

Proposta metodológica de identificação de áreas prioritárias para recuperação da bacia hidrográfica do córrego Pequiá (MA)

RESUMO

Felipe Alexandre Rizzo
Universidade Estadual Paulista
(Unesp), Instituto de Ciência e
Tecnologia, Sorocaba, São Paulo.

Bruna Henrique Sacramento
Universidade Estadual Paulista
(Unesp), Instituto de Ciência e
Tecnologia, Sorocaba, São Paulo.

Paulo Sergio Tonello
Universidade Estadual Paulista
(Unesp), Instituto de Ciência e
Tecnologia, Sorocaba, São Paulo.

Darllan Collins da Cunha e Silva
Universidade Estadual Paulista
(Unesp), Instituto de Ciência e
Tecnologia, Sorocaba, São Paulo.

O estudo apresenta uma proposta de método para determinação de áreas prioritárias a recuperação (APR) na bacia hidrográfica do córrego Pequiá (BHCP), considerando suas sub-bacias, por meio de Geoprocessamento. Foram considerados dados de Equação Universal de Perda e Solo (USLE), Temperatura de Superfície Terrestre (TST) e Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI). Na priorização da APR, foram considerados índices morfométricos e variáveis do Índice de Qualidade da Água (IQA) por meio de Análise Hierárquica de Processos (AHP). Quase 90% das APP de uma das sub-bacias está desflorestada. Todas as sub-bacias apresentaram perda de solo muito alta. A floresta remanescente local apresentou NDVI adequado ao bioma. As sub-bacias hidrográficas do Brejão e do Mosquito foram as de maior prioridade para APR. O método se mostrou adequado e importante para a gestão territorial, por permitir a análise ambiental espacial e pelo uso de dados e softwares gratuitos.

PALAVRAS-CHAVE: Geoprocessamento. USLE. Temperatura de superfície. NDVI. IQA.

INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas que têm sido observadas são uma grande problemática considerando os mais diversos aspectos (agrícola, ambiental etc). Têm-se observado o aumento das temperaturas superficiais – que leva à formação de ilhas de calor nos grandes centros urbanos (SILVA *et al.*, 2012; SILVA *et al.*, 2021. SILVA; LOUREIRO; SOUZA, 2021). Estas alterações levam a mudanças no balanço hídrico e, em especial, na região nordeste do Brasil têm-se observado um clima mais quente e seco, impactando o meio ambiente e a sociedade (ROZENSTEIN *et al.*, 2014).

Um dos fatores que contribui com estas alterações climáticas, em especial na região nordeste brasileira, além de fatores oceânicos, é o desflorestamento (ERFANIAN; WANG; FOMENKO, 2017). Esta prática, muitas vezes realizada por meio do uso de fogo no solo, carece de técnicas sustentáveis, pois leva à impactos ambientais como alteração da dinâmica microbiana – muito importante para a ciclagem de nutrientes dos solos. Estas práticas inadequadas de manejo propiciam a erosão hídrica e, conseqüentemente, o transporte de sedimentos aos corpos hídricos. A erosão é muito ocorrente em regiões com atividades agrícolas e constitui um dos principais problemas relacionados à conservação dos solos das bacias hidrográficas (CUNHA *et al.*, 2017).

Para o entendimento sobre quantitativo de perdas de solo relacionado a processos erosivos, fatores antrópicos atrelados a características e propriedades dos fatores ambientais (incluindo a vegetação) são representados pela utilização da Equação Universal de Perda de Solos – *Universal Soil Loss Equation* (USLE), em inglês (DUNKERLEY, 2021). Esta metodologia permite uma análise sistemática quanto à perda de solo para, desta forma, se propor as devidas medidas de gestão sustentáveis para atenuação da problemática de erosão ou na busca de tecnologias sustentáveis.

A adoção de boas práticas de manejo agrícola para a melhoria das condições físicas do solo possibilita o incremento de matéria orgânica incorporada, que com a formação de serapilheira (e com maiores teores de nitrogênio), melhoram as atividades microbiológicas e químicas do solo e acelera o processo de recuperação ambiental (SIMONETTI *et al.*, 2019). Desta forma, temperatura superficial e uma boa saúde vegetal são fatores importantes para a conservação dos solos (SILVA *et al.*, 2020).

O Geoprocessamento (definido como a utilização de técnicas computacionais e matemática para análise de dados georreferenciados) representa uma metodologia que tem auxiliado na proposição de métodos para utilização dos recursos ambientais. Além disto, é um método que auxilia na tomada de decisão de forma ágil por meio da abordagem espacial, ao se avaliar e combinar informações de diferentes mapas temáticos relacionados aos mais diversos aspectos ambientais – como a perda de solo e temperatura em diferentes períodos (CARVALHO, 2019).

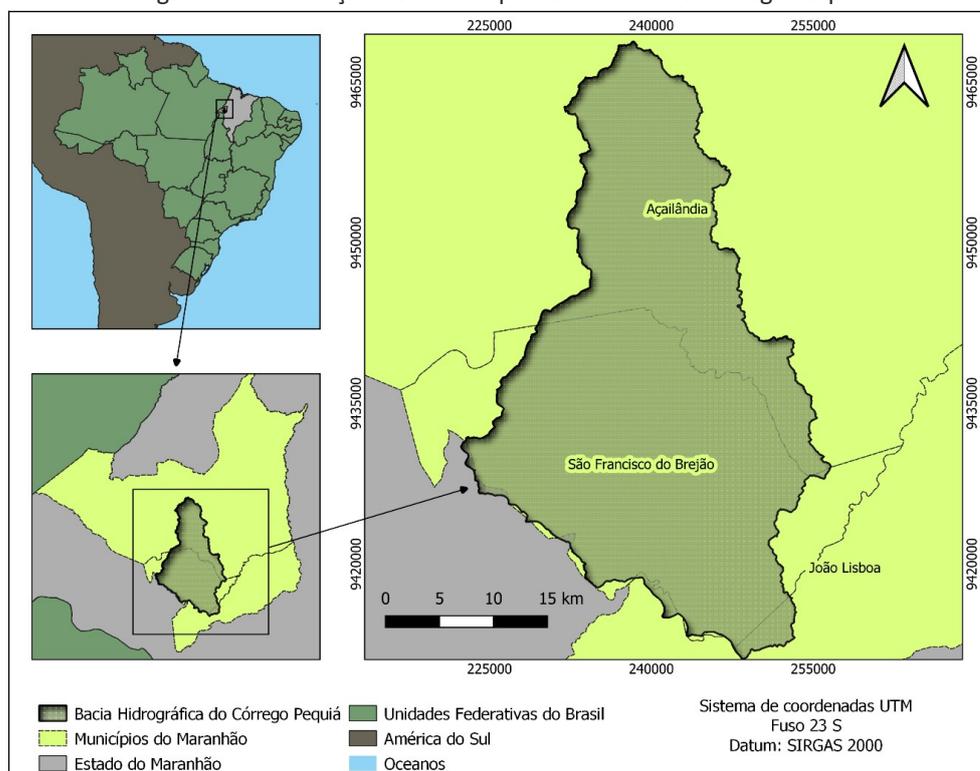
O objetivo desta pesquisa foi propor uma metodologia para identificação de Áreas Prioritárias para Recuperação (APR) da bacia hidrográfica do Córrego Pequiá como auxílio para gestão territorial, por meio de ferramentas de Geoprocessamento.

