

Proposta metodológica para análise espacial de nutrientes do solo em bacias hidrográficas

Methodology proposal for spatial analysis of soil nutrients in watersheds

*Darllan Collins da Cunha e Silva*¹
*José Luiz Albuquerque Filho*²
*Renan Angrizani de Oliveira*³
*Roberto Wagner Lourenço*⁴

Resumo

Índices ambientais são importantes mecanismos de informações sobre o estado do solo resultante do uso e manejo antrópico que impacta positivamente ou negativamente a qualidade de vida dos seres vivos. Nesse estudo objetivou-se elaborar um Índice do Estado Ambiental do Solo (IEAS) para analisar a espacialização através da interpolação por krigagem ordinária de fatores químicos do solo resultante do uso e manejo antrópico na Bacia Hidrográfica do Rio Una. Como resultado, é possível observar que há um déficit de fósforo na Bacia Hidrográfica do Rio Una e que o carreamento desse nutriente para os corpos de água pode desencadear processos de eutrofização. Aproximadamente 65% da área da Bacia Hidrográfica do Rio Una está classificada como regular, isto é, encontram-se na faixa de 0,38 a 0,60. Não houve valores classificados como ruins ou péssimos para o IEAS, indicando que a Bacia Hidrográfica está pouco degradada, fato comprovado pela taxa de ocupação por matas na área de estudo que corresponde a 41% de sua extensão territorial. O IEAS pode ser utilizado como uma importante ferramenta para a gestão do estado do solo em bacias hidrográficas, pois permite interpretar numericamente esse estado, além de poder servir como um instrumento de tomada de decisão para gestores públicos e privados.

Palavras-chave: Índice. Geoprocessamento. Krigagem. Geoestatística.

Abstract

Environmental indices are important information tools about the state of the soil resulting from the use and anthropic management that impacts positively or negatively the quality of life in living beings. The objective of this study was to elaborate a Soil and Environmental Status Index (SESI) to analyze the spatialization through interpolation by ordinary kriging of

¹ UNESP – Universidade Estadual Paulista, Campus Experimental de Registro, São Paulo, Brasil. darllanamb@yahoo.com.br

² IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, Centro de Tecnologias Geoambientais, São Paulo, São Paulo, Brasil. albuzelu@ipt.br

³ UNESP – Universidade Estadual Paulista, Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba (ICTS), São Paulo, Brasil. renan_angrizani@hotmail.com

⁴ UNESP – Universidade Estadual Paulista, Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba (ICTS), São Paulo, Brasil. robertow@sorocaba.unesp.br

Artigo recebido em: 23/01/2017. Aceito para publicação em: 30/08/2018.

soil chemical factors resulting from anthropic use and management in the Una River Watershed. Thus, it is possible to observe that there is a phosphorus deficit in the Una River Watershed and that the transport of this nutrient to the water bodies can trigger eutrophication processes. Approximately 65% of the area of the Una River Watershed is classified as regular, that is, they are in the range of 0.38 to 0.60. There were no values classified as bad or awful for the SESI, indicating that the Watershed is poorly degraded, a fact evidenced by the occupation rate by forests in the study area that corresponds to 41% of the territorial extension. The SESI can be used as an important tool for the management of soil state in watersheds, since it allows the interpretation of this state numerically, and can serve as a decision-making tool for public and private managers.

Keywords: Index. Geoprocessing. Kriging. Geostatistics.

Introdução

Índices e Indicadores ambientais são importantes mecanismos para a comunicação de informações resumidas ou para a provisão de bases sólidas sobre o estado do solo aos responsáveis por sua gestão, contribuindo para uma relação sustentável entre os eixos social, econômico e ambiental. Devem agregar informações essenciais em simples ou complexas medições de acordo com a dinâmica do processo de tomada de decisões (DEPONTI et al., 2002; MOLLER, 2015).

Além disso, devem permitir avaliar uma situação presente e sua tendência de comportamento, bem como estabelecer um termo de comparação em escala temporal e espacial (MARZALL; ALMEIDA, 2000). Portanto, os indicadores de qualidade do solo, em especial, podem ser considerados importantes mecanismos de suporte à tomada de decisões envolvendo questões ambientais.

Segundo Doran e Parkin (1994) um indicador de qualidade do solo resume-se na capacidade do solo de funcionar dentro de limites capazes de sustentar a produtividade de plantas e animais, manter ou aumentar a qualidade do ar e da água e promover a saúde dos seres vivos. Então, qualidade do solo está relacionada com a capacidade do solo em aceitar, estocar e reciclar água, nutrientes e energia, integrando as propriedades

biológicas, físicas e químicas do solo (CARTER, 2001; PULLEMAN et al., 2012).

Somado a essas características, um indicador de qualidade do solo deve, ainda, analisar um conjunto de propriedades do solo e ser acessível a todos os usuários, sem deixar dúvidas sobre os princípios utilizados no processo de avaliação, além de fáceis de medir e, quando possível, ser componente de um banco de dados já existente (DORAN; PARKIN, 1994; MARZALL; ALMEIDA, 2000; PULLEMAN et al., 2012).

Vários estudos foram realizados em busca de um índice ou indicador de qualidade do solo que pudesse refletir o quanto sustentável é o solo de uma determinada região, como os de Vezzani (2009) e Araújo et al. (2012) que descreveram teoricamente sobre a qualidade do solo. Monteiro e Ponciano (2012) avaliou a qualidade do solo em áreas com cana-de-açúcar colhida crua e queimada, enquanto que, Maia (2013) propôs um índice de qualidade ambiental em solos cultivados em diferentes ciclos da cultura do meloeiro irrigado. Já Alvarenga et al. (2012) propôs gerar e mapear um índice de qualidade do solo associado à recarga de água subterrânea a partir de técnicas de geoprocessamento, enquanto que, Motomiya e Eduardo (2006) utilizaram indicadores de fertilidade de solos cultivados com cana-de-açúcar com vistas ao aprimoramento de técnicas de agricultura de precisão utilizando técnicas de geoprocessamento.

