

Mapeamento temático de exploração do aquífero Alter do Chão na área urbana de Santarém/PA

Thematic mapping of water extraction from the Alter do Chão Aquifer in the urban area of Santarém, PA

Daniela Roque de Oliveira ¹, Armando Carlos de Pina Filho ²,
Fernanda Souza do Nascimento ³

¹Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – Brasil, danielaoliveira@poli.ufrj.br

²Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – Brasil, armando@poli.ufrj.br

³Universidade Federal do Oeste do Pará, Pará – Brasil, fernanda.nascimento@ufopa.edu.br

Recebido:

18 de agosto de 2025

Recebido no formato de revisão:

19 de novembro de 2025

Aceito:

02 de dezembro de 2025

Disponível online:

20 de fevereiro de 2026

Seção:

Artigos

Palavras-chave:

Geoprocessamento.
Recursos hídricos.
Águas Subterrâneas.
Análise multicritério.
Sustentabilidade hídrica.

Keywords:

Geoprocessing.
Water Resources.
Groundwater.
Multicriteria Analysis.
Water Sustainability.

<https://doi.org/10.14295/ras.v40i1.30351>



RESUMO

O presente estudo justifica-se pela crescente pressão da urbanização sobre o Aquífero Alter do Chão (AAC) em Santarém/PA, tornando imperativo conhecer seu estado de exploração para uma gestão sustentável. A metodologia consistiu em uma análise espacial multicritério, utilizando o Processo de Hierarquia Analítica (AHP) para ponderar dados de Vazão específica, Nível estático e tipo de aquífero, obtidos de 212 poços cadastrados no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS). Os resultados apontaram o Nível estático como o fator de maior peso (64,3%) e revelaram uma setorização da exploração diretamente ligada à densidade urbana. As áreas foram classificadas em quatro condições: "crítica" no aquífero livre do centro urbano (16,03% da área), "preocupante" no aquífero semi-livre adjacente (23,77%), "favorável" no semi-confinado (37,78%) e "ótima" no confinado (22,42%), localizado em bairros mais afastados. Conclui-se que a sustentabilidade hídrica não é homogênea, havendo um estresse hídrico no núcleo urbano que demanda políticas públicas urgentes, como o controle da perfuração de poços e a fiscalização, enquanto as áreas periféricas, em melhor condição, necessitam de um planejamento que assegure a exploração sustentável a longo prazo. Os resultados desta pesquisa constituem uma ferramenta essencial para o planejamento urbano, evidenciando a necessidade de políticas de gestão hídrica direcionadas para cada setor, a fim de garantir a perenidade do AAC.

ABSTRACT

This study is justified by the growing urbanization pressure on the Alter do Chão Aquifer (AAC) in Santarém, Pará, making it imperative to understand its exploitation status for sustainable management. The methodology consisted of a multicriteria spatial analysis using the Analytical Hierarchy Process (AHP) to weight data on specific flow, static level, and aquifer type obtained from 212 wells registered in the Groundwater Information System (SIAGAS). The results indicated static level as the most important factor (64.3%) and revealed a sectorization of exploitation directly linked to urban density. The areas were classified into four conditions: "critical" in the urban center's unconfined aquifer (16.03% of the area), "of concern" in the adjacent semi-unconfined aquifer (23.77%), "favorable" in the semi-confined aquifer (37.78%), and "excellent" in the confined aquifer (22.42%), located in more remote neighborhoods. The conclusion is that water sustainability is not homogeneous. There is water stress in the urban core, which demands urgent public policies, such as well-drilling control and inspection, while the peripheral areas, in better condition, require planning to ensure long-term sustainable exploitation. The results of this research constitute an essential tool for urban planning, highlighting the need for water management policies targeted at each sector to ensure the sustainability of the AAC.

1. INTRODUÇÃO

O Aquífero Alter do Chão (AAC), constituído pela formação de mesmo nome, representa uma reserva estratégica de água subterrânea de vital importância para a região do Baixo Amazonas. Caracterizado como um sistema poroso de alta produtividade, o AAC é o principal manancial para o abastecimento público e privado no município de Santarém/PA, um polo urbano em constante crescimento. A preservação deste recurso é crucial diante das crescentes pressões ambientais e urbanas (Bentes *et al.*, 2020; Costa *et al.*, 2020; Silva; Descovi Filho, 2023).

O avanço da urbanização acarreta impactos significativos sobre os elementos físico-naturais, o que torna indispensável a busca por uma gestão inteligente e sustentável dos recursos (Chourabi *et al.*, 2012; Silva, 2014). A exploração de águas subterrâneas é um elemento central nesse desafio, pois afeta diretamente a habitabilidade e a sustentabilidade de um centro urbano. Contudo, a gestão hídrica tem se mostrado deficitária, com a apropriação privada muitas vezes desrespeitando a legislação e ameaçando a segurança hídrica (Villar, 2016). A fragilidade na gestão e a exploração irregular, exacerbadas pelo caráter oculto dessas águas, são problemas que refletem as falhas históricas que levaram à degradação de águas superficiais (Villar, 2016).

