Título: "SUSTENTABILIDADE DA BACIA DO RIO PANDEIROS-MG:
Dinâmica de Vertentes da Bacia do Rio Pandeiros"

Subprojeto 1c - Uso e Ocupação dos Solos na Bacia do Rio Pandeiros

Equipe

ADRIANA MONTEIRO DA COSTA
Professora Dra. Depto. Geografia – IGC /UFMG

ANTONIO HENRIQUE NORONHA RIBEIRO
Graduado em Geografia, Depto. Geografia – IGC – UFMG

DAYANE CAROLINE FREITAS CARVALHO
Mestre em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais – IGC/UFMG

HUGO HENRIQUE CARDOSO DE SALIS
Mestre em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais – IGC/UFMG

JOÃO HERBERT MOREIRA VIANA
Pesquisador Embrapa Milho e Sorgo

MAÍSE DE MOURA
Doutoranda em Geografia – IGC/UFMG

MARCELO ALVARES TENENWURCEL
Mestrando em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais – IGC/UFMG

PAULA KAREN MOTA
Doutoranda em Geografia – IGC/UFMG

VICTOR CORDEIRO DA SILVA
Graduando em Geografia – IGC/UFMG

Belo Horizonte, 2020

Sumário

Metodologia.....4

Caracterização da Área de Estudo.....4

Caracterização dos solos e sedimentos.....9

Zoneamento Ambiental e Produtivo.....10

Ajuste de modelos matemáticos de curvas granulométricas para a comparação entre os materiais amostrados de solos/saprolitos e de sedimentos fluviais.....12

**Recarga hídrica*.....13

Drastic.....18

Resultados.....33

Caracterização dos solos e sedimentos.....33

Zoneamento Ambiental e Produtivo.....35

Ajuste de modelos matemáticos de curvas granulométricas para a comparação entre os materiais amostrados de solos/saprolitos e de sedimentos fluviais.....44

*Recarga hídrica **.....46

- *Drastic*.....52

Caracterização dos solos e sedimentos.....57

Ajuste de modelos matemáticos de curvas granulométricas para a comparação entre os materiais amostrados de solos/saprolitos e de sedimentos fluviais.....58

Bibliografia.....59

ANEXOS.....63

Caracterização Física e Química dos solos de voçorocas na porção norte da Bacia Hidrográfica do Rio Pandeiros, Minas Gerais.....64

ZONEAMENTO DO POTENCIAL DO USO CONSERVACIONISTA COMO ALTERNATIVA ÀS UNIDADES DE PAISAGEM PARA A CONFECÇÃO DO ZAP1.....67

FERTILIDADE DE SOLOS E DE SEDIMENTOS DA BACIA DO RIO PANDEIROS - MG.....71

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA E FRACIONAMENTO DE AREIAS DE SOLOS E DE SEDIMENTOS DA BACIA DO RIO PANDEIROS, NORTE DE MINAS GERAIS.....72

Indicadores para avaliação da sustentabilidade: ZAP e ISA.....73

CERTIFICADO DE APRSENTAÇÃO UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO".....109

Zoneamento Ambiental e Produtivo (ZAP) na gestão da bacia do Rio Pandeiros, MG.....110

An Improved Model for the Evaluation of Groundwater Recharge Based on the Concept of Conservative Use Potential: A Study in the River Pandeiros Watershed, Minas Gerais, Brazil 115

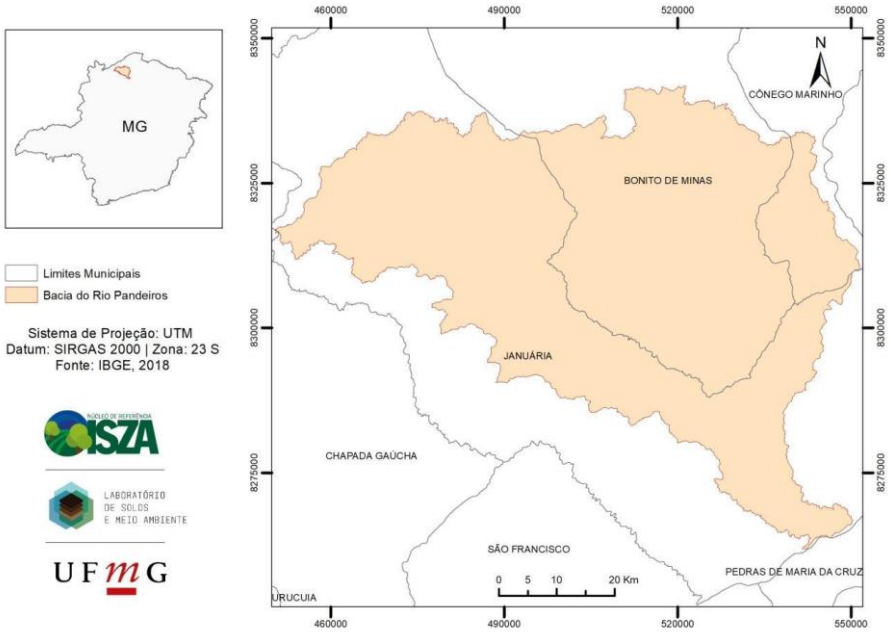
Metodologia

Caracterização da Área de Estudo

**Contida no artigo publicado na revista Water MDPI (Tenenwurcel et al., 2020)*

A Bacia Hidrográfica do Rio Pandeiros (BHRP) localiza-se na região Norte do estado de Minas Gerais e abrange uma área de 396.028 ha, compreendendo parte dos municípios de Januária, Bonito de Minas e Cônego Marinho (Figura 1). O clima da região é predominantemente seco com temperatura média anual de 24,6°C, havendo máximas de 33ºC, ocasionalmente no mês de outubro e mínimas de 14ºC no mês de julho (INMET 2019). Observa-se uma concentração do período chuvoso em 5 meses do ano (Abril – Setembro), sendo que o clima da região é considerado do tipo semiárido com média anual de precipitação em torno de 1.050 mm/ano (ALVARES et al., 2013; NEVES, 2011; SILVA, 2018). O rio Pandeiros possui como afluentes mais extensos e volumosos os córregos Catolé e Suçuarana, além dos riachos Borrachudo e Macaúbas.

Figura 1 - Localização da área de estudo.



De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2019), o conjunto de municípios que compõem a BHRP possuem população total estimada de aproximadamente 86.311 habitantes, com a maioria residente em Januária, entretanto a maior parcela da população se encontra localizada nas áreas rurais, sobretudo nos municípios de Bonito de Minas e Cônego Marinho (Tabela 1) (IBGE, 2019).

Tabela 1 - Área e população dos municípios da bacia hidrográfica do rio Pandeiros.

Município	Área Total (ha)	População Urbana	População Rural	População Total em 2018
Januária	665.700	41.322	24.141	67.628
Bonito de Minas	390.200	2.209	7.464	11.088
Cônego Marinho	164.100	1.915	5.186	7.595
Total	1.220.000	45.446	36.791	86.311

Fonte: IBGE - Censo 2010/População estimada 2018.

A BHRP situa-se em uma área de vegetação transicional com fitofisionomias do Cerrado e da Caatinga, sendo assim, este ecótono apresenta processos que se destacam, como por exemplo, a formação de pântanos. As regiões pantanosas são consideradas berçários do rio São Francisco, sendo responsável pela reprodução da grande maioria de peixes que vivem entre as barragens de Três Marias - MG e Sobradinho – BA (NUNES et al., 2009).

O relevo da área apresenta predominância de superfícies planas que podem ser atribuídas a Depressão São Franciscana, cuja evolução está relacionada aos processos de denudação das rochas e chapadas do Planalto do São Francisco (REZENDE, 2018). Essas características são responsáveis pela pequena expressão de áreas mais declivosas na bacia, conforme apresentado na Figura e Tabela 2 (EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 1979).

Figura 2 - Mapa de declividade da área de estudo.

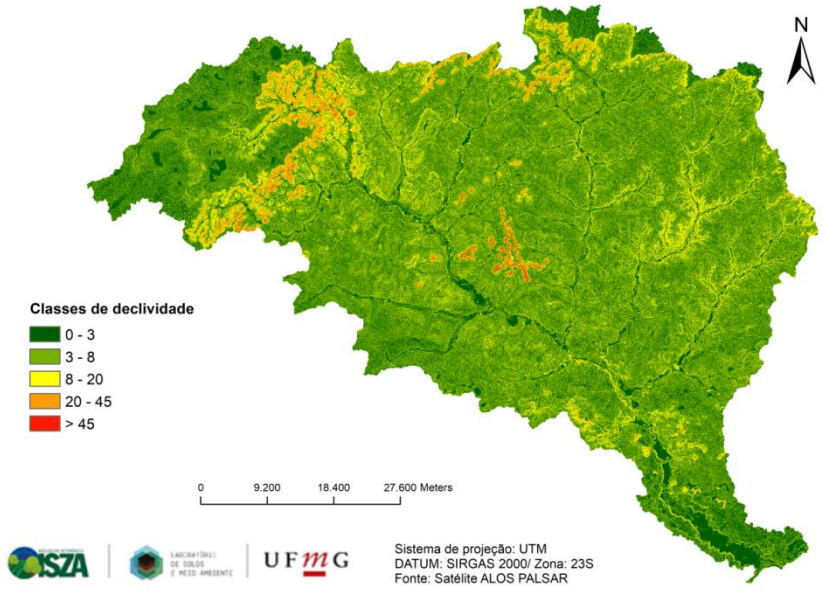


Tabela 2 - Abrangência espacial das classes de declividade na BHRP.

Declividade (%)	Tipo de Relevo	Área (ha)	%
0 a 3	Plano	122.048,53	30,83
3 a 8	Suave ondulado	206.106,85	52,04
8 a 20	Ondulado	59.179,5	14,94
20 a 45	Forte ondulado	7.806,56	1,97
Acima de 45	Montanhoso a escarpado	886,85	0,22
Total	396.028,29	100	100,00

Em relação à geologia, destaca-se ainda a presença de Depósitos Aluvionares ao longo das principais drenagens existentes na área e nas regiões de veredas, resultantes de processos naturais e antrópicos de erosão com o consequente transporte e posterior deposição de sedimentos. A figura e tabela 3 representam a distribuição espacial e proporção dos litotipos na bacia estudada.

Figura 3 – Mapa litológico da área de estudo.

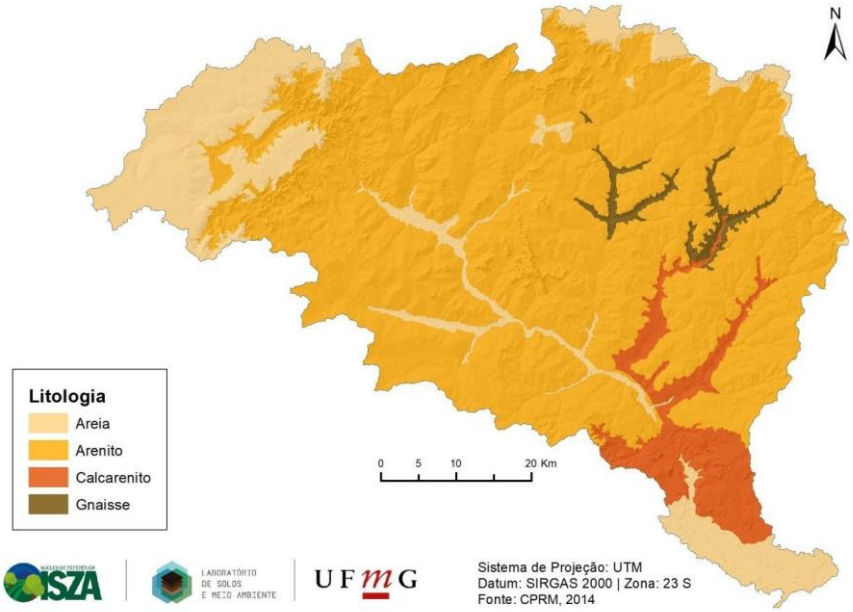


Tabela 3 - Abrangência espacial dos litotipos na BHRP.

Litotipo	Área (ha)	%
Areia	70.886,74	17,90
Arenito	290.804,78	73,43
Calcarenito	27.570,98	6,96
Gnaisse	6.765,81	1,71
Total	396.028,29	100,00

Com relação aos solos, o Mapa de Solos de Minas Gerais (UFV, 2010) apresenta uma área predominantemente composta por Latossolos Vermelho-Amarelo, os quais abrangem mais de 87% da bacia hidrográfica, seguido por Neossolos Flúvicos (5,48%). Já a ocorrência de Neossolos Quartzarênicos, Neossolos Litólicos, Cambissolos Háplicos e Gleissolos Melânicos assumem menores dimensões de área (Figura e Tabela 4).

Figura 4 – Mapa de solos da área de estudo.

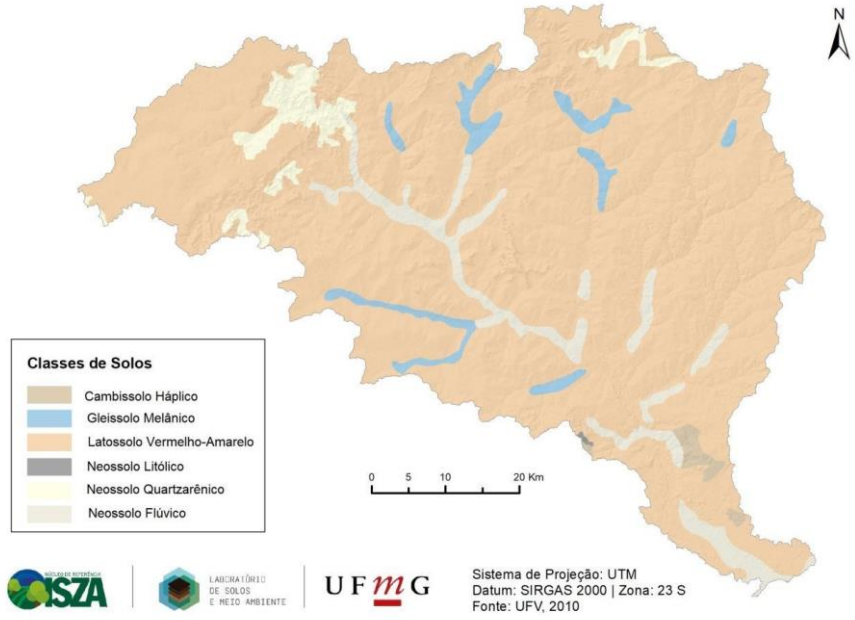


Tabela 4 - Abrangência espacial das classes de solos na BHRP.

Classes de solos	Área (ha)	%
Cambissolos Háplicos	2.810,25	0,71
Gleissolos Melânicos	11.856,63	2,99
Latossolos Vermelho-Amarelos	346.549,01	87,51
Neossolos Flúvicos	21.706,62	5,48
Neossolos Litólicos	176,09	0,04
Neossolos Quartzarênicos	12.929,70	3,26
Total	396.028,29	100,00

Analisando a distribuição espacial dos tipos de uso e ocupação do solo na bacia (Figura 5), percebe-se a predominância do cerrado típico, de porte baixo a médio, que é geralmente associado à presença de Latossolos e Arenitos. Ele ocorre em maior concentração na parte central da bacia indo em direção a porção norte e nordeste da BHRP. Percebe-se que esta fitofisionomia tem sua abrangência espacial de 183.719,88 ha, sendo a fitofisionomia de maior expressão na BHRP com 46,3% da área (Tabela 5).

Figura 5 – Mapa de uso e cobertura da área de estudo.

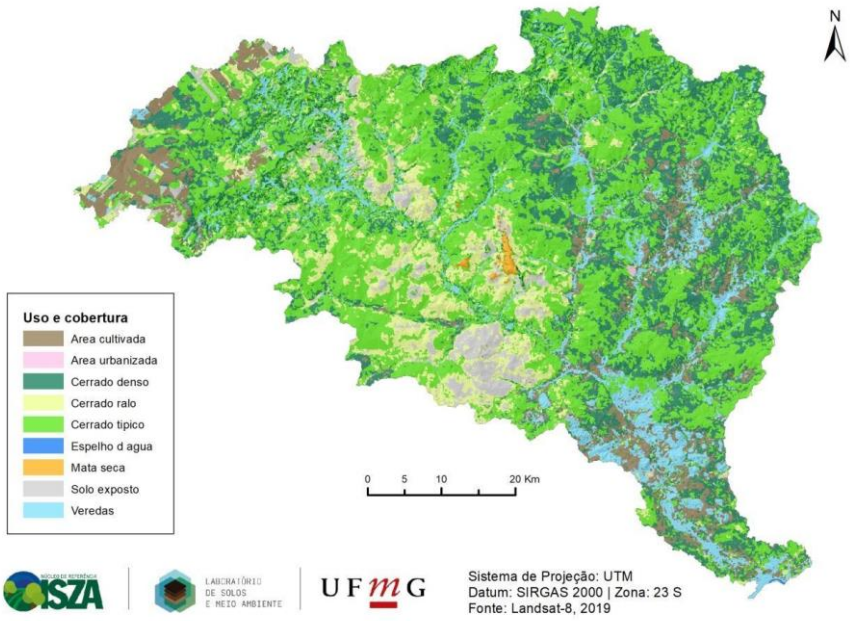


Tabela 5 - Abrangência espacial das classes de uso e cobertura do solo na BHRP.

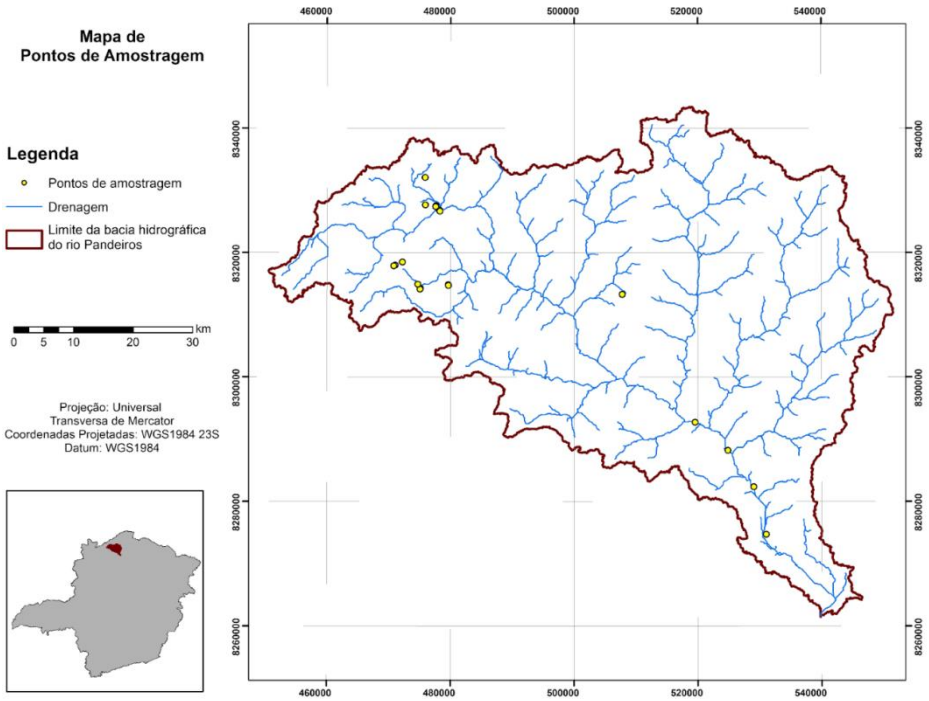
Classe	Área	%
Área cultivada	33.138,21	8,37
Área urbanizada	121,19	0,03
Cerrado denso	85.203,09	21,51
Cerrado ralo	41.246,36	10,42
Cerrado típico/Pastagens	183.719,88	46,39
Espelho d'água	70,08	0,02
Mata seca	1.102,50	0,28
Solo exposto	18.351,75	4,63
Veredas	33.075,23	8,35
Total	396.028,29	100

A segunda classe de uso e cobertura do solo mais abrangente na área de estudo refere-se ao cerrado denso (21,5%), seguido do cerrado ralo (10,42%) (Tabela 5).

Caracterização dos solos e sedimentos

Inicialmente, foram realizados campos de reconhecimento da área de estudo. Em campo a área foi percorrida focando nos pontos de maior susceptibilidade aos processos erosivos priorizando inicialmente, as áreas de cabeceiras da Bacia, como de maior potencial à produção de sedimentos. Dentre os pontos selecionados, foram coletadas 42 amostras sendo que, 27 são de solos e 15 de sedimentos (Figura 6).

Figura 6 - Mapa de pontos de coleta de solos e sedimentos



Em seguida, foram realizadas as análises laboratoriais, que foram divididas entre físicas, químicas e microscópicas. As análises de granulometria foram realizadas no Laboratório de Geomorfologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), por dispersão com NaOH 0,1 mol L-1 e agitação lenta. As frações areia grossa e fina foram separadas por tamização, a argila determinada pelo método da pipeta, e a fração silte calculada pela diferença [(silte + argila) - argila] (EMBRAPA, 1997). A fração areia foi separada em cinco frações (areia muito grossa, grossa, média, fina e muita fina), sendo que a mais representativa de cada amostra, foi separada para as análises de microscopia óptica.

As análises de pH em KCl, M.O, Mg, K, P, Ca, Cu, Fe, Zn, Mn, S e Al, Zn, Cu, Mn e Fe foram realizadas conforme Donagemma et al. (2011). Em seguida, os resultados foram organizados, tabelados e analisados.

As análises microscópicas foram divididas em duas etapas: microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura. As análises de microscopia óptica foram realizadas em todas as 42 amostras e as análises de microscopia eletrônica de varredura em 15 amostras selecionadas.

Zoneamento Ambiental e Produtivo

Para realização do estudo foram utilizadas a base cartográfica (formato *shapefile*) da rede de drenagem regionalizada do Estado de Minas Gerais (IGAM, 2010) e dados de outorgas e cadastros vigentes de usuários de água superficial presentes na bacia hidrográfica do Rio Pandeiros, obtidos via requerimento à Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD). Cada informação individual constante nos dados é composta de descrições específicas como a vazão outorgada (em m^3/s), a finalidade de uso, os tipos de captação, entre outros. Assim, os dados foram processados com auxílio do *software* livre Quantum GIS e, com isso, o diagnóstico da disponibilidade hídrica pode ser obtido após a execução de duas etapas básicas principais.

Na primeira etapa verifica-se qual é a vazão de referência para cálculo da disponibilidade hídrica superficial nas bacias hidrográficas mineiras, cuja informação se baseia na resolução conjunta entre a SEMAD e o Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM). Nesta resolução (nº 1.548) é estabelecido que em algumas bacias estaduais sejam garantidas, a jusante de cada captação, 50% da vazão média de sete dias de duração e dez anos de recorrência ($Q_{7,10}$) e em outras bacias hidrográficas esse percentual é alterado para 70%, devido ao fato de serem consideradas em estado de conflito pelo direito de uso dos recursos hídricos, cenário no qual a bacia hidrográfica do Rio Pandeiros está inserida.

Na segunda etapa, atribui-se a cada trecho de curso d'água a soma das vazões demandadas, seguindo orientações específicas para cada tipo de captação e, em seguida, foi calculado o comprometimento hídrico de cada extensão da rede de drenagem. Assim, onde a demanda assumiu valores de intervalos entre 0 a 50% da vazão outorgável, classificou-se o trecho como "em estado de disponibilidade hídrica", já onde a demanda apresentou valores com intervalo entre 50 a 100% da vazão outorgável, classificou-se o trecho como "em estado de atenção", por último, onde a demanda estava acima de 100%

da vazão outorgável, considerou-se o trecho como em “estado de indisponibilidade hídrica”.

O mapeamento do Potencial de Uso Conservacionista (PUC) consiste em um método que realiza o cruzamento das características físicas do ambiente (solos, geologia e relevo), utilizando-se bases cartográficas oficiais disponíveis e sem custos de obtenção. O resultado da interseção das variáveis ambientais permite categorizar as áreas de uma bacia hidrográfica quanto ao potencial de uso conservacionista que, por sua vez, tem como objetivo central o zoneamento integrado de áreas propícias à recarga hídrica, ao potencial de uso agrícola e a resistência à erosão (COSTA et al., 2017).

Os materiais utilizados no estudo são: o Mapa de solos do Estado de Minas Gerais (Folha 4); o Mapa Geológico do Estado de Minas Gerais e o Modelo Digital de Elevação (MDE) – ALOS PALSAR, com resolução espacial de 12,5 m; bem como o Software livre Quantum GIS.

Após a obtenção dos dados cartográficos, o Zoneamento do Potencial de Uso Conservacionista foi elaborado em três etapas principais, quais sejam: pré-processamento dos dados cartográficos; reclassificação e álgebra de mapas.

Na primeira etapa realiza-se a conversão dos dados cartográficos para o sistema de coordenadas planas, projeção UTM, Datum SIRGAS 2000, fuso 23 Sul, depois é feito o recorte para a área de referência com base nos limites físicos da bacia hidrográfica. A segunda etapa constitui na atribuição de pesos para cada classe das variáveis: solo, geologia e declividade, conforme proposto por Costa et al. (2017a). Os pesos atribuídos variaram de 1 a 5, sendo que, quanto maior o valor, maior é o potencial da área para o uso de forma conservacionista e mais eficientes serão os efeitos de ações preservacionistas a serem implantadas. Além dos pesos, os autores sugerem uma ponderação para as variáveis ambientais utilizadas, conforme equação abaixo (Costa et al., 2017):

$$\textit{Potencial de uso conservacionista} = (\text{Declividade} \times 0{,}50) + (\text{Solos} \times 0{,}39) + (\text{Litologia} \times 0{,}11)$$

Aplicada a álgebra, observa-se que o intervalo de abrangência de potencial de uso conservacionista pode variar de 1 a 5 (adimensional), considerando-se todo o cenário ambiental para o Estado de Minas Gerais. Tal intervalo pode ser segmentado em cinco intervalos de classes que, por sua vez, permitem padronizar as análises ambientais e comparar resultados em diferentes bacias hidrográficas, conforme Tabela 6.

Tabela 6 – Descrição das classes adotadas no zoneamento do Potencial de Uso Conservacionista.

Classe	Intervalo	Cor
Muito baixo	1,0 – 1,8	Vermelho
Baixo	1,8 – 2,6	Laranja
Médio	2,6 – 3,4	Amarelo
Alto	3,4 – 4,2	Verde
Muito alto	4,2 – 5,0	Azul

A classificação do uso e cobertura do solo foi baseada em 4 (quatro) etapas principais: i) Pré-processamento; ii) obtenção de amostras; iii) classificação; iv) pós-processamento. Na etapa de pré-processamento foi realizada a conferência geométrica e geográfica, recorte para a área de interesse, realce de contraste e conversão para o sistema de coordenadas planas, Datum SIRGAS 2000, Zona 23 Sul.

Na etapa de obtenção de amostras, foi realizada a fotointerpretação da imagem e, em seguida, escolhidas regiões na bacia hidrográfica referentes aos temas: corpo hídrico, solo exposto, área minerada, área cultivada, área urbanizada, pastagens e vegetação arbórea. Em seguida, realizou-se a classificação utilizando o classificador por máxima verossimilhança. No pós-processamento, foi realizada a conversão de formatos (raster para shape) e a readequação de valores das classes, conforme seu tema de origem.

Ajuste de modelos matemáticos de curvas granulométricas para a comparação entre os materiais amostrados de solos/saprolitos e de sedimentos fluviais

A análise granulométrica foi efetuada conforme os procedimentos detalhados em Almeida et al. (2012) e Teixeira et al. (2018). As frações da areia foram separadas por peneiramento a seco, com uma adaptação da escala da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo e do USDA (Ferreira, 2010) – areia muito grossa (2,00-1,00 mm), areia grossa (1,00 - 0,50 mm); areia média (0,50–0,210 mm); areia fina (0,210 - 0,10 mm) e areia muito fina (0,10-0,05 mm). Os resultados foram ajustados para 100% pela divisão do valor obtido pela soma das frações, com a redistribuição proporcional dos valores.

As análises estatísticas foram executadas nos programas Microsoft Excel 2010 e R (R Core Team, 2019).

**Recarga hídrica*

(Artigo publicado: An Improved Model for the Evaluation of Groundwater Recharge Based on the Concept of Conservative Use Potential: A Study in the River Pandeiros Watershed, Minas Gerais, Brazil. (Tenenwurcel et al., 2020)

Os materiais utilizados neste estudo são indicados na Tabela 7 e são compostos por: i) um Modelo de Elevação Digital (DEM) ALOS PALSAR com uma resolução espacial de 12,5 metros; ii) mapa de uso e cobertura mapeado na escala 1: 25.000; iii) o mapa de solos do estado de Minas Gerais na escala de 1: 600.000; iv) notas da recarga hídrica do método PUC e condutividade hidráulica correspondente às classes de solos da bacia; v) Precipitação e evapotranspiração real de estações meteorológicas nos municípios próximos a bacia e vi) os dados de vazão da estação 45250000, correspondente a foz do Rio Pandeiros.

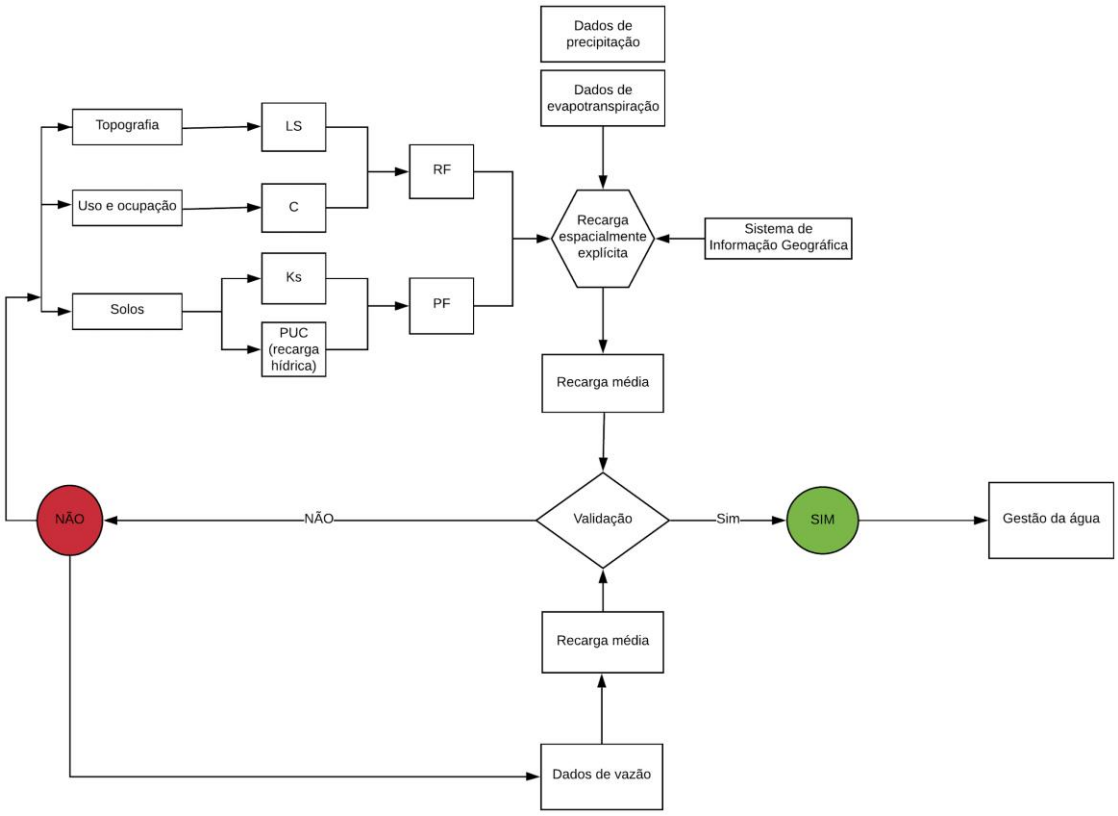
Tabela 7 - Materiais utilizados no trabalho.

Tipo de dado	Utilização no trabalho	Endereço eletrônico
Modelo Digital de Elevação	Cálculo do fator LS	https://www.asf.alaska.edu
Mapa de uso e cobertura	Cálculo do Fator de escoamento (RF)	https://www.earthexplorer.usgs.gov/
Mapa de solos	Cálculo do fator de percolação (PF)	https://www.dps.ufv.br
Dados de precipitação e evapotranspiração	Cálculo da recarga potencial	https://www.inmet.gov.br
Dados hidrométricos	Validação dos dados de recarga potencial (análise de curva de recessão)	https://www.snirh.gov.br/hidroweb

Para a avaliação da recarga potencial subterrânea espacialmente distribuída da BHRP, foi utilizada a metodologia proposta por Costa et al., (2019), com ajustes pontuais (COSTA ET AL., 2019). O trabalho foi dividido em 5 principais etapas, como representado no fluxograma da Figura 7. As atividades foram: i) aquisição de mapas de uso do solo, DEM, mapa de solos e dados climáticos (precipitação e evapotranspiração real); ii) cálculo do fator de escoamento superficial (RF) através do fator LS (comprimentos das encostas e graus de declividade) e dos coeficientes de escoamento para os tipos de uso e ocupação (C); iii) cálculo do fator de percolação de água (PF) com base nas notas de recarga hídrica do método Potencial de Uso Conservacionista (PUC) (C0STA ET AL.,2017) e valores de condutividade hidráulica (Ks) adaptados [28,29]; iv)

cálculo da recarga hídrica subterrânea em cada ponto da bacia e um valor médio para toda a bacia usando um sistema de informação geográfica (SIG); v) validação dos resultados por meio de comparação da recarga média previamente calculada com o valor estimado pelo método de análise de curva de recessão do hidrograma da bacia.

Figura 7 – Fluxograma do cálculo da recarga hídrica potencial e validação do estudo Adaptado Costa et al., 2019.



Na primeira etapa do estudo, as médias anuais de precipitação e evapotranspiração real dos municípios próximos à área de estudo foram estimadas usando dados de 2009 a 2018. Foram utilizadas as estações meteorológicas (coletadas no INMET) dos municípios de Arinos-MG, Januária-MG, Montes Claros-MG, Salinas-MG, Cariranha-BA, Espinosa-MG, Formoso-MG, Posses-GO e Brasília-DF. Séries temporais mais longas seriam mais adequadas para estimativas de recarga, no entanto, não estavam disponíveis. Para preenchimento das falhas nas séries temporais foi utilizado o método da ponderação regional e a informação foi interpolada através do cálculo da ponderação da distância inversa (IDW) elevada à potência de dois [30]. Esse interpolador foi utilizado porque reduz a influência dos valores registrados nas estações mais distantes da bacia do Rio Pandeiros, com pesos maiores para os valores das estações mais próximas.

Posteriormente, os dados foram especializados e recortados até os limites da área de estudo.

Na segunda etapa, o mapa de uso e cobertura do solo e as informações topográficas derivadas do modelo digital de elevação (comprimento da rampa e grau de declividade, fator LS) foram utilizados para calcular um fator de escoamento superficial, baseado no método proposto por Böhner e Selige (2002). O fator de escoamento superficial foi calculado de acordo com a Equação 1:

$$RF = 1 - (C + LS_{Fuzzy})$$

Onde:
RF é o fator de escoamento superficial (adimensional); C é o coeficiente de escoamento superficial (valores adimensionais adotados da Tabela 7); LS_{Fuzzy} é o comprimento da rampa e o grau de declividade estimado usando o método de Desmet e Govers (1996) [32], sendo que este valor foi posteriormente ajustado para um intervalo de 0 a 1 por um algoritmo de lógica fuzzy (quanto mais próximo de 1, mais íngreme é o declive na paisagem).

Tabela 8 - Coeficientes de escoamento superficial para cada uso e cobertura na bacia hidrográfica do Rio Pandeiros – MG (American Society of Civil Engineers-ASCE, 1969) [33].

Classes de uso e cobertura	C
Áreas antropizadas	0,50
Áreas urbanizadas	0,85
Formação florestal	0,10
Solo exposto e vegetação rasteira	0,60
Veredas	0,09

Na terceira etapa, para o cálculo do fator de percolação (PF), considerou-se as classes de solo presentes na bacia (UFV, 2010). Através de revisão sistemática de literatura, definiu-se valores de condutividade hidráulica (Ks) para cada classe de solo, no segundo nível categórico do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) (SANTOS ET AL., 2018). Os valores de Ks foram estabelecidos conforme Pedron (2011) e Amaral (2017).

Diferente do método proposto por Costa et al. (2019), para o cálculo do fator de percolação do modelo foi utilizado a categoria da recarga hídrica pertencente ao método do Potencial de Uso Conservacionista (PUC), desenvolvido por Costa et al. (2017). O

PUC consiste em um método que permite categorizar as áreas de uma bacia hidrográfica quanto às suas limitações e potencialidades de uso através do cruzamento das características físicas do ambiente (solos, geologia e geomorfologia) Costa et al. (2017). As análises são realizadas com foco na recarga hídrica, potencial de uso agrícola e resistência à erosão em bacias hidrográficas. Para esse trabalho, utiliza-se o parâmetro de recarga hídrica, que atribui para as classes de solo da bacia uma nota variável de 1 a 5. O parâmetro leva em consideração a profundidade efetiva, textura e drenagem de cada uma das classes de solos, em primeiro nível categórico (ORDEM) do SiBCS (SANTOS ET AL., 2018). Assim, o solo que apresenta profundidade efetiva considerável, drenagem satisfatória e textura favorável à infiltração, atribui-se, ao mesmo, maior nota quanto à recarga hídrica.

No entanto, para adequar o método PUC para o modelo de recarga foi realizado um processo de parametrização das notas de 1 a 5 para valores entre 0 e 1. Os valores utilizados na modelagem estão representados na Tabela 8. O fator de percolação foi avaliado através da Equação (2).

$$PF = Ks_{Fuzzy} \times PUC$$

Onde:
PF é o fator de percolação da água (adimensional); Ks_{Fuzzy} (adimensional) é a condutividade hidráulica do solo ajustada para uma faixa de 0 a 1 através de lógica fuzzy (quanto mais próximo de 1, maior a condutividade hidráulica do solo na classe especifica); PUC são as notas do parâmetro Recarga Hídrica utilizadas pelo método PUC ajustados para um intervalo entre 0 e 1.

Tabela 9 – Classes de solo e respectivos valores de Ks_{Fuzzy} e notas do Parâmetro Recarga Hídrica do método PUC associados na bacia hidrográfica do Rio Pandeiros – MG (PEDRON, 2011; AMARAL, 2017).

Classe de solo	Nota PUC	Ks_{fuzzy}
Cambissolo Háplico	0,4	0,3
Gleissolo Melânico	0,1	0,01
Latossolo Vermelho-Amarelo	0,7	1
Neossolo Flúvico	0,3	0,02
Neossolo Litólico	0,3	0,06
Neossolo Quartzarênico	0,3	0,61

Na quarta etapa, foram calculados os valores para a recarga potencial de água subterrânea em cada ponto da bacia estudada, utilizando a Equação (3):

$$RPot = [(P - ETr) \times RF \times PF] \times 10$$

Onde:
RPot é o potencial de recarga das águas subterrâneas (m^3 ha^{-1} ano^{-1}); P é a precipitação média anual (mm ano^{-1}); ETr é a evapotranspiração real média (mm ano^{-1}); RF é o fator de escoamento superficial; PF é o fator de percolação.

Os resultados foram validados na quinta etapa através da comparação da recarga média calculada com o valor estimado pelo método de análise de curva de recessão, utilizando a equação Maillet (PACHECO, 2012; SANTOS ET AL., 2014). O hidrograma gerado para o rio Pandeiros foi obtido através de dados de vazões médias diárias da estação fluviométrica nº 4425000 (Usina do Rio Pandeiros), através do portal Hidroweb (ANA, 2019). Os dados de 2013 a 2018 foram utilizados por ser o período mais recente em que os registros de vazão tiveram maior continuidade na série histórica sem falhas ou dados ausentes. Esses dados foram utilizados para calcular a equação de Maillet (Equação 4) (PACHECO, 2012; SANTOS ET AL., 2014).

$$Qt = Q_0 e^{-\alpha t}$$

Onde:
Qt é a vazão no tempo t (m^3 s^{-1}); Q_0 é a vazão no início da recessão (m^3 s^{-1}); α é o coeficiente da recessão; t é o tempo (dias) do início ao fim da recessão; e é a base do logaritmo neperiano (2,71828).

Assim, o coeficiente da recessão pode ser determinado numericamente, com base na forma logarítmica expressa na Equação (5):

$$\alpha = \frac{LogQ_0 - LogQ_t}{0.4343t}$$

Por fim, o volume de recarga da água subterrânea foi calculado utilizando a Equação (6):

$$V = Q_0 \times t' / \alpha$$

Onde:
V é o volume de recarga (m^3); Q_0 é a vazão no início da recessão (m^3 s^{-1}); t é o conversor de unidade (dias para segundos; 86.400); α é o coeficiente de recessão (adimensional).

A constante de recessão (α; Equação (5)) foi calculada seis vezes, considerando os seis períodos de recessão analisados (2013-2018) e a média destes seis valores foi obtida para gerar a constante de recessão que melhor representa a bacia. Da mesma forma, para cada período foi observado o valor da vazão inicial correspondente (Q_0), vazão final

(Q_1) e tempo de recessão (t_1-t_0). Em seguida, foi utilizado um valor médio na Equação (6), do valor de Q_0, para obter o potencial médio de recarga.

Drastic

* Em formatação para submissão à revista Elsevier – Special Issues.

Modelo DRASTIC

O método DRASTIC é um método paramétrico muito difundido e utilizado ao redor do planeta atualmente. Esta metodologia foi desenvolvida por Aller et al. (1987) para a Agência de Proteção Ambiental Norte-Americana (US-EPA), constituindo-se num método utilizado para avaliar a vulnerabilidade natural de contaminação de sistemas aquíferos a partir da superfície, por fontes agrícolas ou pesticidas. Para estimar a vulnerabilidade dos sistemas são utilizadas variáveis hidrogeológicas da região em estudo.

As variáveis, ou parâmetros, utilizados por este modelo são:

D - Profundidade das águas subterrâneas (Depth to groundwater);

R - Recarga hídrica (Recharge);

A - Material do aquífero (Aquifer media);

S - Solos (Soil media);

T - Topografia (Topography);

I - Impacto na zona vadosa (Impact of the vadose zone);

C - Condutividade hidráulica (Condutivity hydraulic).

Para gerar o mapa de vulnerabilidade foi utilizada uma equação para o cálculo dos índices finais DRASTIC a partir da soma ponderada de sete parâmetros, sendo que cada parâmetro é multiplicado pelo respectivo peso. Neste contexto, através do ArcGIS versão 10.3.1 foi realizado o processo chamado de álgebra de mapas, através da ferramenta calculadora raster, de acordo com a fórmula abaixo.

$$DRASTIC = (Dp \times Di)\ (Rp \times Ri) + (Ap \times Ai) + (Sp \times Si) + (Tp \times Ti) + (Ip \times Ii) + (Cp \times Ci)$$

Onde:

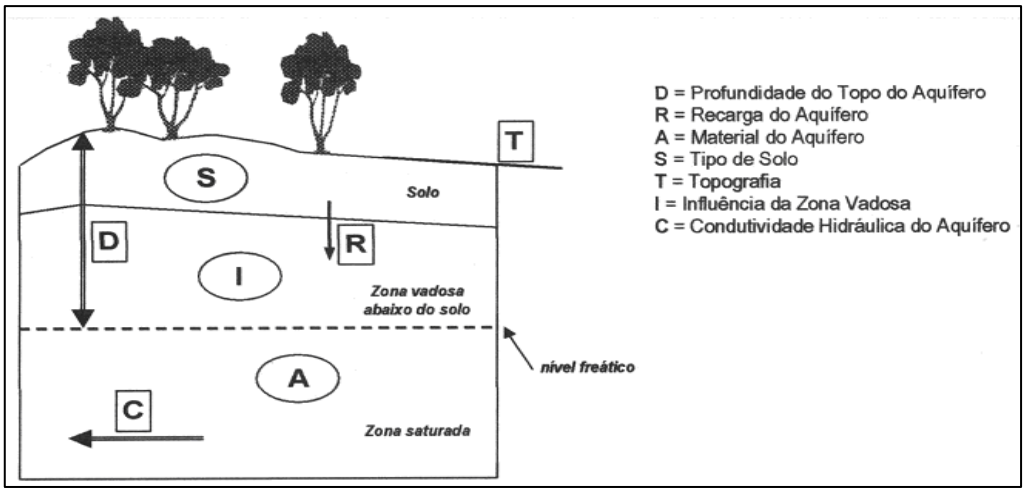
i representa o índice atribuído a cada parâmetro em seus respectivos intervalos de ocorrência e p representa o peso atribuído a cada parâmetro conforme apresentado na Tabela 7. Os pesos variam de 1 a 5, sendo 1 o valor representativo para menor vulnerabilidade e 5 o valor máximo de vulnerabilidade. Enquanto os índices variam de 1 a 10, sendo 1 o menor nível de vulnerabilidade e 10 o valor máximo de vulnerabilidade.

Além disso, a tabela 10 demonstra os pesos adotados para cada parâmetro avaliado pelo método e a figura 8 demonstra a distribuição espacial dos parâmetros e como eles podem influenciar na contaminação do sistema aquífero.

Tabela 10 - Parâmetros e pesos utilizados pelo modelo DRASTIC.

Parâmetros e pesos
D - Profundidade do topo do aquífero (5)
R - Recarga do aquífero (4)
A - Material do aquífero (3)
S - Tipo de solo (2)
T - Topografia (1)
I - Impacto da zona não saturada ou vadosa (5)
C - Condutividade hidráulica do aquífero (3)

Figura 8 - Ilustração dos parâmetros incorporados no modelo DRASTIC.



Fonte: PACHECO, 2012

O índice final pode variar entre 23 e 230, podendo indicar vulnerabilidade baixa, intermediária, alta ou muito alta (Tabela 11). Quanto maior o índice DRASTIC, maior será a vulnerabilidade natural do aquífero à contaminação. Entretanto, a ocorrência de um baixo índice em uma região não significa que a contaminação não possa ocorrer, apenas que a mesma será menos provável de acontecer do que em outras áreas.

Tabela 11 - Graus de vulnerabilidade (BORGES, 2017).

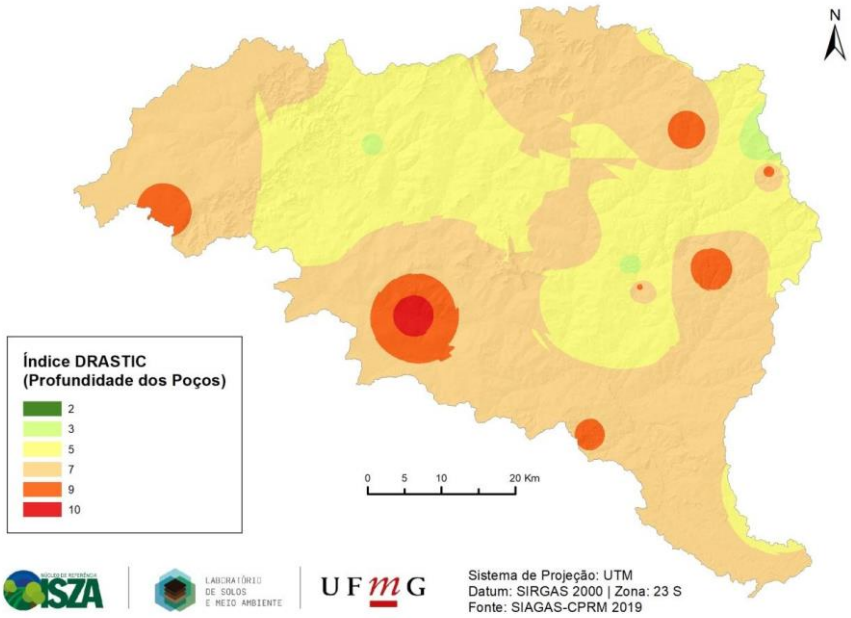
Índice DRASTIC	Vulnerabilidade
Maior que 199	Muito elevada
160 - 199	Elevada
120 – 159	Moderada
Inferior a 120	Baixa

Os dados utilizados para a aplicação do método DRASTIC são referentes a profundidade do nível hidrostático da água nos poços, conforme representado na Tabela 12. A partir disto, foi realizado o processo de interpolação utilizando o método *Inverse Distance Weighted* (IDW) para estimar os valores de profundidade para todas as áreas da bacia e assim, a imagem foi reclassificada de acordo com os índices propostos pelo método. A tabela 12 ilustra como é feita a adoção dos índices DRASTIC e a figura 9 demonstra a distribuição espacial dos índices na bacia estudada.

Tabela 12 - Nível hidrostático e índices DRASTIC.