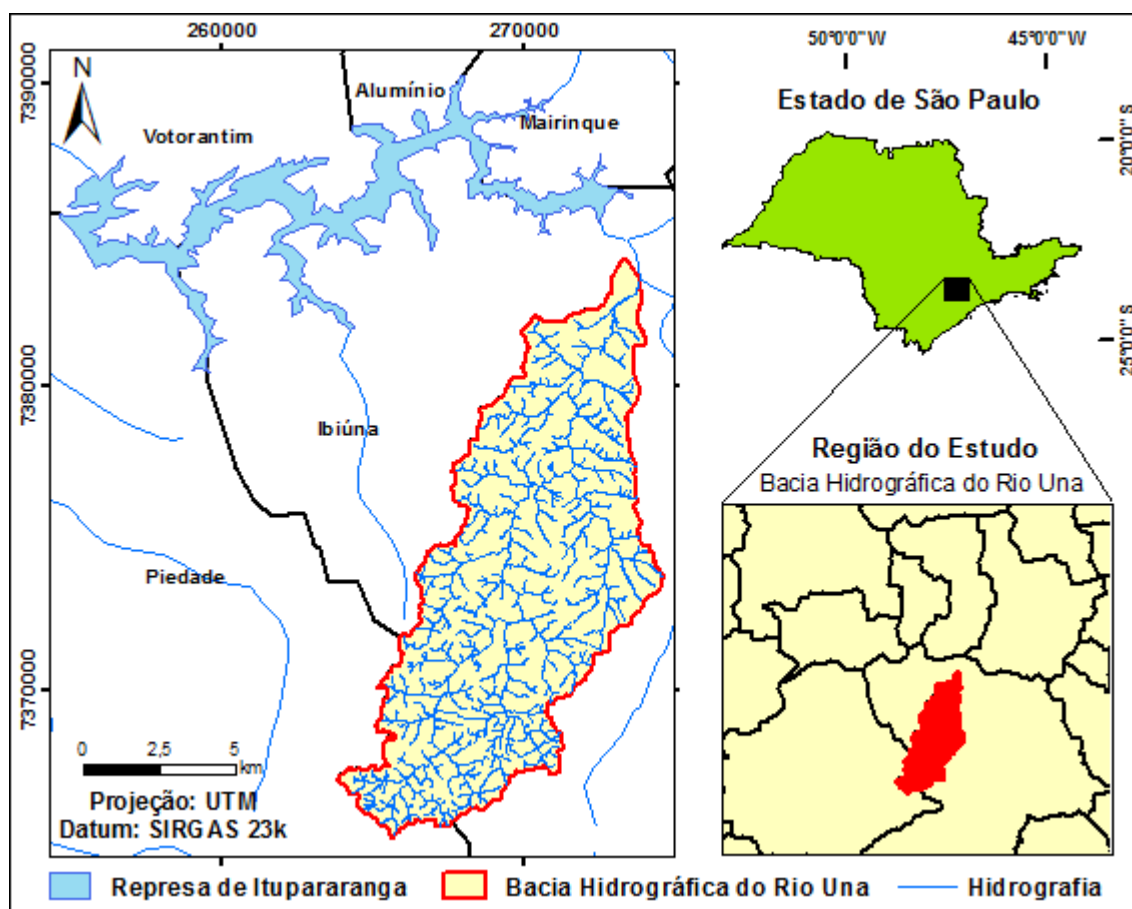
Portanto, nesse estudo foram estudados alguns parâmetros químicos do solo que pudessem refletir o grau de fertilidade dos solos, bem como sua capacidade de se manter sustentável frente ao uso e manejo imposto pelas atividades antrópicas. Para isso, foi elaborado um Índice do Estado Ambiental do Solo (IEAS) e utilizado um Sistema de Informação Geográfica (SIG) para avaliar espacialmente a distribuição desses parâmetros químicos do solo da Bacia Hidrográfica do Rio Una.

Metodologia

Área de estudo

A área de estudo é denominada de Bacia Hidrográfica do Rio Una e está localizada no interior do Estado de São Paulo no Município de Ibiúna (Figura 1) que possui uma população de 73.309 habitantes com 55,7% dos habitantes residentes na zona rural devido a agricultura ser a principal atividade econômica do município (SEADE, 2017).

O Rio Una desemboca no reservatório de Itupararanga que é o principal manancial de captação de água do município de Sorocaba e região e fonte de água para irrigação de propriedades agrícolas. O clima predominante na área de estudo é do tipo Cwb segundo a classificação de Köppen com vegetação original predominante de ombrófila densa montana (SILVA et al., 2016).

Figura 1. Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Una

Fonte: Org.: dos Autores, 2017.

Procedimento metodológico adotado para a distribuição dos pontos de amostragens

A Bacia Hidrográfica do Rio Una foi seccionada em Baixo, Médio e Alto Una para a distribuição dos pontos de amostragens de solo que foram distribuídos regularmente na Bacia Hidrográfica em uma malha quadrada com medidas laterais iguais a 1600 m, considerando o mapa de uso do solo e cobertura vegetal divulgado por Silva et al. (2016). Para a quantificação dos pontos de amostragens foi elaborado um procedimento metodológico onde considerou-se a área que cada uso do solo apresentava no Baixo, Médio e Alto Una, pois foi definido que deveria haver pelo menos uma amostragem de cada um dos usos do solo nesses compartimentos da Bacia Hidrográfica.

Para isso, foi considerado que caso a área de um determinado uso do solo fosse maior que a média, a área desse uso do solo seria dividida pela média e o seu valor indicaria quantos daquele uso do solo deveria haver naquele compartimento da Bacia Hidrográfica (Equação 1), caso contrário, seria atribuído o valor 1, que indica que deve haver pelo menos uma amostragem desse uso do solo (Equação 2).

$$\text{Se } A_{uso} > M_c \therefore N_{amostra} = \frac{A_{uso}}{M_c} \quad (1)$$

$$\text{Se } A_{uso} \leq M_c \therefore N_{amostra} = 1 \quad (2)$$

Sendo:

A_{uso} é área de um determinado uso do solo no Baixo, Médio ou Alto Una;

M_c é a média das áreas dos usos do solo no Baixo, Médio ou Alto Una;

$N_{amostra}$ é o número de amostras.

A Tabela 1 mostra os usos do solo e cobertura vegetal adotados para a amostragem de solo com suas respectivas áreas no Baixo, Médio e Alto Una, enquanto que, a Tabela 2 mostra o número de amostras pertencentes ao conjunto dos números naturais para cada tipo de uso do solo no Baixo, Médio e Alto Una, conforme as sentenças estabelecidas nas Equações 1 e 2.