De forma análoga, a complexa questão da gestão dos recursos hídricos em áreas urbanas é agravada pela proliferação de poços particulares não controlados ou sem outorga (Castanheira, 2021). Embora esses poços possam atender demandas localizadas, sua desregulamentação dificulta o planejamento e a gestão integrada dos aquíferos, podendo levar à superexploração e à interferência entre captações. Adicionalmente, a falta de cadastro impede o conhecimento preciso do volume de água subterrânea efetivamente utilizado e de seus consequentes impactos (Villar, 2016).

Os resultados dessa gestão deficitária e da ausência de infraestrutura sanitária são evidentes na deterioração da qualidade da água do AAC, um risco direto à saúde pública. Os estudos apontam que múltiplas origens de degradação, como sistemas de esgoto precários, infiltração de chorume de depósitos de resíduos e manejo inadequado de efluentes, comprometem o manancial (Dias *et al.*, 2022). Em Santarém, pesquisadores diagnosticaram a presença de contaminação microbiológica (coliformes totais e *Escherichia coli*) em poços domiciliares, indicando contaminação fecal, especialmente em áreas de ocupação irregular (Bentes *et al.*, 2020; Melo *et al.*, 2022). Outra preocupação é a elevada concentração de nitrato, que, em microssistemas urbanos, foi constatada em valores acima do limite de potabilidade (Rodrigues *et al.*, 2018).

Nesse contexto, para reverter o "ciclo prejudicial" da gestão, que é mantido pela omissão do poder público e pela baixa percepção dos problemas pelos usuários (Conicelli; Hirata, 2017), torna-se imperativo o acesso a informações transparentes e precisas. A pesquisa de Castanheira (2021) enfatiza a importância do cadastro e da regularização dos poços como um passo fundamental para avaliar o impacto real da exploração. Da mesma forma, medidas como a investigação hidrogeológica detalhada, o monitoramento contínuo e a instituição de perímetros de segurança em torno das captações são essenciais para o uso duradouro dos recursos subterrâneos (Albuquerque Filho *et al.*, 2011; Toscano; Silva, 2012).

Apesar dos diagnósticos precisos sobre a vulnerabilidade qualitativa do AAC à contaminação em função da expansão urbana, há uma lacuna no conhecimento espacial e quantitativo sobre a condição atual de exploração no contexto de Santarém. Não existe um mapeamento temático consolidado que integre diferentes indicadores de pressão hidrogeológica para identificar e delimitar as áreas de maior estresse hídrico.

Dessa forma, este trabalho tem como objetivo realizar um mapeamento da condição de extração dos diferentes tipos de aquíferos (livres, semi-livres, confinados e semi-confinados) na área urbana de Santarém. A finalidade é caracterizar a pressão atual sobre o recurso hídrico, analisando parâmetros como Vazão específica e Nível estático dos poços por meio de uma Análise Espacial Multicritério (AEM) para identificar e espacializar as áreas críticas de captação. O conhecimento gerado permitirá a otimização do uso da água e servirá como base para a implementação de medidas preventivas contra a superexploração e a contaminação, assegurando a perenidade do AAC.

2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A Formação Alter do Chão depositou-se na bacia sedimentar do Amazonas durante o período Cretáceo (Aptiano ao Maastrichtiano). Esta unidade geológica, que constitui o Aquífero Alter do Chão (AAC), assentou-se de forma discordante sobre rochas do Paleozoico e é majoritariamente coberta por depósitos cenozoicos, como as Formações Solimões e Içá (Cunha *et al.*, 2007; Souza *et al.*, 2013). O AAC é um sistema poroso, caracterizado pela alternância de arenitos de granulometria variada e conglomerados. Essas camadas de arenitos, que apresentam alta porosidade e permeabilidade, formam as zonas aquíferas mais produtivas do sistema (Cunha *et al.*, 2007; Souza; Verma, 2006).

O aquífero é predominantemente livre em suas áreas de afloramento e torna-se confinado ou semi-confinado em profundidade, devido à presença de intercalações argilosas cenozoicas. As condições de confinamento, por sua vez, resultam na ocorrência de poços artesianos ou surgentes em diversas localidades (Souza *et al.*, 2013).

Santarém é um relevante polo geoeconômico do Baixo Amazonas, situado no oeste do Pará, na confluência dos rios Tapajós e Amazonas, com uma população estimada em mais de 331.000 habitantes (IBGE, 2022). Sendo o principal manancial subterrâneo da região, o AAC é um recurso de suma importância para o abastecimento humano, o desenvolvimento de atividades econômicas e a manutenção dos ecossistemas locais (Costa *et al.*, 2020; Bentes *et al.*, 2020). A delimitação da área de estudo corresponde ao perímetro urbano de Santarém.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para avaliar a condição de exploração do aquífero Alter do Chão na área urbana de Santarém, foi empregada uma abordagem de análise espacial multicritério no ambiente de geoprocessamento ArcGIS Pro. Os dados utilizados foram de 212 poços com informações cadastradas na plataforma Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS), mantida pelo Serviço Geológico do Brasil (Figura 1).

