

## Artigos

# Mapas de zonas potenciais de recarga da água subterrânea como uma nova ferramenta para a segurança hídrica do abastecimento público

## Groundwater potential recharge zones maps as a novel tool for water security in the public supply

Tiago De Vargas<sup>1</sup>; Vinícius Sgorla<sup>1</sup>; Rossano Belladona<sup>1</sup>; Luiz Alberto Vedana<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto de Caxias do Sul, RS, Brasil.

<sup>2</sup> Universidade Federal de Sergipe (UFS), São Cristóvão, SE, Brasil.

✉ [vargas\\_geo@gmail.com](mailto:vargas_geo@gmail.com), [v.sgorla@gmail.com](mailto:v.sgorla@gmail.com), [rbelladona@samaecaxias.com.br](mailto:rbelladona@samaecaxias.com.br), [luzvedana@gmail.com](mailto:luzvedana@gmail.com)

### Palavras-chave:

Gestão de águas;  
Potencial de recarga;  
AHP;  
Álgebra de mapas.

### Keywords

Water management;  
Recharge potential;  
Analytic Hierarchy Process;  
Map algebra.

Revisão por pares.  
Recebido em: 22/06/2022.  
Aprovado em: 27/12/2022.

### Resumo

O desenvolvimento socioeconômico das cidades é dependente da segurança hídrica do abastecimento público. A identificação das zonas potenciais de recarga é fundamental para a gestão e planejamento dos recursos hídricos, tendo em vista garantir o fornecimento de água potável. O mapa de zonas potenciais de recarga de água subterrânea pode ser um instrumento facilitador para auxiliar a tomada de decisão nesse âmbito. A proposta deste estudo é identificar cartograficamente as zonas potenciais de recarga de três pequenas bacias hidrográficas urbanas destinadas ao abastecimento público de Caxias do Sul, RS. A metodologia aplicada considerou seis critérios do meio físico: densidade de lineamentos, densidade de drenagem, forma do terreno, uso e cobertura do solo, tipo do solo e declividade do terreno. Os pesos atribuídos para cada critério foram definidos através do método de análise hierárquica de processo. A modelagem cartográfica para a obtenção do mapa de zonas potenciais de recarga foi desenvolvida em software de SIG. As zonas potenciais de recarga classificadas como níveis baixo e moderado são dominantes nas três bacias hidrográficas, representando entre 79,54 e 84,57% das áreas avaliadas. Por outro lado, o nível elevado está caracterizado entre 15,43 e 20,46% das áreas das bacias, sendo esse nível o mais favorável à recarga. Os critérios com maior influência nas zonas de recarga foram a forma do terreno, uso e cobertura do solo, tipo do solo e declividade do terreno. O mapa de zonas potenciais de recarga pode ser uma nova ferramenta aos estudos de segurança hídrica, especialmente voltados ao abastecimento público municipal.

### Abstract

Cities socioeconomic development is dependent on the water security of the public water supply. The identification of groundwater potential recharge zones becomes fundamental to water resources planning and management, mainly when public water supply is at stake. The potential groundwater recharge zones map can be a facilitating tool to aid decision-making in this field. This study aims to map such zones of three small urban catchments whose water is destined to supply a portion of the city of Caxias do Sul, southern Brazil. The applied methodology considered six physical criteria: lineaments density, drainage density, hillslope geometry, land use and cover, hydrologic soil group and terrain slope. The weights assigned to each criterion were defined by applying the Analytic Hierarchy Process (AHP), while the cartographic modeling to obtain the potential recharge zones map was developed in GIS software. The potential recharge zones classified as low and moderate levels are dominant in the three catchments, covering between 79.54 and 84.57% of the assessed areas. On the other hand, the high level happens between 15.43 and 20.46% of the studied areas, which is the most favorable for recharge. The criteria which most influenced the recharge zones were the hillslope geometry, land use and cover, hydrologic soil group and terrain slope. Groundwater potential recharge zone maps can be a novel tool to be applied to studies regarding water security, especially targeting public water supply.

DOI: <http://doi.org/10.14295/ras.v37i1.30152>

## 1. INTRODUÇÃO

A recarga de água subterrânea integra o ciclo hidrológico e possui relação direta com a disponibilidade hídrica subterrânea e superficial das bacias hidrográficas. A alteração da taxa, frequência e qualidade da recarga pode decorrer das atividades

antrópicas em superfície (FOSTER; HIRATA, 1993), que estão relacionadas ao aumento do consumo de água por efeito da expansão urbana, agrícola e industrial (KARAMOUZ; AHMADI; AKHBARI, 2020; ZGHIBI *et al.*, 2020). O crescimento econômico e a sustentabilidade das comunidades estão associados à segurança hídrica (RAPPOUR, 2019), cuja garantia do

fornecimento de água potável é de responsabilidade das companhias de água que, para atender à crescente demanda, devem ampliar os esforços para o delineamento e preservação das áreas de recarga.

A definição de zonas potenciais de recarga pode ser crucial para a segurança hídrica de uma cidade ou região. As técnicas de investigação tradicionais de áreas de recarga, como a Variação do Nível da Água, os Traçadores e o Balanço Hídrico, geralmente, são mais caras, consomem mais tempo e precisam de mais pessoas envolvidas do que as técnicas de Sensoriamento Remoto (SR), Sistema de Informação Geográfica (SIG) e Análise de Dados Multicritério (ARULBALAJI; PADMALAL; SREELASH, 2019; BENJMEI *et al.*, 2020; DAR; RAI; BHAT, 2021; FETTER, 2001; YEH *et al.*, 2016). Devido a essa diferença econômica, muitos pesquisadores optam pelas técnicas com melhor custo-benefício.

Estudos utilizando técnicas de SR, SIG e Análise de Dados Multicritério são realizados em todo o mundo para delinear as zonas potenciais de recarga. As duas primeiras técnicas são frequentemente aplicadas no âmbito da pesquisa (DEEPA *et al.*, 2016; GNANACHANDRASAMY *et al.*, 2018) e fornecem um mapa qualitativo de zonas potenciais de recarga (KUMAR; GOPINATH; SERALATHAN, 2007). Por outro lado, a terceira técnica, em conjunto com as duas primeiras, tornam os estudos quantitativos (ZGHIBI *et al.*, 2020). Um método fortemente utilizado em estudos de dados multicritério é a Análise Hierárquica de Processo (BENJMEI *et al.*, 2020; CHOWDHURY; JHA; CHOWDARY, 2010; DAR; RAI; BHAT, 2021), que foi demonstrada por R. W. Saaty (1987) e T. L. Saaty (1990). Porém, existem outros métodos multicritério que podem ser aplicados como a Lógica Fuzzy, *Frequency Ratio* e *Multi-influencing Fator* (MANZIONE; SILVA; PAES, 2021; ZGHIBI *et al.*, 2020).

Na análise hierárquica de processo a escolha dos critérios do meio físico e a atribuição dos pesos devem considerar as particularidades do local de estudo (HUTTI, 2011), pois as zonas potenciais de recarga são avaliadas em ambientes de rochas fraturadas (BENJMEI *et al.*, 2020; KUMAR; GOPINATH; SERALATHAN, 2007) e porosas (GNANACHANDRASAMY *et al.*, 2018; YEH *et al.*, 2016). Os sete critérios mais representativos são a litologia, a geomorfologia, o uso e cobertura do solo, a declividade, a densidade de lineamentos, a densidade de drenagem e o tipo de solo (BORTOLIN, 2018; DAR; RAI; BHAT, 2021; DEEPA *et al.*, 2016; SELVAM *et al.*, 2016; YEH *et al.*, 2016). A validação do mapa de zonas potenciais de recarga pode ser realizada, por exemplo, pelo método *Receiver Operating Characteristics* (DAR; RAI; BHAT, 2021; ZGHIBI *et al.*, 2020) e pelo comparativo de porcentagens das nascentes (áreas de descarga) localizadas nas zonas de baixo e médio potencial de recarga (BORTOLIN, 2018).

No sul do Brasil, estudos delineando as zonas potenciais de recarga das águas subterrâneas, com aplicação no planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos, são escassos e, consequentemente, essa lacuna dificulta a tomada de decisão dos *stakeholders*. As companhias de abastecimento de água eventualmente direcionam esforços para conhecer e preservar os recursos hídricos superficiais e subterrâneos. A identificação de áreas sensíveis, como as zonas potenciais de recarga, pode despertar o interesse das companhias de abastecimento de água e dos gestores públicos em desenvolverem políticas públicas de planejamento e gestão do uso do solo nas áreas de recarga, a nível regional e municipal, a fim de assegurar a disponibilidade de água potável em longo prazo.

Diante desse cenário, o objetivo deste estudo é delinear as zonas potenciais de recarga de três pequenas bacias hidrográficas urbanas destinadas ao abastecimento de água potável da cidade de Caxias do Sul – RS e aplicar esse produto na gestão do uso do solo considerando a fragilidade do ambiente hidrogeológico. Essa pesquisa apresenta um aspecto inovador por utilizar a técnica de Análise Hierárquica de Processo para delinear áreas potenciais de recarga a nível de gestão municipal, no sul do Brasil, podendo servir como exemplo metodológico para outras companhias de abastecimento de água.

### 1.1 Áreas de estudo

O município de Caxias do Sul está localizado na região nordeste do Estado do Rio Grande do Sul, possui 1.652 km<sup>2</sup> e uma população estimada de 523.716 habitantes (IBGE, 2021). A economia de Caxias do Sul é a segunda maior do Rio Grande do Sul, com um Produto Interno Bruto (PIB), em 2019, de R\$ 23,10 bilhões (IBGE, 2022). As áreas de estudo são três bacias hidrográficas urbanas nomeadas como Samuara, Dal Bó e Maestra (SAMAE, 2021) cuja água é utilizada para o abastecimento de 24,4% da população urbana de Caxias do Sul (Tabela 1). A Figura 1 mostra a localização da cidade de Caxias do Sul e das três bacias estudadas.

O clima da região de Caxias do Sul é classificado como muito úmido, com uma média anual de temperatura entre 14°C e 17,2°C (ROSSATO, 2011) e a precipitação pluviométrica está entre 1.750 e 2.400 mm·ano<sup>-1</sup> (BELLADONA; DE VARGAS, 2017). Conforme a classificação de climas Köppen, as bacias hidrográficas urbanas estão inseridas no contexto climático temperado Cfb (PIDWIRNY, 2006). No cenário geomorfológico, as bacias hidrográficas urbanas estudadas pertencem a região do Planalto das Araucárias (LISBOA; REMUS; DANI, 2003).