Tabela 1. Classes de uso do solo e cobertura vegetal com suas respectivas áreas no Baixo, Médio e Alto Una

Classes de Uso do Solo e Cobertura Vegetal	Área por classes (ha)	Baixo		Médio		Alto	
		Área (ha)	%	Área (ha)	%	Área (ha)	%
Agricultura com Culturas Temporárias	2204,0	338,4	20,3	1605,7	32,9	260,0	13,1
Agricultura com Culturas Perenes	229,3	21,4	1,3	144,9	3,0	62,9	3,2
Campos Sujos	1009,6	289,0	17,4	594,5	12,2	126,2	6,3
Área Florestal	3945,0	877,8	52,8	2084,7	42,7	982,6	49,6
Pastagens	1136,4	136,7	8,2	448,5	9,2	551,2	27,8
Área Total (ha)	8524,4	1663,3		4878,2		1982,9	
Média da área (ha)	1704,9	332,7		975,6		396,6	

Fonte: Org.: dos Autores, 2017.

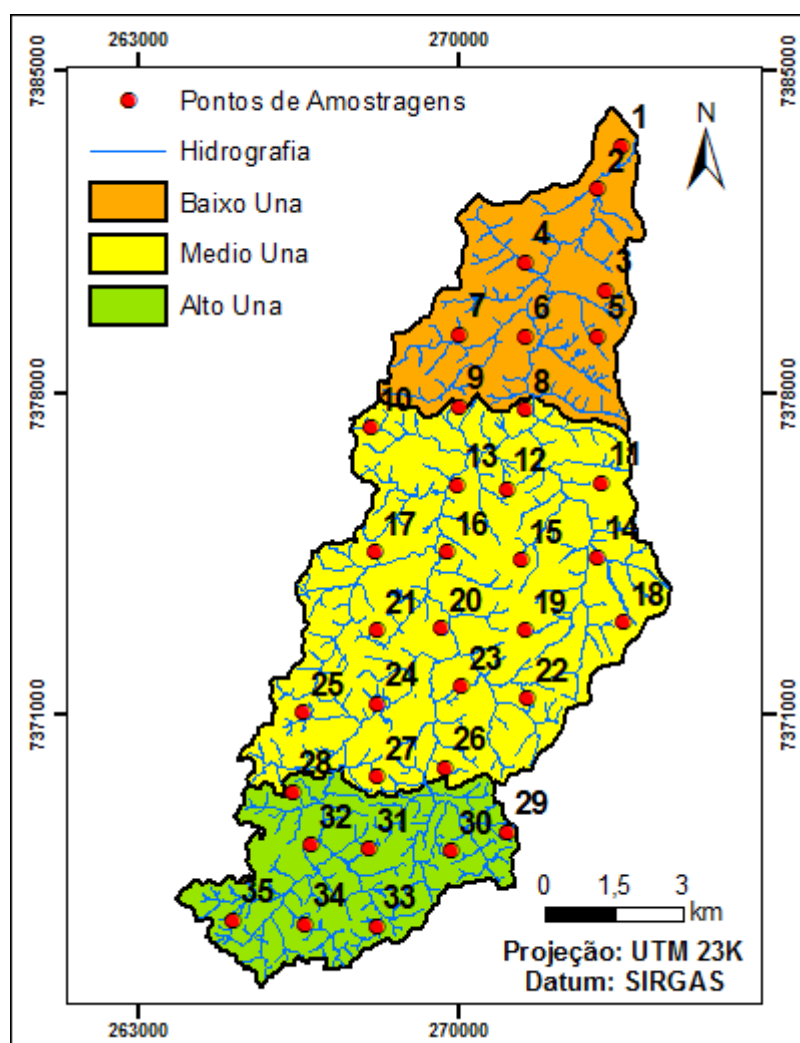
Tabela 2. Número de pontos de amostragem presentes no Baixo, Médio e Alto Una

Classes de Uso do Solo e Cobertura Vegetal	Baixo	Médio	Alto	Total
Agricultura com Culturas Temporárias	1	5	1	7
Agricultura com Culturas Perenes	1	3	1	5
Campos Sujos	1	3	1	5
Área Florestal	3	6	3	12
Pastagens	1	3	2	6
Total	7	20	8	35

Fonte: Org.: dos Autores, 2017.

Uma vez definido a quantidade de pontos de amostragens para cada uso do solo por compartimento da Bacia Hidrográfica (Baixo, Médio e Alto Una) foi distribuído os pontos espacialmente, levando em consideração o uso do solo, o espaçamento entre os pontos de amostragens de forma a buscar uma distribuição destes em uma malha regular para favorecer a interpolação dos dados (YAMAMOTO; LANDIM, 2013), além da proximidade com estradas para facilitar o acesso aos pontos coleta do solo. Não foram consideradas as classes de solo existentes para alocação dos pontos de amostragens, pois a base cartográfica disponível têm uma escala pequena (1:500.000) e indica apenas três classes de solo para a área estudada, não sendo, portanto, representativa para este estudo.

A Figura 2 mostra a distribuição dos pontos de amostragens do solo ao longo da Bacia Hidrográfica do Rio Una.

Figura 2. Localização dos pontos de amostragens na Bacia Hidrográfica do Rio Una

Fonte: Org.: dos Autores, 2017.

Análise Estatística Espacial dos Pontos Amostrados

A coleta do solo foi realizada em outubro de 2015. Nesse processo foi utilizado um GPS de navegação da marca Garmim modelo Etrex Vista para localização e locomoção na área de estudo, bem como um trado de caneco, um enxadão e uma pá para a coleta de solo na profundidade de 0 a 20 cm, conforme recomendações técnicas contidas no Boletim Técnico 100 do Instituto Agrônomo de Campinas - IAC (RAIJ et al., 1996). As análises foram realizadas nos laboratórios do IAC segundo os métodos de análise contidos no Boletim Técnico 106 desse instituto (CAMARGO et al., 2009).

O solo é um dos recursos naturais de maior importância cuja heterogeneidade, decorrente do processo de formação natural e do uso e manejo antrópico, reflete na variabilidade de seus atributos físicos e químicos. Por isso, a geoestatística foi utilizada para avaliar a variabilidade espacial dos atributos do solo estudados como potássio, fósforo, cálcio, magnésio, matéria orgânica (MO), Potencial Hidrogeniônico (pH), Capacidade de Troca Catiônica (CTC) e Saturação por Bases do Solo (V), sendo a dependência espacial expressa através da função de semivariância $\hat{\gamma}(h)$, estimada pela Equação (3):

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (3)$$

Sendo:

$N(h)$ são os valores amostrados de um determinado atributo do solo estudado, $Z(x_i)$ e $Z(x_i+h)$, separados pela distância h .

