

Distribuição das taxas de infiltração em áreas afetadas por processos erosivos acelerados e recobertas por materiais antropogênicos

Infiltration distribution rates on areas affected by rapid erosive process and covered by anthropogenic materials

Dener Toledo Mathias¹ , Cenira Maria Lupinacci² , Rodrigo Braga Moruzzi^{2*} 

RESUMO

Este artigo busca avaliar a distribuição das taxas de infiltração na dinâmica de áreas afetadas por processos erosivos acelerados e recobertas por material antropogênico. Foram realizados ensaios de infiltração com o uso de infiltrômetro em pontos distribuídos na área de investigação. Os dados foram ajustados à função de decaimento de Horton, e seus parâmetros, correlacionados com atributos do meio físico e do modelo digital do terreno por meio do coeficiente de correlação de Pearson. Os resultados permitiram constatar grande variabilidade das taxas de infiltração, decorrentes das complexidades geradas pelas diversas obras de contenção, com diferentes variáveis morfológicas, granulométricas e de uso da terra, nos diferentes setores amostrados. Apesar da variação espacial dessas taxas, a avaliação setorizada, coerente com as características do meio físico, permitiu a constatação das principais variáveis que interferem nos parâmetros representativos das taxas de infiltração. Assim, em setores de baixa vertente, há correlação forte entre as taxas de infiltração e a areia fina, assim como entre essas taxas e a distância do rio. Já nos setores de alto declive e pastagem, tais correlações são altas entre as taxas de infiltração final e os materiais finos (argila e argila + silte). Em setores de alta vertente, sem cobertura vegetal, as correlações mais fortes ocorrem entre a infiltração final e o fluxo de escoamento superficial acumulado. Tais dados apontam, portanto, para a complexidade do próprio fenômeno, que depende tanto das características dos materiais de superfície e da morfologia dos terrenos quanto da situação específica da área.

Palavras-chave: erosão linear; taxas de infiltração; coberturas tecnogênicas; voçoroca; escoamento superficial; granulometria dos materiais.

ABSTRACT

In this paper, infiltration distribution rates were evaluated on areas affected by accelerated erosive processes and covered by anthropogenic material. Infiltration tests were performed at several samples distributed in the area. The data were adjusted to the Horton decay function, and its parameters were correlated with attributes of the physical environment and the terrain digital model, using the Pearson correlation coefficient (r). Results pointed out great variability of infiltration rates, due to the complexities generated by several structural interventions in the different sectors sampled, with different morphological, granulometric and land use variables. The analysis made sector by sector here proposed allowed verifying the main variables that interfere in the parameters that represent the infiltration rates, in spite of the spatial variability for infiltration rates. In low-slope sectors, there was a strong correlation between infiltration rates and sand, as well as between these rates and river distance. In high slope and grassland areas, such correlations are high between the final infiltration rates and the fine materials (clay and clay + silt). In high-slope areas with no vegetation coverage, the strongest correlations occur between the final infiltration and the cumulative runoff flow. Therefore, results here presented emphasize that both the characteristics of the cover materials and the morphology of the land are determinant for data analysis.

Keywords: linear erosion; infiltration rates; tectonic covers, erosion, runoff, granulometry.

INTRODUÇÃO

O conhecimento acerca da dinâmica da água que infiltra nos solos é relevante para avaliar parâmetros de drenagem e para compreender sua relação

com o desenvolvimento de processos erosivos, principalmente daqueles vinculados à erosão em sulcos (ou erosão linear), que podem evoluir para ravinas e voçorocas. Assim, a taxa de infiltração, que representa a

¹Universidade Federal de Mato Grosso - Cuiabá (MT), Brasil.

²Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" - Rio Claro (SP), Brasil.

*Autor correspondente: rmoruzzi@rc.unesp.br

Recebido: 08/08/2016 - Aceito: 22/06/017 - Reg. ABES: 167570

velocidade com que a água penetra no solo, constitui um dado importante que reflete indiretamente no grau de compactação deste. Desse modo, considera-se que a avaliação da infiltração no solo pode auxiliar no entendimento da dinâmica erosiva, visto que, quanto menor a taxa de infiltração, maior a possibilidade de escoamento superficial direto e, portanto, de ações erosivas sobre os terrenos. De maneira oposta, em áreas já atingidas por avançados processos erosivos lineares, registrados pelos voçorocamentos, altas taxas de infiltração podem indicar acréscimo da circulação das águas de subsuperfície e, assim, maior possibilidade de geração de *pipes* e alcovas de regressão nas paredes da voçoroca, contribuindo para a dinamização da forma erosiva.

Tais premissas são ainda reforçadas ao se levarem em conta terrenos marcados por intensa remobilização dos perfis superficiais do solo, situação comum às áreas submetidas a obras visando ao controle de processos erosivos. Neste trabalho, adota-se o termo *coberturas tecnogênicas* para caracterizar os materiais assim remobilizados, os quais já não apresentam comportamento pedogenético tradicional, atingindo profundidades variáveis de materiais depositados pela ação antrópica. Os processos erosivos e a perda do solo gerada por esses escoamentos são temas desafiadores no âmbito da engenharia e carecem de investigações (MENDIONDO & TUCCI, 1997; MÁRKER *et al.*, 2008; Lesschen; CAMMERAAT; NIEMAN, 2008; CEbecauer & Hofierka, 2008; SILVA *et al.*, 2010; MACHADO *et al.*, 2014; GARCÍA-RUIZ *et al.*, 2015; DUAN; HUANG; ZHANG, 2016).

Diante dessas considerações, os objetivos deste artigo foram avaliar a variabilidade espacial das taxas de infiltração registradas na baixa bacia do córrego Tucunzinho (São Pedro, SP), área afetada por extenso processo erosivo, e correlacionar tais taxas com atributos do meio físico e do modelo digital do terreno em busca de informações que auxiliem no entendimento da dinâmica de áreas afetadas por processos erosivos acelerados e recobertas por materiais de origem tecnogênica. Ressalta-se que o presente estudo se pautou na avaliação estatística de dados preexistentes, apresentados por Mathias, Lupinacci e Moruzzi (2015). Portanto, trata-se da apresentação de resultados de um estudo mais detalhado realizado pelos mesmos autores.

