Hidrográfica Amazônica, que abriga apenas 5% da população nacional (ANA, 2013).

Na Amazônia, a utilização dos aquíferos livres é extremamente comum em razão da pouca profundidade em que essas águas se encontram, sendo fundamental para atender as demandas da população, mesmo com a existência de grande concentração de águas superficiais. Assim, o entendimento de como os aquíferos subterrâneos são abastecidos é de suma importância para a estabilização do ecossistema e manutenção do recurso para a população (DE BRITO et al., 2020). Em Belém, capital do estado do Pará, a recarga dos aquíferos que abastecem a cidade depende diretamente das variações climáticas inerentes ao comportamento das chuvas na região, em que é marcada por altos índices pluviométricos (MENEZES et al., 2015).

De forma geral, as águas subterrâneas são recarregadas principalmente por meio da infiltração da água da chuva, e compreender os efeitos da sua distribuição espacial e temporal pode ajudar a entender a influência da recarga pluviométrica dos aquíferos na disponibilidade hídrica para a população de locais tropicais (DE BRITO et al., 2020). Assim, ao se monitorar os níveis de água de tais bacias hidrográficas, é possível analisar a interferência de eventos extremos de precipitação no volume de água presente e o quanto tais ocorrências são determinantes na recarga episódica dos aquíferos e como podem afetar de maneira significativa os níveis da água subterrânea (ANDUALEM et al., 2021).

Para realizar tal monitorização, a utilização de transdutores para medir os níveis da água nos poços tem ganhado importância na coleta e processamento de dados, permitindo um monitoramento mais contínuo e detalhado dos aquíferos (TASHIE et al., 2016). Ao aliar a utilização de tais sensores a técnicas de tratamento dos dados coletado possibilita a análise mais precisa do comportamento dos reservatórios subterrâneos, o que contribui para a gestão e conservação do recurso hídrico (CASANOVA et al., 2016).

Todavia, mesmo com a utilização de recursos tecnológicos atuais, ainda existe desafios na análise dos dados coletados, entre eles uns dos mais importantes é a falta de integração entre informações provenientes de diferentes fontes. Dessa forma, fica evidente a necessidade de considerar as especificidades locais e os fatores regionais durante a análise, uma vez que os métodos empíricos podem sofrer variação de acordo com as características climáticas de cada região. Tal limitação ligada a adaptação dos dados restringe a capacidade de realizar previsões mais precisas, o que compromete a qualidade das projeções climáticas em escalas maiores (HUANG et al., 2020). Como forma de minimizar tal problema na análise, é necessário avançar nas metodologias de diagnóstico, com objetivo de integrar melhor os dados pluviométricos e as informações dos níveis da água subterrânea, para a finalidade de oferecer previsões mais acuradas sobre a disponibilidade hídrica (COLLISCHONN & DORNELLES, 2013).

Diante disso, o presente trabalho visa avaliar a importância das precipitações sazonais na Amazônia para a recarga do aquífero estudado. Também será discutido sobre os métodos empregados para a obtenção e correlação dos dados coletados, seguido da discussão sobre os resultados obtidos durante a pesquisa e suas implicações práticas. A pesquisa se propõe a responder questões relacionadas a recarga de aquíferos e à influência das chuvas sobre o nível e o armazenamento subterrânea, com vistas a fornecer subsídios para uma gestão hídrica mais eficiente e sustentável para a região.

2. OBJETIVOS

Analisar e quantificar as chuvas que ocorrem na área de estudo, identificando suas principais características (intensidade, duração, e padrões de precipitação) e como essas variáveis influenciam a recarga episódica do aquífero.

Desenvolver e aplicar modelos baseados na relação entre taxas de recarga e precipitação conhecida como Recharge to Precipitation Ratios (RPR) para integrar de forma eficaz dados hidrogeológicos, obtendo dados consistentes na modelagem da recarga de aquíferos.

Utilizar a correlação de Pearson para analisar a relação entre a precipitação e elevação de nível, considerando as influências sazonais presentes na região em questão. Especificamente, busca-se identificar e distinguir os padrões dessa correlação ao longo do ano, a fim de compreender como as flutuações na precipitação impactam o comportamento da elevação em cada período sazonal.

3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi realizado no campus da Universidade Federal do Pará (UFPA), localizado em Belém, capital do Estado do Pará. A cidade apresenta características geomorfológicas fluviais recentes, configurando um terreno parcialmente peninsular, com extensa área de várzea e bacias hidrográficas formadas por lagos, rios e igarapés, os quais atravessam tanto o ambiente urbano quanto o natural. A maioria desses cursos d'água foi retificada por canais, resultando em zonas de terra firme e áreas alagáveis que podem sofrer inundações sob a influência de marés ou em decorrência de precipitação pluvial (PMB, 2019). Possui sistema flúvio-estuarino complexo que inclui tanto porções continentais quanto insulares, contornadas por rios expressivos, como os Rios Guamá e Pará, além de diversos furos e igarapés (ANA, 2018). A cidade encontra-se sob a influência do clima equatorial quente e úmido, conforme a classificação de Köppen-Geiger, caracterizado por altas temperaturas, forte convecção, ar instável e elevada umidade (ANA, 2018).

Essa condição climática de Belém, marcada por precipitação anual superior a 2.500 mm (DIAS et al., 2021), contribui significativamente para a recarga dos aquíferos locais, processo essencial para a manutenção da reserva dos recursos hídricos subterrâneos na região. Estudos realizados em áreas com características semelhantes destacam a importância da recarga para garantir a sustentabilidade dos recursos hídricos subterrâneos (DE BRITO et al., 2020).

Atualmente, a Universidade Federal do Pará conta com um total de 12 poços de monitoramento instalados em sua área. Para tanto, selecionou-se o poço com série de dados mais completa. Todos os poços são equipados com transdutores para acompanhamento contínuo das variações dos níveis, processo descrito em estudos como o de ALLOCCA et al. (2015), que evidenciam a importância para a avaliação de recarga em ambientes cársticos.