**Tabela 1** - Bacias hidrográficas urbanas do município de Caxias do Sul

Bacia de captação	Área da bacia (ha)	Área alagada (ha)	Volume (m <sup>3</sup> )
Samuara	687,1	19,1	728.104,9
Dal Bó	642,8	45,9	1.903.893,5
Maestra	1.526,5	48,7	4.996.849,8

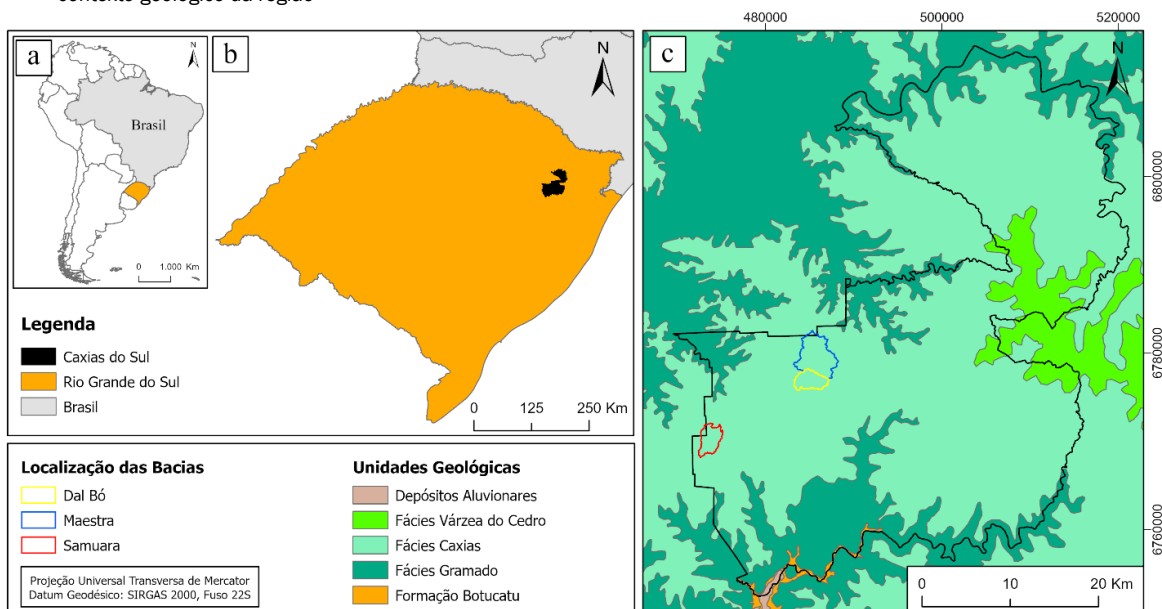
Fonte: SAMAE (2021).

## 2. GEOLOGIA E HIDROGEOLOGIA

O Estado do Rio Grande do Sul possui formações geológicas desde a era Neo-Arqueano até a era Cenozóico (PICADA, 1972). Na região de estudo é identificado o Grupo São Bento, da Província Paraná, que é constituído pelas formações Guará, Botucatu e Serra Geral. A Formação Serra Geral é composta por basaltos tholeiíticos, na base, enquanto que na parte superior são observados riolitos, riocácitos e dacitos (BELLIENI *et al.*, 1984, 1986; ROISENBERG; VIERO, 2000). Na região nordeste do Rio Grande do Sul há registros locais de domos vulcânicos

com distribuição bastante restrita (LIMA *et al.*, 2012) e afloramentos relacionados a esses domos apresentam padrões petrográficos e geoquímicos típicos de um estilo eruptivo efusivo (LIMA *et al.*, 2018). Conforme Figura 1, na cidade de Caxias do Sul há predominância de afloramentos dos derrames vulcânicos ácidos (Fácies Caxias), seguidos pelos derrames vulcânicos básicos (Fácies Gramado), vitrófiros Várzea do Cedro e, de forma subordinada, a Formação Botucatu (CPRM, 2011; LISBOA; REMUS; DANI, 2003).

**Figura** - Localização da área de estudo. (a) Rio Grande do Sul, (b) Caxias do Sul e (c) as três bacias hidrográficas estudadas e o contexto geológico da região



O contexto hidrogeológico regional inclui os sistemas aquíferos Guarani e Serra Geral. O Sistema Aquífero Guarani (SAG) é um aquífero granular e, regionalmente, sofre controle estrutural através dos principais depocentros da Bacia do Paraná, falhas regionais e locais, reativação dos arcos e soerguimentos (LISBOA; REMUS; DANI, 2003), e está sotoposto ao Sistema Aquífero Serra Geral (SASG). O SASG pode ser segmentado em aquíferos do tipo poroso e fraturado. O aquífero poroso está localizado no manto intemperizado das rochas vulcânicas da Formação Serra Geral. Esse aquífero tem como principais condicionantes o solo (tipo e espessura), a topografia, a litologia (tipo, composição e estruturação da rocha) e o clima (REGINATO, 2003). Conforme o modelo conceitual a água armazenada nesse aquífero livre infiltra e circula pelas fraturas, que atuam como vias de água para a zona saturada do SASG (BORTOLIN, 2018; HAUSMAN, 1966; REGINATO, 2003).

Por outro lado, o aquífero do tipo fraturado, no modelo conceitual do SASG, está condicionado à Formação Serra Geral, apresentando circulação da água em estruturas tectônicas, que podem apresentar ou não influência das estruturas primárias. A circulação e armazenamento da água subterrânea nas rochas da Formação Serra Geral ocorrem nas fraturas oriundas das disjunções horizontais, dos contatos entre derrames e nas zonas vesiculares e amigdaloides, sendo as zonas de fraturas abertas verticais e sub-verticais, que transpassam os diferentes derrames, a trajetória para percolação da água até a zona de saturação (FREITAS, 2016; REGINATO *et al.*, 2015).

No contexto das bacias hidrográficas urbanas estudadas, o SASG apresenta os aquíferos do tipo poroso e fraturado. O fraturado possui as direções de lineamento NE-SW e NW-SE como as estruturas com maior potencialidade hídrica

subterrânea, as quais coincidem com as direções de fraturas subverticais NE-SW e NW-SE, que juntamente com as fraturas sub-horizontais, apresentam a maior circulação de água (DE VARGAS *et al.*, 2022). Na região de Caxias do Sul é reconhecido que o SASG possui 71% dos poços tubulares explorando vazões abaixo de  $10 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , 18% entre  $10$  e  $20 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  e 11 % superior a  $20 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  (DE VARGAS *et al.*, 2018).

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. Critérios e subcritérios

A seleção dos critérios do meio físico densidade de lineamentos (*DL*), densidade de drenagem (*DD*), forma do terreno (*FT*), uso e cobertura do solo (*USCS*), tipo do solo (*TS*) e declividade do terreno (*DT*) foi baseada em Bortolin (2018). Esse autor delineou as zonas potenciais de recarga em uma bacia hidrográfica de contexto climatológico, geológico e hidrogeológico similar ao existente na área de estudo desta pesquisa e demonstrou que esses seis critérios representaram satisfatoriamente a realidade do meio físico em relação às zonas potenciais de recarga. A litologia não foi incluída como critério porque a região de estudo não possui variação litológica em sua extensão. Todos os critérios foram trabalhados no *Software ArcGIS Pro 2.8.* e as bases raster utilizadas possuem resolução espacial igual a 1 metro.

A *DL* foi determinada através dos mapas de lineamentos geológicos, onde considerou-se o comprimento total dos lineamentos ( $L_i$ ) dividido pela área do grid ( $A$ ),  $DL = \sum_{i=1}^n \left(\frac{L_i}{A}\right)$ . Esses mapas foram elaborados utilizando modelo digital de terreno (MDT) *Light Detecting and Ranging* (LIDAR) (CAXIAS DO SUL, 2013), com ângulo de sombreamento de  $45^\circ$  (*Hillshade*) para as direções  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  e  $135^\circ$ , na escala 1:30.000. A partir dos mapas de lineamentos geológicos foi

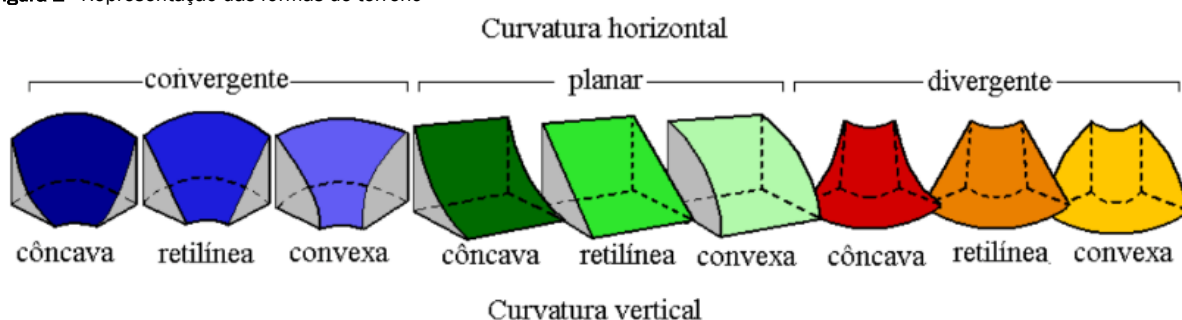
calculada a densidade através da ferramenta *LineDensity*. Foram observadas 10 classes de intervalos de densidade ( $\text{km}/\text{km}^2$ ): 0-3, 3-6, 6-9, 9-12, 12-15, 15-18, 18-21, 21-24, 24-27 e  $>27$ , adaptadas de Kaliraj *et al* (2014), sendo empregadas como subcritérios da *DL*.

A *DD* corresponde ao comprimento total dos rios ( $D_i$ ) dividido pela área do grid ( $A$ ),  $DD = \sum_{i=1}^n \left(\frac{D_i}{A}\right)$ . As drenagens foram vetorizadas utilizando imagem aerofotogramétrica (ano 2013) com tamanho de pixel de 10 cm (CAXIAS DO SUL, 2013) e calculadas na ferramenta *LineDensity*. Os três intervalos de classes ( $\text{km}/\text{km}^2$ ) identificados  $< 7,5$  (baixo),  $7,5-10,0$  (médio) e  $>10,0$  (alto) (CHRISTOFOLETTI, 1969) foram utilizados como subcritérios da *DD*.