Crê-se importante discutir e avaliar os processos de infiltração em situações tais como a que ocorre na área de estudo, uma vez que esses processos podem contribuir para o avanço das formas erosivas. Além disso, cenários de complexas intervenções antrópicas, como o estudado, são cada dia mais comuns nas áreas periurbanas do interior paulista, demandando estudos que visem diagnosticar a dinâmica que se desenvolve nessas situações e, principalmente, avaliar o motivo da ineficácia de muitas práticas tradicionais de contenção dos processos erosivos.

CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO E DAS FORMAS EROSIVAS

A baixa bacia do córrego Tucunzinho possui área de 946.330 m² e localiza-se na porção central do estado de São Paulo, inserida

na periferia da área urbana do município de São Pedro (Figura 1). Essa área caracteriza-se pela predominância de litologia sedimentar (arenitos fluviolacustres da Formação Piramboia, conforme IPT, 1981) e solos friáveis, tais como argissolos e neossolos quartzarênicos, atributos que conferem suscetibilidade natural ao desencadeamento erosivo. As formas de relevo apresentam-se como colinas suavizadas, com topos tabulares e vertentes com relevante comprimento de rampa, cedendo abruptamente aos fundos de vale em virtude da ocorrência de formas erosivas, expressas em ampla voçoroca e ravinaamentos adjacentes. O próprio córrego em questão tem sua dinâmica associada à evolução dos processos erosivos, uma vez que seu regime hidrológico se vincula ao afloramento do nível freático e às formas de erosão de caráter subsuperficial (*pipes*).

As formas erosivas presentes na área, segundo Mathias, Cunha e Moruzzi (2013), se devem tanto às fragilidades litopedológicas como ao uso da terra, efetuado ao longo de décadas de exploração agrícola e urbanização, entretanto ressalta-se que um dos aspectos mais marcantes acerca das características da área se refere às inúmeras intervenções por parte da administração pública no sentido de conter os processos de erosão. Tais ações resultaram na mobilização intensa dos horizontes superficiais dos solos e na concepção de terraços. As medidas, efetuadas no decorrer dos últimos 30 anos, mostraram-se ineficazes e terminaram por compor um quadro no qual grande parte dos materiais superficiais se categoriza como coberturas e relevos tecnogênicos, de caráter inconsolidado, os quais vêm a condicionar o comportamento das águas de escoamento (superficial e subsuperficial) e da infiltração de forma a estimular a dinamização erosiva. Assim, conforme informações obtidas por Mathias (2011) com o poder público local, tais intervenções foram realizadas sem a orientação de estudos técnicos, o que pode ter comprometido a dinâmica erosiva local.

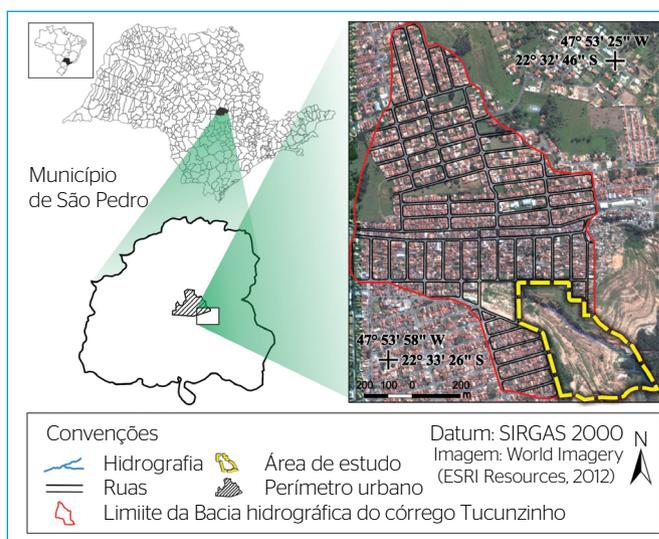


Figura 1 - Localização da área de estudo no contexto do estado de São Paulo e do município de São Pedro.

Aspecto intrínseco à evolução dos processos na área são as características de uso e ocupação da terra, que, aliadas ao quadro de intervenções referido, vêm a ser contribuintes ao desencadeamento erosivo. Constata-se que, na maior parte da bacia, especialmente nas porções alta e média, predomina a urbanização, consolidada em bairros residenciais de forte adensamento (com lotes entre 300 e 500 m²). A periferia da área urbana consiste em antiga pastagem, apresentando-se bastante degradada, com notáveis manchas de solo exposto. É nessa porção da bacia que estão inseridas as feições erosivas. Portanto, trata-se de área caracterizada por alterações antrópicas de vulto, como já dito.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para a obtenção das taxas de infiltração, foram coletados dados com um infiltrômetro de anel único, conforme proposto por Hills (1970), considerando-se as adaptações sugeridas por Guerra (2002). Esse infiltrômetro consiste num tubo de policloreto de vinila (PVC) de 100 mm de diâmetro por 150 mm de comprimento. O tubo contém, em sua parede interna, uma régua graduada, e é introduzido no solo de maneira que fique com um terço de seu comprimento enterrado. Em seguida, é preenchido com água e, então, realiza-se a leitura do tempo que leva para que ocorra a infiltração dessa água no solo, marcando os níveis a cada 30 segundos nas primeiras medições e a cada 1 minuto nas precedentes, até o tempo de 30 minutos. A coleta de dados foi feita em 30 pontos distribuídos pela área, visando à espacialização do parâmetro, os quais foram definidos em função de aspectos topográficos e morfológicos. Com isso, buscou-se avaliar os diferentes setores das vertentes (alta, média e baixa), assim como as áreas contendo formas antrópicas de relevo (terraços) e possível correlação com microformas erosivas (alcovas de regressão, *pipings* etc.) observadas no interior do talude erosivo. A Figura 2 apresenta a localização dos pontos de amostragem em relação à base topográfica, em escala de 1:10.000.

Estipularam-se dois períodos para a coleta dos dados de infiltração: o período de chuvas (verão) e o de estiagem (inverno). Considerou-se necessário avaliar dois períodos em razão de comportamentos diferenciados que podem ser provocados pela umidade antecedente durante o verão. A primeira coleta foi realizada no mês de fevereiro de 2010, e a segunda, em julho do mesmo ano.