METODOLOGIA

ÁREA DE ESTUDO

A pesquisa foi realizada na Bacia Hidrográfica do Córrego Pequiá (BHCP), que possui 999,43 km² e está inserida no estado do Maranhão, predominantemente nos municípios de Açailândia e São Francisco do Brejão e, também, em um pequeno trecho rural da cidade de João Lisboa (Figura 1). A população estimada da região, no ano de 2021, foi de 12000 habitantes conforme o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2021).

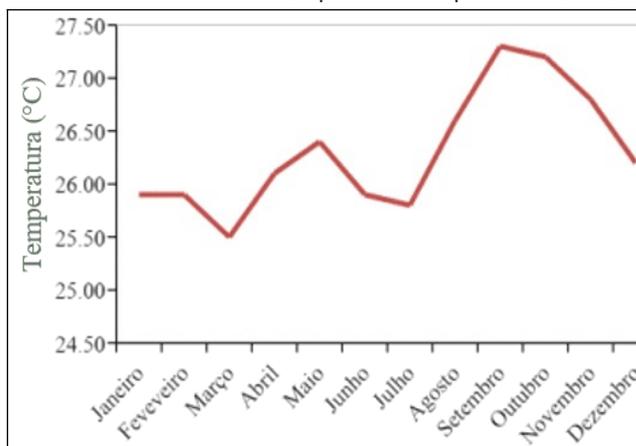
Figura 1 – Localização dos municípios e da Bacia do Córrego Pequiá



Fonte: Autoria própria.

A região possui classificação climática Aw (clima mesotérmico úmido com verões quentes e invernos secos), conforme a classificação de Köppen (NETO; BLANCO, 2020). Outra característica do clima local é a média anual de temperatura, superior a 24°C e que podem atingir 26°C na região norte do estado do Maranhão, conforme a Figura 2.

Figura 2 – Médias mensais de temperatura do período de 1961 a 1990



Fonte: Adaptado do INMET.

Os tipos de solos encontrados na área foram Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico; Latossolo Amarelo Distrófico e Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico, sendo o último de maior ocorrência na BHCP (EMBRAPA, 1999).

ELABORAÇÃO DO BANCO DE DADOS

Um Modelo Digital de Elevação (MDE), elaborado a partir de dados *Shuttle Radar Topograph Mission (SRTM)*, foi obtido da base de dados TOPODATA do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE (cartas 04S48 e 05S48, que incluem a área de estudo). A partir dele, a BHCP e suas sub-bacias hidrográficas foram delimitadas. A malha hidrográfica referente à BHCP foi obtida do IBGE (2017).

Para as estimativas de perda de solos, foram necessários dados meteorológicos e de uso e cobertura do solo da área de estudo. Dados de precipitação entre os anos de 1996 a 2018 foram obtidos da base de dados da Agência Nacional das Águas (ANA). Os dados de uso e cobertura do solo, por sua vez, foram obtidos da base do Projeto MapBiomas, coleção 5 (PROJETO MAPBIOMAS, 2019).

Para elaboração dos mapas do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index*, em inglês, NDVI) e Temperatura de Superfície Terrestre (TST), foram obtidas imagens dos satélites Landsat 5 e 8 referentes a 9 de agosto de 1984 e 27 de junho de 2020, respectivamente, da plataforma Earth Explorer do Serviço Geológico dos Estados Unidos (*United States Geological Survey*, em inglês – USGS). Os dados utilizados na pesquisa foram relativos às bandas espectrais do vermelho, infravermelho próximo e infravermelho termal, obtidas pelos sensores *Thematic Mapper – TM* (bandas 3, 4 e 6 do Landsat 5) e *Operational Land Imager – OLI* e *Thermal Infrared Sensor – TIRS* (bandas 4, 5 e 10 do Landsat 8), cenas 223/63 e 223/64 (órbita/ponto).

DELIMITAÇÃO DAS ÁREAS DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE

A partir dos dados de drenagem da BHCP, foram delimitadas as Áreas de Preservação Permanente (APP) conforme o que preconiza a Lei Federal nº 12.651/12 (BRASIL, 2012). Desta forma, foram delimitadas faixas marginais aos cursos d'água da BHCP com largura de 30 metros; exceto o trecho do curso principal (Córrego Pequiá) inserido na sub-bacia hidrográfica do Baixo Pequiá que se adotou a largura da de 50 metros. As APP foram delimitadas por meio da ferramenta *buffer* no software QGIS 3.20.

EQUAÇÃO UNIVERSAL DA PERDA DE SOLO

O cálculo da perda de solo por erosão hídrica foi realizado através da USLE (Equação 1), proposta por Wischmeier e Smith (1978). Esta metodologia permite a modelar a perda de solo em função das diferentes condições de manejo, variações climáticas, relevo e práticas conservacionistas (CUNHA *et al.*, 2017; SILVA *et al.*, 2021). A USLE é utilizada em nível mundial pois é flexível, com alta acessibilidade de dados e extensa literatura científica que permite adaptar o modelo a diversas regiões do globo terrestre (ALEWELL *et al.*, 2019).

$$A = R * K * LS * C * P(1)$$

Sendo:

A: perda de solo por unidade de área no tempo (ton/ha.ano);

R: erosividade da chuva (MJ.mm/h.ha);

K: erodibilidade do solo (t.ha.h/ ha.MJ.mm);

LS: fator topográfico (adimensional);

C: uso e manejo do solo (adimensional);

P: prática conservacionista do solo (adimensional).

O R foi determinado com base na série histórica da ANA. O fator K considerado levou em conta os tipos de solo da região (MANNIGEL *et al.*, 2002; MORAIS; SALES, 2017). O fator LS foi determinado com base nos dados do MDE. C foi também determinado por meio de levantamento bibliográfico (BARROS *et al.*, 2017; BERTOL; SCHICK; BATISTELA, 2001; DEMARCHI; PIROLI; ZIMBACK, 2019; FROTA *et al.*, 2020; PARANHOS FILHO *et al.*, 2003; SILVA *et al.*, 2017), bem como o fator P (AZIZ *et al.*, 2012; DIAS; SILVA, 2015; RODRIGUES *et al.*, 2017; SILVA *et al.*, 2017). Por meio destes dados, a USLE foi aplicada por meio da *calculadora raster* do QGIS 3.20.

ÍNDICE DE VEGETAÇÃO POR DIFERENÇA NORMALIZADA

O NDVI foi calculado por meio das bandas espectrais dos satélites Landsat 5 e 8, conforme a Equação 2.

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} (2)$$

Onde o:

NIR: infravermelho próximo;

RED: vermelho.

DETERMINAÇÃO DA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE TERRESTRE

Para obtenção da TST, foi necessário determinar a radiância espectral (L_λ) dos produtos de sensoriamento remoto (Equação 3), utilizando as bandas espectrais 6 e 10 (Landsat 5 e 8, respectivamente).

$$L_\lambda = \frac{(L_{\lambda_{max}} - L_{\lambda_{min}})}{(Q_{cal_{max}} - Q_{cal_{min}})} Q_{cal} + L_{\lambda_{min}} \quad (3)$$

L_λ : radiância espectral no sensor ($W/(m^2 \mu m)$);

$L_{\lambda_{min}}$: radiância dimensionada para $Q_{cal_{min}}$ ($W/(m^2 \mu m)$);

$L_{\lambda_{max}}$: radiância dimensionada para $Q_{cal_{max}}$ ($W/(m^2 \mu m)$);

Q_{cal} : Valor calibrado e quantizado do pixel (número digital);

$Q_{cal_{min}}$: Valor mínimo calibrado e quantizado do pixel (número digital);

$Q_{cal_{max}}$: Valor máximo calibrado e quantizado do pixel (número digital).

