Índice de pressão nos recursos hídricos da alta bacia do Rio Vermelho, Goiás, Brasil

Ana Carolina Santomé Franco
da Universidade Estadual de Goiás - Goiás - Brasil
carolinafs93@hotmail.com

Fernanda Alves de Oliveira Ferreira
da Secretária Estadual de Educação de Goiás - Goiás - Brasil
fernanddafferreira@hotmail.com

Resumo: Este trabalho teve como objetivo desenvolver um índice de pressão nos recursos hídricos para a Alta Bacia do Rio Vermelho, estado de Goiás, utilizando a análise multicritério. Foram utilizadas as variáveis potencial de vazão da hidrogeologia, potencial de recarga da geomorfologia, potencial de infiltração das declividades, potencial de proteção dos recursos hídricos em relação ao uso e cobertura do solo e potencial de infltração da densidade da cobertura vegetal, por meio do índice SAVI. Para a atribuição de valores às variáveis e classes, recorreu se a especialistas e à literatura. As classes de cada variável foram normalizadas para o intervalo de 0 a 1, onde 0 é nulo e 1 muito alto. O índice indicou que 12,66% da área apresentou de alta a muito alta pressão nos recursos hídricos. São áreas onde ocorrem intermitência nos cursos d'água, no período de estiagem, e onde há restrições à recarga e vazão, em áreas cobertas por pastagens.

Palavras-chave: análise multicritério; crise Hídrica; paisagem; geoprocessamento.

Introdução

Os problemas relacionados aos múltiplos usos dos recursos hídricos, bem como seus conflitos, atingem escalas geográficas diversas, que vão desde ambientes urbanos densamente povoados a áreas agrícolas. As demandas urbanas, rurais e industriais, dentre outras, têm provocado pressão nos recursos hídricos e potencializado processos de degradação, que culminam na redução da vazão dos rios, condições de intermitência, poluição e contaminação, configurando cenários de uma crise hídrica.

No Brasil, um importante marco para o estabelecimento de normas para gestão dos recursos hídricos foi a criação da Lei das Águas (Lei n° 9.433/97), que estabelece a Política Nacional de Recursos Hídricos e define as bacias hidrográficas como unidades territoriais para implementação dessa política (BRASIL, 1997). No entanto, a gestão das águas em uma bacia hidrográfica, requer a compreensão sistêmica e integrada de fatores

ambientais e socioeconômicos, com vistas à compreensão da relação entre o potencial de produção de água, a pressão exercida pelos múltiplos usos dela e o potencial de degradação dos recursos naturais, frente ao processo de uso e ocupação do solo.

As modelagens aplicadas a bacias hidrográficas têm contribuído no diagnóstico das condições ambientais e socioeconômicos de bacias, subsidiando a implementação de sistemas de gestão dos recursos hídricos (JACOBI; FRACALANZA, 2005; FONTANELLA *et al*., 2009; PIZELLA; SOUZA, 2013). Dentre as modelagens aplicadas a diagnósticos ambientais em bacias hidrográficas, tem-se os métodos multicritério. No contexto das modelagens ambientais, esses métodos preconizam a combinação de variáveis ambientais para geração de indicadores, com vistas à identificação de suscetibilidade, vulnerabilidade, risco ou danos em recursos naturais (SOARES, 2004; CORSEUIL, 2006; CORDÃO, 2009).

O método de análise hierárquica AHP (*Analytic Hierarchy Process*) compreende uma modelagem para elaboração de indicadores a partir da inter-relação de variáveis. Esse procedimento foi proposto por Thomas L. Saaty, em 1970, e permite modelar múltiplos critérios simultaneamente, com a possibilidade de arbitragem e atribuição de valores por especialistas. O método tem sido utilizado na definição de indicadores de vulnerabilidade ambiental e/ou suscetibilidade à erosão dos solos em bacias hidrográficas, como os trabalhos de Pinese Júnior e Rodrigues (2012), Falcão (2013), Padilha, Trevisan e Cruz (2014), Schmidt e Barbosa (2016), Fernandes *et al.* (2019), Caldas, Silva e Santos (2019), dentre outros.

A aplicação de modelos como o AHP em bacias hidrográficas requer o uso de geotecnologias. As técnicas de geoprocessamento se apresentam como suportes importantes no desenvolvimento de indicadores ambientais, pois nos *softwares* de geoprocessamento é possível fazer a interpretação e tratamento das variáveis, aplicação do modelo matemático para geração do indicador e elaboração dos produtos cartográficos.

Assim, este trabalho propôs desenvolver um índice de pressão nos recursos hídricos para a Alta Bacia do Rio Vermelho, no estado de Goiás, utilizando a análise multicritério AHP (*Analytic Hierarchy Process*).

Materiais e métodos

Área de estudo

A Alta Bacia do Rio Vermelho (ABRV) compõe o sistema de drenagem da bacia do Rio Araguaia e está localizada na porção oeste do território goiano (Figura 1), entre as coordenadas 15º 39'00"/ 16º50'00" de Latitude Sul e 50º 02'00"/50º37'00" de Longitude Oeste. A bacia ocupa uma área de 2.107 km², seu território é composto pelos municípios de Goiás e Itapirapuã.

Figura 1 - Mapa de Localização da Alta Bacia do Rio Vermelho – Goiás

A ABRV tem como principal divisor de águas, nas porções Leste e Sudeste, a Serra Dourada, feição geomorfológica muito conhecida no estado de Goiás por sua dimensão e beleza cênica. A Serra Dourada é um divisor de águas das duas importantes bacias hidrográficas do estado de Goiás, Araguaia e Tocantins.

Caracterização e Tratamento das Variáveis

Foi realizado o mapeamento de uso e cobertura do solo com dados de 2019 do Projeto Mapbiomas, onde foram definidas as classes: formação florestal, formação savânica, formação campestre, pastagem, agricultura/solo exposto, área urbana e

hidrografia. A estas classes foram atribuídos valores, por especialistas, que indicassem o grau de pressão nos recursos hídricos.

O mapeamento das declividades foi elaborado a partir do Modelo Digital de Elevação SRTM *(Shuttle Radar Topography Mission*), com resolução espacial de 30 metros, desenvolvido pela NASA (*Nacional Aeronautcs and Space Administration*). As imagens SRTM foram adquiridas na plataforma: *http://earthexplorer.usgs.gov/* e as declividades foram classificadas com base na metodologia proposta por Crepani *et al.* (2001), considerando as seguintes classes em porcentagem: (<2); (2-6); (6-20); (20-50); (>50). As classes de declividades foram associadas ao potencial de infiltração/escoamento superficial.

As unidades geomorfológicas e hidrogeológicas foram mapeadas a partir das bases cartográficas elaboradas pela Superintendência de Geologia e Mineração do Estado de Goiás, disponibilizadas no site do Sistema de Geoinformação do Estado de Goiás (SIEG). A descrição e classificação das unidades, em relação ao potencial de vazão e recarga, foram baseadas em Goiás (2006).

Foi calculado o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (*Soil-Adjusted Vegetation Index* - SAVI). O SAVI mensura o vigor e densidade da cobertura vegetal e foi calculado por meio das imagens do Sensor MSI/Sentinel 2A, a partir da equação a seguir:

$$Equação - SAVI = [\,(NIR - R) / (NIR + R + L)\,] * (1 + L)$$

Em que: *NIR* = reflectância na faixa do infravermelho próximo; *R* = reflectância na faixa do vermelho; *L* = fator de ajuste do solo (0,5).

As imagens MSI/Sentinel 2A são datadas de julho de 2019 e foram obtidas no portal do *Earth Explorer*. Estas já são adquiridas com correção geométrica, radiométrica e de refletância no topo da atmosfera (TOA) e foram corrigidas para refletância na base da atmosfera (BOA), utilizando a extensão Sen2Cor do *Software* SNAP 6.0. Após o cálculo do SAVI, a imagem índice foi reclassificada para definição de classes de densidade de cobertura vegetal e para indicação do potencial a infiltração, com base na metodologia apresentada por Silva, Melo e Galvíncio (2011).