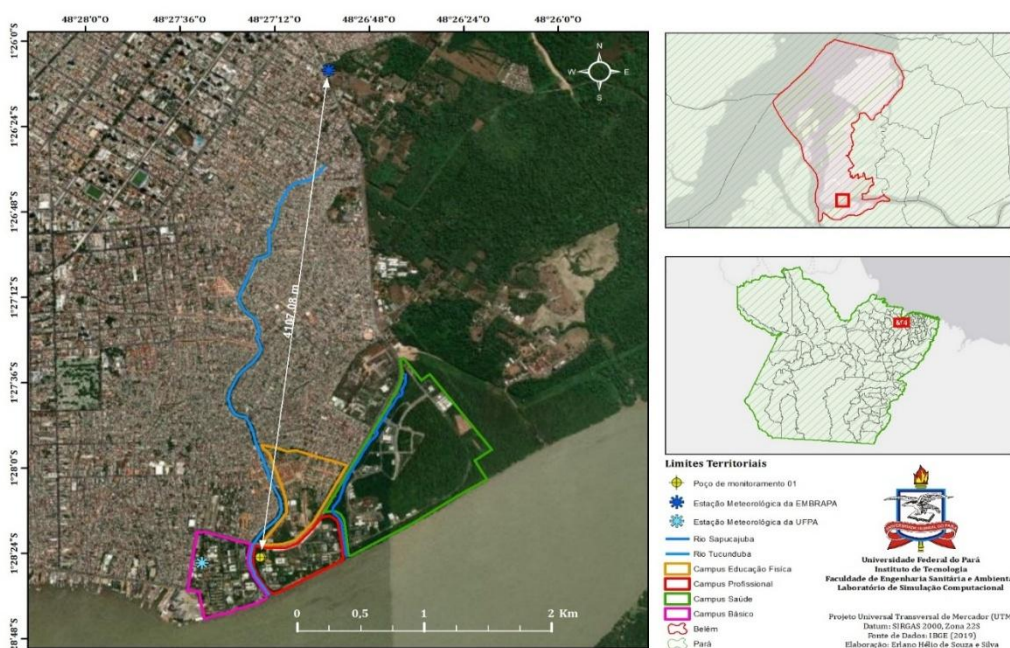


Figura 1: Área da Universidade Federal do Pará e seus campus.

4. METODOLOGIA UTILIZADA

4.1. Monitoramento hidrológico

A monitorização contínua dos níveis de água subterrânea foi realizada no campus da Universidade Federal do Pará (UFPA) ao longo do período de janeiro de 2023 a dezembro de 2024 com a intenção de para avaliar a recarga episódica do aquífero livre local e entender a interação entre precipitação e a resposta do aquífero da área de interesse nos períodos chuvoso e menos chuvoso. Para tanto foram utilizados transdutores programados para registrar os níveis de água a cada 15 minutos (Figura 2), com o intuito de garantir alta resolução temporal, que é essencial para capturar as variações rápidas nos níveis de água subterrânea (ANDUALEM et al., 2021).



Figura 2: Aparelho transdutor utilizado.



Figura 3: Poço de monitoramento.

Além da coleta de dados de nível de água feita através do programa InterfaceDLSM3v141.exe (Figura 4) que é fornecido pela fabricante, também foi realizada a compensação barométrica para corrigir os valores obtidos pelos transdutores, que, por estarem submersos no aquífero, podem ser afetados por variações da pressão atmosférica, eliminando os efeitos das flutuações da pressão atmosférica sobre as medições.

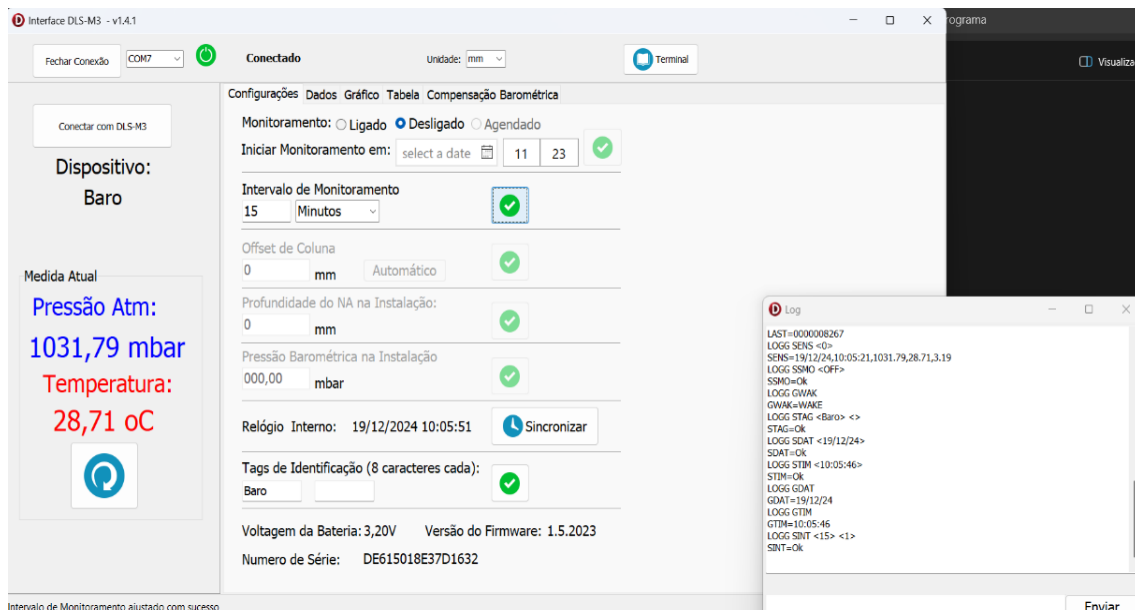


Figura 4: Programa InterfaceDLSM3v141.exe.

A compensação foi essencial para garantir que os dados coletados representassem fielmente a variação dos níveis de água subterrânea, eliminando os efeitos das flutuações de pressão atmosférica sobre as medições dos transdutores (CASANOVA et al., 2016).

Sendo assim, o monitoramento contínuo dos níveis de água subterrânea, aliado a medições da precipitação realizadas pela estação meteorológica da UFPA, forneceu dados cruciais para a estimativa da recarga episódica do aquífero, conforme a metodologia do Episodic Master Recession (EMR). O método EMR foi adaptado para o contexto local, utilizando os dados de variação do nível da água medidos pelos transdutores de precipitação fornecido pela estação meteorológica para identificar os episódios de recarga e calcular as taxas de recarga (GR) e a relação de recarga para precipitação (RPR) (TASHIE et al., 2016). Esse método tem se mostrado eficaz na quantificação de recarga, especialmente em aquíferos que apresentam uma recarga episódica em resposta a eventos de precipitação intensa (SOLIMAN et al., 2024).

4.2. Sazonalidade das precipitações

Os dados pluviométricos utilizados nesta pesquisa foram obtidos por meio de duas fontes principais.

A primeira fonte foi a Estação Meteorológica da Universidade Federal do Pará (UFPA), que forneceu informações sobre a dinâmica das chuvas, e posteriormente, refletindo na análise dos impactos no aumento dos níveis de água na área estudada. A escolha dessa estação se deu pela proximidade com os poços monitorados, permitindo uma análise detalhada da região.