A Temperatura de Brilho (TB), foi obtida com dados de L_λ e as devidas constantes de calibração (Equação 4).

$$TB = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)} - 273,15 \quad (4)$$

TB: temperatura de brilho no sensor ($^{\circ}C$);

K_2 : constante de calibração 2 (Landsat 5 = 1260,56 K; Landsat 8 = 1321,08 K);

K_1 : constante de calibração 1 (Landsat 5 = 607,76 $W/(m^2 \cdot \mu m)$; Landsat 8 = 774,88 $W/(m^2 \cdot \mu m)$).

Conforme Matias, Silva e Tenedório (2018), a emissividade foi determinada para correção dos valores de temperatura por dados de NDVI dos períodos analisados, bem como emissividades do solo e da vegetação (Equação 5).

$$E = m \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} + n \quad (5)$$

E: emissividade (adimensional);

NDVI: adimensional;

$NDVI_{min}$ e $NDVI_{max}$: valores mínimo e máximo do NDVI, respectivamente (adimensionais);

m: emissividade do solo (0,004);

n: emissividade da vegetação (0,986).

A partir destes dados, foi possível determinar a TST por meio da Equação 6.

$$TST = TB + \frac{L_{\lambda} * TB}{P} * \ln E \quad (6)$$

TST: (°C);

P = hc/σ (1.438·10⁻² m.K);

DEFINIÇÃO DE ÁREAS PRIORITÁRIAS PARA A RECUPERAÇÃO

Os mapas de perda de solo, NDVI e TST foram reclassificados conforme a prioridade para recuperação, de acordo com a Tabela 1, por meio das funções *r.reclass* e *reclassify by layer* do QGIS 3.20.

Tabela 1 – Intervalos de reclassificação dos dados conforme a prioridade para recuperação

Prioridade	Perda de solo (ton/ha.ano)	NDVI	TST (°C)
Baixa	0 a ≤50	-	>15 e ≤ 25
Média	>50 a ≤120	> 0,2 (Vegetação com atividade fotossintética média e alta.)	≤15
Alta	>120	≤ 0,2 (Vegetação com baixa atividade fotossintética, solo exposto e corpo hídrico.)	>25

Fonte: adaptado de Zolin *et al.* (2020) e autoria própria.

Conforme a Tabela 1, foi estabelecida uma maior prioridade para os locais com maiores perdas de solo. Já com relação à temperatura de superfície (Tabela 2), os maiores graus de prioridade foram relacionados aos locais de maiores valores desta variável. A temperatura de 25°C foi estabelecida como o limite para o alto grau de prioridade pois esta é a faixa ideal para a atividade enzimática de microrganismos presentes no solo, que favorecem a ciclagem de nutrientes (GONÇALVES *et al.*, 2019, ZOLIN *et al.*, 2020).

A carta de APR foi obtida, então, por meio da multiplicação da média ponderada da perda de solo, NDVI e TST (reclassificados), conforme a Equação 7.

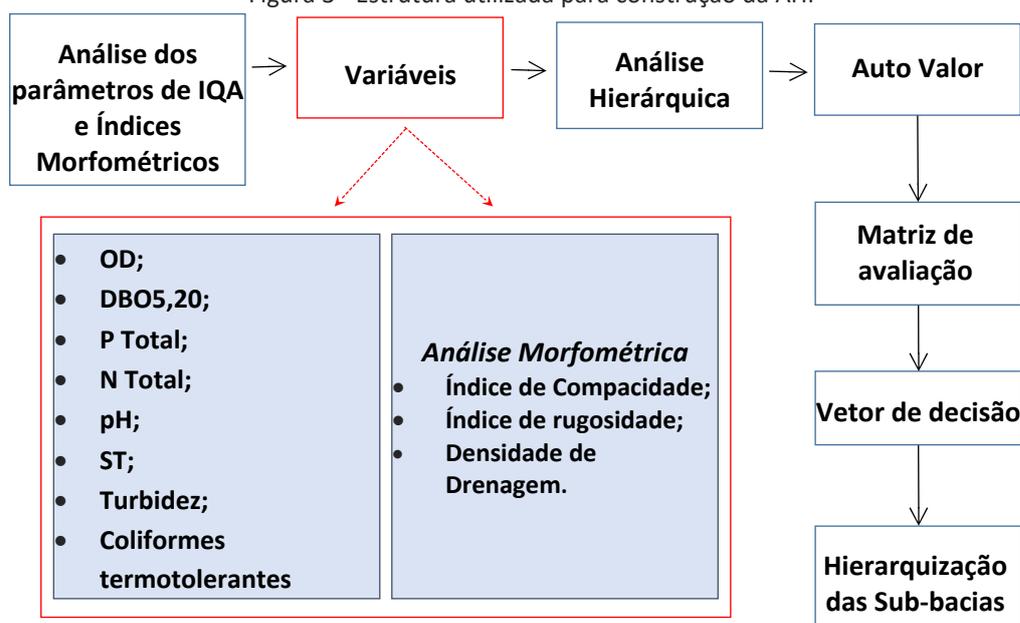
$$APR = \left(\frac{2 * TST + USLE}{3} \right) * NDVI \quad (7)$$

DEFINIÇÃO DE ÁREAS PRIORITÁRIAS PARA A RECUPERAÇÃO

A Análise Hierárquica de Processos (AHP) é uma metodologia que permite auxiliar na tomada de decisão de problemas complexos, colaborando com a ponderação de critérios de seleção relativos às variáveis envolvidas no problema (RIBEIRO; MENDES, 2015). Para construção da hierarquia de tomada de decisão

na BHCP (Figura 2), foram considerados os parâmetros do Índice de Qualidade da Água (IQA): Oxigênio Dissolvido (OD), Demanda Bioquímica de Oxigênio durante 5 dias e a 20°C (DBO_{5,20}), Fósforo Total (P), Nitrogênio Total (N), pH, Sólidos Totais (ST), Turbidez e Coliformes Termotolerantes; além de parâmetros morfométricos (Índices de Rugosidade – Ir, Compacidade – Kc e Densidade de Drenagem – Dd). Foram realizadas coletas de campo das variáveis do IQA, em triplicata, e consideradas as médias das amostras.

Figura 3 - Estrutura utilizada para construção da AHP



Fonte: Autoria própria.

A AHP em estrutura se divide em três fases principais sendo: hierarquização do problema de decisão, avaliação comparativa ou pareada e síntese de prioridades (SAATY, 1986). Este modelo engloba medidas de seleção objetivas e subjetivas que podem variar de 1 a 9, considerando o nível de contribuição para o objetivo definido, testando a sua consistência através de uma razão entre 0 e 1, com 0 indicando a completa consistência do processo de julgamento (SAATY, 1986). Desta forma, as variáveis foram analisadas, par a par, respeitando a escala do método.