Foram também levantados dados climáticos de temperatura máxima e mínima (1987 a 2017) e dados históricos de precipitação (1990 a 2019), no INMET (Instituto Nacional de Meteorologia).

Aplicação do Método Multicritério AHP (Análise Hierárquica de Processos)

A partir das variáveis normalizadas aplicou-se o método multicritério AHP para elaboração do mapa de índice. Este método permite aos tomadores de decisão modelar problemas complexos numa estrutura hierárquica. É um método para trabalhar com problemas que envolvem considerações de múltiplos critérios, simultaneamente (ANTONELLO, 2008).

O fluxograma metodológico apresentado na Figura 2 descreve os procedimentos que foram desenvolvidos para o tratamento das variáveis e aplicação do método. Todos os procedimentos de aplicação do método foram desenvolvidos no *software* de processamento QGIS 3.10.10.

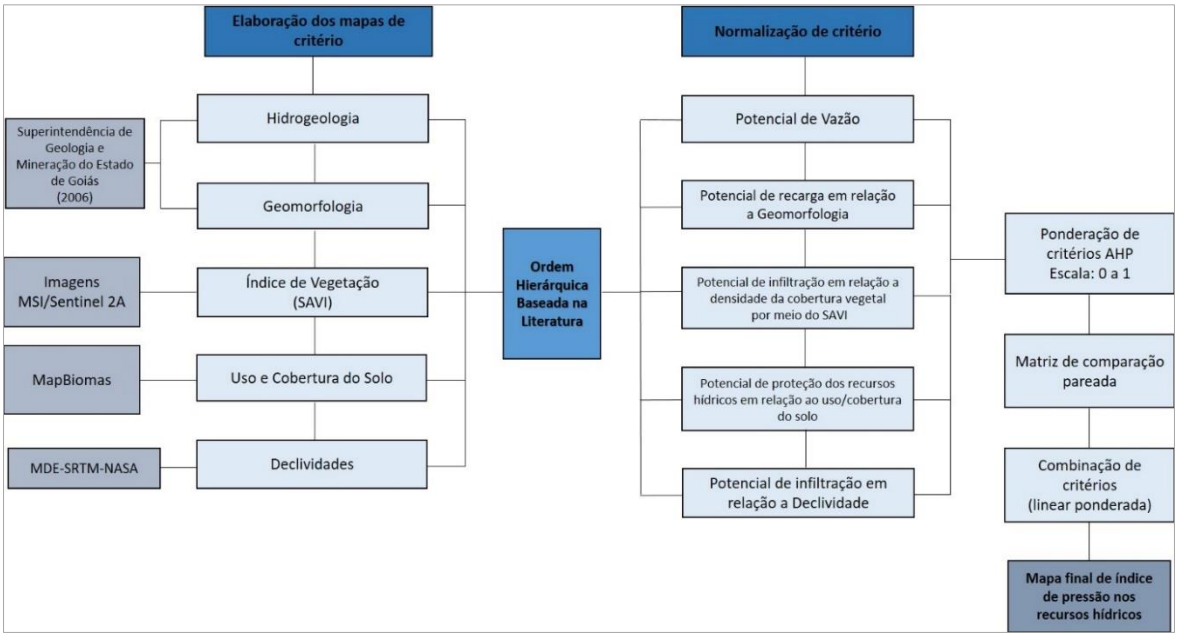


Figura 2 – Fluxograma metodológico para a geração do índice de pressão nos recursos hídricos. Elaborado pelos autores (2019).

As variáveis Hidrogeologia, Geomorfologia, SAVI e Declividades foram adaptadas a uma ordem hierárquica baseadas na literatura, com vistas à definição de indicadores de potencial abastecimento do lençol freático (infiltração) e vazão para manutenção dos cursos d'água. Em seguida, os valores das classes de cada variável foram normalizados a partir de uma ponderação de critérios, nos quais foram atribuídos valores entre 0 a 1. A normalização dessas variáveis seguiu as seguintes classes de valores: Muito Alto (1), Alto (0,75), Médio (0,5), Muito Baixo (0,25), Baixo (0,05) e Nulo (0).

Às classes de uso e cobertura do solo foram arbitrados por especialistas, a partir da aplicação de questionário pela plataforma *Google Forms*. A partir dos valores

atribuídos, foram feitas médias aritméticas para se chegar ao valor final. Foram consultados nove especialistas com formações nas áreas de Geografia, Biologia, Geologia, Engenharia Florestal e Engenharia Ambiental.

Para a elaboração da matriz de comparação pareada, foram atribuídos valores entre 1 e 9, pareando as variáveis entre se e considerando a importância de cada critério, no processo de manutenção/equilíbrio dos recursos hídricos. Este procedimento ocorreu também por arbitragem de especialistas via plataforma *Google Forms*, com posterior aplicação de média aritmética. A Tabela 1 apresenta a escala de comparação pareada que norteou a correlação entre das variáveis.

Tabela 1 – Escala de comparação pareada - AHP

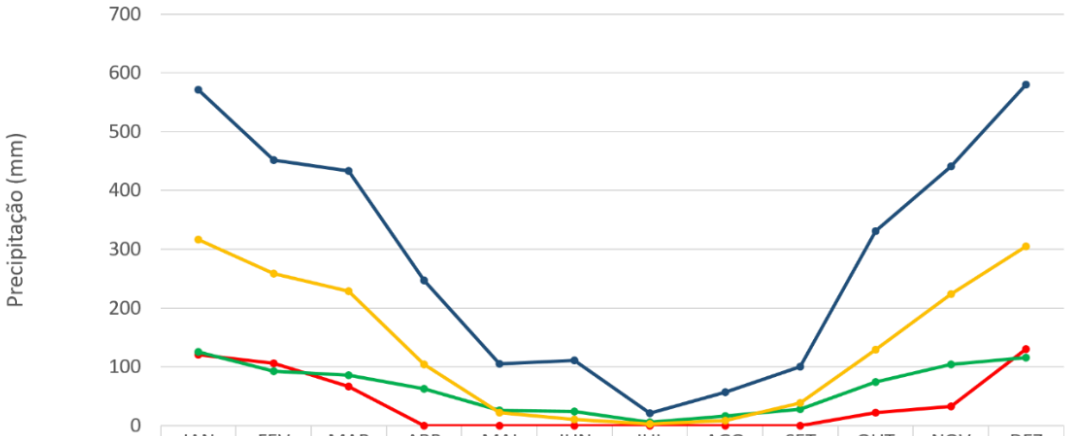
Intensidade de Importância	Definição	Explicação
1	Igual importância	As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo.
3	Fraca importância	A experiência e o julgamento favorecem levemente uma atividade em relação a outra.
5	Forte importância	A experiência e o julgamento favorecem fortemente uma atividade em relação a outra.
7	Muito forte importância	Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação a outra; sua dominação de importância é demonstrada na prática.
9	Importância absoluta	A evidência favorece uma atividade em relação a outra com o mais alto grau de certeza.
2, 4, 6 e 8	Valores intermediários	Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições.

Fonte: Adaptado de Saaty e Vargas (1991).

Resultados e discussão

Caracterização climática

Para Cavalcanti, Lopes e Ponte (2008) o clima da ABRV é do tipo Tropical Subúmido (Aw), com duas estações bem definidas, uma quente e úmida e outra predominantemente seca (SILVA; BARBALHO, 2016). No período de 1987 a 2017, foram registradas na área de estudo, médias máximas de temperatura entre 31°C a 35°C e médias mínimas entre 20°C a 22°C. A Figura 3 apresenta a estatística dos dados mensais de precipitação do período de 1990 a 2019. No que se refere às médias, o mês de julho registrou o menor total de chuva para o período analisado e, o mês de janeiro, corresponde ao mais chuvoso. Em relação aos valores mínimos, os meses entre abril e setembro, em alguns dos anos analisados, não registraram precipitação. Os valores máximos indicam os meses de janeiro e dezembro com os maiores registros de precipitação.