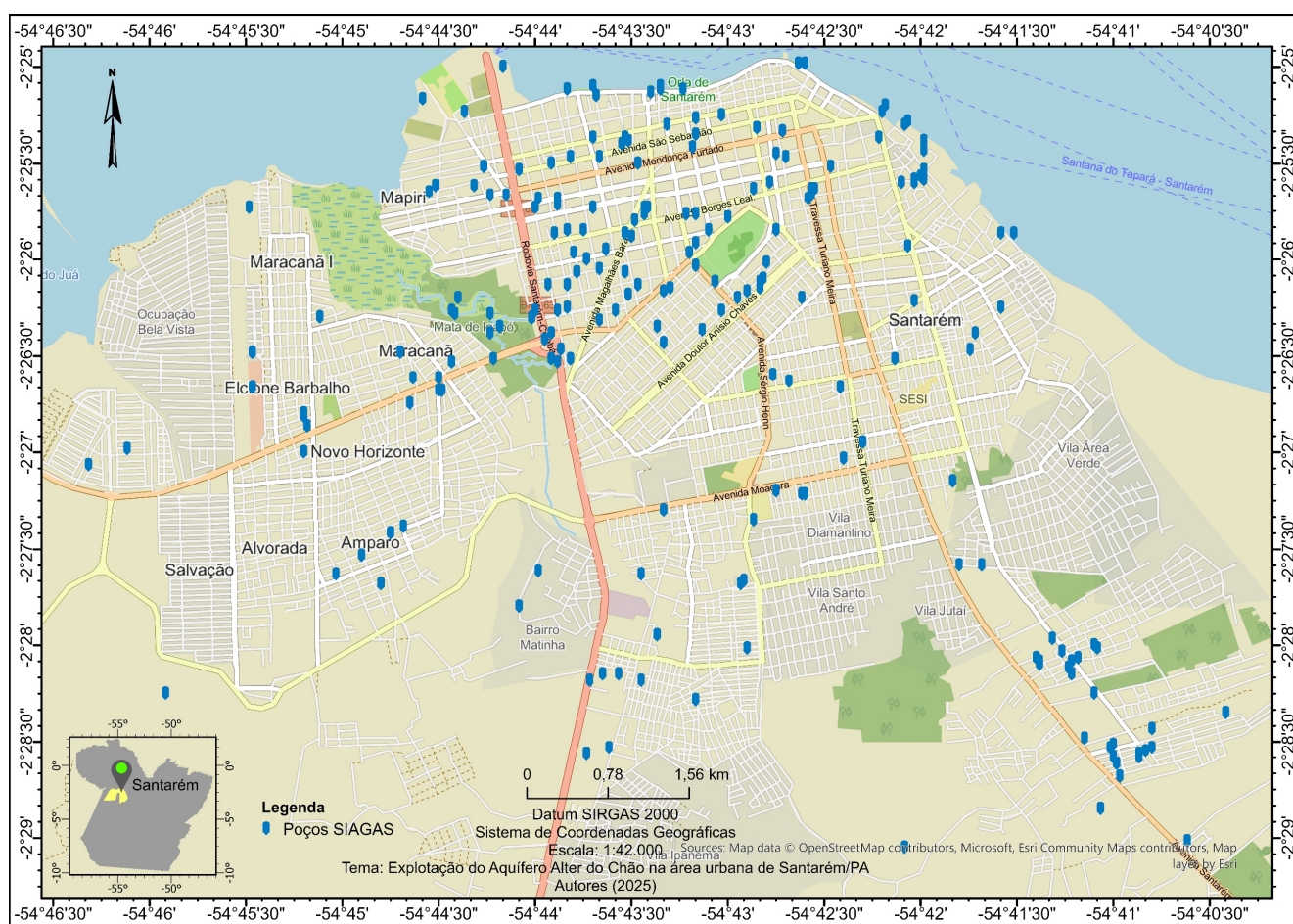


Figura 1. Mapa de localização dos poços SIAGAS na área urbana de Santarém

Estes dados referem-se a coordenadas geográficas, Vazão específica ($\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$), Nível estático (m) e tipo de aquífero (cuja classificação é detalhada na Seção 3.1). A delimitação da área de estudo foi realizada a partir de um arquivo shapefile do perímetro municipal, obtido na plataforma de dados abertos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

Os fatores analíticos em shapefile - Vazão específica, Nível estático e tipo de aquífero - foram convertidos em formato raster e, subsequentemente, reclassificados em uma escala ordinal, conforme detalhado na Tabela 1.

Para determinar a importância relativa de cada um desses fatores, foi aplicado o método do Processo de Hierarquia Analítica (AHP). Uma matriz de comparação par a par foi elaborada no Excel com base na escala de Saaty para realizar os cálculos de ponderação dos critérios (Goepel, 2013).