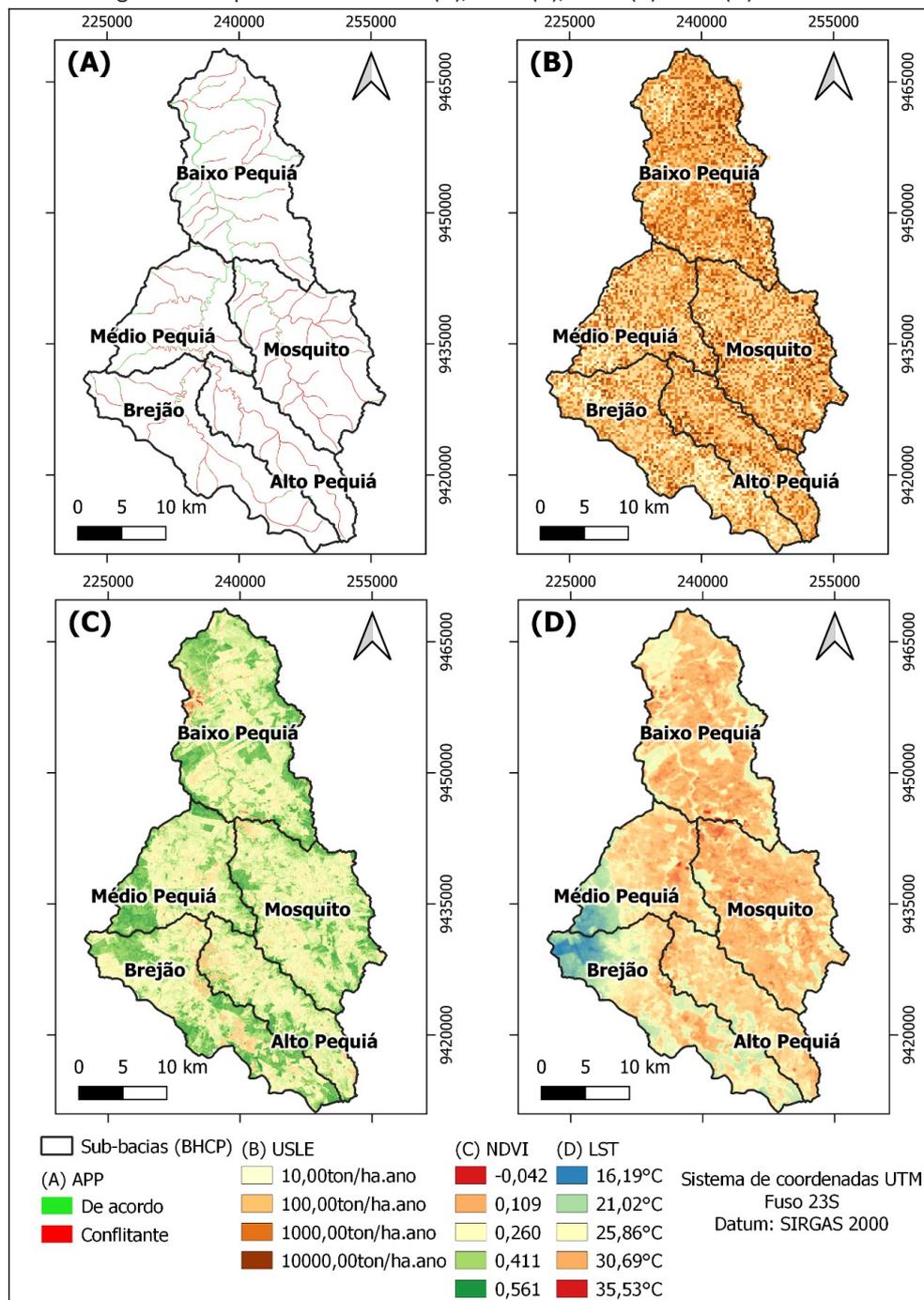
Para auxílio na identificação de APR e validação de dados, foram realizadas análises *in situ* por amostragem aleatória. Para apoio das atividades de campo, foram utilizados um GPS Garmin eTrex® 10 e um *drone* DJI Mavic 3.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

DELIMITAÇÃO DAS ÁREAS DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE

A Figura 4(A) contém o mapeamento da APP na BHCP. É possível observar que diversos locais não estão em conformidade com a Lei Federal nº 12.651/2012.

Figura 4 - Mapeamentos de APP (A), USLE (B), NDVI (C) e TST (D) da BHCP



Fonte: Autoria própria.

A Tabela 2 apresenta os resultados de quantificação das APP da BHCP conforme suas sub-bacias hidrográficas. A sub-bacia do Mosquito foi a unidade com maior percentual de APP na área de estudo.

Tabela 2 - Percentual de APP das sub-bacias hidrográficas da área de estudo e da BHCP

Sub-bacias	Área Total (ha)	APP (ha)	Usos não florestais (ha)	APP conflitante (%)
Baixo Pequiá	27647,60	906,84	452,80	49,64
Médio Pequiá	15555,90	511,79	299,70	58,56
Alto Pequiá	13277,20	333,26	294,20	88,28
Brejão	20040,10	507,01	395,47	78,00
Mosquito	23422,00	777,61	627,45	80,69
Total (BHCP)	99942,80	3036,51	2069,62	68,16

Fonte: Autoria própria.

Conforme a tabela acima, é possível observar que cerca de 70% da BHCP possui usos da terra conflitantes em APP. Ao analisar este percentual com relação às sub-bacias hidrográficas de estudo, tem-se resultados ainda piores: as sub-bacias do Alto Pequiá, do Brejão e do Mosquito, com 88,28; 78,00 e 80,69% de usos conflitantes em APP, respectivamente.

A área de estudo insere-se no Bioma Amazônico e em transições para o Bioma Cerrado. De acordo com Nóbrega *et al.* (2020), dentre os serviços ecossistêmicos exercidos por estes biomas está a manutenção de maiores taxas de infiltração de água (por uma maior porosidade do solo), o que implica no aumento da qualidade da água. Além disto, o Cerrado é um dos 35 *hotspots* de conservação de biodiversidade mundial; enquanto o bioma Amazônia possui suma importância na circulação atmosférica, ciclos de água, energia e carbono a nível continental (MARENGO *et al.*, 2018; VIEIRA *et al.*, 2022). Desta forma, a manutenção da vegetação nativa destes biomas é essencial no contexto do equilíbrio ambiental.

A partir de análises *in situ*, foi possível apontar alguns dos fatores de degradação ambiental na área de estudo, conforme a Figura 5(A e C), destacados em amarelo, onde é visto uma área sem cobertura vegetal com processo erosivo acentuado, enquanto é destacado em vermelho um corpo de água com presença de muito sedimentos em suspensão na água que pode ser proveniente dessa área destacada em amarelo. A sub-bacia hidrográfica do Baixo Pequiá, ainda que com o menor percentual de usos conflitantes, está próxima a uma rodovia federal (BR-222), o que contribuiu para o crescimento populacional local após a instalação de indústrias siderúrgicas na década de 90 e ocasionou uma ocupação territorial sem o devido planejamento. Na sub-bacia hidrográfica do Brejão, conforme a Figura 5(B), nota-se um grande impacto antrópico visto a presença de cerca de 12 mil habitantes (IBGE, 2021). As APP preservadas localizadas em áreas urbanas são importantes para garantia de segurança hídrica e um bom microclima urbano (ACKERMANN; SAMORA, 2020).

Figura 5 - Imagens obtidas pelo sobrevoo da BHCP, respectivas às proximidades da nascente do córrego Pequiá (A e C) e ocupação urbana na sub-bacia hidrográfica do Brejão (B).