	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Máximo	571,5	451,7	433,1	246,7	104,8	110,6	21,3	56,3	100,3	331	440,9	580,2
Mínimo	120,2	105,7	66,4	0	0	0	0	0	0	21,6	32,66	129,6
Desvio Padrão	124,78	91,95	85,68	62,05	25,91	23,24	5,52	15,82	27,65	74,01	103,71	115,55
Média	316,46	258,8	228,28	104,33	21,7	10,51	2,61	8,17	38,16	129,02	223,55	304,72

Figura 3 - Estatística descritiva dos dados mensais de precipitação para o Município de Goiás (1990 a 2019)
Fonte: Dados INMET (2020). Elaborado pelos autores (2020).

No que tange à amplitude dos dados (relação entre maiores e menores totais), o mês de julho apresentou a menor, com 21,3mm, e a maior amplitude foi no mês de janeiro, com 451,3mm. A amplitude corrobora os valores de desvio padrão que indicaram que nos meses com maior variação dos valores e maiores totais de chuva, houve maior variação entre o conjunto de dados em relação à média. Os totais anuais de precipitação indicaram o ano de 1992 com o maior total registrado (2.425,7mm) e 2019 com o menor total (1.031mm). A média para o período foi de 1.630mm.

Descrição das variáveis e normalização de critérios

O Mapa de potencial de vazão em relação à hidrogeologia (Figura 4) é resultado da normalização de três unidades. Aos sistemas aquíferos Cristalino Noroeste e Serra da Mesa foram atribuídos, Alto potencial de vazão, por conter um conjunto de reservatórios e porosidade que facilitam a percolação das águas (GOIÁS, 2006). O sistema aquífero *Greenstone Belts* foi classificado como Muito Baixo potencial, por ser um sistema com capacidade restrita, por ser constituído por rochas pelíticas e plásticas (GOIÁS, 2006). Na Tabela 2 são apresentadas as características das classes de potencial a vazão.

Figura 4 - Potencial de vazão da Hidrogeologia

Tabela 2 – Classificação das unidades Hidrogeológicas

Sistema Aquífero	Classe	Valor Atribuído	Área em (%)	Área em (km²)
Cristalino Noroeste Serra da Mesa	Alto	0,75	83	1.748,81
Greenstone Belts	Muito Baixo	0,05	17	358,19
Total	-	-	100	2,107

Fonte: Elaborado pelos autores (2020).

As unidades geomorfológicas foram agrupadas em quatro classes de potencial de recarga. A espacialização das classes pode ser observada na Figura 5 e as descrições na Tabela 3.

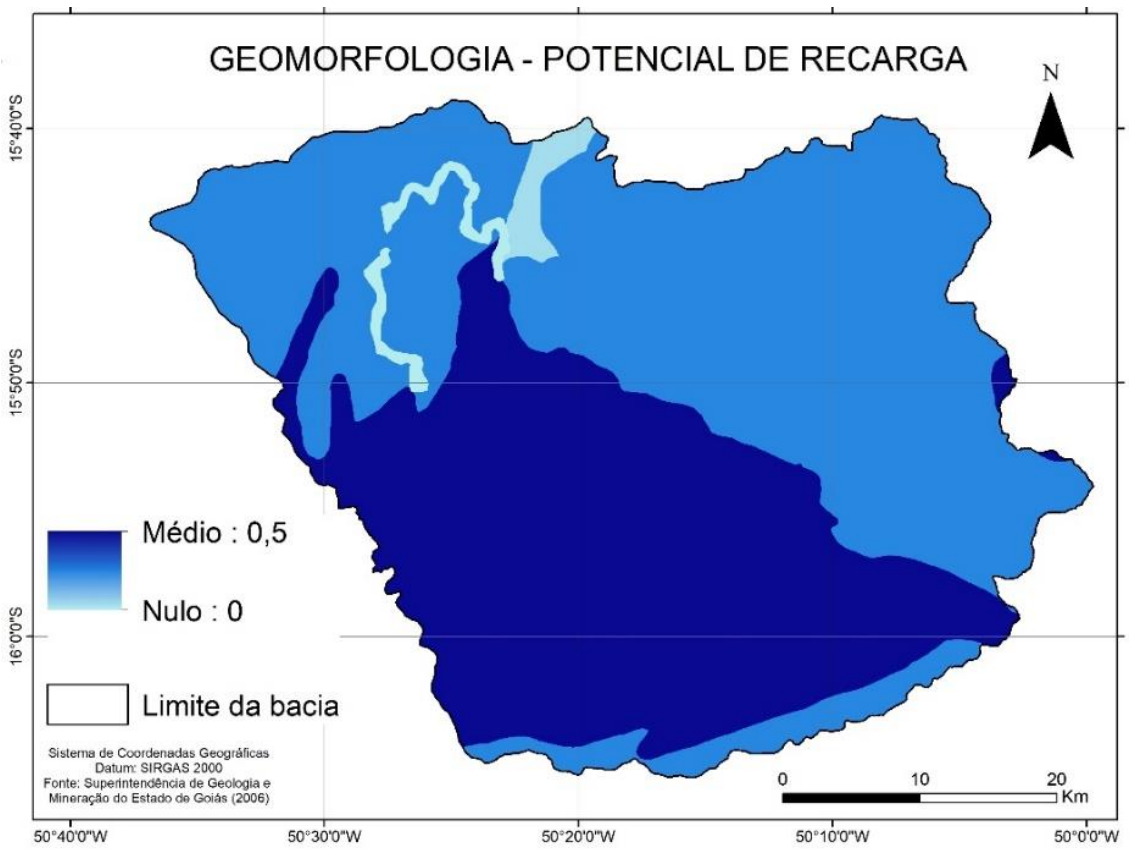


Figura 5 – Potencial de recarga da Geomorfologia
Fonte: Elaborado pelos autores (2020).

As Estruturas Dobradas foram classificadas com Muito Baixo potencial de recarga, devido ao relevo movimentado e aos solos poucos espessos, que favorecem o escoamento superficial e apresentando capacidade de infiltração reduzida (GOIÁS, 2006). As unidades Faixa Aluvial e Planícies Fluviais foram classificadas com potencial Nulo, pois se configura como áreas de descarga (GOIÁS, 2006).

As unidades Morros e Colinas, *HogBack* e Superfície Regional de Aplainamento IV (SRAIV), foram classificadas com Baixo potencial de recarga. Os Morros e Colinas e *HogBack* ocorrem em relevo forte ondulado a escarpado, com solos rasos, favorecendo o escoamento superficial em detrimento da infiltração. Na SRAIV, as condições de recarga são desfavoráveis em função dos solos rasos, da restrita condutividade hidráulica e do substrato pouco permeável (GOIÁS, 2006).

A Superfície Regional de Aplainamento IIIA apresenta, Médio potencial de recarga. Nessa unidade ocorrem sistemas de fluxos locais, pois o relevo mais dissecado resulta na dispersão do fluxo superficial e subterrâneo e, neste caso, a recarga é relativamente eficiente (GOIÁS, 2006).

Tabela 3 – Classificação das unidades Geomorfológicas

Unidade Geomorfológica	Classe	Valor Atribuído	Área (%)	Área (km²)
Faixa Aluvial Planícies Fluviais	Nulo	0,00	1,26	26,54
Estruturas Dobradas	Muito Baixo	0,05	1,18	24,86
Morros e Colinas *HogBack* Superfície Regional de Aplainamento IV	Baixo	0,25	54,44	1.147,05
Superfície Regional de Aplainamento IIIA	Médio	0,5	43,12	908,53
Total	-	-	100	2,107

Fonte: Elaborado pelos autores (2020).