Profundidade da Zona Não Saturada (D)	
Profundidade (m)	Índice DRASTIC
< 1,5	10
1,5 - 4,6	9
4,6 - 9,1	7
9,1 - 15,2	5
15,2 - 22,9	3
22,9 - 30,5	2

Figura 9 - Parâmetro D reclassificado (Índice DRASTIC).



As informações sobre a recarga hídrica para a bacia estudada foram retiradas do projeto Águas do Norte de Minas Gerais (PANM) (CPRM, 2019) que disponibiliza o mapa de Potencialidade Hídrica Subterrânea com escala de 1:1.000.000. Para realizar o cálculo da recarga, o PANM utilizou duas metodologias: o método do Balanço Hídrico do Solo e o método do Índice de Infiltração Eficaz.

O método do balanço hídrico é uma adaptação da metodologia proposta por Westenbroek et al. (2010), *SWB- A modified Thornthwaite-Mather Soil-Water-Balance Code for Estimating Groundwater Recharge*, que possui o objetivo de estimar a distribuição espacial e temporal da recarga hídrica subterrânea. A região é dividida em uma grade regular e para cada ponto da grade é realizado o balanço hídrico do solo, cujas entradas e saídas de água nas células são determinadas com base em dados climáticos diários (precipitação e evapotranspiração), uso e ocupação da terra e tipos de solos. A recarga é estimada em cada célula da grade pela equação abaixo:

$$REC = (\underbrace{PREC}_{entrada}) - (\underbrace{INT + ES + EVAP}_{saída}) - \Delta S$$

Onde:

REC – Recarga Hídrica Subterrânea;

PREC – Precipitação média diária;

INT – Intercepção vegetal;

ES – Escoamento superficial;

EVAP –Evapotranspiração;

ΔS – Variação do armazenamento da água no solo.

Fonte: CPRM, 2019

Já na metodologia de Índice de Infiltração Eficaz o valor estimado para recarga hídrica subterrânea é proporcional ao volume precipitado médio anual. Assim como no balanço hídrico, a região é dividida em uma grade regular e para cada ponto da grade os valores de recarga são estimados de acordo com a equação abaixo:

$$REC = PREC \times CI$$

Onde:

REC – Recarga hídrica subterrânea;

PREC – Precipitação média anual;

CI – Coeficiente de infiltração eficaz.

Fonte: CPRM, 2019

Onde:

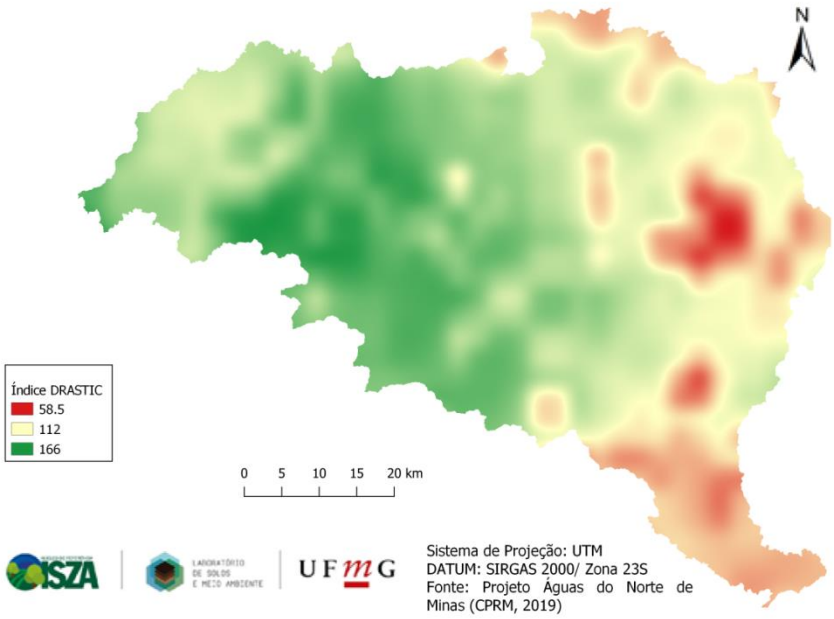
Coeficiente de infiltração eficaz (CI) representa a porcentagem da água proveniente de precipitação que efetivamente atinge o aquífero (recarga).

Os valores anuais de recarga foram analisados e filtrados para a área da bacia e depois reclassificados de acordo com os índices propostos pelo método DRASTIC original, conforme apresentado pela Tabela 13. A Figura 10 ilustra a distribuição da recarga hídrica na bacia.

Tabela 13 - Índices DRASTIC para intervalos de recarga hídrica.

Recarga Hídrica (R)	
Recarga (mm/ano)	Índice DRASTIC
Menor que 51	1
51 – 102	3
102 – 178	6
178 – 254	8
> 254	9

Figura 10 - Mapa da recarga hídrica da BHRP.

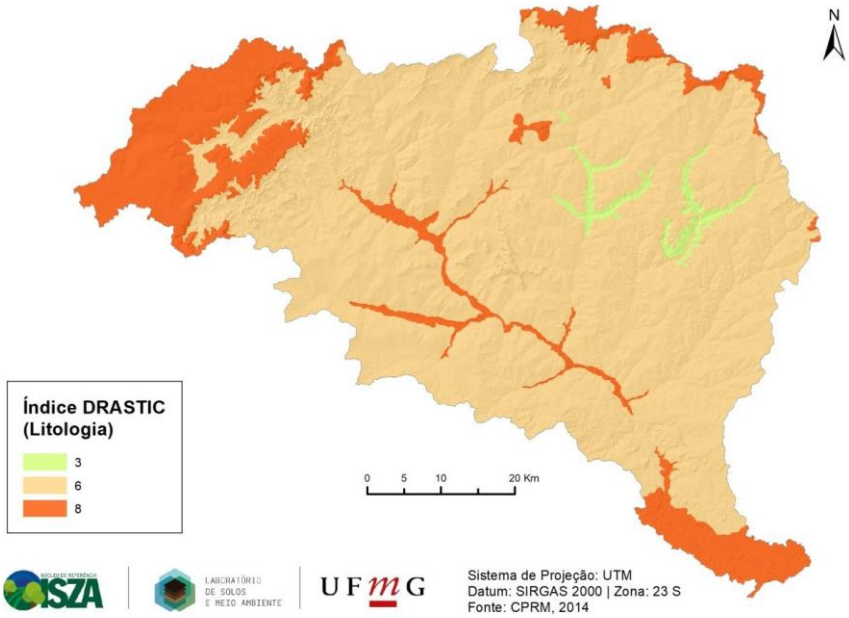


Para a coleta dos dados sobre o material geológico do sistema aquífero da bacia foram consultadas as cartas geológicas de Catolé, São Joaquim, Rio Acari e São Franscisco do projeto fronteiras de minas, com escala de 1:100.000 (CODEMIG/CPRM, 2014). Os litotipos observados na área da bacia foram classificados de acordo com os índices de vulnerabilidade propostos pelo método DRASTIC de acordo com a tabela 14. A figura 11 ilustra a distribuição espacial dos índices DRASTIC em relação aos litotipos encontrados na bacia.

Tabela 14 - Litotipos e índices DRASTIC.

Material do aquífero (A)	
Litologia	Índice DRASTIC
Arenito	6
Calcarenito	6
Areia	8
Gnaisse	3

Figura 11 – Mapa dos litotipos reclassificados (Índices DRASTIC).



A definição do parâmetro A também foi baseado na densidade de lineamentos estruturais da área de estudo, que representa o grau de faturamento das rochas na região. As estruturas representadas pelos lineamentos podem favorecer a migração de contaminantes para o aquífero caso estejam abertas. Como seriam necessários novos estudos mais detalhados para se determinar quais fraturas estão abertas e quais estão fechadas, considerou-se a densidade de lineamentos como diretamente proporcional a vulnerabilidade à contaminação. Dessa forma, quanto maior for a densidade de lineamentos ou fraturas na área, maior será a vulnerabilidade de ocorrer a contaminação do aquífero e naturalmente maiores serão os índices associados a estas regiões (PACHECO, 2012).

Para coleta de informações sobre quais áreas possuem maiores e menores adensamentos de fraturas presentes na bacia, consultou-se as mesmas cartas supracitadas para a definição dos litotipos, com escala de 1:100.000 (CODEMIG/CPRM, 2014). Como observado, a área da bacia possui uma densidade baixa de fraturas e com o intuito de deixar a análise mais precisa e mais adequada para a escala do estudo foi utilizado um raio de busca de 20 Km², assim como proposto por BORGES (2017) que aplicou o modelo DRASTIC no estado do Paraná. Portanto, os resultados da densidade de lineamentos estruturais são apresentados em quilômetros de lineamentos a cada 20 km². A associação dos índices DRASTIC a cada um dos intervalos observados na bacia são apresentados na

tabela 15 e as figuras 12 e 13 demonstram a distribuição espacial dos índices DRASTIC na bacia do Rio Pandeiros.

Tabela 15 - Densidade de lineamentos estruturais a cada 20 km² e índices DRASTIC.

Lineamentos (A)	
Km/20km²	Índice DRASTIC
0 -- 11	6
11 -- 14	7
14 – 16	8
16– 24	9
> 24	10

Figura 12 - Mapa de lineamentos estruturais na BHRP.

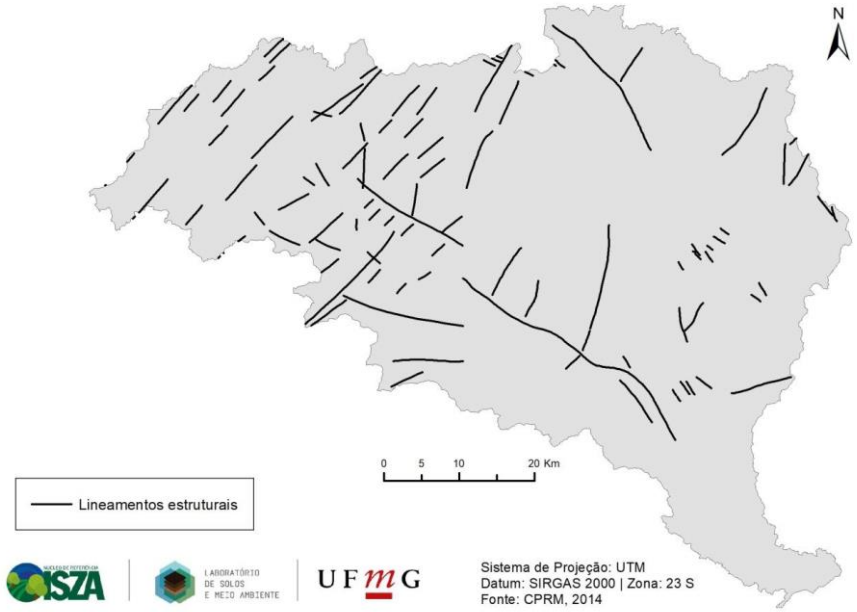
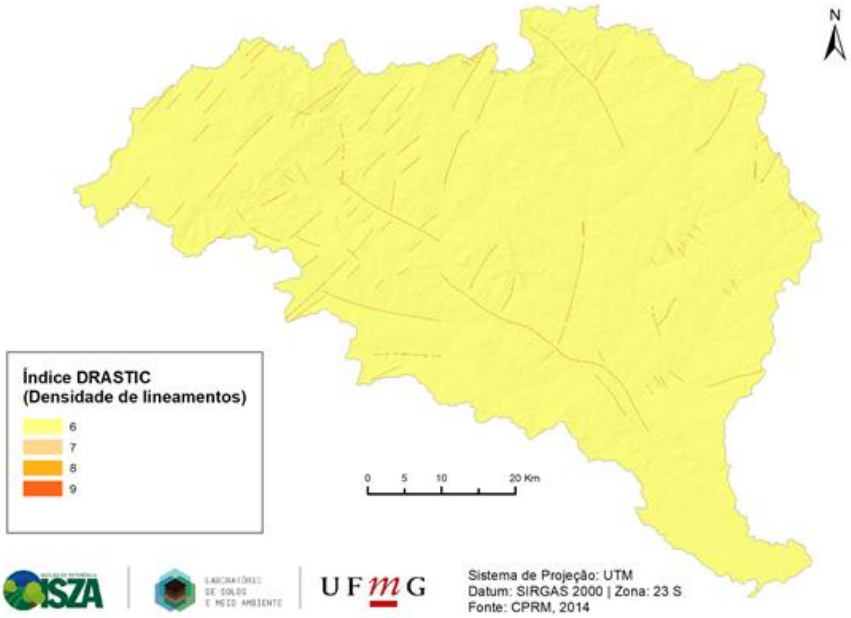
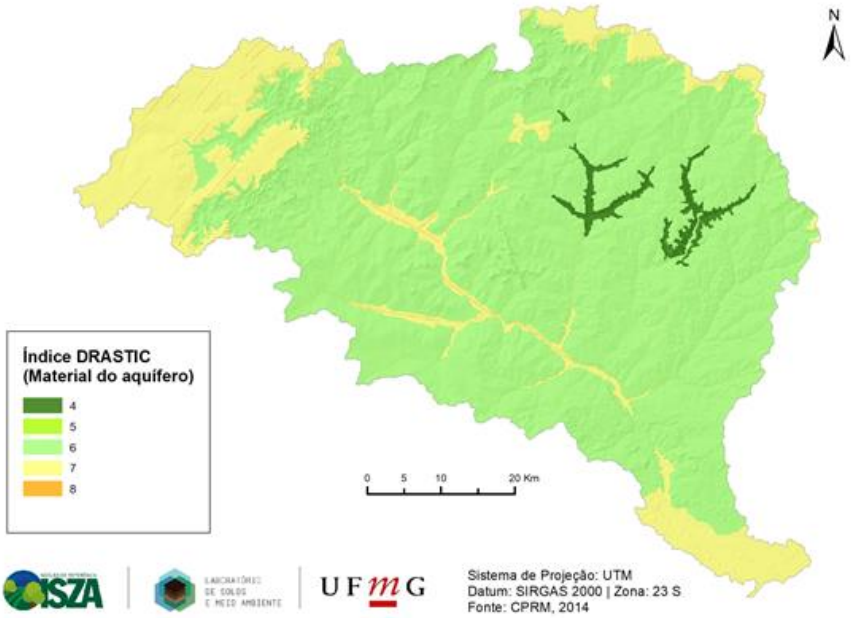


Figura 13 - Mapa de lineamentos estruturais na BHRP.



Por fim, para definir os índices finais para o parâmetro A, realizou-se a média ponderada entre o mapa de litotipos reclassificado com os índices DRASTIC (Figura 13) e o mapa de densidade de lineamentos reclassificados (Figura 12). Esta operação foi realizada através da ferramenta "calculadora raster". O mapa gerado através desta operação é foi utilizado para o cálculo final dos índices de vulnerabilidade (Figura 14).

Figura 14 – Parâmetro A reclassificado (Índices DRASTIC).



Os índices associados ao parâmetro S são baseados na avaliação das classes de solo de acordo com o parâmetro da recarga hídrica pertencente ao método do potencial de uso conservacionista (PUC), desenvolvido por COSTA et al, 2017. O PUC consiste em um método que permite categorizar as áreas de uma bacia hidrográfica quanto ao potencial de uso conservacionista, através do cruzamento das características físicas do ambiente (solos, geologia e geomorfologia) (Costa et al., 2017). As análises são realizadas com foco na recarga hídrica, potencial de uso agrícola e resistência à erosão de bacias hidrográficas.

O parâmetro da recarga hídrica (PUC) atribui para as classes de solo da bacia uma nota variável de 1 a 5 e leva em consideração a profundidade efetiva, textura e drenagem para determinação das notas. Se o solo apresentar profundidade efetiva considerável, drenagem satisfatória e textura favorável à infiltração e percolação de água, adota-se para o mesmo elevada nota de recarga hídrica e da mesma forma um índice DRASTIC alto, pois aumenta a possibilidade de um determinado contaminante atingir o sistema aquífero durante o processo de infiltração e percolação.

Na avaliação do parâmetro solos, o método DRASTIC leva em consideração a textura, profundidade efetiva e a capacidade de infiltração e percolação de água no perfil de solo. Esta última é diretamente relacionada com a textura e estrutura do solo, desta forma solos que possuem boa drenagem, tendem a possuir maior potencial de contaminação. Em relação à profundidade, quanto mais superficial for o perfil do solo, maior será a tendência de ocorrer a contaminação do aquífero e maior será o índice DRASTIC, dado a proximidade com o nível freático.

Desta forma, as classes de solo que obtiveram notas altas através do parâmetro de recarga hídrica do método PUC, também obtiveram índices altos para o DRASTIC, pois foram avaliados como solos de boa percolação de água e recarga, e consequentemente, os contaminantes teriam maior facilidade para atingir o sistema aquífero. As tabelas 16 e 17 demonstram como foi feita a associação das notas do parâmetro de recarga do método PUC para os índices DRASTIC. Já a figura 15 ilustra a distribuição espacial dos índices DRASTIC ao longo da bacia.

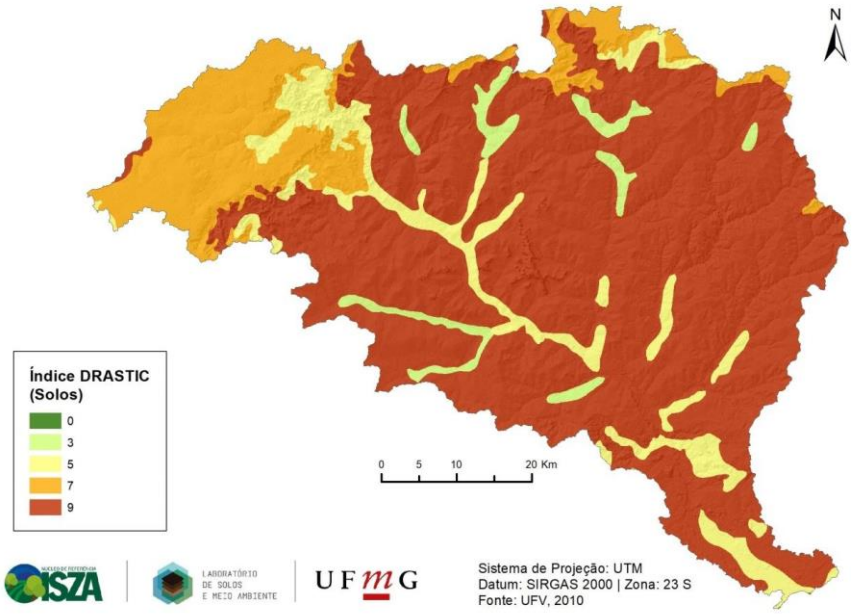
Tabela 16 - Notas PUC associadas aos índices DRASTIC.

Nota PUC	Índice DRASTIC
1	1 - 2
2	3 – 4
3	5 – 6
4	7 – 9
5	10

Tabela 17 - Classes de solos e índices DRASTIC.

Solos (S)		
Classe de solo	Textura	Índice DRASTIC
Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico Típico textura média	A fraco/moderado textura média	9
Latossolo Vermelho- Amarelo Distrófico Típico textura argilosa	A moderado Textura argilosa	8
Cambissolo Háplico Eutrófico Tipico	A moderado textura argilosa	5
Gleissolo Melânico Distrófico Tipico	textura argilosa	3
Neossolo Flúvico Tb Eutrófico Típico	A moderado textura média/argilosa	5
Neossolo Litólico Distrófico Tipico	textura média/argilosa	5
Neossolo Quartzarenico Órtico Tipico	A fraco/moderado textura média	5
Metodologia utilizada: Pesos usados na metodologia PUC (ZAP)		

Figura 15 - Mapa de solos reclassificado (Índices DRASTIC).



O mapa de declividade da área foi elaborado a partir das imagens do satélite ALOS PALSAR e para a determinação das declividades utilizou-se a metodologia da classificação de relevo proposta pela EMBRAPA (1979), associando para cada valor de declive a um índice DRASTIC. A Tabela 18 demonstra como foi feita a associação.

Tabela 18 - Topografia de índices DRASTIC.

Topografia (T)	
% de declividade	Índice DRASTIC
0 –3	10
3 – 8	9
8 – 20	5
20 – 45	3
> 45	1

O solo foi considerado como zona vadosa devido ao potencial que possuem para retenção e degradação de contaminantes antes desses atingirem o sistema aquífero. A caracterização dos solos conforme a resistência aos impactos ambientais, baseia-se nos

métodos de classificação propostos por Kämpf et al. (2001) e Streck et al. (2008), que levam em conta diversas características, como, profundidade, textura, pedregosidade, drenagem natural, erodibilidade, presença ou proximidade de lençóis freáticos e aptidão agrícola. A partir destas, o solo é classificado em quatro índices de resistência a impactos ambientais: muito baixa, baixa, média e alta.

Dessa forma, quanto maior a resistência do tipo de solo aos impactos ambientais, menor o índice DRASTIC atribuído a classe. Na mesma perspectiva, quanto menor a resistência do solo, maior a vulnerabilidade de contaminação do sistema aquífero e, por consequência, maior é o índice associado. A tabela 19 apresenta como foi realizada a classificação dos diferentes tipos de solo da área de estudo e o índice DRASTIC atribuído. A figura 18 ilustra a distribuição espacial dos índices DRASTIC associados para cada classe de solo observada na bacia.

Tabela 19 - Material da zona vadosa e índices DRASTIC.

Impacto da Zona Vadosa (I)	
Classe de solo	Índice DRASTIC
Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico textura média	3
Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico textura argilosa	2
Cambissolo Háplico Eutrófico típico	8
Gleissolo Melânico Distrófico típico	8
Neossolo Flúvico Tb Eutrófico Típico	8
Neossolo Litólico Distrófico típico	8
Neossolo Quartzarênico Órtico típico	6
Metodologia utilizada: Borges, (2017) e Resistência a Impactos Ambientais dos solos (Kämpf – 2001)	

Devido à dificuldade de encontrar dados acerca dos valores de condutividade hidráulica para a área estudada, o trabalho utilizou dados referentes aos valores de transmissividade do aquífero. A adoção deste parâmetro para avaliar a vulnerabilidade de águas subterrâneas já foi realizada por outros autores, como MAIA e CRUZ (2011), que

demonstraram existir uma forte correlação entre transmissividade e condutividade hidráulica, além da aplicação de BORGES et. al. (2017), que fez uso da mesma variável.

A transmissividade é um parâmetro hidráulico que indica a capacidade do aquífero de transmitir água, em toda a sua espessura saturada. Fisicamente, é a vazão do aquífero por unidade de largura (perpendicular ao fluxo) em função de um gradiente hidráulico unitário, numa base de área unitária, geralmente este parâmetro e medido em m^2/dia. Este parâmetro depende do formato, quantidade e interconectividade de espaços vazios (FETTER, 1994; FEITOSA, 2008). Dessa forma, entre os principais aspectos para a avaliação da produtividade e reserva de um aquífero estão a transmissividade e a condutividade hidráulica.

O projeto Águas do Norte de Minas, realizado pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM disponibiliza o mapa hidrogeológico e de produtividade dos sistemas aquíferos de toda a região Norte do estado. Nestes mapas são fornecidos dados sobre a transmissividade em metros quadrados por segundo da Unidade Hidroestratigráfica Aflorante, em escala de 1:1.000.000. Após serem filtrados os dados para a área de estudo, foram atribuídos aos valores de transmissividade os índices DRASTIC, de acordo com BORGES et. al (2017). A Tabela 20 demonstra como foi realizada a associação entre os índices e os valores de transmissividade.

Tabela 20 - Transmissividade e índices DRASTIC.

Transmissividade (C)	
Intervalos de transmissividade (m^2/dia)	Índice DRASTIC
0 - 0,7	3
0,8 - 2,4	5
2,5 - 5,1	7
5,2 - 23,4	9
>23,4	9

Os valores de transmissividade encontrados para a bacia do Rio Pandeiros são demonstrados na tabela 21, juntamente com seus respectivos índices DRASTIC associados. As figuras 16 e 17 ilustram a distribuição espacial ao longo da bacia dos coeficientes de transmissividade e dos índices DRASTIC reclassificados.

Tabela 21 - Transmissividade da bacia do Rio Pandeiros (m²/dia).

(m²/s)	(m²/dia)	Índice DRASTIC
$1{,}05x10^{-3}$	90,72	9
$4{,}85x10^{-4}$	41,904	9
$1{,}2x10^{-5}$	1,0368	5
$3{,}75x10^{-6}$	0,324	3
$1{,}7x10^{-3}$	146,88	9
$1x10^{-4}$	8,64	9

Figura 16 – Mapa da distribuição espacial dos coeficientes de transmissividade na BHRP.

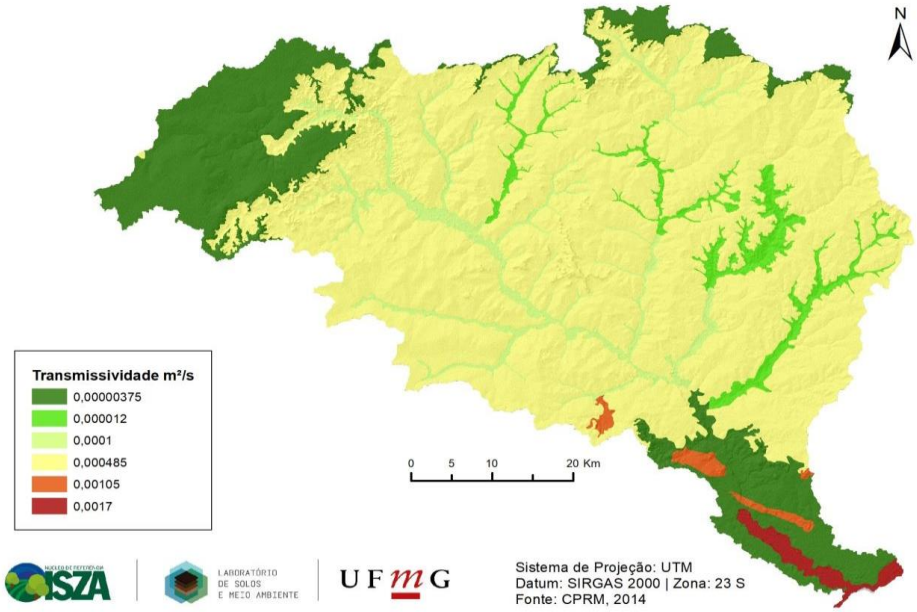
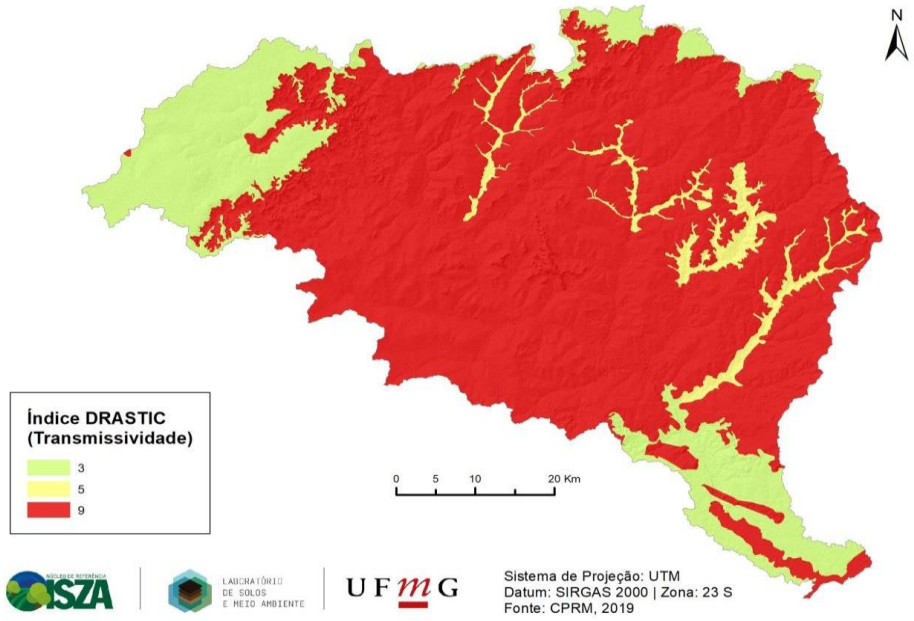


Figura 17 – Mapa de transmissividade reclassificado (Índice DRASTIC).



Resultados

Caracterização dos solos e sedimentos

De modo geral a maioria dos solos coletados apresentou textura arenosa, com predomínio de areia fina. Os sedimentos também apresentaram textura arenosa, apenas um ponto teve os cascalhos como fração dominante, que pode ser justificada pela localização do ponto, uma região de borda de meandro do rio área de deposição de sedimentos. A figura 18 exemplifica o comportamento das amostras de sedimento, mostrando o predomínio da fração areia com destaque para as areias finas. A figura 19 exemplifica o comportamento de amostras de solo, mostrando o predomínio da fração areia com destaque para as areias finas e médias.

Figura 18 - Curvas granulométricas de sedimentos.

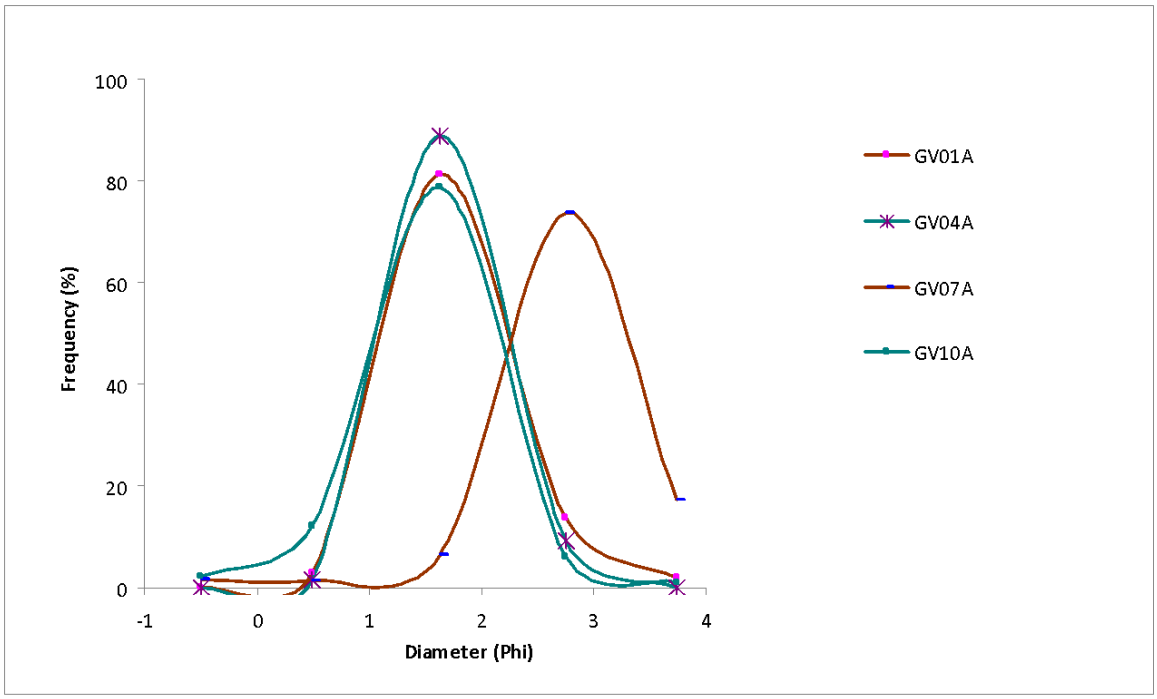
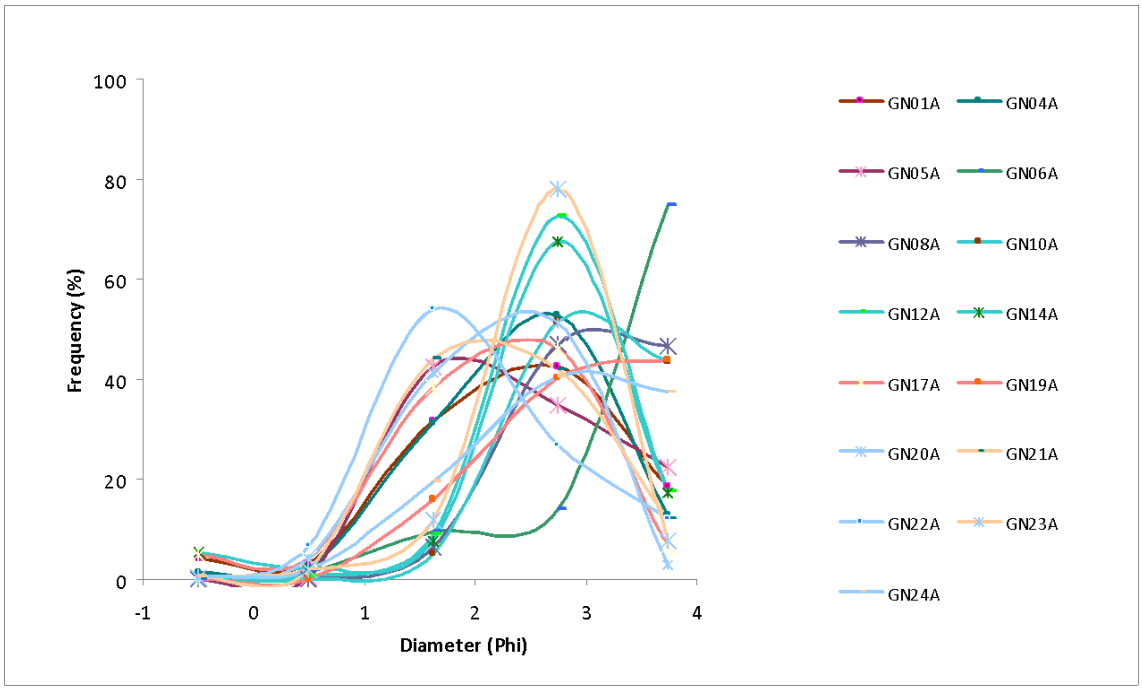
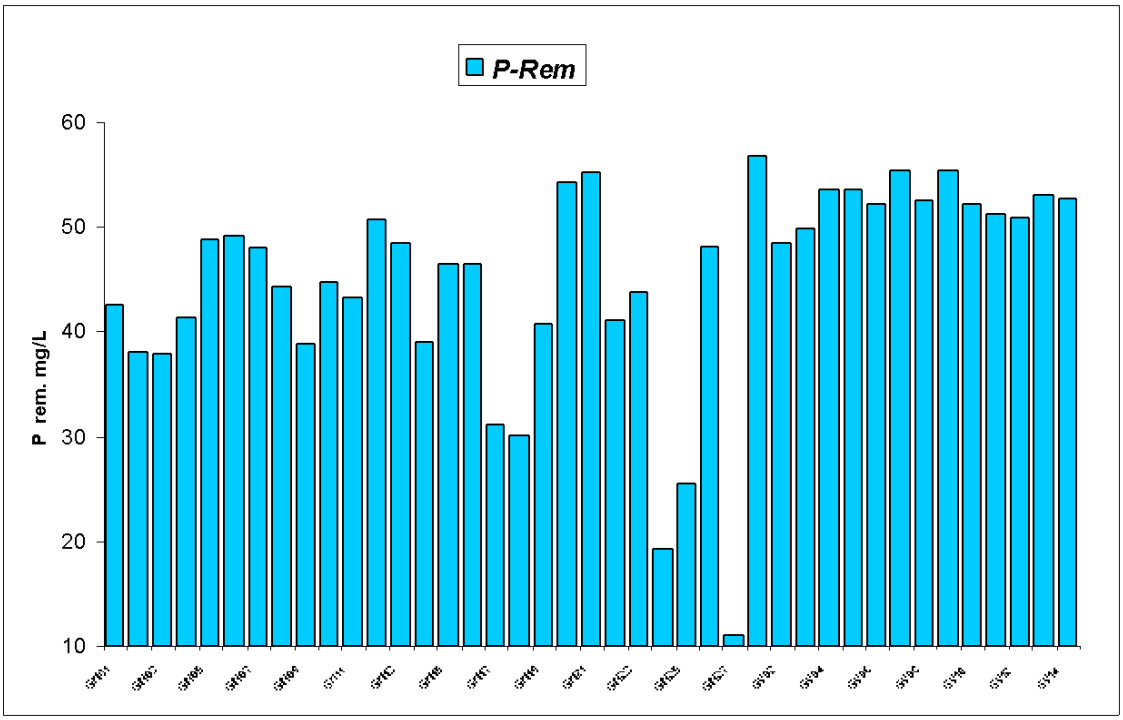


Figura 19 - Curvas granulométricas de solos.



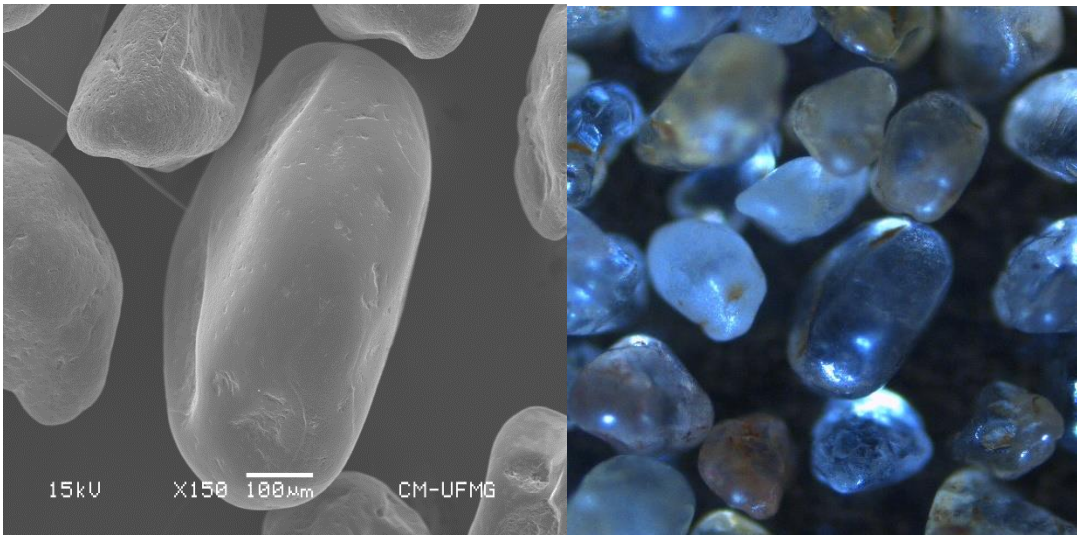
As análises de fertilidade também foram realizadas e estão representadas na figura 20.

Figura 20 - Resultado de análise de fertilidade (Fósforo remanescente) das areias.



As análises de microscopia estão em andamento. Exemplo de sua realização aparecem na Figura 21.

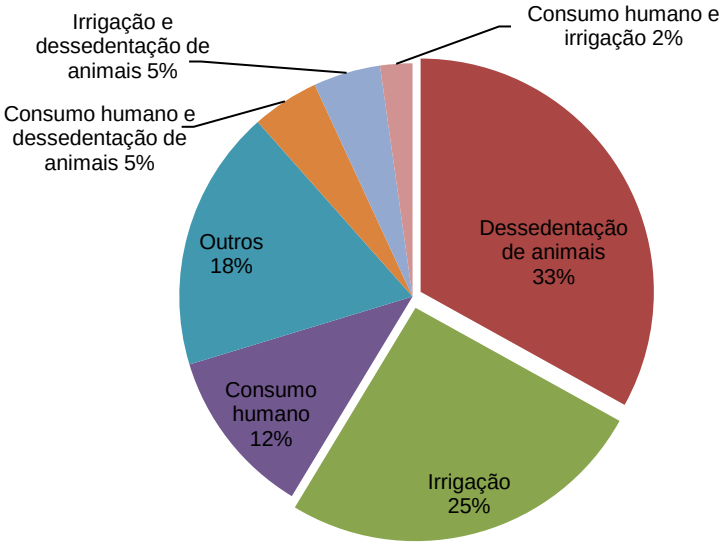
Figura 21 – Exemplo de microscopia eletrônica de varredura e óptica.



Zoneamento Ambiental e Produtivo

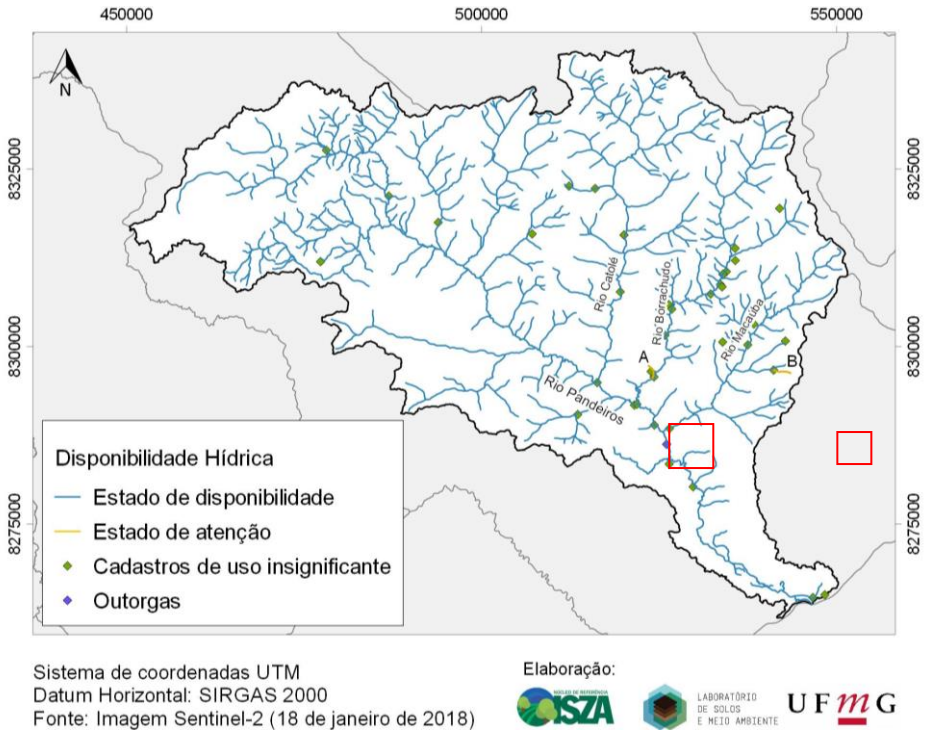
A análise dos dados de disponibilidade hídrica para a bacia do Rio Pandeiros, apontou a existência de 39 pontos de captação de água superficial com processos vigentes. Destes, os principais usos estão relacionados dessedentação de animais, Irrigação e Consumo humano (Figura 22).

Figura 22 – Percentual da vazão demandada por finalidades de usos na BHRP-MG.



Com vazão demandada total de 0,0215 m³/s, observou-se que não houveram pontos na BHRP cuja demanda hídrica estivesse acima do suprimento do sistema fluvial. Ou seja, não houveram trechos que estivesse sobrecarregado em termos de concessão de outorgas, levando como conseqüência, se fosse o caso, ao comprometimento da disponibilidade hídrica, conforme é possível observar na Figura 23.

Figura 23 – Classificação dos trechos de cursos d'água da bacia hidrográfica do Rio Pandeiros quanto à disponibilidade hídrica e localização dos usuários de água superficial na área.

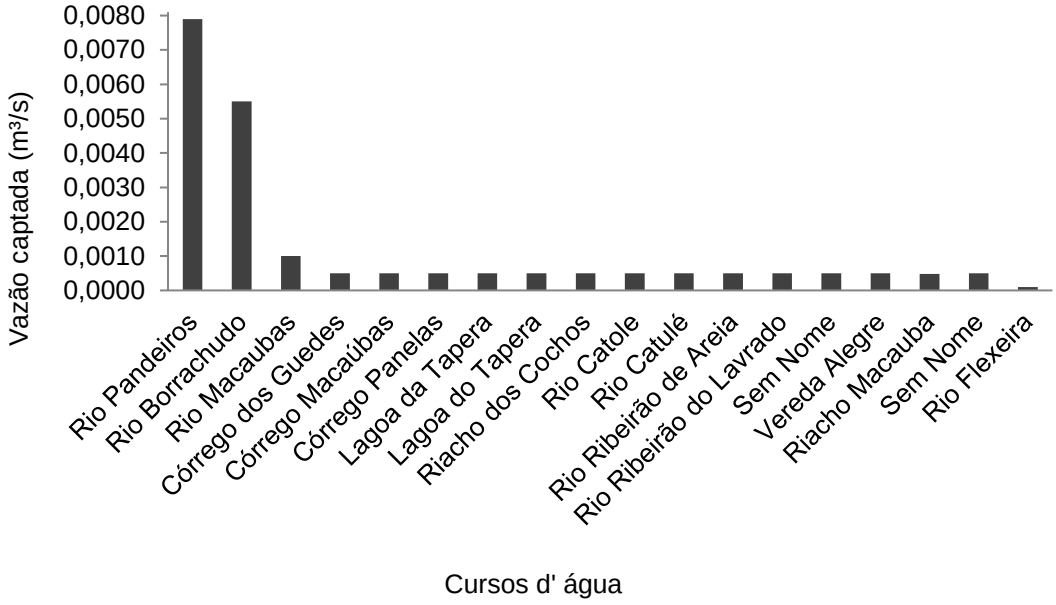


Apesar de não apresentar trechos em estado de indisponibilidade hídrica, é possível observar que na área de estudo existem 2 trechos de cursos d'água que estão em estado de atenção, nestes dois segmentos de cursos d'água (A e B) o comprometimento da demanda hídrica assume valores de 89% e 67%. Isso porque a Q7,10 do trecho A é igual a 0,0019 m³/s e a demanda é igual a 0,0005 m³/s, já a Q7,10 do trecho B é igual a 0,0025 m³/s e a vazão demanda é igual a 0,0005 m³/s.

Em relação aos demais trechos estudados, o não comprometimento da disponibilidade hídrica, indica que a gestão dos recursos hídricos na BHRP está assegurando a quantidade necessária de fluxo de água para manter a ecologia fluvial das águas superficiais na área. Com a ressalva de que, em cenários de escassez de chuvas, os trechos que eventualmente não apresentaram indisponibilidade hídrica, podem sofrer os impactos naturais, com reduções de vazões.

No que diz respeito a vazão captada nos cursos d'água da bacia, tiveram maiores valores o Rio Pandeiros, seguido do Rio Borrachudo e Rio Macaúbas, conforme apresentado na Figura 24, todos caracterizados como os rios de maior ordem na área de estudo, conforme já mencionado.

Figura 24 – Vazão captada em todos os cursos d'água com demanda hídrica vigente na BHRP – MG.

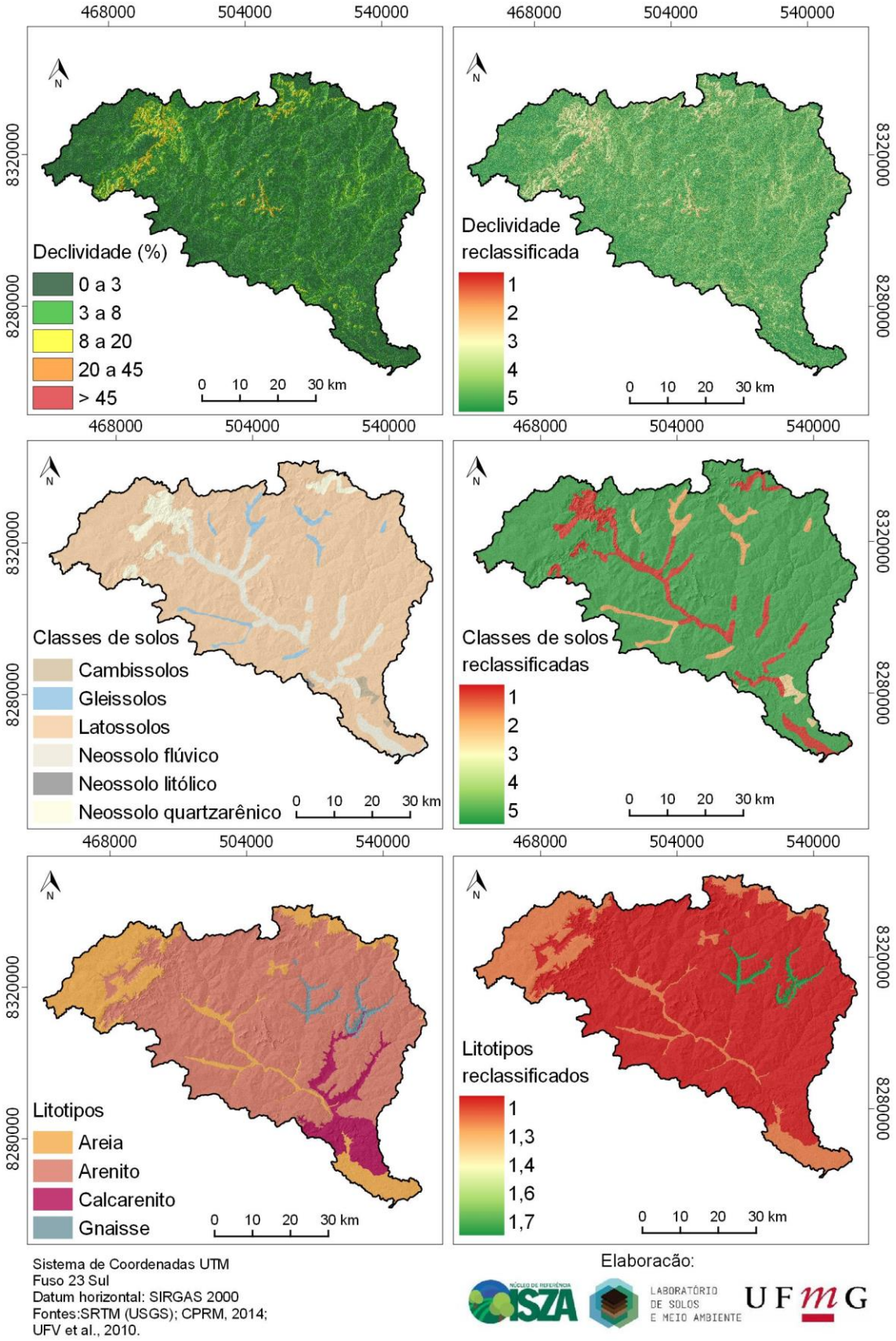


Baseado nas informações da Figura 24 pode-se considerar que a vazão captada média dos trechos apresentados é igual a 0,0013 m³/s, indicando que a maioria dos usuários de água superficial da bacia está na categoria do cadastro de uso insignificante, com captações de 0,5 litros por segundo, com exceção de um usuário, com captação de

aproximadamente 3 litros por segundo. Além disso, é importante destacar que as informações hídricas locais, aliadas com diagnósticos do meio físico da área, aumentam o nível de compreensão dos moradores locais, pesquisadores e extensionistas sobre o seu meio de atuação e contribuem para direcionar suas práticas conservacionistas cotidianas voltadas para a manutenção da qualidade do ecossistema.