O gráfico de $\hat{\gamma}(h)$ versus os valores correspondentes de h é chamado de semivariograma (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

Constatada a presença de dependência espacial entre os dados, foram realizadas inferências para estimar os valores dos atributos do solo estudados em locais não amostrados e depois confeccionado os mapas da distribuição destes atributos na Bacia Hidrográfica do Rio Una. Para isso, utilizou-se o método de interpolação da Krigagem ordinária que utiliza um estimador linear não viciado com mínima variância e leva em consideração a estrutura de variabilidade encontrada para o atributo (YAMAMOTO; LANDIM, 2013) sendo definido pela Equação (4):

$$Z_{KO}^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (4)$$

Sendo:

Z_{KO}^* é o estimador para um ponto (x_0) da região;

λ_i ($i=1,n$) são os pesos usados na estimativa;

$Z(x_i)$ ($i=1,n$) é o conjunto de n dados disponíveis.

A construção do estimador, na Krigagem ordinária, não requer o conhecimento inicial da média estacionária da amostragem, porém requer que a soma dos pesos ($\sum_{i=1}^n \lambda_i$) seja igual a 1. Uma necessidade da Krigagem ordinária é que os valores amostrados não apresentem tendência, portanto, foi avaliado se o conjunto de dados apresentava ou não tendência (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

Para análise geoestatística, os modelos teóricos usados para ajuste foram: esférico, exponencial e gaussiano. A validação e escolha do modelo mais adequado foi baseada na média dos erros (ME), na média dos erros de predição padronizados (MS), raiz quadrada da média do quadrado das diferenças entre os valores estimados e o verdadeiro (*Root-Mean-Square – RMS*), erro padrão da média do erro de predição (*Average Standard Error – ASE*) e raiz quadrada da média do quadrado das diferenças entre os valores estimados e o verdadeiro padronizado (*Root-Mean-Square-Standardized – RMSS*). Para predições não viesadas (que representam o valor real), ME e MS devem ter valores próximos de zero e RMS e ASE tenham valores próximos, o que diminui a incerteza associada quanto às predições e, ainda, para uma maior acurácia RMS deve apresentar baixos valores, o que indica uma menor variabilidade entre os valores preditos e os respectivos valores verdadeiros. Para o valor de RMSS, se for superior a 1, a variabilidade da predição está sendo subestimada, caso contrário, superestimada, assim o valor ideal é o mais próximo possível de 1 (TATALOVICH *et al.*, 2006; GEORGAKARAKOS; KITSIOU, 2008; PASINI *et al.*, 2014).

Essa análise foi desenvolvida no *software* ArcGIS 10.1. Esse ajuste permitiu a partir do semivariograma definir os seguintes parâmetros: efeito pepita (C_0), patamar (C) e alcance (a). O alcance é a distância a partir da qual não ocorre mais dependência espacial entre as amostras, enquanto, o efeito pepita é o valor da função na origem ou descontinuidade do semivariograma. Já o patamar, por sua vez, consiste no valor onde o

semivariograma se estabiliza e as amostras se tornam independentes (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

Além disso, foi verificado se havia casos de anisotropias, o que significa dizer que há direções privilegiadas que condicionam a gênese do fenômeno, a qual é percebida nos semivariogramas quando o alcance ou o patamar, ou ambos, variam conforme a direção. Para isso, foram gerados os semivariogramas direcionais, e as direções frequentemente utilizadas são 0°, 45°, 90° e 135° com tolerância angular de 22,5° (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

Para avaliar a dependência espacial do fenômeno utilizou-se o Índice de Dependência Espacial (IDE) proposto por Cambardella *et al.* (1994) que utiliza o efeito pepita (C_0) e a contribuição (C) em seus cálculos, sendo expresso pela Equação (5) com a seguinte classificação para os seus valores: se $IDE \leq 25\%$ o fenômeno tem forte dependência espacial; entre 25% e 75% tem dependência espacial moderada e $\geq 75\%$ tem fraca dependência espacial.

$$IDE = \left(\frac{C_0}{C_0 + C} \right) \times 100 \quad (5)$$

Segundo as conclusões de Corá *et al.* (2004), Silva *et al.* (2008) e Souza *et al.* (2010), este interpolador é o que apresenta os melhores resultados para estimar a distribuição de atributos físicos e químicos dos solos, razão pela qual foi utilizado nesse estudo.

Índice do Estado Ambiental do Solo

Para gerar o indicador de qualidade do solo, os mapas com a distribuição dos atributos do solo foram classificados segundo faixas de valores estabelecidas pelo Instituto Agrônomo de Campinas (IAC) e pela Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais que estudam a

fertilidade dos solos nos Estados de São Paulo e Minas Gerais (RAIJ *et al.*, 1996; RIBEIRO *et al.*, 1999).

A Tabela 3 mostra as faixas com classificações de muito baixa a muito alto de fertilidade do solo para fins de agricultura que foram usadas para compor o índice de sustentabilidade do solo. As unidades de medida dos valores apresentados na Tabela 3 foram convertidas de cmol/dm^3 e mg/dm^3 para $\text{kg}/\text{tonelada}$ de solo e da matéria orgânica de g/dm^3 para $\text{kg}/\text{tonelada}$ de solo (BROWN; HOLME, 2009). A conversão da unidade dos nutrientes e da matéria orgânica foi adotada neste estudo para quantificar, em quilos, a presença desses nutrientes em uma tonelada de solo e, assim, facilitar a percepção e leitura dos mapas por gestores públicos e servir de subsídio para políticas públicas.

Tabela 3. Classificação da fertilidade dos atributos do solo

Parâmetros	Un.	Classificação				
		Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito alto
K ⁽¹⁾	Kg/t	0 a 0,27	0,28 a 0,59	0,60 a 1,17	1,18 a 2,35	> 2,35
P (Matas) ⁽¹⁾	Kg/t	0 a 0,002	0,003 a 0,005	0,006 a 0,008	0,009 a 0,016	> 0,016
Ca ⁽²⁾	Kg/t	0 a 0,08	0,09 a 0,24	0,25 a 0,48	0,49 a 0,80	> 0,80
Mg ⁽²⁾	Kg/t	0 a 0,02	0,03 a 0,05	0,06 a 0,11	0,12 a 0,18	> 0,18
MO ⁽²⁾	Kg/t	≤ 7	7,1 a 20	20,1 a 40	40,1 a 70	> 70
pH ⁽²⁾	-	> 7	6,1 a 7	5,5 a 6,0	4,5 a 5,4	< 4,5
V ⁽¹⁾	%	0 a 25	26 a 50	51 a 70	71 a 90	> 90
CTC ⁽²⁾	mmol/dm^3	≤ 8	8,1 a 23	23,1 a 46	46,1 a 80	> 80

Fonte: Adaptado de ⁽¹⁾Raij *et al.* (1996) e ⁽²⁾Ribeiro *et al.* (1999).