O mapa da Figura 6 apresenta o potencial de infiltração em relação à declividade. Com a normalização, os valores variaram de 0 a 1, sendo 0 muito baixo ou nulo e 1 muito alto. A Tabela 4 apresenta as classes de declividades propostas por Crepani *et al.* (2001), na qual os autores fazem a correlação da declividade do terreno com a fragilidade ambiental, relacionada ao potencial de escoamento.

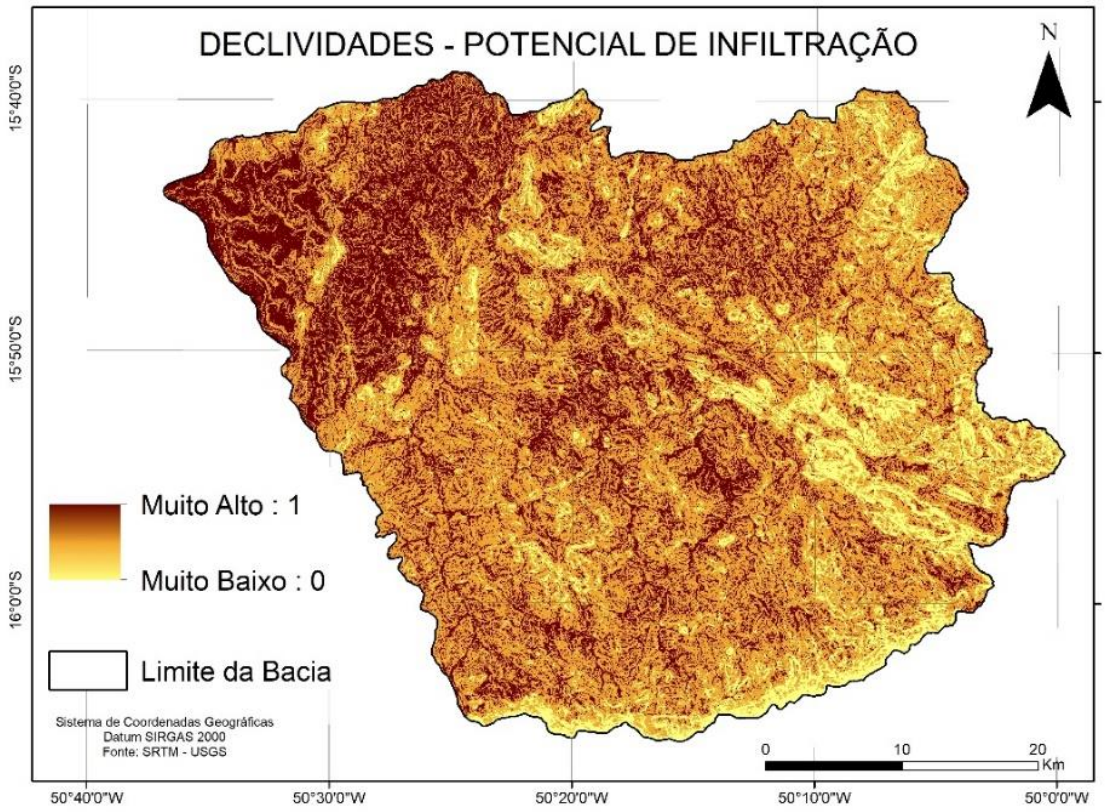


Figura 6 – Potencial de infiltração das Declividades

Tabela 4 – Classificação do Potencial à infiltração em relação à declividade

Classes de Potencial à Infiltração	Classes de declividades (%)
Muito Alto	< 2
Alto	2,1 – 6
Médio	6,1 – 20
Baixo	20,1 – 50
Muito Baixo ou Nulo	> 50

Fonte: Elaborado pelos autores (2020).

Nesta variável, considera-se a relação direta entre a topografia e o potencial de infiltração da água em um evento chuvoso. Assim, áreas mais inclinadas responderão por um escoamento superficial mais rápido, reduzindo assim, o potencial de infiltração e abastecimento do lençol freático. De acordo com Oliveira, Klinke Neto e Pereira (2016), o comportamento do escoamento superficial é definido pela topografia, ou seja, quanto maiores as declividades, maior deverá ser a vazão máxima de escoamento superficial e menor será a capacidade de armazenamento de água.

Na Figura 7, está espacializado o SAVI, normalizado de acordo com a classificação proposta por Silva, Melo e Galvíncio (2011), como apresentado na Tabela 5. Após a classificação da imagem do SAVI, a imagem índice passou pela normalização dos critérios, apresentando valores entre 0 e 1, onde zero são as áreas com Muito Baixo ou Nulo potencial de infiltração e 1 (um) Muito Alto potencial de infiltração em relação à densidade da cobertura vegetal.

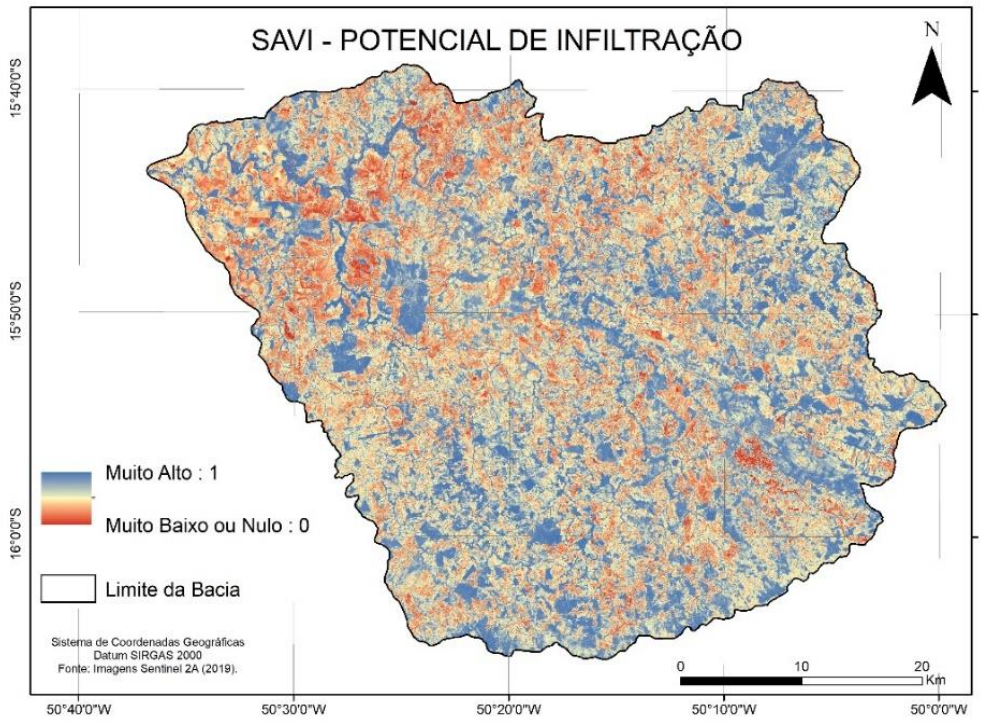


Figura 7 – Potencial de infiltração em relação à densidade da cobertura vegetal (SAVI)

Como observado na Tabela 10, há um predomínio de vegetação rala ou esparsa, totalizando mais de 60,85% da área da bacia e que compreende cobertura de pastagens. As áreas com ausência de vegetação se referem a área urbana, solo exposto e corpos d'água. As coberturas esparsas a muito densa são coberturas de Cerrado, que variam de formações florestais a formações savânicas. O SAVI contribui na definição de áreas com maior potencial à infiltração da água e abastecimento do lençol freático em relação à presença de vegetação com diferentes densidades e/ou a ausência dela.