A *DT* foi obtida através do MDT-LIDAR (CAXIAS DO SUL, 2013), calculando a variação máxima da altitude que ocorre na distância definida entre cada célula e seus vizinhos. Os intervalos de declividade foram divididos em seis subcritérios (%): 0-3 (plano), 3-8 (suave-ondulado), 8-20 (ondulado), 20-45 (forte-ondulado), 45-75 (montanhoso) e  $>75$  (escarpado) (EMBRAPA, 1999).

A *FT* foi estabelecida com base no MDT-LIDAR (CAXIAS DO SUL, 2013) e através da integração de duas variáveis, a curvatura horizontal (que determina a divergência ou convergência das linhas de fluxo) e a curvatura vertical (que determina o caráter côncavo ou convexo do terreno, dando o formato da vertente), gerando nove formas de terreno (VALERIANO; JÚNIOR, 2003) que foram utilizadas como subcritérios (Figura 2). Os casos extremos dessas feições são representados pela forma côncavo-convergente (onde há máxima concentração e acúmulo do escoamento) e pela forma convexo-divergente (máxima dispersão do escoamento) (PHILIP, 1991a, 1991b).

Figura 2 - Representação das formas de terreno



Fonte: Adaptado de Valeriano (2008).

O *USCS* foi vetorizado utilizando imagem aerofotogramétrica com tamanho de pixel de 10 cm (CAXIAS DO SUL, 2013), escala 1:1.000, e foram identificados cinco subcritérios: agricultura, açude, campo, edificações e mata. A identificação do *TS* foi baseada em Flores *et al.* (2007), escala 1:50.000, e a caracterização hidrológica dele em Sartori *et al.* (2005), que apresenta quatro subcritérios: A, B, C e D. Esses grupos refletem uma condição de potencial de escoamento e taxa de

infiltração, sendo “A” o solo com maior taxa de infiltração e “D” com a menor. As características que definem cada grupo estão baseadas na profundidade, permeabilidade, textura e razão textural do solo (SARTORI; NETO; GENOVEZ, 2005).

#### 3.2. Análise Hierárquica de Processo

O método de Análise Hierárquica de Processo (AHP) é usado

para derivar escalas de razão de comparações pareadas discretas e contínuas, sendo considerado uma teoria geral de medição (SAATY, 1987). Nesse método é preciso determinar o problema de decisão multicritério que deve ser avaliado e, com base nisso, definir quais são os fatores relevantes para a análise. A AHP organiza esses fatores hierarquicamente como

critérios, subcritérios e outros níveis sucessivos (SAATY, 1990), estabelecendo relações de pares dentro da estrutura (SAATY, 1987). Para a determinação da influência de cada critério é utilizada a escala padrão de 1 a 9, onde 1 representa igualdade e 9 a influência extrema em comparação ao outro critério (SAATY, 1987, 1990) (Tabela 2).

**Tabela 2** - Escala padrão da relação de influência entre os critérios.

Extremo	Muito Forte	Forte	Moderado	Igual	Moderado	Forte	Muito Forte	Extremo
1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9
← Menos importância					Mais importância →			

Fonte: T. L. Saaty (1980, 1990) e Zghibi et al. (2020)

Nota: 1/8, 1/6, 1/4, 2, 4, 6, 8 também podem ser usados se existirem mais classes.

A partir da pontuação da escala padrão é elaborada a matriz de comparação pareada (A),  $A = (m \times m)$ , entre os critérios ou subcritérios, sendo ordenada a importância do critério como decrescente e baseada no conhecimento de especialistas (LENTSWE; MOLWALEFHE, 2020). O primeiro critério, normalmente, é considerado o mais importante e deve ser atribuída a pontuação 1, quando comparado a si mesmo. Essa comparação é realizada entre o fator-linha e o fator-coluna. O fator-linha recebe o valor de escala, enquanto o fator-coluna considera uma relação inversa da intensidade, constituindo uma noção de reciprocidade (ZGHIBI et al., 2020). Por outro lado, existe o processo de normalização, que a partir da média de cada critério normalizado é identificada a prioridade relativa (PR) (SAATY, 1990). A PR indica a ordem de importância dos critérios ou subcritérios em relação ao problema de decisão

multicritério e a soma dos valores de PR para cada subcritério ou de todos os critérios têm que ser 1 (representando 100%).

Outro passo importante na AHP é avaliar a Razão de Consistência (RC) do julgamento entre os critérios e subcritérios analisados, que deve apresentar escore inferior a 0,1 (SAATY, 1994). O RC é o produto da razão entre o Índice de Consistência (IC) e o Índice de Consistência Randômico (IR), sendo o IR um escore tabelado conforme a ordem da matriz (n), Tabela 3, (SAATY, 1980). O IC é a razão da diferença entre o valor *Eigen Principal*  $\lambda_{max}$  e o número de fatores sob investigação de (n) a (n-1), sendo representado pela equação  $IC = |\lambda_{max} - n| / (n - 1)$ , enquanto o RC é representado por  $RC = IC / IR$ .

**Tabela 3** - Índice de consistência randômico, onde n representa a ordem da matriz. Fonte: T. L. Saaty (1980).

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
IR	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45

### 3.3. Modelagem cartográfica

Os mapas temáticos correspondentes a cada critério avaliado e com os respectivos pesos atribuídos foram sobrepostos utilizando modelagem cartográfica (álgebra de mapas), resultando no mapa síntese das zonas potenciais de recarga (ZPR). A álgebra de mapas corresponde a um *script* em linguagem bem definida (LONGLEY et al., 2013), que neste estudo foi baseado e adaptado de publicações relacionadas ao tema recarga (ARULBALAJI; PADMALAL; SREELASH, 2019; ESRI, 2022; LENTSWE; MOLWALEFHE, 2020) e aplicado com o auxílio do software ArcGIS Pro 2.8, resultando na equação  $ZPR = \sum X_i * W_x$ , onde  $X_i$  representa a camada de critério e o  $W_x$  corresponde ao peso da camada de critério.

As ZPR's da água subterrânea foram definidas em três níveis de classificação: baixo, moderado e elevado (LENTSWE; MOLWALEFHE, 2020; MANZIONE; SILVA; PAES, 2021). A validação dessa classificação foi realizada através da sobreposição do mapa de nascentes (área de descarga) ao mapa de ZPR (BORTOLIN, 2018). A fundamentação vetorial de nascentes foi desenvolvida utilizando MDT-LIDAR, imagem

aerofotogramétrica com tamanho de pixel de 10 cm, escala 1:1.000, (CAXIAS DO SUL, 2013) e aferições de nascentes em campo utilizando o sistema de posicionamento global (GPS) com receptores de dupla frequência (L1/L2).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Mapa do critério densidade de lineamentos

Os lineamentos são indicadores de áreas com aumento de porosidade e permeabilidade secundária, tornando-se bons referenciais para zonas de fluxo e acumulação de águas subterrâneas; a densidade de lineamentos pode inferir uma zona potencial de recarga (KUMAR; GOPINATH; SERALATHAN, 2007; ZGHIBI et al., 2020). Nas bacias estudadas, notoriamente, as maiores densidades estão associadas as direções NE-SW e NW-SE (Figura 3), sendo essas direções dominantes como reservatórios de água subterrânea na região de estudo (DE VARGAS et al., 2022).

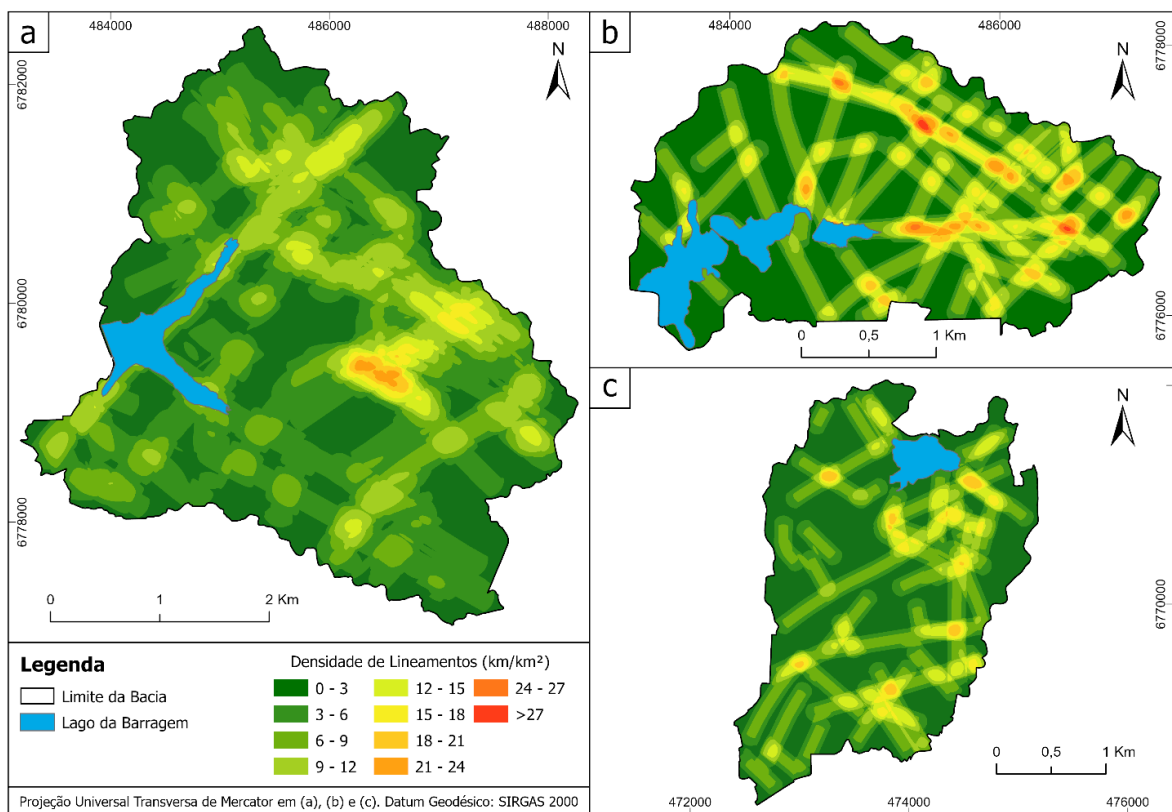
Os valores dos pesos atribuídos aos subcritérios, que constituem a DL, aumentam a influência sincronicamente a

elevação do intervalo de densidade, variando de 0,014 (0-3 km/km<sup>2</sup>) até 0,275 (> 27 km/km<sup>2</sup>) (Tabela 4). Essa configuração de pesos apresentou RC igual a 0,076, validando o julgamento dos subcritérios. A análise da *DL* considerou 10 subcritérios, sendo observada a predominância dos subcritérios com intervalos de 0 a 6 (km/km<sup>2</sup>), entre 49,3 e 62,2%, para as três bacias hidrográficas.