Tabela 1 – Reclassificação dos rasters de Vazão específica, Nível estático e tipo de aquífero

Vazão ($\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$)	Nota (Novo valor)	Nível estático (m)	Nota (Novo valor)	Tipo de aquífero	Nota (Novo valor)
0 - 3	1 (Vazão muito baixa)	< 10	1 (Nível muito raso)	Livre	1 (Captação muito fácil)
3.1 - 5.0	2 (Vazão baixa)	20 < 10	2 (Nível raso)	Semi-livre	2 (Captação fácil)
5.1 - 12	3 (Média vazão)	40 < 20	3 (Nível médio)	Semi-confinado	3 (Captação moderada)
> 12	4 (Alta vazão)	> 40	4 (Nível profundo)	Confinado	4 (Captação difícil)

O cálculo dos pesos de prioridade de cada fator foi realizado por meio do método da média aritmética. A Equação 1 (p_i) representa a normalização dos valores (julgamentos) para que a soma total seja igual a 1 ou 100%. Esta equação demonstra que os valores r_i são divididos pela soma total dos r_i (Alonso; Lamata, 2006).

$$p_i = r_i / \sum_{i=1}^N r_i \quad (1)$$

Para validar a confiabilidade dos julgamentos, foi verificada a consistência da matriz. Calculou-se o autovalor principal (λ_{max}) (Equação 2), onde o produto entre a matriz de critérios (a_{ij}) e o vetor de pesos (p_i) é o vetor ponderado (v_n) que é dividido pelo p_i e também calculou-se a média aritmética dos valores resultantes (\bar{w}) (Alonso; Lamata, 2006).

$$\lambda_{max} = a_{ij} p_i = \frac{v_n}{p_i} = \bar{w} \quad (2)$$

O Índice de Consistência (CI) foi calculado com base no λ_{max} e no número de critérios (N) conforme a Equação 3 e, a Razão de Consistência (CR) foi calculada conforme a Equação 4, a qual é a razão entre o CI e o Índice Aleatório (RI) de 0,58, correspondente a uma matriz de três critérios ($n=3$) (Alonso; Lamata, 2006).

$$CI = \frac{(\lambda_{max} - N)}{N - 1} \quad (3)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (4)$$

Com os pesos definidos e validados, a etapa final consistiu na sobreposição ponderada dos mapas temáticos reclassificados, utilizando a ferramenta *Raster Calculator* do ArcGIS Pro. O mapa resultante, que representa a situação integrada da exploração do aquífero, foi então categorizado em quatro classes distintas, conforme detalhado na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores em classes para a situação de exploração do aquífero Alter do Chão

Situação de exploração	Nota (Novo valor)
1,6 < 1,0	1(Captação desafiadora/crítica)
2,5 < 1,6	2(Captação preocupante)
3,4 < 2,5	3(Captação moderada/razoável)
4,0 < 3,4	4(Captação excelente/ótima)

3.1. Classificação hidrogeológica adotada (tipo de aquífero)

A avaliação da condição de exploração requer uma classificação precisa do regime hidrodinâmico dos poços utilizados no estudo. Os dados de poços extraídos da plataforma SIAGAS para o Aquífero Alter do Chão (AAC) classificam o regime do aquífero em quatro categorias distintas, conforme a Tabela 1: livre, semi-livre,

confinado e semi-confinado. No contexto deste estudo, e seguindo a classificação adotada pelo SIAGAS para a Bacia do Amazonas, o termo semi-livre é interpretado para designar poços localizados em zonas de transição do AAC (Melo Junior, 2012): Livre: Águas com nível d'água em contato direto com a pressão atmosférica, sem camada impermeável superior; Semi-Livre: Caracteriza poços localizados em zonas de transição onde o aquífero se comporta primariamente como livre (baixa pressão na coluna d'água), mas há uma cobertura inicial de baixa permeabilidade (afloramento de argilas cenozoicas, por exemplo) que retarda ligeiramente a recarga vertical, diferenciando-o do regime puramente livre; Semi-Confinado: Caracteriza poços onde o aquífero é coberto por uma camada semi-impermeável (aquitado) mais contínua, permitindo vazamento (vazão de drenagem) vertical significativo sob gradiente hidráulico, mas distinto do confinamento total; Confinado: Águas sob pressão piezométrica superior à pressão atmosférica, totalmente restritas por camadas impermeáveis (aquitados ou aquícludes) superiores e inferiores (Tancredi, 1996; Melo Junior, 2012). Esta classificação detalhada é essencial para o mapeamento temático, pois reflete a complexa heterogeneidade da Formação Alter do Chão e permite uma diferenciação espacial mais acurada dos regimes de exploração e vulnerabilidade.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O julgamento do nível de importância dos fatores da matriz de comparação, foi realizado da seguinte forma (Tabela 3).

Nível estático (NE) vs. Vazão específica (Q/s): O Nível estático é considerado um indicador mais crítico e urgente do que a Vazão específica. Enquanto a Vazão específica ($\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$) é uma medida da eficiência e capacidade produtiva do poço individual, estando diretamente ligada à transmissividade local, o Nível estático (m) é o reflexo direto da pressão piezométrica e do volume de água armazenado no sistema aquífero como um todo.

Um declínio persistente e significativo no Nível estático ao longo do tempo sinaliza um desequilíbrio crônico no balanço hídrico: a taxa de extração (exploração) está consistentemente superando a taxa de recarga (reposição). Este cenário implica uma redução da reserva total do aquífero (seja pela descompressão da reserva elástica em aquíferos confinados ou pela diminuição da saturação em aquíferos livres), indicando uma exploração insustentável e risco de esgotamento do recurso a longo prazo. Em contraste, uma Vazão específica baixa pode resultar de fatores localizados, como o design do poço, obstrução do filtro, ou simplesmente a baixa condutividade hidráulica da formação rochosa adjacente à captação. Embora importante para a produtividade do poço, este valor não reflete a saúde e a disponibilidade geral do aquífero com a mesma urgência que o Nível estático.