Tabela 6 – Classificação do SAVI

Intervalos de SAVI	Densidade da Vegetação	Área (%)	Área (km²)
< 0	Ausente	0,54	11,98
0,1 – 0,35	Vegetação rala ou esparsa	60,85	1282,11
0,36 – 0,44	Vegetação esparsa a densa	18,11	381,58
> 0,45	Vegetação densa a muito densa	20,50	431,33
-	-	100	2.107

Fonte: Elaborada pela autora (2021).

A densidade da cobertura vegetal, associada às condições topográficas do relevo, influenciam diretamente no potencial de recarga do lençol freático. A vegetação é responsável pela interceptação da água na chuva e redução da velocidade do escoamento superficial, contribuindo, assim, para maior absorção da água pelo solo e para o aumento da porosidade deste, elevando a condutividade hidráulica e as taxas de infiltração (PRUSKI *et al.*, 2003; BRANDÃO et al., 2006).

Bias *et al.* (2012), em um estudo correlacionado cobertura vegetal com escoamento superficial, utilizaram o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), destacando a importância do índice na análise do escoamento superficial, pois quanto maiores os valores do índice, menores os impactos provocados pelas águas da chuva nos solos e maior o fluxo subsuperficial.

O uso e cobertura do solo são fatores que também influenciam na dinâmica de escoamento superficial e recarga do lençol freático. Foram atribuídos valores de 0 a 1 às classes de uso e cobertura do solo da ABRV, sendo 0 Muito Baixo ou Nulo potencial de proteção dos recursos hídricos e recarga do lençol freático e 1 Muito Alto potencial (Figura 8).

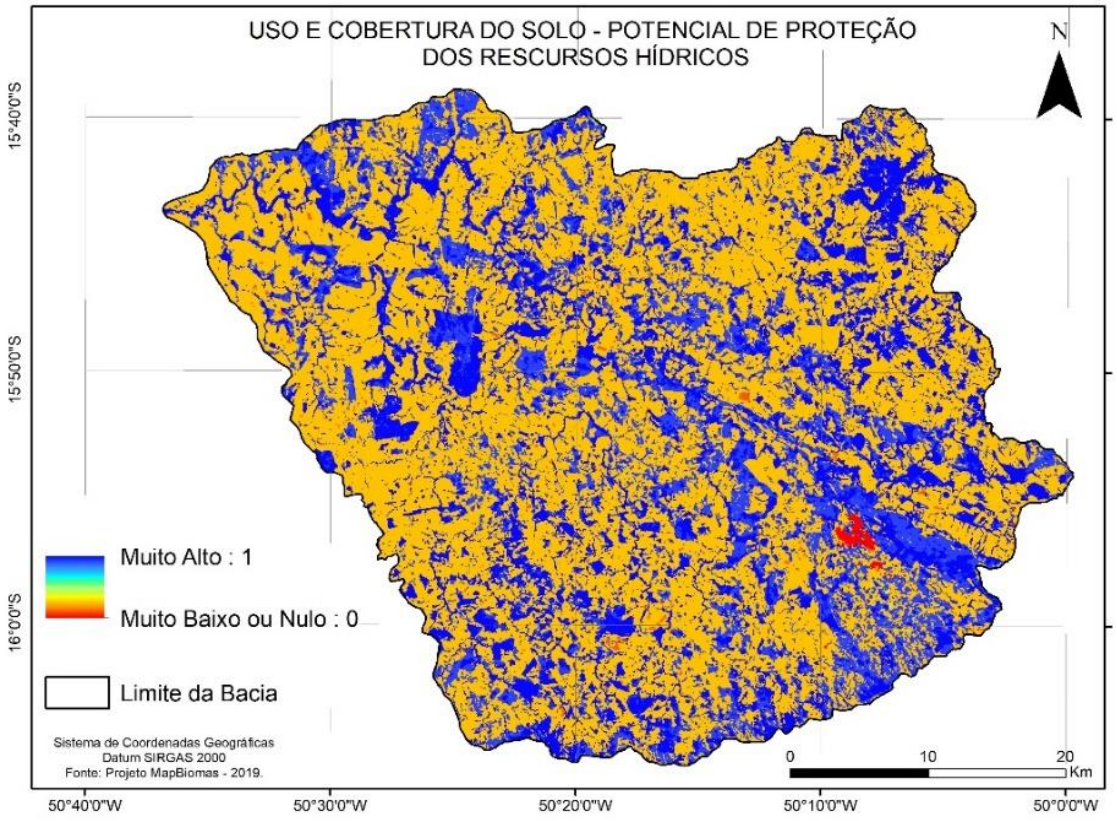


Figura 8 – Potencial de proteção dos recursos hídricos em relação ao uso/cobertura do solo

Na Tabela 7, são apresentados os valores de cada classe identificada na bacia, que é o resultado do mapeamento do ano de 2019. Os valores são uma média dos valores arbitrados pelos especialistas e, se referem, ao potencial de proteção dos recursos hídricos e recarga do lençol freático.

Tabela 7 – Valores das classes de uso e Cobertura do solo

Classes	Valor Atribuído
Formação Florestal	1,00
Formação Savânica	0,93
Formação Campestre	0,50
Pastagem	0,24
Agricultura	0,09
Área Urbana	0,03
Solo Exposto	0,00

Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

As formações florestais, savânicas e campestres são coberturas naturais de Cerrado. Segundo Ribeiro e Walter (2008) as formações florestais são compostas de espécies arbóreas e com a formação de dossel contínuo; nas formações savânicas ocorrem

estratos arbóreos e arbustivo-herbáceos, com distribuição aleatória sobre o terreno, sem que se forme um dossel contínuo e as formações campestres se caracterizam pela presença de arbustos e subarbustos entremeados no estrato arbustivo-herbáceo.

As áreas florestadas são o tipo de cobertura que mais contribui para a entrada de água no solo. Nessas áreas há pouco escoamento superficial, visto que parte da água precipitada fica retida nos diversos extratos da vegetação, perdendo parte por evapotranspiração e, outra parte, se infiltra no solo. As raízes das árvores, a serapilheira e matéria orgânica ajudam na descompactação do solo e atuam como redutores da velocidade de enxurradas, aumentando a capacidade de infiltração (MENDONÇA, et al., 2009; PALHARES; FRANCO; ZAIDAN, 2010; COELHO NETTO, 2015). Na ABRV, a formação florestal e a formação savânica ocupam juntas 38,61% da área.

As formações campestres são encontradas em 0,8% da área da ABRV. Nas áreas de formação campestre, ou campos naturais, a infiltração ocorre de forma restrita ou limitada, por apresentar menor densidade vegetativa; possibilidade de maior escoamento superficial; e menor profundidade das raízes, que atua no movimento de capilaridade da água (NASCIMENTO *et al*., 2017; BRITO, 2019).

Nas áreas de pastagem, em função do pastejo intensivo, ocorrem camadas compactadas na superfície do solo, proporcionando menor infiltração da água de chuvas e, com isso, maior escoamento superficial, favorecido pela presença de pouca massa verde na superfície (PINHEIRO; TEIXEIRA; KAUFMANN, 2009; BERTONI; LOMBARDI NETO, 2014). A pastagem na ABRV é a cobertura predominante na paisagem, ocupando 60,25% da área.

As áreas urbanizadas representam o maior impacto de intervenção no processo de infiltração de água da chuva, pois nessas áreas ocorrem a impermeabilização total ou parcial do solo, com o aumento significativo do escoamento superficial. A impermeabilização é o resultado da infraestrutura de construções que resultam no bloqueio da quase totalidade do processo de infiltração e recarga dos aquíferos (TARGA et al., 2012; JUSTINO et al., 2011). Na ABRV, as áreas urbanizadas ocupam 0,17% da área.