Estudo realizado na Bacia superior de Vaigai (Tamil Nadu, Índia) identificou os intervalos de densidade entre 0 e 6 (km/km<sup>2</sup>) como áreas moderadas ou não adequadas à recarga, enquanto intervalos acima de 14,7 km/km<sup>2</sup> foram

considerados como zonas potenciais de recarga (KALIRAJ; CHANDRASEKAR; MAGESH, 2014). Na bacia Maestra (Figura 3a) é observada uma concentração dos intervalos maiores que 15 km/km<sup>2</sup> nas regiões centro, leste e norte (1,7%). O mesmo comportamento é observado na bacia Dal Bó (8%), porém alguns pontos com densidade superior a 27 km/km<sup>2</sup> foram identificados (Figura 3b). Por outro lado, a bacia Samuara concentra uma maior densidade (> 15 km/km<sup>2</sup>) nas porções leste e sul, 3,3% (Figura 3c). Portanto, as bacias mostram áreas reduzidas com densidade de lineamentos satisfatória para recarga do aquífero.

**Figura 3** - Mapa de densidade de lineamentos das três bacias hidrográficas estudadas. (a) Maestra, (b) Dal Bó e (c) Samuara



#### 4.2. Mapa do critério densidade de drenagem

A rede de drenagem de uma região é dependente da litologia (ARULBALAJI; PADMALAL; SREELASH, 2019) e sofre a influência de diversos fatores, como as condições climáticas, a capacidade de infiltração, a cobertura vegetal, a rugosidade da superfície e a intensidade de *runoff* (ZGHIBI *et al.*, 2020). A densidade de drenagem tem sido um critério relevante na avaliação de zonas potenciais de recarga, pois quanto maior essa densidade, menor será a infiltração de água no solo (BENJMEL *et al.*, 2020).

Os valores dos pesos atribuídos aos subcritérios que compõem a *DD* diminuem a influência ao passo que aumenta a densidade, variando de 0,750 (0-7,5 km/km<sup>2</sup>) até 0,087 (> 10 km/km<sup>2</sup>) (Tabela 4). Essa configuração de pesos apresentou RC igual a 0,005, validando o julgamento dos subcritérios.

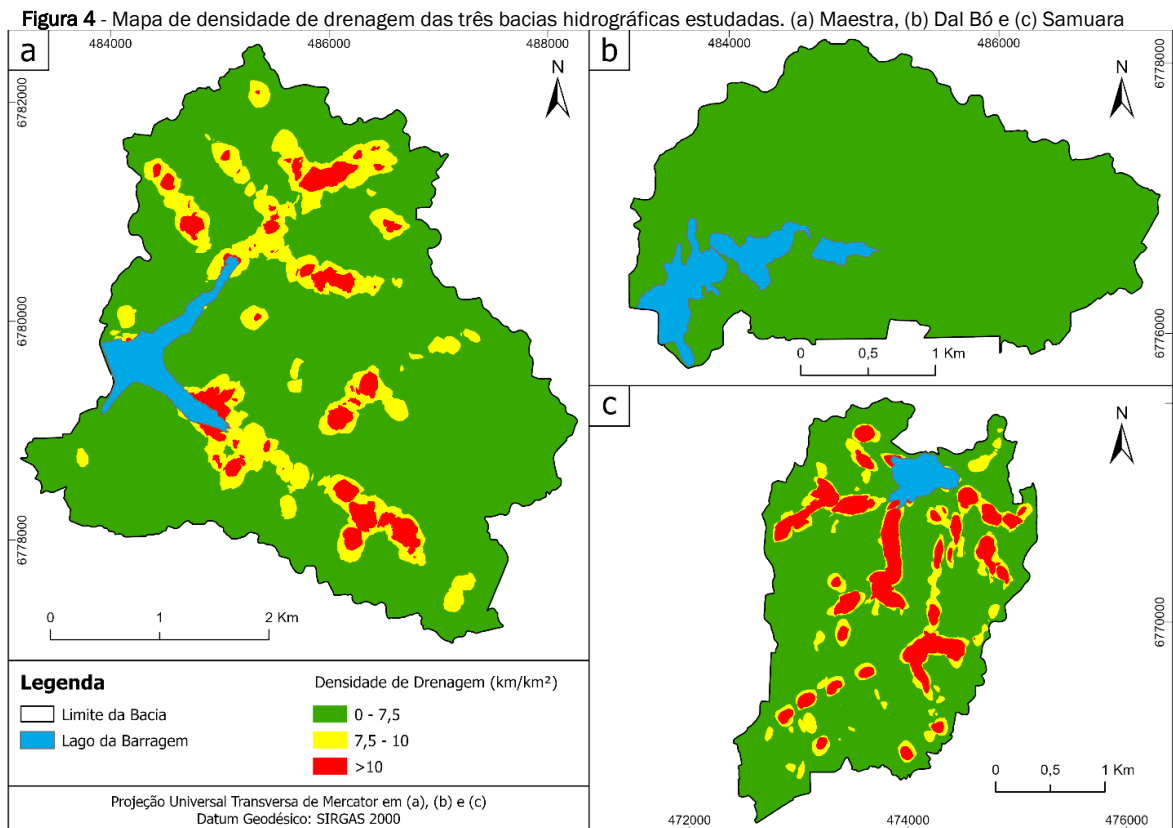
A *DD* apresenta o intervalo 0-7,5 (km/km<sup>2</sup>) como dominante nas três bacias hidrográficas, variando entre 75,3 e 100% das áreas, assim, classificando a maior parte das bacias como baixa densidade de drenagem, que contribui para um bom potencial de recarga.

Na parte norte e central da bacia Maestra foi observada uma maior *DD* (Figura 4a) com distribuição espacial coincidente aos valores de maior *DL* observadas na Figura 3a, porém na porção sul não fica clara essa relação. Essa relação, também, ocorre na bacia Samuara, nas porções norte-nordeste (Figura 4c), enquanto nos outros setores da bacia essa associação (drenagem-lineamento) é incipiente quando comparada com a Figura 3c. Por outro lado, a bacia Dal Bó só apresenta um intervalo de *DD* (0-7,5 km/km<sup>2</sup>), Figura 4b. A coincidência entre as áreas com maior *DD* e *DL* pode ter relação com o sistema de fraturas do tipo riacho-fenda (SÁ *et al.*, 2008), já



identificado no município de Caxias do Sul por (SGORLA *et al.*, 2022). Neste caso, a média e a alta densidade de drenagem

relacionadas as estruturas de lineamentos podem favorecer a recarga de aquíferos fraturado.



### 4.3. Mapa do critério uso e cobertura do solo

O uso e cobertura do solo é um critério essencial no processo de recarga, pois fornece informações sobre a infiltração, umidade do solo, escoamento superficial e a água subterrânea (ARULBALAJI; PADMALAL; SREELASH, 2019). As florestas, campos e terras agrícolas proporcionam maior tendência de recarga (KALIRAJ; CHANDRASEKAR; MAGESH, 2014; ZGHIBI *et al.*, 2020), enquanto solos descobertos, afloramentos rochosos, mineração e a urbanização diminuem o potencial de recarga (GONÇALVES; PEREIRA; VIEIRA, 2020; KUMAR; GOPINATH; SERALATHAN, 2007).

O USCS apresenta cinco subcritérios que possuem uma variação dos pesos atribuídos entre 0,036 e 0,489, sendo homologado pelo RC igual a 0,034 (Tabela 4). Os subcritérios, mata e campo, são destaques devido ao peso de influência, associado a área de abrangência deles nas três bacias, entre 78,1 e 89,4% das áreas (Figura 5). As bacias Maestra e Dal Bó apresentam avanço da urbanização nos setores leste/sudeste e possuem uma porcentagem urbanizada maior do que a observada na bacia Samuara, 11,7, 13,5 e 3,9%, respectivamente; isso mostra uma urbanização que avança nas regiões de

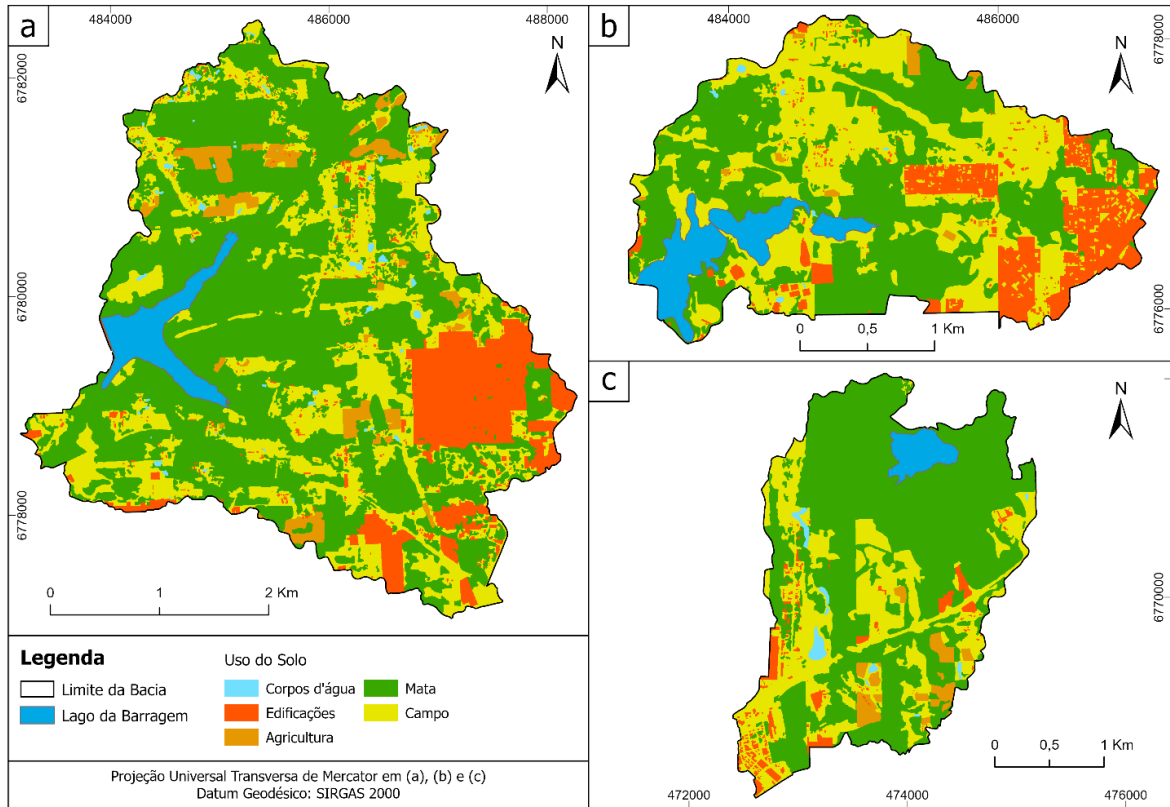
cabeceira de drenagem e a interferência antrópica maior nas duas primeiras bacias. Portanto, esse avanço corrobora para a redução do potencial de recarga nas bacias Maestra e Dal Bó.