A escolha da baixa bacia do córrego Tucunzinho para os ensaios propostos neste estudo pautou-se no fato de ser a área onde há ocorrência das feições erosivas e que se constitui a periferia do setor urbano, cujo uso da terra é restrito às pastagens incipientes, alternando-se com áreas degradadas. Os setores que vêm a compor a média e a alta bacia do córrego em questão são aqueles em que o alto índice de impermeabilização, decorrente do meio urbano, impediu as análises propostas. Outros setores, tais como a área de expansão urbana e a de despejo de resíduos (entulho), também foram desconsideradas, dadas as intervenções constantes nesses setores, que inviabilizavam a realização de experimentos.

Convém esclarecer que, por área degradada, se entende toda a cobertura que se caracteriza pela remobilização dos horizontes superficiais do solo dada em obras pretéritas, compondo, portanto, terrenos cujo material superficial é de gênese antrópica (coberturas tecnológicas), o qual possui um recobrimento incipiente por gramineas intercalado de grandes porções de solo exposto, fatos que vêm a resultar em um quadro de degradação, sobretudo pelos processos erosivos.

A equação clássica de Horton (1939) em sua forma integrada, Equação 1, foi empregada para ajuste não linear dos dados experimentais e obtenção dos parâmetros (f_0 , f_c e k). O ajuste foi realizado por meio da minimização da soma da diferença dos quadrados, utilizando os três parâmetros, correspondentes às taxas inicial e final (f_0 e f_{oo}) e ao coeficiente de potência (k), representativo da constante de decaimento de primeira ordem. Tais ajustes foram sujeitos à restrição dada pela infiltração inicial medida, de modo que o parâmetro f_0 da Equação (1) fosse menor ou igual ao valor máximo medido (f_{max}), ou seja, $f_0 \leq f_{max}$. A equação de decaimento de Horton linearizada foi usada para verificação dos coeficientes angulares, representativos do parâmetro de decaimento (k) da função, conforme Equação 2. Tais resultados foram avaliados por meio de sua variação estatística para intervalo de confiança de 95% (IC95%) e para a distribuição percentil.

$$F(t) = f_c \cdot t + \left[\frac{f_0 - f_c}{k} (1 - e^{-kt}) \right] \quad (1)$$

$$\ln \frac{(f(t) - f_c)}{f_0 - f_c} = -kt \quad (2)$$

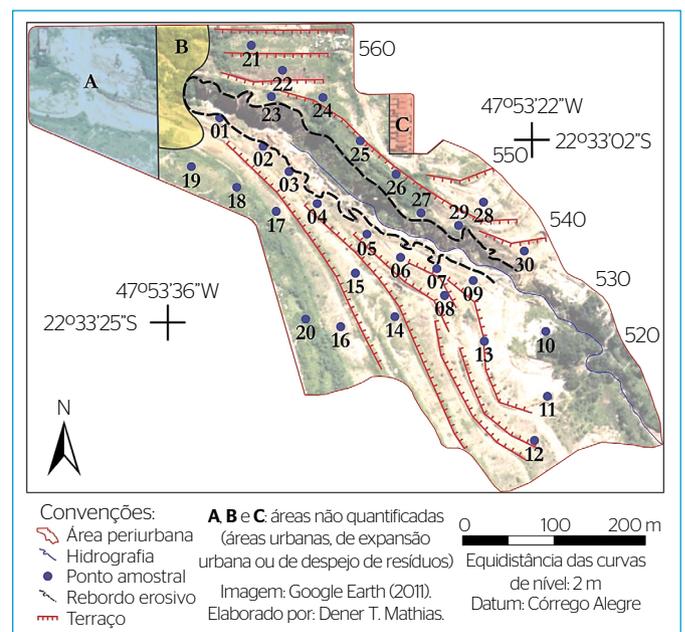


Figura 2 - Pontos de amostragem da infiltração no contexto geomorfológico da área.

Em que:

$F(t)$ = a infiltração acumulada no intervalo de tempo (t), avaliado (mm);

t = o tempo, medido em minutos;

f_0 = a taxa de infiltração inicial em $t=0$ ($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$);

f_c = a taxa de infiltração final, para a qual os valores iniciais tendem assintoticamente ($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$);

k = um parâmetro de ajuste que descreve a intensidade do decaimento da infiltração (min^{-1}).

Posteriormente, foram analisadas as correlações dos parâmetros da equação ajustada de Horton (k), das infiltrações iniciais (f_0) e finais (f_c) com as características do meio físico e com o uso da terra para o conjunto total de dados (Tabela 1) e para os subconjuntos com atributos físicos semelhantes (Tabela 2). Assim, para os parâmetros da equação de Horton, foram obtidos os coeficientes de correlação de Pearson (r) perante os atributos físicos da área, dados por declividade, distância do rio, granulometria do solo (fração de argila, fração de silte, fração de areia grossa, fração de areia fina e fração de areia total) e fluxo acumulado ($flow$), este último obtido por intermédio do modelo digital do terreno. O fluxo acumulado, portanto, refere-se à área (m^2) do entorno, que concentra escoamento superficial para determinado ponto — no caso da Tabela 1, o ponto amostrado.

Os dados dos períodos seco e úmido foram usados nos estudos que envolveram a avaliação geoestatística, pelos quais dados pontuais, com coordenadas conhecidas, foram utilizados para estimar superfícies contínuas. O método geoestatístico utilizado nesse processo foi o da krigagem, em que cada ponto da superfície é estimado por meio da interpolação das amostras mais próximas. Para tanto, usou-se um estimador estatístico do programa Surfer. O procedimento adotado nesse programa encontra-se descrito em Yamamoto e Landim (2013). Como resultado, foram gerados os mapas das taxas de infiltração para os dois períodos já mencionados. Uma vez que a amostragem dos dados de infiltração foi realizada apenas nas áreas adjacentes às formas erosivas, delimitou-se essa área como recorte para a representação cartográfica.