A agricultura ocupa 0,34% da ABRV e são pequenas ocorrências de cultura temporária. As áreas com agricultura apresentam problemas quanto ao aumento do escoamento superficial, especialmente as práticas de cultivo temporário, onde o solo é revolvido até duas vezes ao ano. A exposição do solo à chuva, a ausência de cobertura vegetal durante o período de preparo do solo e a falta de práticas conservacionistas,

propiciam a formação de fluxo superficial. Nestas áreas também ocorrem a compactação das estruturas do solo, com redução do volume de macroporos, que são importantes no processo de infiltração (BOTELHO; SILVA, 2010; BERTONI; LOMBARDI NETO, 2014).

Combinação de Critérios e elaboração do Índice

Com a média aritmética dos valores atribuídos pelos especialistas foi possível hierarquizar as variáveis e elaborar a matriz de comparação pareada (Tabela 8).

Tabela 8 - Matriz de comparação pareada.

	Hidrogeologia	Geomorfologia	Declividade	Uso e Cobertura do Solo	SAVI
Hidrogeologia	1,00	2,00	4,00	6,00	5,00
Geomorfologia	1/2=0,50	1,00	2,00	5,00	4,00
Declividade	1/4=0,25	1/2=0,50	1,00	2,00	3,00
Uso e cobertura do solo	1/6=0,17	1/5=0,20	1/2=0,50	1,00	2,00
SAVI	1/5=0,20	1/4=0,25	1/3=0,33	1/2=0,50	1,00

Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

De acordo com os resultados apresentados na matriz, os especialistas arbitraram que, no processo de equilíbrio e manutenção dos recursos hídricos, a hidrogeologia, em função de ser um elemento do meio físico que controla o processo de vazão de água, é a variável mais importante entre as demais. Na sequência, viriam a geomorfologia, por controlar o processo de recarga do lençol freático; as declividades, por controlar o processo de escoamento/infiltração das águas da chuva; o uso e cobertura do solo, por determinar processos de alteração/degradação na paisagem, influenciar o ciclo hidrológico e na demanda pelo consumo de água; e, por último, o SAVI, por ser um indicador de densidade da cobertura vegetal, que por sua vez, influencia no processo de escoamento e absorção das águas.

A Tabela 9 são apresentados os pesos (Autovetor) de cada variável, que é resultado da ponderação de critérios da matriz de comparação pareada. Os pesos foram aplicados ao cálculo final de elaboração do índice, considerando a hierarquia de importância dos critérios ou variáveis.

Tabela 9 – Pesos das variáveis

Variáveis	Autovetor
Hidrogeologia	0,415
Geomorfologia	0,288
Declividade	0,156
Uso e cobertura do solo	0,089
SAVI	0,053
Total	1,000

Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

A razão de consistência é o produto que valida o julgamento realizado pelos especialistas. Na aplicação do método, chegou-se ao valor 0,041, considerado como satisfatório, de acordo com os parâmetros definidos por Saaty (1980). Segundo o autor, valores inferiores a 0,1 indicam que há coerência nos valores arbitrados.

O resultado da aplicação das variáveis ao método multicritério AHP resultou no mapa final de Índice de Pressão nos Recursos Hídricos (IPRH), com classes que variaram de muito alta a muito baixo, como demonstrado na Figura 9. A espacialização das classes apresentadas no mapa final gerou cinco unidades de paisagem bem definidas na imagem. Assim, para melhor compreensão, as discussões e análises foram feitas a partir dessas unidades.

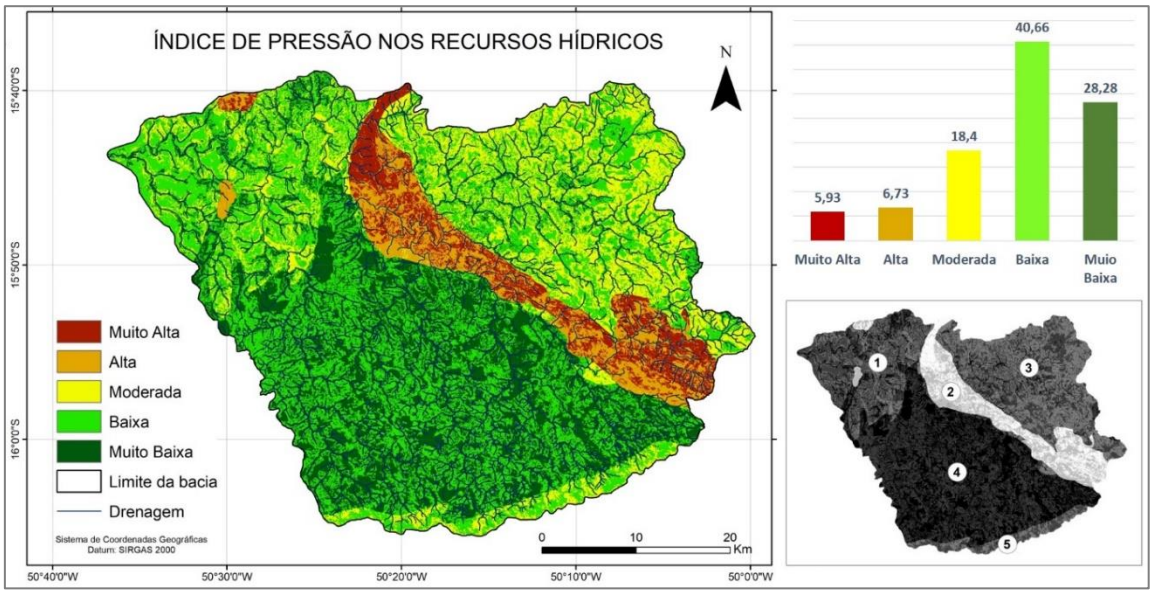


Figura 9 – Índice de Pressão nos Recursos Hídricos (IPRH), unidades de paisagem e percentual por classes

A Unidade de Paisagem [1] apresenta extensas áreas com menores declividades, que podem favorecer a infiltração, mas com potencial baixo de recarga, em relação à geomorfologia. No que se refere a hidrogeologia, predomina o alto potencial de vazão. A pastagem é a cobertura predominante, com ocorrências de alguns fragmentos de cobertura vegetal natural. Quanto ao SAVI, há uma variação de baixa a alta densidade em função da variação de pastagem e florestas. Assim, nesta primeira unidade de paisagem, há um predomínio da classe Baixa do IPRH. Destaca-se a ocorrência de dois polígonos com alta a muito alta pressão em função de estarem em área de pastagem com altas declividades.

Na Unidade de Paisagem [2] predomina as classes alta e muito alta do IPRH e que pode ser explicada em razão das altas declividades, que apresenta menor absorção de água no solo e o baixo potencial de recarga em relação a geomorfologia. Em relação à hidrogeologia, apresenta muito baixa vazão. As pastagens associadas à declividade e à baixa vazão, influenciam na definição de áreas com muito alta pressão nos recursos hídricos. O que reduz o potencial de muito alta para alta é a presença de vegetação nativa de Cerrado, pois existe uma variação entre a cobertura vegetal natural (formação florestal e savânica). O SAVI apresenta valores variados, desde baixa a alta densidades, relacionados à cobertura natural de Cerrado e às coberturas de pastagem.

Em toda a alta bacia, ocorrem no período de estiagem, a intermitência dos cursos d'água que apresentam menor vazão, geralmente entre os meses de junho a setembro, onde os totais de precipitação são muito baixo ou nulos, como pode ser observado na Figura 3. No entanto, este cenário é mais agravante e evidente, nos cursos d'água desta faixa Leste-Noroeste, que compreende a unidade 2 e, nesta unidade, está um dos cursos d'água que abastece a área urbana da cidade de Goiás, que já enfrenta racionamento de água, em função destas condições.