Os mapas que apresentavam a distribuição dos atributos do solo foram reclassificados conforme as classes presentes na Tabela 3 e atribuído valores a essas faixas de classificações que variavam de 1 a 5, onde 1 indicava péssima qualidade e 5 ótima qualidade conforme pode ser visto na Tabela 4. Somente aos valores do pH do solo foram atribuídos valores diferentes aos demais atributos, uma vez que, segundo a Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, valores entre 5,5 a 6,0 são

considerados adequados, enquanto que, os valores que não se encontram dentro desse intervalo são considerados inadequados. Para os valores de pH classificados como adequado foi atribuído valor igual a 5 e para os classificados como inadequado valor igual a 1.

Tabela 4. Valores numéricos das classes de qualidade dos atributos do solo

Parâmetros	Classificação				
	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
K	1	2	3	4	5
P (Matas)	1	2	3	4	5
Ca	1	2	3	4	5
Mg	1	2	3	4	5
MO	1	2	3	4	5
pH	1	1	5	1	1
V	1	2	3	4	5
CTC	1	2	3	4	5

Fonte: Org.: dos Autores, 2017.

Para o cálculo final do índice de sustentabilidade do solo foi utilizado todos os planos de informação dos atributos do solo classificados. Foi calculada a média entre esses planos de informação resultando no plano de informação do Índice do Estado Ambiental do Solo (IEAS) com valores que podem variar de 1 a 5. Para essa operação algébrica foi utilizado a ferramenta Map Algebra do ArcGIS 10.1. Posteriormente, esse plano de informação resultante foi escalonado utilizando a Equação (6) para que o valor final do índice de qualidade do solo variasse de 0 a 1.

$$IEAS_{esc} = 0,25 \times IEAS - 0,25 \quad (6)$$

Sendo:

$IEAS_{esc}$ é o valor final escalonado do Índice de Sustentabilidade Ambiental do Solo;

IEAS é o valor do Índice de Sustentabilidade Ambiental do Solo.

Resultados e discussões

Através dos parâmetros mostrados na Tabela 5 da análise geoestatística efetuada por meio do ajuste do modelo teórico ao semivariograma experimental é possível observar que os atributos do solo estudados apresentaram forte dependência espacial por meio do cálculo do IDE (CAMBARDELLA *et al.*, 1994). Dentre os modelos teóricos utilizados, os apresentados na Tabela 5 são os com valores de ME e MS mais próximos de zero e mais semelhantes de RMS e ASE, o que diminui a incerteza associada às predições, somente o CTC apresentou variação superior a 1% e próxima de 3,6%. Entretanto, Ca, MO, V e CTC apresentaram valores altos de RMS indicando uma alta variabilidade entre os valores preditos e verdadeiros. Em relação aos valores de RMSS, todos os atributos do solo estudados apresentaram valores próximos do ideal que é igual a 1 (TATALOVICH *et al.*, 2006; GEORGAKARAKOS; KITSIOU, 2008; PASINI *et al.*, 2014).

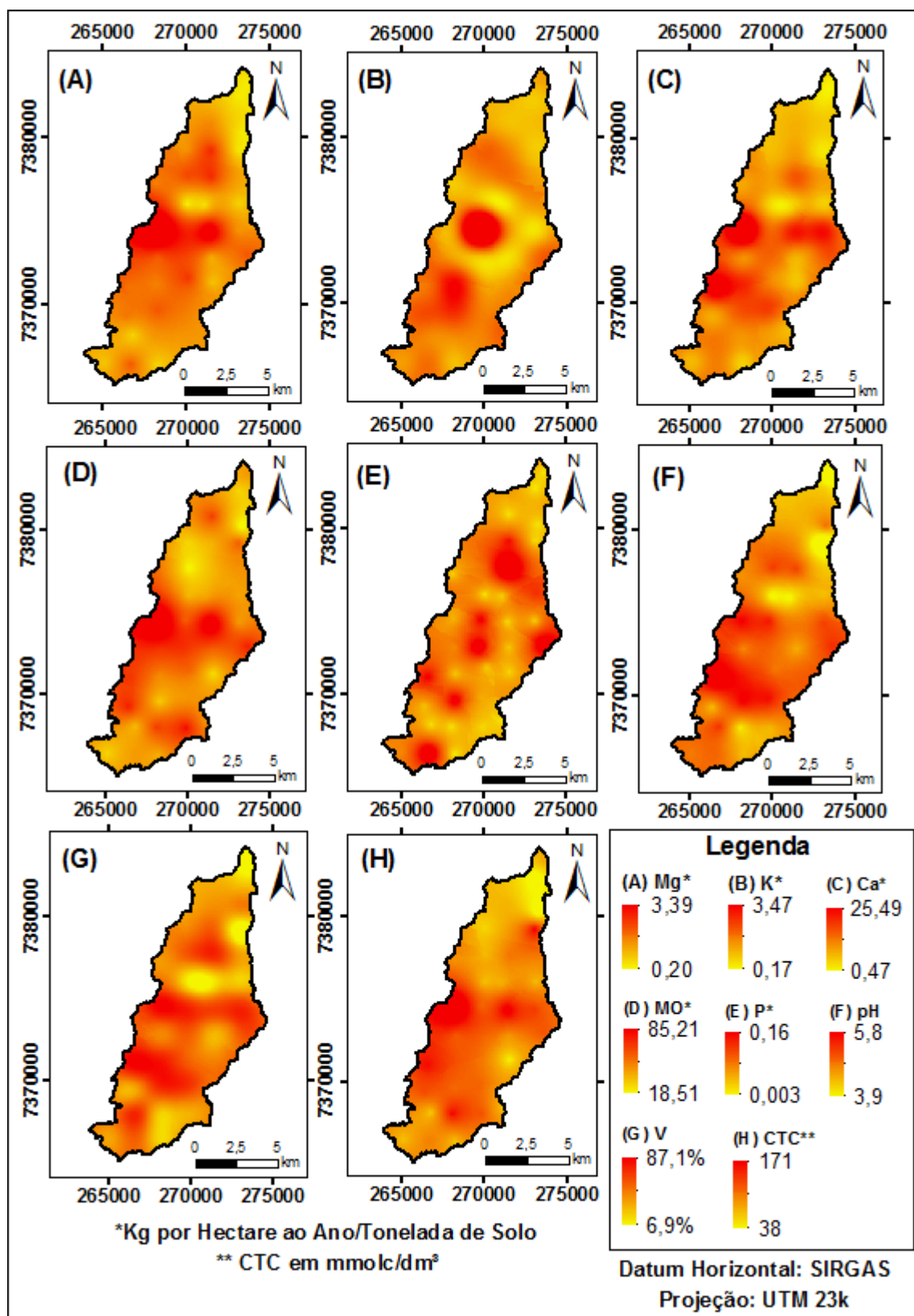
Tabela 5. Parâmetros da análise geoestatística dos atributos do solo