A segunda fonte foi a Estação da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), que foi selecionada devido à sua longa série histórica de dados, analisada em uma janela temporal de 10 anos, a qual foi fundamental para a determinação da mediana pluviométrica e o comportamento climático da área de estudo. A partir da mediana dos anos em foco, os meses foram classificados como "chuvosos" quando os valores de precipitação estavam acima da mediana e "menos chuvosos" quando apresentavam valores abaixo dessa referência.

4.3. Estimativa de recarga

Para estimar a recarga do aquífero livre da UFPA, foi aplicada a fórmula de Variação do Nível de Água (VNA), conforme descrito por Healy e Cook (2002), que utiliza a variação do nível da água em poços de monitoramento para determinar a quantidade de água recarregada no aquífero em resposta à precipitação. A fórmula de VNA utilizada neste estudo é expressa por:

$$R = Sy \frac{\Delta h}{\Delta t}$$

A aplicação dessa fórmula é particularmente útil em regiões com flutuações significativas nos níveis freáticos, como na Amazônia, onde as chuvas são frequentes e intensas, o que gera variações rápidas no nível da água (SOLIMAN et al., 2024).

4.3.1. Estimativa sy

No estudo realizado por PENNER et al. (2023), a estimativa de recarga de águas subterrâneas, e o rendimento específico (Sy), desempenham um papel crucial na determinação da dinâmica da água no subsolo. De acordo com os dados apresentados, a recarga total estimada para o período em questão foi de 1.078,9 mm, com uma incerteza de 129,5 mm, correspondendo a uma fração significativa da precipitação registrada, variando entre 33,9% e 39,8% da precipitação total (PENNER et al., 2023). No estudo anteriormente mencionado o rendimento específico calculado (teste de bombeamento e recuperação) variou entre 0,094 e 0,106.

4.4. Correlação de pearson

A correlação de Pearson, também conhecida como coeficiente de correlação linear de Pearson, é uma medida estatística utilizada para avaliar a intensidade e a direção da relação linear entre duas variáveis contínuas. A fórmula matemática do coeficiente de correlação de Pearson é dada por:

$$\rho = \frac{\sum i (x_i - \bar{x}) * (y_i - \bar{y})}{\sqrt{(\sum i (x_i - \bar{x})^2 * \sum i (y_i - \bar{y})^2)}}$$

O numerador calcula o produto das diferenças entre os valores e suas respectivas médias, enquanto o denominador normaliza o cálculo, considerando a variabilidade individual de cada variável. Sendo utilizada para visualização numérica dos eventos para cada período.

Essa medida ajuda a entender como duas variáveis estão relacionadas, indicando se existe uma tendência direta ou inversa entre elas e quão forte essa relação é. O valor do coeficiente de correlação de Pearson varia entre -1 e 1: um valor de +1 indica uma correlação perfeita positiva, ou seja, quando uma variável aumenta, a outra também aumenta de forma proporcional; um valor de -1 indica uma correlação perfeita negativa, ou seja, quando uma variável aumenta, a outra diminui de forma proporcional; e um valor de 0 indica que não há relação linear entre as variáveis. Para tornar a interpretação mais clara, foi destacado o resultado conforme apresentado abaixo:

Valor de ρ (+ ou -)	Interpretação
0,00 a 0,19	Uma correlação bem fraca
0,20 a 0,39	Uma correlação fraca
0,40 a 0,69	Uma correlação moderada
0,70 a 0,89	Uma correlação forte
0,90 a 1,00	Uma correlação muito forte

Tabela 1: Resultado do coeficiente de correlação de Pearson.

A aplicação do coeficiente de correlação de Pearson é amplamente utilizada em diversos campos da ciência para avaliar a relação entre variáveis contínuas, sendo uma ferramenta fundamental em análises estatísticas e hidrológicas (CAMPOS & GALVÃO, 2023).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Sazonalidade das precipitações

No primeiro momento da análise foram investigadas as precipitações pluviométricas na região da Universidade Federal do Estado do Pará. Os resultados indicaram que, em 2023, o período chuvoso abrangeu os meses de janeiro a junho, enquanto em 2024 esse intervalo foi de janeiro a maio. Por outro lado, o período caracterizado por precipitações abaixo da mediana do período de interesse, configurando o período menos chuvoso, foi de julho a dezembro em 2023, e de junho a novembro em 2024. A mediana anual de precipitação foi de 235,0 mm. A seguir, apresento o gráfico (Figura 5) que ilustra essas variações ao longo dos anos analisados.

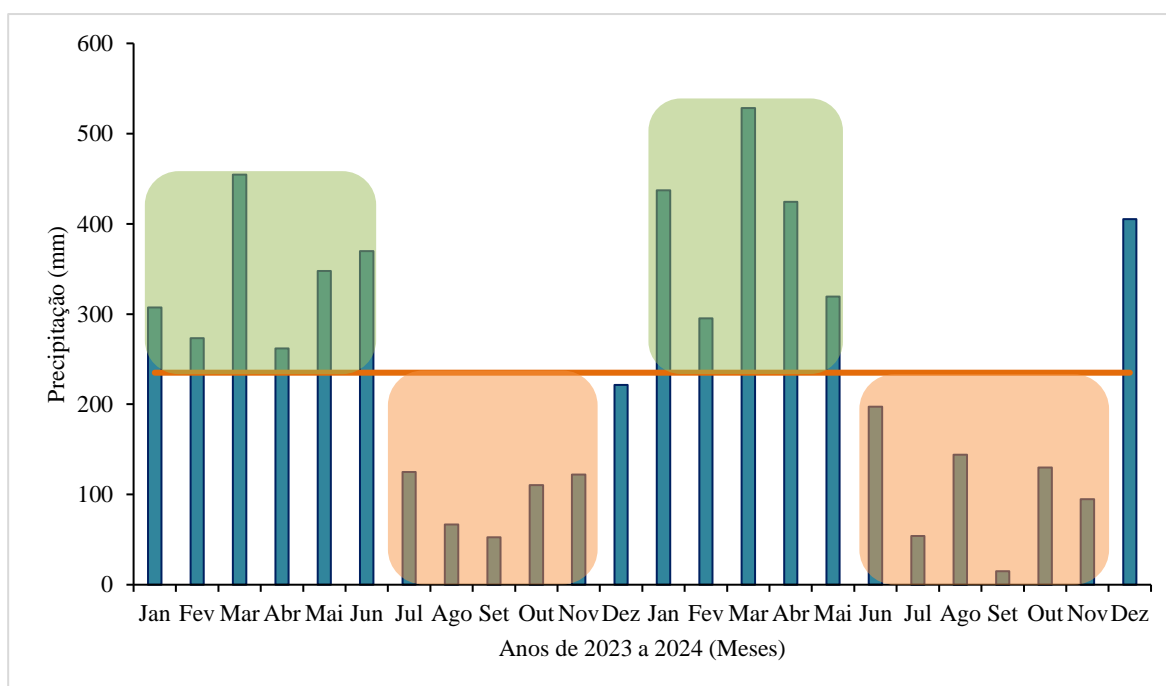


Figura 5: Gráfico das precipitações mensais e seus períodos de chuva.