A terceira Unidade de Paisagem [3] está diretamente relacionada à baixa capacidade de recarga em relação à geomorfologia; recebe influência da hidrogeologia, onde vai predominar um potencial de vazão alto. As declividades apresentam de muito baixa a média capacidade de infiltração, predominantemente. O SAVI apresenta densidades vegetativas de média a muito alta. É uma unidade que predominam classes de IPRH que vão de moderada à baixa, pois mesmo apresentando um potencial baixo em relação à recarga, ela representa um potencial alto de vazão, ou seja, a hidrogeologia

colabora nesse contexto, mitigando os impactos decorrentes principalmente das pastagens.

Na Unidade de Paisagem [4] o IPRH varia de baixa a muito baixa. O potencial de recarga em toda área apresenta-se como médio; o potencial de vazão em relação à hidrogeologia é considerado alto; as declividades são de médias a altas e o SAVI apresenta densidade vegetacional de média a muito alta. Nesta unidade ocorrem muitos fragmentos arbóreos de vegetação nativa de Cerrado, portanto, o que se pode observar é que as variáveis de geomorfologia e hidrogeologia, principalmente, favorecem com que a mesma apresente as melhores condições em relação ao IPRH, em toda a ABRV.

Na Unidade de Paisagem [5], que ocorre no *front* da Serra Dourada, uma área escarpada de altas declividades, apresentou baixo a moderado IPRH. Esses resultados estão relacionados a um predomínio de cobertura vegetal natural de Cerrado e de densidade do SAVI. Em relação à geomorfologia, não é uma área de recarga, devido à própria declividade, predominando o escoamento nos eventos chuvosos. As classes baixa e moderada do IPRH estão relacionadas, principalmente, aos aspectos hidrogeológicos, que possuem um alto potencial de vazão; à cobertura vegetal natural e à densidade do SAVI. Em relação à geomorfologia e à declividade, é uma área que apresenta baixo potencial de recarga e muito baixa capacidade de infiltração.

Mesmo predominando as classes muito baixa (28,28%) e baixa (40,66%) do IPRH, como podemos observar no gráfico da Figura 19, a ABRV enfrenta problemas de escassez de água para abastecimento urbano e para dessedentação de animais. Isso ocorre em função dos fenômenos de intermitência de grande parte dos cursos d'água da região e a redução drástica da vazão dos cursos perenes, como o rio Vermelho, principal curso da bacia.

Considerações finais

O estudo possibilitou o desenvolvimento de um índice que evidenciasse as condições de pressão nos recursos hídricos superficiais, considerando aspectos do meio fisico-natural e de uso do solo. É uma modelagem que sugere aprimoramentos, principalmente na associação dos aspectos físicos dos solos, da dinâmica dos eventos chuvosos, assim como uma melhor descrição e valoração do uso do solo. Mas, os resultados alcaçados, já contribuem para uma avaliação das condições da fragilidade dos recursos hidricos, evidenciando que áreas que indicam restrições a recarga e vazão e que

a densidade da cobertura vegetal é baixa, como pastagens, apresentam potencial à intermitência dos cursos dágua.

O cenário de crise hídrica sempre foi associado a espaços densamente ocupados e onde os recursos naturais são superexplorados. A ABRV não apresenta essas condições e, mesmo assim, enfrenta problemas relacionados à escassez de água, principalmente para abastecimento urbano e dessedentação de animais, no período de estiagem. Assim, as modelagens ambientais, com a incorporação de análise multicritério, podem contribuir para a compreensão dessas condições e fragilidades ambientais, aperfeiçoando os resultados alcançados. E, as técnicas de geoprocessamento, se apresentam com uma alternativa rápida e com resultados satisfatórios para a delimitação das áreas que estão mais susceptíveis à situação de crise hídrica.

Pressure index in water resources in the vermelho river upper basin, Goiás, State, Brazil

Abstract: This study aimed to develop a pressure index on water resources for the Vermelho River Upper Basin, in the state of Goiás, Brazil, using the multicriteria analysis. The variables hydrogeology flow potential, geomorphology recharging potential, slope infiltration potential, water resource protection potential in relation to land use and cover, and plant cover density infiltration potential were used, through the SAVI index. To assign the values to the variables and classes, specialists and the literature were used. The classes of each variable were normalized in the range from 0 to 1, where 0 means null and 1 means very high. The index indicated that 12.66% of the area had high to very high pressure on water resources. These are areas where intermittency occurs in water courses during the dry season and where there are restrictions on recharge and flow, in areas covered by pastures.

Keywords: multicriteria analysis; water crisis; landscape; geoprocessing.

Índice de presión en los recursos hídricos de la alta cuenca del Río Vermelho, Goiás, Brasil

Resumen: Esta investigación tuvo como objetivo desarrollar un índice de presión en los recursos hídricos para la Alta Cuenca del Río Vermelho, estado de Goiás, utilizando el análisis multi-criterio. Fueron utilizadas las variables potencial de flujo de la hidrogeología, potencial de recarga de la geomorfología, potencial de infiltración de las declividades, potencial de protección de los recursos hídricos en relación al uso y cobertura del suelo y potencial de infiltración de la densidad de la cobertura vegetal, por medio del índice SAVI. Para la atribuición de valores a las variables y clases, se recurrió a expertos y a la literatura. A las clases de cada variables, fueron normalizadas para el intervalo de 0 a 1, donde 0 es nulo y 1, muy alto. El índice indicó que 12,66% de la area presentó de alta a muy alta presión en los recursos hídricos. Son areas donde ocurren intermitencia en los cursos de agua, en el periodo de estiaje, y donde hay restricciones a la recarga y flujo, en areas cobertas por pastizales.

Palavras Claves: analisis multi-criterio; crisis hídrica; paisaje; geoprocesamiento.

Agradecimentos

O agradecimento foi elaborado por uma das autoras que agradece à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela concessão da bolsa de mestrado que foi contemplada, sendo de vital importância para o financiamento e viabilização da pesquisa.

Referências

ANTONELLO, S. L. **Um sistema de planejamento e gestão para bacias hidrográficas com uso de análise multicritérios**. (Tese de doutorado em Ecologia de Agroecossistemas). Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 9. ed. São Paulo: Ícone, 2014.

BOTELHO, R. G. M.; SILVA, A. S. Bacia Hidrográfica e Qualidade Ambiental. *In:* VITTE, A. C.; GUERRA, A. J. T. (org.). **Reflexões sobre a Geografia Física no Brasil**. 3. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2010.

BIAS, E. de. S. *et al.* Análise da eficiência da vegetação no controle do escoamento superficial: uma aplicação na Bacia Hidrográfica do Rio São Bartolomeu, DF. **Geociências:** UNESP, São Paulo, v. 31, n. 3, p. 411-429, 2012.

BRASIL**. Política Nacional de Recursos Hídricos.** Lei nº **9.433, de 8 de Janeiro de 1997.** Disponível em: <https://legislacao.presidencia.gov.br/atos/?tipo=LEI&numero=9433&ano=1997&ato=a12ATVU90MJpWTbaf>. Acesso em: 10 de novembro de 2020.

BRANDÃO, V. et al**. Infiltração da água no solo**. 3. ed. Viçosa: UFV, 2006. 120 p.

BRITO, G. Q. **Capacidade de Infiltração de Água no Solo em Fitofisionomias do Bioma Cerrado**. Tese (Mestre em Ciências Ambientais). Programa de pós-graduação em Ciências Ambientais da Universidade de Brasília (UnB). Brasília-DF, 2019.

CALDAS, V. I. S. P.; SILVA, A. S.; SANTOS, J. P. C. Suscetibilidade a Erosão dos Solos da Bacia Hidrográfica Lagos – São João, no Estado do Rio de Janeiro – Brasil, a partir do Método AHP e Análise Multicritério. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v. 12, n. 04, p. 1415-1430, 2019.

CAVALCANTI, M. C; LOPES, L. C; PONTES, M. N. C. Contribuição ao entendimento do fenômeno das enchentes do Rio Vermelho na cidade de Goiás, GO. Goiânia**. Boletim Goiano de Geografia.** v. 28, n. 1, p. 167-186. jan./jun., 2008.