### 4.4. Mapa do critério tipo de solo

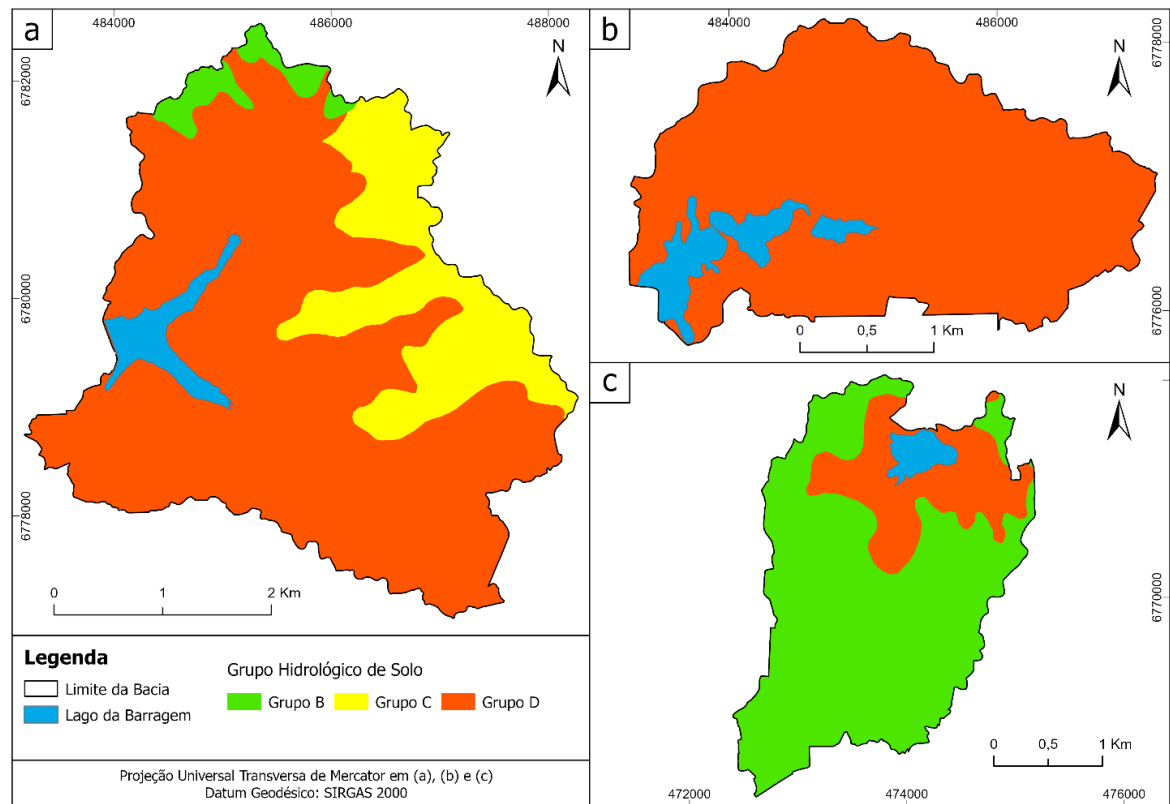
O TS mostra uma influência decrescente do subcritério B (0,581) para o D (0,110) e autenticação do RC igual a 0,020 (Tabela 4). A distribuição do subcritério D é predominante na bacia Maestra (77,8%), sendo os subcritérios C (19%) e B (3,2%) restritos as porções nordeste e norte (Figura 6a). Já a bacia Dal Bó é totalmente composta pelo subcritério D (Figura 6b). Por outro lado, a bacia Samuara inverte essa dominância mostrando prevalência do subcritério B (76,2%) em relação ao D (23,8%), Figura 6c.

A bacia Samura apresenta maior facilidade de infiltração de água (solo "B"), enquanto as bacias Maestra e Dal Bó (solo "D") mostram potencial menor para a recarga. Conforme (ARULBALAJI; PADMALAL; SREELASH, 2019), a textura e as características hidráulicas são os principais fatores que influenciam na taxa de infiltração de água no solo.

**Figura 5** - Mapa de uso e cobertura do solo das três bacias hidrográficas estudadas. (a) Maestra, (b) Dal Bó e (c) Samuara



**Figura 6** - Mapa do tipo de solo das três bacias hidrográficas estudadas. (a) Maestra, (b) Dal Bó e (c) Samuara





#### 4.5. Mapa do critério declividade do terreno

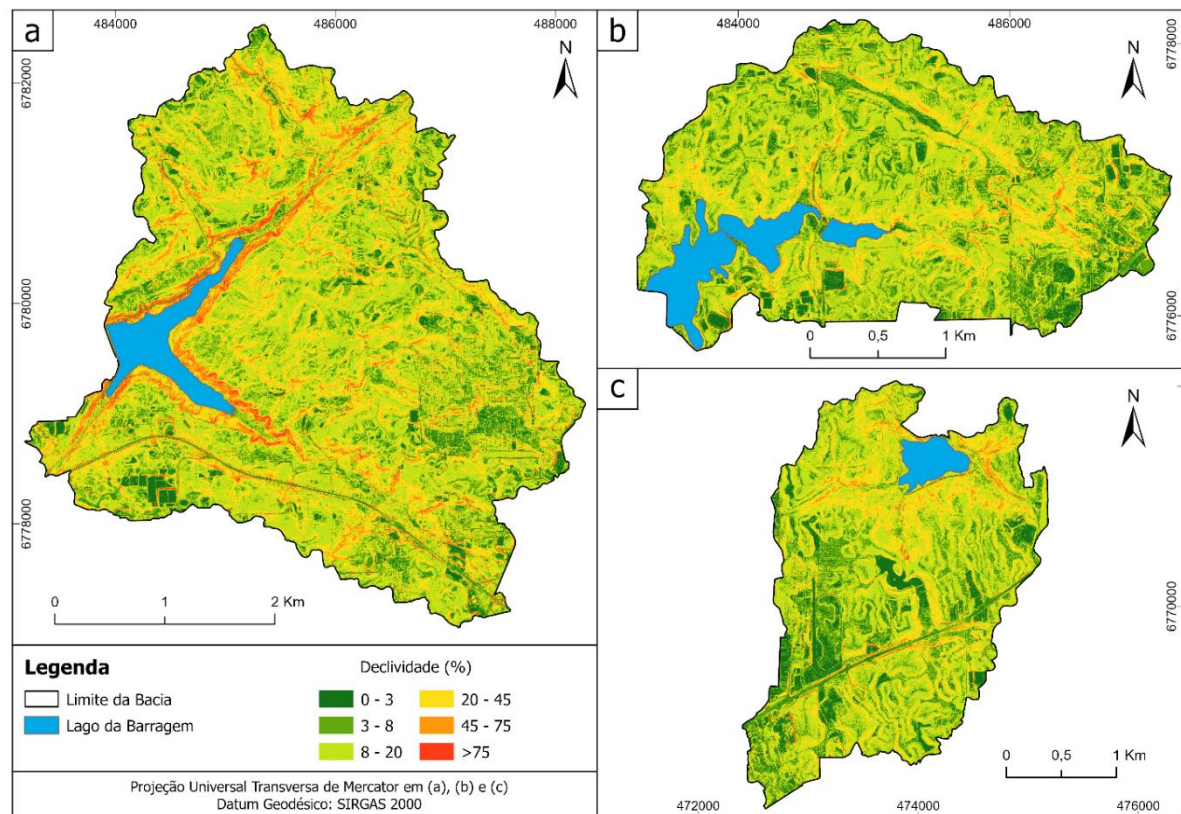
A declividade do terreno é considerada um fator com grande influência na infiltração da água no solo (DAR; RAI; BHAT, 2021), pois a taxa de infiltração está relacionada com a capacidade da superfície do terreno em reter a água no solo (DEEPA et al., 2016) e quanto menor a declividade, maior o potencial de recarga (MAGESH; CHANDRASEKAR; SOUNDHRANAYAGAM, 2012).

Os subcritérios que compõem o DT decrescem conforme aumenta a declividade do terreno, ocorrendo menor influência na recarga em locais com maior inclinação, os pesos atribuídos variam de 0,467 (0-3%) a 0,032 (> 75%) e o RC foi igual a 0,046 (Tabela 4). A bacia Maestra apresenta a menor percentagem de área com declividade até 8% (23%), enquanto Dal Bó (34%) e Samuara (33%) possuem extensões mais

representativa de relevo suave. Por outro lado, a declividade do terreno entre 8 e 45% são observadas em porcentagens majoritárias das áreas na Maestra (68,2%), Dal Bó (63,4%) e Samuara (63,6%). As maiores declividades (> 45%) são características em trechos de talvegue e cortes de estrada, variando entre 8,7 e 2,5% das áreas das bacias (Figura 7).

A maior porcentagem de declividades suaves nas bacias Dal Bó e Samuara elevam o potencial de recarga, quando comparadas com a Maestra. Essa maior suavização do terreno está relacionada com o domínio geomorfológico Planalto dos Campos Gerais que apresenta um menor grau de dissecação, quando comparado com o domínio Serra Geral que apresenta características de relevo mais acidentado (LISBOA; REMUS; DANI, 2003). Ambos os domínios estão presentes na área de estudo e afetam a declividade observada nas bacias estudadas.