Por essa razão, foi determinado que o Nível estático é muito fortemente mais importante que a Vazão específica, recebendo uma nota 7 na escala de prioridade.

Nível estático (NE) vs. Tipo de aquífero: O Nível estático representa a condição de estresse atual do aquífero, servindo como um indicador imediato de desequilíbrio hídrico. Já o tipo de aquífero (livre ou confinado) é uma condição permanente de vulnerabilidade ou resiliência inerentes do sistema. Embora o tipo de aquífero seja relevante, qualquer aumento do nível da água é um sinal de alerta direto. Portanto, o Nível estático foi julgado como moderadamente mais importante que o Tipo de aquífero, com uma nota 3.

Tipo de aquífero vs. Vazão específica (Q/s): O Tipo de aquífero define a resiliência do sistema à extração. Entender se o sistema é livre ou confinado é fundamental para avaliar o impacto de uma determinada vazão. Portanto, o Tipo de aquífero foi considerado fortemente mais importante que a Vazão específica, recebendo uma nota 5.

Os valores fracionários ($1/3$, $1/7$ e $1/5$) é uma regra fundamental do método AHP, baseada no princípio da reciprocidade. Cada um desses números é o inverso matemático do julgamento primário feito na parte superior da matriz. Dessa forma, o valor $1/3$ quantifica que o Tipo de aquífero é "moderadamente menos importante" que o Nível estático. Similarmente, o valor $1/7$ corresponde ao julgamento do critério Vazão específica em relação ao Nível estático. Aplicando o princípio do inverso, a Vazão é, conseqüentemente, "muito fortemente menos importante" que o Nível estático. Por fim, o valor $1/5$ representa que a Vazão específica é "fortemente menos importante" que o Tipo de aquífero.

O valor 1 na matriz de comparação AHP indica que os dois elementos que estão sendo comparados possuem igual importância para a análise.

A Tabela 4 mostra os julgamentos normalizados.

Tabela 3 – Matriz de comparação entre os fatores

	Nível Estático	Tipo de aquífero	Vazão específica
Nível estático	1	3	7
Tipo de aquífero	1/3	1	5
Vazão específica	1/7	1/5	1
Soma total	1.476	4.200	13.000

Tabela 4 – Matriz de comparação normalizada

	Nível Estático	Tipo de aquífero	Vazão específica
Nível estático	0.677	0.714	0.538
Tipo de aquífero	0.226	0.238	0.385
Vazão específica	0.097	0.048	0.077

A Tabela 5 mostra o resultado do cálculo da média aritmética das linhas da matriz de comparação normalizada.

Tabela 5 – Matriz de comparação normalizada

	Vetor de pesos
Nível estático	0.643
Tipo de aquífero	0.283
Vazão específica	0.074

O autovalor principal (λ_{max}) foi calculado da seguinte forma:

$$\lambda_{max} = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 7 \\ 1/3 & 1 & 5 \\ 1/7 & 1/5 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0.643 \\ 0.283 \\ 0.074 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.643 + 0.849 + 0.516 \\ 0.214 + 0.283 + 0.369 \\ 0.092 + 0.057 + 0.074 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.008 \\ 0.866 \\ 0.222 \end{bmatrix}$$

$$\lambda_{max} = \begin{bmatrix} 2.008/0.643 \\ 0.866/0.283 \\ 0.222/0.074 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.121 \\ 3.062 \\ 3.013 \end{bmatrix} = ((3.121+3.062+3.013)/3) = 3.066$$

A aplicação da AHP foi fundamental para atribuir pesos objetivos aos fatores que influenciam a exploração do aquífero. O "Nível estático" emergiu como o critério de maior importância, recebendo um peso de 64,3%, seguido pelo "Tipo de aquífero" com 28,3% e pela "Vazão específica" com 7,4%. A validade desses pesos foi confirmada pela análise de consistência ($\lambda_{max} = 3.066$ e $CI = 0.0328$) que resultou em uma CR de 5,6%. Este valor, por ser inferior ao limiar de 10%, indica que os julgamentos comparativos foram consistentes e que os pesos calculados são confiáveis para a modelagem espacial.

O mapa integrado da condição de exploração do aquífero (Figura 2) abrange uma área urbana total de 76,60 km² e reflete a ponderação definida. Devido ao peso predominante do Nível estático, o mapa ilustra primariamente a vulnerabilidade do sistema aquífero, diferenciando as zonas onde o lençol freático está mais próximo de um esgotamento (nível raso) e mais suscetível à contaminação, daquelas onde o aquífero se encontra menos pressionado pela exploração, com níveis estáticos mais profundos.

A análise espacial revelou um padrão claro, com as condições mais adversas concentradas no núcleo urbano. A zona do aquífero livre, que corresponde a 16,03% da área (11,89 km²), foi classificada em condição "crítica". Esta área coincide com o centro histórico, comercial e densamente povoado de Santarém, onde a alta densidade de poços para abastecimento residencial e comercial exerce pressão intensa sobre o recurso. A criticidade é justificada pelos níveis estáticos muito rasos, que aumentam tanto o risco de bombeamento a seco quanto a vulnerabilidade à contaminação superficial. Circundando esta área, encontra-se a zona do aquífero semi-livre, que ocupa 23,77% do território (17,62 km²) e apresenta uma condição "preocupante". Atuando como uma zona de transição, seus níveis estáticos, mais rasos que o ideal, sugerem que a demanda pode estar se aproximando da capacidade de recarga, exigindo monitoramento para que sua condição não evolua para crítica.