Atributo	Modelo	C ₀	C	a(m)	IDE(%)	ME	MS	RMS	ASE	RMSS
Ca	Gaussiano	0,8	24,48	1600	3,2%	0,069	0,017	5,289	5,289	0,993
Mg	Exponencial	0,03	0,59	4200	4,8%	0,010	0,014	0,709	0,707	1,008
K	Gaussiano	0,07	0,48	2000	12,7%	0,015	0,019	0,784	0,778	1,031
P	Exponencial	10 ⁻⁵	0,0018	2000	0,6%	-0,001	-0,031	0,044	0,043	1,024
MO	Exponencial	3,56	236,31	4000	1,5%	0,054	0,008	14,72	14,56	1,012
pH	Exponencial	0,09	0,3	4200	23,1%	-0,005	-0,008	0,586	0,585	1,014
V	Gaussiano	37	490	1910	7,0%	0,58	0,03	23,33	23,31	1,018
CTC	Exponencial	120	960	3200	11,1%	0,118	0,006	33,09	31,89	1,037

Fonte: Org.: dos Autores, 2017.

A Figura 3 mostra os mapas com a distribuição espacial dos atributos do solo estudados.

Figura 3. Mapas com a distribuição dos atributos do solo

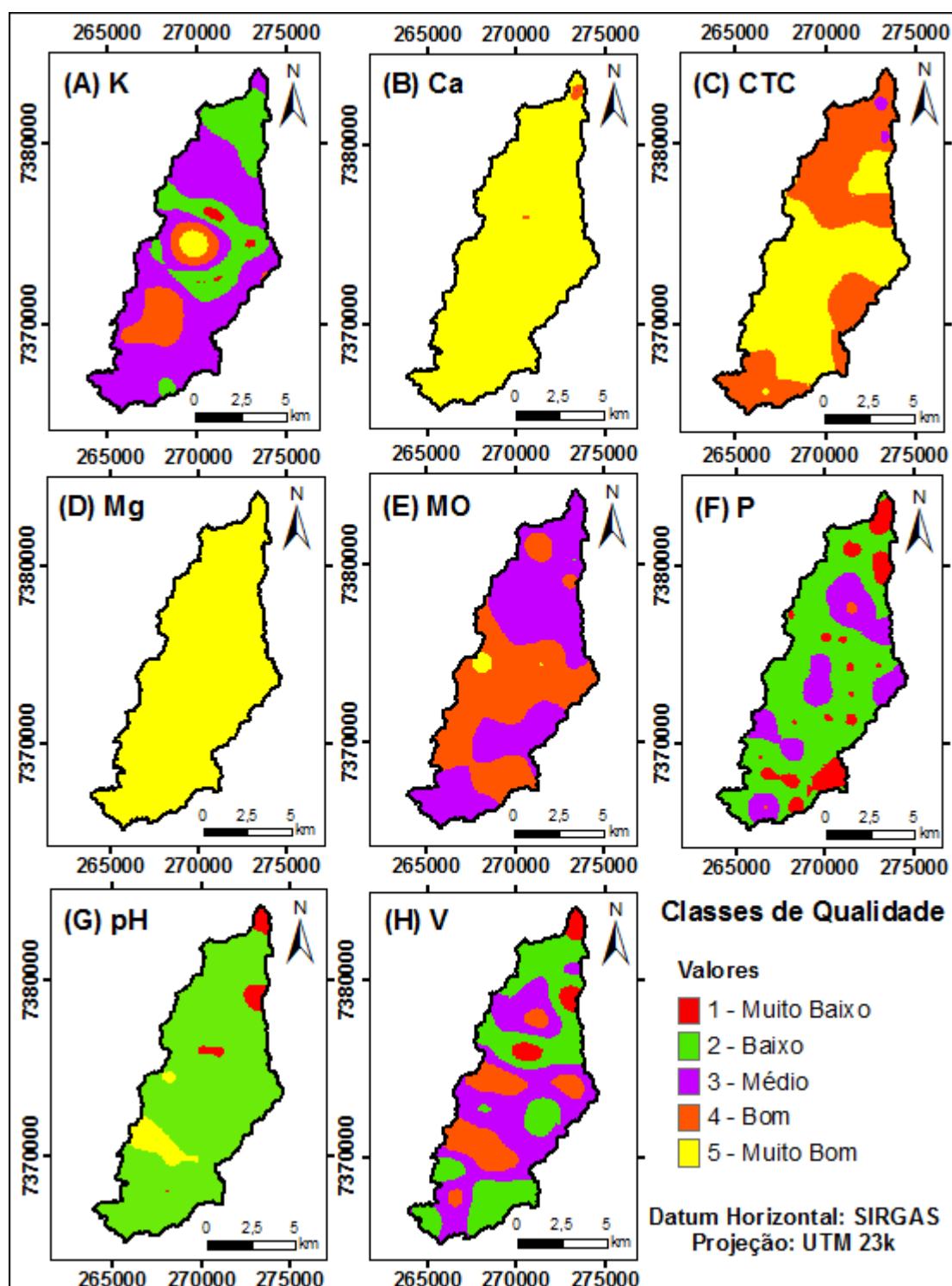


Fonte: Org.: dos Autores, 2017.

Percebe-se para todos os atributos do solo que sua intensidade é mais acentuada na região central da área de estudo, ou seja, no médio Una, onde a atividade agrícola pode estar interferindo nos valores encontrados devido ao uso de fertilizantes (SILVA *et al.*, 2017). Entretanto, é possível observar que o fósforo (P) apresenta também alta concentração na região sul do baixo Una, possivelmente devido à alta presença de atividades agrícolas que utilizam fertilizantes enriquecidos com fósforo nessa região.

A Figura 4 mostra a distribuição dos valores das classes de qualidade dos atributos do solo.

Figura 4. Distribuição dos valores das classes de qualidade dos atributos do solo



Fonte: Org.: dos Autores, 2017.