Fonte: Autoria própria.

Além do impacto da ocupação urbana, a conversão da vegetação nativa em pastagem foi observada nas APP nas sub-bacias do Médio e do Alto Pequiá, tendo, na última sido observado a conversão de uma das principais nascentes do Córrego Pequiá para este uso e, ainda, sido presenciado o pisoteio de animais de grande porte. De acordo com o estudo de Lopez-Poma *et al.* (2020), a conversão de Cerrado em pastagens ou silvicultura de eucalipto pode resultar na redução de nitrogênio no solo e, conseqüentemente, fazer com que estes solos demandem adubação para a recomposição florestal.

EQUAÇÃO UNIVERSAL DA PERDA DE SOLO

A Figura 4(B) contém o produto do mapeamento de perda de solo por erosão hídrica, obtido pela aplicação da USLE. Os resultados foram semelhantes nas sub-bacias hidrográficas de estudo. A Tabela 3, por sua vez, apresenta os valores mínimos, máximos e médios desta variável para cada unidade da BHCP.

Tabela 3 - Quantitativo dos mapeamentos de USLE, NDVI e TST

Sub-bacia	USLE (ton/ha.ano)			NDVI			TST (°C)		
	Mínimo	Máximo	Média	Mínimo	Máximo	Média	Mínimo	Máximo	Média
Baixo Pequiá	13,03	25024,96	1295,63	-0,146	0,577	0,334	22,80	37,62	28,51
Médio Pequiá	13,09	34349,36	1086,53	-0,154	0,561	0,335	16,73	35,65	26,87
Alto Pequiá	12,69	33690,84	1189,01	-0,058	0,565	0,311	22,33	33,29	27,90
Brejão	12,65	15590,25	470,29	0,020	0,575	0,331	15,44	32,31	25,34
Mosquito	12,80	30525,44	1361,02	-0,102	0,581	0,321	23,74	37,24	29,00

Fonte: Autoria própria.

Conforme a classificação da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (*Food and Agriculture Organization – FAO*, em inglês), todas as sub-bacias hidrográficas da BHCP apresentaram valores muito altos de perda de solo (FAO, 1980). Estes locais, por sua alta suscetibilidade à

erosão, demandam ações de como manejo agropecuário sustentável – utilização de sistema de plantio direto, manutenção do solo com boa cobertura vegetal, adubação para reposição mineral; reflorestamento etc – para atenuação de processos erosivos (DEMARCHI; PIROLI; ZIMBACK, 2019; SILVA *et al.*, 2017).

O maior valor mapeado de perda de solo por erosão hídrica por registrado na sub-bacia do Médio Pequiá (34349,36 ton/ha.ano). Já os maiores valores médios foram encontrados nas sub-bacias do Baixo Pequiá e Mosquito (1295,63 e 1361,02 ton/ha.ano, respectivamente). As três sub-bacias apontadas foram as com maiores percentuais de APP com vegetação. Conforme o destaque em vermelho da Figura 5(C), nota-se a presença de sedimentos no curso hídrico da área de estudo. Estes resultados reforçam a necessidade de ações de conservação ambiental, visto que o desmatamento é um fator de aumento de perda de solo (DEMARCHI; PIROLI; ZIMBACK, 2019).

ÍNDICE DE VEGETAÇÃO POR DIFERENÇA NORMALIZADA

A Figura 4(C) apresenta o mapeamento de NDVI na BHCP. É possível observar que na sub-bacia do Baixo Pequiá foram mapeados valores bastantes baixos (representados em vermelho). Conforme o estudo de Sousa *et al.* (2022), os adensados urbanos constituem um fator de pressão antrópica sobre fragmentos florestais. Ainda os autores, áreas com maior densidade demográfica tendem a apresentar maior pressão sobre fragmentos florestais, o que contribui para degradação e supressão dos mesmos (CELENTANO *et al.*, 2018; SOUSA *et al.*, 2022).

Os resultados da Tabela 3, por sua vez, apontam que o máximo valor mapeado na BHCP se encontra na sub-bacia hidrográfica do Mosquito (0,581). Ao realizar uma análise do comportamento do NDVI em diversas regiões do bioma Amazônico, Álvarez e Poveda (2022) observaram que os valores deste índice podem variar entre 0,2 e 0,5 ao longo de um ano. Desta forma, os resultados de NDVI obtidos nos presente estudo são condizentes para a floresta nativa.

DETERMINAÇÃO DA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE TERRESTRE

A Figura 4(D) contém o mapeamento de TST da BHCP. A partir da Tabela 3, é possível observar que na sub-bacia hidrográfica do Mosquito foi registrado o maior valor médio desta variável (29°C). A mesma tabela também confirma que foi nesta unidade de estudo que foi mapeado um dos maiores valores de uso conflitante do solo em APP (80,69%). De acordo com a literatura, os usos não-florestais da terra ocasionam aumento nas temperaturas de superfície e, conseqüentemente, alterações no microclima (YAMAMOTO *et al.*, 2017; GUILHERME *et al.*, 2020).

DEFINIÇÃO DE ÁREAS PRIORITÁRIAS PARA A RECUPERAÇÃO

A quantificação dos índices morfométricos das sub-bacias da BHCP constam na Tabela 4. A partir destes resultados, é possível notar que a sub-bacia do Médio

Pequiá apresentou os valores mais favoráveis a enchentes e erosão hídrica (SOUSA *et al.*, 2021).

Tabela 4 - Índices Morfométricos utilizados na ponderação da AHP

Variável Morfométrica	Baixo Pequiá	Médio Pequiá	Alto Pequiá	Brejão	Mosquito
Dd (Km/km ²)	0,59	0,73	0,68	0,63	0,77
Ir	146,91	162,06	165,92	134,19	187,88
Kc	2,07	2,02	2,30	2,55	1,91

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 5 contém os resultados dos parâmetros do IQA analisados para cada sub-bacia.

Tabela 5 – Dados de Índice da Qualidade da Água

Parâmetros Físico-Químicos	Valor Médio				
	P1	P2	P3	P4	P5
OD	3,95	3,84	4,6	4,11	3,57
DBO _{5,20}	5,35	5,83	5,76	5,62	5,92
P	22,33	44,31	33,53	29,3	46,25
N	22,06	21,06	27,97	23	48,62
pH	5,52	5,5	4,98	5,26	5,26
ST	88,05	62,32	74,12	28,17	55,33
Turbidez	15,9	16,43	16,4	16,3	16,3

P1 – Baixo Pequiá; P2 – Médio Pequiá; P3 – Córrego Mosquito; P4 – Alto Pequiá; P5 – Brejão.

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 6 apresenta a matriz de comparação pareada elaborada no estudo. As variáveis OD, DBO_{5,20} e N apresentaram maior intensidade, devido ao elevado grau de importância considerado no estudo.

Tabela 6 – Matriz de comparação pareada das variáveis consideradas na AHP

	OD	DBO _{5,20}	P	N	pH	ST	T	CT	Kc	Ir	Dd
OD	1,00	1,00	1,00	1,00	9,00	9,00	8,00	3,00	9,00	9,00	9,00
DBO _{5,20}		1,00	2,00	3,00	9,00	8,00	6,00	8,00	8,00	9,00	7,00
P			1,00	3,00	9,00	9,00	9,00	8,00	9,00	9,00	9,00
N				1,00	2,00	7,00	8,00	2,00	8,00	9,00	9,00
pH					1,00	2,00	2,00	2,00	3,00	3,00	3,00
ST						1,00	1,00	2,00	5,00	5,00	5,00
T							1,00	1,00	1,00	2,00	3,00
CT								1,00	7,00	8,00	8,00
Kc									1,00	1,00	1,00
Ir										1,00	1,00
Dd											1,00

Fonte: Autoria própria.