Os resultados da reclassificação dos mapas temáticos apresentam de inicio os locais da BHRP cuja declividade, os tipos de solos e as litologias, analisados separadamente, podem favorecer ou limitar um determinado uso conservacionista. As observações primárias dessas informações vão indicar locais cujas restrições naturais podem comprometer adequações ambientais como, a título de exemplo, o plantio de espécies nativas em áreas cuja declividade ultrapassa os 45% e possui peso 1 (Figura 25). Isso porque a restrição topográfica desses locais dificulta tanto o acesso, quanto a circulação de pessoas, bem como o manuseio de ferramentas.

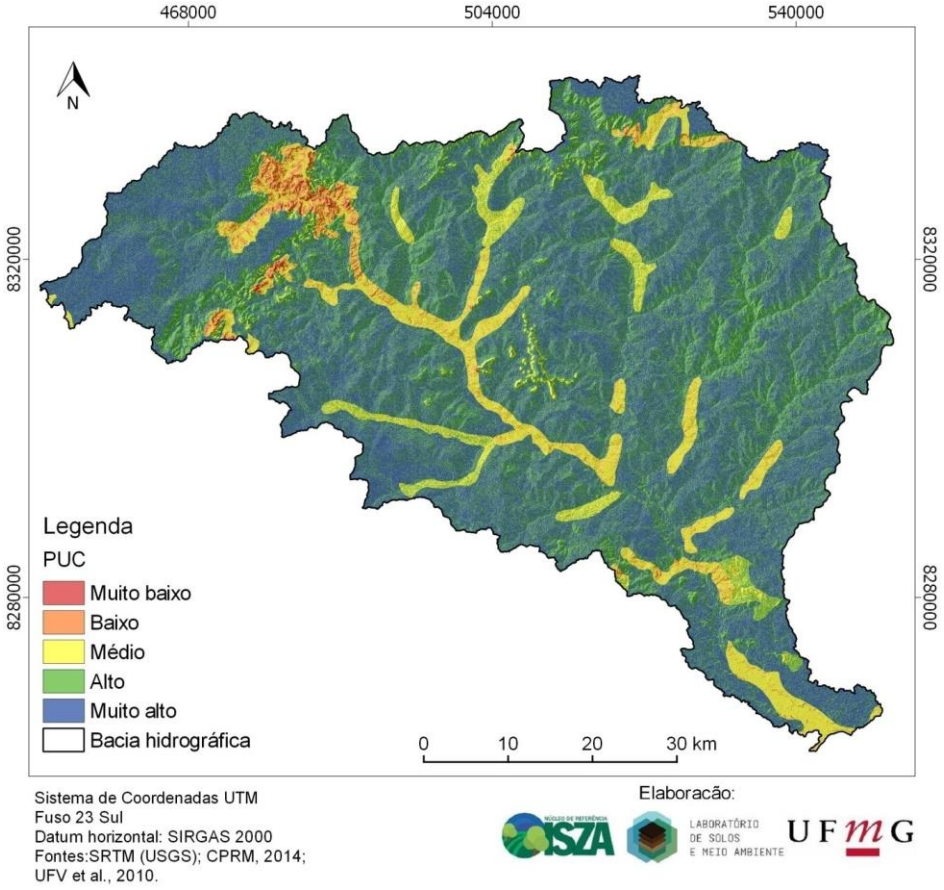
Figura 25 – Resultado da reclassificação dos mapas temáticos da BHRP.



Além da restrição topográfica, os locais com peso 1 indicam restrições quanto ao tipo de solo, principalmente, por serem rasos, pouco desenvolvidos e de pouca fertilidade e quanto as litologias, principalmente, por apresentarem composição mineralógica pobre em nutrientes essenciais, como os macro e micro nutrientes. No outro extremo, os locais que apresentaram peso 5 são as regiões na bacia cujo o relevo é plano, os solos são bem desenvolvidos, como os latossolos por exemplo, e as litologias são ricas em macro e micro nutrientes.

Porém, em relação a essas últimas, não houve locais na área com sua ocorrência, sendo o maior peso de litologia apresentado igual a 1,7, os quais representam os Gnaisses. Assim, a associação de locais com pesos altos em relação aos solos, geologia e declividades, ponderados entre si, conferem os mais altos valores de PUC, conforme apresentado na Figura 26.

Figura 26 – Potencial de Uso Conservacionista da Bacia Hidrográfica do Rio Pandeiros.



Observando a Figura 29, é importante ressaltar que apesar de não apresentar litologias de maiores valores, a ponderação adotada revela uma maior distribuição espacial do PUC Muito alto (41,14%), pois são referentes a associação de relevo plano, suave ondulado e os Latossolos Vermelho-Amarelos presentes na área (Tabela 22).

Assim, da área total da bacia verificou-se que menos de 3% refere-se as áreas de PUC baixo (0,15%) e Muito baixo (2,54%).

Tabela 22 – Abrangência espacial das classes de Potencial de Uso Conservacionista (PUC) na BHRP.

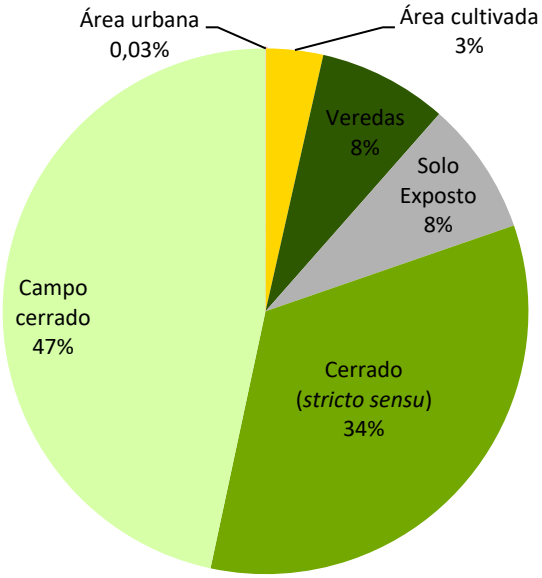
PUC	Área (ha)	%	Área 2*
Muito baixo	608,26	0,15	598,58
Baixo	10.068,83	2,54	9.401,36
Médio	37.547,31	9,48	32.901,91
Alto	162.907,75	41,14	155.162,68
Muito alto	184.896,14	46,69	177.561,17
Total	396.028,30	100,00	375.625,70

* Descontadas as áreas de restrição ambiental: APPs hídricas, de veredas e UC Estadual.

A Tabela 22 também informa que, descontando-se as áreas com restrição ambiental (APPs hídricas, APPs de veredas e a UC Estadual), o mesmo padrão de PUC permanece com as maiores áreas referentes ao PUC Muito alto (mais de 177 mil ha) e com menores áreas referentes ao PUC Muito baixo (aproximadamente 600 ha). Quando essas informações são cruzadas com o mapa de uso e cobertura do solo é possível avaliar um cenário mais amplo de qual uso determinada área está apresentando em função de seu potencial natural e assim, interpretar se há super exploração ou sub-exploração de ecossistemas.

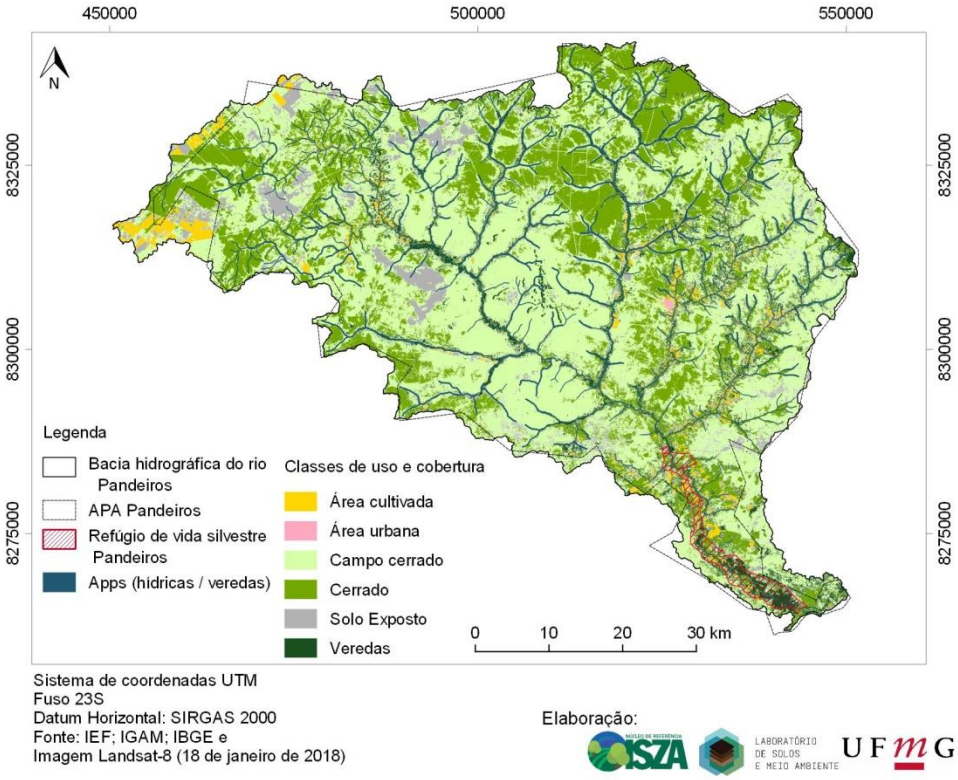
O mapeamento de uso e cobertura do solo na bacia hidrográfica do Rio Pandeiros foi realizada por meio de classificação automática, supervisionada, das imagens Sentinel-2 no software QGIS e as classes temáticas identificadas foram Área urbana, Área cultivada, Campo cerrado, Cerrado Stricto sensu, Campo cerrado e Veredas (Figura 27).

Figura 27 – Porcentagem das classes de uso e cobertura da BHRP.



Os maiores percentuais de cobertura de vegetação nativa como o cerrado stricto sensu (34%), o campo cerrado (47%) e as veredas (8%) ilustram o cenário de conservação da BHRP quando comparadas com outras bacias do Estado, cuja antropização está em estágio mais avançado (Citar bacia hidrográfica do Rio Manso, Bacia hidrográfica do Gualaxo, entre outras), indicando que as restrições legais para a UC está cumprindo o papel conservacionista de seu objetivo. No entanto, mesmo em menor expressão de área, quando comparadas com as demais classes de uso e cobertura áreas antropizadas como a área urbana (0,03%), o solo exposto (8%) e áreas cultivadas (3%) também compõem a paisagem na bacia hidrográfica, conforme é possível observar na Figura 2.

Figura 28 – Mapa de uso e cobertura da BHRP.



Apesar do predomínio de vegetação nativa na área, é possível observar a presença de área cultivada nas proximidades, ou até mesmo dentro, das regiões de veredas, principalmente nos terços superior, próximo à foz, e médio da bacia hidrográfica. No terço inferior, porção noroeste da área e próximo à nascente do curso d'água principal, também há presença de solo exposto (que podem ser atribuídas às áreas de pousio dos cultivos) ao lado das fitofisionomias características do local.

Essa condição pode indicar que há possíveis conflitos de uso e cobertura e/ou áreas de uso consolidado destinado às atividades antrópicas em áreas de restrição ambiental, como as APPs de cursos d'água, nascentes e veredas, bem como na UC Estadual para refúgio da vida silvestre, que somadas totalizam 20.402,6 ha, conforme informado na Tabela 23.

Tabela 23 – Uso e cobertura do solo em áreas de restrição ambiental na BHRP – MG.

Classe de uso e cobertura	Área (ha)	%
Área cultivada	1.413,9	6,9
Campo cerrado	5.426,2	26,6
Cerrado	6.318,6	31,0
Solo Exposto	1.338,8	6,6
Veredas	5.905,1	28,9
Total	20.402,6	100

Ajuste de modelos matemáticos de curvas granulométricas para a comparação entre os materiais amostrados de solos/saprolitos e de sedimentos fluviais

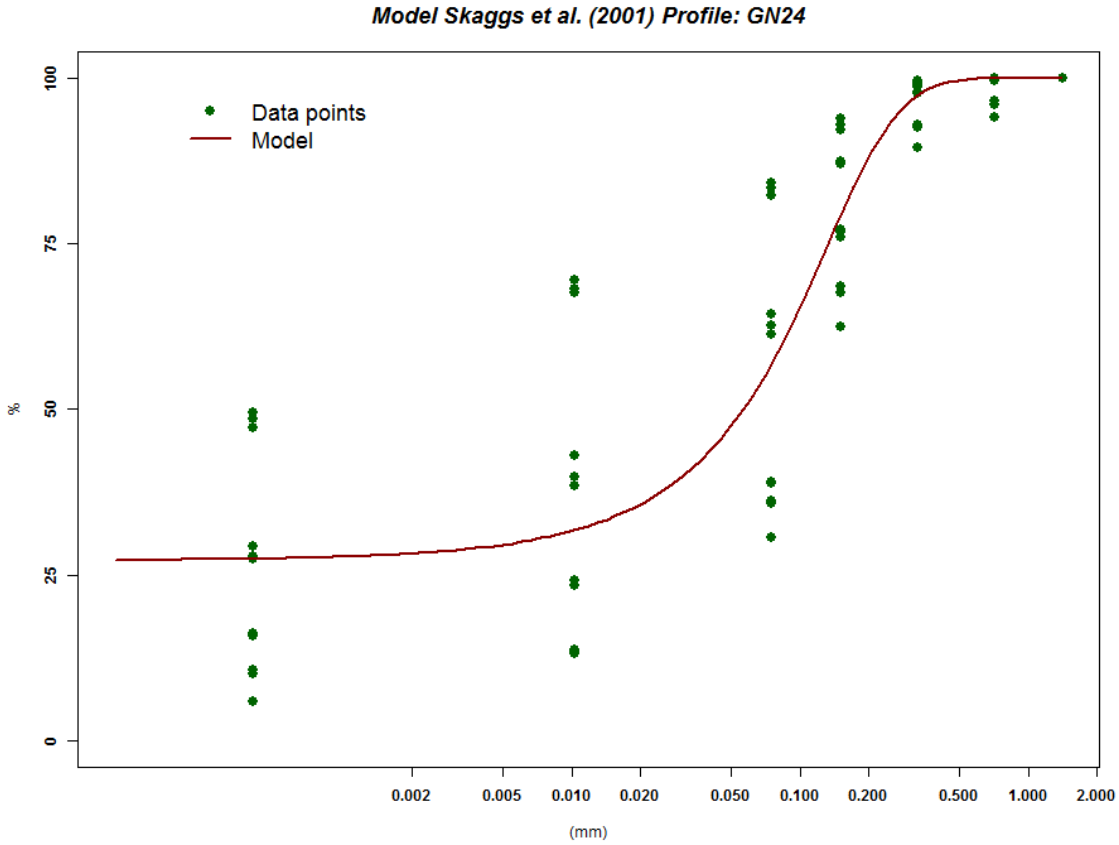
Foi possível ajustar os modelos com bons resultados na maioria dos casos. Algumas amostras não tiveram bom ajuste com nenhum modelo (e.g. GN23 – Tabela 24). Outras são compostas por conjuntos de sub-amostras diferentes (e.g. GN19, GN24 – Figura 29) que devem ser ajustados separadamente. Nem todos os modelos puderam ser ajustados a todos os materiais (e.g. Haverkamp & Parlange).

Tabela 24 – Ajuste dos modelos matemáticos do material GN23

Modelo	Sigma	Converg	log Max.	AIC	BIC	Desvio	G.L.Res
Gompertz	6.8	Sim	-69.0	144.1	147.2	881.1	19.0
Richards	11.2	Não	-79.0	165.9	170.1	2266.3	18.0
Fredlund	9.6	Não	-75.1	160.1	165.3	1564.6	17.0
Haver & Parlange							
Morgan, Mercy, Flodin	4.5	Sim	-59.6	127.2	131.4	359.0	18.0
Skaggs	5.5	Não	-63.8	135.6	139.8	535.3	18.0
Lima & Silva	4.6	Não	-59.6	129.2	134.4	358.4	17.0
log logaritmo 3 parâmetros	5.0	Sim	-62.0	132.0	136.1	450.3	18.0
logístico 5 parâmetros							
logístico 4 parâmetros	6.2	Não	-65.9	141.8	147.1	655.3	17.0
logístico 3 parâmetros	6.0	Sim	-65.9	139.8	144.0	655.3	18.0
Tangente hiperbólica	6.8	Sim	-69.0	144.1	147.2	881.1	19.0

Sigma: raiz quadrada da variância estimada; Converg: se a convergência foi obtida; log Max: logaritmo da máxima verossimilhança; AIC: critério de informação de Akaike, BIC: critério de informação de Bayes; G.L. Res.: graus de liberdade do resíduo.

Figura 29 - Ajuste do material GN24 composto por conjuntos de sub-amostras diferentes



Os melhores modelos ajustados foram os de Skaggs et al (2001) e Lima e Silva (2002), pelo critério de AIC (Tabela 25). Esses modelos foram os que tiveram melhor ajuste no conjunto dos materiais, tanto para o conjunto completo como para os subconjuntos solo/saprolito e sedimento. Esses modelos servem para a comparação entre os grupos e intra-grupos.

Tabela 25 – Resultado dos ajustes dos modelos não-lineares.

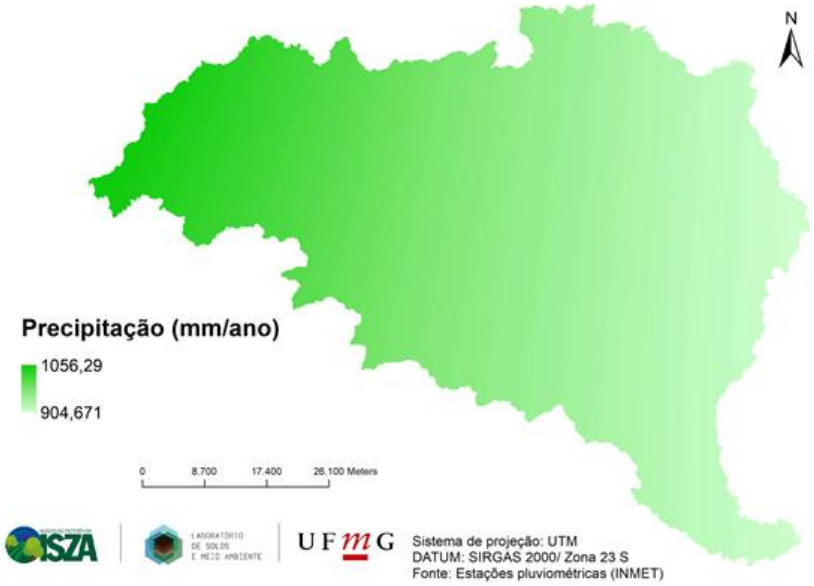
Modelo	Todos os materiais	Apenas solo/saprolito	Apenas sedimento
Skaggs	**1**	**1**	**1**
Lima & Silva	**2**	**2**	**2**
Logístico 4 parâmetros	3	5	3
Morgan, Mercy, Flodin	4	4	4
Richards	5	3	5
Tangente hiperbólica	6	6	6
Logístico 3 parâmetros	7	9	8
Gompertz	8	8	9
Logístico 5 parâmetros	9	7	12
Fredlund	10	11	7
log logaritmo 3 parâmetros	11	10	10
Haver & Parlange	12	12	11

Recarga hídrica *

*Artigo submetido à revista Water MDPI

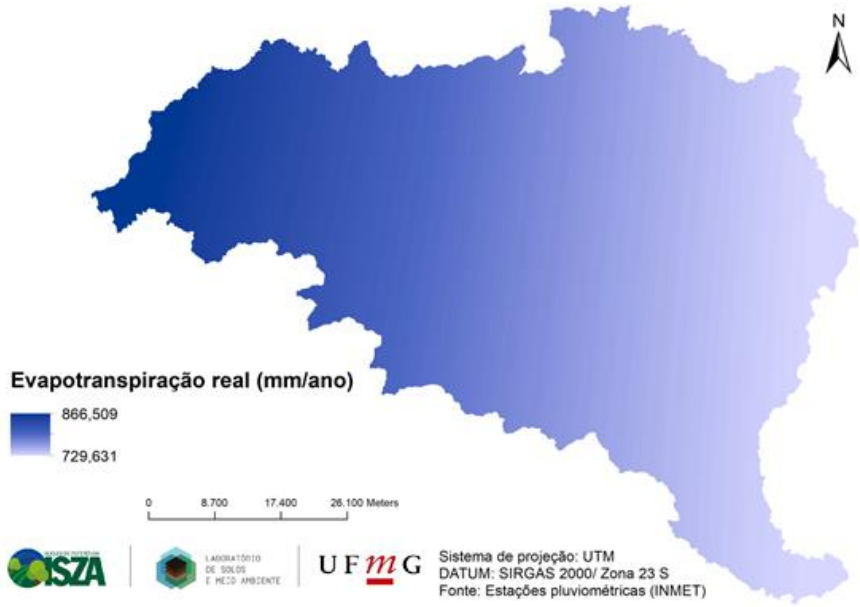
Por meio da interpolação dos dados climáticos das estações pluviométricas próximas à BHRP (período 2009-2018) foi observada uma precipitação média entre 904 mm ano^{-1} a 1056,29 mm ano^{-1} (Figura 30).

Figura 30 – Mapa da distribuição espacial da precipitação na bacia hidrográfica do Rio Pandeiros.



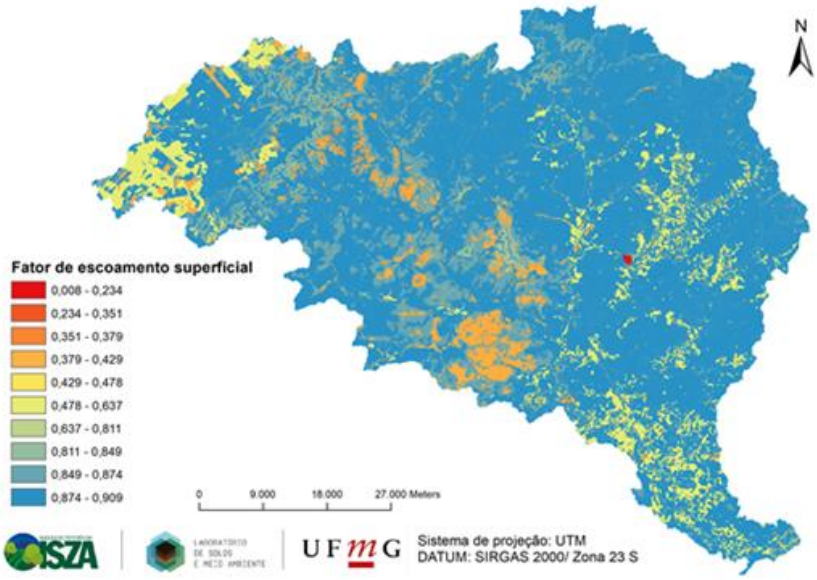
Os valores de evapotranspiração real variaram entre 729,631 mm ano^{-1} e 856,509 mm ano^{-1} (Figura 31). A distribuição espacial desta variável ocorreu de acordo com a precipitação, sendo que os menores valores para essas duas variáveis foram encontrados nas regiões sudeste, leste e nordeste e os maiores na região noroeste da BHRP.

Figura 31 - Mapa da distribuição espacial da evapotranspiração na bacia hidrográfica do Rio Pandeiros.



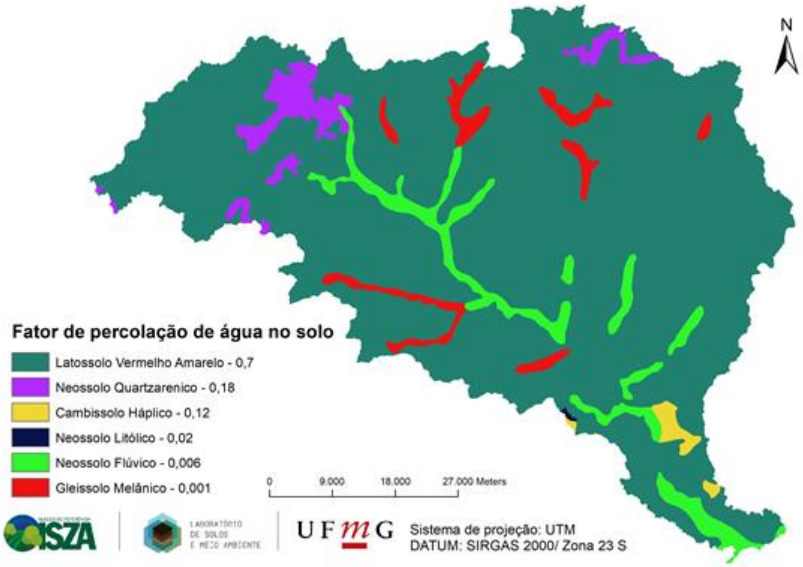
Ao avaliar o fator de escoamento superficial (RF), os resultados revelam uma forte influência dos coeficientes C nos valores de RF, como pode ser observado ao se comparar o mapa de uso e ocupação do solo (Figura 5) com o mapa de RF (Figura 32). É possível constatar através do mapa de RF um menor escoamento superficial e por consequência maior tendência a recarga hídrica subterrânea em áreas com vegetação densa, indicando que a presença de vegetação diminui diretamente o escoamento de água superficial.

Figura 32 - Mapa da distribuição do fator de escoamento superficial (RF) e uso e ocupação da bacia hidrográfica do Rio Pandeiros.



O fator de percolação variou de 0,001 a 0,7 (adimensional), expressando a variação combinada entre os valores de condutividade hidráulica e das notas do método PUC ajustados para o intervalo de 0 a 1 (Tabela 9). Observa-se que a classe dos Gleissolos Melânicos e Neossolos Flúvicos apresentam os menores fatores de percolação, diminuindo a recarga nestas áreas, devido aos menores valores de condutividade hidráulica nestes solos.

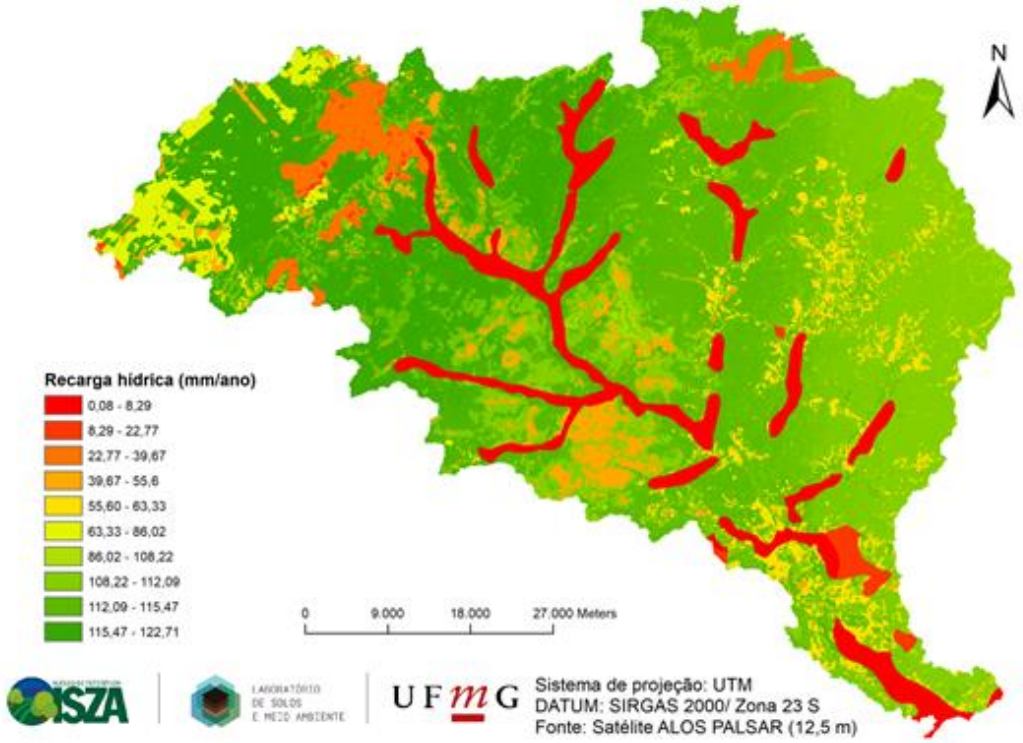
Figura 33 - Mapa da distribuição espacial do fator de percolação (PF) da bacia hidrográfica do Rio Pandeiros.



Por fim, o mapeamento mostrou que o potencial de recarga da BHRP varia de 0 a 122,71 mm ano^{-1} (Figura 36), com uma média de 93,99 mm ano^{-1}. As áreas com maior potencial de recarga estão em regiões com cobertura vegetal arbórea densa, áreas planas ou relevo levemente ondulado e solos desenvolvidos e estruturados, cuja porosidade e condutividade hidráulica permitem a percolação da água até o lençol freático. Essas áreas estão espacialmente distribuídas ao longo de toda a bacia, abrangendo os 3 municípios que compõem a mesma.

As áreas concentradas com menor potencial de recarga de água subterrânea na bacia estão representadas pela cor vermelha e localizam-se na área urbana, devido a processos de impermeabilização do solo e também em áreas com presença de Gleissolos Melânicos e Neossolos Flúvicos, que possuem menores valores de condutividade hidráulica, diminuindo a percolação de água nestas áreas (Figura 34).

Figura 34 - Mapa da distribuição espacial da recarga hídrica potencial na bacia hidrográfica do Rio Pandeiros.

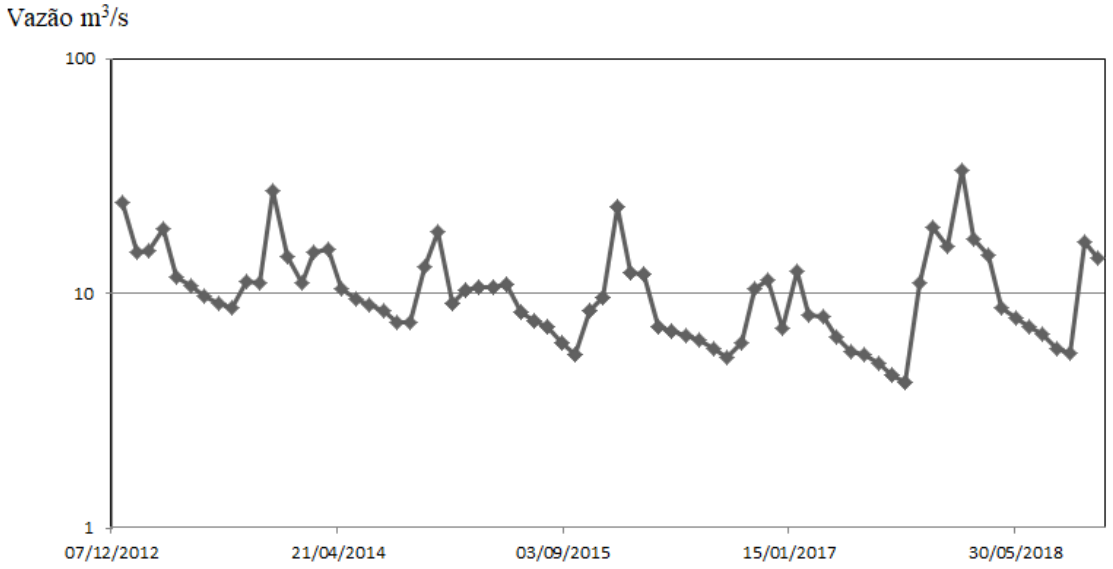


A validação dos resultados indicou que o valor médio de recarga (mm ano^{-1}) de água subterrânea obtido pelo método da espacialização e o valor obtido pela análise da curva de recessão do hidrograma da bacia foram semelhantes (Tabela 8). O hidrograma usado para calcular a recarga com base nas vazões do período de recessão é mostrado na Figura 35.

Tabela 26 - Recarga de água subterrânea na bacia do rio Pandeiros- MG, estimada por dois métodos.

Método	Recarga hídrica média (mm ano^{-1})	Diferença (mm ano^{-1})	Diferença percentual
Espacialização	93,99	15,04	16%
Análise de curva de recessão	78,95		

Figura 35 - Hidrograma do rio Pandeiros, utilizado para calcular o valor da constante de recessão.



A análise do hidrograma revelou que o período de recessão da bacia do Rio Pandeiros, no período estudado, tem início (Q_0) no mês de Abril e se prolonga por cerca de 180 a 200 dias até os meses de Setembro a Outubro (Q_t) (Figura 35). Durante esses meses, período em que as chuvas cessam, a depleção das águas subterrâneas regula o fluxo de base, até iniciar o novo período chuvoso, onde as vazões aumentam.

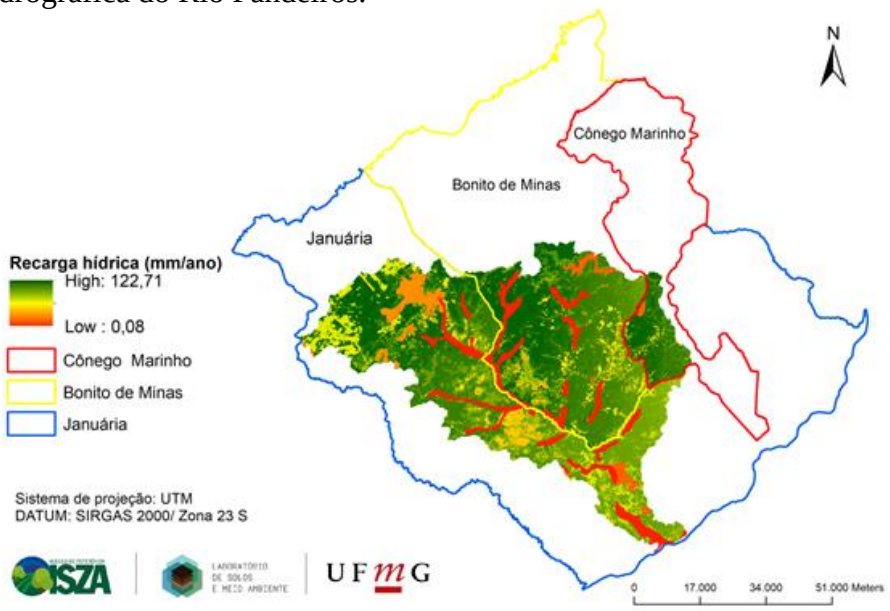
A Figura 36 ilustra a espacialização da recarga hídrica dentro dos municípios que constituem a bacia estudada. Neste contexto, embora o município de Januária possua a maior área da bacia hidrográfica do Rio Pandeiros, aproximadamente 212.956,8 ha, deve-se perceber que neste município encontra-se maior proporção de Gleissolos Melânicos, Neossolos Flúvicos, Neossolos Litólicos e Neossolos Quartzarênicos, que são solos avaliados como de menor potencial de percolação de água (PF) pelo modelo. Além disso, apresenta proporção considerável de solo exposto, cerrado ralo e áreas cultivadas na porção Noroeste da bacia, o que elevam o potencial de escoamento superficial e desta forma, este município apresenta média anual de recarga de 90,30 mm ano^{-1}.

O município de Cônego Marinho apresentou a maior média anual de recarga subterrânea, sendo de 105 mm ano^{-1}. Apesar deste município possuir a menor área da

bacia, com aproximadamente 26.083,86 ha, encontra-se em região de solo e relevo que favorecem a recarga de água subterrânea.

Por fim, Bonito de Minas apresentou média anual de 97,18 mm ano^{-1} e a área da bacia localizada dentro deste município é de aproximadamente 156.987,95 ha. É interessante perceber que apesar de ocorrer a presença considerável de Neossolos Flúvicos e Gleissolos nesta região da bacia, esta acontece em proporção bem menor que em Januária. Observa-se que a porção de área urbana dentro da bacia localiza-se em Bonito de Minas, mas por ser uma área pequena (0,03% da área total da bacia) a média anual de recarga não é consideravelmente afetada.

Figura 36 – Distribuição espacial da recarga hídrica potencial ao longo dos municípios da Bacia Hidrográfica do Rio Pandeiros.



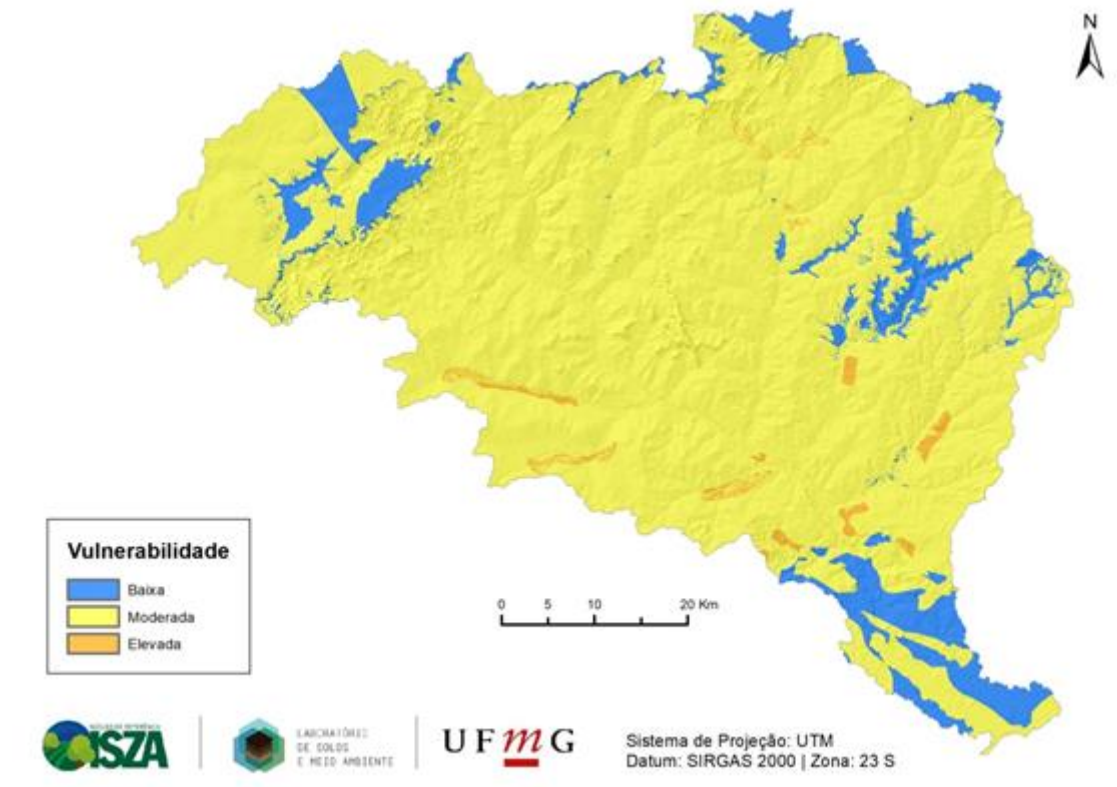
O mapa de uso e cobertura (Figura 5) e o mapa de recarga subterrânea (Figura 34) demonstram que as áreas com formação florestal apresentaram melhor recarga. Observa-se que os fatores de uso e cobertura do solo combinados com áreas planas ou suavemente onduladas e áreas com presença de Latossolos Vermelho-Amarelos, se mostraram preferenciais para a recarga.

De forma contrária, regiões que apresentam uso e cobertura como centros urbanos, solo exposto, vegetação rasteira, solos mal estruturados e de baixa condutividade hidráulica (Neossolos, Cambissolos e Gleissolos), combinados com áreas mais declivosas, apresentam redução da recarga.

- *Drastic*

Como exposto, o modelo faz uso de diversas variáveis, dado que é o conjunto das características físicas do ambiente que condicionam os processos de vulnerabilidade ou resistência do sistema aquífero frente a contaminantes. Por isso o modelo avalia um conjunto de 7 parâmetros. Neste contexto, o resultado obtido é apresentado na Figura 37.

Figura 37 - Mapa de vulnerabilidade da BHRP.



A distinção entre áreas com maior e menor vulnerabilidade ocorrem através da interação dos distintos índices e pesos adotados para cada parâmetro. A tabela 19 quantifica a ocorrência das classes de vulnerabilidades na área de estudo.

Tabela 27 - Áreas por classe de vulnerabilidade DRASTIC.

Graus de vulnerabilidade da BHRP		
Classes de vulnerabilidade	Área (Ha)	%
Vulnerabilidade baixa	37.088,64	9,36
Vulnerabilidade moderada	353.969,64	89,38
Vulnerabilidade elevada	4.971,51	1,26
Total	396.028,79	100

É interessante perceber que as porções avaliadas como de alta vulnerabilidade ocorrem em regiões marcadas pela presença principalmente de Gleissolos, Neossolos e Cambissolos. Isso acontece, porque o estudo considerou para o parâmetro material da zona vadosa (I) os solos, devido ao potencial de que eles possuem para retenção e degradação de contaminantes antes do mesmo atingir o sistema aquífero. É válido lembrar que este parâmetro possui o maior peso do modelo (junto ao parâmetro D) e por isso possui grande influência sobre o cálculo da classe de vulnerabilidade final gerada. As classes acima citadas foram consideradas como de baixa resistência a impactos ambientais, de acordo com a metodologia de Streck et al (2008) e Kampf (2001) e por isso receberam índice 8 quanto ao potencial de contaminar o sistema aquífero.

No entanto, se este parâmetro fosse analisado de forma isolada a bacia do Rio Pandeiros possuiria no geral uma vulnerabilidade natural baixa de contaminação, devido à presença elevada de Latossolos Vermelho-Amarelos em toda extensão da bacia, que de acordo com a metodologia utilizada classificam esta classe como alta resistência a impactos ambientais e desta forma recebem índices baixos. Os Latossolos Vermelho-Amarelos de textura média receberam índice 3 e a menor porção representada pelos Latossoslos Vermelho-Amarelos de textura argilosa receberam índice 2.

Além disso, nas áreas de alta vulnerabilidade a profundidade da zona não saturada é mais baixa e devido a isso o caminho que o contaminante teria que percorrer até atingir o aquífero seria também menor. Em média a bacia apresentou nível hidrostático médio de 9,3 metros, sendo que o poço com nível mais profundo possui 24 m e o mais superficial 1,2 metros. Ao analisar o mapa dos valores de nível hidrostático interpolados percebe-se que os valores de profundidade variam bastante ao longo da bacia, porém na porção inferior encontram-se maiores áreas com menores profundidades e desta forma uma porção maior de áreas com índices altos.

É válido observar que os índices com maior presença na bacia são 5 e 7, o que significa que se o parâmetro D fosse analisado de forma isolada a bacia de forma geral iria possui uma vulnerabilidade intermediaria de contaminação.

Para o parâmetro recarga hídrica, os solos também desempenham um importante papel, pois dependendo da tipologia do solo, a recarga pode ser beneficiada ou prejudicada. Quanto maior a capacidade de infiltração dos solos, maior o aporte de água para o meio subterrâneo e, consequentemente, maior a infiltração de eventuais contaminantes que migram dissolvidos na água.

Para a bacia estudada, percebe-se maior prevalência de Latossolos Vermelho-Amarelos de textura média, que possuem um bom potencial para recarga dos aquíferos. Desta forma, é possível concluir que grande parte da área de estudo possuiria alta vulnerabilidade, se fosse considerado apenas o parâmetro solo na avaliação.

No entanto, para o cálculo da recarga hídrica outros parâmetros devem ser avaliados como a taxa de evapotranspiração das plantas na área, taxas de precipitação, escoamento superficial e de base, declividade e etc. Neste contexto, o mapa de recarga hídrica subterrânea, disponibilizado pelo projeto Águas do Norte de Minas Gerais (CPRM, 2019), demonstra que na maior porção da bacia do rio Pandeiros a quantidade de água que atinge o aquífero é de 102 a 178 mm/ano, que de acordo com o método DRASTIC é um valor intermediário. Devido a isso, é possível observar que a maior parte da bacia foi classificada com índice 6.

Neste ponto é interessante perceber que os Latossolos Vermelho-Amarelos de textura média são considerados como de bom potencial quanto à recarga hídrica pelo método PUC (COSTA ET AL., 2017), e, portanto possuem um índice alto quanto ao potencial de contaminar os sistemas aquíferos pelo parâmetro solos (s), que possui peso 2. No entanto, a mesma classe de solo possui uma alta resistência a impactos ambientais, de acordo com Kampf et al. (2001) e dessa forma possui baixa vulnerabilidade para contaminar as aguas subterrâneas DRASTIC, de acordo com o parâmetro material da zona vadosa (I), que possui peso 5 e portanto é mais relevante para o índice final gerado pelo modelo.

Como o modelo original foi desenvolvido levando em consideração as características climáticas, litológicas, pedológicas, dentre outras características ambientais para os Estados Unidos é natural que o método deverá sofrer adaptações para ser aplicado no Brasil, que possui não apenas características ambientais diferentes, mas também sistemas de classificação distintos.

Neste contexto, de acordo com a EMBRAPA (1979), em regiões de clima tropical, os solos possuem muitas peculiaridades decorrentes das condições ambientais (clima, relevo, material originário e vegetação). Nestas regiões, verifica-se um processo pedogenético ou de formação de solo mais acelerado, estando associado ao clima tropical úmido com temperaturas mais elevadas e ação mais intensa da água e pela presença de organismos atuando como agentes formadores do solo. Quanto maior a disponibilidade de água (chuvas mais intensas e frequentes), mais completas são as reações químicas do intemperismo. Já em regiões de clima frio, estes processos ocorrem de forma menos

intensa. Devido a isso em climas tropicais os solos geralmente apresentam estrutura bem desenvolvida e maiores profundidades e, portanto, é um dos aspectos mais importantes para avaliar a infiltração de contaminantes e a vulnerabilidade natural de águas subterrâneas. Por este motivo o trabalho adota aos solos um papel de destaque dentro do modelo.

Em relação ao parâmetro A (material do sistema aquífero) percebe-se que na área da bacia há prevalência dos litotipos arenito e areia que receberam respectivamente os índices 6 por representar um potencial moderado de contaminação e 8 que representa um índice alto de contaminação dos aquíferos. No entanto, ao observar o mapa de lineamentos através do raio de busca de 20 km² (CPRM/CODEMIG, 2014), percebe-se que nessas regiões ocorre uma distribuição uniforme de fraturas, o que influencia no potencial de contaminação. A partir da média ponderada realizada através da ferramenta calculadora raster, percebe-se que os índices finais que possuem maior prevalência na bacia são 6 e 7, o que representaria uma vulnerabilidade moderada para a maior parte da bacia se fosse levada em consideração apenas o parâmetro A para o potencial de contaminar os aquíferos.

É válido elucidar que o parâmetro A possui peso 3 para o modelo e, portanto, é interpretado como de importância moderada para Aller et al. (1987) para avaliar a vulnerabilidade. No entanto, não deve ser desprezado, pois mesmo tendo peso menor também influencia o cálculo dos índices finais.