Em contrapartida, as áreas mais afastadas do centro demonstram condições mais favoráveis. A zona do aquífero semi-confinado, representando a maior porção do estudo com 37,78% da área (28,01 km²), exibe uma situação de exploração favorável. Localizada em bairros como Novo Horizonte e Maracanã, esta zona se beneficia de níveis estáticos mais profundos e/ou melhores vazões, indicando menor pressão antrópica. Finalmente, a zona do aquífero confinado, que compreende 22,42% da área (16,62 km²), apresenta uma condição de exploração "ótima". Caracterizada por níveis estáticos profundos e elevada resiliência à contaminação superficial, esta é a porção menos explorada do aquífero no perímetro urbano, observada em bairros como Jardim Santarém e Salvação. Este cenário evidencia um gradiente de sustentabilidade hídrica que se correlaciona diretamente com a expansão e a densidade da malha urbana.

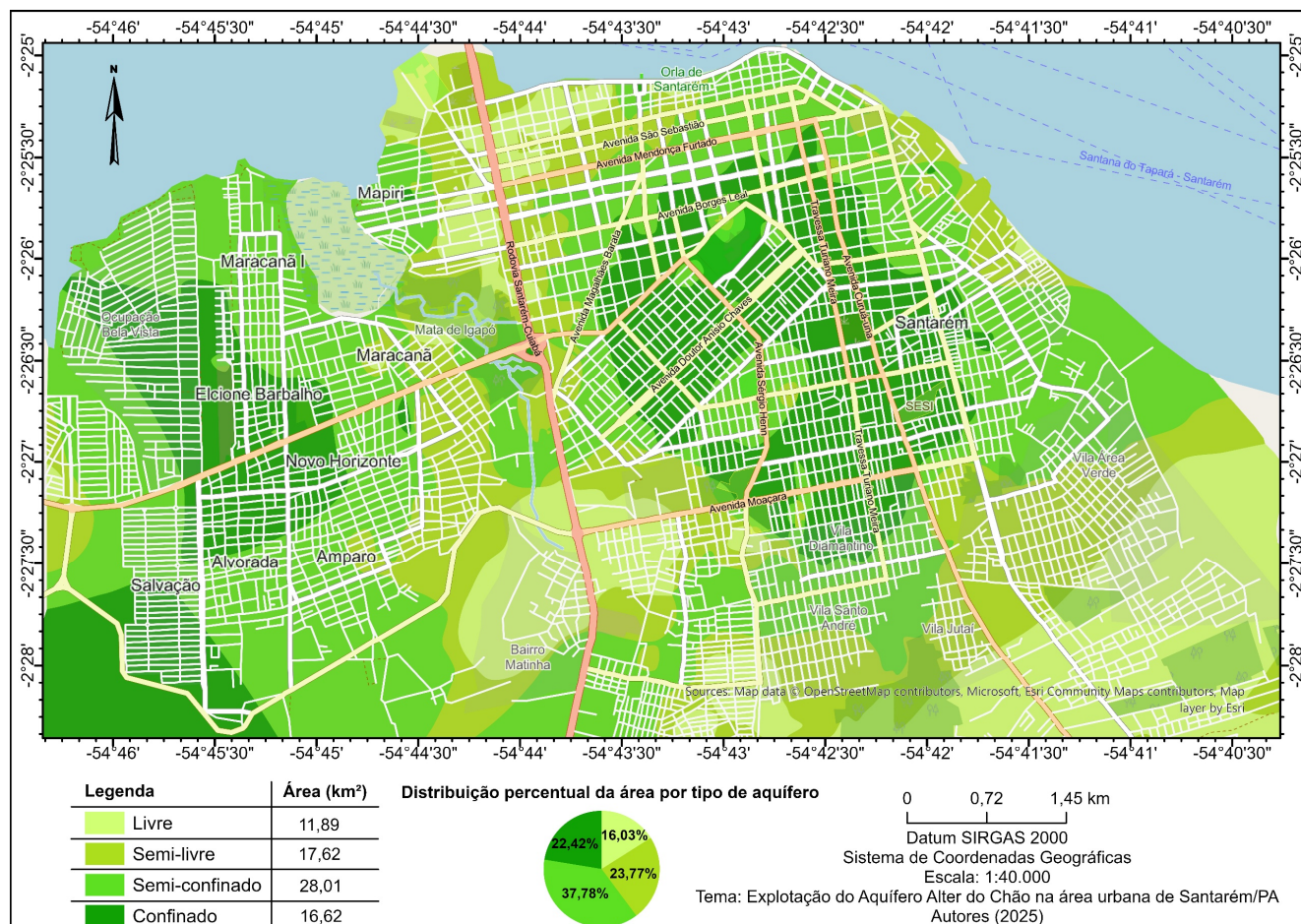


Figura 2. Mapa de exploração do Aquífero Alter do Chão na área urbana de Santarém

5. CONCLUSÕES

Este estudo realizou o mapeamento e a classificação da condição de exploração do aquífero Alter do Chão na área urbana de Santarém, aplicando uma metodologia de análise espacial multicritério (AHP) validada por um baixo índice de inconsistência. A pesquisa demonstrou ser uma ferramenta eficaz para diagnosticar a pressão sobre os recursos hídricos subterrâneos, revelando uma clara setorização das condições de exploração que correspondem tanto ao tipo de aquífero quanto ao padrão de urbanização do município.