A partir destes dados, foi determinada a ponderação de acordo com a tabela abaixo. A Razão de Consistência obtida foi de 8,2%, bastante adequada de acordo com a literatura (SAATY, 1986).

Tabela 7 – Pesos das variáveis utilizadas na AHP

Variável	DBO _{5,20}	P	OD	N	CT	pH	ST	T	Kc	Dd	Ir
Peso	23,7	22,6	19,7	13,1	4,9	4,6	3,9	2,9	1,6	1,5	1,5

Fonte: Autoria própria.

Para a hierarquização das sub-bacias hidrográficas de estudo quanto à recuperação ambiental, os pesos (Tabela 7) foram considerados para geração da matriz de avaliação quanto às unidades da BHCP (Tabela 8), com valores normalizados.

Tabela 8 - Ponderação obtida da normalização das variáveis da AHP

	OD	DBO _{5,20}	P	N	pH	ST	T	CT	Kc	Ir	Dd
Vetor dos Critérios	19,73	23,67	22,63	13,14	4,58	3,93	2,87	4,87	1,64	1,49	1,47
Baixo Pequiá	0,20	0,19	0,13	0,15	0,21	0,29	0,20	0,20	0,19	0,18	0,17
Médio Pequiá	0,19	0,20	0,25	0,15	0,21	0,20	0,20	0,20	0,19	0,20	0,21
Mosquito	0,23	0,20	0,19	0,20	0,19	0,24	0,20	0,20	0,18	0,24	0,23
Alto Pequiá	0,20	0,20	0,17	0,16	0,20	0,09	0,20	0,20	0,21	0,21	0,20
Brejão	0,18	0,21	0,26	0,34	0,20	0,18	0,20	0,20	0,24	0,17	0,19

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 9 mostra o vetor de decisão onde as sub-bacias já ranqueadas em ordem de prioridade a recuperação definida pelo produto do autovalor pelo peso encontrados através dos dados da matriz de avaliação.

Tabela 9 - Ordens de importância das sub-bacias da BHCP

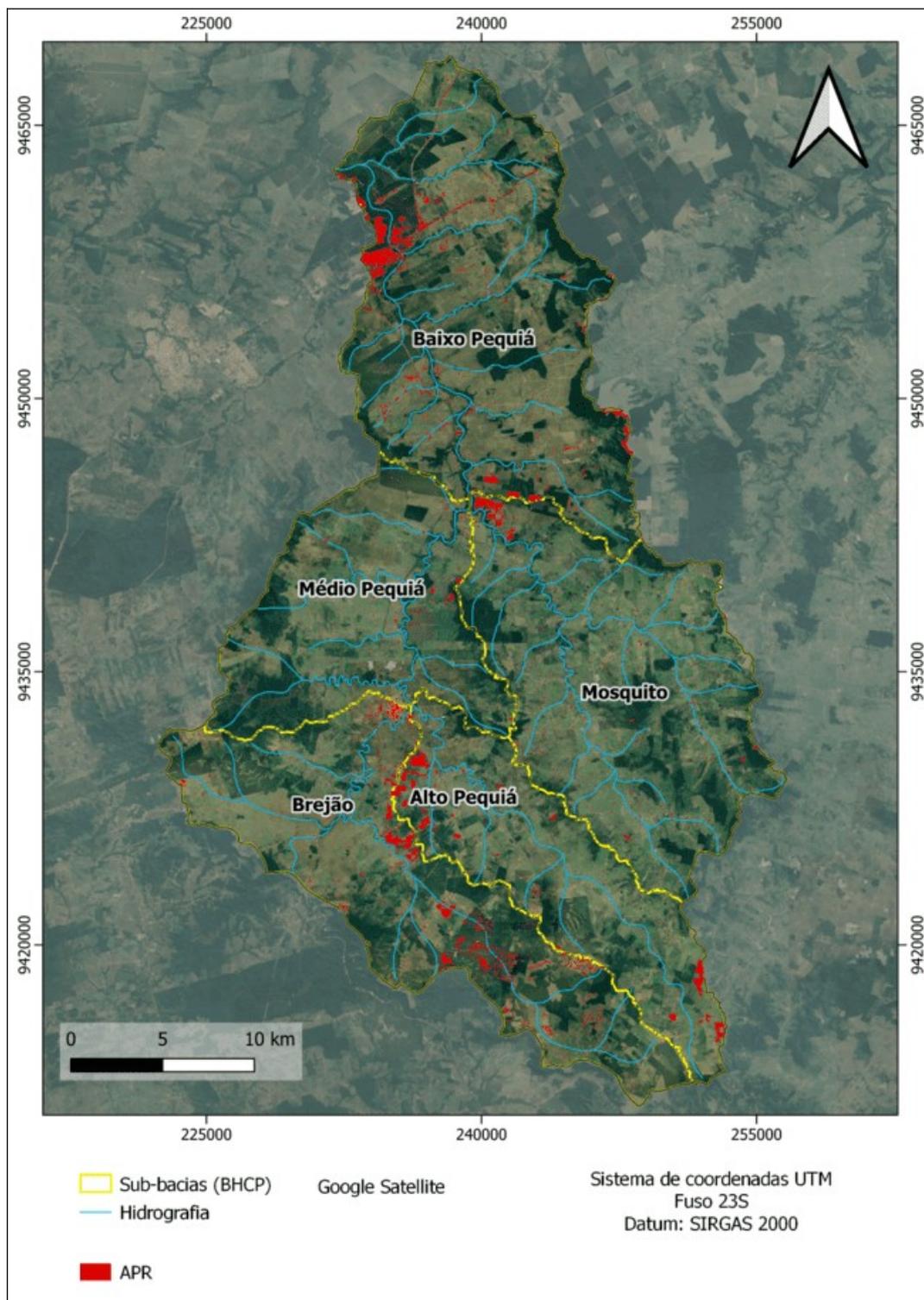
Sub-bacias	Peso
Brejão	22,93
Mosquito	20,53
Médio Pequiá	20,48
Alto Pequiá	18,37
Baixo Pequiá	17,69

Fonte: Autoria própria.

A partir destes pesos, foram definidas as APR ao longo de toda a BHCP, conforme a Figura 6. A sub-bacia hidrográfica do Baixo Pequiá, ainda que com a menor ordem de prioridade (definida pela AHP), merece destaque por seus resultados ruins quanto à qualidade da água. Nos estudos de Lopes *et al.* (2020) foram definidas áreas prioritárias para conservação florestal com vistas aos recursos hídricos em local de ecótono Cerrado/Amazônia. Os autores reforçam a

necessidade de metodologias desta natureza, pois podem evitar eventuais conflitos pelo uso da água.

Figura 6 - Mapeamento de APR das sub-bacias hidrográficas de estudo



Fonte: Autoria própria.