O parâmetro C que sofreu uma adaptação para ser aplicado na bacia do Rio Pandeiros, também possui peso 3. De acordo com o mapa hidrogeológico fornecido pelo Projeto Águas do Norte de Minas (CPRM, 2019), os intervalos de transmissividade na área da bacia vão de $3{,}75x10^{-6}$ até $1{,}7x10^{-3}$m²/s e possui média de $5x10^{-4}$ m²/s. Além disso, o valor de transmissividade que tem maior prevalência na bacia é $4{,}85x10^{-4}$ m²/s. O índice DRASTIC que mais marca presença na bacia é o 9, conforme apresentando na tabela 12. Desta forma, se fosse considerado apenas este parâmetro para avaliar a vulnerabilidade de contaminação a bacia apresentaria uma vulnerabilidade muito alta.

Em relação ao parâmetro topografia da área (T), percebe-se, através dos mapas de altimetria e declividade, que na bacia há prevalência de áreas suavizadas, o que diminui a probabilidade de algum contaminante ser escoado, aumentando o índice de infiltração da bacia no geral. Devido a isso, ao se analisar o mapa de declividade reclassificado de acordo com o método DRASTIC, o índice 10 ocupa grande parte da área de estudo. Se a

vulnerabilidade de contaminação fosse avaliada apenas por este parâmetro os aquíferos da bacia possuiriam altíssimo potencial de serem contaminados.

Apesar de este parâmetro possuir o menor peso dentro do método (peso 1) para a bacia do Pandeiros ele deve ser levado bastante em consideração, devido a prevalência do índice 10, e por isso tem ocupa papel importante para o cálculo do mapa final da bacia.

A partir das análises realizadas sobre o mapa final de vulnerabilidade foi possível perceber que as áreas classificadas como de alto potencial de serem contaminadas, estão localizadas em regiões de solos menos profundos e de textura mais arenosa, pois encurtam o caminho de um contaminante até o aquífero, assim como desfavorecem a ocorrência de processos de atenuação natural destes poluentes. Além disso, em regiões com boa recarga hídrica percebe-se também o aumento da vulnerabilidade natural das águas subterrâneas.

Aproximadamente 89% da área de estudo foi avaliada como de vulnerabilidade intermediaria, isso se deve ao fato de que a grande maioria dos parâmetros avaliados pelo método atribuiu índices de valores médios, como 5, 6 e 7, o que influenciou bastante na grande porção de vulnerabilidade mediana na bacia. Além disso, percebe-se que a bacia possui, de forma geral, uma profundidade moderada em relação ao nível da água subterrânea, assim como uma recarga hídrica de valores médios.

A presença de Latossolos Vermelho-Amarelos de textura média em quase toda a extensão da bacia foi também um fator crucial para explicar a presença de uma área tão elevada de vulnerabilidade intermediaria. Devido a alta resistência desta classe de solo a impactos ambientais, como visto na metodologia de Streck et al. (2008) e Kampf et al. (2001), a maior parte da bacia recebeu um índice 3 para o parâmetro I, o que diminuiu a vulnerabilidade de alto para médio. Se houvesse a prevalência de uma classe de solo com baixa resistência a impactos ambientais, a vulnerabilidade da bacia seria classificada como alta ou muito alta em alguns pontos.

Para as áreas de baixa vulnerabilidade, deve-se compreender que ocorrem em regiões com solos profundos, baixa recarga hídrica e presença de solos com alta resistência a impactos ambientais, ou seja, classes de solo que favoreçam os processos de retenção e atenuação natural dos contaminantes antes de atingirem águas subterrâneas.

Conclusões

Caracterização dos solos e sedimentos

A partir das análises realizadas pode-se perceber que a maioria dos solos coletados apresentou textura arenosa, com predomínio de areia fina. Os sedimentos também apresentaram textura arenosa, apenas em um ponto foi possível identificar prevalência da fração cascalho. Isso aconteceu, devido a localização do ponto, uma região de borda de meandro do rio área de deposição de sedimentos.

A prevalência da textura arenosa dentre as amostras dos solos coletados na bacia pode favorecer a recarga hídrica subterrânea, por facilitar a percolação de água, no entanto deve-se entender que a os recursos hídricos subterrâneos podem ser mais vulneráveis a serem contaminados devido a esta característica, pois possíveis poluentes teriam maior mobilidade nas camadas sub superficiais e subterrâneas. Além disso, solos arenosos podem agravar a ocorrência de processos erosivos, já que podem possuir estruturas menos desenvolvidas e serem mais facilmente erodidos.

Estas análises podem ser utilizadas como ferramentas de gestão da paisagem da bacia do Rio Pandeiros, identificando áreas preferenciais para serem conservadas, assim como áreas preferenciais para implementação de planos de recuperação ambiental, como práticas de conservação de solos.

Zoneamento Ambiental produtivo

Através da análise dos resultados pode-se perceber que não foram identificadas áreas em estado de indisponibilidade hídrica e apenas dois trechos foram classificados como em estado de atenção. Isso aconteceu, devido a prevalência de áreas preservadas e o baixo número de usuários de água superficial, assim como a regulação dos valores de outorga para uso insignificante.

No que diz respeito ao PUC geral da área, observou-se que se trata de uma bacia com abrangência de PUC alto, pelo fato da declividade ser predominantemente plana a suave ondulada, favorecendo, portanto, à recarga hídrica e uso agropecuário, desde que respeitado as práticas corretas de uso do solo e a legislação vigente. Desta forma, as principais limitações na área relacionam-se pelas questões climáticas, devido as baixas taxas de precipitações e pelas questões pedológicas, devido a ocorrência de solos arenosos.

Ajuste de modelos matemáticos de curvas granulométricas para a comparação entre os materiais amostrados de solos/saprolitos e de sedimentos fluviais

Foi possível perceber que na maioria dos casos os modelos apresentaram bons ajustes e resultados satisfatórios. Algumas amostras não tiveram bom ajuste com nenhum modelo (e.g. GN23). Outras são compostas por conjuntos de sub-amostras diferentes (e.g. GN19, GN24) que devem ser ajustados separadamente.

Os melhores modelos ajustados foram os de Skaggs et al (2001) e Lima e Silva (2002). Esses modelos foram os que tiveram melhor ajuste no conjunto dos materiais, tanto para o conjunto completo como para os subconjuntos solo/saprolito e sedimento. Esses modelos servem para a comparação entre os grupos e intra-grupos.

Recarga hídrica

**Submetido à revista Water MDPI*

O potencial de recarga foi maior em áreas constituídas por formações florestais, relevo plano ou suavemente ondulado e com presença de Latossolos Vermelho-Amarelos. Os resultados mostraram áreas com maior potencial concentradas na região do município de Cônego Marinho, seguido de Bonito de Minas e Januária. Áreas com a presença de Gleissolos Melânicos e Neossolos Flúvicos apresentaram as piores respostas do modelo.

Este estudo pode ser utilizado como uma ferramenta para gestão dos recursos hídricos da bacia hidrográfica do Rio Pandeiros, identificando áreas preferenciais para recarga e desta forma direcionando políticas públicas e ações conservacionistas para estas áreas. As iniciativas de gestão da água podem incluir o armazenamento sazonal de água superficial em áreas de baixo potencial de recarga ou o ajuste de métodos de irrigação, assim como práticas de conservação dos solos, com intuito de melhorar a estrutura dos mesmos e favorecer a infiltração de água. A preservação da vegetação florestal também é recomendada porque essas áreas demonstram-se favoráveis para a recarga de água subterrânea.

DRASTIC

**Submetido à revista Special Issues – Elsevier*

A partir das análises realizadas sobre o mapa final de vulnerabilidade foi possível perceber que as áreas classificadas como de alto potencial de serem contaminadas, estão localizadas em regiões de solos menos profundos e de textura mais arenosa, pois encurtam o caminho de um contaminante até o aquífero, assim como desfavorecem a ocorrência de

processos de atenuação natural destes poluentes. Além disso, em regiões com boa recarga hídrica percebe-se também o aumento da vulnerabilidade natural das águas subterrâneas.

A presença de latossolos vermelho-amarelos de textura média em quase toda a extensão da bacia foi também um fator crucial para explicar a presença de uma área tão elevada de vulnerabilidade intermediaria. Devido à alta resistência desta classe de solo a impactos ambientais, como visto na metodologia de Streck et al. (2008) e Kampf et al. (2001), a maior parte da bacia recebeu um índice 3 para o parâmetro I, o que diminuiu a vulnerabilidade de alto para baixo.

Os mapas de vulnerabilidade apresentados podem servir de subsídio para órgãos ambientais gestores de recursos hídricos da região da bacia hidrográfica do rio Pandeiros. Os resultados apresentados podem auxiliar no direcionamento de quais seriam as melhores áreas para desempenho de atividades agropecuárias, com menor risco de contaminar as águas subterrâneas através do lançamento de substancias de alto potencial poluidor, como agrotóxicos. Além disso, podem contribuir para selecionar locais mais adequados para a instalação de outros empreendimentos que ofereçam riscos, como postos de gasolina, indústrias, centros comerciais, aterros sanitários, dentre outros.

Bibliografia

ALLER, L.; LEHR, J. H.; PETTY, R. DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Groundwater Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings. U.S Environmental Protection Agengy, 622 p., Oklahoma, 1987.

ALMEIDA, B. G. DE; DONAGEMMA, G. K.; RUIZ, H. A.; BRAIDA, J. A.; VIANA, J. H. M.; REICHERT, J. M. M.; OLIVEIRA, L. B.; CEDDIA, M. B.; WADT, P. G. S.; FERNANDES, R. B. A.; PASSOS, R. R.; DECHEN, S. C. F.; KLEIN, V. A.; TEIXEIRA, W. G. Padronização de métodos para análise granulométrica no Brasil. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2012.

ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.D.M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorol. Zeitschrift* 2013, *22*, 711–728.

AMARAL, J.R. do Caracterização físico-hídrica dos solos da bacia do Córrego Marinheiro, Sete Lagoas – MG, Universidade Federal de Minas Gerais, 2017.

ANA, A.N. de Á. Acervo de Dados Hidrológicos Available online: http://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas (accessed on Oct 25, 2019).

ASCE, A.S. of C.E. *Design and Construction of Sanitary and Storm Sewers*; New

York, 1969;

BÖHNER, J.; SELIGE, T. Spatial prediction of soil attributes using terrain analysis and climate regionalisation. *GÖTTINGER Geogr. ABHANDLUNGEN* 2002, *115*, 13–28.

BORGES, VINÍCIUS. Avaliação da Vulnerabilidade Natural à Contaminação do Sistema Aquífero Serra Geral, Estado do Paraná. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, BR-RS, 2017.

Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM/ Serviços geológicos do Brasil. Projeto Águas do Norte de Minas – PANM. Estudo da disponibilidade hídrica subterrânea do Norte de Minas Gerais, relatório de integração. Escala 1:1.000.000. Belo Horizonte, CPRM, 2019.

Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM/ Serviços geológicos do Brasil. Sistema de Informações de Águas Subterrâneas – SIAGAS. Acessado através: http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/index.php, 25 de abril de 2019.

Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM – Mapa hidrogeológico do Norte de Minas. Projeto Águas do Norte de Minas, 2019 – Escala 1: 1.000.000.

COSTA, A.M. DA; SALIS, H.H.C. DA; VIANA, J.H.M.; PACHECO, F.A.L. Groundwater recharge potential for sustainable water use in urban areas of the Jequitiba River Basin, Brazil. *Sustain.* 2019.

COSTA, A.M. DA; VIANA, J.H.M.; EVANGELISTA, L.P.; CARVALHO, D.C. DE; PEDRAS, K.C.; HORTA, I.D.M.; SALIS, H.H. DE C.; PEREIRA, M.P.R.; SAMPAIO, J.L.D. Ponderação de variáveis ambientais para a determinação do Potencial de Uso Conservacionista para o Estado de Minas Gerais. 2017, *14*, 118–133.

DESMET, P.J.J.; GOVERS, G. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. *J. Soil Water Conserv.* 1996, *51*, 427–433.

DONAGEMMA, G. K.; CAMPOS, D. V. B. DE; CALDERANO, S. B.; TEIXEIRA, W. G.; VIANA, J. H. M. Manual de métodos de análise de solos. Rio de Janeiro. Embrapa Solos, 2011. 230 p.

EMBRAPA, E.B.D.P.A. *Sumula da X Reunião Técnica de Levantamento de Solos*; PALMIERI, F., RODRIGUES, T.E., SANTOS, H.G. DOS MOTHCI, E.P., FREITAS, F.G. DE, MATOS, M.D.M., Eds.; Rio de Janeiro, 1979.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Manual de métodos de análise de solo / Centro Nacional de Pesquisa de Solos. – 2. ed. rev. atual. – Rio de Janeiro, 1997.

FEITOSA, F.A.C; MANOEL, F.J; DEMETRIO, J.G.A. Hidrogeologia: conceitos e aplicações. 3 Edição – Rio de Janeiro: CPRM, 2008.

FERREIRA, M.M. Caracterização física do solo. In: LIER, Q.J.V.; Física do Solo. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 2010. 298p.

FETTER, C.W. (1994) Applied Hydrogeology. 3rd Edition, Macmillan College Publishing Company, New York.

IBGE, I.B. de G. e E. População estimada Available online: https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados.html?view=municipio (accessed on Oct 25, 2019).

Instituto Mineiro de Gestão das Águas. 2006. Relatório de Implantação da rede dirigida de Monitoramento das Águas Superficiais na Região do Projeto Jaíba e municípios de Verdelândia, Varzelândia e Montes Claros. Projeto Estruturador da Bacia do Rio São Francisco. Belo Horizonte, MG: IGAM, 2006.

Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Dados Meteorológicos Available online: http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep (accessed on Oct 25, 2019).

KAMPF, NESTOR; GIASSON, ELVIO; JUNIOR, A.V.I.; NASCIMENTO, P.C.; RODRIGUES, A. L. M.; ANGHINONI, M. C. M.; FERRRARO, L. W.; BINOTTO, R. B.; SANBERG, J. R. D. Metodologia para classificação de solos quanto à resistência a impactos ambientais decorrentes da disposição final de resíduos. Fepam em Revista, Porto Alegre, v.2, n.1, p.11-17, jan./dez. 2008.

MAIA, P.H.P.; CRUZ, M.J.M. Um Novo Método para Avaliar a Vulnerabilidade de Aqúiferos. Braz. J. Aquat. Sci. Techno., v. 15, n. 2, p 29 – 40, 2011.

NEVES, W.V. Avaliação da vazão em bacias hidrográficas com veredas, em diferentes estádios de conservação, na APA do Rio Pandeiros - MG, Universidade Federal de Minas Gerais, 2011.

NUNES, Y.R.F.; AZEVEDO, I.F.P.; NEVES, W.V.; VELOSO, M. DAS D.M.; SOUZA, R. DE A.; FERNANDES, G.W. *MG. Biota*. 2009, pp. 4–17.

OLIVEIRA, L.F.C. DE; FIOREZE, A.P.; MEDEIROS, A.M.M.; SILVA, M.A.S. Comparação de metodologias de preenchimento de falhas de séries históricas de precipitação pluvial anual. *Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient.* 2010, *14*, 1186–1192.

PEDRON, F. DE A.; FINK, J.R.; RODRIGUES, M.F.; AZEVEDO, A.C. de Condutividade e retenção de água em Neossolos e saprolitos derivados de arenito. *Rev. Bras. Cienc. do Solo* 2011, *35*, 1253–1262.

PINTO C. P.; SILVA M. A. Mapa Geológico do Estado de Minas Gerais. CODEMIG/CPRM, 2014. Disponível em: <www.portaldageologia.com.br>. Acesso em:13 Set 2017.

R CORE TEAM. 2019. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. https://www.R-project.org/.

REZENDE, É.A. O papel da dinâmica espaço-temporal da rede hidrográfica na evolução geomorfológica da alta/média bacia do Rio Grande, sudeste brasileiro, Universidade Federal de Ouro Preto, 2018.

SILVA, C.G. da Caracterização física e ambiental da bacia hidrográfica do rio Pandeiros- MG em eventos de El Niño-Oscilação Sul, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2018.

SANTOS, H.G. DOS; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C. DOS; OLIVEIRA, V.A. DE; LUMBRERAS, J.F.; COELHO, M.R.; ALMEIDA, J.A. DE; ARAUJO FILHO, J.C. DE; OLIVEIRA, J.B. DE; CUNHA, T.J.F. *Sistema brasileiro de classificação de solos*; 5 ed.; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2018; ISBN 85-85864-19-2.

SEMAD/SEAPA. Método para elaboração do Zoneamento Ambiental Produtivo: ZAP de sub-bacias hidrográficas. MINAS GERAIS. 2ª Edição. 2016.

SKAGGS, T.H.; ARYA, L.M.; SHOUSE, P.J.; MOHANTY, B.P. Estimating particle-size distribution from limited soil texture data. Soil Science Society of America Journal, v.65, p.1038-1044, 2001.

STRECK, E. V.; KAMPF, N.; DALMOLIN, R. S. D.; KLAMT, E. NASCIMENTO, P. C.; SCHENEIDER, P.; GIASSON, E.; PINTO, L. F. S. P. 2. Solos do Rio Grande do Sul. 2. Ed. – Porto Alegre: EMATER/RS – ASCAR, 2008.

TEIXEIRA, P.C; DONAGEMMA, G.K; FONTANA, ADEMIR; TEIXEIRA, W. G. Manual de métodos de análise de solo / Paulo César Teixeira [et al.], editores técnicos. – 3. ed. rev. e ampl. – Brasília, DF: Embrapa, 2018.

TENENWURCEL, M. A.; Moura, M. S.; Costa, A.M.; MOTA, P.K.; VIANA, J.H. M.; FERNANDES, L.F.F.; PACHECO, F.A.L. An improved model for the evaluation of groundwater recharge based on the concept of conservative use potential: a study in the river Pandeiros watershed, Minas Gerais, Brazil. *Water* **2020**, *12*, 1001; doi:10.3390/w1204100.

UFV, U.F. de V.; CETEC, F.C.T.D.M.G.; UFLA, U.F. de L.; FEAM, F.E. do M.A. Mapa de Solos do Estado de Minas Gerais Available online: http://www.dps.ufv.br/?page_id=742 (accessed on Oct 25, 2019).

WESTENBROEK, S.M., KELSON, V.A., DRIPPS, W.R., HUNT, R.J., AND BRADBURY, K.R., 2010, SWB—A modified Thornthwaite-Mather Soil-Water-Balance code for estimating groundwater recharge: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6–A31, 60 p.

ANEXOS

IV Simpósio Mineiro de Ciência do Solo

"Solos no Espaço e Tempo: Trajetórias e Tendências"

2017 – Viçosa/MG

Caracterização Física e Química dos solos de voçorocas na porção norte da Bacia Hidrográfica do Rio Pandeiros, Minas Gerais.

Davane Caroline Freitas Carvalho[(1)]; Adriana Monteiro da Costa[(2)]; João Herbert Moreira Viana[(3)]; Jarbas Lima Dias Sampaio[(4)] e Carlos Henrique Jardim[(5)]

[(1)]Mestranda em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais; Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais; Belo Horizonte; Minas Gerais; dayanecfc@gmail.com; [(2)]Professora Adjunta do Departamento de Geografia; Instituto de Geociências; Universidade Federal de Minas Gerais; drimonteiroc@gmail.com [(3)]Pesquisador, Embrapa Milho e Sorgo, joao.herbert@embrapa.br; [(4))]Professor do Departamento de Geologia; Instituto de Geociências; Universidade Federal de Minas Gerais; jarbasdias@gmail.com; [(5)]Professor do Departamento de Geografia; Instituto de Geociências; Universidade Federal de Minas Gerais; cjardim@yahoo.com.

RESUMO: Os processos de erosão acelerada, como ravinamento e voçorocamento, estão entre os principais problemas ambientais de diversas regiões do Estado de Minas Gerais. As voçorocas constituem o estágio mais avançado e complexo desses processos. Caracterizar e entender os materiais que compõem essas áreas é importante para a análise ambiental, política e econômica. Deste modo, o objetivo desta pesquisa é realizar a caracterização física e química dos solos de duas voçorocas localizadas na porção norte da bacia hidrográfica do rio Pandeiros e caracterizar o ambiente em que estão inseridas. A metodologia aplicada foi dividida em três partes principais: o trabalho de campo para diagnóstico da área e coleta das amostras; as análise laboratoriais para a realização das análises de granulometria, pH em KCl, M.O, Mg, K, P, Ca, Cu, Fe, Zn, Mn, S e Al, e a etapa final com a organização e análises dos dados. As duas voçorocas analisadas apresentaram baixos teores de nutrientes e de M.O e textura arenosa, reflexo do material de origem e alto grau de intemperismo. As Voçorocas estão em condições diferentes, a primeira ativada e a segunda em processo de estabilização. De modo geral, ambas estão em solos frágeis que demandam pesquisa e planejamento prévio de ações.

Termos de indexação: recuperação de áreas degradadas, solos degradados, erosão.

INTRODUÇÃO

Os processos de erosão acelerada, como ravinamento e voçorocamento, estão entre os principais problemas ambientais de diversas regiões do estado de Minas Gerais. Tais processos contribuem intensamente para a degradação dos solos além de gerar contratempos e prejuízos ao poder público e a particulares, sobretudo pela falta de estudos e planejamento na fase intervenções e expansão urbana (Santos, 1997).

Entre os diferentes processos erosivos e suas respectivas feições, as voçorocas constituem o estágio mais avançado e complexo de erosão, com um poder destrutivo local superior ao dos demais (São Paulo, 1990). Isto se deve à variedade de processos observados nas voçorocas, como erosão superficial, erosão interna promovida por *pipings*, além de escorregamentos e desmoronamentos das paredes laterais (Viero, 2004).

Deste modo, caracterizar e entender o material que compõem essas áreas é de suma importância para o desenvolvimento de técnicas, aplicação de intervenções eficazes e tomadas de decisão.

Esta pesquisa tem como objetivo realizar a caracterização física e química dos solos de duas voçorocas localizadas na porção norte da bacia hidrográfica do rio Pandeiros e caracterizar o ambiente em que estão inseridas.

MATERIAL E MÉTODOS

A bacia hidrográfica do rio Pandeiros está localizada na região norte do estado de Minas Gerais, margem esquerda do médio curso do Rio São Francisco, compreendendo parte dos municípios de Januária, Bonito de Minas e pequena parte de Cônego Marinho e possui uma área de 3.960 km² (Bethonico, 2009).

A Região norte da bacia é recoberta pela Formação Posse, constituída por arenitos muito finos, finos e médios, com boa maturidade textural e mineralógica, geralmente apresentando bom selecionamento e Depósitos Eluviais e Coluviais, material depositado sob forma de tálus (com matacões), fluxo de detritos, rampas de acumulação e níveis de material transportado e ferruginoso, além do material trabalhado *in situ* (CODEMIG, 2016). A geomorfologia é composta por um relevo de superfícies tabulares, áreas mais elevadas da

bacia, com topografia plana e baixa declividade, e vertentes ravinadas nas bordas destas superfícies (IGA, 2006).

As classes de solos dominantes são os Latossolos Vermelho-Amarelos e os Neossolos Quartzarênicos (UFV, 2007). Quanto aos aspectos vegetacionais, a bacia do Rio Pandeiros localiza-se no bioma Cerrado (IEF, 2009).

O trabalho foi dividido em três partes principais: trabalho de campo, análise laboratoriais e análise dos dados. O trabalho de campo realizado no mês de fevereiro de 2016, contou com o reconhecimento da área de estudo, caracterização do ambiente e coleta das amostras.

As análises laboratoriais foram divididas em químicas e físicas. As análises de granulometria foram realizadas no Laboratório de Geomorfologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), por dispersão com NaOH 0,1 mol L^{-1} e agitação lenta. As frações areia grossa e fina foram separadas por tamização, a argila determinada pelo método da pipeta, e a fração silte calculada pela diferença [(silte+argila) - argila].

As análises de pH em KCl, M.O, Mg, K, P, Ca, Cu, Fe, Zn, Mn, S e Al, Zn, Cu, Mn e Fe foram realizadas conforme Donagemma et al. (2012). Em seguida, os resultados foram organizados, tabelados e analisados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Voçoroca 01 (Figura 1) está localizada nas coordenadas UTM 8314844m S / 479620m, fuso 23S, com altitude de média de 676 metros.

Figura 1. Vista da Voçoroca 01.

A sua granulometria é representada majoritariamente pela fração areia, sendo que quase 80% é areia fina, sendo seu solo classificado como de textura arenosa. A estrutura é pouco desenvolvida, e a consistência, quando úmida, é friável, são bem profundos e pouco agregados.

Tabela 1. Tabela de granulometria da Voçoroca 01.

Granulometria - Voçoroca 01 (g/kg)					
Areia grossa	Areia média	Silte	Argila	Soma	Erro
75	795.5	6.8	125.8	1003	< 5%

Os solos apresentam pH com acidez fraca, e baixos níveis de P e K. Os valores de Ca e Al são considerados baixos / muito baixos, condição normal em solos tropicais. O Mg e Fe apresentam teores médios. Os teores de Cu, Zn e Mn são muito baixos, próximos de 0, característica comum em solos que com avançado grau de intemperismo. Considerando os valores de teor de P remanescente de 44,22 o teor de S é considerado baixo. O teor de M.O também é bastante baixo, comum em áreas de solo exposto como a área estudada (Ribeiro, et al. 1999).

Tabela 2. Tabela de análises químicas da Voçoroca 01.

Análises Químicas - Voçoroca 01 (g/kg)			
Mg (mg dm-3)	K (mg dm-3)	P (mg dm-3)	Ca (cmolc dm-3)
0.5	1.68	0.06	0.1
Cu (mg dm-3)	Fe (mg dm-3)	Zn (mg dm-3)	Mn (mg dm-3)
0.1	29.95	0.2	0.12
M.O (dag kg-1)	pH	S (mg dm-3)	Al (cmolc dm-3)
0.17	5.1	11.72	0.5

A Voçoroca 01 encontra-se numa área de mata, sem muita interferência antrópica. Não foi possível identificar se o nível freático foi alcançado, entretanto, cicatrizes de abatimentos recentes destacam a condição de voçoroca ativa.

A Voçoroca 02 (Figura 02) está localizada nas coordenadas UTM 8327407m S / 477404m E também no fuso 23S, com altitude média de 699 metros.

Figura 02. Vista da Voçoroca 02.

Os solos são profundos e pouco agregados,

apresentam predomínio na fração areia, com fração dominante de areia grossa com 53,8%. A consistência, quando úmida, variou entre friável a muito friável. A estrutura é pouco desenvolvida e não apresenta pegajosidade.

Tabela 3. Tabela de granulometria da Voçoroca 02

Granulometria - Voçoroca 02 (g/kg)					
Areia grossa	Areia média	Silte	Argila	Soma	Erro
538.4	324.1	35.5	95.8	994	< 5%

O pH se mostra pouco ácido e está numa faixa que atende a agricultura. O P, K, Ca, Al e Mg apresentam níveis bem baixos e distantes como o solo ideal para a agricultura. Os macronutrientes apresentaram valores variando de muito baixos a baixos para Cu, Zn e Mn e bom e alto para os valores de Fe. Os valores de S se mostram médio considerando os valores de P remanescente de 41,15. O teor de M.O também foi indicado bom muito baixo (tabela 4) (Ribeiro, et al. 1999).

Tabela 4. Tabela de análises químicas da Voçoroca 02.

Análises Químicas - Voçoroca 02 (g/kg)			
Mg (mg dm-3)	K (mg dm-3)	P (mg dm-3)	Ca (cmolc dm-3)
0.1	3.85	0.52	0.1
Cu (mg dm-3)	Fe (mg dm-3)	Zn (mg dm-3)	Mn (mg dm-3)
0.21	64.48	0.26	4.76
M.O (dag kg-1)	pH	S (mg dm-3)	Al (cmolc dm-3)
0.22	5.1	12.69	0.2

Diferente da Voçoroca 01, a Voçoroca 02 está em processo de estabilização e recuperação. A revegetação é um forte sinal desse processo.

CONCLUSÕES

Os solos de ambas as voçorocas podem ser considerados frágeis. São arenosos e altamente susceptíveis a erosão, o solo exposto presente em ambas favorece o desenvolvimento de fluxos preferenciais da água da chuva e desagregação das partículas. Deste modo, o seu uso e manejo demandam mais cuidado além de estudos e planejamento prévios de futuras ações.

AGRADECIMENTOS

À FAPEMIG e à UFMG pelo apoio financeiro, ao Laboratório de Solos e Meio Ambiente e ao Núcleo ISZA do Instituto de Geociências da UFMG pelo desenvolvimento da pesquisa.

REFERÊNCIAS

BETHONICO, M. **Rio Pandeiros: Território e História de uma área de proteção ambiental no norte de Minas Gerais.** Revista Acta Geográfica, 2009. P. 23-38.

Biodiversitas. **Biodiversidade em Minas Gerais: um atlas para sua conservação.** Belo Horizonte/MG: Fundação Biodiversitas, 2005, 256p.

Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais (Codemig). **Mapeamento Geológico das folhas Catolé, São Francisco, São Joaquim e Serra dos Tropeiros / Rio Itaguari (1: 100.000).** 2016.

DONAGEMA, G. K.; CAMPOS, D. V. B. de; CALDERANO, S. B.; TEIXEIRA, W. G.; VIANA, J. H. M.**Manual de métodos de análise de solos.** Rio de Janeiro. Embrapa Solos, 2011. 230 p.

IEF. INSTITUTO ESTADUAL DE FLORESTAS. **Pandeiros: o pantanal mineiro.** Revista MG Biota. Belo Horizonte, v.2, n. 2, jun./jul. 2009.

RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G.; ALVAREZ V., V.H. **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação.** Viçosa, MG: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. 359p.

SANTOS, R.M.M. **Caracterização Geotécnica e Análise do Processo Evolutivo das Erosões no Município de Goiânia.** Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, FT, UnB, Brasília, DF, 1997, 120 p.

SÃO PAULO, Secretaria de Energia e Saneamento. **Controle de Erosão: bases conceituais e técnicas; diretrizes para o planejamento urbano e regional e orientação para o controle de boçorocas urbanas.** 2 ed. São Paulo: DAEE / IPT , 1990. 92p.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA (UFV). **Mapeamento dos solos de Minas Gerais.** Viçosa. 2007.

VIERO, C. A. **Análise da geologia, geomorfologia e solos no processo de erosão por voçorocas: Bacia do Toboão, RS.** Dissertação de mestrado submetida ao programa de pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2004. 141 p.

VI WORKSHOP INTERNACIONAL
SOBRE PLANEJAMENTO E DESENVOLVIMENTO
SUSTENTÁVEL DE BACIAS HIDROGRÁFICAS

ZONEAMENTO DO POTENCIAL DO USO CONSERVACIONISTA COMO ALTERNATIVA ÀS UNIDADES DE PAISAGEM PARA A CONFECÇÃO DO ZAP[1]

Adriana Monteiro da COSTA UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, drimonteiroc@yahoo.com.br
Ivana De Marco Fonseca HORTA UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais
Hugo Henrique Campos SALIS UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais
João Herbert Moreira VIANA EMBRAPA Milho e Sorgo, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Dayane Caroline Freitas CARVALHO UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais

Resumo

A garantia da manutenção da qualidade e da quantidade dos recursos naturais das bacias hidrográficas está diretamente relacionada à promoção de políticas para o desenvolvimento ambiental e socioeconômico da região, que por sua vez dependem de métodos adequados de mensuração. O objetivo deste trabalho foi a proposição de um método de álgebra de mapas para analisar o potencial de uso conservacionista para a confecção do ZAP, usando como estudo de caso a bacia hidrográfica do Rio Pandeiros. O método proposto apresenta três etapas principais, sendo: preparação das bases cartográficas, com conferência geométrica e recorte para a área de interesse, aplicação da álgebra de mapas, atribuindo-se pesos para as variáveis ambientais de declividade, solos e geologia e avaliação e análise crítica dos resultados. Concluiu-se que a álgebra de mapas foi um instrumento adequado para análise ambiental da bacia hidrográfica do Rio Pandeiros, podendo ser aplicada de forma padronizada evitando-se a etapa de interpretação subjetiva.

Palavras-Chave: Zoneamento ambiental produtivo, Álgebra de Mapas, Geoprocessamento.

Introdução

A garantia da manutenção dos recursos naturais das bacias hidrográficas está diretamente relacionada à promoção de políticas para o desenvolvimento ambiental e socioeconômico da região, para as quais é necessário o desenvolvimento de métodos e ferramentas que garantam o conhecimento das relações geográficas locais. Estas devem revelar corretamente as limitações e potenciais da área e serem acessíveis a todos os usuários e interessados pelo entendimento da dinâmica ambiental na bacia (OLIVEIRA, et al., 2009).

O Zoneamento Ambiental Produtivo (ZAP), em Minas Gerais (Decreto Estadual n° 46650/2014), é um importante instrumento que permite diagnósticos diversos associados a unidades de paisagens pré-estabelecidas, as quais determinarão a aptidão das áreas. As unidades são delimitadas manualmente, por meio de geoprocessamento, e nomeadas

[1] Avanços no manejo de bacias hidrográficas

conforme Fernandes et al. (2013). Essa etapa do método permite controle e direcionamento do resultado obtido, mas exige do analista experiência prática em análises geomorfológicas por meio de interpretação de curvas de nível (SEMAD/SEAPA, 2016) e conhecimento avançado em Pedologia e Geologia. Já a álgebra de mapas é um método consagrado utilizado em larga escala por vários autores em diversos estudos relacionados ao meio ambiente (OLIVEIRA et al. 2009; MENEZES JÚNIOR et al., 2016). O seu uso para substituição das Unidades de Paisagem por "potencial de uso" apresenta-se como uma alternativa à obtenção das informações da paisagem por meio da integração, automatizada, de dados geográficos de interesse. Desta forma pode-se reduzir a subjetividade da análise estabelecendo-se padrões a serem utilizados por qualquer usuário. O objetivo deste trabalho é propor um método de aplicação da álgebra de mapas para avaliar o "potencial de uso conservacionista" como alternativa ao procedimento de mapeamento das "unidades de paisagem", proposta pelo ZAP, e avaliar sua aplicação à bacia hidrográfica do Rio Pandeiros.

Materiais e Métodos

O método desenvolvido foi aplicado na bacia hidrográfica do rio Pandeiros, localizada no noroeste de Minas Gerais, com extensão de 393.060 ha. Foram utilizadas as bases cartográfica de solos, na escala de 1:650.000 (http://www.feam.br/noticias/1/1355-mapa-de- solos), de geologia, escala de 1:1.000.000 (CPRM, 2014); o modelo digital de elevação do SRTM (USGS – *United States Geological Survey*), com resolução espacial de 30 m e o *Software* Arcgis 10.3.

O método proposto abrange três etapas principais, sendo: preparação das bases cartográficas, com conferência geométrica e recorte para a área de interesse, aplicação da álgebra de mapas, atribuindo-se pesos diferenciados para as variáveis ambientais de declividade, solos e geologia conforme tabelas propostas e avaliação e análise crítica dos resultados. A etapa de álgebra de mapas pode ser sintetizada por meio da seguinte equação:

$$pUC = \frac{\sum(d_i P + s_i P + g_i P)}{n}$$

Onde pUC é o potencial de uso conservacionista, adimensional. P é o peso relativo do parâmetro analisado (podendo variar de 0 a 1), di é o valor para a declividade da classe i, si é o valor para o solo da classe i, gi é o valor para a geologia da classe i, e n é o número de classes de potencial de uso conservacionista. Os valores atribuídos para as classes foram

estabelecidos com base em consultas à literatura e tabelados. A última etapa corresponde à discussão dos resultados, comparando-se o potencial de uso conservacionista obtido pela álgebra com o observado nas atividades de verificação no campo.

Resultados e Discussões

As classes alta e muito alta representam 75% da área (Figura 1 e Tabela 1) e correspondem a Latossolos em declividades variando de plana a onduladas (0 a 20%), e litologia predominante de arenitos que, por sua vez, apresentam alta permeabilidade e porosidade, favorecendo a recarga de aquíferos. As demais classes estão localizadas próximas à drenagem e nas rupturas de relevo nas chapadas, onde predominam Neossolos e Cambissolos. O trabalho de campo permitiu a validação dos resultados obtidos (Figura 2).

Figura 01 - Mapa do potencial para a bacia do rio Pandeiros.

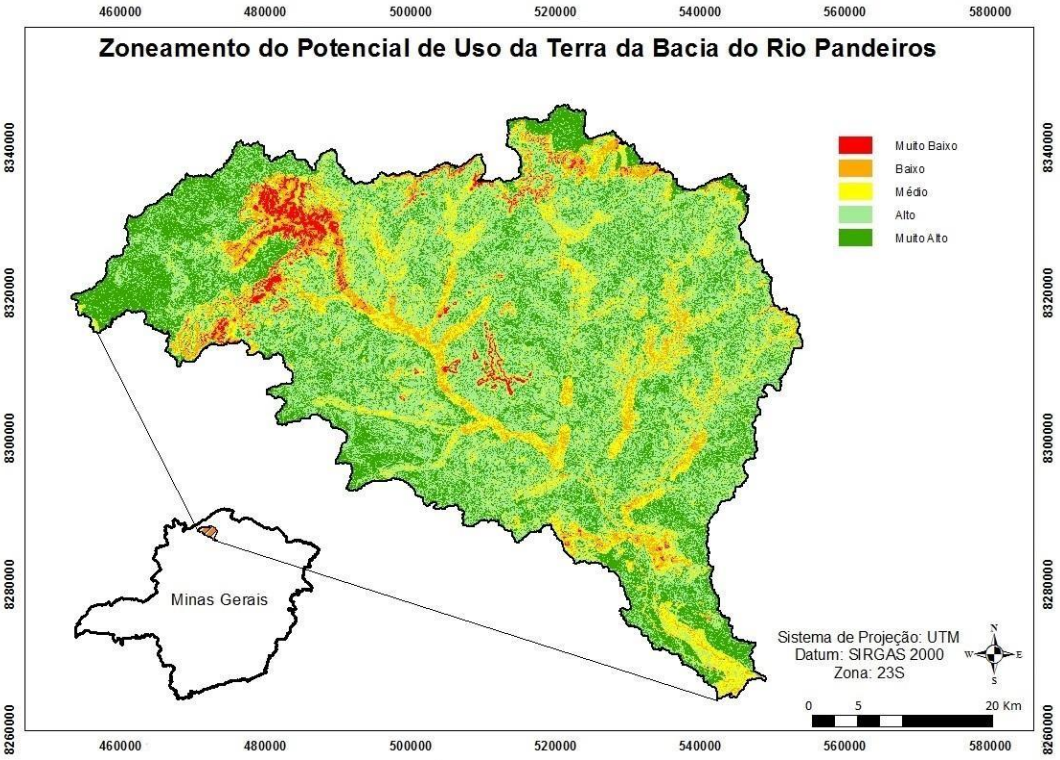


Tabela 1- Resultados das classes de potencial de uso conservacionista na bacia do Rio Pandeiros, MG

Classes	Área (%)
Muito Baixo	2,1
Baixo	6,6
Médio	15,3

Alto	45,4
Muito Alto	30,5

Figura 02 - Imagens de alguns de pontos de validação das unidades de Relevo da bacia do rio Pandeiros

Conclusões

A álgebra de mapas mostrou-se adequada para a análise ambiental da bacia hidrográfica do Rio Pandeiros, com potencial para ser aplicada a outras bacias de forma automatizada e prática. O procedimento permitiu representar espacialmente as características, os potenciais, as limitações e as aptidões das áreas na bacia, podendo auxiliar no planejamento ambiental e tomada de decisões locais.

Referências

FERNANDES, M. R *et al*. **Minas Gerais: Caracterização de Unidades de Paisagem.** Belo horizonte, MG: EMATER-MG. 2013. 92 p.

JACOMINE, P. K. T. *et al*. **Levantamento exploratório – reconhecimento de solos do Norte de Minas Gerais, área de atuação da SUDENE**. Recife, PE: EMBRAPA-SNLCS, 108 p, 1979.

MENEZES JÚNIOR, M., ALMEIDA, J. S., MELO, W. F., ANDRADE, A. B. A., & PEREIRA, A. W. R. Álgebra de mapas aplicado na determinação das ocupações irregulares e o risco ambiental em Catolé do Rocha-PB. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 11, n. 1, p. 01-07, 2016.

OLIVEIRA, J. H. M., CHAVES, J. M., LOBÃO, J., PEREIRA, Q., BANDEIRA, F. Fragilidade ambiental de um setor do raso da Catarina-BA e entorno utilizando geoprocessamento (álgebra simples de mapas-sobreposição ponderada). **XII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada**, v. 1, 2009.

SEMAD/SEAPA. **Método para elaboração do Zoneamento Ambiental Produtivo: ZAP de sub-bacias hidrográficas.** MINAS GERAIS. 2ª Edição. 2016.

XXXVI CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO
AMAZÔNIA E SEUS SOLOS: PECULIARIDADES E POTENCIALIDADES
30 de julho a 04 agosto de 2017
Belém - Pará - Brasil

FERTILIDADE DE SOLOS E DE SEDIMENTOS DA BACIA DO RIO PANDEIROS - MG

Adriana Monteiro da COSTA[(1)]**; João Herbert Moreira VIANA**[(2)]**; Dayane Caroline Freitas CARVALHO** [(3)]**; Jarbas Lima Dias SAMPAIO**[(1)]**; Carlos Henrique JARDIM**[(1)] [(1)]Professor; Universidade Federal de Minas Gerais/UFMG; Belo Horizonte, MG; adrianamonteiro@ufmg.br; [(2)]Pesquisador; Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG; [(3)]Estudante de Mestrado; UFMG, Belo Horizonte, MG

Introdução – A bacia do Rio Pandeiros é um ambiente de grande diversidade geoecológica e desempenha funções ecológicas importantes para o Estado de Minas Gerais. Contudo, ela tem despertado a atenção de agentes públicos e estudiosos para as ameaças que vem sofrendo, em virtude do processo de degradação acelerada de seus solos, reflexo do uso a partir da década de 60, associado à grande fragilidade destes solos. Os processos erosivos e a degradação do solo, conjuntamente com mudanças em outros elementos ambientais, têm promovido vários impactos na região, com destaque para o assoreamento do Rio Pandeiros, com redução do volume de água disponível nos cursos d'água e perda da capacidade produtiva dos solos. O objetivo deste trabalho foi avaliar a fertilidade de solos e de sedimentos na Bacia do Rio Pandeiros. **Material e Métodos** – O estudo foi realizado nos municípios de Bonito de Minas e Januária, no norte de Minas Gerais. A região, inserida no bioma Cerrado, é marcada por relevos tabulares que correspondem à parte mais elevada da bacia, com topografia plana e baixa declividade, e vertentes ravinadas, correspondendo às bordas da bacia. A geologia é representada pela Formação Posse, constituída por arenitos muito finos, finos e médios, que tem grande influência nos solos da região. Os solos dominantes são os Latossolos Vermelho-Amarelos e os Neossolos Quartzarênicos. A área foi percorrida para reconhecimento e foram identificados os locais de maior susceptibilidade aos processos erosivos. Nestes pontos, foram analisados perfis de solos representativos da área e coletadas amostras para análise química do solo. Foram coletadas 27 amostras de solos na área de cabeceira da bacia e 14 amostras de sedimentos no leito do rio. Foram realizadas análises de fertilidade completa e os resultados foram organizados, tabelados e analisados. **Resultados e Discussão** – Os solos, de forma geral, apresentam teores muito baixos de todos os macro e micronutrientes avaliados. Os teores de fósforo remanescente são considerados elevados, reflexo da baixa capacidade adsorção do material, muito arenoso e com baixos teores de ferro. Em algumas das amostras, verifica-se teores adequados de enxofre. Os resultados indicam a restrição geral de fertilidade dos solos para uso agropecuário e um risco potencial de percolação profunda dos elementos, devido à baixa capacidade de retenção dos mesmos nos solos. **Conclusões** – Os solos da bacia do Rio Pandeiros apresentam baixa fertilidade natural e pode haver problemas de contaminação dos cursos d'água em função de sua baixa capacidade de retenção de elementos. **Bibliografia:** DONAGEMA, G. K.; CAMPOS, D. V. B. de; CALDERANO, S. B.; TEIXEIRA, W. G.; VIANA, J. H. M.**Manual de métodos de análise de solos.** Rio de Janeiro. Embrapa Solos, 2011. 230 p.

Palavras-chave: erosão do solo, bacia hidrográfica, sustentabilidade ambiental

Apoio financeiro: FAPEMIG, UFMG

Promoção: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Núcleo Regional Amazônia Oriental

Realização: Ufra

Apoio Institucional: Instituto Federal Pará; Museu Paraense Emílio Goeldi; Embrapa

XXXVI CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO
AMAZÔNIA E SEUS SOLOS: PECULIARIDADES E POTENCIALIDADES
30 de julho a 04 agosto de 2017
Belém - Pará - Brasil

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA E FRACIONAMENTO DE AREIAS DE SOLOS E DE SEDIMENTOS DA BACIA DO RIO PANDEIROS, NORTE DE MINAS GERAIS

João Herbert Moreira VIANA[(1)]**; Adriana Monteiro da COSTA**[(2)]**; Dayane Caroline Freitas CARVALHO**[(3)]**; Jarbas Lima Dias SAMPAIO DIAS**[(2)]**; Carlos Henrique JARDIM**[(2)]**;**
[(1)]Pesquisador; Embrapa Milho e Sorgo; Sete Lagoas, MG; joao.herbert@embrapa.br;
[(2)]Professor; UFMG, Belo Horizonte, MG; [(3)]Estudante de Mestrado; UFMG, Belo Horizonte, MG;
[(2)]Bolsista; UFMG, Belo Horizonte, MG.

Introdução - A Bacia Hidrográfica do Rio Pandeiros exerce um importante papel ecológico regional no norte do Estado de Minas Gerais, apresentando um ambiente único em sua foz, o "Pantanal Mineiro". Entretanto, a degradação ambiental sofrida a partir da década de 60 intensificou os processos de erosão acelerada e o assoreamento dos cursos d'água, comprometendo a qualidade e a dinâmica ambiental da bacia. Estudos da dinâmica erosional que contribuam com a preservação e recuperação da Bacia ainda são reduzidos. Este trabalho teve como objetivo a caracterização granulométrica dos solos/saprolitos e dos sedimentos da calha do rio Pandeiros, predominantemente arenosos, visando identificar as eventuais fontes destes. **Material e Métodos** - Foram realizados trabalhos de campo de reconhecimento da área de estudo, localizada na região Norte do estado de Minas Gerais, compreendendo parte dos municípios de Januária e Bonito de Minas. A área foi percorrida buscando locais de maior susceptibilidade aos processos erosivos. Foram priorizadas as áreas de cabeceiras da Bacia, como de maior potencial à produção de sedimentos, e alguns pontos de coleta de sedimentos no curso principal do rio para o estudo comparativo. Foram coletadas 27 amostras de solos/saprolitos e 15 de sedimentos, todas em triplicata. Foram realizadas as análises granulométricas com separação da fração areia em suas subfrações. Para a separação de areias procedeu-se à análise por dispersão com NaOH 0,1 mol L^{-1} e agitação lenta. As frações areia foram separadas por tamização, a argila determinada pelo método da pipeta, e a fração silte calculada pela diferença [(silte+argila) - argila]. A fração areia foi separada em cinco frações (areia muito grossa, grossa, média, fina e muita fina). **Resultados e Discussão** - Foi observado que a maioria dos solos/saprolitos coletados apresentaram textura arenosa, com predomínio de areia média a fina, porém com grande variação entre os pontos coletados, com texturas desde areia até argila. Isso reflete a variação dos materiais de origem, associados aos arenitos da Formação Urucuia e coberturas associadas. Foi observado para os sedimentos uma maior uniformidade granulométrica, com maior concentração de areias médias e menor de areias finas, sendo que um ponto apresentou elevada quantidade de cascalhos. Este localiza-se na borda de meandro do rio área de deposição de sedimentos. Os resultados indicam a necessidade do maior detalhamento das análises das areias para melhor compreensão das relações entre áreas fonte e sedimentos.

Palavras-chave: elementos-traço, solos da Amazônia, análise de componentes principais

Apoio financeiro: FAPEMIG, UFMG

Promoção: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Núcleo Regional Amazônia Oriental

Realização: Ufra

Apoio Institucional: Instituto Federal Pará; Museu Paraense Emílio Goeldi; Embrapa

COSTA, A. M.; SALIS, H. H. C. C.; CARVALHO, D. C. F.; RIBEIRO, A. H. N. FERREIRA, J. M. L. VIANA, J. H. M (SUBMETIDO). **Indicadores para avaliação da sustentabilidade: ZAP e ISA.** In: ANDREOLI, C. PHILLIP, A. Sustentabilidade no Agronegócio. Barueri, SP: Manole, 2018.