Figura 7 - Mapa de declividade das três bacias hidrográficas estudadas; (a) Maestra, (b) Dal Bó e (c) Samuara

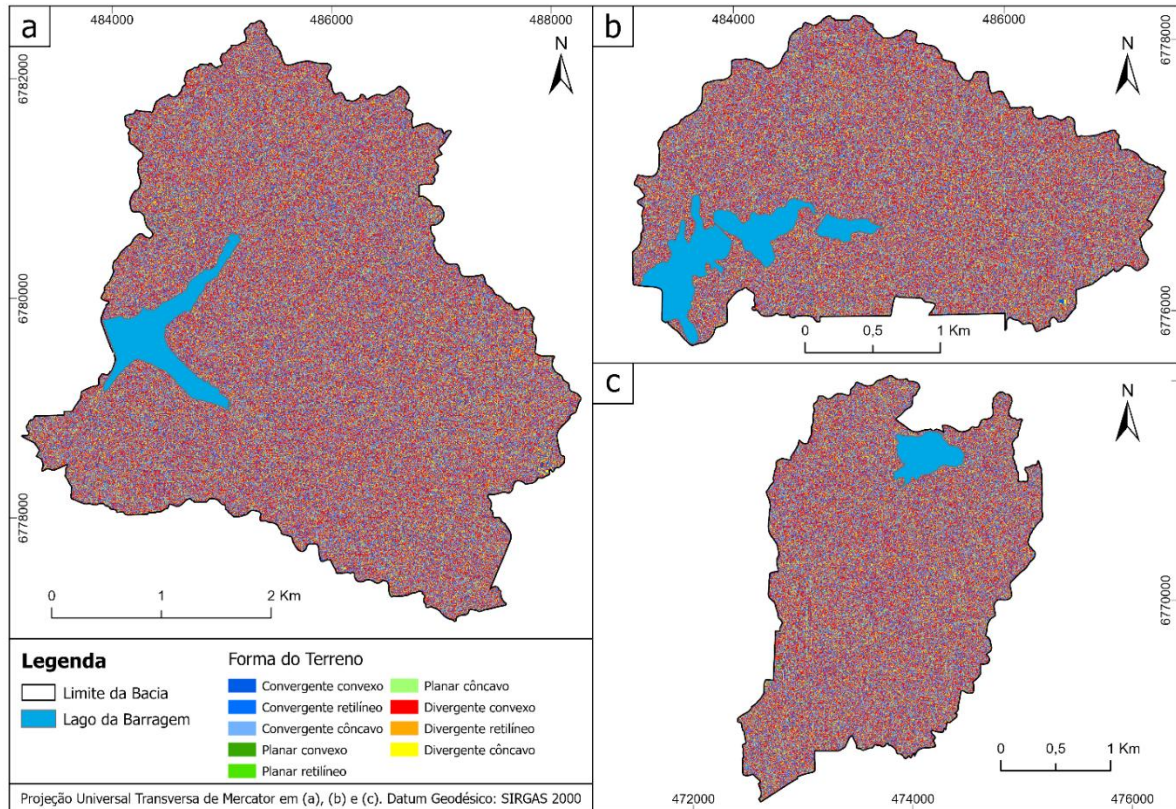


#### 4.6. Mapa do critério forma do terreno

A forma do terreno representa o perfil natural da superfície e pode ser côncavo ou convexo, gerando uma tendência de acumulação e desaceleração, respectivamente (ARULBALAJI; PADMALAL; SREELASH, 2019). O critério FT apresenta nove subcritérios com influência de pesos entre 0,256

(Convergente côncavo) e 0,035 (Divergente convexo), com um RC igual a 0,007 (Tabela 4). Nas três bacias hidrográficas os subcritérios mais representativos e com porcentagens similares de área foram os Convergente côncavo (34%), Convergente convexo (15%), Divergente côncavo (15%) e Divergente convexo (35%), sendo os demais subcritérios distribuídos em 1% das áreas (Figura 8).

**Figura 8** - Mapa da forma do terreno das três bacias hidrográficas estudadas. (a) Maestra, (b) Dal Bó e (c) Samuara



#### 4.7 Mapa das zonas potenciais de recarga da água subterrânea

A influência de cada critério utilizado na modelagem cartográfica das ZPR considerou o modelo hidrogeológico conceitual do SASG para determinar o peso normalizado (Tabela 4). Para os critérios *FT* (0,353) e *DT* (0,260) foram verificados os maiores pesos, devido a expressiva influência que a curvatura e a declividade do terreno exercem no processo de infiltração da

água no solo. Os critérios *USCS* (0,179) e *TS* (0,109) também representam uma influência relevante na percolação da água. Esses quatro critérios possuem características que afetam os dois tipos de aquíferos (poroso e fraturado) observados no SASG e por esse motivo são mais significativos. Por outro lado, os critérios *DL* (0,068) e *DD* (0,031) apresentam uma influência menor por terem uma relação intrínseca com o aquífero fraturado. O modelo cartográfico foi validado com RC igual a 0,016.

**Tabela 4** - Pesos atribuídos para cada critério e subcritério utilizados na elaboração do ZPR

(continua)

Nome do critério	Critério: peso normalizado	Subcritério	Subcritério: peso normalizado	Subcritério RC
<i>DL</i> (km/km <sup>2</sup> )	0,068	>27	0,275	0,076
		24-27	0,199	
		21-24	0,160	
		18-21	0,120	
		15-18	0,092	
		12-15	0,057	
		9-12	0,039	
		6-9	0,025	
		3-6	0,018	
		0-3	0,014	
<i>DD</i> (km/km <sup>2</sup> )	0,031	0-7,5	0,750	0,005
		7,5-10	0,162	
		>10	0,087	

**Tabela 4** - Pesos atribuídos para cada critério e subcritério utilizados na elaboração do ZPR

(conclusão)

Nome do critério	Critério: peso normalizado	Subcritério	Subcritério: peso normalizado	Subcritério RC
FT	0,353	Convergente côncavo	0,256	0,007
		Convergente retilíneo	0,161	
		Convergente convexo	0,093	
		Planar côncavo	0,161	
		Planar retilíneo	0,093	
		Planar convexo	0,054	
		Divergente côncavo	0,093	
		Divergente retilíneo	0,054	
		Divergente convexo	0,035	
USCS	0,179	Mata	0,489	0,034
		Agricultura	0,242	
		Campo	0,177	
		Corpos d'água	0,056	
		Edificações	0,036	
TS	0,109	B	0,581	0,020
		C	0,309	
		D	0,110	
DT (%)	0,26	0-3	0,467	0,046
		3-8	0,250	
		8-20	0,149	
		20-45	0,064	
		45-75	0,036	
		>75	0,032	
Critério RC = 0,016				

\*Razão de consistência (RC)

As ZPR identificadas apresentam porcentagens similares nas três bacias hidrográficas (Tabela 5). As ZPR classificadas como elevado ocupam de 15,43 a 20,46% das bacias estudadas e são as mais propícias para a infiltração da água. Por outro lado, as classificações baixo e moderado são predominantes e somadas representam 84,57% (Samuara), 82,02% (Dal Bó) e 79,54% (Maestra), sendo essas as áreas com menor tendência de recarga e maior aptidão para descarga hídrica (Figura 9). (BORTOLIN, 2018) desenvolveu estudo para

potencial de recarga no SASG, escala 1:50.000, em uma área da bacia hidrográfica Taquari-Antas (Rio Grande do Sul), e observou que 22,4% da área é equivalente ao potencial elevado, enquanto que a soma das áreas dos potenciais moderado e baixo representam 77,6%. Esses valores são muito similares aos identificados neste estudo, confirmando um potencial de recarga reduzido para o sistema aquífero poroso e fraturado do SASG.

**Tabela 5** - Apresenta os quantitativos percentuais das ZPR nas bacias Samuara, Dal Bó e Maestra

Bacia	Zonas potenciais de recarga (%)		
	Baixo	Moderado	Elevado
Samuara	40,8	43,7	15,5
Dal Bó	44,7	37,3	18,0
Maestra	36,6	42,9	20,5

A validação do mapa das ZPR considerou as porcentagens de nascentes (%) identificadas nas zonas classificadas como baixa e moderada. A bacia Samuara apresentou a maior porcentagem de nascentes nessas zonas (94,4%), seguida da Maestra (71,4%) e Dal Bó (57,1%), mostrando um alto índice

de consistência do modelo cartográfico (Tabela 6). Esse alto índice de nascentes nas zonas baixa e moderada também foram observadas por (BORTOLIN, 2018), que quantificou 85,7% das nascentes nessas zonas.

**Tabela 6** - Apresenta os quantitativos percentuais de nascentes para cada ZPR, nas bacias Samuara, Dal Bó e Maestra

Nº total de nascentes	Porcentagem de nascentes (%)			
	Baixo	Moderado	Elevado	Baixo + Moderado
36	63,9	30,6	5,6	94,4
35	34,3	22,9	42,9	57,1
168	35,1	36,3	28,6	71,4