Ainda no que concerne aos objetivos deste estudo, foi elaborada uma carta de fluxo acumulado com base em dados primários de modelo digital do terreno, de acordo com as orientações técnicas de Schauble (2004), que pressupõem a realização de operações algorítmicas em ambiente Sistemas de Informação Geográfica (SIG) sobre um modelo digital de elevação da área. Empregou-se, para tanto, a ferramenta Hydrotools, componente do programa ArcView 3.2. O resultado obtido consistiu na representação de valores de concentração de fluxo por área de contribuição ($flow - \text{m}^2$). Ou seja, foram computadas as relações geométricas entre as células do modelo a fim de obter-se a quantidade em área (m^2), que converge para cada célula individualmente.

Tabela 1 - Características físicas, da granulometria dos solos, da concentração de fluxo e de uso da terra dos pontos amostrados.

Ponto	Uso da terra	Declive (%)	Distância do rio (m)	Fluxo acumulado ($flow$) (m^2)	Silte + argila (%)	Areia fina (%)	Areia total (%)
1	AD	45,0	10,5	120	17,5	17,5	82,5
2	AD	45,0	15,1	30	17,5	17,5	82,5
3	AD	45,0	25,4	300	18,7	16,1	81,3
4	AD	37,5	35,3	300	11,2	18,6	88,8
5	AD	45,0	31,3	300	15,0	26,1	85,0
6	AD	37,5	32,7	300	15,0	26,6	85,0
7	AD	37,5	24,3	300	15,0	26,1	85,0
8	AD	22,5	44,3	120	15,0	26,6	85,0
9	AD	37,5	21,1	300	11,5	23,8	88,5
10	AD	5,0	28,7	30	8,7	18,7	91,3
11	AD	22,5	63,6	120	13,0	38,1	87,0
12	AD	22,5	129,2	300	12,5	30,3	87,5
13	AD	37,5	66,3	300	11,2	32,3	88,8
14	AD	22,5	112,2	300	12,5	31,5	87,5
15	AD	22,5	56,7	3000	16,2	23,6	83,8
16	AD	22,5	102,2	300	16,2	22,8	83,8
17	AD	22,5	68,0	120	15,0	19,3	85,0
18	AD	22,5	79,5	300	16,2	19,3	83,8
19	AD	10,0	70,8	120	16,2	19,3	83,8
20	Pasto	22,5	107,4	30	16,2	22,8	83,8
21	Pasto	22,5	84,0	120	19,2	29,6	80,8
22	Pasto	37,5	71,1	300	18,0	22,3	82,0
23	Pasto	37,5	49,1	300	16,7	17,8	83,3
24	Pasto	22,5	57,8	300	15,5	22,5	84,5
25	Pasto	22,5	45,5	300	11,7	16,1	88,3
26	Pasto	22,5	44,6	300	18,0	19,5	82,0
27	AD	22,5	23,7	3000	13,0	16,2	87,0
28	AD	22,5	57,4	300	16,7	25,5	83,3
29	AD	37,5	27,8	300	13,0	20,6	87,0
30	AD	37,5	31,8	1200	13,7	29,1	86,3

AD: área degradada, sem cobertura de superfície.

Fonte: Mathias, Lupinacci e Moruzzi (2015).

Tabela 2 - Subconjuntos dos pontos de coleta com atributos físicos semelhantes.

Pontos de coleta	Atributos
1 a 5	Posição topográfica de baixa vertente
21 a 24	Posição topográfica da margem esquerda com alto declive e presença de pastagem
12, 14, 16, 17 e 19	Posição topográfica de alta vertente sem cobertura de superfície

Assim, foi possível identificar os setores do terreno que recebem fluxo superficial maior, potencialmente sujeito à maior taxa de infiltração.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 3, são compilados os resultados adaptados de Mathias, Lupinacci e Moruzzi (2015) referentes às taxas de infiltração no tempo, com detalhe das curvas para tempos inferiores a 5 minutos, visando enfatizar os diferentes comportamentos do decaimento. Na mesma figura, com base em análise mais detalhada dos dados apresentados pelos autores citados, avaliaram-se as variações das taxas de infiltração iniciais e finais para IC95%, igualmente apresentadas em detalhe.

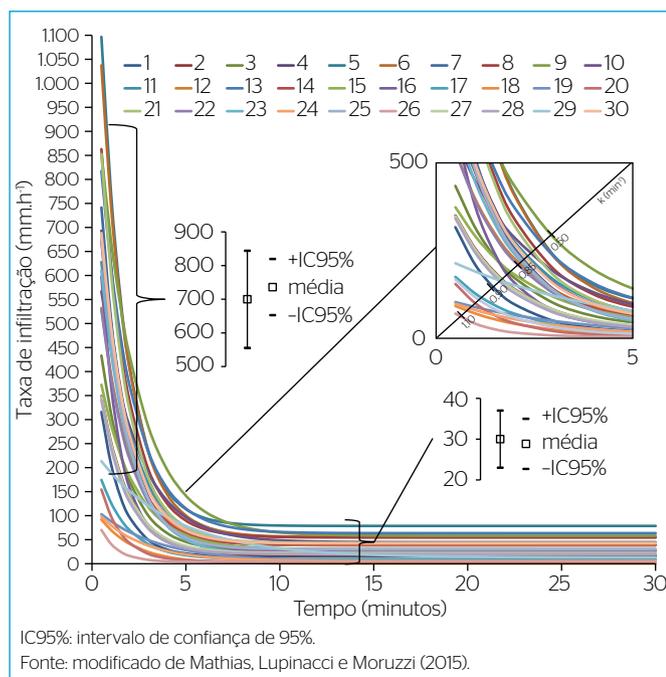


Figura 3 - Variação temporal das taxas de infiltração nos pontos amostrados com detalhes para a variação das taxas iniciais e finais e para o comportamento do decaimento. Os números representam os pontos de amostragem, conforme Figura 1.

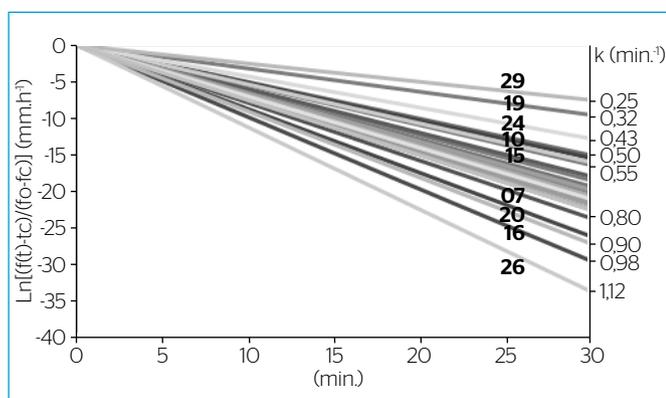


Figura 4 - Resultados linearizados referentes ao quociente das taxas pelo tempo, conforme Equação (2), com coeficientes de decaimento (k).