Indicadores para avaliação da sustentabilidade: ZAP e ISA

Adriana Monteiro da Costa[1]; Hugo Henrique Cardoso de Salis[2]; Dayane Caroline Freitas Carvalho[3]; Antonio Henrique Noronha Ribeiro[4]; José Mário Lobo Ferreira[5]; João Herbert Moreira Viana[6]

[1]Universidade Federal de Minas Gerais, Profª. Associada do Departamento de Geografia. drimonteiroc@yahoo.com.br; [2] Pesquisador Núcleo ISZA/IGC-UFMG; [3] Mestranda em Análise e Modelagem de Sistemas/IGC-UFMG; [4] Graduando em Geografia/IGC-UFMG; [5]Pesquisador EPAMIG; [6]Pesquisador Embrapa Milho e Sorgo.

PARTE 1 - Zoneamento ambiental e produtivo de bacias hidrográficas (ZAP): o caso da bacia hidrográfica do Rio Pandeiros

1. Introdução

Identificar áreas que apresentam determinado potencial de uso, ou dividir unidades espaciais de acordo com suas características principais, é um mecanismo utilizado historicamente com o objetivo de organizar e garantir a manutenção dos recursos naturais disponíveis em determinada área.

O planejamento para a utilização de tais recursos em uma unidade espaço-temporal qualquer deve considerar suas características físicas e biológicas e as relações de uso dos solos e de sua capacidade de suporte, sendo que, da análise detalhada de tais características, é possível estabelecer normas e padrões de uso para áreas distintas (zoneamento).

Neste sentido, Barbosa (2016) considera ser imprescindível a utilização das metodologias conservacionista e preservacionista que permitam a realização da análise e investigação da situação real da paisagem, em um dado espaço geográfico. A bacia hidrográfica é um sistema ambiental complexo, onde se expressa um conjunto de fatores biogeofísicos e socioambientais que obedece a uma delimitação natural dos fluxos de escoamento e recarga hídrica. Tal unidade espacial é dotada ainda de um caráter sociopolítico, ao ser definida pela Lei 9.433 de janeiro de 1997 como sendo a unidade territorial de planejamento. Um dos grandes desafios da gestão de recursos hídricos é, então, realizar um zoneamento das bacias hidrográficas que promova sua compartimentação, obedecendo às características

ambientais, às fragilidades, às potencialidades e, principalmente, que ordene o uso dos recursos naturais, garantindo a manutenção do seu potencial de recarga e seu estoque hídrico.

A partir desta problemática, foi elaborada em Minas Gerais a metodologia do Zoneamento Ambiental e Produtivo de sub-bacias hidrográficas – ZAP, que é uma ferramenta de zoneamento territorial capaz de orientar o planejamento do uso conservacionista dos recursos naturais, a partir de uma minuciosa análise de aspectos socioeconômicos e ambientais no âmbito de bacias hidrográficas.

O ZAP é uma metodologia desenvolvida pela Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável - SEMAD e pela Secretaria de Estado de Agricultura, Pecuária e Abastecimento - SEAPA. A mesma foi regulamentada pelo Decreto Estadual nº 46.650, de 19 de novembro de 2014, que oficializa o ZAP como a metodologia do Estado de Minas Gerais para análise de bacias hidrográficas.

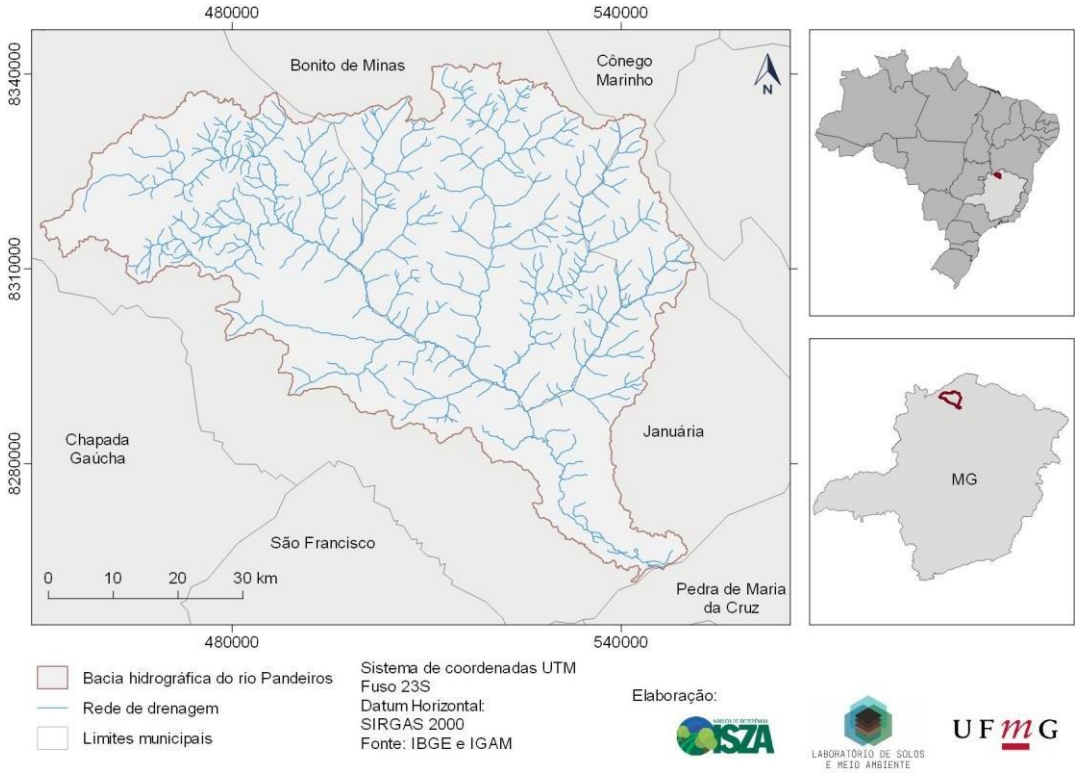
Consiste em uma análise integrada do meio físico, através da avaliação da demanda hídrica e do levantamento do potencial de uso conservacionista, aliado ao levantamento do uso do solo na área da bacia. Sua interpretação tem o potencial de subsidiar a elaboração de planos, programas e ações, assim como a definição de indicadores para acompanhamento e avaliação.

Para exemplificar sua aplicação, é apresentado o estudo de caso da bacia do rio Pandeiros. A escolha da área se deve à mesma ser uma das principais sub-bacias da margem esquerda do médio curso do rio São Francisco, transformada em Área de Preservação Permanente (APA), pela lei 11.901, de 01 de setembro de 1995. A bacia do rio Pandeiros possui, ainda, características bem específicas, sendo uma área de transição geológica e vegetacional. Ocorrem ali ambientes estratégicos, como o único pântano do Estado de Minas Gerais, que recebeu o título de Refúgio da Vida Silvestre através do Decreto nº43.910, de 05 de novembro de 2004.

1.1 A área de estudo

A Bacia Hidrográfica do Rio Pandeiros (BHRP), localizada na região Norte do Estado de Minas Gerais, abrange uma área de 396.028 ha, compreendendo parte dos municípios de Januária, Bonito de Minas e Cônego Marinho (Figura 1). O clima da região é predominantemente seco, com uma temperatura média anual de 24,6 °C, sendo as temperaturas máximas (33 °C) geralmente registradas no mês de outubro e as mínimas (14 °C), no mês de julho (INMET, 2018). No que diz respeito à hidrografia, os principais confluentes do Rio Pandeiros são os Córregos Catolé e Suçuarana e os Riachos Borrachudo e Macaúbas.

Figura 1 – Localização da área de estudos



Já em relação ao relevo, a área apresenta predominância de superfícies suavizadas, associadas à Depressão São Franciscana, cuja evolução está relacionada aos processos de denudação realizados pela drenagem sobre as rochas das chapadas dos Planaltos do São Francisco (IGA, 2006). Essas características são responsáveis pela pequena extensão dos locais mais declivosos na bacia, com inclinação superior a 20% (EMBRAPA, 1979), conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Área das classes de declividade da BHRP.

Declividade (%)	Tipo de Relevo	Área (ha)	%

0 a 3	Plano	209.474	52,9
3 a 8	Suave ondulado	167.685	42,3
8 a 20	Ondulado	16.680	4,2
20 a 45	Forte ondulado	2.189	0,6
Acima de 45	Montanhoso a escarpado	0,67	0,0002
	Total	396.028	100

De acordo com o Mapa de Solos de Minas Gerais (UFV et al., 2010), os solos predominantes na área são os Latossolos Vermelho-Amarelos, que abrangem mais de 87% da bacia hidrográfica, seguido dos Neossolos Flúvicos (5,48%). As demais classes são os Neossolos Quartzarênicos, os Neossolos Litólicos, os Cambissolos Káplicos e os Gleissolos Melânicos, que somadas correspondem a 7% da área da bacia (Tabela 2).

Tabela 2 – Abrangência espacial das classes de solos na BHRP.

Classe de solos	Área (ha)	%
CambissolosHáplicos	2.810	0,71
GleissolosMelânicos	11.857	2,99
LatossolosVermelho-Amarelos	346.549	87,51
NeossolosFlúvicos	21.707	5,48
NeossolosLitólicos	176	0,04
NeossolosQuartzarênicos	12.930	3,26
Total	396.028	100

A geologia do local é caracterizada pela presença em maior área do Grupo Urucuia (Formação Posse e Formação Serra das Araras), litologia do tipo arenito com mais de 290 mil ha, equivalente a 73,43% da área (Tabela 3).

Tabela 3 – Abrangência espacial dos litotipos na BHRP.

Litotipo	Área (ha)	%
Areia	70.887	17,90
Arenito	290.805	73,43
Calcarenito	27.571	6,96
Gnaisse	6.766	1,71
Total	396.028	100,00

A área apresenta ainda os depósitos aluvionares ao longo das principais drenagens nas regiões de veredas, resultantes de processo naturais e antrópicos de erosão.

1.2 Materiais utilizados

Os materiais utilizados neste estudo foram: Software Quantum GIS – QGIS – versão 2.18.13 (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2017); b) Imagens do Satélite Landsat-8, obtidas no site do *Earth Explorer* (https://earthexplorer.usgs.gov/); c) Mapa de solos do Estado de Minas Gerais com escala de 1:650.000 (UFV et al, 2010); d) Mapa geológico do Estado de Minas Gerais com escala de 1:1.000.000 (CODEMIG/CPRM, 2014); e) Rede hidrográfica regionalizada do Estado de Minas Gerais com escala de 1:1.000.000, obtida junto à Secretaria de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD); f) Mapa de vegetação do Estado de Minas Gerais, com escala de 1:60.000 (SISEMA/ZEE, 2009); g) Dados de outorgas de usuários e água superficial da bacia hidrográfica do rio Manso – MG, obtidos junto à SEMAD; h) Modelo Digital de Elevação ALOS PALSAR com resolução espacial de 12,5 metros (JAXA/METI, 2010).

2. Estudo da disponibilidade hídrica

O estudo da disponibilidade hídrica possibilita ao analista, aos moradores da região e aos demais interessados avaliar, em termos quantitativos, como está sendo utilizada a água da bacia hidrográfica e seus usos mais significativos. Aponta espacialmente, a partir da categorização, as áreas com indisponibilidade (volume outorgado superior ao limite da vazão de referência) e em estado de atenção (volume outorgado próximo ao limite da vazão de referência), as quais, por sua vez, devem ser priorizadas no processo de gestão. Nesse sentido, o presente cálculo foi realizado conforme proposto no documento da Metodologia Mineira de Caracterização Socioeconômica e Ambiental de Sub-bacias Hidrográficas (SEMAD/SEAPA, 2016).

2.1 Metodologia

Para realização do estudo, foi utilizada base cartográfica, em formato *shapefile*, da rede de drenagem regionalizada do Estado de Minas Gerais (IGAM, 2010) e os dados de outorgas e de cadastros vigentes de usuários de água superficial presentes na bacia hidrográfica do Rio Pandeiros, obtidos via requerimento à Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD). Cada informação individual constante nos dados é composta de descrições específicas, como a vazão outorgada (em m^3/s), a finalidade de uso

e os tipos de captação, entre outros. Assim, os dados foram processados com auxílio do *software* QGIS e, com isso, o diagnóstico da disponibilidade hídrica pode ser obtido após a execução de duas etapas básicas principais.

Na primeira etapa, verificou-se qual é a vazão de referência para cálculo da disponibilidade hídrica superficial nas bacias hidrográficas mineiras, cuja informação se baseia na resolução conjunta nº 1548 entre a SEMAD e o Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM). Nela é estabelecido que, em algumas bacias estaduais, devem ser garantidas, a jusante de cada captação, 50% da vazão média de sete dias de duração e dez anos de recorrência ($Q_{7,10}$) e, em outras bacias hidrográficas, esse percentual é alterado para 70%, por serem consideradas em estado de conflito pelo direito de uso dos recursos hídricos. Ressalta-se que este é o cenário no qual a bacia hidrográfica do Rio Pandeiros está inserida.

Na segunda etapa, atribuiu-se a cada trecho de curso d'água a soma das vazões demandadas, seguindo orientações específicas para cada tipo de captação e, em seguida, foi calculado o comprometimento hídrico de cada extensão da rede de drenagem. Assim, onde a demanda assumiu valores de intervalos entre 0 e 50% da vazão outorgável, classificou-se o trecho como "em estado de disponibilidade hídrica". Já, onde a demanda apresentou valores com intervalo entre 50 a 100% da vazão outorgável, classificou-se o trecho como "em estado de atenção". Por último, onde a demanda estava acima de 100% da vazão outorgável, considerou-se o trecho como em "estado de indisponibilidade hídrica".

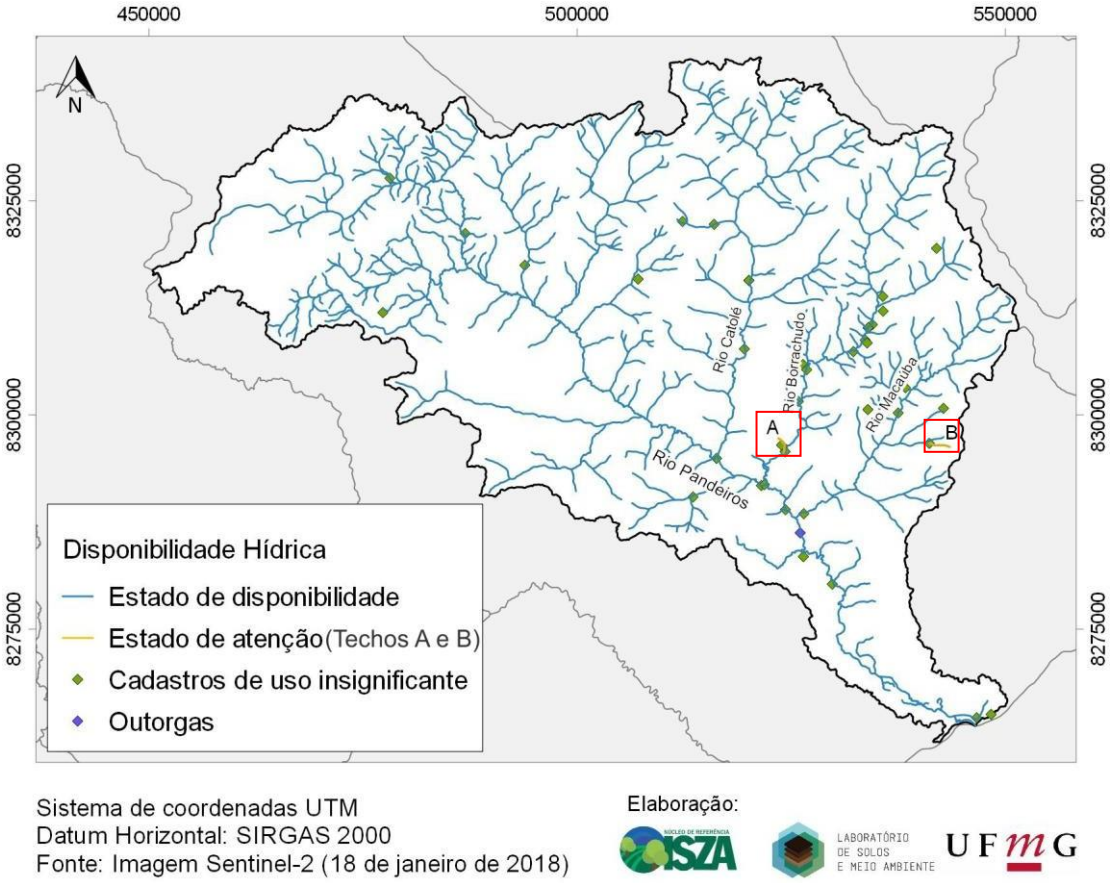
2.3 Resultados e Discussão

A análise dos dados de disponibilidade hídrica para a bacia do Rio Pandeiros apontou a existência de 39 pontos de captação de água superficial com processos vigentes. Destes, os principais usos são a dessedentação de animais, a irrigação e o consumo humano (Figura 2).

Figura 2 – Percentual da vazão demandada por finalidades de usos na BHRP-MG.

O Gráfico também indica que, dos 0,0215 m³/s outorgados e cadastrados na BHRP, 0,039 m³/s foram destinados para usos diversos (classe “outros”), como abastecimento de atividades industriais, abastecimento público e uso doméstico que não seja consumo humano. Além disso, em termos de vazões de referência, não foram observados trechos de cursos d’água em estado de indisponibilidade hídrica. Ou seja, não foram observados segmentos cuja vazão outorgada estava acima da vazão ecológica proposta pelo Estado (Figura 3).

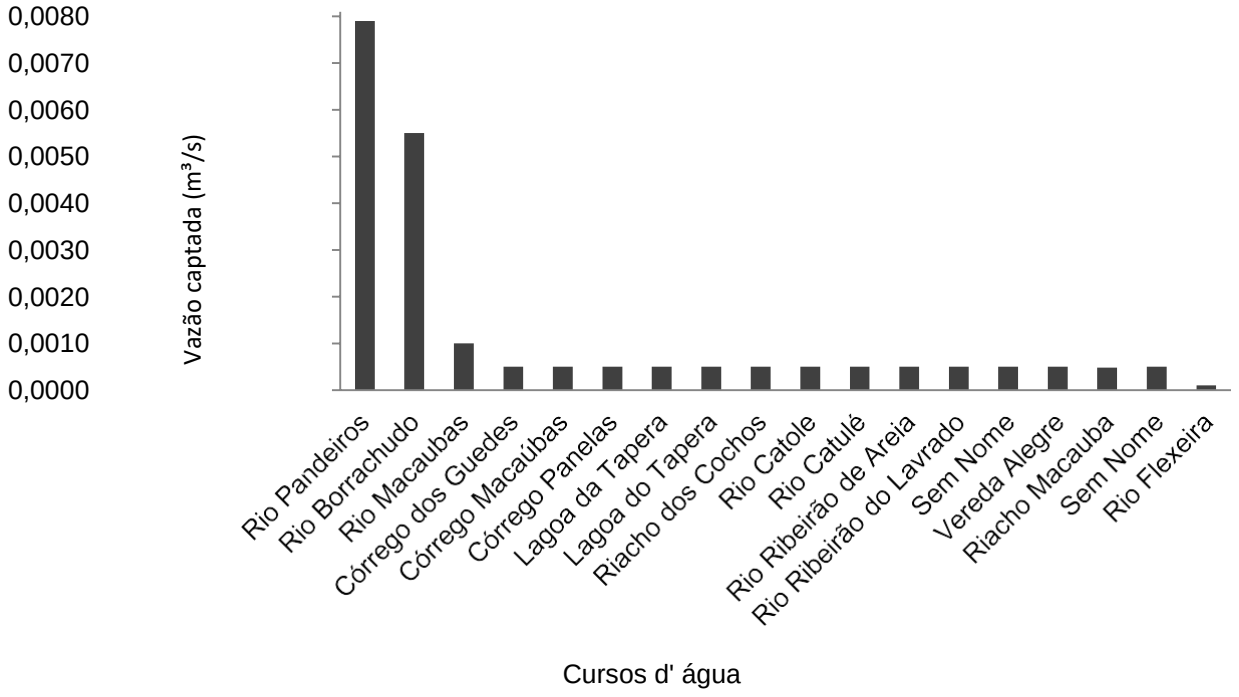
Figura 3 – Classificação dos trechos de cursos d'água da bacia hidrográfica do Rio Pandeiros quanto à disponibilidade hídrica e localização dos usuários de água superficial na área.



É possível observar que, na área de estudo, existem 2 trechos de cursos d'água que estão em estado de atenção. Nestes 2 segmentos de cursos d'água (A e B), o comprometimento da demanda hídrica assume valores de 89% e 67%. A $Q_{7,10}$ do trecho A é igual a 0,0019 m³/s e a demanda é igual a 0,0005 m³/s. Já a $Q_{7,10}$ do trecho B é igual a 0,0025 m³/s e a vazão demanda é igual a 0,0005 m³/s. São vazões e demandas muito baixos, em termos absolutos. O não comprometimento atual da disponibilidade hídrica indica que é possível fazer a gestão dos recursos hídricos na BHRP, assegurando a quantidade necessária de fluxo de água para manter a ecologia fluvial das águas superficiais na área, antes do aparecimento de conflitos. É importante ressaltar que, além da questão do gerenciamento por ser uma APA, o padrão de uso e de cobertura do solo também assegura a disponibilidade hídrica local, em função de seu baixo desenvolvimento e reduzida utilização da água pela agropecuária.

No que diz respeito à vazão captada nos cursos d'água da bacia, tiveram maiores valores o Rio Pandeiros, seguido do Rio Borrachudo e do Rio Macaúbas, conforme apresentado na Figura 4, todos caracterizados como os rios de maior ordem na área de estudo, conforme já mencionado.

Figura 4 – Vazão captada em todos os cursos d'água com demanda hídrica vigente na BHRP – MG.



Baseado nas informações da Figura 4, pode-se considerar que a vazão captada média dos trechos apresentados é igual a 0,0013 m³/s, indicando que a maioria dos usuários de água superficial da bacia está na categoria do cadastro de uso insignificante, com captações de 0,5 litros por segundo, com exceção de um usuário, com captação de aproximadamente 3 litros por segundo.

Destaca-se que essas informações, aliadas a diagnósticos em geral do potencial natural do meio físico, podem elevar o nível de compreensão dos moradores locais, de pesquisadores e de extensionistas sobre o seu meio de atuação e contribuir para direcionar suas práticas conservacionistas cotidianas, de médio e de longo prazo, principalmente, aquelas voltadas para a manutenção da qualidade do ecossistema.

3. Potencial de uso conservacionista na BHRP

O Potencial de Uso Conservacionista (PUC) é uma análise integrada do meio físico que possibilita a identificação das limitações e potencialidades das áreas estudadas, subsidiando as formas de uso e adoção de manejos que promovam a conservação das suas principais características ambientais.

Esta análise foi desenvolvida com o objetivo de responder os questionamentos implícitos no zoneamento ambiental e produtivo das bacias hidrográficas (ZAP), que busca a compreensão das áreas dentro da bacia com maior potencial de recarga hídrica, com maior potencial para atividades agropecuárias e com maior resistência a processos erosivos.

Para tal, é realizada uma álgebra ponderada entre os mapas de solos, de geologia e de geomorfologia (declividade) da área, sendo que os ponderadores para cada variável estão relacionados à sua influência na recarga hídrica, no potencial agropecuário e na resistência à erosão, respectivamente

No mapeamento do Potencial de Uso Conservacionista (PUC), utilizam-se bases cartográficas oficiais disponíveis e sem custos de obtenção. O resultado da interseção das variáveis ambientais permite categorizar as áreas de uma bacia hidrográfica (COSTA et al., 2017a).

3.1 Metodologia

Os materiais utilizados no estudo foram o Mapa de solos do Estado de Minas Gerais (Folha 4); o Mapa Geológico do Estado de Minas Gerais e Modelo Digital de Elevação (MDE) ALOS PALSAR, com resolução espacial de 12,5 m.

Após a obtenção dos dados cartográficos, o Zoneamento do Potencial de Uso Conservacionista foi elaborado em três etapas: pré-processamento dos dados cartográficos, reclassificação e álgebra de mapas.

Na primeira etapa, realizou-se a conversão dos dados cartográficos para o sistema de coordenadas planas, Datum SIRGAS 2000, fuso 23 Sul e, depois, realizou-se o recorte para a área de referência, com base nos limites físicos da bacia hidrográfica. A segunda etapa constitui na atribuição de pesos para cada classe das variáveis: solo, geologia e declividade, conforme proposto por Costa et al. (2017b).

Os pesos atribuídos variaram de 1 a 5, sendo que, quanto maior o valor, maior é o potencial da área para o uso de forma conservacionista. Além dos pesos, os autores sugerem uma ponderação para as variáveis ambientais utilizadas, conforme equação abaixo (Costa et al., 2017b):

P_{uc} =Potencial de uso conservacionista D = Declividade

S = Solos

L = Litologia

Aplicada a álgebra, observa-se que o intervalo de abrangência de potencial de uso conservacionista pode variar de 1 a 5 (adimensional), considerando-se todo o cenário ambiental para o Estado de Minas Gerais. Tal intervalo pode ser segmentado em cinco intervalos de classes (Tabela 4) que, por sua vez, permitem padronizar as análises ambientais e comparar resultados em diferentes bacias hidrográficas (Costa et al., 2017a).

Tabela 4– Descrição das classes adotadas no zoneamento do Potencial de Uso Conservacionista.

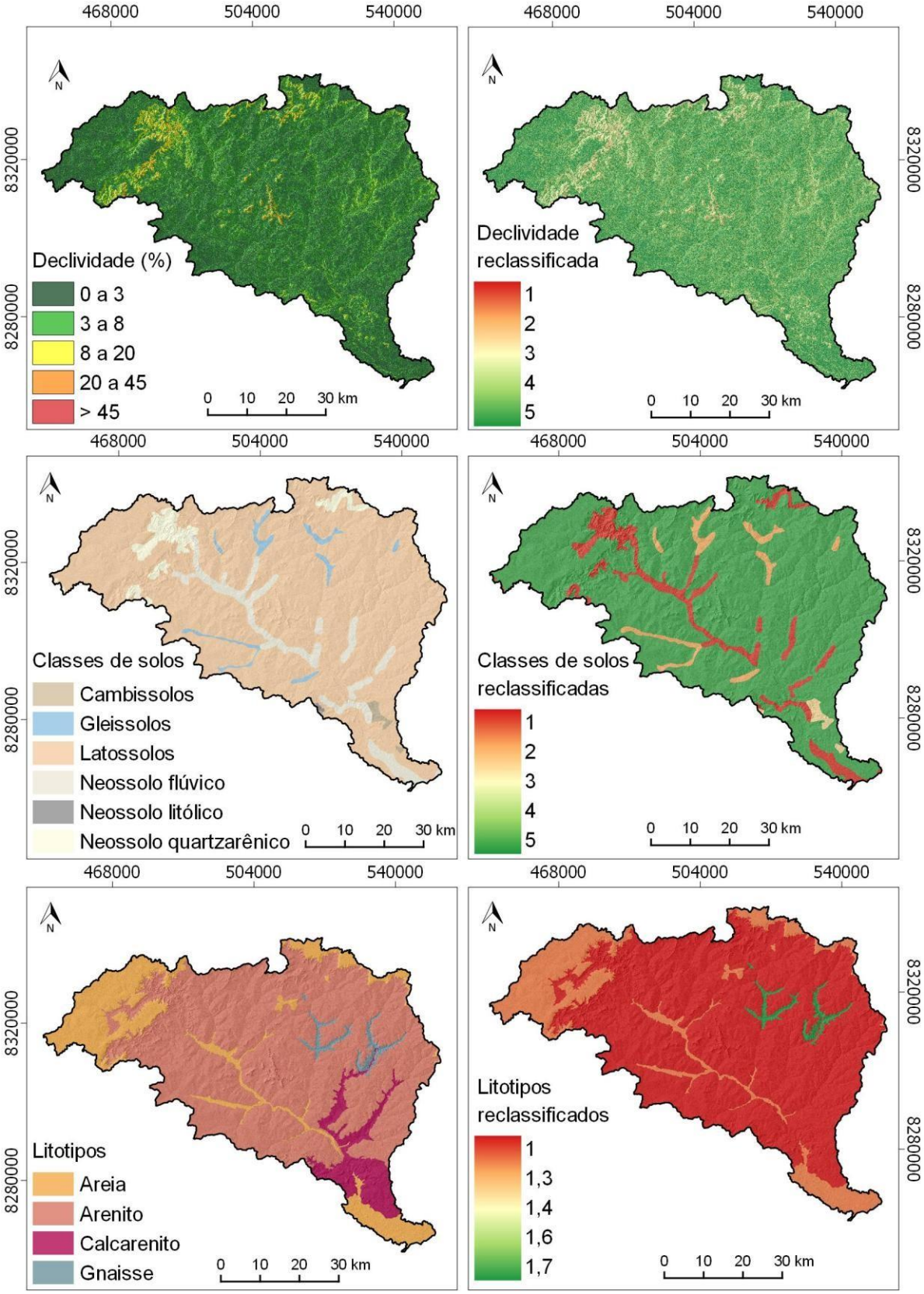
Classe	Intervalo	Cor
Muito baixo	1,0 – 1,8	Vermelho
Baixo	1,8 – 2,6	Laranja
Médio	2,6 – 3,4	Amarelo
Alto	3,4 – 4,2	Verde
Muito alto	4,2 – 5,0	Azul

3.2 Resultados e discussão

Os resultados da reclassificação dos mapas temáticos apresentam os locais da BHRP cuja declividade, os tipos de solos e as litologias, analisados separadamente, podem favorecer ou limitar um determinado uso conservacionista.

Figura 5 – Resultado da reclassificação dos mapas temáticos da BHRP.

COSTA, A. M.; SALIS, H. H. C. C.; CARVALHO, D. C. F.; RIBEIRO, A. H. N. FERREIRA, J. M. L. VIANA, J. H. M (SUBMETIDO). **Indicadores para avaliação da sustentabilidade: ZAP e ISA.** In: ANDREOLI, C. PHILLIP, A. Sustentabilidade no Agronegócio. Barueri, SP: Manole, 2018.



Sistema de Coordenadas UTM
Fuso 23 Sul
Datum horizontal: SIRGAS 2000
Fontes:SRTM (USGS); CPRM, 2014;
UFV et al., 2010.

Elaboracão:

NÚCLEO DE REFERÊNCIA ISZA

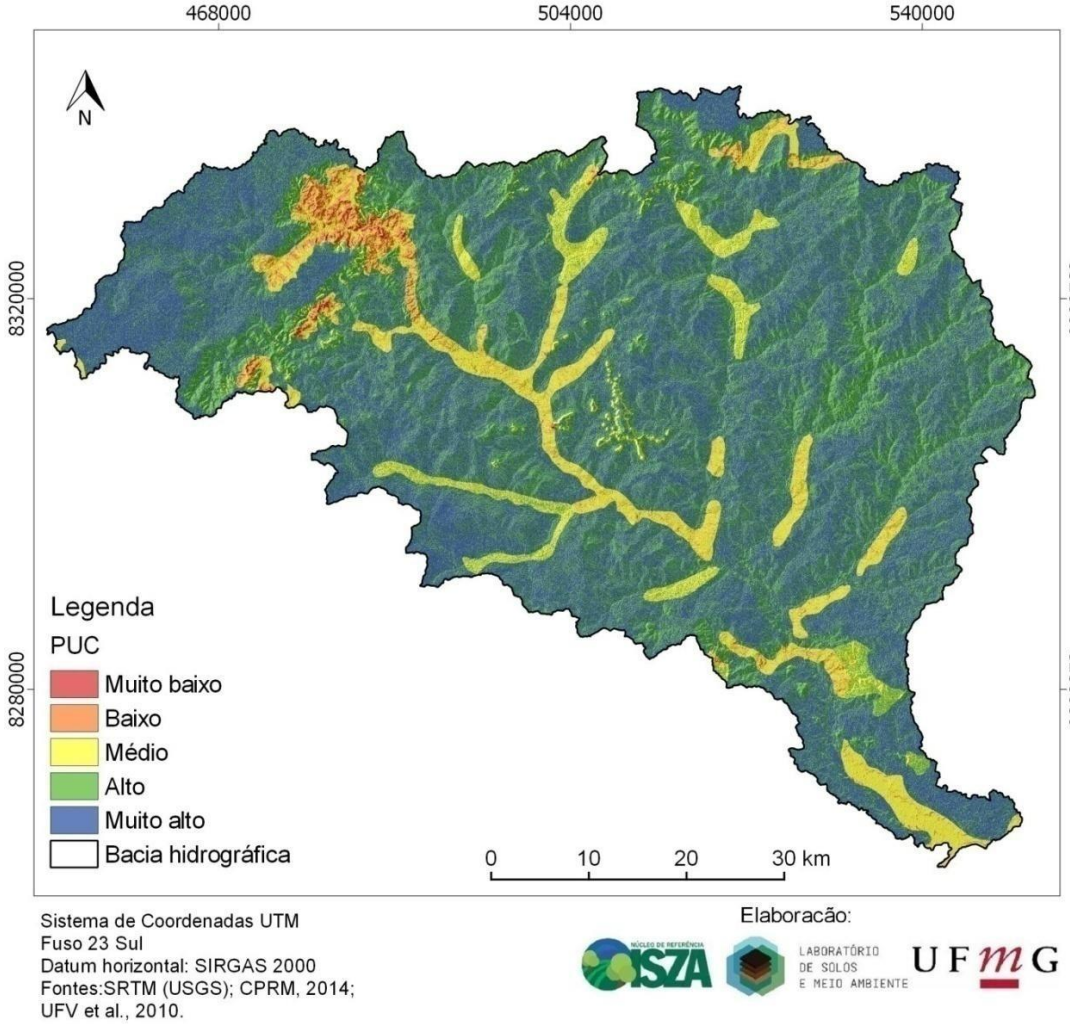
LABORATÓRIO DE SOLOS E MEIO AMBIENTE

UFMG

Além da restrição topográfica, os locais com peso 1 indicam restrições quanto ao tipo de solo, que podem ser rasos, pouco desenvolvidos e de baixa fertilidade natural e quanto à litologia, que pode apresentar composição mineralógica pobre em macro e micronutrientes.

No outro extremo, os locais que apresentaram peso 5 são as regiões na bacia cujo o relevo é plano, os solos são geralmente bem desenvolvidos, como os Latossolos, e as litologias, dentre suas principais características, são aquelas com potencial para fornecer macro e micronutrientes. Assim, a associação de locais com pesos mais altos em relação aos solos, geologia e declividades confere os mais altos valores de PUC, conforme apresentado na Figura 6.

Figura 6 – Potencial de Uso Conservacionista da Bacia Hidrográfica do Rio Pandeiros.



A Figura 6 ilustra a distribuição espacial do PUC e destaca a maior abrangência da classe do tipo muito alto (41,14%). Apesar de apresentarem litologias que podem ser consideradas restritivas, conforme já apresentado na Figura 5, tais áreas mapeadas apresentaram o mais elevado potencial devido, principalmente, à associação de relevo plano e suave ondulado com a presença de Latossolos Vermelho-Amarelos. Além disso, verificou-se que menos de 3% da área total da bacia hidrográfica refere-se às áreas de PUC baixo (0,15%) e muito baixo (2,54%), conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 – Abrangência espacial das classes de Potencial de Uso Conservacionista (PUC) na BHRP.

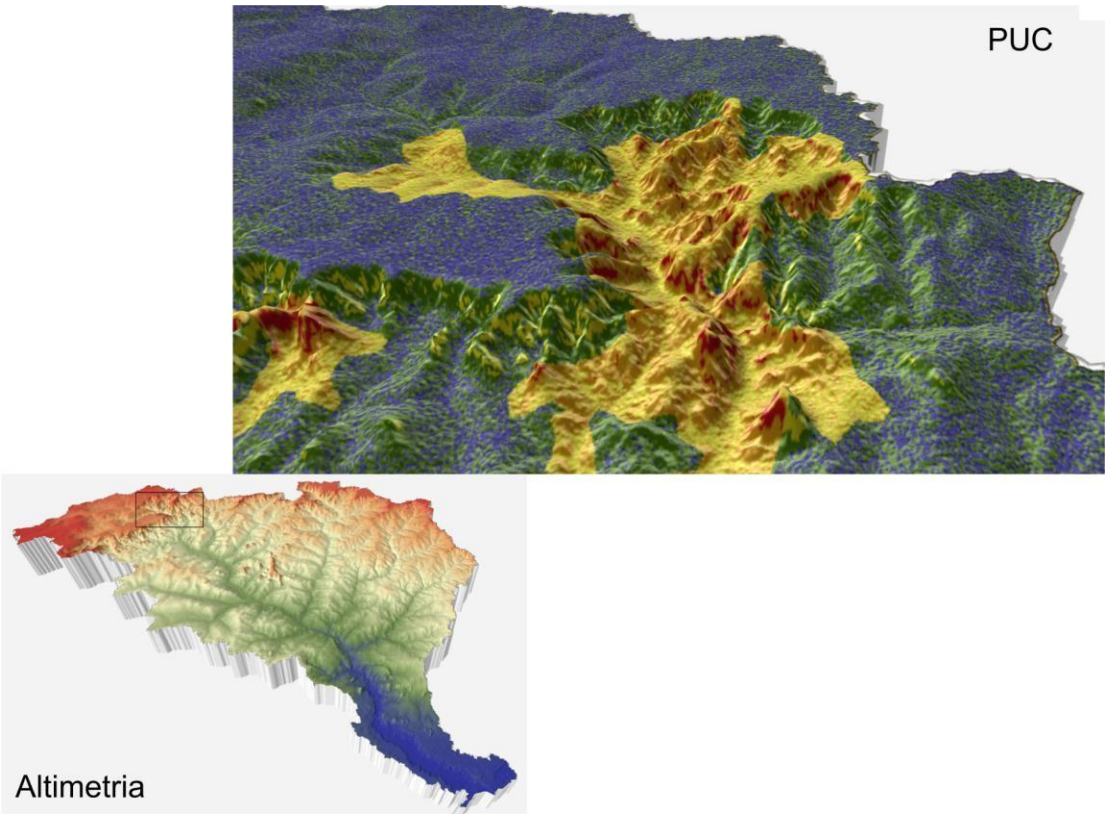
PUC	Área (ha)	%	Área 2*
Muito baixo	608	0,15	599
Baixo	10.069	2,54	9.401
Médio	37.547	9,48	32.902
Alto	162.908	41,14	155.163
Muito alto	184.896	46,69	177.561
Total	396.028	100,00	375.626

* Descontadas as áreas de restrição ambiental: APPs hídricas, de veredas e UC Estadual.

Descontando-se as áreas com restrição ambiental ao uso antrópico (APPs hídricas e a UC Estadual), o mesmo padrão de PUC permanece com as maiores áreas referentes ao PUC muito alto (mais de 177.000 ha) e com menores áreas referentes ao PUC muito baixo (aproximadamente 600 ha).

Dentre as limitações do PUC muito baixo está o acesso ao local, tanto por veículos automotores quanto por maquinários, pois são regiões de relevo montanhoso e declividades acentuadas (acima de 45%), as quais, na área de estudo, estão associadas às bordas das chapadas e que podem ser consideradas áreas aptas apenas para a preservação ambiental, como é possível observar na Figura 7.

Figura 7 – Altimetria da BHRP associadas aos potenciais de uso conservacionista destacado próximos à região da cabeceira da área.



A Figura 7 também apresenta detalhes da localização dos potenciais alto e muito alto na região do primeiro terço (cabeceira) da bacia, ilustrando sua presença em áreas com aptidão para plantios agrícolas e, sobretudo, para recarga hídrica associados às regiões de chapadas. Nas outras porções da bacia, como próximo à foz e no seu terço médio, o uso conservacionista limita-se ao fato de estarem em áreas sob condições alagadiças (veredas e planícies aluviais), além estarem sujeitas à aplicação da legislação (APPs de cursos d'água). As demais potencialidades e limitações das classes de PUC podem ser visualizadas na Tabela 7, juntamente com outras características de interesse.

COSTA, A. M.; SALIS, H. H. C. C.; CARVALHO, D. C. F.; RIBEIRO, A. H. N. FERREIRA, J. M. L. VIANA, J. H. M (submetido). **Indicadores para avaliação da sustentabilidade: ZAP e ISA.** In: ANDREOLI, C. PHILLIP, A. Sustentabilidade no Agronegócio. Barueri, SP: Manole, 2018.

Tabela 7 – Resumo das características de cada classe de PUC da BHRP.

PUC	Intervalo da álgebra de mapas (adimensional)	Área (ha)	Classes de litotipos predominantes	Classe de solos predominante	Classe de relevo predominante	Limitação	Potencialidade
Muito baixo	1,0 a 1,8	608	Arenito	Neossolos	Montanhoso a escarpado	Acesso (trânsito de veículos e implementos agrícolas)	Preservação de cursos d'água de primeira ordem, nascentes.
Baixo	1,8 a 2,6	10.069	Arenito	Neossolos	Ondulado a Forte ondulado	Plantios agrícolas	Revegetação de áreas
Médio	2,6 a 3,4	37.547	Arenito	Neossolos	Ondulado	Suscetibilidade a processos erosivos	Plantios agrícolas
Alto	3,4 a 4,2	162.908	Arenito e calcarenito	Latossolos	Suave ondulado	Áreas de restrição ambiental	Plantios agrícolas e áreas de recarga hídrica
Muito alto	4,2 a 5,0	184.896	Arenito e calcarenito	Latossolos	Plano	Áreas alagadiças e de restrição ambiental	Áreas de recarga hídrica e pagamentos de serviços ambientais

4. Uso e cobertura do solo na BHRP

4.1 Metodologia

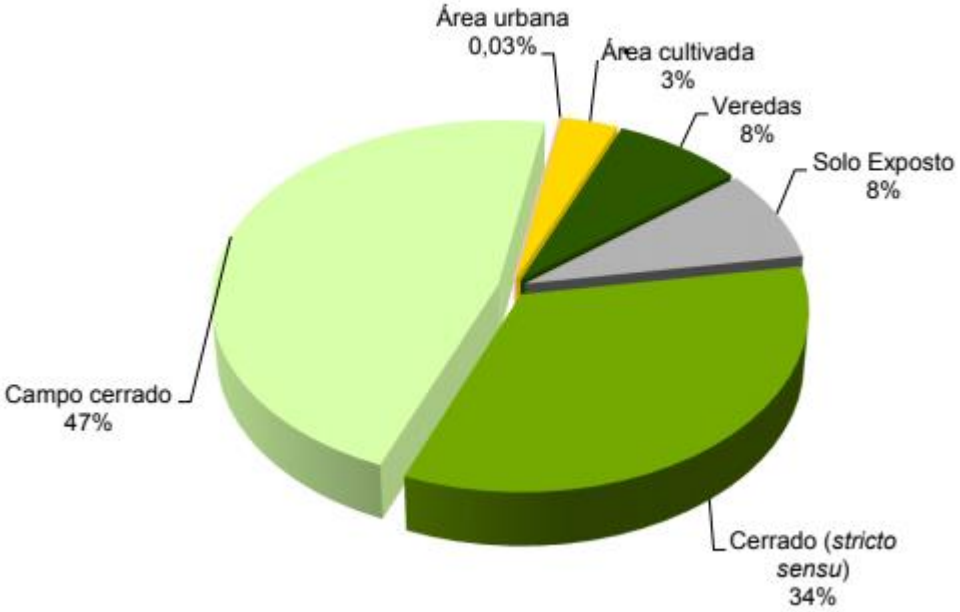
O mapeamento de uso e de cobertura do solo na bacia hidrográfica do Rio Pandeiros foi realizado por meio de classificação automática, supervisionada, das imagens Sentinel-2 no *software* QGIS. A classificação do uso e cobertura do solo foi baseada em 4 (quatro) etapas principais: i) Pré-processamento; ii) obtenção de amostras; iii) classificação; e iv) pós-processamento. Na etapa de pré-processamento, foi realizada a conferência geométrica e geográfica, o recorte para a área de interesse, o realce de contraste e a conversão para o sistema de coordenadas planas, Datum SIRGAS 2000, Zona 23 Sul.

No processo de obtenção de amostras, foi realizada a fotointerpretação da imagem, associando-a às fitofisionomias descritas no Mapa de Vegetação do Estado e, em seguida, escolhidas regiões na bacia hidrográfica referentes aos temas: corpo hídrico, solo exposto, área minerada, área cultivada, área urbanizada, pastagens e vegetação nativa. Após essa etapa, realizou-se a classificação utilizando o classificador por máxima verossimilhança. No pós-processamento, foi realizada a conversão de formatos (*raster* para *shape)* e a readequação de valores das classes classificadas em temas diferentes do fotointerpretado.

4.2 Resultados e discussão

Após a aplicação dos procedimentos metodológicos, foram identificadas as seguintes classes temáticas: Área urbana, Área cultivada, Campo cerrado, Cerrado *Stricto sensu*, Solo exposto e Veredas (Figura 8).

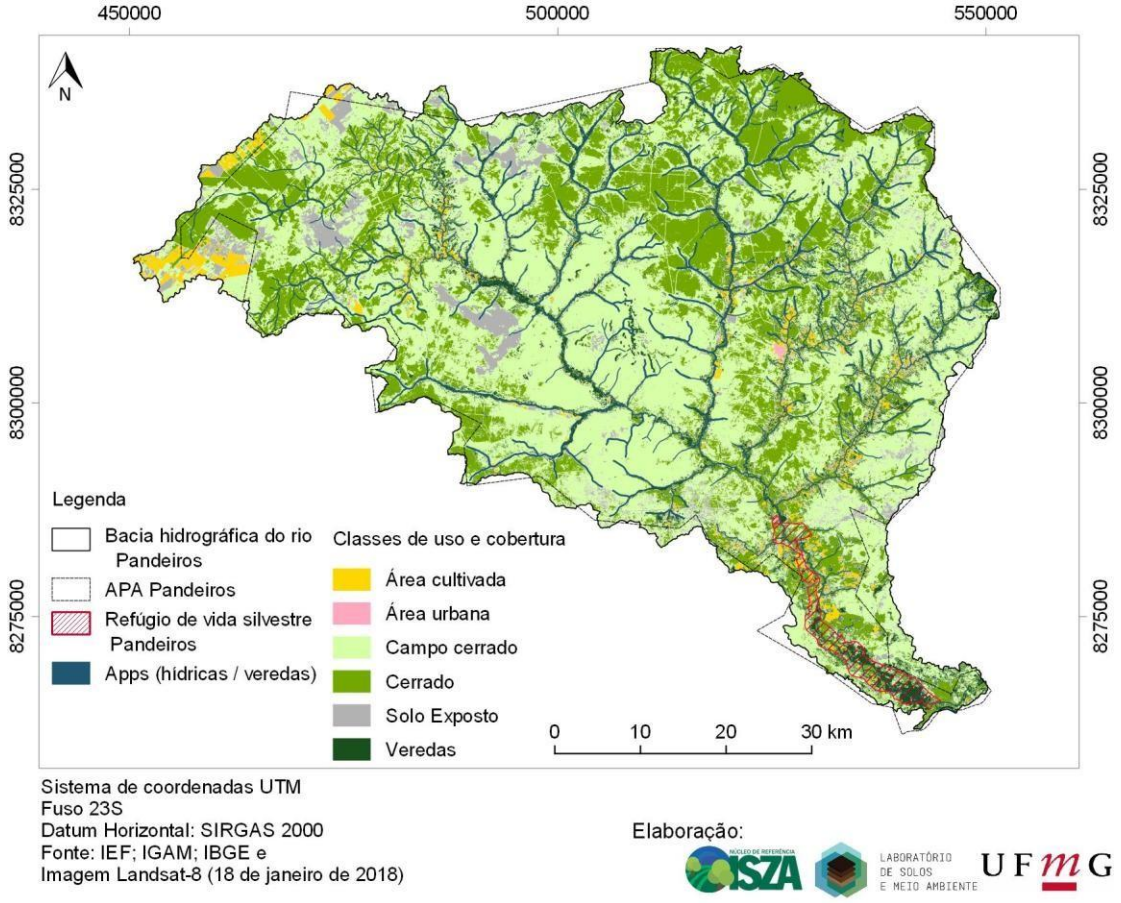
Figura 8 – Percentual de área ocupada por cada classe de uso e cobertura do solo na BHRP.