É possível observar que o maior percentual de APR, considerando a área da sub-bacia, foi na unidade do Mosquito. Os resultados são condizentes, pois esta foi uma das sub-bacias com maior ordem de importância (conforme a metodologia AHP). Além disso, esta sub-bacia hidrográfica apresentou a maior de perda de solo média dentre as demais unidades de estudo.

A Tabela 10 apresenta os valores de áreas classificadas como APR bem como o percentual considerando a área total (por sub-bacia hidrográfica da BHCP). Por meio destes resultados, é possível verificar que o segundo maior percentual de áreas destinadas a APR foi no trecho do Alto Pequiá. Esta unidade de estudo combinou diversos resultados negativos quanto à degradação ambiental: o maior percentual de usos conflitantes em APP, altas taxas de perda de solo, baixos valores médios de NDVI e das maiores TST da região de estudo. De acordo com Sano *et al.* (2019), a sustentabilidade ambiental no Cerrado é de interesse econômico para se aumentar a produção de alimentos e energia. Portanto, metodologias como a APR, proposta no presente estudo, são importantes para conciliação dos interesses econômicos e ambientais.

Tabela 10 - Quantitativo de APR na BHCP

Sub-bacia	APR (ha)	APR (% da sub-bacia)
Baixo Pequiá	812,43	0,27
Médio Pequiá	57,60	0,79
Alto Pequiá	328,32	6,07
Brejão	600,66	1,16
Mosquito	210,24	11,11

Fonte: Autoria própria.

O Mapa de Áreas Prioritárias para Conservação e Recuperação, elaborado para a região do Parque Estadual dos Godoy no Paraná (no município de Londrina), mostrou ser uma importante ferramenta de planejamento ambiental, fiscalização e manejo, onde os tomadores de decisão. Esta é uma metodologia permite orientar quanto a alocação de reserva legal no interior dos limites das propriedades com base nas informações geradas, relacionando-as com a dinâmica da paisagem na região, mantendo assim os corredores ecológicos (SILVA *et al.*, 2019). Metodologias desta natureza são importantes para auxílio na gestão territorial (CUNHA *et al.*, 2018).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos sugerem que a metodologia de definição de APR é adequada, pois áreas com alta prioridade demonstraram-se com bastantes alterações e impactos ambientais negativos como solo exposto, vegetação esparsa e intervenção humana. Já as áreas de baixa prioridade se apresentaram com vegetação densa, geralmente nativa.

As áreas definidas como APR totalizam cerca de 2% da BHCP. Ainda que seja um valor baixo, ressalta-se a necessidade de intervenção nestas áreas para um melhor manejo, visto que problemáticas ambientais como a perda de solos podem ser muito prejudiciais e comprometer a sustentabilidade.

A utilização da AHP permitiu dividir uma grande decisão em questões menores e, desta forma, reduzir possíveis subjetividades nas escolhas das sub-bacias a serem priorizadas. Além disso, as ferramentas de Geoprocessamento se mostraram eficientes e primordiais para uma adequada abordagem espacial do estudo.

Metodologias como a APR são extremamente importantes para a gestão territorial, pois além de fornecer um embasamento técnico para a tomada de decisão, são facilmente aplicáveis (principalmente por utilizar apenas *softwares* de código aberto e dados de livre acesso). A partir dos resultados obtidos, pode-se intervir e propor a criação de uma área verde na BHCP com fim de recuperação ambiental, por exemplo.

Além disto, a APR, aplicada em um local de ecótono Amazônia/Cerrado no presente estudo, pode ser adaptada para outros biomas brasileiros, pois as demandas apontadas para a criação da metodologia são observadas ao longo de toda a federação. Desta forma, pode-se atuar de modo a mitigar impactos ambientais negativos.

Methodological proposal for identifying priority areas for environmental recovery of the Pequiá stream watershed (MA)

ABSTRACT

The study presents a method-proposal for determining priority areas for recovery (APR) in the Pequiá stream watershed (BHCP), considering its sub-basins, through Geoprocessing. Data from the Universal Soil Loss Equation (USLE), Land Surface Temperature (TST) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) were evaluated. In the APR prioritizing, morphometric indices and variables of the Water Quality Index (IQA) through Analytic Hierarchy Process (AHP) were considered. Almost 90% of the APP in one of the sub-basins are deforested. All the sub-basins presented very high soil loss. The remaining forest presented NDVI suitable for the biome. The Brejão and Moquito sub-basins had the highest priority for APR. The method is adequate and important for territorial management, as it allows spatial environmental analysis and for the use of free data and software.

KEYWORDS: Geoprocessing. USLE. Land Surface Temperature. NDVI. IQA.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- ACKERMANN, M.; SAMORA, P. R. Área de preservação permanente urbana e o manejo da água: inovação, resiliência e adaptação aos eventos hidrológicos extremos. **Labor e Engenho**, v. 14, p. e020007-e020007, 2020.
- ALEWELL, C. *et al.* Using the USLE: Chances, challenges and limitations of soil erosion modelling. **International soil and water conservation research**, v. 7, n. 3, p. 203-225, 2019.
- ÁLVAREZ, D. M.; POVEDA, G. Spatiotemporal Dynamics of NDVI, Soil Moisture and ENSO in Tropical South America. **Remote Sensing**, v. 14, n. 11, p. 2521, 2022.
- AZIZ, S. A. *et al.* Assessing the effects of DEM uncertainty on erosion rate estimation in an agricultural field. **Transactions of the ASABE**, v. 55, n. 3, p. 785, 2012.
- BARROS, E. N. *et al.* Modelagem da erosão hídrica nas bacias hidrográficas dos rios Lontra e Manoel Alves Pequeno, Tocantins. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 13, n. 1, 2018.
- BERTOL, I.; SCHICK, J.; BATISTELA, O. Razão de perdas de solo e fator C para as culturas de soja e trigo em três sistemas de preparo em um Cambissolo Húmico Alumínico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 2, p. 451-461, 2001.
- BRASIL. Lei nº12.651, de 25 de maio de 2012. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF, 25 mai. 2012.
- CARVALHO, N. E. **Desenvolvimento de baixo impacto no manejo de águas pluviais urbanas: uma proposta para o município de Campinas**. 131f. 2019. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana) – Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2019.
- CELENTANO, D. *et al.* Desmatamento, degradação e violência no “Mosaico Gurupi” – A região mais ameaçada da Amazônia. **Estudos Avançados**, v. 32, p. 315 – 339, 2018.
- CUNHA, D. C. *et al.* Identificação de áreas com perda de solo acima do tolerável usando NDVI para o cálculo do fator C da USLE. **Raega – O Espaço Geográfico em Análise**, v. 42, p. 72-85, 2017.
- DEMARCHI, J. C.; PIROLI, E. L.; ZIMBACK, C. R. L. Estimativa de perda de solos por erosão na bacia hidrográfica do Ribeirão das Perobas (SP) nos anos 1962 e 2011. **Raega – O Espaço Geográfico em Análise**, v. 46, n. 1, p. 110-131, 2019.
- DIAS, E. R.; SILVA, R. M. Estimativa do risco à erosão do solo no município de Lucena – Paraíba. **Caminhos de Geografia**. v. 16, n. 54, p. 192–204, 2015.

DUNKERLEY, D. Rainfall intensity in short events: Evaluating the “I30 is equal to twice the rainfall depth” approach advised for use with the Universal Soil Loss Equation by Wischmeier & Smith (1978). **CATENA**, v. 207, p. 105659, 2021.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: EMBRAPA, 1999.