Fica evidente a grande variabilidade dos parâmetros (f_0 , f_c e k) presentes na área de estudo.

Na Figura 4, veem-se os dados linearizados do quociente das taxas nas ordenadas e do tempo nas abscissas (Equação 2). Nesse caso, é possível verificar a variação do decaimento (k) pelo coeficiente angular das retas representativas de cada ponto de amostragem na área de estudo.

Na Figura 5, são apresentados os valores da constante de decaimento (k), correspondentes aos coeficientes angulares da Figura 4, e sua variação estatística, com gráficos em destaque para a variação no IC95% e sua distribuição percentil. Tais resultados reforçam a variação decorrente da complexidade do meio, provavelmente agravada pelas condições físicas dos materiais superficiais (coberturas tecnogênicas). Segundo Mendiondo e Tucci (1997), o escoamento de subsuperfície, a declividade e a granulometria dos solos, distribuídas de forma distinta no espaço, influem nas taxas de infiltração. Considerando esses apontamentos, buscou-se avaliar a relação dos dados obtidos experimentalmente com as variáveis citadas.

Na tentativa de uma explicação generalizada, Mathias, Lupinacci e Moruzzi (2015) avaliaram os resultados para todo o conjunto de dados indistintamente, a despeito das variações observadas nas Figuras 3, 4 e 5. De forma geral, os autores verificaram que os coeficientes de correlação entre os parâmetros ajustados da função de Horton e os atributos do meio físico foram fracas ($r < 0,5$) para todo o conjunto de dados dos 30 pontos coletados, indicando a complexidade do processo de infiltração e a dificuldade de explicá-lo nessa escala de análise e por uma única variável do meio físico. A título de exemplo da análise global realizada por Mathias, Lupinacci e Moruzzi (2015), elencam-se, na Figura 6, os resultados da constante de decaimento (k) para diferentes declividades, sendo possível constatar visualmente sua baixa correlação, dada por coeficiente r de

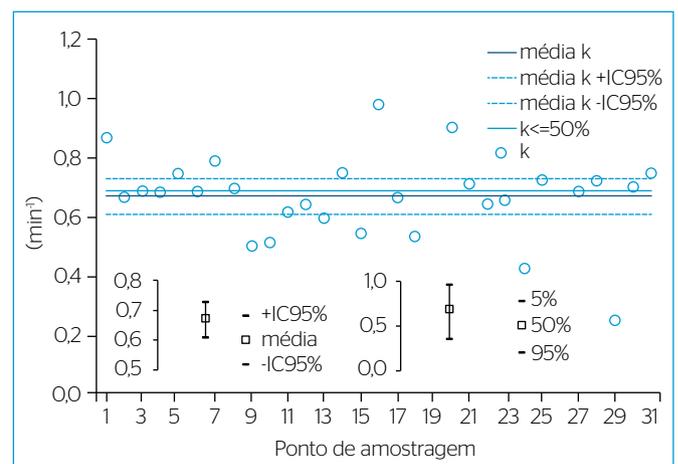


Figura 5 - Constante de decaimento (k) e sua variação estatística para os pontos amostrados, com gráficos em destaque para a variação no intervalo de confiança de 95% (IC95%) e sua distribuição percentil.

0,18, por meio do coeficiente angular da reta de ajuste, bem como sua baixa explicação (R^2), ante a dispersão dos dados quando avaliados por esse atributo.

Ao realizar o agrupamento dos dados com base nas características do meio, conforme atributos exibidos na Tabela 2, verificou-se que houve melhora significativa do coeficiente de correlação (r) em relação à avaliação geral para todo o conjunto de dados. Por exemplo, agrupando-se pontos de baixa vertente (de 1 a 5) (Figura 1), obteve-se coeficiente de correlação (r) de 0,96 entre a constante de decaimento em módulo (k) e a declividade. Da mesma forma, obtiveram-se as correlações entre as taxas de infiltração (f_c e f_o) com a granulometria dos materiais ($r=0,94$ para areia fina), assim como entre as taxas (f_c e f_o) e a distância do rio ($r>0,71$), entre outros, conforme Tabela 3. Tal fato decorre da adequação das escalas de análise às formulações locais, visando restringir a natureza multivariada dos fenômenos que governam a infiltração.

Dessa forma, pôde-se verificar que o aumento da areia fina nesses pontos provoca um significativo incremento da taxa de infiltração inicial ($r=0,94$). Convém lembrar que a areia fina constitui a fração granulométrica que mais potencializa a atividade erosiva, visto que seu baixo peso, combinado com o formato irregular dos grãos, o qual

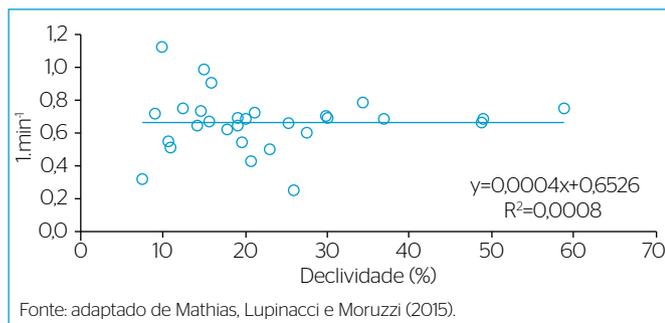


Figura 6 - Constante de decaimento da infiltração (k) em função da declividade do terreno dos pontos amostrais, enfatizando a fraca correlação ($r=0,18$) e a baixa explicação da reta ajustada.