Os resultados indicam que a sustentabilidade hídrica na área estudada não é homogênea. A zona do aquífero livre, que abrange a área central, mais antiga e densamente povoada de Santarém, foi classificada em estado "crítico". Essa condição é atribuída à intensa exploração e à vulnerabilidade associada a níveis estáticos muito rasos, o que eleva o risco de esgotamento e contaminação. De forma adjacente, a zona do aquífero semi-livre apresenta uma condição "preocupante", funcionando como uma área de transição que demanda monitoramento contínuo para evitar sua degradação ao estado crítico. Em virtude disso, pretende-se realizar futuros estudos com a inclusão de indicadores de qualidade da água ao modelo AHP para uma análise mais completa, assim gerar um mapeamento de riscos de contaminação, com base na proximidade de fontes poluidoras (aterros, indústrias, fossas sépticas, e outras).

Em contrapartida, as áreas mais afastadas do centro urbano, que exploram os aquíferos semi-confinado e confinado, apresentam condições "favoráveis" e "ótimas", respectivamente. Essas zonas, caracterizadas por níveis estáticos mais profundos e, conseqüentemente, maior proteção natural e resiliência, representam as áreas menos pressionadas pela exploração. Essa disparidade evidencia que, enquanto o núcleo urbano enfrenta um cenário de estresse hídrico, as áreas de expansão mais recentes ainda dispõem de condições mais seguras para o aproveitamento do recurso.

Portanto, os resultados gerados nesta pesquisa constituem um subsídio técnico de grande valor para o planejamento urbano e a gestão de recursos hídricos em Santarém. As conclusões apontam para a necessidade urgente de políticas públicas direcionadas: para a área central, são cruciais medidas de controle da perfuração de novos poços, fiscalização e proteção contra a poluição; para a zona de transição, um programa de monitoramento da qualidade e do nível da água é essencial. Para as áreas com condições favoráveis, o planejamento da expansão urbana deve incorporar, desde já, diretrizes para garantir a exploração sustentável a longo prazo, assegurando a perenidade do aquífero Alter do Chão para as futuras gerações.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE FILHO, J. L. *et al.* O Papel das Águas Subterrâneas como Reserva Estratégica de Água e Diretrizes para a sua Gestão Sustentável. **Revista Recursos Hídricos**, [s. l.], v. 32, n. 2, p. 53-61, nov. 2011. DOI: 10.5894/rh32n2-5. Disponível em: <https://www.aprh.pt/rh/v32n2-5.html>. Acesso em: 27 dez. 2024.
- ALONSO, J. A.; LAMATA, M. T. Consistency in the analytic hierarchy process: A new approach. **International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge based systems**, Cingapura, v. 14, n. 4, p.445-459, May. 2006. DOI: <https://doi.org/10.1142/S0218488506004114>. Disponível em: <https://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S0218488506004114>. Acesso em: 20 out. 2024.
- BENTES, V. S. *et al.* Qualidade da água utilizada para consumo humano proveniente do aquífero Alter do Chão em Santarém (oeste do Pará) e sua relação com a saúde pública. **Geochimica Brasiliensis**, Belo Horizonte, v.34, n.1, p.101–109, Jul. 2020. DOI: <https://doi.org/10.21715/GB2358-2812.2020341101>. Disponível em: <https://geobrasiliensis.emnuvens.com.br/geobrasiliensis/article/view/662>. Acesso em: 08 out. 2024.
- CHOURABI, H. *et al.* Understanding Smart Cities: An Integrative Framework. In: ANNUAL HAWAII INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEM SCIENCES,, 45., 2012, Maui. **Proceedings [...]**. IEEE Computer Society, 2012. p. 2289-2297. DOI: 10.1109/HICSS.2012.615. Disponível em: <https://asu.elsevierpure.com/en/publications/understanding-smart-cities-an-integrative-framework>. Acesso em: 16 jul. 2025.
- CASTANHEIRA, Daniella. **Gestão integrada dos recursos hídricos: a conexão dos poços particulares com o abastecimento público dos centros urbanos**. 2021. 90 f. Tese (Doutorado em Hidrogeologia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/003038854/>. Acesso em: 11 dez. 2024.
- CONICELLI, Bruno Pirilo; HIRATA, Ricardo. Novos paradigmas na gestão das águas subterrâneas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 19., 2017. **Anais [...]** São Paulo: ABAS, 2017. p. 1-18. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/28712>. Acesso em: 27 dez. 2024.
- COSTA, I. *et al.* A sazonalidade de contaminantes em águas subterrâneas e superficiais entorno de um aterro sanitário na região Amazônica. **Revista Ibero-Americana De Ciências Ambientais**, São José dos Pinhais, v.11, n.6, p. 371–382, jul. 2020. DOI: <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2020.006.0030>. Disponível em: <https://sustenere.inf.br/index.php/rica/article/view/CBPC2179-6858.2020.006.0030>. Acesso em: 17 dez. 2024.
- CUNHA, P. R. C. *et al.* Bacia do Amazonas. **Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 8, n. 1, p. 47-55, maio/nov. 2007. Disponível em: <https://bgp.petrobras.com.br/bgp/article/view/580>. Acesso em: 03 jan. 2025.
- GOEPEL, K. D. Implementing the Analytic Hierarchy Process as a Standard Method for Multi- Criteria Decision Making In Corporate Enterprises – A New AHP Excel Template with Multiple Inputs. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE ANALYTIC HIERARCHY PROCESS, 2013, Kuala Lumpur. **Proceedings [...]**. Jun. 2013.. p 1 -10. DOI: 10.13033/isahp.y2013.047. Disponível em: <https://www.isahp.org/uploads/29.pdf>. Acesso em: 20 out. 2024.
- IBGE. **Conheça cidades e estados do Brasil**. Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pa/santarem/panorama>. Acesso em: 16 jul. 2025.