Os maiores percentuais de cobertura de vegetação nativa, como o cerrado *stricto sensu* (34%), o campo cerrado (47%) e as veredas (8%), ilustram o cenário de conservação da BHRP, quando comparadas com outras bacias do Estado, cuja antropização está em estágio mais avançado. Tal característica de preservação pode ser atribuída, além da limitação climática regional, à presença da APA Pandeiros, cujos limites geográficos se assemelham aos limites físicos naturais da BHRP (Figura 8). Isso indica que as restrições legais para a UC estão cumprindo o papel conservacionista de seu objetivo.

No entanto, é importante mencionar que, mesmo em menor expressão de área, quando comparadas com as demais classes de uso e cobertura, as áreas antropizadas, como a área urbana (0,03%), o solo exposto (8%) e áreas cultivadas (3%), também compõem a paisagem na bacia hidrográfica, conforme é possível observar na Figura 9.

Figura 9 – Mapa do uso e cobertura do solo e unidades de conservação presentes na BHRP.



Mesmo em condições de preservação, a presença de área cultivada nas proximidades, ou até mesmo dentro das regiões de veredas, principalmente nos terços superior e médio da bacia hidrográfica, devem ser mensuradas e monitoradas para que não avancem em termos de área. Destacando-se o fato de que, próximo à nascente do curso d'água principal, também há presença de solos expostos, os quais poderiam receber atenção para que os efeitos do arraste de partículas não cause o assoreamento de cursos d'água. A condição citada indica que há possíveis conflitos de uso e cobertura e/ou áreas de uso consolidado destinado às atividades antrópicas implantadas em áreas de restrição ambiental. Tais áreas são as APPs de cursos d'água, as nascentes e as

veredas, bem como a U.C. Estadual para refúgio da vida silvestre, com cerca de 20.403ha (5%) da BHRP, conforme apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 – Uso e cobertura do solo em áreas de restrição ambiental na BHRP – MG.

Classe de uso e cobertura	Área (ha)	%
Área cultivada	1.414	6,9
Campo cerrado	5.426	26,6
Cerrado	6.319	31,0
Solo Exposto	1.339	6,6
Veredas	5.905	28,9
Total	20.403	100

A Tabela 8 também evidencia o padrão conservacionista do uso e cobertura do solo nas áreas legalmente restritas na BHRP, indicando que aproximadamente 87% são referentes ao campo cerrado, ao cerrado *stricto sensu* e a veredas, cujas características é possível observar na Figura 10 (A, B e C). No entanto, o uso antrópico nestes locais (Figura 10D) não deixa de configurar um potencial conflito com impactos ao ecossistema.

Figura 10 – Exemplos de características de uso e cobertura do solo presentes na BHRP.

Fonte: Núcleo ISZA (IGC/UFMG)

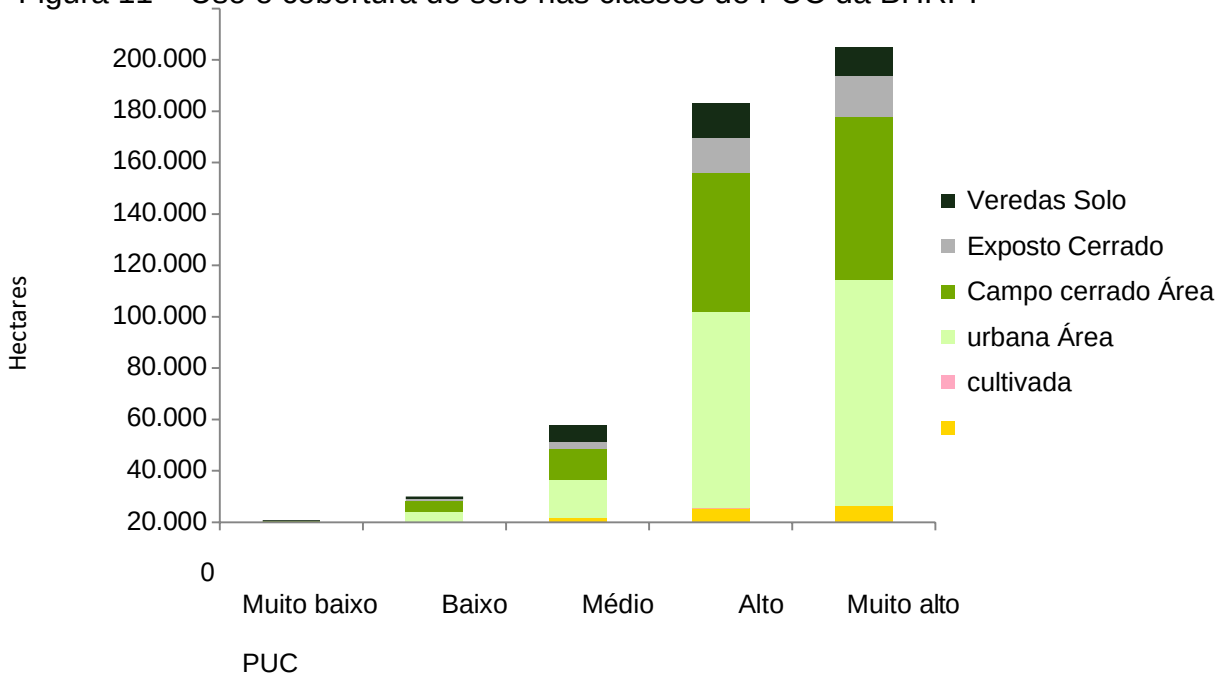
Além das questões ambientais e das condições do padrão natural da vegetação (Figura 10 A, B e D), a Figura 10 revela um exemplo de área antropizada com cultivos agrícolas. Nestes locais, as condições de solo (bem desenvolvidos, profundos e bem drenados), relevo (plano a suave ondulado) e litologia favorecem a recarga de aquífero, além de favorecerem que haja resistência natural a processos erosivos.

5. Interpretações gerais.

5.1 Composição do PUC de acordo com o uso e cobertura do solo

Dentre as maneiras de se interpretar os produtos do Zoneamento Ambiental e Produtivo, está o cruzamento entre os potenciais ambientais mapeados (PUC) e as classes de uso e cobertura do solo. Essas informações agregadas permitem avaliar, em primeiro momento, como está a composição de cada PUC, em termos de uso e cobertura (Figura 11).

Figura 11 – Uso e cobertura do solo nas classes de PUC da BHRP.



Analisando a Figura 11, é possível destacar que na classe de potencial muito alto (184.896 ha), o uso e cobertura predominante é o Campo cerrado (88.150 ha), seguido da classe de uso do tipo Cerrado (63.067 ha). No entanto, é nessa classe de potencial que também ocorre a maior expressão de área da classe de uso e cobertura do solo do tipo solo exposto (16.034 ha). Uma atenção especial deve ser destinada para essa situação, pois áreas descobertas podem comprometer a recarga hídrica e a resistência a processos erosivos.

Além do gráfico apresentado, a matriz PUC também permite compreender o cenário ambiental no qual está inserido a BHRP, bem como ajudar na gestão do território.

5.2 Matriz PUC

A Matriz PUC é uma forma de análise e avaliação do cenário ambiental de determinada bacia hidrográfica, por meio da combinação espacial do Potencial de Uso Conservacionista e do uso e cobertura do solo em determinados intervalos de tempo. É possível interpretá-la baseando-se nas perguntas: i) qual é o uso predominante do solo em determinado potencial? ii) qual é o PUC predominante em determinado uso e cobertura do solo? A resposta da primeira pergunta é obtida por meio da interpretação da coluna *versus* a linha e a resposta da segunda é obtida por meio da interpretação da linha *versus* a coluna.

No geral, a soma dos valores internos da matriz corresponderá ao valor percentual total da bacia estudada (100%) e permitirá obter informações tanto sobre os efeitos de ações preservacionistas e planos de adequação ambiental, quanto de efeitos de degradação e de impactos de ações antrópicas.

Ao avaliar a matriz PUC da BHRP, observa-se que não foi registrada a presença de uso e cobertura do tipo área cultivada em regiões de potencial muito baixo (que representam 0,2% da área de estudo) (Tabela 9) e isso é uma característica adequada para se manter.

Tabela 9 - Matriz PUC

Classe de uso e cobertura do solo (%)	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito alto	Percentual geral
Área cultivada	0,0	0,1	0,4	1,4	1,6	4
Área urbana	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,03
Campo cerrado	0,0	0,9	3,8	19,3	22,3	46
Cerrado	0,1	1,1	3,0	13,7	15,9	34
Solo Exposto	0,0	0,2	0,7	3,4	4,0	8
Veredas	0,0	0,3	1,6	3,4	2,8	8
Percentual geral	0,2	3	9	41	47	100

A título de exemplo, se daqui a 5 anos, for realizado um novo mapeamento de uso e cobertura do solo na área, e for verificada a presença de área cultivada nessa classe de potencial muito baixo, será um “conflito de potencial”, pela inviabilidade ambiental e econômica da área.

Verificou-se, nas áreas de potencial muito alto, predominância das áreas de Campo Cerrado (22,3%) e Cerrado *Stricto Sensu* (15,9%), cuja manutenção favorece a recarga hídrica e a manutenção da biodiversidade.

Ao utilizar a matriz PUC nessas condições, gestores ambientais, órgãos reguladores e demais interessados podem propor a proprietários rurais o pagamento

por serviços ambientais, incentivando-os a manterem essas formações florestais preservadas para garantir seus benefícios em longo prazo.

CONSIDERAÇÕES ZAP

O Zoneamento Ambiental e Produtivo se apresenta como uma importante ferramenta de gestão do território, na busca pela sustentabilidade ambiental e produtiva das bacias hidrográficas.

A metodologia, ao considerar as limitações e potencialidades do meio físico, as características de uso e cobertura do solo e a disponibilidade hídrica de bacias hidrográficas, possibilita uma análise integrada entre o uso e a capacidade de suporte dessa área, subsidiando as tomadas de decisão e instrumentalizando a bacia como unidade territorial de planejamento.

É importante considerar que o Zoneamento Ambiental e Produtivo é objeto de estudo de pesquisadores de diferentes áreas, assim, a ferramenta demonstra possibilidade de evoluir e ser atualizada.

PARTE 2 - Indicadores de Sustentabilidade em Agroecossistemas (ISA)

1. Introdução

Com o objetivo de impulsionar o desenvolvimento econômico, grande parte das tecnologias adotadas pelo setor agropecuário e florestal acabam promovendo uma desconexão entre os sistemas de produção e os ecossistemas naturais, e, por conseguinte, uma degradação dos recursos naturais, essenciais para a manutenção da capacidade produtiva desses sistemas. O atual desafio do setor compreende um duplo propósito: responder às demandas de uma população mundial crescente e, ao mesmo tempo, manter, ou mesmo, incrementar, as condições ecológicas para que os sistemas suportem eventuais impactos e mantenham a sua capacidade produtiva e de resiliência ao longo do tempo. Na medida que estas demandas crescem, a eficácia na utilização dos recursos naturais deve ser otimizada. A intensificação dos sistemas de produção, evitando abertura de novas áreas e aproveitando áreas já ocupadas, leva ao reforço de estruturas e de funções naturais evitando os processos de degradação, como a compactação do solo, a contaminação da água, etc. Sistemas mais integrados e diversificados demandam um grau de complexidade maior de gestão. Para tanto, são necessários instrumentos que possam auxiliar na aferição e monitoramento do desempenho ambiental e socioeconômico, tanto na escala de um estabelecimento rural, como também de uma sub-bacia hidrográfica, ou outras unidades territoriais (FERREIRA et al., 2018).

A integração e a interação das escalas de um estabelecimento rural e de uma sub-bacia hidrográfica podem resgatar o agricultor do seu isolamento e estabelecer uma linguagem compartilhada com os gestores de áreas-temas, como o social, o ambiental, o econômico, o tecnológico e o institucional. Representa, portanto, uma estratégia para o processo de planejamento, facilitando a identificação e priorização de ações conjuntas. O setor agropecuário já dispõe de instrumentos institucionalizados para este propósito: o Cadastro Ambiental Rural (CAR); o sistema “Indicadores de Sustentabilidade em Agroecossistemas” (ISA); o Zoneamento Ambiental e Produtivo (ZAP). Tais ferramentas servem de base para o planejamento e gestão territorial: o CAR e o ISA, na escala do estabelecimento rural e o ZAP, na de sub-bacia hidrográfica (FERREIRA et al., 2018).

2. Indicadores de Sustentabilidade em Agroecossistemas - ISA

O sistema de aferição do desempenho ambiental e socioeconômico de estabelecimentos rurais, desenvolvido pelo Estado de Minas Gerais, com potencial de adaptação para outros Estados e biomas, é constituído por um questionário com diversos parâmetros, que compõem um conjunto de 21 indicadores. Tem como objetivo, a partir dos dados gerados pela sua aplicação, detectar pontos críticos e propor medidas de correção do manejo produtivo, e identificar oportunidades de geração de renda e de melhoria no desempenho ambiental, social e econômico. Propõe também instrumentalizar o gestor público para auxiliar na formulação, execução, e monitoramento de políticas, planos e programas de incentivo à adoção de práticas para a conservação dos recursos naturais (FERREIRA et al., 2018).

O preenchimento do conjunto de indicadores é realizado a partir de uma entrevista com o produtor, do levantamento de dados gerados no CAR e da verificação no campo. São realizadas vistorias nos sistemas de produção agrossilvipastoris, o levantamento do estado de conservação dos habitats naturais, a coleta de amostras de solo, quando necessárias, e a avaliação do ecossistema aquático em dois segmentos de um corpo d'água, quando presente. A partir do preenchimento dos dados, são atribuídas automaticamente notas em todos os 21 indicadores, gerando também um relatório para a devolução dos dados ao produtor. Na própria planilha, pode ser elaborado um plano de adequação ambiental e socioeconômica, com metas de execução (FERREIRA et al., 2018). O sistema propõe uma abordagem da paisagem rural de forma integrada, na qual são incluídas as dimensões ambiental, social e econômica, identificadas as potencialidades, as limitações e as aptidões para usos e ocupações múltiplos, dentro de cada estabelecimento rural, gerando, no final, um plano elaborado em conjunto com o produtor, para adequação ambiental de seu empreendimento.

O ISA também permite aos gestores do CAR uma avaliação da efetividade do PRA elaborado para o empreendimento rural, integrado a outras propostas complementares, que podem estar contempladas num plano de adequação socioeconômico e ambiental. O sistema ISA, na medida em que atinge padrão

estatístico satisfatório para constituir amostras representativas de territórios, também pode servir de apoio ao processo de planejamento e de tomadas de decisão para gestores públicos, instituições e empresários, na escala de sub-bacias hidrográficas (FERREIRA et al., 2018).

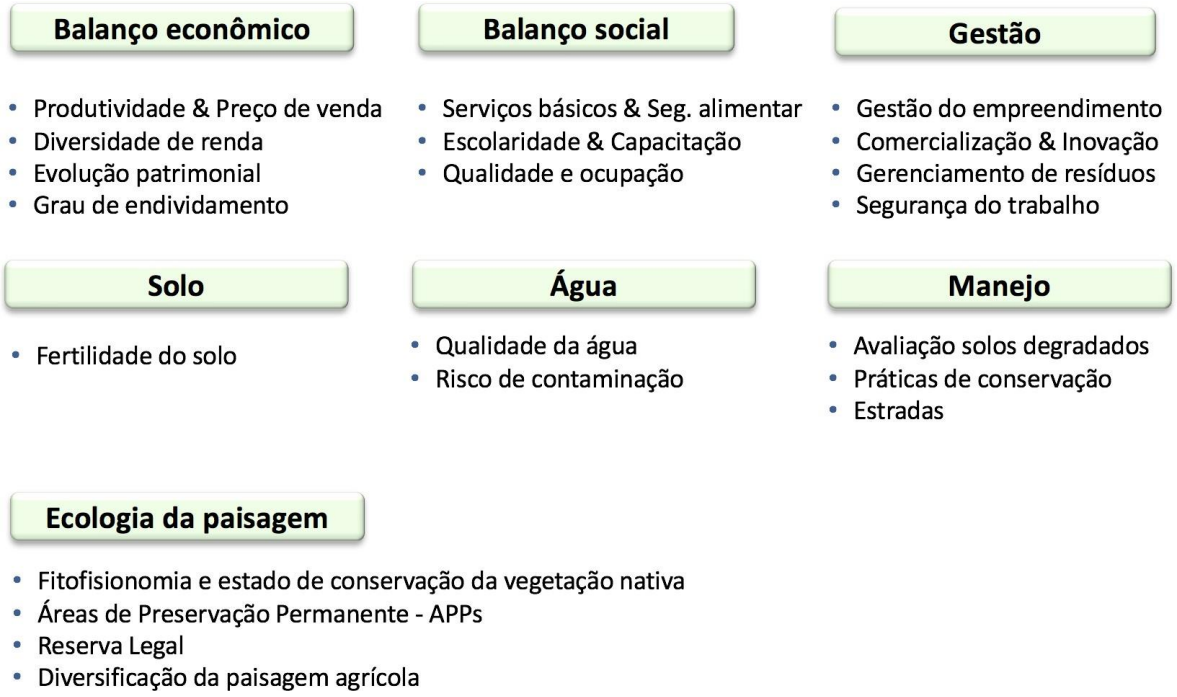
O sistema ISA foi elaborado a partir de um projeto de pesquisa multi-institucional, coordenado pela Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (Epamig) em parceria com a Empresa de Assistência Técnica e Extensão de Minas Gerais (Emater-MG), Instituto Estadual de Florestas (IEF), Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), e Fundação João Pinheiro, por meio de projetos financiados pela Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (Fapemig).

O sistema ISA utiliza uma planilha eletrônica para a entrada e processamento de dados, constituída por um questionário, indicadores, relatório, plano de adequação, guia de aplicação e um banco de dados (Figura 1)

Figura 1 – Abas da planilha ISA

O preenchimento do Questionário é realizado a partir de uma entrevista com o produtor rural, podendo contar com o auxílio de seus consultores ou responsáveis técnicos. Para os estabelecimentos rurais que já são assistidos, grande parte das informações contidas no questionário poderão ser levantadas diretamente com o técnico responsável. Os campos relativos ao uso e a ocupação do solo e dados sobre as APP’s e sobre a Reserva Legal poderão ser extraídos do croqui e das informações geradas no CAR. Se o produtor rural ainda não tiver o CAR, será necessário entrar no programa para obter essas informações. Os 21 Indicadores estão distribuídos em 7 sub-itens, conforme apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Indicadores



Foram estabelecidas matrizes de avaliação, de forma a ponderar, automaticamente, os indicadores e seus atributos (cada parâmetro, utilizado nos indicadores, contém ao lado um fator de ponderação, como o exemplo na Figura 3). Elas transformam o índice em uma função de valor, que o relaciona com o desempenho ambiental ou socioeconômico em uma escala de utilidade que varia de 0 a 1, calculado automaticamente a partir de fatores de ponderação, expressando três situações:

Situação ideal (valor 1,0);

Situação referente a linha de base ou limiar de sustentabilidade[1] (valor 0,7);

[1] Abaixo do valor geral 0,7 a propriedade estaria em uma situação indesejável ou inadequada.

Situação em que se encontra o produtor.

Figura 3 – Indicador gerenciamento de resíduos e efluentes

10 GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS E EFLUENTES GERADOS NO IMÓVEL RURAL

RESÍDUOS E EFLUENTES GERADOS NO IMÓVEL RURAL

10.1 - Destino do esgoto gerado nas residências **marque as opções com x**

Ausência de qualquer estrutura de coleta e tratamento de esgoto		0,00
Fossa rudimentar; fossa negra	x	0,25
Fossa indicada sem manutenção	x	0,35
Fossa indicada c/ manutenção adequada		0,75
Fossa com biodigestor; separação das águas cinzas		1,00

10.2 - Destino do lixo (doméstico e das atividades) **marque as opções com x**

Queimado/descartado em local inapropriado		0,00
Enterrado em local inapropriado		0,20
Enterrado em local indicado		0,60
Lixo levado pelo produtor	x	0,80
Lixo coletado		1,00

Deixar o campo em branco quando não houver geração de efluentes líquidos e/ou gasosos	Dados: (%)		Fator de ponderação
10.3 - Coleta e destinação adequada dos resíduos	80,0%		1,0
10.4 - Destinação adequada do esgoto doméstico	30,0%		1,0
10.5 - Compostagem e/ou reaproveitamento de **resíduos sólidos orgânicos**	80%		1,0
10.6 - Destinação adequada e tratamento de efluentes líquidos (gerados por criações ou unidades de beneficiamento) (Utilização dos efluentes tratados nos sistemas de produção)*.		Não se aplica	1,0
10.7 - Tratamento de efluentes gasosos (gerados em caldeiras, biodigestores, carvoaria).		Não se aplica	1,0

* Estação de tratamento; biodigestor; compostagem; etc.

Caso afirmativo marque a opção com x

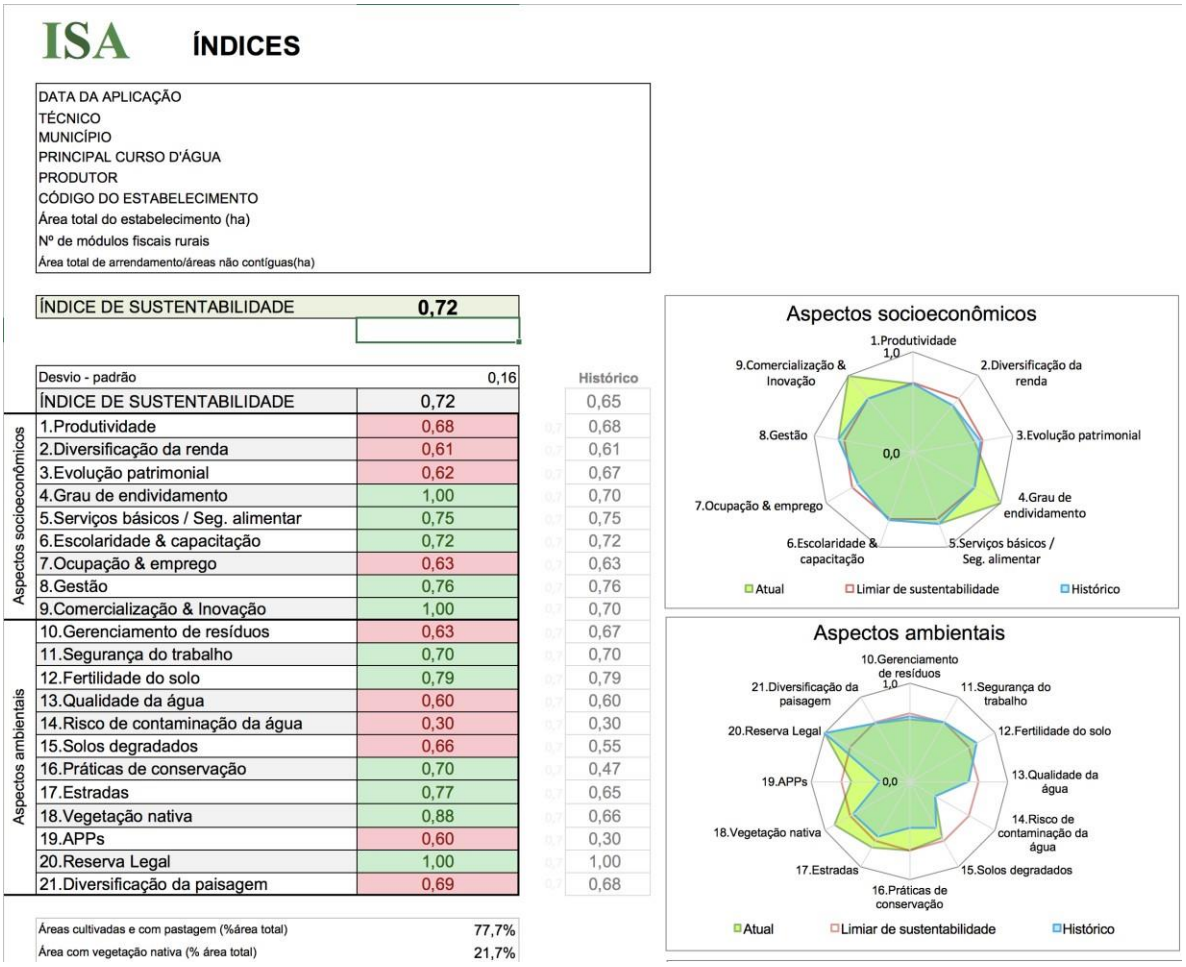
10.8 - O imóvel rural possui algum ponto crítico com relação à gestão de resíduos e efluentes	

Resultado	0,63

Adaptação APOIA-NovoRural (Rodrigues et al, 2003).

A restituição dos resultados é apresentada de uma forma simples e direta para os produtores (3ª aba – Relatório), contendo tabelas, gráficos, o índice geral, e um resumo das principais informações coletadas no estabelecimento rural (Figura 4).

Figura 4 - Relatório



ISA **ÍNDICES**

DATA DA APLICAÇÃO	
TÉCNICO	
MUNICÍPIO	
PRINCIPAL CURSO D'ÁGUA	
PRODUTOR	
CÓDIGO DO ESTABELECIMENTO	
Área total do estabelecimento (ha)	
Nº de módulos fiscais rurais	
Área total de arrendamento/áreas não contíguas(ha)	

ÍNDICE DE SUSTENTABILIDADE	0,72

			Histórico
	Desvio - padrão	0,16	
	ÍNDICE DE SUSTENTABILIDADE	0,72	0,65
Aspectos socioeconômicos	1.Produtividade	0,68	0,68
	2.Diversificação da renda	0,61	0,61
	3.Evolução patrimonial	0,62	0,67
	4.Grau de endividamento	1,00	0,70
	5.Serviços básicos / Seg. alimentar	0,75	0,75
	6.Escolaridade & capacitação	0,72	0,72
	7.Ocupação & emprego	0,63	0,63
	8.Gestão	0,76	0,76
	9.Comercialização & Inovação	1,00	0,70
Aspectos ambientais	10.Gerenciamento de resíduos	0,63	0,67
	11.Segurança do trabalho	0,70	0,70
	12.Fertilidade do solo	0,79	0,79
	13.Qualidade da água	0,60	0,60
	14.Risco de contaminação da água	0,30	0,30
	15.Solos degradados	0,66	0,55
	16.Práticas de conservação	0,70	0,47
	17.Estradas	0,77	0,65
	18.Vegetação nativa	0,88	0,66
	19.APPs	0,60	0,30
	20.Reserva Legal	1,00	1,00
	21.Diversificação da paisagem	0,69	0,68

Áreas cultivadas e com pastagem (%área total)	77,7%
Área com vegetação nativa (% área total)	21,7%

Mediante uma simples visualização gráfica, é possível observar onde estão as fortalezas e as fraquezas do estabelecimento rural. O resultado é interpretado pelo técnico e discutido com o produtor rural para a elaboração de um Plano de Adequação ambiental e socioeconômico do estabelecimento rural (Figura 5).

Figura 5 – Plano de adequação

ISA

PLANO DE ADEQUAÇÃO

PRODUTOR
MUNICÍPIO
DATA DA APLICAÇÃO

TÉCNICO / REGISTRO PROFISSIONAL

ITEM	Índ	PROPOSIÇÕES	Período de execuçã
10.Gerenciamento de resíduos	0,18	Implantar esterqueira para captação e distribuição de esterco líquido nas pastagens	Até 2017
11.Segurança do trabalho	0,47	Uso de produtos homeopáticos para controle de carrapato e mosca do chifre Uso de EPI para aplicação de produtos agrotóxicos nos animais	Imediato
17Estradas	0,55	Negociar, através da Associação da Mata do Paiou, reunião onde representante da sec. De agricultura e divisão de estradas rurais estejam presentes, expondo o problema e buscando solução	Imediato
15.Avaliação solos degradados	0,60	Utilizar a prática de ILP e ILPF para recuperação das pastagens de forma barata, produzindo volumoso para secas	Águas de 2016

Os dados e as informações gerados neste sistema podem auxiliar o produtor e o técnico no processo de planejamento e tomada de decisões, e promover uma análise mais ampla e integrada, indo além de avaliações pontuais, limitadas ao rendimento dos sistemas de produção ou observações de curto prazo. Os fatores de ponderação, fórmulas, gráficos e explanações sobre cada indicador estão acessíveis na 5ª aba (Guia de Aplicação).

A 6ª aba (Banco de Dados) contém uma base de informações sobre diversos produtos utilizados para o controle de pragas, doenças e plantas invasoras, visando facilitar o preenchimento do indicador sobre o risco de contaminação da água por agrotóxicos (Indicador 14).

Cada parâmetro, métrica e indicador, utilizados no sistema ISA, foi avaliado considerando o propósito (por quê estou avaliando, para que serve esta informação, e qual a sua importância para a elaboração de um plano de adequação ambiental e socioeconômica). As indagações ao produtor referem-se ao seu empreendimento: Qual é área do imóvel rural a ser avaliado? Como ele é ocupado? Quais são as principais atividades? O produtor exerce bem essas atividades? (Identificadas as principais atividades, quais as referências sobre produtividade e preço médio obtido na sua comercialização?); qual a aptidão de sua área? Quanto vale o seu empreendimento? (Identificação das principais limitações nas diversas unidades da paisagem, inventário, estimativa patrimonial); quais os principais entraves e potencialidades? (FERREIRA et al., 2018).

A partir de uma análise expedita, munido de informações que auxiliem na contextualização dos dados e na interpretação dos resultados, e buscando uma boa percepção do meio físico, é gerado um relatório para a devolução dos dados e elaborada uma proposta, conjuntamente com o produtor, para um plano de adequação de seu estabelecimento rural.

PARTE 3 - Integração ISA-ZAP

A partir do croqui gerado no CAR, o ISA visa aferir o balanço ambiental e socioeconômico de um estabelecimento rural, apontar pontos críticos e oportunidades, podendo auxiliar nas tomadas de decisão do produtor rural e no planejamento das suas atividades. A sua abordagem permite ao produtor adotar uma atitude mais proativa em relação à gestão ambiental, indo além do processo de regularização ambiental do seu imóvel rural. Já o ZAP aborda a sub-bacia hidrográfica e avalia, a partir de dados secundários, o uso do solo, identifica todos os cursos d'água, a disponibilidade hídrica e as outorgas e delimita as unidades de paisagem, identificando as áreas sensíveis e aquelas com maior potencial para a exploração agropecuária e florestal. A aplicação do sistema ISA constitui uma sequência lógica à elaboração do CAR, sendo uma relevante contribuição ao PRA e permite a necessária amostragem de propriedades rurais para o ZAP. O sistema ZAP situa-se na escala onde convergem a capacidade de análise do interesse público e a lógica privada de empreendimentos (FERREIRA et al., 2018).

O uso integrado desses instrumentos pode subsidiar a elaboração, a execução e o monitoramento de planos e de projetos, numa perspectiva local e regional. A identificação de interesses comuns e a concertação de ações corretivas e preventivas, envolvendo diversos atores, pode incluir, por exemplo, a pactuação e a negociação de contrapartidas entre produtores, que destinam áreas de seus estabelecimentos rurais para ações de conservação do solo e água, revitalização e recarga de mananciais, e empreendedores com interesse no uso desse recurso para múltiplos usos. Estabelecimentos rurais podem potencializar a regularização das vazões de cursos d'água, a recarga de aquíferos e, em especial, propiciar melhor aproveitamento das águas pluviais. A partir da maximização da infiltração e, por consequência, redução do escoamento superficial, garante-se o aumento do período de permanência das águas pluviais. Este potencial aproxima soluções rurais atuais e necessidades urbanas por uma melhor qualidade de vida (geração de energia e abastecimento de água à indústria, agroindústria, comércio, serviços e domicílios). Facilita também a priorização de ações no processo de planejamento estratégico na escala do estabelecimento rural, propiciando uma perspectiva mais ampla na interpretação da paisagem (FERREIRA et al., 2018).

Enfoques reducionistas têm prevalecido nessa área, com a aplicação de práticas em apenas alguns segmentos da paisagem, como no caso da proteção das matas ciliares visando evitar a erosão das margens e o assoreamento de corpos d'água. A gestão de recursos hídricos envolve a captação da água em todo o território, disponibilizando-a para futura descarga através das nascentes, evitando perdas por enxurradas e favorecendo a sua infiltração no solo (FERREIRA, 2012).

O meio urbano depende cada vez mais da produção de água do meio rural, pois normalmente as obras de engenharia nestes centros foram direcionadas para impermeabilizar o solo e drenar as águas pluviais. A interação entre os estabelecimentos rurais e o território onde os mesmos se inserem representa uma estratégia para o processo de planejamento dos mesmos, facilitando a identificação e priorização de ações conjuntas. Portanto, os sistemas ISA e ZAP podem ser considerados instrumentos de pactuação, que interessam aos empreendedores privados, organizações de Assistência Técnica e Extensão Rural (públicas, privadas e do terceiro setor), municípios e consórcios intermunicipais, comitês de bacias

hidrográficas e conselhos estaduais de recursos hídricos, agências promotoras de pagamentos por serviços ambientais, gestores de Unidades de Conservação e organizações territoriais fundiárias, sociais e culturais, entre outras. O gestor público, a partir dos dados gerados por estes instrumentos, pode elaborar políticas, planos e programas, atuando como indutor para que os produtores adotem boas práticas, com vistas à sustentabilidade dos seus sistemas de produção. Ao mesmo tempo, o ISA serve de instrumento de monitoramento para verificar a eficácia das políticas públicas em execução em um determinado território. A utilização de métricas padronizadas, inserindo a gestão de um estabelecimento rural num contexto maior, possibilita análises comparativas e facilita a interpretação dos dados gerados pela aplicação desses instrumentos (FERREIRA et al., 2018).

REFERÊNCIAS

COSTA, A.M.; HORTA, I.F.H.; SALIS, H.H.C.; VIANA, J.H.M.; CARVALHO, D.C.F. Zoneamento do potencial do uso conservacionista como alternativa às unidades de paisagem para a confecção do ZAP. In: VI Workshop Internacional sobre planejamento e desenvolvimento sustentável de bacias hidrográficas, 2017, Uberlândia. **Anais**.

COSTA, A. M. C.; VIANA, J. H. M.; EVANGELISTA, L. P.; CARVALHO, D. C.; PEDRAS, K. C.; HORTA, I. M. F.; SALIS, H. C.; PEREIRA, M. P. R.; SAMPAIO, J.D.L. **Ponderação de variáveis ambientais para a determinação do Potencial de Uso Conservacionista para o Estado de Minas Gerais**. Geografias, v 14. n.1, 2017. p. 118-134.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ)**. Súmula da 10ª. Reunião Técnica de Levantamento de Solos. Rio de Janeiro, 1979. 83p.

FERREIRA, J. M. L.; VIANA, J. H. M.; COSTA, A. M.; SOUSA, D. V.; FONTES, A. A. **Indicadores de Sustentabilidade em Agroecossistemas**. Informe Agropecuário, v. 33, n. 271, p. 12-25, nov./dez. 2012

FERREIRA, J. M. L.; FERNANDES, M. R.; SOUZA, E. R.; MAURY, P. Módulo 1: Indicadores de Sustentabilidade em Agroecossistemas - Introdução. Viçosa, MG: UFV, CEAD, 2018. Apostila do curso de Gestão Territorial. Disponível em: www.cead.ufv.br/portais/gestaoterritorialrural/. Acesso em: 06 out. 2018.

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS APLICADAS - IGA. **Áreas de Proteção Ambiental no Estado de Minas Gerais: demarcação e estudos para o pré zoneamento**

ecológico - APA Bacia do Rio Pandeiros. Belo Horizonte: IGA, 2006. (Relatório Técnico).

JAXA/METI. ALOS PALSAR WBI, 2010. Disponível em: <**https://www.asf.alaska.edu**>. Acesso em 26 Set 2017.

ALVARES, C.A., STAPE, J.L., SENTELHAS, P.C., GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G. 2013. **Köppen's climate classification map for Brazil**. MeteorologischeZeitschrift, v. 22, n. 6, p. 711-728.

PINTO C. P.; SILVA M. A. **Mapa Geológico do Estado de Minas Gerais**. CODEMIG/CPRM, 2014. Disponível em: <www.portaldageologia.com.br>. Acesso em:13 Set 2017.

SECRETARIA DO ESTADO DE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL/ SECRETARIA DE ESTADO DE AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO – SEMAD/SEAPA. **Metodologia para Elaboração do Zoneamento Ambiental Produtivo: ZAP de sub-bacias hidrográficas.** 2ª Edição, 2016. Disponível em: <http://www.meioambiente.mg.gov.br/images/stories/2016/ZAP/Metodologia_ZAP_-_2_edicao.pdf>. Acesso em 03 de Jun 2017.

SECRETARIA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE DE MINAS GERAIS – SISEMA.Zoneamento Ecológico Econômico de Minas Gerais (ZEE) - Disponível em: <http://geosisemanet.meioambiente.mg.gov.br/zee/>.Acesso em 01/12/2017.

QUANTUM GIS Development Team, 2017. QGIS Geographic Information System: Open Source Geospatial Foundation Project. Disponível em: <**www.qgis.org**>. Acesso em: 10 set. 2017.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA - UFV; UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS; FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE DE MINAS GERAIS. **Mapa de Solos do Estado de Minas Gerais**. Mapa col. 1: 600.000. Projeção Policônica, 2010.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Jaboticabal

POLUS
POLÍTICA DE USO DO SOLO

C E R T I F I C A D O

Certificamos que o ***Adriana Monteiro da Costa*** apresentou o artigo intitulado "Zoneamento Ambiental e Produtivo (ZAP) na gestão da bacia do Rio Pandeiros, MG", de autoria de Adriana Monteiro da Costa, Antônio Henrique Noronha Ribeiro, Maise Soares de Moura, Paula Karen Mota, Bárbara Janine Reis Silva Araújo, no **II Workshop Internacional de Política de Uso e Governança de Solo** realizado nos dias 11, 12 e 13 de novembro de 2019, no Centro de Energia Nuclear na Agricultura – CENA – Universidade de São Paulo – USP, na cidade de Piracicaba, Estado de São Paulo, Brasil.

Jaboticabal, 13 de novembro de 2019.

Profa. Dra. Teresa Cristina Tarlé Pissarra
Coordenadora – Grupo PolUS

CERTIFICADO DE APRSENTAÇÃO UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

LABORATÓRIO DE SOLOS E MEIO AMBIENTE

II Workshop Internacional de Política de Uso e Governança de Solo

UFMG

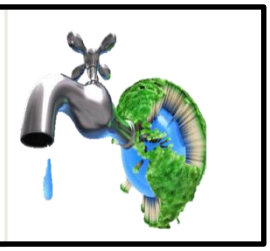
Zoneamento Ambiental e Produtivo (ZAP) na gestão da bacia do Rio Pandeiros, MG

Adriana Monteiro da Costa, Antônio Henrique Noronha Ribeiro, Maíse Soares de Moura, Paula Karen Mota, Bárbara Janine Reis Silva Araújo

Introdução

A escassez da água, assim como, as alterações em sua qualidade e quantidade, se apresentam como um crescente problema das bacias hidrográficas brasileiras. Sendo que, as bacias de menor ordem são comumente as primeiras a sentirem os impactos das atividades antrópicas.

- Recursos Hídricos X Desenvolvimento Sustentável
- Conflitos pelo uso da água



Potencial de Uso Conservacionista PUC

Uso e ocupação do solo

Disponibilidade Hídrica

Zoneamento Ambiental e Produtivo (ZAP)

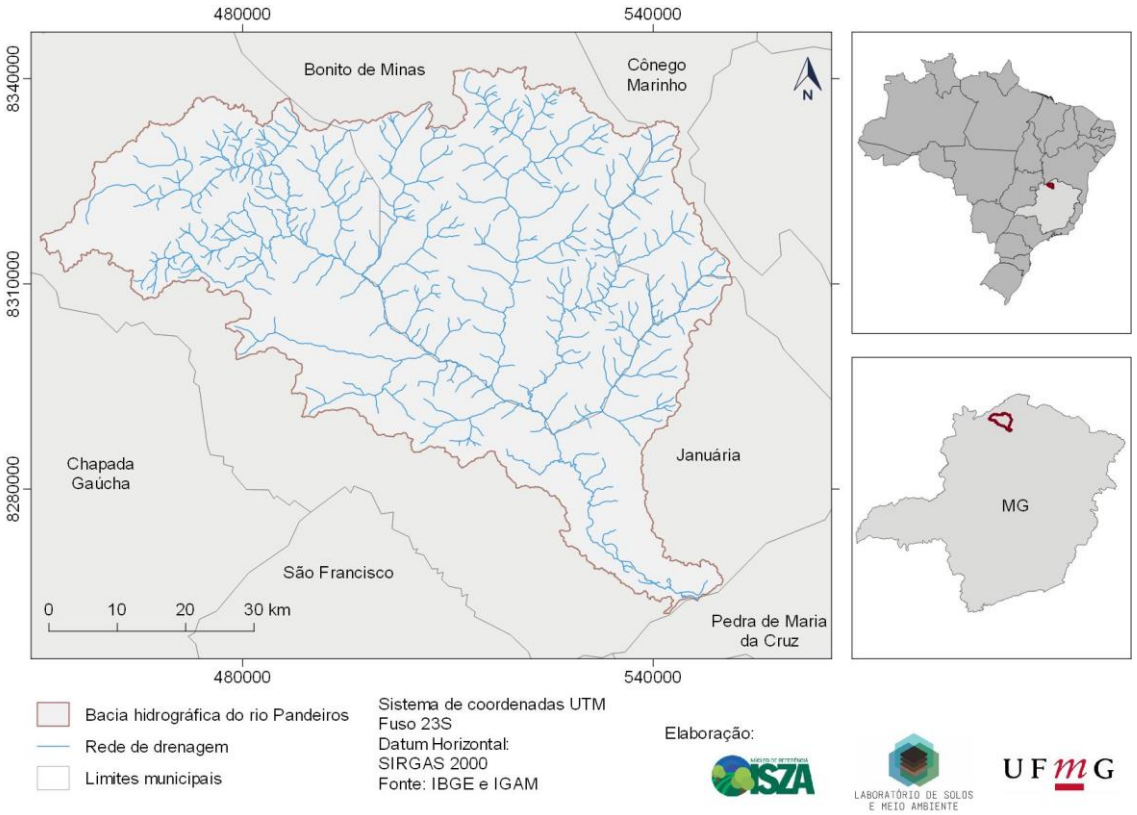
(SEMAD/SEAPA, 2016)

Material e Métodos

Bacia Hidrográfica do Rio Pandeiros, localizada na Bacia do Rio São Francisco, transformada em APA pela Lei 11.901 de 01/09/1995.

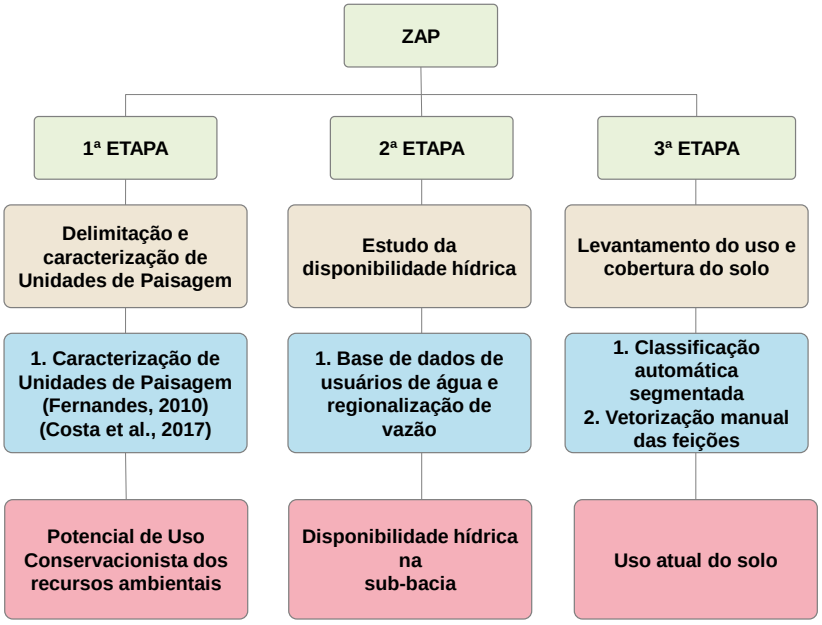
Compreende uma área de 396.028,30 ha e abriga o único pântano do Estado de Minas Gerais, que consiste em Refúgio da Vida Silvestre (Decreto nº 43.910, de 05 de novembro de 2004).

Figura 1: Localização da área de estudo



O ZAP envolve três grandes etapas: definição do Potencial de Uso Conservacionista, diagnóstico da disponibilidade hídrica da sub-bacia e levantamento do uso e ocupação do solo.

Figura 2: Etapas do Zoneamento Ambiental e Produtivo



Resultados e Discussão

Figura 3 - Potencial de Uso Conservacionista

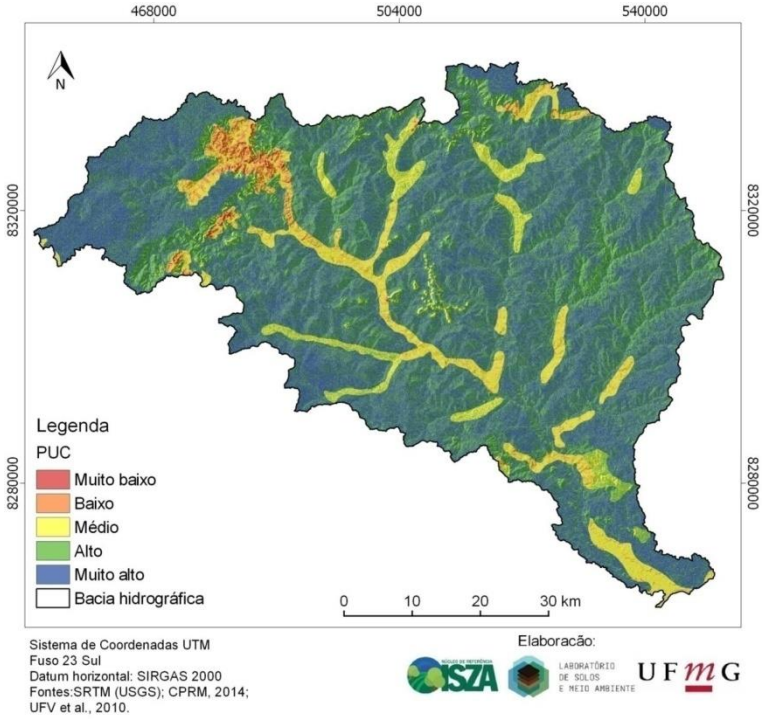


Figura 4 - Uso e ocupação do solo

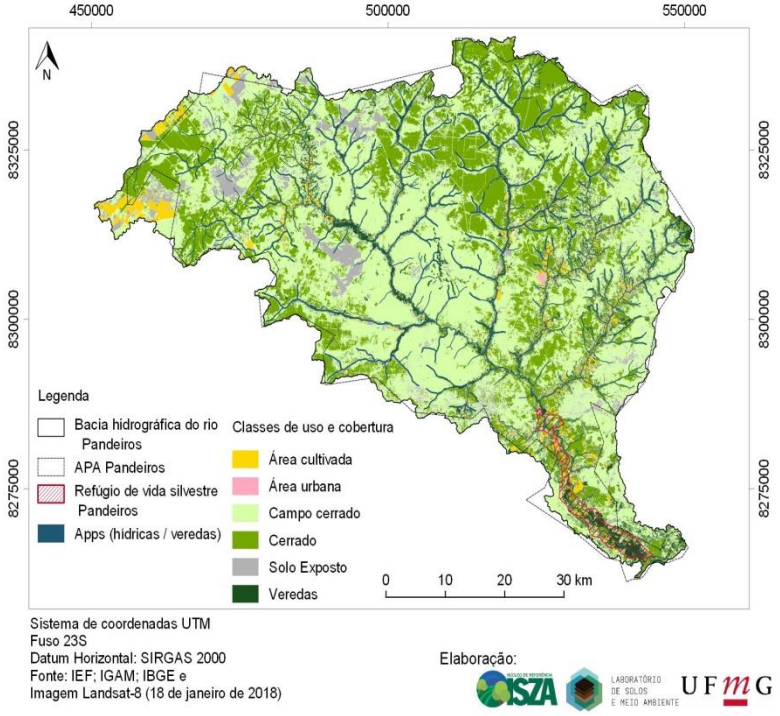
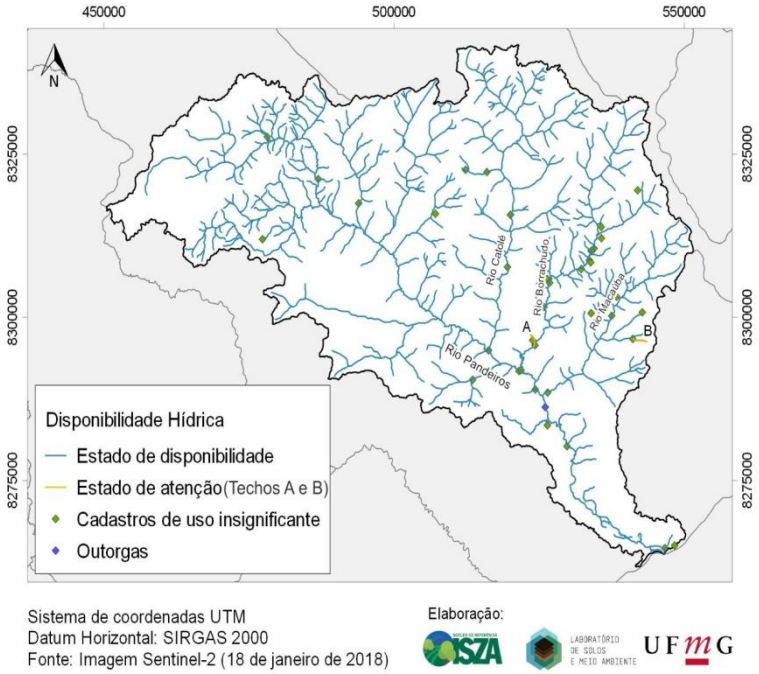


Figura 5 - Disponibilidade Hídrica



A área apresenta valores de PUC alto e muito alto (87,8%) (Figura 3) devido à dominância de relevo plano, solos profundos e bem drenados, que favorecem à infiltração e retenção de água nos solos, assim como à redução de processos erosivos. Menos de 3% da bacia está sob áreas com restrições de uso. Aproximadamente 87% da área é composta por campo cerrado, cerrado stricto sensu e veredas (Figura 4). Contudo apresenta áreas de solos exposto e cultivos que merecem práticas de manejo e conservação do solo adequadas. Com 39 pontos de captação de água superficial e com processos vigentes na bacia, não foram observados trechos de cursos d'água em estado de indisponibilidade hídrica e, apenas 2 trechos, em estado de atenção (Figura 5).