Tabela 3 - Coeficiente de correlação entre as variáveis físicas e os parâmetros de infiltração nos pontos correspondentes à baixa vertente (pontos 1 a 5).

	f_c	f_o	k
Declividade (%)	-0,25	-0,25	0,96
Distância do rio	0,71	0,74	-0,50
% Argila	-0,39	-0,49	0,29
% Silte	-0,09	-0,07	-0,50
% Areia grossa	-0,61	-0,53	-0,27
% Areia fina	0,94	0,94	0,12
% Areia total	0,44	0,55	-0,20
Flow (m^2)	0,64	0,65	-0,17
Silte + argila	-0,44	-0,55	0,20

compromete a agregação, é um fator que facilita o transporte pelas águas pluviais. Assim, o incremento da taxa de infiltração inicial (f_o) nessas condições pode potencializar a ação erosiva.

Nesse mesmo subconjunto, dos pontos 1 a 5, verificou-se que o aumento da declividade dos terrenos apresenta forte correlação com a constante de decaimento em módulo (k) da Equação (1) ($r=0,96$). Assim, a alta porcentagem da declividade registrada nesses pontos impõe um padrão de infiltração cujo decaimento é também acelerado. Vale dizer que, nesse setor, ainda existe uma frequência significativa de terraços, conforme apontado na Figura 2, fato que pode colaborar com o comportamento dessas taxas de infiltração.

Outro agrupamento investigado refere-se aos pontos 21 a 24 (Figura 2), os quais se posicionam à margem esquerda do córrego do Tucunzinho, em áreas de considerável declive, ocupada por pastagens (Tabelas 1 e 2). Nesse setor, as taxas de infiltração final (f_c) apresentam forte correlação com a granulometria dos materiais (argila, $r=0,94$; areia grossa, $r=-0,81$; areia total, $r=-0,99$; silte + argila, $r=0,99$). Assim, o aumento da porcentagem de argila + silte (Tabela 4) nos materiais de superfície gera taxas de infiltração final elevadas, quando comparadas com as demais. O oposto ocorre com a areia total, havendo forte correlação entre o aumento da argila e o decaimento das taxas (Tabela 4). Ainda, a taxa de infiltração final aponta coeficiente de correlação negativo entre a declividade e o fluxo acumulado ($flow$), correspondentes a r de -0,80 e de -0,82, respectivamente. Desse modo, declividades mais elevadas dificultam tanto a acumulação do fluxo de superfície como o processo de infiltração, fatos que respondem por tal comportamento da taxa de infiltração.

Vale ressaltar, entretanto, que a correlação pareada de atributos é uma simplificação que não indica necessariamente relação de causa e efeito. Tal fato fica mais pronunciado em sistemas complexos e multifatoriais, tais como a infiltração em coberturas antropogênicas com variadas profundidades. Também, os dados avaliados estão sujeitos à amostragem, sendo necessário continuar o trabalho

Tabela 4 - Coeficiente de correlação entre as variáveis físicas e os parâmetros de infiltração nos pontos correspondentes à área com alto declive e pastagem (pontos 21 a 24).

	f_c	f_o	k
Declividade (%)	-0,80	-0,52	-0,45
Distância do rio	0,82	0,56	0,48
% Argila	0,94	0,99	0,99
% Silte	0,19	-0,18	-0,25
% Areia grossa	-0,81	-0,58	-0,45
% Areia fina	0,68	0,43	0,27
% Areia total	-0,99	-0,90	-0,87
Flow (m^2)	-0,82	-0,71	-0,55
Silte + argila	0,99	0,90	0,87

de coleta sistemática de dados para confirmar algumas relações. Nesse sentido, o valor $r=-0,80$ para f_c de declividade pode não refletir o fenômeno, tendo em vista que essas variáveis apresentaram fraca correlação nas análises dos outros agrupamentos. Todavia, o agrupamento dos dados com base nos atributos do meio simplificou a análise e aumentou a possibilidade de a inferência estatística estar de acordo com o fenômeno observado.

Na Tabela 5, buscou-se associar os pontos 12, 14, 16, 17 e 19, os quais se encontram em setor de alta vertente, sem cobertura vegetal (por conta da degradação provocada pela ação erosiva), isto é, em situação de relativa homogeneidade de uso. Nessa situação, há forte correlação entre a taxa de infiltração final e a areia fina ($r=0,90$), assim como entre tal taxa e o fluxo acumulado de superfície ($r=0,93$). Esses dados estão em consonância com o cenário de intensa atividade erosiva, visto que a areia fina e o fluxo acumulado são fatores importantes a serem avaliados para o entendimento das formas erosivas.

Por fim, buscando compreender a distribuição espacial das taxas de infiltração, apresenta-se o mapeamento dessas taxas, por intermédio da análise geoestatística e da krigagem das medidas realizadas em campo, na área delimitada (Figura 7), assim como o fluxo acumulado (Figura 8) feito pelo processamento dos dados do modelo digital do terreno.

As taxas de infiltração e o fluxo acumulado refletem aspectos inerentes à morfologia da área, na qual formas topográficas tecnogênicas, tais como terraços, colaboram no condicionamento da infiltração e pervertem o fluxo acumulado de superfície. Merece destaque o fato de tais terraços serem tradicionalmente apontados pela bibliografia como uma forma de manejo que visa ao incremento da infiltração e, portanto, à diminuição das taxas erosivas provocadas pelo escoamento de superfície (BERTONI & LOMBARDI NETO, 1990). Na área estudada, conforme constatações feitas em campo, as citadas feições têm provocado aumento substancial da infiltração, a exemplo do que se pode verificar

Tabela 5 - Coeficiente de correlação entre as variáveis físicas e os parâmetros de infiltração nos pontos correspondentes à alta vertente sem cobertura de superfície (pontos 12, 14, 16, 17 e 19).

	f_c	f_o	k
Declividade (%)	0,37	0,32	0,60
Distância do rio	0,74	0,66	0,47
% Argila	-0,82	-0,53	0,08
% Silte	--	--	--
% Areia grossa	-0,86	-0,77	-0,34
% Areia fina	0,90	0,73	0,22
% Areia total	0,82	0,53	-0,08
Flow (m ²)	0,93	0,91	0,19
Silte + argila	-0,82	-0,53	0,08

nas vertentes da margem direita do córrego (Figura 7 — período úmido). Alguns dos pontos amostrais nesse setor, 7, 8, 14 e 15, se encontram posicionados no interior de embaciamentos formados no reverso dos terraços e apresentaram marcante saturação de água no solo no período úmido, evidenciando que tais formas antrópicas de relevo têm contribuído para a retenção de água no solo e, conseqüentemente, para sua percolação em direção às resurgências no sopé do talude erosivo.