JUNIOR, Homero Reis de Melo. **Projeto Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas: relatório diagnóstico Aquífero Alter do Chão, Bacia Sedimentar do Amazonas**. MOURÃO, Maria Antonieta Alcântara. (Coord.). Belo Horizonte: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, v. 7, 2012. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/22246>. Acesso em: 30 out. 2025.

MELO, Sérgio Gouvêa de *et al.* Physicochemical analysis of water from wells in an urban area of irregular occupation in the Brazilian Amazon. **Research, Society and Development**, Vargem Grande Paulista, v. 11, n. 4, p. 1-11, mar. 2022. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i4.27359>. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/27359>. Acesso em: 09 out. 2024.

RODRIGUES, Caio Augusto Nogueira *et al.* Diagnóstico de microssistema de abastecimento de água na área urbana de Santarém – Pará. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 9., 2018, São Bernardo do Campo **Anais [...]**. Bauru: Ibeas, nov. 2018. p. 1-5. Disponível em: <https://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2018/IX-018.pdf>. Acesso em: 19 dez. 2024.

SILVA, Yasmim Araújo; DESCOVI FILHO, Leônidas Luiz Volcato. Análise da vulnerabilidade intrínseca do Aquífero Alter do Chão no município de Santarém -Pará -Brasil. In: DAVID, Martha Edith Velásquez *et al.* (org.). **Contribuições à Geologia da Amazônia**. 1. ed. Belém, PA: SGB - Núcleo Norte, 2023. v. 12, p. 212-225. Disponível em: <https://arquivos.sgb-no.org.br/BASES/CGA12.pdf/>. Acesso em: 10 nov. 2024.

SILVA, J. A. B. *et al.* A urbanização no mundo contemporâneo e os problemas ambientais. **Cadernos de Graduação – Ciências Humanas e Sociais**, Aracaju, v. 2, n. 2, p. 197-207, out. 2014. Disponível em: <https://periodicos.set.edu.br/index.php/cadernohumanas/article/view/1723/964>. Acesso em: 25 jul. 2025.

SOUZA, L. S. B.; VERMA, O. P. Mapeamento de aquíferos na cidade de Manaus (AM): utilizando perfilagem geofísica de poço e sondagem elétrica vertical. **Revista Brasileira de Geofísica**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 3, p. 443, 2006. Disponível em: <https://www.sbgf.org.br/revista/index.php/rbgf/article/view/1631>. Acesso em: 10 out. 2024.

SOUZA, E. L. *et al.* Síntese da hidrogeologia nas bacias sedimentares do Amazonas e do Solimões: Sistemas Aquíferos Içá-Solimões e Alter do Chão. **Revista do Instituto de Geociências – USP**, São Paulo, v. 13, n. 1, p. 107-117, Mar. 2013. DOI: <https://doi.org/10.5327/Z1519-874X2013000100007>. Disponível em: <https://revistas.usp.br/guspssc/article/view/54085>. Acesso em: 10 dez. 2024.

TANCREDI, Antônio Carlos Felice Nicola Savério. **Recursos hídricos subterrâneos de Santarém**: Fundamentos para uso e proteção. 1996. 153 f. Tese (Doutorado em Geoquímica) - Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 1996. Disponível em: <http://repositorio.ufpa.br:8080/jspui/handle/2011/7884>. Acesso em: 05 jan. 2025.

TOSCANO, Germana Gonzalez; SILVA, Tarciso Cabral da. Uma síntese analítica sobre legislação de proteção das águas subterrâneas. **Gaia Scientia**, Paraíba, v. 6, n. 1, p. 31-41, 2012. Disponível em: <https://periodicos.ufpb.br/ojs/index.php/gaia/article/view/18221>. Acesso em: 28 dez. 2024.

VILLAR, Pilar Carolina. As águas subterrâneas e o direito à água em um contexto de crise. **Ambiente & Sociedade**, São Paulo, v. 19, n. 1, p. 83-102, jan./mar. 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/asoc/a/TWWhNrmq5nKsLbLTSSKNbtbm/?lang=pt&format=pdf>. Acesso em: 11 nov. 2024.