Conclusões

O ZAP permitiu a realização de um diagnóstico da bacia que pode subsidiar aos tomadores de decisões a elaboração de planos, projetos e programas que visem ações integradas para manutenção da sustentabilidade da bacia do Rio Pandeiros.

Agradecimentos

À FAPEMIG. Ao Laboratório de Solos e Meio Ambiente – IGC/UFMG. Ao Núcleo ISZA.

Bibliografia

COSTA, A. M. C.; VIANA, J. H. M.; EVANGELISTA, L. P.; CARVALHO, D. C.; PEDRAS, K. C.; HORTA, I. M. F.; SALIS, H. C.; PEREIRA, M. P. R.; SAMPAIO, J.D.L. Ponderação de

variáveis ambientais para a determinação do Potencial de Uso Conservacionista para o Estado de Minas Gerais. Geografias, v 14. n.1, 2017. p. 118-134.

SECRETARIA DO ESTADO DE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL/ SECRETARIA DE ESTADO DE AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO – SEMAD/SEAPA. Metodologia para Elaboração do Zoneamento Ambiental Produtivo: ZAP de sub-bacias hidrográficas. 2ª Edição, 2016.

water

MDPI

Article

An Improved Model for the Evaluation of Groundwater Recharge Based on the Concept of Conservative Use Potential: A Study in the River Pandeiros Watershed, Minas Gerais, Brazil

Marcelo Alvares Tenenwurcel 1, Maíse Soares de Moura 1, Adriana Monteiro da Costa 1 , Paula Karen Mota 1 , João Hebert Moreira Viana 2, Luís Filipe Sanches Fernandes 3 and Fernando António Leal Pacheco 4,*

[1] Federal University of Minas Gerais, 6620 Antônio Carlos Ave., Pampulha, Belo Horizonte, MG 31270-901, Brazil; m-alvares@hotmail.com (M.A.T.); maisedemoura2013@gmail.com (M.S.d.M.); drimonteiroc@yahoo.com.br (A.M.d.C.); paulakarenmota@gmail.com (P.K.M.)

[2] Brazilian Agricultural Research Corporation (Embrapa Maize and Sorghum), Sete Lagoas, MG 35701-97,
Brazil; joao.herbert@embrapa.br

[3] CITAB—Centre for the Research and Technology of Agro-Environment and Biological Science, University of Trás-os-Montes and Alto Douro, Quinta de Prados Ap. 1013, 5001-801 Vila Real, Portugal; lfilipe@utad.pt

[4] CQVR—Chemistry Research Centre, University of Trás-os-Montes and Alto Douro, Quinta de Prados
Ap. 1013, 5001-801 Vila Real, Portugal

* Correspondence: fpacheco@utad.pt

Received: 14 February 2020; Accepted: 28 March 2020; Published: 1 April 2020

Abstract: Water resources have been increasingly impacted due to the growth of water demand associated with environmental degradation. In this context, the mapping of groundwater recharge potential has become attractive to water managers as it can be used to direct public policies and conserve this natural asset. The present study modifies (improves) a spatially explicit model to determine groundwater recharge potential at the catchment scale, testing it in the Pandeiros River basin located in the state of Minas Gerais, Brazil. The model is generally based on the water balance approach and the input variables were compiled from institutional sources and processed in a Geographic Information System. The novelty brought by the aforementioned modification relates to the coupling of physical variables (conventional way) and land management practices (introduced here) in the estimation of a percolation factor. The role of land management practices for percolation was assessed by the so-called Conservative Use Potential (PUC) method, which classifies the areas of a river basin in terms of their potential for sustainable use. The results were validated by an independent method, namely the recession curve method based on the interpretation of hydrographs. In general, the groundwater recharge potential is favored in flat to gently undulating areas and forested regions, as well as where the landscape is characterized by well-structured soils, good drainage conditions and large hydraulic conductivity. The map of groundwater recharge potential produced in this study can be used by planners and decision makers in the Pandeiros River basin as a tool to achieve sustainable use of groundwater resources and the protection of recharge areas.

Keywords: groundwater recharge; water resources management; Conservative Use Potential; river basin; geographic information system; water balance

1. Introduction

Clean water resources are becoming scarcer due to the increasing demand for its use and to environmental degradation [1]. It has been estimated that 1/3 of all countries will have to adapt their productive processes by 2025 because water is lacking, and more than 3 billion people might be living in regions under chronic draughts or water stress [2–6]. Owing to its great importance for society, economy and the environment, it is necessary to properly manage water resources. The increasing degradation of surface water resources not only in Brazil but all over the world [7], makes the sustainable management of groundwater become an even more essential activity. In this context, a precise evaluation of groundwater distribution entails the understanding of aquifer refilling processes and the quantification of groundwater inputs. This quantification is called groundwater recharge estimation. In light of this challenge, studies and maps related to the provision of water resources are needed, with the purpose of indicating priority areas for conservation or restoration and to direct public policies to protect this natural resource. In Brazil, groundwater recharge studies that exist are predominantly focused on the river basin scale [8].

The incorrect management of river basins can generate serious threats to water availability, hindering surface and groundwater, because the dynamic of hydrologic systems is vulnerable to human actions [9,10]. An example is the reduced capacity for water infiltration into the soil observed in areas that are occupied with civil constructions or impermeable pavements [10,11]. Other problems, such as the intensification of erosion or floods, can occur in the development of soil permeability declines. In rural catchments, the inadequate uses of the land, among other factors, can amplify the risk of flood occurrence [12] reducing the levels of recharge.

Changes in the dynamics of hydrologic systems are particularly worrying in aquifer recharge zones, which are regions that enable water infiltration and percolation toward an aquifer system, which is defined as the geological system capable of storing and distributing a significant amount of water [13–15]. Moreover, recharge zones can be defined as areas where the soil surface favors the water infiltration and percolation [16,17]. Water can also be retained in the soil and slowly recharge the aquifer [13,18,19]. Some recharge zones are more efficient than others and for that reason are called preferential groundwater recharge zones [20]. The environmental protection of these special areas is important to conserve the quality and quantity of water resources. Thus, detailed information on the groundwater recharge process can aid better land use and cover distribution, and indicate the best areas for agricultural activities with the lowest groundwater contamination risks caused by the release of substances with high polluting potential, such as pesticides.

Despite the importance of sustainable management of aquifer recharge zones [7,21–23], in the state of Minas Gerais, Brazil, this topic has not yet been properly studied. Therefore, a better comprehension about the factors that affect groundwater recharge is necessary, as well as the mapping of recharge areas that consider the sustainable management potential of the basin. These evaluations should be robust and contain physical–environmental factors [10], such as soil characteristics, geology, vegetation cover, climate, and topography. When all these data are evaluated together, they allow for sustainable water use, meaning a use without compromising groundwater recharge [10]. Besides, under these circumstances the volume of water withdrawn from the aquifer system can be defined according to its natural capacity [24].

Numerous groundwater recharge estimation methods exist. However, they all entail some level of uncertainty [25]. In general, the practical and conceptual limitations of recharge estimation models occur because the available hydrological and hydrogeological data are sparse or fragmented, and because the spatial and temporal variations in recharge are significant [26]. This difficulty is significant for semi-arid areas [27], causing recharge estimations in these areas to be even more challenging. There are direct and indirect methods to evaluate the groundwater recharge potential. The direct methods include geological and geophysical explorations, gravimetrical and magnetic models, and perforation tests [10]. The indirect methods include hydrological and hydrogeological models [28,29], using geographical information systems (GIS) combined with field work [30,31]. Other studies have employed different methods to estimate groundwater recharge, which are comprised of tracer methods, water table fluctuation models, lysimeter methods and simple water balance techniques. Some of these studies have used numerical groundwater models or dynamically linked them to hydrological models to estimate recharge variations under different climate and land cover conditions [32–36]. For example, Döll (2008) modeled global groundwater recharge using the WaterGAP Global Hydrological Model

(WGHM), which has failed to reliably estimate recharge in semi-arid regions [37]. In that study, the influence of vegetation was not taken into account, even though many studies have showed the importance of this variable for estimating the groundwater recharge [32,38–42]. Moreover, Chowdhury et al. (2010) delineated groundwater recharge zones in West Medinipur district, India, using a GIS approach mixed with remote sensing and multi-criteria decision making techniques [22]. The input variables considered in that study were geomorphology, geology, drainage density, slope and aquifer transmissivity. In general, the choice of a method should consider the precision level needed, the project execution viability, and the available financial resources.

Among methods available in the literature, Costa et al. (2019) proposed one for the evaluation of groundwater recharge potential based on the water balance approach that considers climatic variables, water runoff, and the percolation of water into the soil profile [10]. The authors obtained results for mean annual recharge similar to those calculated by the hydrograph recession curve analysis, which has been used as a validation method. Furthermore, they identified areas with larger recharge potential and suggested management practices to improve groundwater recharge in those areas, making their study a valuable tool for the sustainable use of groundwater and protection of recharge areas [10].

Despite the positive results obtained by Costa et al. (2019), it is worth noting that the land management practices were a consequence of groundwater recharge assessments, not a contributing factor to groundwater recharge included in the model. Indeed, all parameters included in Costa's water balance model were physical, while land management practices had no role, regardless of their potential to dynamically affect groundwater recharge [10]. Thus, the coupling of physical factors and land management practices in a recharge estimation model could be a motivation (and a novelty) for a subsequent study. Before the publication of Costa et al. (2019), Costa et al. (2017) [43] conducted a study in Minas Gerais and developed a method based on multi criteria analysis, which was efficient to map a so-called Conservative Use Potential (PUC). The PUC method weights a considerably large number of variables considering their importance for sustainable land use, including several variables linked to land management practices, such as drainage, soil depth and fertility, erosion potential, and land capability. Hence, one possible route to realize our research motivation would encompass including the PUC, as determined by Costa et al. (2017) [43], within the framework of the Costa et al. (2019) groundwater recharge method [10].

The general purpose of this study is therefore to take that step forward and embed the concept of PUC in the groundwater recharge method of Costa et al. (2019) [10]. In that method, a parameter is defined to measure water percolation based on the soil's effective porosity and hydraulic conductivity. The method presented in this work replaces porosity by three parameters strongly influenced by management practices, which are soil texture, drainage, and profile depth. The replacement has the specific purpose to check whether this set of variables responds more effectively to land use changes than the original variable (porosity). The model was tested in the Pandeiros River Basin (PRB), Brazil, to generate a spatially explicit map of groundwater recharge potential, at regional scale (1:100.000). This map has the potential to subsidize indications of preferred areas for restoration, recovery, and protection, ensuring a more sustainable water resources management in this basin.

1. Materials and Methods

1.1. Study Area

The Pandeiros River basin (PRB) is located in the northern state of Minas Gerais, Brazil, and has an area of 396,028 ha, which encompasses part of Januária, Bonito de Minas, and Cônego Marinho municipalities (Figure 1). The climate of the region is predominantly dry with mean annual temperature of 24.6 °C, which occasionally reaches a maximum of 33 °C in October, and a minimum of 14 °C in

July [44]. Rainfall is concentrated in April to September, since the climate is semiarid, with mean annual rainfall of approximately 1,050 mm year [45–47]. The longest and largest tributaries of the Pandeiros River are the Catolé, Suçuarana, Borrachudo and Macaúbas streams.

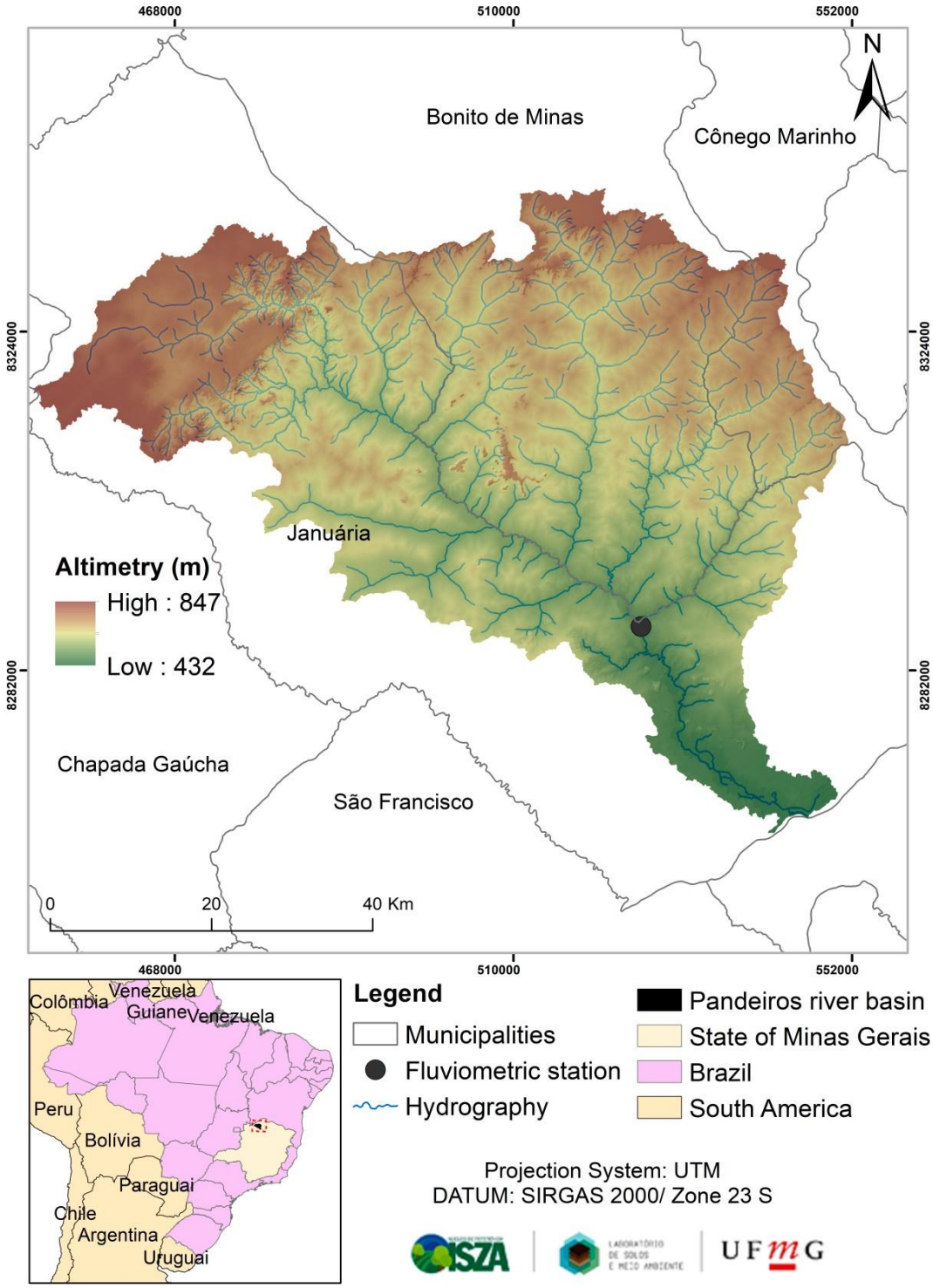


Figure 1. Location of the Pandeiros River basin in the state of Minas Gerais, Brazil.

According to the Brazilian Institute for Geography and Statistics (2018), the municipalities comprising the PRB have a total population of 86,311 inhabitants, most of them living in Januária. The largest part of this population live in rural areas, especially in the municipalities of Bonito de Minas and Cônego Marinho (Table 1) [48].

Table 1. Area and population living in the municipalities of Pandeiros River basin. Source: Brazilian Institute for Geography and Statistics. The population numbers refer to 2018.

Municipality	Total Area (ha)	Urban Population (2018)	Rural Population (2018)	Total Population (2018)
Januária	665,700	41,322	24,141	67,628
Bonito de Minas	390,200	2209	7464	11,088
Cônego Marinho	164,100	1915	5186	7595
Total	1,220,000	45,446	36,791	86,311

The PRB is in an area with transitional vegetation, presenting phytophysionomies of Cerrado and Caatinga biomes [49]. This ecotone is characterized by swamp regions that contain the springs of the São Francisco River. These springs are responsible for the reproduction of most fishes that live between the Três Marias (MG) and Sobradinho (BA) dams [50].

The relief is predominantly flat. The plain was formed by the filling of the São Francisco Depression with sediments that were sourced from the erosion of rocks from the São Francisco Plateau [51]. This process is also responsible for a small proportion of steep slope areas in the basin, as shown in Figure 2 and quantified in Table 2 [52].

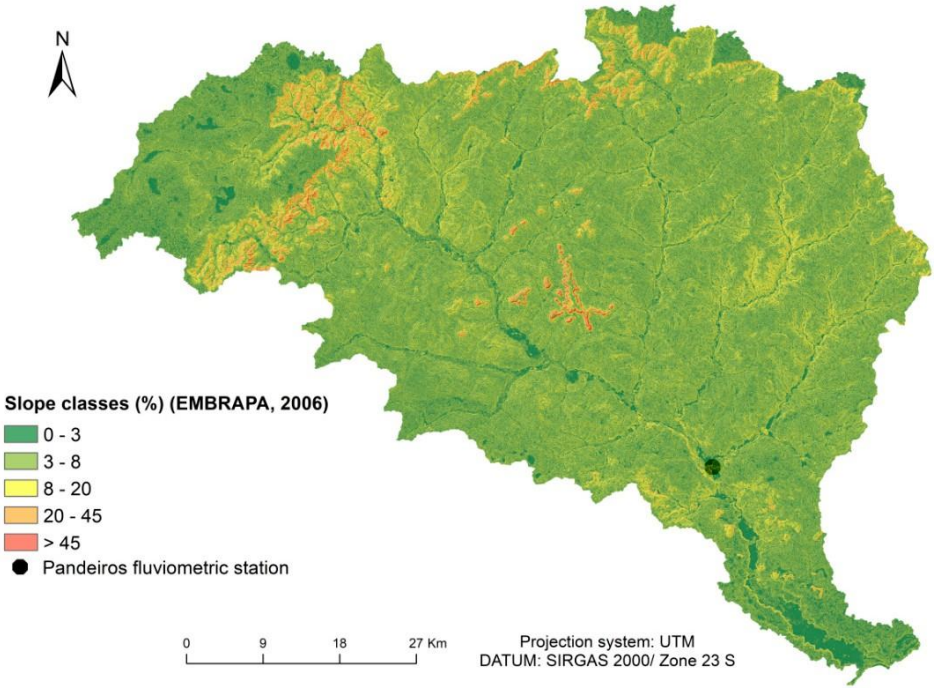


Figure 2. Slope map of the Pandeiros River basin.

Table 2. Area of slope classes in the Pandeiros River basin.

Slope (%)	Relief Type	Area (ha)	%
0 to 3	Plain	122.048,53	30.83
3 to 8	Slightly wavy	206.106,85	52.04
8 to 20	Wavy	59.179,5	14.94
20 to 45	Strongly wavy	7.806,56	1.97
Above 45	Mountainous to scarped	886,85	0.22
Total	396,028.29	100	100

As regards the local geology, there is the presence of alluvial deposits over the main drains in the area and in wetland regions (Veredas), which are the results of natural and anthropogenic erosion

processes with consequent transport and deposition of sediments. Figure 3 and Table 3 show the spatial distribution and proportion of lithotypes in the studied basin, respectively.

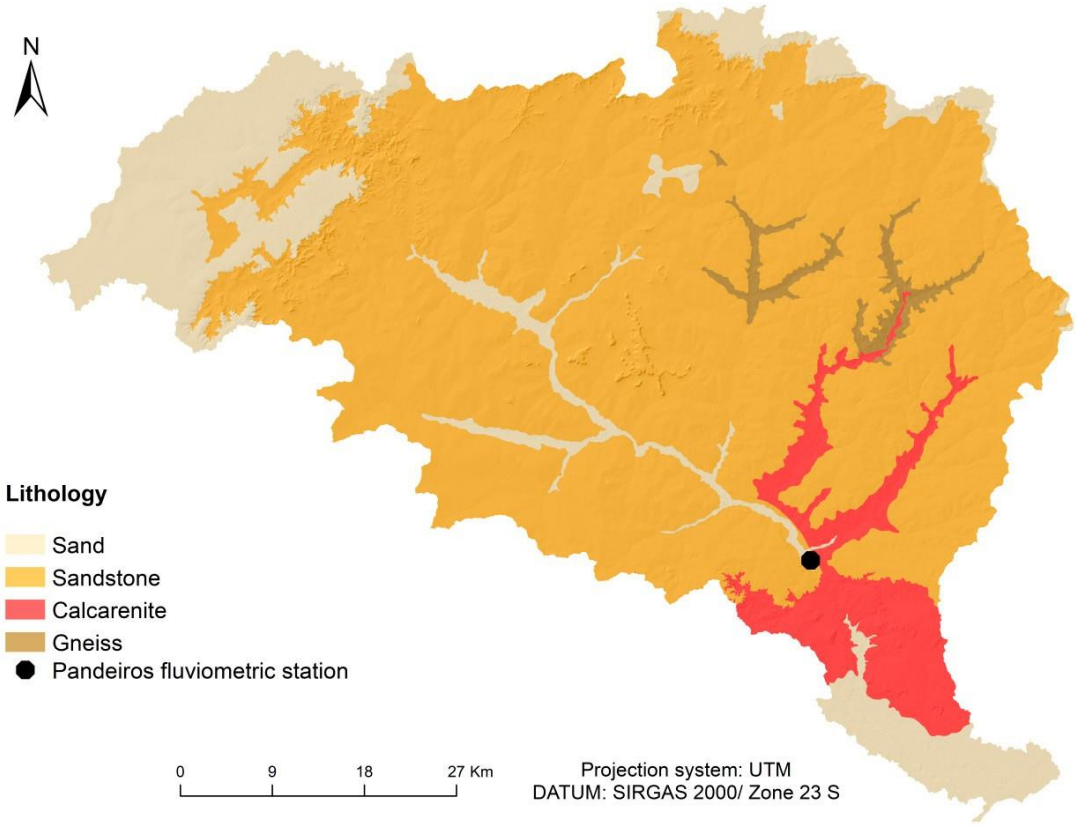


Figure 3. Lithological map of the Pandeiros River basin.

Table 3. Spatial distribution and proportion of lithotypes in the Pandeiros River basin.

Lithotype	Area (ha)	%
Sand	70,886.74	17.90
Sandstone	290,804.78	73.43
Calcarenite	27,570.98	6.96
Gneiss	6,765.81	1.71
Total	396,028.29	100

The Soil Map of Minas Gerais [53] presents an area predominantly composed of red–yellow latosols, which cover more than 87% of the hydrographic basin, followed by fluvic neosols (5.48%). The occurrence of quartzarenic neosols, litolic neosols, cambisols and melanic gleysols are related to much smaller areas (Figure 4 and Table 4).

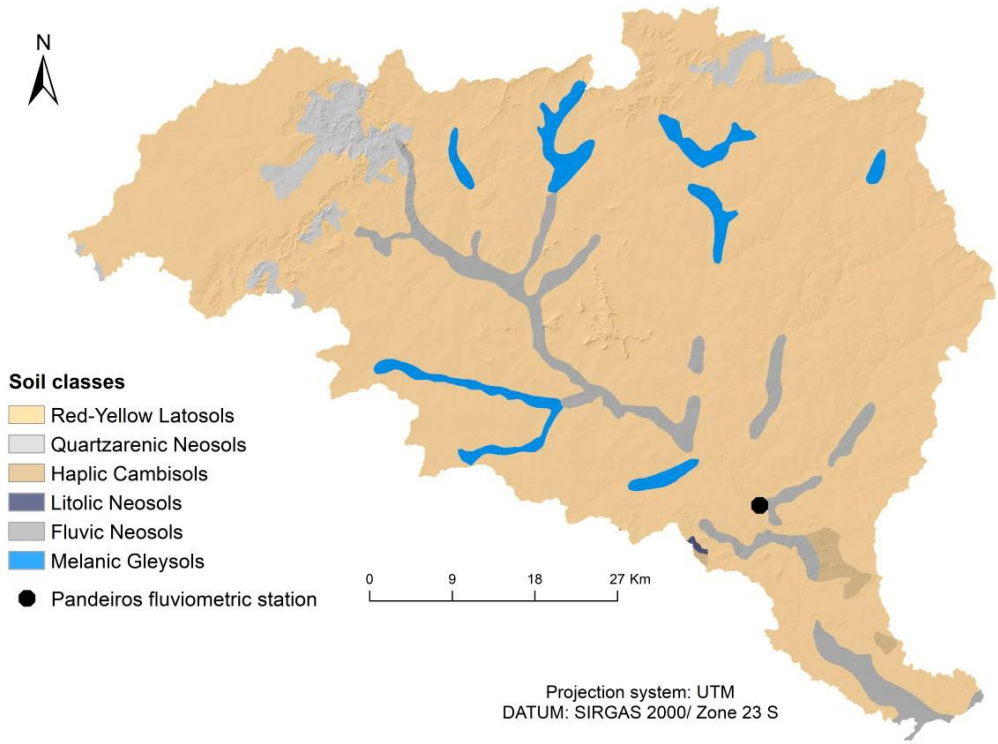


Figure 4. Soil map of the Pandeiros River basin.

Table 4. Spatial distribution and proportion of soil classes in the Pandeiros River basin.

Soil Classes	Area (ha)	%
Haplic cambisols	2,810.25	0.71
Melanic gleysols	11,856.63	2.99
Red–yellow latosols	346,549.01	87.51
Fluvic neosol	21,706.62	5.48
Litolic neosol	176.09	0.04
Quartzarenic neosol	12,929.70	3.26
Total	396,028.29	100

The spatial distribution of the land use and cover classes in the basin (Figure 5) shows the predominance of a typical Cerrado vegetation (savanna) of low to medium size [54], which is usually associated with the occurrence of latosols and sandstone regions. These are found mainly in the central part, towards the northern and northeast of the Pandeiros River basin. This phytophysiognomy covers 183,719.88 ha in the basin, representing 46.3% of its area (Table 5). The second most significant land use and cover class in the study area is the dense Cerrado (21.5%), followed by the sparse Cerrado (10.42%).

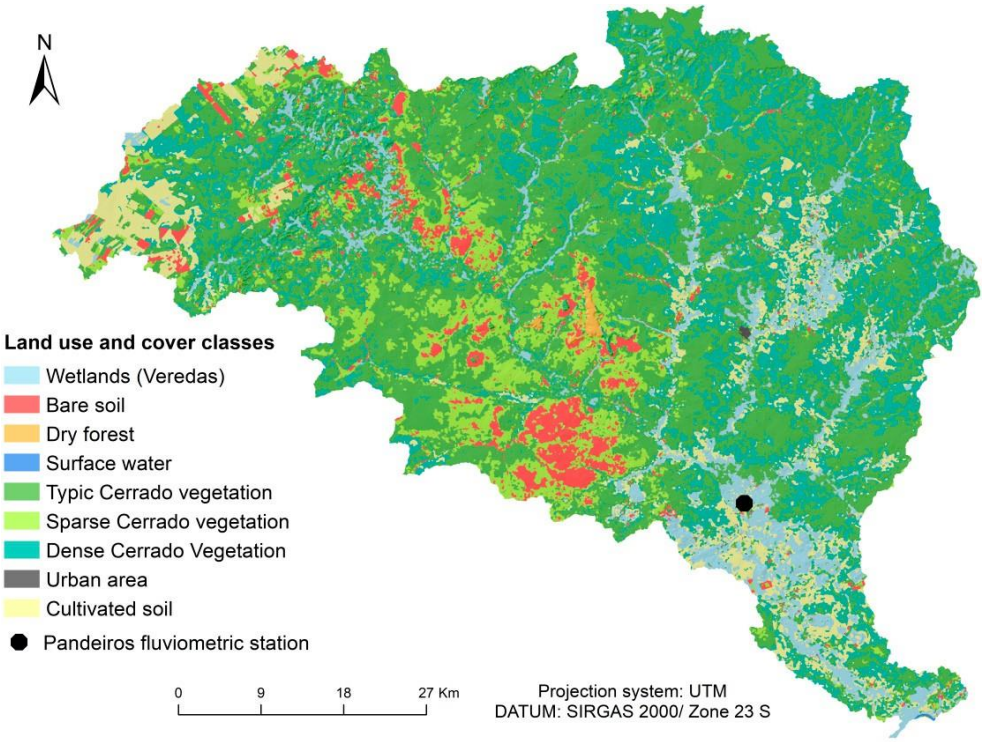


Figure 5. Land use and cover map of the study area, Pandeiros River basin.

Table 5. Spatial distribution and proportion of the land use and cover classes in the Pandeiros River basin.

Class	Area	%
Cultivated soil	33,138.21	8.37
Urban area	121.19	0.03
Dense Cerrado vegetation	85,203.09	21.51
Sparse Cerrado vegetation	41,246.36	10.42
Typical Cerrado vegetation	183,719.88	46.39
Surface water	70.08	0.02
Dry forest	1,102.50	0.28
Bare soil	18,351.75	4.63
Wetland regions (Veredas)	33,075.23	8.35
Total	396,028.29	100

1.2. Material

The materials used in this study (Table 6) consisted of (i) a digital elevation model (ALOS PALSAR), with a spatial resolution of 12.5 meters; (ii) a land use and cover map (scale of 1: 25.000); (iii) the soil map of Minas Gerais state (scale of 1: 600.000); (iv) values of groundwater recharge calculated by the PUC method and the hydraulic conductivity of each soil class in the basin; (v) rainfall and evapotranspiration data from meteorological stations located in municipalities near the basin; and vi) flow data records from the station code 45,250,000 located near the mouth of the Pandeiros River.

Table 6. Material used in the groundwater recharge evaluations.

Data Type	Use in the Work	Web Site Page
Digital elevation model	Calculation of slope length and steepness factor	https://www.asf.alaska.edu
Land use and cover map	Calculation of RF, the runoff factor	https://www.earthexplorer.usgs.gov/
Soil map	Calculation of PF, the percolation factor	https://www.dps.ufv.br
Rainfall and evapotranspiration data	Calculation of recharge potential	https://www.inmet.gov.br
Streamflow data	Validation of recharge potential data (analysis of hydrograph recession curve)	https://www.snirh.gov.br/hidroweb

1.3. Methodology

The spatially explicit groundwater recharge potential in the Pandeiros River basin was evaluated using the methodology proposed by Costa et al. (2019) [10], with the adjustments described below. The workflow was divided into 5 main steps: (i) acquisition of a land use and cover map, digital elevation model, soil type map, and climate data (rainfall and evapotranspiration); (ii) calculation of surface runoff using the slope length and steepness factor, and runoff coefficients for the land use and cover types; (iii) calculation of water percolation based on the PUC method [43] (replacing the effective porosity of Costa's approach and representing the proposed methodological improvement) and adapted hydraulic conductivity values with fuzzy logic [55,56]; (iv) calculation of groundwater recharge in different points of the basin and a mean value for the whole basin, using a geographical information system; (v) validation of results by comparing the previously calculated mean groundwater recharge with the value estimated by the hydrograph recession curve analysis (Figure 6).

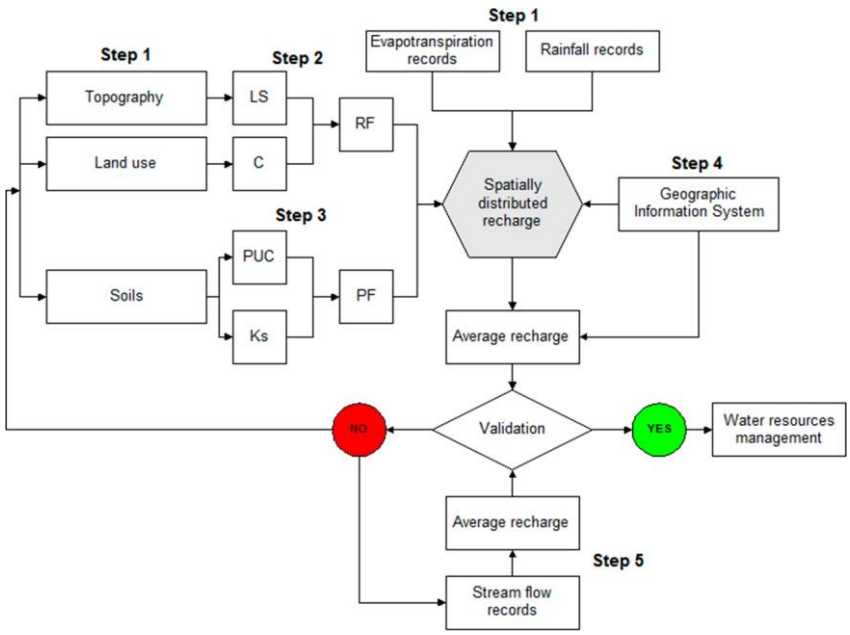


Figure 6. Flowchart for the groundwater recharge potential calculation and model validation. Adapted from Costa et al. (2019) [10]. Abbreviations: LS—slope length and steepness factor [57]; C—runoff coefficient (Table 7); RF—runoff factor (Equation (1)); PUC—Conservative Use Potential [43]; Ks—soils' hydraulic conductivity (Table 8); PF—water percolation factor (Equation (2)).

In the first step, the mean annual rainfall and evapotranspiration of municipalities near the study area were estimated using data from the Brazilian Institute for Meteorology (INMET) relative to the 2009–2018 period, which were obtained from meteorological stations in Arinos (MG), Januária (MG), Montes Claros (MG), Salinas (MG), Cariranha (BA), Espinosa (MG), Formoso (MG), Posses (GO), and Brasília (DF). Longer temporal series would be more adequate for estimating groundwater recharge. However, these records were not available. The flaws in the temporal series were resolved by using the regional weighting method, and the information was interpolated through inverse distance weighting (IDW) raised to the power of two [58]. This method was used because it raises the importance of closer stations in the interpolation. The data were spatialized and trimmed up to the study area limits.

In the second step, the land use and cover map and the topographical information from the digital elevation model (slope length and steepness factor—LS factor) were used to calculate the surface runoff factor, based on the method proposed by Böhner and Selige (2002) [59]. The runoff factor was calculated according to Equation (1), reproduced from Costa et al. 2019 [10].

$$RF = 1 - (C + LS_{FUZZY}) \quad (1)$$

where RF is the runoff factor (dimensionless); C is the runoff coefficient (dimensionless values adopted from Table 7); LS_{FUZZY} is the slope length and steepness factor estimated using the method of Desmet and Govers (1996) [57], but recast to the 0–1 range using a fuzzy logic algorithm (the steeper the slope the closer to 1).

Table 7. Runoff coefficients for each land use and cover class in the Pandeiros River basin. Adapted from the ASCE—American Society of Civil Engineers, 1969, and Costa et al., 2019 [10,60].

Land and Cover Class	Runoff Coefficient
Anthropized areas	0.50
Urban areas	0.85
Forest formation	0.10
Exposed soil and ground vegetation	0.60
Wetland regions ("Veredas")	0.09

In the third step, the water percolation was calculated considering the soil classes in the basin [53]. A systematic literature review was performed to set up hydraulic conductivity values for each soil class, at the second category level of Brazilian soil classification system (SiBCS) [61]. The hydraulic conductivity values were established according to Freire et al. (2003), Costa et al. (2019), Pedron (2011) and Amaral (2017) [10,55,56,62].

Table 8. Soil classes and respective Ks_{Fuzzy} values. The scores of groundwater recharge parameter were set up by the PUC method in the Pandeiros River basin [10,55,56,62].

Soil Class	PUC Score	Ks_{fuzzy}
Haplic cambisols	0.4	0.3
Melanic gleysols	0.1	0.01
Red–yellow latosols	0.7	1
Fluvic neosols	0.3	0.02
Litolic neosols	0.3	0.06
Quartzarenic neosols	0.3	0.61

Different from the method proposed by Costa et al. (2019) [10], the water percolation factor in this model was calculated using the groundwater recharge category of the PUC method, developed by Costa et al. (2017) [43]. The PUC is a method that allows for mapping areas of a basin based on their limitations and potentialities for conservationist land use, through the combined assessment and weighting of several environmental variables (soils, geology, and geomorphology) [43].

The PUC assigns values from 1 to 5 to the different classes of lithology, slope and soil in the watersheds from the state of Minas Gerais, Brazil. The analyses are focused on groundwater recharge, agricultural use potential and soil resistance to erosion in the catchments [43]. For the identification of lithologies, slopes and soil classes existing in Minas Gerais, the available official databases are used.

The attribution of grades for the different types of lithologies took into consideration their potential to provide nutrients (greater weight for rocks with higher absolute content of essential macro elements to plants) and their susceptibility to weathering processes (considering the main mineral constituents and scored according to their resistance to weathering, based on Goldish's stability [63]). Regarding the slope parameter, the same weights were attributed for groundwater recharge potential for agricultural use and resistance to erosion. For groundwater recharge, it was considered that the slope has a direct relationship with the flow velocity and the opportunity time for water infiltration. The higher the slope, the higher the water velocity and the shorter the time for water infiltration. In this context, the mountainous relief received a weight 1 and the flat relief a weight 5.

For the attribution of grades to different soils, the variables texture, drainage, effective depth and fertility were considered. For groundwater recharge, the attribute fertility was disregarded and the classes of soils characterized as favorable to water infiltration and percolation received greater weight.

The recharging potential for each soil type was obtained by the simple average of the values of texture, drainage and effective depth, normalized so that the final scale was in the range of 1 to 5.
In this work, only the soil parameter of groundwater recharge was used, which assigns the basin´s soil classes a score from 1 to 5. This parameter takes into account the effective depth, texture and drainage of each soil class at the first category level of SiBCS [61]. Thus, to the soil that presents considerable effective depth, satisfactory drainage and texture favorable to infiltration, a higher score regarding groundwater recharge is attributed.
However, in order to adapt the PUC method to the recharge model, a rescaling process was implemented, whereby the ratings from 1 to 5 were recast to the range 0 to 1. The values used in the model are represented in Table 8. The percolation factor was evaluated using Equation (2), reproduced from Costa et al. 2019 [10]:

$$PF = PUC \times Ks_{FUZZY} \quad (2)$$

where PF is the water percolation factor (dimensionless); Ks_{FUZZY} (dimensionless) is the soil's hydraulic conductivity fitted to the 0 to 1 range by the fuzzy logic algorithm (the higher the soil's hydraulic conductivity in the class the closer to 1); PUC are the scores of groundwater recharge set up by the PUC method but fitted to the 0 to 1 range.
In the fourth step, the groundwater recharge potential was calculated for each point in the basin, using Equation (3), according to Costa et al. 2019 [10]:

$$RPot = [(P - ET_R) \times RF \times PF] \times 10 \quad (3)$$

where $RPot$ is the groundwater recharge potential ($m^3\ ha^{-1}\ year^{-1}$); P is the mean annual rainfall depth ($mm\ year^{-1}$); ET_R is the mean evapotranspiration ($mm\ year^{-1}$); RF is the surface runoff factor; and PF is the water percolation factor.
The results were validated in the fifth step through comparison of the calculated mean groundwater recharge with a homologous median value estimated by the hydrograph recession method based on the Maillet equation [64,65]. The hydrograph for the Pandeiros River was drawn from daily average stream flow data measured at the hydrometric station nº 4425000 located in the Pandeiros River mouth (Pandeiros River Dam), compiled from the Hidroweb portal [66]. Streamflow data from 2013 to 2018 were the most recent and more continuous in the historical series, showing no flaws or absent data. Thus, these data were used to calculate the Maillet equation (Equation (4)). To separate and analyze the recession curve and the recession days, the methodology proposed by Barnes (1939), Dewandel et al. (2003) and Kovacs et al. (2005) was used [64,65,67–69]:

$$Q_T = Q_0 \times e^{-\alpha t} \quad (4)$$

where Q_T is the flow at time t ($m^3\ s^{-1}$); Q_0 is the flow at the beginning of a recession ($m^3\ s^{-1}$); α is the coefficient of recession; t is the time (days); and e is the basis of Neperian logarithm (2.71828).
Thus, the coefficient of recession can be determined numerically, based on the logarithmic form of Equation (4), represented and rearranged in Equation (5):

$$\alpha = \frac{LogQ_0 - LogQ_t}{0.4343t} \quad (5)$$

Subsequently, the groundwater recharge volume was calculated using Equation (6):

$$V = \frac{Q_0 \times t'}{\alpha} \quad (6)$$

where V is the recharge volume (m^3); Q_0 is the flow at the beginning of recession ($m^3\ s^{-1}$); t' is the converter of the t unit (days into seconds; 86,400); α is the coefficient of recession (dimensionless).

The constant of recession (α; Equation (5)) is dependent on the aquifer characteristics and therefore should not vary significantly from year to year. On a Q versus t plot (hydrograph), where the Q values are represented in logarithmic scale and the values are in linear scale, the baseflow within a hydrologic year (from the recharge period to the end of recession) should define as a straight line, the slope to which is related in terms of α. If t_{cycle} is the time of a log cycle for discharge, meaning the time for discharge to change from 1 to 10 m^3/s, from 10 to 100 m^3/s, and so forth, then $LogQ_0 - LogQ_t = 1$ and $\alpha = 1/(0.4343t_{cycle})$. This simplified representation of Equation (5) is frequently used in the calculation of α and will be adopted in the present study. Conversely, the values of Q_0 can vary in response to the annual variations of precipitation. In this case, a value of Q_0 should be calculated for each hydrologic year, while mean ± standard deviation values are derived therefrom.

2. Results

The interpolation of precipitation data from 2009 to 2018, obtained from climatologic stations close to the Pandeiros River basin, showed mean rainfall depths ranging from 904.7 to 1056.3 mm $year^{-1}$ (Figure 7).

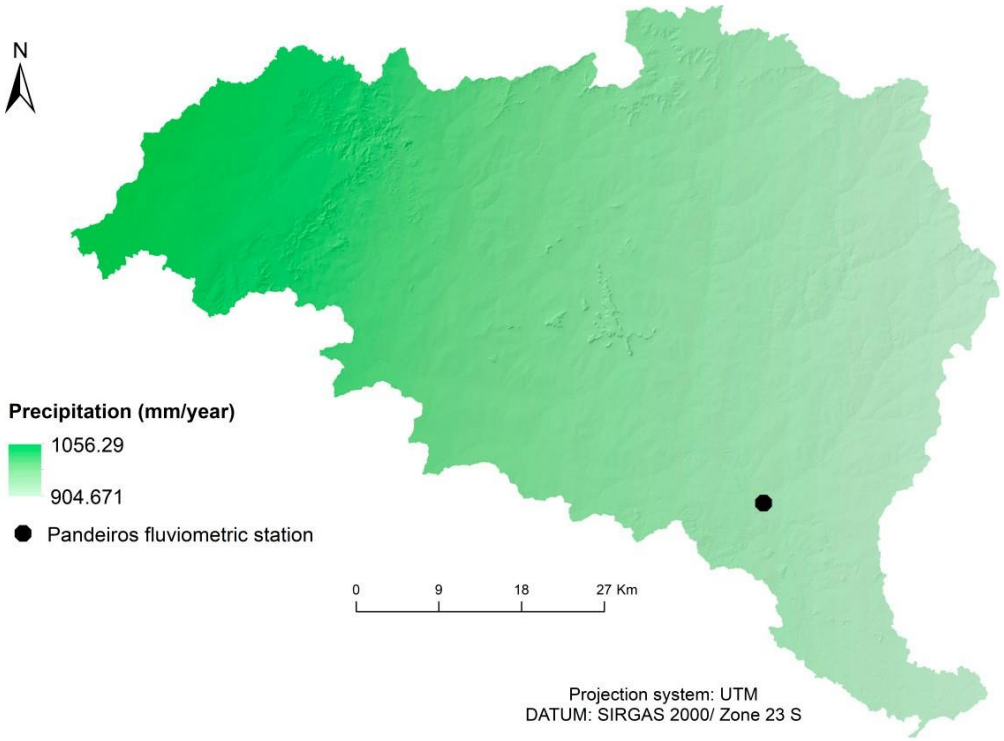


Figure 7. Spatial distribution of rainfall in the Pandeiros River basin.

The evapotranspiration ranged from 729.6 to 856.5 mm $year^{-1}$ (Figure 8). The spatial distribution of this variable was similar to rainfall; the lowest values were found in the southeast, east, and northeast regions, whereas the highest values were found in the northwest region of Pandeiros River basins.

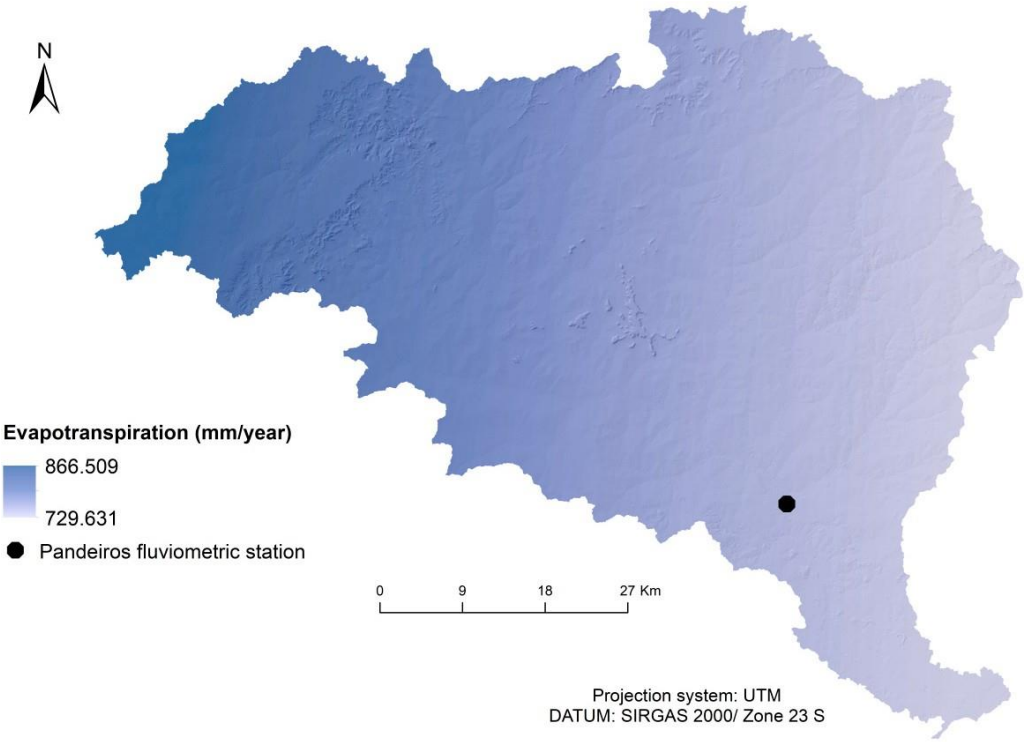


Figure 8. Spatial distribution of evapotranspiration in the Pandeiros River basin.