Levando em conta o critério definido anteriormente para a demarcação dos períodos, identificamos os intervalos com maior volume de chuva em verde, enquanto os períodos com menores chuvas em vermelho.

5.2. Recarga episódica

Inicialmente os dados foram organizados para definir um valor de referência de altura precipitada que provoca elevação do nível de água no aquífero, para o período chuvoso e menos chuvoso, tais alturas foram 14 mm e 16 mm, respectivamente. Isto é, a partir destas alturas precipitadas todas as elevações de níveis observadas foram consideradas no estudo, incluindo o tempo de duração da chuva até sua interrupção, bem como o tempo de elevação dos níveis, conforme ilustrado na Tabela 2 a seguir.

Episódios	Data (dia/mês/ano)	Precipitação (mm)	Duração da chuva (h)	Elevação de nível (mm)	Duração da elevação (h)
1	27/01/2023	18,4	2	45	4
2	28/01/2023	43,8	5	67	5
3	29/01/2023	33	5	63	5
4	31/01/2023	51	5	92	4
5	11/02/2023	36	4	87	5
6	14/02/2023	18,4	6	64	7
7	15/02/2023	28,4	5	72	8
8	16/02/2023	19,8	4	37	8
9	20/02/2023	22,2	7	95	9
10	28/02/2023	15,4	2	33	5
11	03/03/2023	31,4	8	90	9
12	04/03/2023	16,8	8	133	10
13	05/03/2023	14,4	3	28	7
14	13/03/2023	17,6	6	38	7
15	14/03/2023	66,2	9	125	9
16	17/03/2023	24,2	7	126	10
17	17/03/2023	18,2	5	80	7
18	21/03/2023	36	4	83	8
19	24/03/2023	17,4	8	49	9
20	25/03/2023	16,2	5	81	6
21	27/03/2023	55,2	5	100	7
22	28/03/2023	15,8	6	73	8
23	30/03/2023	15,6	3	57	4
24	31/03/2023	22,2	3	67	6
25	02/04/2023	24,6	5	97	7
26	09/04/2023	35,6	12	219	13
27	18/04/2023	17,8	3	113	6
28	22/04/2023	16,2	4	68	7
29	25/04/2023	14,6	1	6	3
30	29/04/2023	29,4	7	62	9
31	01/05/2023	18,4	3	69	5
32	11/05/2023	54,6	3	27	5
33	16/05/2023	26,2	1	5	3
34	18/05/2023	22,6	7	124	10
35	19/05/2023	24,8	2	66	5
36	26/05/2023	45,6	3	89	5
37	27/05/2023	31	5	40	5
38	02/06/2023	31,2	6	115	9
39	09/06/2023	16,4	2	36	4
40	12/06/2023	36,4	1	25	4
41	17/06/2023	83,8	5	121	6
42	19/06/2023	15,4	6	48	8
43	20/06/2023	34	3	23	4

44	30/06/2023	92,6	3	94	5
45	08/08/2023	27,8	2	7	2
46	16/10/2023	16,0	8	5	10
47	18/10/2023	45,6	2	8	3
48	03/11/2023	32,8	2	6	2
49	06/01/2024	67,4	11	226	11
50	11/01/2024	19,8	1	76	3
51	14/01/2024	33,2	4	114	7
52	18/01/2024	28,6	2	74	5
53	24/01/2024	24,4	6	86	9
54	25/01/2024	21,2	5	125	8
55	29/01/2024	45,6	6	165	8
56	02/02/2024	24,4	2	37	3
57	02/02/2024	17,2	5	76	7
58	06/02/2024	22,6	2	48	3
59	09/02/2024	33,8	4	111	7
60	18/02/2024	37,4	8	125	9
61	23/02/2024	21,8	7	106	8
62	27/02/2024	27	7	133	8
63	07/04/2024	21,8	1	103	5
64	10/04/2024	37,6	6	139	9
65	14/04/2024	41,8	10	64	10
66	16/04/2024	35,6	7	53	7
67	17/04/2024	14,2	3	35	3
68	20/04/2024	39,2	5	109	6
69	25/04/2024	33,2	9	150	10
70	27/04/2024	20,2	6	99	9
71	29/04/2024	19,6	1	5	2
72	07/05/2024	17,6	5	98	8
73	08/05/2024	14	2	66	4
74	09/05/2024	16	3	75	5
75	10/05/2024	34,4	2	83	6
76	13/05/2024	27	2	51	3
77	22/05/2024	19	3	38	4
78	20/06/2024	19,0	2	10	4
79	24/06/2024	16,8	7	36	9
80	04/07/2024	32,6	2	32	3
81	19/08/2024	40,6	3	17	4
82	26/08/2024	32,0	2	14	2
83	27/08/2024	36,0	1	5	1
84	14/10/2024	38,0	1	4	2
85	15/10/2024	22,0	1	2	2
86	17/10/2024	18,0	1	1	1
87	21/11/2024	28,4	2	3	2
89	30/11/2024	26,2	5	36	5

Tabela 2: Registro de todas as elevações que foram analisadas.

Da mesma forma, os resultados evidenciam que, durante o período de maior intensidade pluviométrica, a recarga do aquífero ocorre de maneira mais eficiente, caracterizando-se por variações no nível de água sendo mais acentuadas, como observado por SOLIMAN et al. (2024). Em contraste, nos períodos menos chuvosos, os efeitos da precipitação sobre o nível de água subterrânea são mais sutis, o que pode ser explicado pelo direcionamento desta água para a manutenção da umidade do solo e para processos de evapotranspiração, reduzindo assim a recarga do aquífero.

Na Figura 6 estão representados graficamente os resultados de todas as alturas precipitadas e suas respectivas elevações nos níveis de água dos poços selecionados.