A Tabela 6 mostra a distribuição, em porcentagem, das classes de qualidade para cada um dos atributos do solo estudados. Percebe-se que o

único atributo que apresenta valores inadequados é o pH, pois a faixa considerada como adequada para o pH apresenta um intervalo pequeno e, também devido ao fato da área de estudo ser predominante coberta por latossolos (SILVA *et al.*, 2017), os quais são normalmente ácidos e apresentam teores de fósforo disponível extremamente baixo (EMBRAPA, 2018).

Tabela 6. Distribuição das classes de qualidade dos atributos (em %) do solo

Parâmetros	Muito baixo (1)	Baixo (2)	Médio (3)	Bom (4)	Muito Bom (5)
K	0,934	26,440	59,062	11,740	1,824
P (Matas)	11,252	66,465	21,907	0,375	-
Ca	-	-	0,002	0,604	99,394
Mg	-	-	-	-	100
pH	98,102	-	-	-	1,898
V	4,598	38,607	41,513	15,281	-
MO	-	0,025	53,474	45,470	1,032
CTC	-	-	0,721	46,530	52,75

Fonte: Org.: dos Autores, 2017.

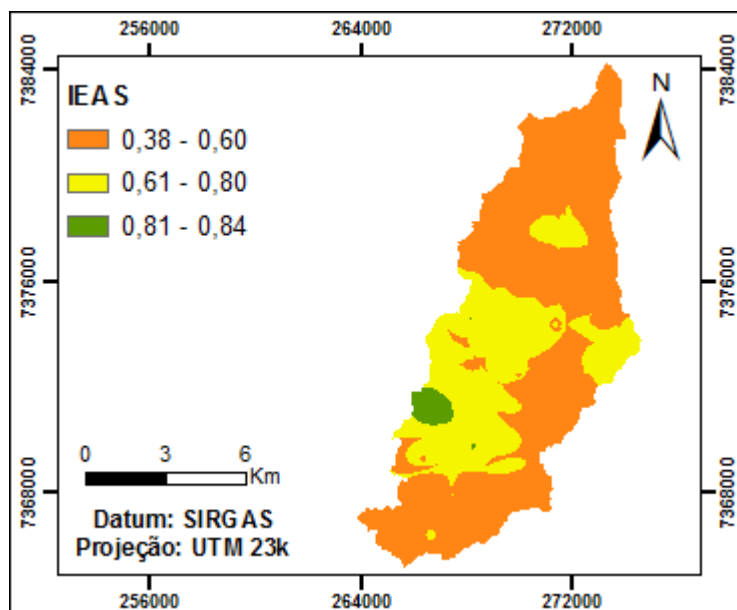
Em relação ao fósforo, é possível observar que há uma carência na Bacia Hidrográfica do Rio Una, sendo que os altos valores encontrados ocorrem em regiões com alta presença de agricultura. O Ca e o Mg são os atributos do solo que apresentam as maiores concentrações classificadas como muito alto. Com exceção do pH e do P, todos os outros atributos apresentaram porcentagens acima da classe média indicando uma boa qualidade do solo.

Em relação à perda de nutrientes por erosão hídrica e outros processos, pode-se afirmar que há um déficit de fósforo na Bacia Hidrográfica em estudo e que a perda desse nutriente apresenta um custo elevado para a Bacia Hidrográfica, primeiramente devido ao custo financeiro para sua reposição na agricultura e, também, porque ao atingir os corpos de água pode ocasionar ou desencadear processos de eutrofização, que além de esteticamente desagradável, causa problemas de odor, sabor e floração de

cianobactérias que produzem diferentes tipos de toxinas impactantes à saúde humana (PEREIRA *et al.*, 2013).

A Figura 5 apresenta o mapa com a distribuição dos valores de IEAS.

Figura 5. Mapa de distribuição dos valores de IEAS



Fonte: Org. dos autores.

De acordo com o mapa da Figura 5 é possível observar que aproximadamente 65% da área da Bacia Hidrográfica do Rio Una está classificada como regular, isto é, encontram-se na faixa de 0,38 a 0,60. Não houve valores inferiores a 0,38 que neste estudo é classificado como péssimo e ruim. Os valores classificados entre 0,61 a 0,80 podem ser classificados como bons e correspondem a aproximadamente 33% da área de estudo, enquanto que, somente 2% da área de estudo apresentam valores classificados como ótimos.

A região sul e norte da bacia hidrográfica foram as que apresentaram os menores valores de IEAS, sendo que está é a região onde se concentra a área urbana do município e a foz do rio Una. Enquanto que, na região sul há presença de atividades agrícolas e é onde o relevo é mais acidentado, o que

facilita o carreamento de sedimentos e, conseqüentemente, nutrientes do solo quando o manejo do uso do solo é realizado de forma irresponsável.

A região central onde se encontra os valores de IEAS superiores a 0,81 está inserida em áreas com presença de florestas nativas, o que pode justificar a preservação do solo quanto a concentração de nutrientes essenciais ao desenvolvimento das plantas e, por conseguinte, a conservação do solo.

Conclusão

Pode-se afirmar que dentre os nutrientes do solo analisados há um déficit de fósforo na bacia hidrográfica em estudo. Esse déficit pode estar associado ao manejo agrícola inadequado, visto que as áreas com menores concentrações de P estão localizadas em áreas agrícolas ou devido ao fato do tipo de solo predominante na bacia hidrográfica ser latossolo que é naturalmente pobre em P e ácido, o que explica os valores de pH baixos, isto é, classificados como inadequados.

O valor médio do IEAS para a bacia hidrográfica foi de 0,57; podendo ser classificado como regular, porém há valores do IEAS classificados como bom à excelente para 35% da área de estudo indicando que a Bacia Hidrográfica está pouco degradada, fato comprovado pela taxa de ocupação por matas na área de estudo que corresponde a 41% de sua extensão territorial.

Através das informações levantadas neste estudo, pode-se concluir que o IEAS é uma ferramenta importante para a gestão do solo em bacias hidrográficas, pois permite interpretar numericamente o estado do solo, além de poder servir como um instrumento de tomada de decisão para gestores públicos e interessados nessa questão.