COELHO NETTO, A. L. C. Hidrologia de Encosta na Interface com a Geomorfologia. *In:* **Geomorfologia:** uma atualização de bases e conceitos. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 4. ed. 2015.

CORDÃO, M. J. de S. **Modelagem e otimização da disposição espacial de unidades de reservação em redes de distribuição de água utilizando geotecnologias**. 2009. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2009.

CORSEUIL, C. W. **Técnicas de geoprocessamento e de análise de multicritérios na adequação de uso das terras.** Tese (Doutorado). Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho". Botucatu. 2006.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S.; HERNANDEZ FILHO, P.; FLORENZANO, T. G.; DUARTE, V.; BARBOSA, C.C.F. **Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico-econômico e ao ordenamento territorial**. São José dos Campos: INPE, 2001.

FALCÃO. E, C. **Análise de riscos à degradação ambiental utilizando avaliação multicritério espacial, no Município de Boa Vista-PB**. 2013. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Campina Grande "Centro de Tecnologia e Recursos Naturais". Campina Grande-PB, 2013.

FERNANDES. J, C. *et al.* Análise Multicritério com uso da AHP para avaliação temporal na Vulnerabilidade Ambiental estudo de caso na Bacia Hidrográfica do Uberabinha, MG. **Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental.** Florianópolis, v. 8, n. 3, p. 141-158. jul/set, 2019.

FONTANELLA, A. *et al.* Diagnóstico ambiental da bacia hidrográfica do Rio da Ilha, Taquara, Rio Grande do Sul, Brasil. **Revista Brasileira de Biociências.** Porto Alegre, v. 7, n. 1, p. 23-41, jan. /mar. 2009.

GOIÁS (Estado). Secretaria de Indústria e Comércio. Superintendência de Geologia e Mineração. **Hidrogeologia do Estado de Goiás**. Por Leonardo de Almeida, Leonardo Resende, Antônio Passos Rodrigues, José Eloi Guimarães Campos. Goiânia, 2006. 232 p.: il. (Série Geologia e Mineração, n. 1).

JACOBI, P. R.; FRACALANZA, A. P. Comitês de Bacias Hidrográficas no Brasil - Desafios de fortalecimento da gestão compartilhada e participativa. **Desenvolvimento e Meio ambiente.** n. 11-12, p. 41-49, jan. /dez, Editora UFPR. 2005.

JUSTINO, E. A; PAULA, H. M; PAIVA, E. C. R. Análise do efeito da impermeabilização dos solos urbanos na drenagem de água pluvial no Município de Uberlândia –MG. **Espaço em Revista.** vol.13, n. 2, p. 16-38, 2011.

MENDONÇA, L. A. R. *et al.* Avaliação da capacidade de infiltração de solos submetidos a diferentes tipos de manejo. **Eng Sanit Ambient**. v.14 n.1, jan/mar, p. 89-98, 2009.

NASCIMENTO, P. W. F. *et al.* Avaliação do Potencial de Infiltração Relativo das Bacias Hidrográficas Urbanas do Rio Anil e do Rio Grande (Município Do Rio De Janeiro). **Geo.** UERJ, Rio de Janeiro, n. 30, p. 364-390, 2017.

OLIVEIRA, A. H.; KLINKE NETO, G. K.; PEREIRA, S.Y**. Análise do Relevo para o mapeamento de áreas favoráveis ao processo de infiltração**. XIX CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, Campinas–SP, 2016.

PADILHA, D. G.; TREVISAN, M. L.; CRUZ, J. C. Sensibilidade do modelo de fragilidades ambientais à ponderação multicriterial: aspectos físicos da bacia hidrográfica do alto Uruguai. **Floresta.** Curitiba-PR, v. 44, n. 3, p. 535 - 548, jul. /set, 2014.

PALHARES, D.; FRANCO, A. C.; ZAIDAN, L. B. P**.** Respostas fotossintéticas de plantas de cerrado nas estações seca e chuvosa. **Revista Brasileira de Biociência.** Porto Alegre, v. 8, n. 2, p. 213-220, abr./jun, 2010**.**

PINESE JÚNIOR, José Fernando; RODRIGUES, Silvio Carlos. O Método de Análise Hierárquica – AHP – como auxílio na determinação da Vulnerabilidade Ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Piedade (MG). **Departamento de Geografia. Universidade de São Paulo**, [S.L.], p. 4-26, 2012.

PINHEIRO, A.; TEIXEIRA, L. P.; KAUFMANN, V. Capacidade de infiltração de água em solos sob diferentes usos e práticas de manejo agrícola. **Ambi-Água**, Taubaté, v. 4, n. 2, p. 188-199, 2009.

PIZELLA, D. G.; SOUZA, M. P. de. Avaliação ambiental estratégica de planos de bacias hidrográficas. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [S.L.], v. 18, n. 3, p. 243-252, set. 2013.

PRUSKI, F. F.; BRANDÃO, V. S., SILVA, D. D. **Escoamento superficial**. Viçosa: UFV, 2003.

RIBEIRO, J. F; WALTER, B. M. T. As principais fitofisionomias do Bioma Cerrado. *In:* SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P.; RIBEIRO, J. F. **Ecologia e flora**. Brasília: EMBRAPA, 2008. v. 1, p. 152-212.

SAATY, T. L. **The analytical hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation**. New York: McGraw-Hill, 1980. 287p.

SCHMIDT, M. A. R.; BARBOSA, G. R. Uso de Redes Neurais Artificiais na Ponderação Inicial da Técnica AHP em Análises de Vulnerabilidade de Bacias Hidrográficas. **Boletim de Ciências Geodésicas**. v. 22, n. 3, p. 511–525, 2016.

SILVA, A. A.; BARBALHO, M. G. S. **Os fatores naturais, o uso, a chuva e a enchente no Rio Vermelho na Cidade de Goiás –GO em 2001**. Variabilidade e susceptibilidade climática: implicações ecossistêmicas e sociais. UFG, Goiânia/GO, 2016.

SILVA, E. R. A. C.; MELO, J. G. S., GALVÍNCIO, J. D. **Identificação das Áreas Susceptíveis a Processos de Desertificação no Médio Trecho da Bacia do Ipojuca – PE Através do Mapeamento do Estresse Hídrico da Vegetação e da Estimativa do Índice de Aridez**. Revista Brasileira de Geografia Física. Recife, PE, n. 03, p. 629-649, 2011.

SOARES, S. R. Análise Multicritério e Gestão Ambiental. *In:* PHILIPPI JR., A.; ROMÉRO, M. de A.; BRUNA, G. C. **Curso de Gestão Ambiental**. Barueri, SP: Manole, 2004.

TARGA, M. dos. S. *et al.* Urbanização e escoamento superficial na bacia hidrográfica do Igarapé Tucunduba, Belém, PA, Brasil. **Revista Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**. v. 7, n. 2, 2012.

Sobre as autoras

Ana Carolina Santomé Franco - Possui Graduação (2015) em Licenciatura plena em Geografia pela Universidade Estadual de Goiás (Campus Cora Coralina). Mestra em Geografia (2021) pelo Programa de Pós - Graduação em Geografia (PPGEO-UEG)

Fernanda Alves de Oliveira Ferreira - Possui graduação em Licenciatura Plena em Geografia pela Faculdade de Filosofia Cora Coralina (1995). Especialização em Docência Universitária pela Pontifícia Universidade Católica de Goiás - PUC (1998), Especialização em Educação Ambiental pela Universidade Estadual de Goiás (2002), Especialização em Gestão a Educação Pública pela Universidade Federal de Juiz de Fora, Mestrado em Geografia pela Universidade Estadual de Goiás (2021). Atualmente é docente da Secretaria Estadual de Goiás.

Recebido para avaliação em julho de 2023
Aceito para publicação em agosto de 2023