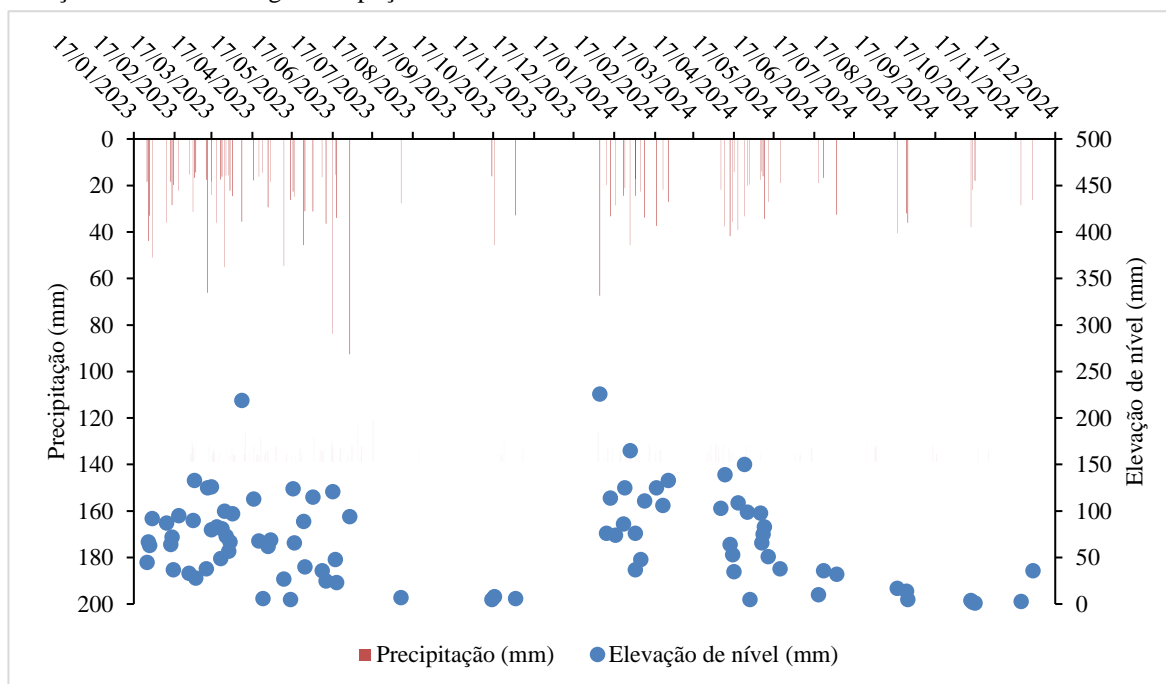


Figura 6: Representação das precipitações com as respectivas elevações dos níveis da água.

Durante os períodos chuvosos observados no início dos anos de 2024 e 2023, constatou-se um aumento significativo na frequência e na intensidade dos eventos pluviométricos, os quais exerceram um impacto direto e positivo na elevação dos níveis do aquífero local. É pertinente ressaltar que a elevação do nível do aquífero durante esses períodos reflete não apenas a quantidade de precipitação, mas também a distribuição temporal e espacial das chuvas, que possibilitam a infiltração adequada no solo e a recarga eficiente das camadas aquíferas. Esse fenômeno contrapõe-se de maneira clara ao comportamento registrado nos períodos menos chuvosos, nos quais a redução na ocorrência de chuvas limitou significativamente a recuperação dos níveis hídricos, resultando em períodos de maior estabilidade ou até declínio gradual do volume armazenado no aquífero.

Portanto, a análise comparativa entre os períodos chuvosos e menos chuvosos permite inferir que a dinâmica de recarga do aquífero está intrinsecamente relacionada às variações sazonais das precipitações. A ausência de precipitações volumosas compromete diretamente a reposição hídrica, conforme observado em estudos realizados na Bacia Hidrográfica do Tucunduba, Belém/PA (DE ANDRADE CRISTO e LUZ, 2014).

Além disso, a variabilidade climática ao longo das últimas décadas tem impactado significativamente a recarga hídrica, como apontado por estudos realizados no Estado do Pará, que indicam tendências de intensificação das chuvas e de eventos extremos (LIRA, 2021).

5.3. Análise gráfica da relação entre precipitação e elevação do nível real do aquífero

A relação entre a precipitação e a elevação do nível dos aquíferos foi visualizada por meio de um gráfico, que exibe a relação linear entre essas duas variáveis, com base na fórmula da função linear $y = ax + b$, onde “x” representa a elevação do nível e “y” representa a precipitação.

Nas Figuras 7 e 8 são representadas as correlações entre as precipitações e as variações no nível do aquífero, com destaque para as duas tendências para os períodos chuvoso e menos chuvoso.

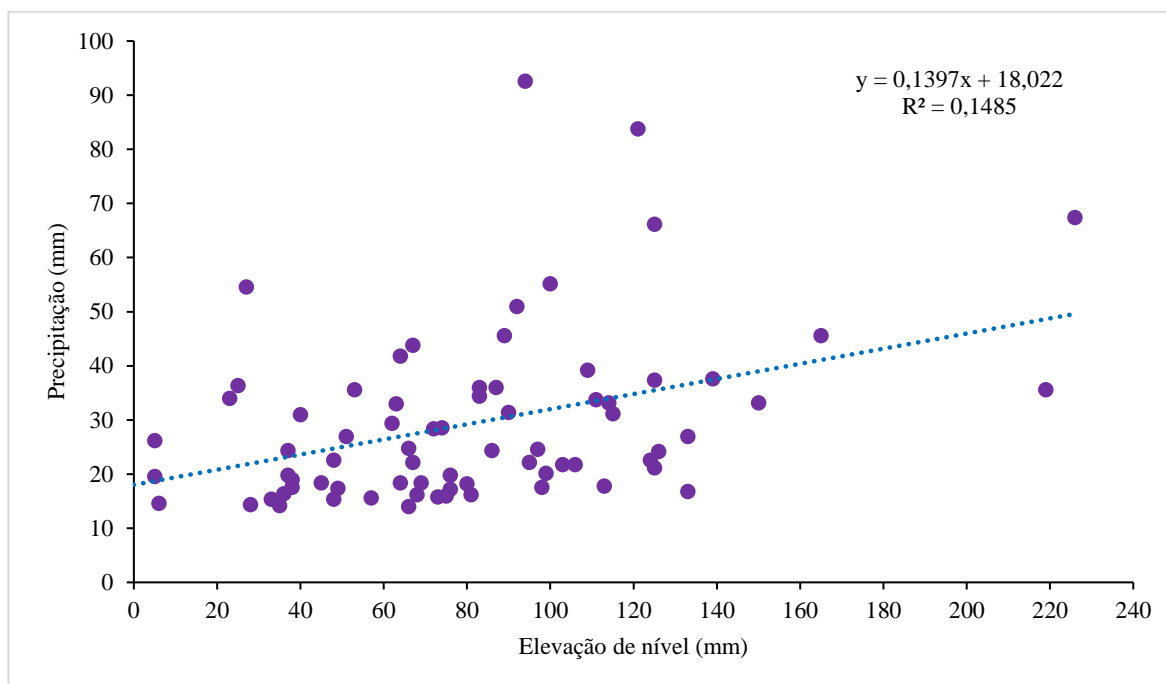


Figura 7: Relação das precipitações com a elevação de nível efetivo para o período chuvoso.