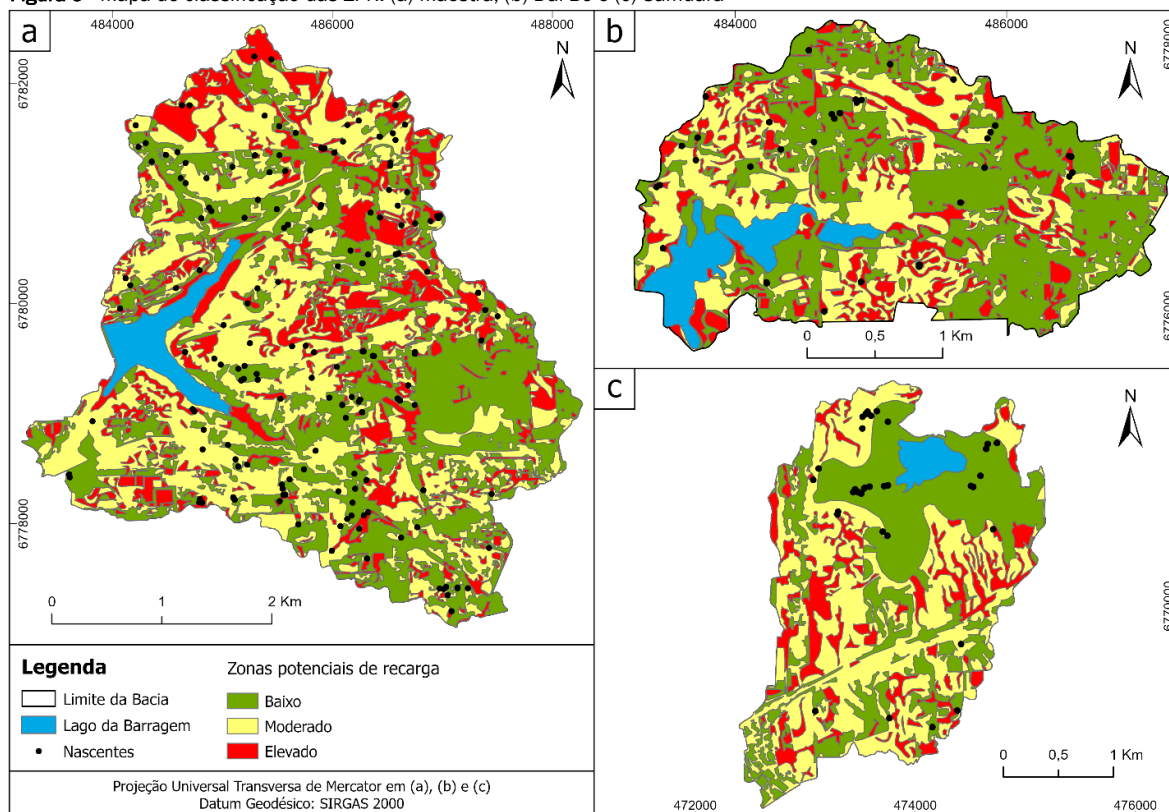
Na bacia Samuara as nascentes apresentam maior associação aos critérios *TS* (subcritério D), *USCS* (subcritérios mata e campo) e *DT* (subcritério 3-8%). Característica similar é observada na bacia Dal Bó, em relação aos critérios *TS* e *USCS*, porém para o critério *DT* observa-se uma associação maior ao subcritério 8-20%. A menor porcentagem de nascentes nas zonas baixa e moderada, na bacia Dal Bó, pode ter relação com a urbanização acentuada, que elimina a possibilidade de identificá-las. A bacia Maestra segue a mesma tendência de associação das nascentes para *USCS* (subcritérios mata e campo), entretanto os critérios *TS* (subcritério D e C) e *DT* (subcritério 20-45%) mostram diferentes subcritérios com maior relação com as nascentes. A diferença observada na quantidade de nascentes relacionadas aos subcritérios da *DT* pode estar relacionada ao grau de dissecação do relevo, entre os domínios geomorfológicos Planalto dos Campos Gerais (menos dissecado) e Serra Geral (mais dissecado), sendo o primeiro dominante na bacia Samuara, o segundo preponderante na bacia Maestra e ambos em equivalência na bacia Dal Bó. A distribuição das nascentes sobre as ZPR pode ser visualizada na Figura 9.

esta o potencial elevado prevalece no setor norte e centro-nordeste denotando uma área de cabeceira de drenagem com maior fragilidade ambiental, enquanto o potencial moderado predomina na parte oeste, atingindo áreas proximais ao reservatório (Figura 9a). Por outro lado, o potencial baixo apresenta maior influência no setor leste, onde coincide com outra cabeceira de drenagem que possui uma considerável presença urbana (Figura 5a).

Na Figura 9b, a bacia Dal Bó demonstra uma maior heterogeneidade na disposição do potencial elevado, estando presente de forma subordinada por toda a bacia, enquanto o potencial moderado ocorre, principalmente, nas proximidades do reservatório. Em contrapartida, o potencial baixo é dominante na bacia, sendo preponderante no setor leste e parte do setor norte, onde existe uma maior interferência antrópica (Figura 5b). A bacia Samuara mostra uma maior concentração das áreas de potencial elevado ao longo das bordas limites da bacia, com algumas áreas dispersas ao centro (Figura 9c). Enquanto o potencial moderado é predominante, exceto no entorno do reservatório da represa, que é dominado pelo potencial baixo.

O arranjo da classificação das ZPR mostra que na bacia Ma-

**Figura 9** - Mapa de classificação das ZPR. (a) Maestra, (b) Dal Bó e (c) Samuara





As áreas classificadas como elevado potencial de recarga apresentam a influência marcante da DT e FT, enquanto para o baixo potencial o USCS e o TS exercem uma importância relevante. Portanto, essas zonas mostram um expressivo significado para a recarga do aquífero livre que, conforme modelo conceitual do SASG (HAUSMAN, 1995; REGINATO, 2003), drena parte da água subterrânea para o aquífero fraturado e outra parte às nascentes que fornecem água aos reservatórios das bacias Maestra, Dal Bó e Samuara.

## 5. CONCLUSÃO

Este estudo mostrou as zonas potenciais de recarga que, conseqüentemente, são locais com maior fragilidade a modificações do meio físico e devem ser consideradas no planejamento do uso do solo de bacias de captação utilizadas no abastecimento público de água. Os critérios Forma do Terreno, Declividade do Terreno, Uso e Cobertura do Solo e o Tipo do Solo foram os mais influentes na caracterização das zonas potenciais de recarga e devem receber uma atenção maior.

Nos locais de estudo, os percentuais de áreas ocupadas pelas zonas potenciais de recarga elevada, moderada e baixa são similares nas bacias Samuara, Dal Bó e Maestra, porém a localização espacial dessas zonas é singular para cada bacia. Os modelos cartográficos de classificação das zonas potenciais de recarga mostram que os critérios escolhidos e a relação de importância entre eles representam satisfatoriamente ao ambiente físico identificado na região de estudo, principalmente ao aquífero livre que é o responsável pela manutenção hídrica das represas Maestra, Dal Bó e Samuara. Também, mostram que as nascentes podem ser uma ferramenta adequada para validação do modelo matemático cartográfico e que a análise hierárquica de processo é uma relevante opção metodológica para indicação das zonas de fragilidades do meio físico, relacionadas a recarga da água subterrânea no município de Caxias do Sul, reduzindo a subjetividade do estudo. Apesar da dificuldade de obter dados confiáveis sobre a localização das nascentes, sendo isso um limitante no desenvolvimento de estudos voltados à zonas potenciais de recarga.

O mapa das zonas potenciais de recarga é uma ferramenta importante para a gestão do uso e cobertura do solo nas bacias hidrográficas que visem a proteção das áreas com maior fragilidade e a aplicação inovadora desse mapa no âmbito da segurança hídrica pode contribuir no debate sobre a garantia do abastecimento público de água. No caso deste estudo, as zonas potenciais de recarga são agentes importantes na manutenção dos recursos hídricos utilizados no abastecimento público de água e podem influenciar a tomada de decisão dos *stakeholders* vinculados a gestão de segurança hídrica municipal.

## REFERÊNCIAS

ARULBALAJI, P.; PADMALAL, D.; SREELASH, K. GIS and AHP Techniques Based Delineation of Groundwater Potential Zones: a case study from Southern Western Ghats, India. *Scientific Reports*, v. 9, n. 1, p. 1–17, 2019.

<http://dx.doi.org/10.1038/s41598-019-38567-x>.

BELLADONA, R.; DE VARGAS, T. Space-time Precipitation Distribution and the Relevance of the Orography of Caxias do Sul, Brazil. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 69/3, p. 607–620, 2017.

BELLIENI, G. et al. High- and low-Ti flood basalts from the Paraná plateau (Brazil): petrology and geochemical aspects bearing on their mantle origin. *N. Jh. Miner.*, v. 150, p. 273–306, 1984.

BELLIENI, G. et al. Petrogenetic aspects of acid and basaltic lavas from the Paraná Plateau (Brazil): geological, mineralogical and petrochemical relationship. *Journ. of Petrol*, v. 27 (4), p. 915–944, 1986.

BENJMEI, K. et al. Mapping of groundwater potential zones in crystalline terrain using remote sensing, GIS techniques, and multicriteria data analysis (Case of the ighrem region, Western Anti-Atlas, Morocco). *Water (Switzerland)*, v. 12, n. 2, p. 1–16, 2020.

BORTOLIN, T. A. *Estudo da recarga do Sistema Aquífero Serra Geral na bacia hidrográfica Taquari-Antas*. 2018. 220 f. - Federal University of Rio Grande do Sul, 2018.

CAXIAS DO SUL. *Aerophotogrammetric image*. 2013.

Disponível em:

<https://geopublico.caxias.rs.gov.br/geocaxias/map?config=src/webgis/config/map/config-all.xml>.

CAXIAS DO SUL. *Light detecting and ranging*, 2013.

Disponível em: <https://geopublico.caxias.rs.gov.br/geocaxias>.

CHOWDHURY, A.; JHA, M. K.; CHOWDARY, V. M. Delineation of groundwater recharge zones and identification of artificial recharge sites in West Medinipur district, West Bengal, using RS, GIS and MCDM techniques. *Environmental Earth Sciences*, v. 59, n. 6, p. 1209–1222, 2010.

CHRISTOFOLETTI, A. Análise morfométrica das bacias hidrográficas. *Notícia Geomorfologia*, v. 9, n. 18, p. 35–64, 1969.

CPRM, (Brazilian Geological Survey). *Projeto Geoparques: Geoparque caminhos dos cânions do sul*, 2011. Disponível em:

[https://www.cprm.gov.br/publique/media/gestao\\_territorial/geoparques/canions/creditos.html](https://www.cprm.gov.br/publique/media/gestao_territorial/geoparques/canions/creditos.html). Acesso em: 16 maio 2018.

DAR, T.; RAI, N.; BHAT, A. Delineation of potential groundwater recharge zones using analytical hierarchy process (AHP). *Geology, Ecology, and Landscapes*, v. 5, n. 4, p. 292–307, 2021.

<https://doi.org/10.1080/24749508.2020.1726562>.