Na área estudada, portanto, os terraceamentos, em associação com bacias de detenção, podem ter duplo caráter: positivo, no sentido de quebrar a energia das águas de escoamento superficial; negativo, por estimular o *piping* por meio da infiltração em subsuperfície,

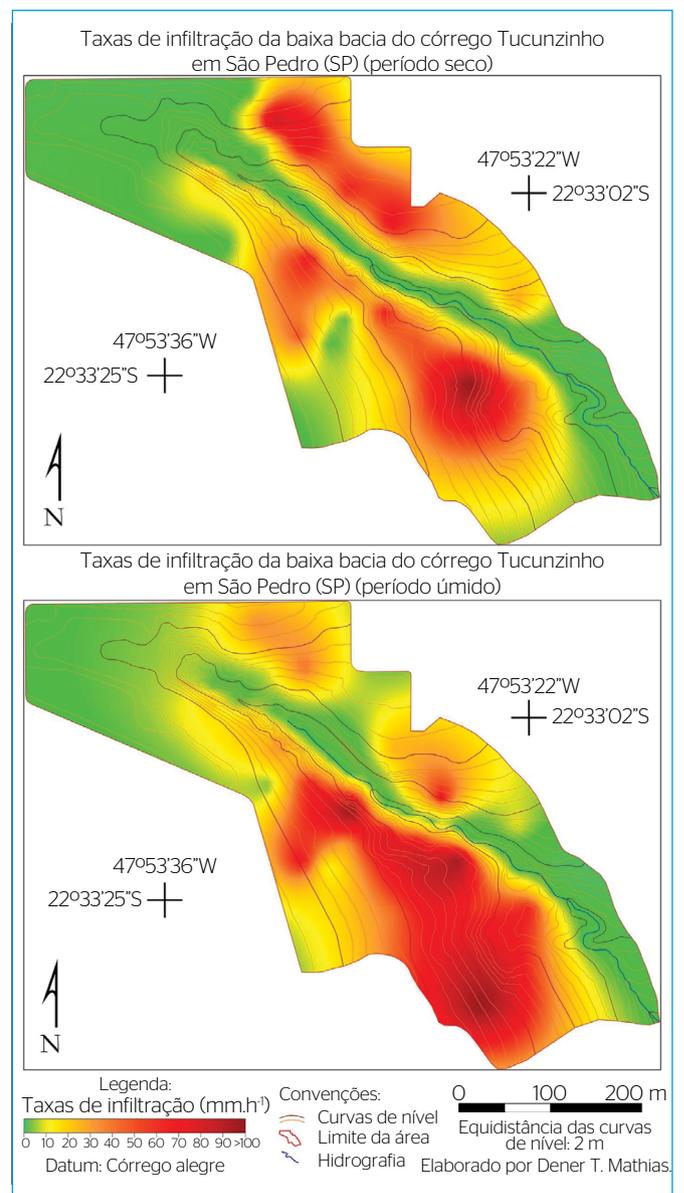


Figura 7 - Taxas de infiltração na baixa bacia do córrego Tucunzinho (São Pedro, SP), obtidas por meio da análise geoestatística e da krigagem das medidas realizadas em campo, para os períodos seco e úmido.

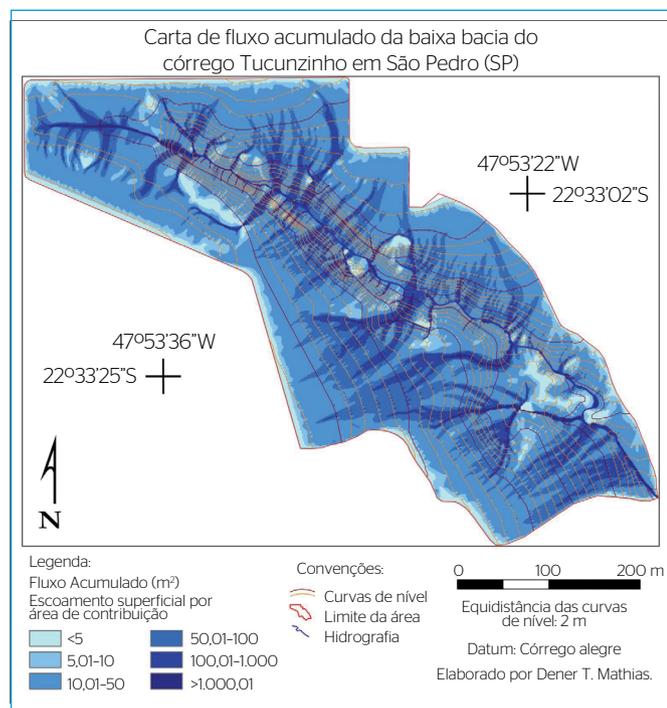


Figura 8 - Fluxo acumulado na baixa bacia do córrego Tucunzinho em São Pedro (SP).

visto que esses processos são dominados por caminhos preferenciais de escoamento. Assim, verificou-se que, em um ponto localizado no médio curso do córrego, marcado pela presença de um dos maiores ramos da voçoroca, ocorre um expressivo duto posicionado na junção entre o ramo e o córrego (Figura 9). Topograficamente, esse ponto está em perfeito alinhamento com um setor da vertente em que se situa uma bacia de retenção (indicada pela seta na Figura 9, à esquerda), em área de extenso depósito antropogênico, o que pode indicar que as águas da citada bacia infiltram e encontram linha preferencial de percolação cuja extremidade leva ao duto mencionado (Figura 9, à direita).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os dados permitem afirmar que há grande variação na distribuição espacial das taxas de infiltração na baixa bacia do córrego Tucunzinho. Tal variação deve-se tanto à complexidade do próprio fenômeno, que depende das características dos materiais de superfície e da morfologia dos terrenos, quanto à situação específica da área, altamente comprometida pela dinâmica da erosão linear acelerada e historicamente alterada por obras que introduziram materiais antropogênicos.