Referências

- ALVARENGA, C. C.; MELLO, C. R.; MELLO, J. M.; SILVA, A. M.; CURI, N. Índice de qualidade do solo associado à recarga de água subterrânea (IQSRA) na Bacia Hidrográfica do Alto Rio Grande, MG. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, v. 36, n. 5, p. 1608-1619, 2012.
- ARAÚJO, E.; KER, J.; NEVES, J.; LANI, J. Qualidade do solo: conceitos, indicadores e avaliação. **Applied Research & Agrotechnology**, v. 5, n. 1, p. 187-206, 2012. <https://doi.org/10.5777/PAeT.V5.N1.12>
- BROWN, L. S.; HOLME, T. A. **Química geral aplicada à engenharia**. São Paulo: Cengage Learning, 2009. 656p.
- CAMARGO, O. A.; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. A. S. **Métodos de Análise Química, Mineralógica e Física de Solos do Instituto Agrônomo de Campinas**. Campinas, Instituto Agrônomo/Fundação IAC, 2009. 77p. (Boletim técnico, 106).
- CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVACK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO R. F.; KNOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society America Journal**, v. 58, n. 5, p.1501-1511, 1994. <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x>
- CARTER, M. R. Organic matter and sustainability. In: REES, B. C.; BALL, B. C.; CAMPBELL, C. D.; WATSON, C. A. **Sustainable management of soil organic**. Wallingford, CAB International, 2001. p.9-22. <https://doi.org/10.1079/9780851994659.0009>
- CORÁ, J. E.; ARAÚJO, A. V.; PEREIRA, G. T.; BERALDO, J. M. G. Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cultura de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 6, p. 1013-1021, 2004. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000600010>
- DEPONTI, C. M.; ECKERT, C.; AZAMBUJA, J. L. B. Estratégia para construção de indicadores para avaliação da sustentabilidade e monitoramento de sistemas. **Agroecologia e Desenvolvimento Rural Sustentável**, Porto Alegre, v.3, n.4, p.44-52, 2002.
- DORAN, J. W. PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J. W.; COLEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. F.; STEWART, B. A. **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison, SSSA, 1994. p.1-20. (Special, 35)
- EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Latossolos. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Agencia16/AG01/arvore/AG01_96_10112005101956.html>. Acesso em 15 ago 2018.
- GEORGAKARAKOS, S.; KITSIOU, D. Mapping abundance distribution of small pelagic species applying hydroacoustics and Co-Kriging techniques. **Hydrobiologia**, v. 612, n. 1, p. 155-169, 2008. <https://doi.org/10.1007/s10750-008-9484-z>
- MAIA, C. E. Qualidade ambiental em solos com diferentes ciclos de cultivo do meloeiro irrigado. **Ciência Rural**, v. 43, n. 4, p. 603-609, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782013000400007>
- MARZALL, K.; ALMEIDA, J. Indicadores de sustentabilidade para agroecossistemas: estado da arte, limites e potencialidades de uma nova ferramenta para avaliar o desenvolvimento sustentável. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, Brasília, v.17, n.1, p.41- 59, 2000.

- MOLLER, A. P. Environmental Indicators of Biological Urbanization. In: **Environmental Indicators**. Springer Netherlands, 2015. p. 421-432. https://doi.org/10.1007/978-94-017-9499-2_25
- MONTEIRO, A. C. G.; PONCIANO, N. J. Índice da qualidade do solo com cana-de-açúcar colhida crua e queimada. **InterSciencePlace**, v. 20, n. 4, p. 58-70, 2012. <https://doi.org/10.6020/1679-9844/2004>
- MOTOMIYA, A. V. A.; EDUARDO, J. Uso da krigagem indicatriz na avaliação de indicadores de fertilidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 3, p. 485-496, 2006. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832006000300010>
- PASINI, M. P. B.; LÚCIO, D. A.; CARGNELUTTI FILHO, A. Modelos de semivariogramas para estimar a densidade populacional da mosca-do-figo ao longo do ano. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 49, n. 7, p. 493-505, 2014.
- PEREIRA, P. S.; VEIGA, B. V.; DZIEDZIC, M. Avaliação da influência do fósforo e do nitrogênio no processo de eutrofização de grandes reservatórios. Estudo de caso: Usina Hidrelétrica Foz do Areia. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 1, p. 43-52, 2013. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v18n1.p43-52>
- PULLEMAN, M.; CREAMER, R.; HAMER, U.; HELDER, J.; PELOSI, C.; PERES, G.; RUTGERS, M. Soil biodiversity, biological indicators and soil ecosystem services - an overview of European approaches. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 4, n. 5, p. 529-538, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2012.10.009>
- RAIJ, B. V.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. 2.ed. Campinas, Instituto Agrônomo/Fundação IAC, 1996. 285p. (Boletim Técnico,100)
- RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V, V. H. **Recomendações para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, MG: CFSEMG/UFV, 1999. 359p.
- SEADE - Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados. Informação dos Municípios Paulistas (IMP). Disponível em: <<http://www.imp.seade.gov.br/frontend/#/>>. Acesso em: 20 Jan. 2017.
- SILVA, D. C. C.; ALBUQUERQUE FILHO, J. L.; SALES, J. C. A.; LOURENÇO, R. W. Uso de indicadores morfométricos como ferramentas para avaliação de bacias hidrográficas. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 2, p. 221-217, 2016.
- SILVA, D. C. C.; ALBUQUERQUE FILHO, J. L.; SALES, J. C. A.; LOURENÇO, R. W. Identificação de áreas com perda de solo acima do tolerável usando NDVI para o cálculo do fator C da USLE. **Raega - O Espaço Geográfico em Análise**, v. 42, p. 72-85, 2017.
- SILVA, S. D. A.; SOUZA LIMA, J. S. D.; SOUZA, G. S. D.; OLIVEIRA, R. B. D. Avaliação de interpoladores estatísticos e determinísticos na estimativa de atributos do solo em agricultura de precisão. **Idesia (Arica)**, v. 26, n. 2, p. 75-81, 2008.
- SOUZA, G. D.; LIMA, J. D. S.; XAVIER, A. C.; ROCHA, W. D. Krigagem ordinária e inverso do quadrado da distância aplicados na espacialização de atributos químicos de um argissolo. **Scientia Agraria**, v. 11, n. 1, p. 73-81, 2010. <https://doi.org/10.5380/rsa.v11i1.15939>
- TATALOVICH, Z.; WILSON, J. P.; COCKBURN, M. A comparison of thiessen polygon, kriging, and spline models of potential UV exposure. **Cartography and Geographic Information Science**, v. 33, n. 3, p. 217-231, 2006. <https://doi.org/10.1559/152304006779077318>

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Uma visão sobre qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 4, p. 743-755, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000400001>

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística**: conceitos e aplicações. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. 215p.