Pela Figura 7 percebe-se claramente que a função linear é capaz de representar bem a correlação obtida pelo coeficiente de Pearson. Para o período chuvoso, a correlação é de 0,40, a elevação do nível real do aquífero começa a se intensificar de forma significativa quando a precipitação atinge aproximadamente 18 mm. Esse ponto indica que, a partir dessa quantidade de precipitação, a recarga dos aquíferos se torna mais perceptível, e a elevação do nível do aquífero segue uma tendência crescente e linear, conforme esperado.

Para o período menos chuvoso, Figura 8, é necessária uma altura precipitada maior que a da situação anterior, para iniciar um aumento perceptível nos níveis dos aquíferos. A altura precipitada de 29 mm se configura como o ponto de mudança, a partir do qual se observa uma elevação quantificável no nível real do aquífero, embora a correlação tenha sido próxima de zero nesse período (coeficiente de -0,02).

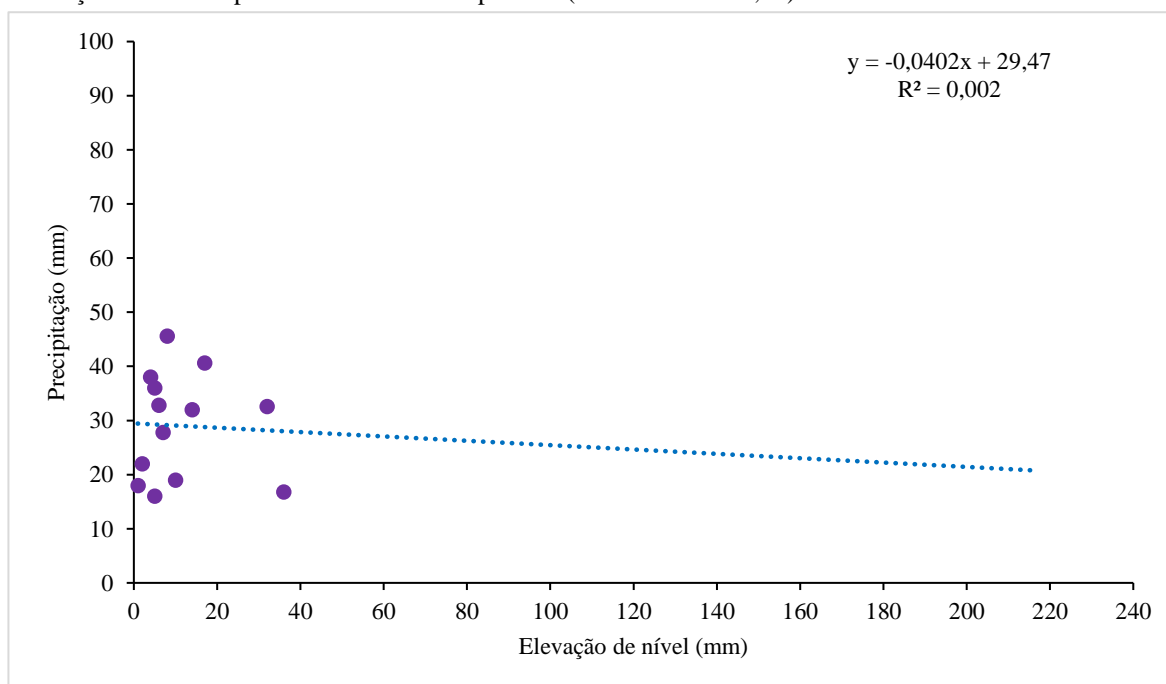


Figura 8: Relação das precipitações com a elevação de nível efetivo para o período menos chuvoso.

A tendência representada pela linha tracejada em azul na Figura 8 sugere que, uma vez atingida essa altura precipitada, a elevação dos níveis sempre ocorrerá, ainda que de forma modesta. Esse comportamento indica que a recuperação dos aquíferos em períodos secos não depende exclusivamente da intensidade da chuva, mas de sua persistência ao longo do tempo. Estudos com o de VALDIVIELSO et al. (2022) que caracterizaram a precipitação e a recarga no aquífero periférico do Salar de Atacama, evidenciando que a manutenção dos níveis aquíferos depende não apenas da quantidade de água precipitada, mas também da continuidade dos eventos pluviométricos.

Por outro lado, se for considerado todo período com dados observados entre os anos de 2023 e 2024, ver Figura 9, constata-se que a elevação do nível do aquífero começa a se intensificar de forma significativa quando a altura precipitada atinge cerca de 22 mm. O coeficiente de correlação de Pearson, calculado para essa relação, foi de 0,32, o que indica uma correlação fraca entre a precipitação e a resposta do nível do aquífero. Esse valor sugere que o efeito é fraco para estabelecer uma relação clara e direta entre as duas variáveis.