DE VARGAS, T. et al. Aplicação do interpolador IDW para

- elaboração de mapas hidrogeológicos paramétricos na região da Serra Gaúcha. *Scientia cum Industria*, v. 6, n. 3, p. 38–43, 2018.
- DE VARGAS, T. *et al.* Influence of geological discontinuities on the water flow of the Serra Geral Fractured Aquifer System. *Groundwater for Sustainable Development*, v. 18, n. 100780, p. 1–14, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352801X22000571?via%3Dihub>.
- DEEPA, S. *et al.* Groundwater recharge potential zones mapping in upper Manimuktha Sub basin Vellar river Tamil Nadu India using GIS and remote sensing techniques. *Modeling Earth Systems and Environment*, v. 2, n. 3, p. 1–13, 2016.
- EMBRAPA. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. Brasília, Brazil: [s. n.], 1999.
- ESRI. *ArcGIS Pro 2.8*. Versão ArcGIS Pro 2.8.5. [S. l.: s. n.], 2022.
- FETTER, C. W. *Applied Hydrogeology*. 4th. ed. New Jersey: Prentice Hall, 2001.
- FLORES, C. A. *et al.* Levantamento semidetalhado de solos: Região Serra Gaúcha - Estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Brazil: UFRGS, 2007.
- FOSTER, S.; HIRATA, R. *Determinação de risco de contaminação das águas subterrâneas*. São Paulo, Brazil: [s. n.], 1993.
- FREITAS, M. A. de. *Hidrogeoquímica e isotopia de águas com alta salinidade do Sistema Aquífero Serra Geral na Região do Alto Rio Uruguai, Brasil*. 2016. 195 f. - Federal University of Rio Grande do Sul, 2016.
- GNANACHANDRASAMY, G. *et al.* Remote Sensing and GIS Based Groundwater Potential Zone Mapping in Ariyalur District, Tamil Nadu. *Journal of the Geological Society of India*, v. 92, n. 4, p. 484–490, 2018.
- GONÇALVES, J. A. C.; PEREIRA, P. H. R.; VIEIRA, E. M. Evaluation of the groundwater recharge potential using GIS multi-criteria data analysis: a case study from district of Itabira, Minas Gerais, southeastern Brazil. *Ciência e Natura*, v. 42, n. 2020, p. e84, 2020.
- HAUSMAN, A. Comportamento do freático nas áreas basálticas do Rio Grande do Sul. *Boletim Paranense de Geografia*, v. 18/20, p. 177–215, 1966.
- HAUSMAN, A. Províncias hidrogeológicas do Estado do Rio Grande do Sul, RS. *Estudos Tecnológicos: Acta Geológica Leopoldensia*, v. Série Mapa, n. 2, p. 1–127, 1995.
- HUTTI, B. Identification of Groundwater Potential Zone using Geoinformatics in Ghataprabha basin, North Karnataka, India. *International Journal of Geomatics and Geosciences*, v. 2, n. 1, p. 91–109, 2011. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/344804322%0AI> identification.
- IBGE, (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). *Cidades e Estados: população estimada*, 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/rs/caxias-do-sul.html>. Acesso em: 7 out. 2021.
- IBGE, (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). *Produto interno bruto dos municípios*. 2022. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/caxias-do-sul/pesquisa/38/47001?tipo=ranking&indicador=47004&ano=2019>. Acesso em: 6 out. 2022.
- KALIRAJ, S.; CHANDRASEKAR, N.; MAGESH, N. S. Identification of potential groundwater recharge zones in Vaigai upper basin, Tamil Nadu, using GIS-based analytical hierarchical process (AHP) technique. *Arabian Journal of Geosciences*, v. 7, n. 4, p. 1385–1401, 2014.
- KARAMOUZ, M.; AHMADI, A.; AKHBARI, M. *Groundwater Hydrology: Engineering, Planning, and management*. 2nd. ed. [S. l.]: Taylor & Francis Group, 2020.
- KUMAR, P. K. D.; GOPINATH, G.; SERALATHAN, P. Application of remote sensing and GIS for the demarcation of groundwater potential zones of a river basin in Kerala, southwest coast of India. *International Journal of Remote Sensing*, v. 28, n. 24, p. 5583–5601, 2007.
- LENTSWE, G. B.; MOLWALEFHE, L. Delineation of potential groundwater recharge zones using analytic hierarchy process-guided GIS in the semi-arid Motloutse watershed, eastern Botswana. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, [s. l.], v. 28, n. January, p. 100674, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100674>.
- LIMA, E. F. de *et al.* Feeder systems of acidic lava flows from the Paraná-Etendeka Igneous Province in southern Brazil and their implications for eruption style. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 81, p. 1–9, 2018.
- LIMA, E. F. de *et al.* Sucessões vulcânicas, modelo de alimentação e geração de domos de lava ácidos da Formação Serra Geral na região de São Marcos-Antônio Prado (RS). *Geologia USP - Serie Científica*, v. 12, n. 2, p. 49–64, 2012.
- LISBOA, N. A.; REMUS, M. V. D.; DANI, N. *Estudo geológico e hidrogeológico regional para o aproveitamento de água do aquífero Guarani no município de Caxias do Sul*. Porto Alegre, Brazil: [s. n.], 2003.
- LONGLEY, P. A. *et al.* Sistemas, Ciência e Estudo. In: SISTEMAS E CIÊNCIAS DA INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA. 3. ed. [S. l.]: Bookman, 2013. p. 540.



- MAGESH, N. S.; CHANDRASEKAR, N.; SOUNDANAYAGAM, J. P. Delineation of groundwater potential zones in Theni district, Tamil Nadu, using remote sensing, GIS and MIF techniques. *Geoscience Frontiers*, v. 3, n. 2, p. 189–196, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gsf.2011.10.007>.
- MANZIONE, R. L.; SILVA, C. de O. F.; PAES, C. O. Groundwater recharge favorability modelling by diffuse logic paradigm. *Águas Subterrâneas*, v. 35, n. 2, p. 1–9, 2021.
- PHILIP, J. Hillslope Infiltration: Divergent and Convergent Slopes. *Water Resources Research*, v. 27, n. 6, p. 1035–1040, 1991. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/263889018%0A> Geoprocessamento.
- PHILIP, J. Infiltration and Downslope Unsaturated Flows in Concave and Convex Topographie. **Water Resources Research**, [s. l.], v. 27, n. 6, p. 1041–1048, 1991.
- PICADA, R. S. Ensaio sobre a tectônica do escudo Sul – rio – grandense: caracterização dos sistemas de falha. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 1972. [Anais...] São Paulo, Brasil: [s. n.], 1972. p. 167–191.
- PIDWIRNY, M. Introduction to the Atmosphere. In: FUNDAMENTALS OF PHYSICAL GEOGRAPHY. 2nd. ed. [S. l.: s. n.], 2006. E-book. Disponível em: <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/7d.html>.
- RAPPORTEUR, L. E. *Groundwater recharge and flow*. Washington, D.C.: National Academies Press, 2019. E-book. Disponível em: <https://www.nap.edu/catalog/25615>.
- REGINATO, P. A. R. et al. Circulação da água subterrânea nas rochas vulcânicas da Formação Serra Geral na região nordeste do Estado do Rio Grande do Sul. In: , 2015, Bento Gonçalves, Brazil. CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL, 15., 2015. [Anais...]. Bento Gonçalves, Brazil: [s. n.], 2015. p. 8. Disponível em: <http://cbge2015.hospedagemdesites.ws/trabalhos/trabalho/s/207.pdf>.
- REGINATO, P. A. R. *Integração de dados geológicos para prospecção de aquíferos fraturados em trecho da bacia hidrográfica Taquari-Antas (RS)*. 2003. 254 f. - Federal University of Rio Grande do Sul, 2003. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/117392>.
- ROISENBERG, A.; VIERO, A. P. O. Vulcanismo Mesozóico da Bacia do Paraná no Rio Grande do Sul. In: HOLZ, M.; DE ROS, F. (org.). *Geologia do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre, Brazil: CIGO/UFRGS, 2000. p. 355–374.
- ROSSATO, M. S. *Os climas do Rio Grande do Sul: variabilidade, tendências e tipologia*. 2011. 253 f. - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [s. l.], 2011.
- SÁ, E. F. J. de et al. Conceitos de análise estrutural aplicados à hidrogeologia de terrenos cristalinos. In: HIDROGEOLOGIA: CONCEITOS E APLICAÇÕES. 3. ed. Rio de Janeiro: CPRM:LABHID, 2008. p. 812.
- SAATY, T. L. How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process. *European Journal of Operational Research*, v. 48, n. 1, p. 9–26, 1990.
- SAATY, T. L. *The analytic hierarchy process : planning, priority setting, resource allocation*. [S. l.]: London : McGraw-Hill International Book Co, 1980.
- SAATY, R. W. The analytic hierarchy process-what it is and how it is used. *Mathematical Modelling*, v. 9, n. 3–5, p. 161–176, 1987.
- SAATY, T. L. To make a decision : the analytic hierarchy process. *Interfaces*, v. 24, n. 6, p. 19–43, 1994.
- SAMAE. *Recursos Hídricos*, 2021. Disponível em: <https://samaecaxias.com.br/Pagina/Index/10044>. Acesso em: 1 out. 2021.
- SARTORI, A.; NETO, F. L.; GENOVEZ, A. Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 10, n. 4, p. 5–18, 2005.
- SELVAM, S. et al. Application of remote sensing and GIS for delineating groundwater recharge potential zones of Kovilpatti Municipality, Tamil Nadu using IF technique. *Earth Science Informatics*, v. 9, n. 2, p. 137–150, 2016. <http://dx.doi.org/10.1007/s12145-015-0242-2>.
- SGORLA, V. et al. Elaboração de um mapa de lineamentos estruturais e densidade de lineamentos no município de Caxias do Sul, RS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL, 17., 2022. [Anais...]. Belo Horizonte, Brazil: [s. n.], 2022. p. em impressão. Disponível em: <https://17cbge.abge.org.br/home>.
- VALERIANO, M. D. M. *Topodata: guia para utilização de dados geomorfológicos locais*. São José dos Campos, SP: [s. n.], 2008. Disponível em: <http://mtc-m16c.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2008/07.11.19.24/doc/publicacao.pdf>.
- VALERIANO, M. D. M.; JÚNIOR, O. A. de C. Geoprocessing of Digital Elevation Models for Mapping plan Curvature in Watersheds. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 4, n. 1, p. 17–29, 2003. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/263889018%0A> Geoprocessamento.
- YEH, H. F. et al. Mapping groundwater recharge potential zone using a GIS approach in Hualian River, Taiwan. *Sustainable Environment Research*, v. 26, n. 1, p. 33–43, 2016. Disponível em:

<http://dx.doi.org/10.1016/j.serj.2015.09.005> .

ZGHIBI, A. *et al.* Using Analytical Hierarchy Process and Multi-Influencing Factors to Map Groundwater Recharge Zones in a

Semi-Arid Mediterranean Coastal Aquifer. *Water*, v. 12, n. 9, p. 2525, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/9/2525>.