The evaluation of the runoff factor exposes a strong effect of runoff coefficients on the RF, as observed when the land use and cover map (Figure 5) is compared with the runoff map (Figure 9). The map of Figure 9 showed a lower groundwater recharge in urban areas, which have a higher runoff. In contrast, higher potential for groundwater recharge takes place in dense vegetation areas, indicating that the presence of vegetation decreases surface runoff.

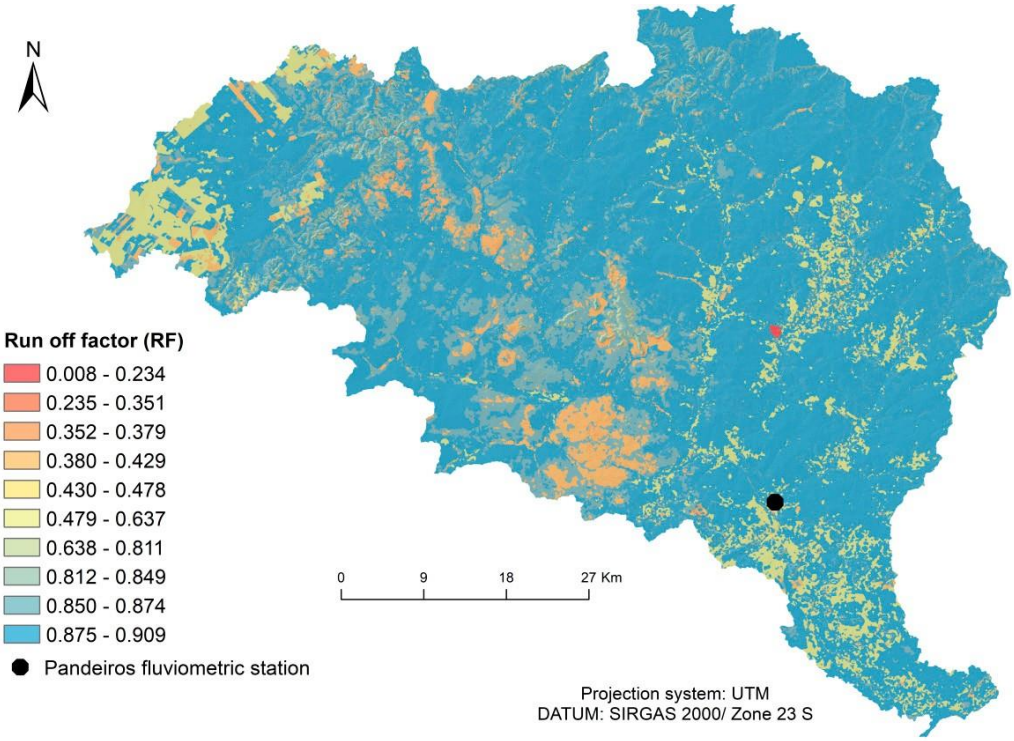


Figure 9. Spatial distribution of runoff factor in the Pandeiros River basin.

The water percolation factor ranged from 0.001 to 0.7 (dimensionless), expressing the combined variation of hydraulic conductivity values and PUC scores fitted to the 0–1 range (Figure 10 and Table 8). Areas with melanic gleysols and fluvic neosols presented the lowest water percolation factors, decreasing the groundwater recharge in these areas because of their low hydraulic conductivity.

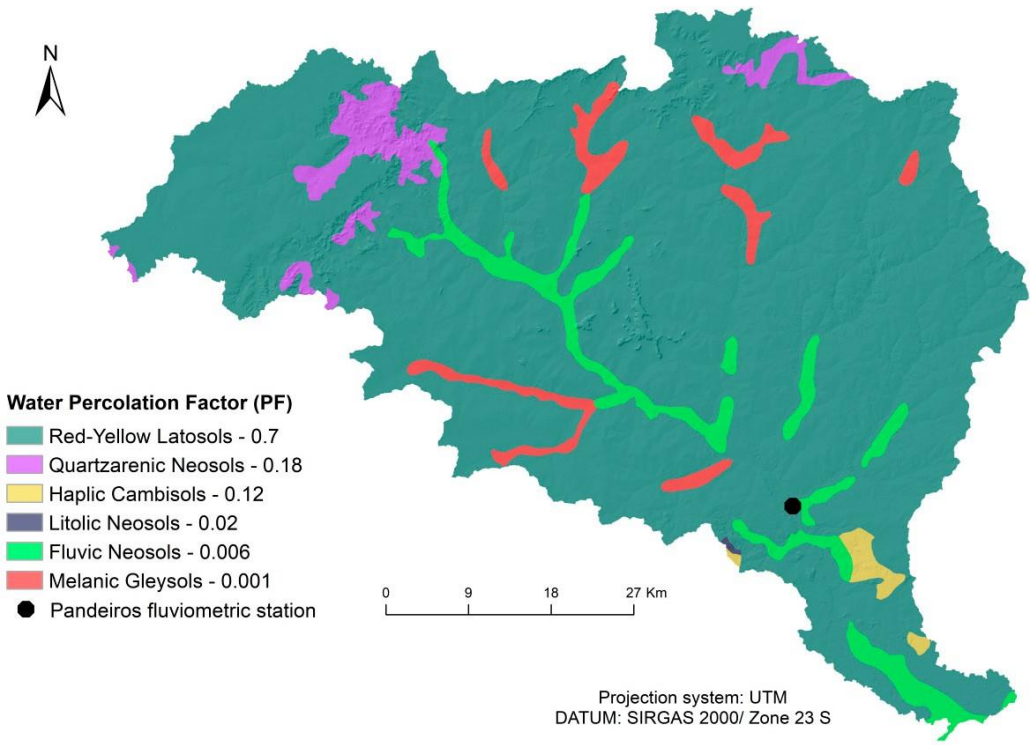


Figure 10. Spatial distribution of water percolation in the Pandeiros River basin.

The map of Figure 11 shows the groundwater recharge potential of the Pandeiros River basin ranging from 0 to 122.7 mm year^{-1}, with a mean value of 93.99 mm year^{-1}. The areas with higher groundwater recharge potential are located in regions with dense tree vegetation cover, areas with flat or slightly wavy relief, and areas with developed and structured soils, where the porosity and hydraulic conductivity allow water percolation to the water table. These areas are distributed throughout the basin and are found in the three municipalities that encompass the basin.

The areas with lowest groundwater recharge potential are represented in Figure 11 with a red color and are located in the urban area and in areas with the presence of melanic gleysols and fluvic neosols. The reduced potential is due to the soil sealing process occurring in urban areas, and to low hydraulic conductivities that decrease water percolation and consequently recharge in the aforementioned soil types.

The validation of PUC-based recharge estimates is depicted in Table 9. The mean groundwater recharge is 93.99 mm year^{-1} which is close to the median value obtained with the hydrograph recession method (87.2 mm year^{-1}). The difference between the two values is just 6.6 mm year^{-1} or 7.3%.

The hydrograph used to calculate groundwater recharge based on base flows is shown in Figure 12. Hydrographs describe the succession of peaks representing the watershed response to a precipitation event, which are separated by baseflow segments that describe the aquifer response to drainage. Hydrograph recession curves are usually separated in the quick flow stage, which depicts the runoff and water infiltration towards the saturated zone, and the baseflow stage when only the saturated zone discharges [68]. The baseflow discharge is the most representative feature of an aquifer's global response because it is less influenced by the temporal and spatial variations on infiltration [69]. Generally, hydrographs are analyzed together with rainfall data. The peak of a hydrograph rising curve shows the highest values of stream flows, which take place in the months when rainfall values are the highest. In these periods the superficial runoff also reaches its highest values and it decreases during the recession time, marked by the red segments in Figure 12.

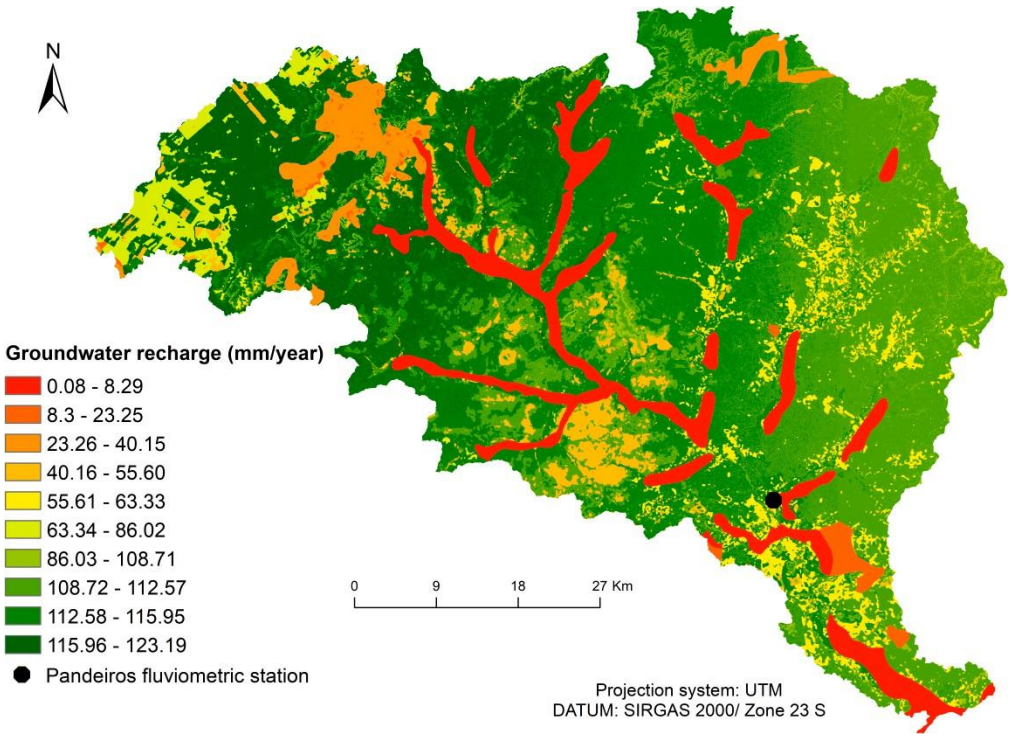


Figure 11. Spatial distribution of groundwater recharge potential in the Pandeiros River basin.

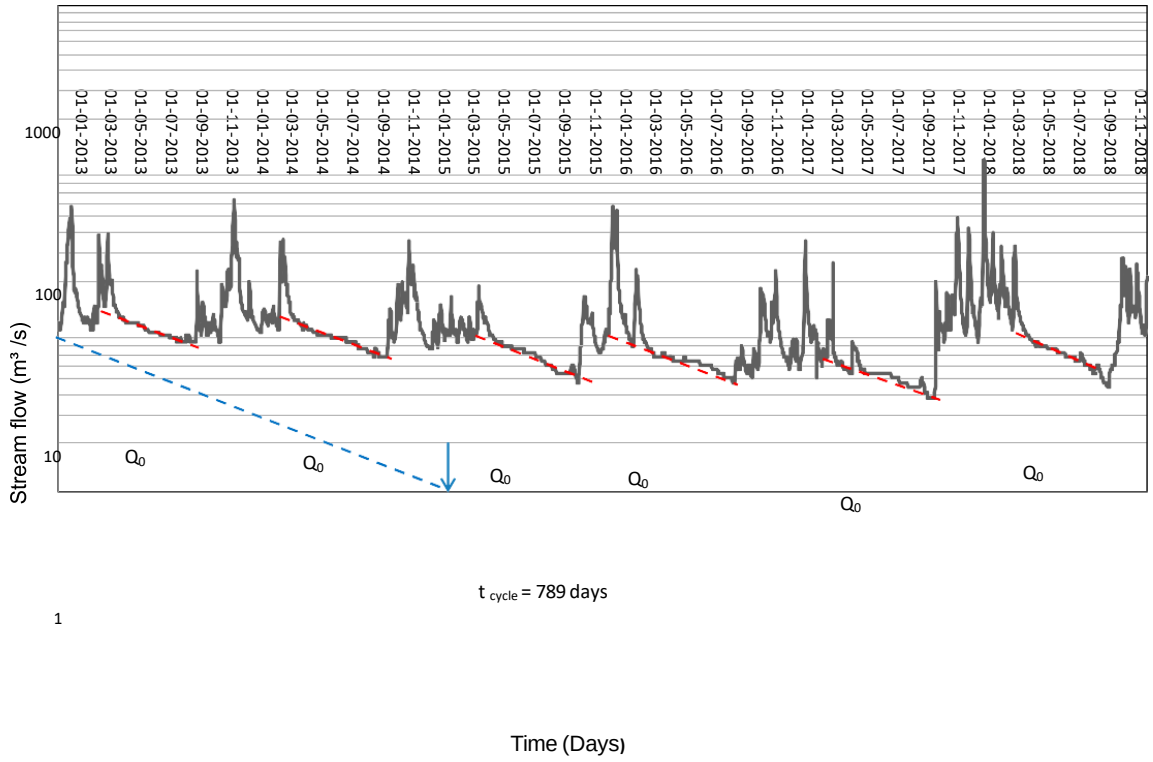


Figure 12. Hydrograph of Pandeiros River basin, state of Minas Gerais, Brazil, used to calculate the recession constant value.

Table 9. Groundwater recharge in the Pandeiros River basin, estimated by the spatially distributed PUC-based and hydrograph recession analysis methods.

Mean Groundwater Method (mm year^{-1})	Recharge	Average Difference (mm year^{-1})	Average Difference (%)
Spatialization	93.99 ± 36.92	4.8	5.2%
Hydrograph recession curve analysis	98.77 ± 20.32		

In the assessment of recharge using the method of hydrograph recession analysis, we looked for straight line segments corresponding to base lows. These segments allowed us to draw the corresponding fitting lines (dashed red lines). As would be expected, the lines are all virtually parallel because the line slope is solely dependent on the aquifer characteristics and dimension, which are invariant at the timescale of a few years (present case). For all years, the point in the graph where the fitting line intercepted the hydrograph at the upper flows (left edge point) was defined as the Q_0,t_0 point, i.e., the point where the recession period began. On average Q_0 = 10.8 ± 1.8 m^3 s^{-1}. The coefficient of recession was estimated by the simplified version of Equation (5), $\alpha = 1/(0.4343 t_{cycle})$. In the Pandeiros River basin, the estimated t_{cycle} is 789 days, and therefore α = 0,002918. Using Q_0 and α in Equation (6) results in the recharge value of V =98.8 ± 20.3 mm year^{-1}.

Figure 13 shows the spatialization of groundwater recharge within the municipalities that constitute the studied basin. Although the municipality of Januária encompasses a large area of the Pandeiros River basin, approximately 212,956.8 ha, this municipality presents a higher proportion of melanic gleysols, fluvic neosols, and litolic neosols, which are soils with the lowest water percolation factor (PF) assessed by the model. Moreover, it presents a considerable proportion of exposed soil, sparse Cerrado vegetation, and cultivated soils in the northwest region of the basin, which increases the runoff potential. For these reasons, this municipality presented a mean annual groundwater recharge of 90.30 mm year^{-1}.

The municipality of Cônego Marinho presented the highest mean annual groundwater recharge (105 mm year^{-1}). This municipality occupies a smaller area of the basin (approximately 26,083.86 ha) than the other municipalities, but it is in a region where soil and topography favor groundwater recharge.

Bonito de Minas presented mean annual groundwater recharge of 97.18 mm year^{-1}. The area of the basin within this municipality is approximately 156,987.95 ha. Despite the considerable presence of fluvic neosols and melanic gleysols in this region of the basin, the proportion is lower than that of Januária. The urban area of Bonito de Minas within the basin is small, representing 0.03% of the total area of the basin, which does not significantly affect the mean annual groundwater recharge.

The land use and cover map (Figure 5) and the groundwater recharge map (Figure 11) showed that the areas with forest cover presented the best recharge values. This type of land use and cover combined with flat or slightly wavy relief and areas overlaid with red–yellow latosols proved preferable for groundwater recharge.

Contrastingly, regions presenting such land use and cover as urban areas, exposed soil, ground vegetation, poorly structured soils and low hydraulic conductivity (fluvic neosols, litolic neosols, haplic cambisols, melanic gleysols), combined with steeper areas, presented lower recharges.

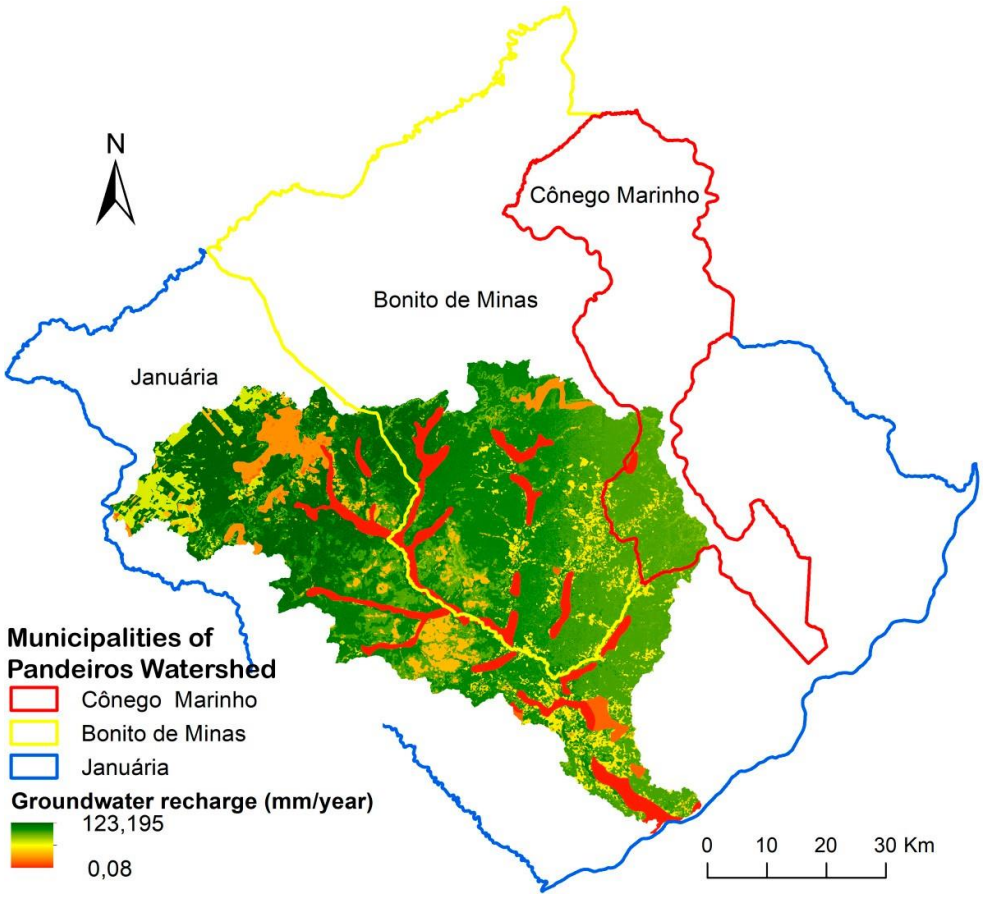


Figure 13. Spatial distribution of groundwater recharge potential in the municipalities of Pandeiros River basin.

3. Discussion

The rainfall depths (Figure 7) are consistent with Neves (2011), who evaluated a historical series (1931–1990) in the same region and reported a mean rainfall depth of 1050 mm year^{-1} [45]. However, the Brazilian Institute for Geography and Statistics (2014) considers values below 800 mm year^{-1} to define the semiarid region of Brazil [70], denoting that the rainfall depths of the study area were relatively high for a semiarid region.

Yang et al. (2016) showed that the rainfall depth can be a determinant for evapotranspiration and temperature values [71]. Therefore, practically all water that leaves the system (output) in regions with dry climate and low rainfall, such as the Brazilian semiarid regions, is due to evapotranspiration [72]. According to Loos, Gayler, and Priesack (2007), evapotranspiration is one of the most critical variables, with a high impact on water loss in similar regions [73].

The spatial distribution of runo*ff* factor showed that cover plants are essential to maintaining the water cycle and to protect the soil against the impacts of raindrops. Moreover, the presence of vegetation increases soil porosity and permeability by the action of roots, thereby reducing runo*ff*, and keeping soil moisture in the vicinity of organic colloids [74].

Soils under forest are characterized by expressive plant residue layers (litter fall) and by an A horizon rich in organic matter, which enables a higher soil aggregation, preserving its porosity [75]. Soils under forest usually present significant porosity, mainly macropores due to dead roots and animal holes, which are important to facilitate water infiltration and recharge. Therefore, water infiltration capacity is usually more expressive in areas with forest vegetation [75,76] than in pastureland or cropland, as found in the present work, resulting in a lower surface runo*ff*.

Costa et al. (2019) [10] used a groundwater recharge model and reported a higher surface runoff in urban areas than in vegetated areas. Urban areas have drainage systems, street pavements, and infrastructures that hinder infiltration of rainwater into the soil, decreasing the recharge potential [10]. Comparing the first model employed by Costa et al. (2019) with the present application, it is interesting to see how including the groundwater recharge parameter from the PUC method improved the spatialization of groundwater recharge, mainly because the first model [10] used solely total porosity values for each soil class in the Jequitiba River basin [10]. This parameter is not the best to assess drainage and water percolation, because according to Silva et al. (2013), the micro and macro porosity better reflect the movement of water through the soil profile [77]. Moreover, the PUC method uses a management approach that was not taken into consideration in the PF in the first model. Another important difference from the first model to the present one is the separation until the second category level of the neosols class, which has shown more reliable spatialization and values for the different category levels of this soil class. The differences between the physical characteristics (structure, texture and effective depth) of fluvic neosols, litolic neosols and quartzarenic neosols) make it questionable to give the same values of hydraulic conductivity and porosity to this soil class.

Regarding the validation stage of the work, the higher the slope of the recession curve, the faster the depletion of the water table reserves and the higher the demand of this system to regulate the surface system; whereas the lower the slope, the lower the time of depletion of water resources. The surface and groundwater form a system with mutual contribution, thus, any change in one will affect the other in the short or long term.

The comparison of the methods (spatialization; recession curve analysis) showed a small difference (5.2%) because of their particularities, since each method has inherent and inevitably uncertainty levels [78]. The spatialization method probably has a higher uncertainty in groundwater recharge values because the number of parameters involved with the calculations is much larger [10]. However, the recession curve analysis provides only an average groundwater recharge estimate (mean) for the entire basin, whereas the spatialization method provides one estimate for each point in the basin.

The small difference between the results obtained with the spatially distributed PUC-based and hydrograph recession methods attributes to geology a limited role in the estimation of recharge in the Pandeiros River basin, and that this process is predominantly controlled by the infiltration capacity and profile depth of the soil. The effect of vadose zone thickness on the recharge was recently reported in China [79]. Information on the characteristics of a river basin and its potentialities and limitations are essential to an adequate management of water resources [10,80,81].

The potentialities found for the municipality of Cônego Marinho include the prevalence of red–yellow latosols, which are soils that favor groundwater recharge because of their structural characteristics, such as the occurrence of macropores that increase hydraulic conductivity [43]. Moreover, the region has few cultivated areas and has a predominance of typical Cerrado vegetation, which also favor groundwater recharge, according to the model. Thus, the mean annual groundwater recharge was higher in this municipality than in the other two in the basin.

The considerable overlay of fluvic neosols and melanic gleysols in Bonito de Minas is compensated for by a high proportion of typical Cerrado and dense Cerrado vegetation and by the presence of few cultivated areas, which decreased the runoff potential: Consequently, the mean annual water recharge in this municipality was higher than that in Januária. The presence of native vegetation favors the groundwater recharge, because the forest reduces the surface runoff, favors water percolation, and maintains the soil physical and mechanical stability, assisting in the storage of water and the supply of groundwater [10]. Several studies evaluated the effect of land use and cover and the benefits of forested areas to groundwater recharge [42,82–88].

Considering these results, the method used in the present work provides aid in the better management of river basins by considering their potentialities and limitations, not generalizing a mean value for the whole area evaluated. Therefore, preferred areas can be identified for recharge, thus directing public policies and conservationist actions for each area, according to their needs.

4. Conclusions

The groundwater recharge potential was higher in areas covered with forests, located in plains or slightly wavy relief areas, or overlaid with red–yellow latosol. These are the areas to protect in the watershed management plan if recharge is to be favored or restored. The soil classes and their structural attributes, as well as the land use and cover types were considered as key factors for groundwater recharge. The results showed that areas with higher groundwater recharge potential were concentrated in the municipality of Cônego Marinho, followed by Bonito de Minas, and Januária. Areas with a presence of melanic gleysols and fluvic neosols presented the worst responses in the model.

As made evident from the results, this study should be used as a tool for the management of water resources in the Pandeiros River basin, because the preferred recharge areas could be successfully identified. It is urgent therefore that public policies and conservationist actions are enforced in these areas to improve natural groundwater recharge, and hence increase the accessible water volume to the local population. The adjustment of irrigation methods, adoption of soil preservation practices to improve water infiltration, seasonal storage of surface water in areas of low recharge potential and the preservation of forest vegetation, are examples of feasible actions. Moreover, this work provided subsidies for further studies that seek methods for the spatialization of groundwater recharge potential in river basins with a key role assigned to management practices.

Author Contributions: Conceptualization, M.A.T., M.S.d.M. A.M.d.C., P.K.M., J.H.M.V.; methodology, M.A.T., M.S.d.M., A.M.d.C. and J.H.M.V.; validation, M.A.T and F.A.L.P.; resources, A.M.d.C.; writing—original draft preparation, M.A.T. and M.S.d.M.; writing—review and editing, M.A.T., M.S.d.M., A.M.d.C., P.K.M., F.A.L.P and L.F.S.F.; supervision, A.M.d.C.; funding acquisition, A.M.d.C. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This study was funded by the research project "Sustentabilidade da Bacia do Rio Pandeiros" (Sustainability of Pandeiros River Basin), sponsored by grant APQ-03773-14 from FAPEMIG – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais that included a research scholarship for the author Maíse Soares de Moura. The manuscript translation from Portuguese to English was financed by the CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior. For the author integrated in the CITAB research centre, the research was financed by National Funds of FCT–Portuguese Foundation for Science and Technology, under the project UIDB/04033/2020. For the author integrated in the CQVR, the research was supported by National Funds of FCT–Portuguese Foundation for Science and Technology, under the projects UIDB/00616/2020 and UIDP/00616/2020.

Acknowledgments: This study was conducted within the work plan of research group "GEISS – Grupo de Estudos Integrado em Solos e Sustentabilidade", in its research line on "Gestão Sustentável de Recursos Hídricos e Segurança Hídrica". We wish to thank the support of the team of Soil and Environment Laboratory of the Federal University of Minas Gerais for the help in the analyses made in the study.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript or in the decision to publish the results.

Nomenclature

The list of mathematical symbols and their measurement units as used in the present article are listed below in alphabetical order:

A	recession coefficient;
C	runoff coefficient (dimensionless);
E	basis of Neperian logarithm (2.71828)
ET_R	mean evapotranspiration (mm year^{-1});
Ks_{FUZZY}	(dimensionless) soil hydraulic conductivity fitted to the 0 to 1 range by the fuzzy logic algorithm;
LS_{FUZZY}	slope length and steepness factor;
P	mean annual rainfall depth (mm year^{-1});
PF	water percolation factor (dimensionless);
PUC	Conservative Use Potential;
Q_T	stream flow discharge at time t (m^3 s^{-1});
Q_0	stream flow discharge at the beginning of a recession (m^3 s^{-1});

RF	runoff factor (dimensionless);
RPot	groundwater recharge potential (m^3 ha^{-1} $year^{-1}$);
T	time (day);
t′	converter of *t* measurement unit (days into seconds; 86,400)

References

1. Grey, D.; Sadoff, C.W. Sink or Swim? Water security for growth and development. *Water Policy* **2007**, *9*, 545–571. [CrossRef]
2. Hanjra, M.A.; Qureshi, M.E. Global water crisis and future food security in an era of climate change. *Food Policy* **2010**, *35*, 365–377. [CrossRef]
3. Carrão, H.; Naumann, G.; Barbosa, P. Mapping global patterns of drought risk: An empirical framework based on sub-national estimates of hazard, exposure and vulnerability. *Glob. Environ. Chang.* **2016**, *39*, 108–124. [CrossRef]
4. Ahmadalipour, A.; Moradkhani, H.; Castelletti, A.; Magliocca, N. Future drought risk in Africa: Integrating vulnerability, climate change, and population growth. *Sci. Total Environ.* **2019**, *662*, 672–686. [CrossRef] [PubMed]
5. Blakeslee, D.; Fishman, R.; Srinivasan, V. Way down in the hole: Adaptation to long-term water loss in rural India. *Am. Econ. Rev.* **2020**, *110*, 200–224. [CrossRef]
6. Calicioglu, O.; Flammini, A.; Bracco, S.; Bellù, L.; Sims, R. The future challenges of food and agriculture: An integrated analysis of trends and solutions. *Sustainability* **2019**, *11*, 222. [CrossRef]
7. Scanlon, B.R.; Keese, K.E.; Flint, A.L.; Flint, L.E.; Gaye, C.B.; Edmunds, W.M.; Simmers, I. Global synthesis of groundwater recharge in semiarid and arid regions. *Hydrol. Process.* **2006**, *20*, 3335–3370. [CrossRef]
8. Bressers, H.; Kuks, S. Integrated Governance and Water Basin Management. In *Integrated Governance and Water Basin Management: Conditions for Regime Change and Sustainability*; Bressers, H., Kuks, S., Eds.; Springer: Heidelberg, Germany, 2004; pp. 247–265. ISBN 978-1-4020-2482-5.
9. Lerner, D.N. Groundwater recharge in urban areas. In *Hydrological Processes and Water Management in Urban Areas*; Massing, H., Packman, J., Zuidema, F.C., Eds.; International Association of Hydrological Sciences: Wallingford, Oxfordshire, England, 1990; pp. 59–65. ISBN 0-947571-82-5.
10. da Costa, A.M.; de Salis, H.H.C.; Viana, J.H.M.; Leal Pacheco, F.A. Groundwater Recharge Potential for Sustainable Water Use in Urban Areas of the Jequitiba River Basin, Brazil. *Sustainability* **2019**, *11*, 2955. [CrossRef]
11. Yang, J.L.; Zhang, G.L. Water infiltration in urban soils and its effects on the quantity and quality of runoff. *J. Soils Sediments* **2011**, *11*, 751–761. [CrossRef]
12. Caldas, A.M.; Pissarra, T.C.T.; Costa, R.C.A.; Neto, F.C.R.; Zanata, M.; Parahyba, R.d.B.V.; Fernandes, L.F.S.; Pacheco, F.A.L. Flood vulnerability, environmental land use conflicts, and conservation of soil and water: A study in the Batatais SP municipality, Brazil. *Water* **2018**, *10*, 1357. [CrossRef]
13. Nimmo, J.R.; Schmidt, K.M.; Perkins, K.S.; Stock, J.D. Rapid measurement of field-saturated hydraulic conductivity for areal characterization. *Vadose Zone J.* **2009**, *8*, 142–149. [CrossRef]
14. Dawoud, M.A.; Darwish, M.M.; El-Kady, M.M. GIS-based groundwater management model for Western Nile Delta. *Water Resour. Manag.* **2005**, *19*, 585–604. [CrossRef]
15. Saraf, A.K.; Choudhury, P.R.; Roy, B.; Sarma, B.; Vijay, S.; Choudhury, S. GIS based surface hydrological modelling in identification of groundwater recharge zones. *Int. J. Remote Sens.* **2004**, *25*, 5759–5770. [CrossRef]
16. CHOWDHURY, R. *Slope Analysis*, 1st ed.; Elsevier: Chatswood, Australia, 1978; ISBN 9780444601391.
17. YEH, J.T.C.; GELHAR, L.W.; WIERENGA, P.J. Observations of spatial variability of soil water pressure in a field soil. *Soil Sci.* **1986**, *142*, 7–12. [CrossRef]
18. Allison, G.B.; Gee, G.W.; Tyler, S.W. Vadose-zone techniques for estimating groundwater recharge in arid and semiarid regions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **1994**, *58*, 6–14. [CrossRef]
19. Delin, G.N.; Healy, R.W.; Lorenz, D.L.; Nimmo, J.R. Comparison of local- to regional-scale estimates of ground-water recharge in Minnesota, USA. *J. Hydrol.* **2007**, *334*, 231–249. [CrossRef]
20. Yeh, H.F.; Cheng, Y.S.; Lin, H.I.; Lee, C.H. Mapping groundwater recharge potential zone using a GIS approach in Hualian River, Taiwan. *Sustain. Environ. Res.* **2016**, *26*, 33–43. [CrossRef]
21. Singh, A.; Panda, S.N.; Kumar, K.S.; Sharma, C.S. Artificial groundwater recharge zones mapping using remote sensing and gis: A case study in Indian Punjab. *Environ. Manag.* **2013**, *52*, 61–71. [CrossRef]
22. 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. *Environ. Earth Sci.* **2009**, *59*, 1209–1222. [CrossRef]
23. Jiménez-Martínez, J.; Skaggs, T.H.; van Genuchten, M.T.; Candela, L. A root zone modelling

approach to estimating groundwater recharge from irrigated areas. *J. Hydrol.* **2009**, *367*, 138–149. [CrossRef]
24. Valle Junior, R.F.; Varandas, S.G.P.; Sanches Fernandes, L.F.; Pacheco, F.A.L. Environmental land use conflicts: A threat to soil conservation. *Land Use Policy* **2014**, *41*, 172–185. [CrossRef]
25. Spannenberg, J.; Atangana, A.; Vermeulen, P.D. New approach to groundwater recharge on a regional scale: Uncertainty analysis and application of fractional differentiation. *Arab. J. Geosci.* **2019**, *12*, 1–12. [CrossRef]
26. Cherkauer, D.S. Quantifying Ground Water Recharge at Multiple Scales Using PRMS and GIS. *Ground Water*

2004, *42*, 97–110. [CrossRef] [PubMed]
27. Conrad, J.; Nel, J.; Wentzel, J. The challenges and implications of assessing groundwater recharge: A study—Northern Sandveld, Western Cape, South Africa. *Water SA* **2004**, *30*, 75–81. [CrossRef]
28. Pacheco, F.A.L. Regional groundwater flow in hard rocks. *Sci. Total Environ.* **2015**, *506–507*, 182–195. [CrossRef]
29. De Luca, D.A.; Lasagna, M.; Gisolo, A.; Morelli di Popolo e Ticineto, A.; Falco, M.; Cuzzi, C. Potential recharge areas of deep aquifers: An application to the Vercelli–Biella Plain (NW Italy). *Rend. Lincei* **2019**, *30*, 137–153. [CrossRef]
30. Blasch, K.W.; Bryson, J.R. Distinguishing sources of ground water recharge by using δ2H and δ18O. *Ground Water* **2007**, *45*, 294–308. [CrossRef]
31. Sukhija, B.S.; Reddy, D.V.; Nagabhushanam, P.; Hussain, S.; Giri, V.Y.; Patil, D.J. Environmental and injected tracers methodology to estimate direct precipitation recharge to a confined aquifer. *J. Hydrol.* **1996**, *177*, 77–97. [CrossRef]
32. Mohan, C.; Western, A.W.; Wei, Y.; Saft, M. Predicting groundwater recharge for varying land cover and climate conditions-a global meta-study. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **2018**, *22*, 2689–2703. [CrossRef]
33. Aguilera, H.; Murillo, J.M. The effect of possible climate change on natural groundwater recharge based on a simple model: A study of four karstic aquifers in SE Spain. *Environ. Geol.* **2009**, *57*, 963–974. [CrossRef]
34. Ali, R.; McFarlane, D.; Varma, S.; Dawes, W.; Emelyanova, I.; Hodgson, G. Potential climate change impacts on the water balance of regional unconfined aquifer systems in south-western Australia. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **2012**, *16*, 4581–4601. [CrossRef]
35. Herrera-Pantoja, M.; Hiscock, K.M. The effects of climate change on potential groundwater recharge in Great Britain. *Hydrol. Process.* **2008**, *22*, 73–86. [CrossRef]
36. Sanford, W. Recharge and groundwater models: An overview. *Hydrogeol. J.* **2002**, *10*, 110–120. [CrossRef]
37. Döll, P.; Fiedler, K. Global-scale modeling of groundwater recharge. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **2008**, *12*, 863–885. [CrossRef]
38. Pang, Z.; Huang, T.; Chen, Y. Diminished groundwater recharge and circulation relative to degrading riparian vegetation in the middle Tarim River, Xinjiang Uygur, Western China. *Hydrol. Process.* **2010**, *24*, 147–159. [CrossRef]
39. Oliveira, P.T.S.; Leite, M.B.; Mattos, T.; Nearing, M.A.; Scott, R.L.; de Oliveira Xavier, R.; da Silva Matos, D.M.; Wendland, E. Groundwater recharge decrease with increased vegetation density in the Brazilian cerrado. *Ecohydrology* **2017**, *10*, 1–8. [CrossRef]
40. Jackson, R.B.; Carpenter, S.R.; Dahm, C.N.; McKnight, D.M.; Naiman, R.J.; Postel, S.L.; Running, S.W. Water in a changing world. *Ecol. Appl.* **2001**, *11*, 1027–1045. [CrossRef]
41. Kim, J.H.; Jackson, R.B. A Global Analysis of Groundwater Recharge for Vegetation, Climate, and Soils.

Vadose Zone J. **2012**, *11*. [CrossRef]
42. Scanlon, B.R.; Reedy, R.C.; Stonestrom, D.A.; Prudic, D.E.; Dennehy, K.F. Impact of land use and land cover change on groundwater recharge and quality in the southwestern US. *Glob. Chang. Biol.* **2005**, *11*, 1577–1593. [CrossRef]
43. da Costa, A.M.; Viana, J.H.M.; Evangelista, L.P.; De Carvalho, D.C.; Pedras, K.C.; Horta, I.D.M.; Salis, H.H.d.C.; Pereira, M.P.R.; Sampaio, J.L.D. Ponderação de variáveis ambientais para a determinação do Potencial de Uso Conservacionista para o Estado de Minas Gerais. *Geografias* **2017**, *14*, 118–133.
44. INMET—Instituto Nacional de Meteorologia (Brazilian Institute for Meteorology). The Database on Climatic Data. Available online: http://www.inmet.gov.br/portal/ (accessed on 1 January 2020).
45. Neves, W.V. *Avaliação da Vazão em Bacias Hidrográficas com Veredas, em Diferentes Estádios de Conservação, na APA do Rio Pandeiros – MG*; Universidade Federal de Minas Gerais: Belo Horizonte, Brazil, 2011.
46. Alvares, C.A.; Stape, J.L.; Sentelhas, P.C.; Gonçalves, J.L.D.M.; Sparovek, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorol. Z.* **2013**, *22*, 711–728. [CrossRef]
47. Silva, C.G. *Da Caracterização Física e Ambiental da Bacia Hidrográfica do rio Pandeiros- MG em Eventos*

de El Niño-Oscilação Sul; Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro: Seropédica, Brazil, 2018.
48. IBGE—Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (Brazilian Institute for Geography and Statistics). The database on demography. Available online: https://www.ibge.gov.br/ (accessed on 12 December2019).
49. Coutinho, L.M. O conceito de bioma. *Acta Bot. Brasilica* **2006**, *20*, 13–23. [CrossRef]
50. Nunes, Y.R.F.; Azevedo, I.F.P.; Neves, W.V.; Veloso, M.d.D.M.; Souza, R.d.A.; Fernandes, G.W. Pandeiros: O Pantanal Mineiro. *MG Biota* **2009**, *2*, 4–17.
51. Rezende, É.A. *O Papel da Dinâmica Espaço-Temporal da rede Hidrográfica na Evolução Geomorfológica da AltaMédia Bacia do Rio Grande, Sudeste Brasileiro*; Universidade Federal de Ouro Preto: Ouro Preto, Brazil, 2018.
52. EMBRAPA. *Sumula da X Reunião Técnica de Levantamento de Solos*; Palmieri, F., Rodrigues, T.E., dos Santos, H.G., Motchi, E.P., de Freitas, F.G., Matos, M.D.M., Eds.; Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuaria: Brasília, Brazil, 1979.
53. UFV—Universidade Federal de Viçosa (Federal University of Viçosa). The database on Minas Gerais Soil Map. Available online: https://www.ufv.br/ (accessed on 20 December 2019).
54. Eiten, G. The cerrado vegetation of Brazil. *Bot. Rev.* **1972**, *38*, 201–341. [CrossRef]
55. Pedron, F.d.A.; Fink, J.R.; Rodrigues, M.F.; Azevedo, A.C. de Condutividade e retenção de água em Neossolos e saprolitos derivados de arenito. *Rev. Bras. Cienc. Solo* **2011**, *35*, 1253–1262.
56. Amaral, J.R. *Do Caracterização Físico-Hídrica dos Solos da Bacia do Córrego Marinheiro, Sete Lagoas—MG*; Universidade Federal de Minas Gerais: Belo Horizonte, Brazil, 2017.
57. Desmet, P.J.J.; Govers, G. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. *J. Soil Water Conserv.* **1996**, *51*, 427–433.
58. de Oliveira, L.F.C.; Fioreze, A.P.; Medeiros, A.M.M.; Silva, M.A.S. Comparação de metodologias de preenchimento de falhas de séries históricas de precipitação pluvial anual. *Rev. Bras. Eng. Agrícola Ambient.* **2010**, *14*, 1186–1192. [CrossRef]
59. Böhner, J.; Selige, T. Spatial prediction of soil attributes using terrain analysis and climate regionalisation.
Gött. Geogr. Abh. **2002**, *115*, 13–28.
60. Joint Committee of the ASCE and the Water Pollution Control Federation. *Design and Construction of Sanitary and Storm Sewers*; American Society of Civil Engineers: New York, NY, USA, 1969.
61. dos Santos, H.G.; Jacomine, P.K.T.; dos Anjos, L.H.C.; de Oliveira, V.A.; Lumbreras, J.F.; Coelho, M.R.; de Almeida, J.A.; de Araujo Filho, J.C.; de Oliveira, J.B.; Cunha, T.J.F. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, 5 ed.*; Embrapa Solos: Rio de Janeiro, Brazil, 2018; ISBN 85-85864-19-2.
62. Freire, M.B.G.d.S.; Ruiz, H.A.; Ribeiro, M.R.; Ferreira, P.A.; Alvarez, V.V.H.; Freire, F.J. Condutividade hidráulica de solos de Pernambuco em resposta à condutividade elétrica e RAS da água de irrigação. *Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambient.* **2003**, *7*, 45–52. [CrossRef]
63. Goldich, S.S. A Study in Rock-Weathering. *J. Geol.* **1938**, *46*, 17–58. [CrossRef]
64. Pacheco, F.A.L.; Van der Weijden, C.H. Integrating topography, hydrology and rock structure in weathering rate models of spring watersheds. *J. Hydrol.* **2012**, *428–429*, 32–50. [CrossRef]
65. Santos, R.M.B.; Sanches Fernandes, L.F.; Moura, J.P.; Pereira, M.G.; Pacheco, F.A.L. The impact of climate change, human interference, scale and modeling uncertainties on the estimation of aquifer properties and river flow components. *J. Hydrol.* **2014**, *519*, 1297–1314. [CrossRef]
66. ANA—Agência Nacional de Águas (Brazilian Agency for Water). The data base on hydrologic information and stream flow records. Available online: https://capacitacao.ana.gov.br/ (accessed on 2 December 2019).
67. Barnes, B.S. The structure of discharge-recession curves. *Eos Trans. Am. Geophys. Union* **1939**, *20*, 721–725. [CrossRef]
68. Dewandel, B.; Lachassagne, P.; Bakalowicz, M.; Weng, P.; Al-Malki, A. Evaluation of aquifer thickness by analysing recession hydrographs. Application to the Oman ophiolite hard-rock aquifer. *J. Hydrol.* **2003**, *274*, 248–269. [CrossRef]
69. Kovács, A.; Perrochet, P.; Király, L.; Jeannin, P.Y. A quantitative method for the characterisation of karst aquifers based on spring hydrograph analysis. *J. Hydrol.* **2005**, *303*, 152–164. [CrossRef]
70. IBGE—Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (Brazilian Institute for Geography and Statistics). The database on the "Semiárido Brasileiro" (Brazilian semiarid region). Available online: https://www.ibge.gov. br/geociencias/cartas-e-mapas/mapas-regionais/15974-semiarido-brasileiro.html?=&t=sobre (accessed on 5 January 2020).
71. Yang, Z.; Zhang, Q.; Hao, X. Evapotranspiration Trend and Its Relationship with Precipitation over the Loess Plateau during the Last Three Decades. *Adv. Meteorol.* **2016**, 1–10. [CrossRef]
72. Saxton, K.E.; Mc Guinness, J.L. Evapotranspiration. In *Hydrologic Modeling of Small Watersheds*; Haan, C.T., Johnson, H.P., Brakenstek, D.L., Eds.; American Society of Agricultural Engineers: St. Joseph, Michigan, EUA, 1982; pp. 229–258.

73. Loos, C.; Gayler, S.; Priesack, E. Assessment of water balance simulations for large-scale weighing lysimeters.

J. Hydrol. **2007**, *335*, 259–270. [CrossRef]

74. Hartanto, H.; Prabhu, R.; Widayat, A.S.E.; Asdak, C. Factors affecting runoff and soil erosion: Plot-level soil loss monitoring for assessing sustainability of forest management. *For. Ecol. Manag.* **2003**, *180*, 361–374. [CrossRef]

75. Cheng, J.D.; Lin, L.L.; Lu, H.S. Influences of forests on water flows from headwater watersheds in Taiwan.

For. Ecol. Manag. **2002**, *165*, 11–28. [CrossRef]

76. Best, A.; Zhang, L.; Mc Mahon, T.; Western, A.; Vertessy, R. *A Critical Review of Paired Catchment Studies with Reference to Seasonal Flows and Climatic Variability*; Murray-Darling Basin Commission: Canberra, Australia, 2003; ISBN 1-876-830-57-3.

77. da Silva, A.J.P.; Coelho, E.F. Estimation of water percolation by different methods using TDR. *Rev. Bras. Ciência Solo* **2014**, *38*, 73–81. [CrossRef]

78. Scanlon, B.R.; Healy, R.W.; Cook, P.G. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge.

Hydrogeol. J. **2002**, *10*, 18–39. [CrossRef]

79. Cao, G.; Scanlon, B.R.; Han, D.; Zheng, C. Impacts of thickening unsaturated zone on groundwater recharge in the North China Plain. *J. Hydrol.* **2016**, *537*, 260–270. [CrossRef]

80. Dessu, S.B.; Melesse, A.M.; Bhat, M.G.; McClain, M.E. Assessment of water resources availability and demand in the Mara River Basin. *Catena* **2014**, *115*, 104–114. [CrossRef]

81. McMahon, P.B.; Plummer, L.N.; Böhlke, J.K.; Shapiro, S.D.; Hinkle, S.R. A comparison of recharge rates in aquifers of the United States based on groundwater-age data. *Hydrogeol. J.* **2011**, *19*, 779–800. [CrossRef]

82. Brauman, K.A.; Freyberg, D.L.; Daily, G.C. Land cover effects on groundwater recharge in the tropics: Ecohydrologic mechanisms. *Ecohydrology* **2012**, *5*, 435–444. [CrossRef]

83. Ilstedt, U.; Bargués Tobella, A.; Bazié, H.R.; Bayala, J.; Verbeeten, E.; Nyberg, G.; Sanou, J.; Benegas, L.; Murdiyarso, D.; Laudon, H.; et al. Intermediate tree cover can maximize groundwater recharge in the seasonally dry tropics. *Sci. Rep.* **2016**, *6*, 21930. [CrossRef]

84. Zomlot, Z.; Verbeiren, B.; Huysmans, M.; Batelaan, O. Spatial distribution of groundwater recharge and base flow: Assessment of controlling factors. *J. Hydrol. Reg. Stud.* **2015**, *4*, 349–368. [CrossRef]

85. Maréchal, J.C.; Varma, M.R.R.; Riotte, J.; Vouillamoz, J.M.; Kumar, M.S.M.; Ruiz, L.; Sekhar, M.; Braun, J.J. Indirect and direct recharges in a tropical forested watershed: Mule Hole, India. *J. Hydrol.* **2009**, *364*, 272–284. [CrossRef]

86. Le Maitre, D.C.; Scott, D.F.; Colvin, C. A review of information on interactions between vegetation and groundwater. Water SA 1999, 25, 137–152.

87.

88. Zhang, H.; Hiscock, K.M. Modelling the impact of forest cover on groundwater resources: A case study of the Sherwood Sandstone aquifer in the East Midlands, UK. J. Hydrol. 2010, 392, 136–149. [CrossRef]

89. Allen, A.; Chapman, D. Impacts of afforestation on groundwater resources and quality. Hydrogeol. J. 2001, 9, 390–400. [CrossRef]

90. © 2020 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and

Conditions