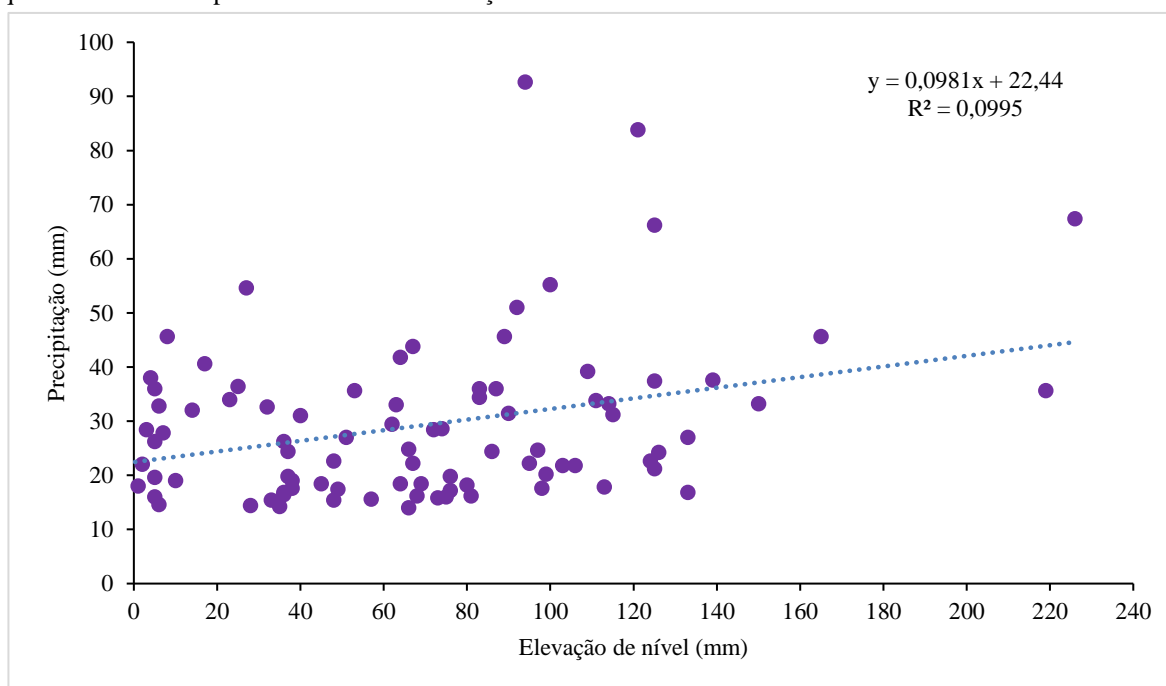


Figura 9: Relação das precipitações com a elevação de nível efetivo para todo o período considerado.

Vale ressaltar que apesar da correlação fraca observados pelos resultados da Figura 8 certamente possui outros fatores que atuam no processo de elevação dos níveis da água no aquífero livre provocada pela precipitação que poderão ser levados em conta em trabalhos futuros, como por exemplo, a durações dos eventos de precipitação, saturação do solo, evapotranspiração, dentro outros. Essa perspectiva encontra ressonância nos estudos realizados por MARTELLI et al. (2012), que monitoraram flutuações nos níveis de água em aquíferos freáticos do Sistema Aquífero Guarani, observando que as recargas são influenciadas não apenas pela precipitação direta, mas também pela capacidade de retenção e pelo tempo de saturação do solo.

5.3.1 Influência de chuvas de longa duração

Um fator relevante a ser considerado nos resultados obtidos é a ocorrência de chuvas de longa duração durante o período chuvoso. Nessas ocasiões, observa-se que as elevações dos níveis dos aquíferos tendem a ser mais acentuadas, influenciando diretamente o comportamento geral da recarga. Isso ocorre porque as chuvas contínuas e persistentes, especialmente aquelas que se estendem por um período superior a 8 horas, proporcionam um intervalo maior para o processo de infiltração, resultando em uma recarga mais prolongada e expressiva dos aquíferos.

Essa observação conduz à hipótese de que a elevação dos níveis do aquífero durante o período menos chuvoso não depende exclusivamente da intensidade ou da quantidade de precipitação acumulada, mas também da duração dos eventos pluviométricos. Estudos prévios, como o de GENARO E CUNHA (2023), destacam que a recarga das águas subterrâneas monitoradas pela Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas (RIMAS) está fortemente relacionada à variabilidade temporal das chuvas, indicando que eventos prolongados, ainda que moderados, podem resultar em uma recuperação significativa dos níveis freáticos.

5.3.2. Interação entre os corpos hídricos superficiais e o meio subterrâneo

Adicionalmente, a interação entre os corpos hídricos superficiais e o meio subterrâneo exerce papel determinante nesse processo, sobretudo em regiões com forte influência da dinâmica fluvial, como ocorre em Belém/PA. Durante a estação chuvosa, o aumento dos níveis dos rios reduz o gradiente hidráulico entre o curso d'água e os aquíferos adjacentes, favorecendo o acúmulo de água no meio subterrâneo e potencializando os processos de recarga (ANA, 2018). Já nos períodos de estiagem ou menor intensidade pluviométrica, a redução do nível dos rios inverte esse gradiente, promovendo a drenagem da água subterrânea em direção ao leito fluvial, o que reduz a visualização da recarga e pode até provocar quedas nos níveis freáticos (CAMPOS E GALVÃO, 2023). Essa oscilação sazonal é também discutida por ANDUALEM et al. (2021), que reforçam a importância de considerar tanto os fluxos verticais quanto os horizontais no balanço hídrico subterrâneo, principalmente em áreas urbanas onde a alteração da paisagem intensifica o escoamento superficial e compromete a infiltração natural.

Portanto, a análise da recarga deve se incorporar a variabilidade temporal das chuvas, a duração dos eventos e a interação dinâmica entre águas superficiais e subterrâneas. Tal abordagem é fundamental para compreender as respostas hidrodinâmicas dos aquíferos frente a diferentes regimes hidrológicos.

6. CONCLUSÃO

Os resultados deste estudo representam um avanço significativo na aplicação e validação do método do Episodic Master Recession para a quantificação da recarga episódica de aquíferos. O método em um novo contexto hidrogeológico, um aquífero livre heterogêneo localizado no campus da Universidade Federal do Pará, amplia as aplicações anteriores do método, que em sua maioria foram realizadas em contextos hidrogeológicos mais homogêneos, apresentando assim uma contribuição relevante para o uso em regiões com heterogeneidades no subsolo.

O trabalho evidenciou a existência de dois períodos distintos associados as elevações dos níveis d'água, isto é, no período chuvoso precipitações acima de 18 mm são suficientes para provocar as respectivas elevações, por outro lado, para o período menos chuvoso são necessárias precipitações acima de 29 mm para o mesmo fim. Outro ponto a se destacar é que houve correlação positiva entre as precipitações e respectivas elevações de níveis para o período chuvoso, e correlação praticamente nula para o período menos chuvoso.