Entretanto, o agrupamento dos dados por atributos específicos permitiu a obtenção de informações relevantes sobre os parâmetros



Figura 9 - Alinhamento topográfico entre a bacia de retenção e o ramo da voçoroca. Em detalhe, a ocorrência de pipes e alcova de regressão no talude erosivo da voçoroca.

que descrevem o comportamento das taxas de infiltração pela equação de Horton, destacando-se:

- Em baixa vertente: coeficiente de correlação (r) de 0,96 entre o decaimento (k) e a declividade. Valor de r de 0,94 entre areia fina e as taxas de infiltração (f_c e f_0), assim como entre as taxas (f_c e f_0) e a distância do rio ($r > 0,71$);
- Em alto declive e pastagem: coeficiente de correlação entre taxas de infiltração final (f_c) e argila com $r = 0,94$, areia grossa com $r = -0,81$, areia total com $r = -0,99$ e silte + argila com $r = 0,99$. Ainda, a taxa de infiltração final (f_c) apresentou valor de r negativo entre a declividade e o fluxo acumulado ($flow$), correspondente a $-0,80$ e $-0,82$, respectivamente.
- Em alta vertente sem cobertura vegetal: coeficiente de correlação entre a taxa de infiltração final (f_c) e a areia fina com $r = 0,90$, assim como entre f_c e o fluxo acumulado de superfície com $r = 0,93$.

Por fim, os dados de campo, em conjunto com o mapeamento das taxas de infiltração e o fluxo acumulado, permitiram constatar que os terraceamentos, prática conservacionista amplamente utilizada, têm levado à intensificação das taxas de infiltração. Observações *in loco* nos setores a jusante dos terraços permitiram confirmar a ocorrência de retomadas erosivas, por conta da presença de dutos que dinamizam a evolução do talude erosivo da voçoroca estudada. Dessa forma, a pesquisa desenvolvida nessa área aponta para a necessidade de avaliações mais criteriosas para a implantação de medidas de contenção, assim como para futuras pesquisas que avaliem de maneira sistemática áreas dominadas por materiais antropogênicos.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), o financiamento por meio do processo nº 2009/03669-3.

REFERÊNCIAS

- BERTONI, J. & LOMBARDI NETO, F. (1990) *Conservação do solo*. São Paulo: Ícone. 355 p.
- CEBECAUER, T. & HOFIERKA, J. (2008) The consequences of land cover changes on soil erosion distribution in Slovakia. *Geomorphology*, v. 98, p. 187-198. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.12.020>
- DUAN, L.; HUANG, M.; ZHANG, L. (2016) Differences in hydrological responses for different vegetation types on steep slope on Loess Plateau, China. *Journal of Hydrology*, v. 537, p. 356-366. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.03.057>
- GARCÍA-RUIZ, J.M.; BEGUERÍA, S.; NADAL-ROMERO, E.; GONZÁLEZ-HIDALGO, J.C.; LANA-RENAULT, N.; SANJUÁN, Y. (2015) A meta-analysis of soil erosion rates across the world. *Geomorphology*, v. 239, n. 15, p. 160-173. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.03.008>
- GUERRA, A.J.T. (2002) Processos Erosivos nas encostas. In: CUNHA, S.B. & GUERRA, A.J.T. (Orgs.). *Geomorfologia: exercícios, técnicas e aplicações*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil. p. 139-156.
- HORTON, R.E. (1939) Analysis of runoff-plot experiments with varying infiltration capacity. *Transactions American Geophysical Union banner*, v. 20. <https://doi.org/10.1029/TRO20i004p00693>
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (IPT). (1981) *Mapa geológico do Estado de São Paulo: escala 1:500.000*. v1 (texto) e v2 (mapa). São Paulo: Governo do Estado de São Paulo/Secretaria da Indústria, Comércio, Ciência e Tecnologia.
- LESSCHEN, J.P.; CAMMERAAT, L.H.; NIEMAN, T. (2008) Erosion and terrace failure due to agricultural land abandonment in a semi-arid environment. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 33, p. 1574-1584. <https://doi.org/10.1002/esp.1676>
- MACHADO, DO.; ALVES-SOBRINHO, T.; RIBEIRO, A.S.; IDE, C.N.; OLIVEIRA, P.T.S. (2014) Erosividade da chuva para o bioma Pantanal. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, v. 19, n. 2. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522014000200010>
- MÄRKER, M.; ANGELI, L.; BOTTAI, L.; COSTANTINI, R.; FERRARI, R.; INNOCENTI, L.; SICILIANO, G. (2008) Assessment of land degradation susceptibility by scenario analysis: A case study in Southern Tuscany, Italy. *Geomorphology*, v. 93, p. 120-129. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.12.020>
- MATHIAS, D.T. (2011) *Propostas de recuperação de áreas peri-urbanas erodidas com base em parâmetros hidrológicos e geomorfológicos: Córrego Tucunzinho (São Pedro/SP)*. 128f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Rio Claro.
- MATHIAS, D.T.; CUNHA, C.M.L.; MORUZZI, R.B. (2013) Implicações geomorfológicas das alterações do escoamento superficial pela urbanização: Análise dos processos erosivos na bacia hidrográfica do Córrego Tucunzinho (São Pedro – SP). *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 18, n. 4, p. 101-113.
- MATHIAS, D.T.; LUPINACCI, C.M.; MORUZZI, R.B. (2015) Variabilidade espacial das taxas de infiltração em terrenos submetidos à erosão linear. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 21, Brasília. *Anais...* Brasília: ABRH. p. 1-8.
- MENDIONDO, E.M.; TUCCI, C.E.M. (1997) Escalas hidrológicas III: hipótese integradora de processos na bacia vertente. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 2, n. 1, p. 59-122.
- SCHÄUBLE, H. (2004) *HydroTools 1.0 for ArcView 3.x*. Disponível em: <<https://www.terraccs.com/wp-content/uploads/2018/05/hydrotools-german.pdf>>. Acesso em: ago. 2015.
- SILVA, F.G.B.; MINOTTI, R.T.; LOMBARDI NETO, F.; PRIMAVESI, O.; CRESTANA, S. (2010) Previsão da perda de solo na Fazenda Canchim - SP (EMBRAPA) utilizando geoprocessamento e o USLE 2D. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522010000200006>
- YAMAMOTO, J.K. & LANDIM, P.M.B. (2013) *Geoestatística: conceitos e aplicações*. São Paulo: Oficina de Textos. 215 p.