ERFANIAN, A.; WANG, G.; FOMENKO, L. Unprecedented drought over tropical South America in 2016: significantly under-predicted by tropical SST. **Scientific reports**, v. 7, n. 1, p. 1-11, 2017.

FROTA, N. V. S.; SONE, J. S.; WENDLAND, E. C. Variação espaço-temporal do fator cobertura e manejo do solo (fator C) para principais usos do solo no Cerrado. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS, 14., 2020, Campinas, **Anais [...]**. Campinas: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2020. p. 8.

GONÇALVES, V. A. *et al.* Biomassa e atividade microbiana de solo sob diferentes sistemas de plantio e sucessões de culturas. **Revista de Ciências Agrárias Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 62, 2019.

GUILHERME, A. P. *et al.* Relação entre tipo de cobertura do solo e temperatura de superfície. **Sociedade & Natureza**, v. 32, p. 515-525, 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Açailândia**: infográficos: evolução populacional e pirâmide etária. Brasília – DF. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ma/acailandia/panorama> Acesso em: 01 mar. 2021.

LOPES, T. R. *et al.* Priority areas for forest restoration aiming at the maintenance of water resources in a basin in the Cerrado/Amazon ecotone, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 101, p. 102630, 2020.

LÓPEZ-POMA, R. *et al.* Impact of the conversion of Brazilian woodland savanna (Cerradão) to pasture and Eucalyptus plantations on soil nitrogen mineralization. **Science of the Total Environment**, v. 704, p. 135397, 2020.

MANNIGEL, A. R. *et al.* Fator erodibilidade e tolerância de perda dos solos do Estado de São Paulo. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 24, p. 1335-1340, 2002.

MARENGO, J. A. *et al.* Changes in climate and land use over the Amazon region: current and future variability and trends. **Frontiers in Earth Science**, v. 6, p. 228, 2018.

MORAIS, R. C. S.; SALES, M. C. L. Estimativa do potencial natural de erosão dos solos da bacia hidrográfica do Alto Gurguéia, Piauí-Brasil, com uso de Sistema de Informação Geográfica. **Caderno de Geografia**, v. 27, n. 1, p. 84-105, 2017.

NETO, B. P. R.; BLANCO, C. J. C. Determinação de curva IDF para o município de Governador Newton Bello no estado do Maranhão. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 3, p. e39932374, 2020.

NÓBREGA, R. L. B. *et al.* Ecosystem services of a functionally diverse riparian zone in the Amazon–Cerrado agricultural frontier. **Global Ecology and Conservation**, v. 21, p. e00819, 2020.

PARANHOS FILHO, A. C.; FIORI, A. P.; DISPERATI, L.; LUCCHESI, C.; CIALI, A.; LASTORIA, G. Multitemporal evaluation of soil loss in the Taquarizinho Basin,

Mato Grosso do Sul–Brazil. **Boletim Paranaense de Geociências**, v. 52, p. 49-59, 2003.

PROJETO MAPBIOMAS – [COLEÇÃO 5]. **Mapas de cobertura e uso do solo**: 2019.

RIBEIRO, B. M. G.; MENDES, C. A. B. Índice de Qualidade Ambiental Urbano: uma proposta metodológica aplicada a áreas urbanas de ocupação irregular. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 17., 2015, João Pessoa, **Anais [...]**. São José dos Campos: INPE, 2015. p. 25-29.

RODRIGUES, J. A. M. *et al.* Estimativa da vulnerabilidade dos solos à erosão hídrica na bacia hidrográfica do Rio Cervo–MG. **Geociências**, São Paulo, v. 36, n. 3, p. 531-542, 2017.

ROZENSTEIN, O. *et al.* Derivation of land surface temperature for Landsat-8 TIRS using a split window algorithm. **Sensors**, v. 14, n. 4, p. 5768-5780, 2014.

SANO, E. E. *et al.* Cerrado ecoregions: A spatial framework to assess and prioritize Brazilian savanna environmental diversity for conservation. **Journal of environmental management**, v. 232, p. 818-828, 2019.

SILVA, A. L. H. *et al.* Estimativa da perda de solo no município de Goiânia entre os anos de 1998 e 2018, utilizando-se dados da literatura científica e do projeto RADAM. **Geoambiente On-line**, n. 41, 2021.

SILVA, D. C. C. *et al.* Análise temporal da temperatura de superfície obtida por sensoriamento remoto. **Holos Environment**, v. 20, p. 186-197, 2020. DOI: <https://doi.org/10.14295/holos.v20i2.12374>.

SILVA, H. G. B. *et al.* Determinação de áreas prioritárias para restauração e implantação de reservas legais no entorno do Parque Estadual Mata dos Godoy. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 19., 2019, Santos, **Anais [...]**. São José dos Campos: INPE, 2019. p. 2208-2211.

SILVA, J. P. S.; LOUREIRO, G. E.; SOUSA, I. Spatio-temporal analysis of the earth's surface temperature in Marabá City, Pará, Brazil. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 7, p. e41710716718, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i7.16718.

SILVA, S. B. *et al.* Atividade microbiana do solo após queima de biomassa na floresta amazônica ocidental – Acre, Brasil. In: Congresso Latinoamericano de La Ciencia del Suelo, 19., 2012, Mar del Plata, **Anais [...]**. Mar del Plata: AACCS, 2012. p. 6.

SIMONETTI, V. C. *et al.* Análise da Variabilidade Espacial Horizontal e Vertical dos Atributos do Solo e sua Relevância para o Parque Natural Chico Mendes, SP. **Revista Brasileira De Geografia Física**, v. 12, p. 2537-2550, 2019. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v12.7.p2537-2550>.

SOUSA *et al.* Modelagem para identificação de sub-bacias suscetíveis à erosão do solo utilizando a abordagem de soma ponderada. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 5, p.2685-2699, 2021.

SOUSA, J. A. P. *et al.* Proposta de um indicador de sustentabilidade para fragmentos florestais (ISFF) por meio de modelagem ambiental. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 15, n. 01, p. 250-267, 2022.

VIEIRA, L. T. A. *et al.* Reviewing the Cerrado's limits, flora distribution patterns, and conservation status for policy decisions. **Land Use Policy**, v. 115, p. 106038, 2022.

YAMAMOTO, M. K. *et al.* VARIAÇÃO DA TENDÊNCIA DA TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE TERRESTRE EM UMA SÉRIE TEMPORAL DO SENSOR MODIS. **REGRASP**, v.2, n. 4, p.28-42, 2017.

ZOLIN, T. D. S. *et al.* Carta de Áreas Prioritárias para Recuperação na Bacia do Córrego Laranja Doce, em Dourados/MS, com base no Fator A e Temperatura de Superfície Terrestre. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 43, n. 3, p. 190-202, 2020.

Recebido: 06/06/2022

Aprovado: 19/06/2023

DOI: 10.3895/rts.v19n57.15589

Como citar:

RIZZO, F.A.; SACRAMENTO, B. H.; TONELLO, P. S. et al. Proposta metodológica de identificação de áreas prioritárias para recuperação da bacia hidrográfica do córrego Pequiá (MA).

Rev. Technol. Soc., Curitiba, v. 19, n. 57, p. 33-54, jul./set., 2023. Disponível em:

<https://periodicos.utfpr.edu.br/rts/article/view/15589>

Acesso em: XXX.

Correspondência:

Direito autoral: Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