Os resultados encontrados reforçam a necessidade em quantificar processos de recarga em escalas locais e episódicas em área equatorial, como o estado do Pará. Assim como, a análise revelou uma relação significativa entre precipitação e recarga durante os períodos chuvosos, embora com correlações variáveis em função da sazonalidade. Essas descobertas oferecem novas perspectivas sobre as taxas de recarga (RPR) de parâmetros hidrológicos básicos, como precipitação e armazenamento da água no subsolo, sugerindo que a utilização desses dados pode ser uma ferramenta poderosa para o gerenciamento sustentável dos recursos hídricos subterrâneos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. Estudos hidrogeológicos para a gestão das águas subterrâneas da região de Belém/PA: Relatório Final – Volume 2 (TOMO I: resultados em hidrogeologia). Brasília: ANA, 2018.
- ALLOCCA, Vincenzo et al. Groundwater recharge assessment at local and episodic scale in a soil mantled perched karst aquifer in southern Italy. *Journal of Hydrology*, v. 529, p. 843-853, 2015.
- ANDUALEM, Tesfa Gebrie et al. Groundwater recharge estimation using empirical methods from rainfall and streamflow records. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, v. 37, 2021.
- CAMPOS, José Eloi; GALVÃO, Manuela Freire. Bacias hidrogeológicas: conceitos e aplicações. Derbyana, v. 44, 2023.
- CAMPOS, Thamiris Luisa de Oliveira Brandão; MOTA, Maria Aurora Santos da; SANTOS, Sergio Rodrigo Quadros dos. Eventos extremos de precipitação em Belém-PA: uma revisão de notícias históricas de jornais. *Revista Ambiente & Água*, v. 10, n. 1, p. 182-194, 2015.
- CARDOSO, FABRICIO BUENO DA FONSECA, et al. Mapa das áreas aflorantes dos aquíferos e sistemas aquíferos do Brasil. *Águas Subterrâneas*, 2012.
- CASANOVA, Joël; DEVAU, Nicolas; PETTENATI, Marie. Managed aquifer recharge: an overview of issues and options. *Integrated groundwater management: Concepts, approaches and challenges*, p. 413-434, 2016.
- COLLISCHONN, Walter; DORNELLES, Fernando. Hidrologia para engenharia e ciências ambientais. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), v. 336, 2013.
- DE ALBUQUERQUE, Monik Fernandes et al. Precipitação nas mesorregiões do estado do Pará: climatologia, variabilidade e tendências nas últimas décadas (1978-2008). *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 6, 2010.
- DE ALMEIDA, Fabíola Magalhães et al. Qualidade das águas subterrâneas do sistema aquífero Barreiras na bacia hidrográfica do Tucunduba-Belém/PA. *Águas Subterrâneas*, 2004.
- DE ALMEIDA, Isabel Kaufmann et al. Estimativa de tempo de concentração em bacia hidrográfica. 2013.
- DE ANDRADE CRISTO¹, Laís; LUZ, Luziane Mesquita. Morfologia e uso do solo na Bacia Urbana do Tucunduba, Belém/PA. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 7, n. 03, p. 466-475, 2014.
- DE BRITO, Alderlene Pimentel et al. Relação entre precipitação e recarga de águas subterrâneas na Amazônia Central. *Águas Subterrâneas*, v. 34, n. 1, p. 39-49, 2020.
- DE METADADOS, ANA Sistemas Aquíferos-Catálogo. da Agência Nacional de Água e Saneamento Básico-Sistemas Aquíferos do Brasil, em escala 1: 1.000. 000. Gerência de Águas Subterrânea, 2013.
- DIAS, Éverton Costa et al. Metropolitan region of Belém-PA Brazil a comparative determination of average annual precipitation. 2021.
- GENARO, Daniele Tokunaga; CUNHA, Viviane. Avaliação das recargas de águas subterrâneas nos aquíferos acompanhados pela Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas–RIMAS. Serviço Geológico do Brasil-CPRM, 2023.
- HUANG, Tianming et al. How does precipitation recharge groundwater in loess aquifers? Evidence from multiple environmental tracers. *Journal of Hydrology*, v. 583, p. 124532, 2020.
- LIRA, B. R. P. Avaliação do Comportamento e da Tendência Pluviométrica na Amazônia Legal no Período de 1986 a 2015. (2019). 2021. Tese de Doutorado. Dissertação de Mestrado). Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará–UFPA, Belém, PA, Brasil.
- LISBOA, Rose Suellen. Guia de elaboração de trabalhos acadêmicos. Belém: Universidade federal do Pará, biblioteca central, 2023.
- MANZIONE, Rodrigo Lilla. Águas Subterrâneas: Conceitos e Aplicações sob uma Visão Multidisciplinar. Jundiaí, Paco Editorial, 2015.
- MARTELLI, Guilherme Viana et al. Monitoramento da flutuação dos níveis de água em aquíferos freáticos para avaliação do potencial de recarga em área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani em Cacequi-RS.

2012.

MENEZES, Franciane Pantoja; FERNANDES, Lindemberg Lima; ROCHA, Edson José Paulino. O uso da estatística para regionalização da precipitação no Estado do Pará, Brasil. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 16, 2015.

MUSHTAHA, Ashraf M.; VAN CAMP, Marc; WALRAEVEENS, Kristine. Quantification of recharge and runoff from rainfall using new GIS tool: Example of the Gaza Strip Aquifer. *Water*, v. 11, n. 1, p. 84, 2019.

PANTHI, Jeeban et al. Time-Lapse Geophysical Measurements for Monitoring Coastal Groundwater Dynamics in an Unconfined Aquifer. *Groundwater*, v. 62, n. 4, p. 513-526, 2024.

PENNER, Giovanni Chaves et al. Uncertainty in groundwater recharge estimation using groundwater level fluctuation and aquifer test. *RBRH*, v. 28, p. e11, 2023.

PARANHOS, Ranulfo et al. Desvendando os mistérios do coeficiente de correlação de Pearson: o retorno. *Leviathan (São Paulo)*, n. 8, 2014.

PREFEITURA MUNICIPAL DE BELÉM – PMB. Anuário Estatístico do Município de Belém - 2019.

SOLIMAN, Karim Mohamed Ahmed et al. Estimating natural groundwater recharge taking into consideration temporal and spatial variability for arid unconfined aquifer. *Water Science*, v. 38, n. 1, p. 359-377, 2024.

STEPHAN, Raya Marina; NICKUM, James E.; WESTER, Philippus (Ed.). *Groundwater: recent advances in interdisciplinary knowledge*. 2023.

TARGA, Marcelo dos Santos et al. Urbanização e escoamento superficial na bacia hidrográfica do Igarapé Tucunduba, Belém, PA, Brasil. *Revista Ambiente & Água*, v. 7, p. 120-142, 2012.

TASHIE, Arik M.; MIRUS, Benjamin B.; PAVELSKY, Tamlin M. Identifying long-term empirical relationships between storm characteristics and episodic groundwater recharge. *Water Resources Research*, v. 52, n. 1, p. 21-35, 2016.

VALDIVIELSO, Sonia et al. Characterization of precipitation and recharge in the peripheral aquifer of the Salar de Atacama. *Science of The Total Environment*, v. 806, p. 150271, 2022.

ZHONG, Wei et al. Effect of different areal precipitation estimation methods on the accuracy of a reservoir runoff inflow forecast model. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, 2018. p. 012043.