

**AVALIAÇÃO GEOSTATÍSTICA DOS TEORES DE MACRONUTRIENTES  
EM SOLOS DE DOIS REMANESCENTES DE FLORESTA DE RESTINGA  
ASSOCIADOS A DEPÓSITOS MARINHOS HOLOCÊNICOS E  
PLEISTOCÊNICOS NA BACIA DO RIO ITAGUARÉ (BERTIOGA, SP)<sup>1</sup>**

**Celia Regina de Gouveia Souza<sup>1,2</sup>; Jaime E. Badel M.<sup>2</sup>; Felipe de Araujo Pinto Sobrinho<sup>2</sup>**

**celiagouveia@gmail.com; celia@igeologico.sp.gov.br**

**<sup>1</sup>Instituto Geológico-SMA/SP; <sup>2</sup>Depto. de Geografia Física da FFLCH-USP**

***Resumo.** O comportamento químico dos solos em ambientes sedimentares costeiros ainda é pouco conhecido no Brasil. Este trabalho apresenta uma avaliação geostatística dos teores de macronutrientes da camada superficial (0-20 cm) de três tipos de sub-biomas seqüencialmente relacionados, presentes na bacia do Rio Itaguare (município de Bertioiga, São Paulo), assim denominados: Floresta baixa de Restinga sobre Cordões Litorâneos Holocênicos com Neossolos Quartzarênicos, Floresta alta de Restinga sobre Terraços Marinhos Holocênicos com Espodossolos Humilúvicos e Floresta alta de Restinga sobre Terraços Marinhos Pleistocênicos com Espodossolos Humilúvicos. A análise espacial das variáveis foi feita levando em consideração a orientação dos eixos dos sub-biomas, a orientação dos eixos de declividade, talwegues e rede de drenagem e das classes altitudinais. Os resultados indicam que a variação espacial dos nutrientes depende do tipo de associação vegetação/substrato/solo, que induz à migração vertical dos mesmos a partir de elementos autóctones dos sedimentos e da ciclagem a partir da floresta (serapilheira), da orientação espacial do eixo dos sub-biomas que está relacionada com a progradação da planície costeira durante o Pleistoceno e o Holoceno, e das relações entre as orientações dos eixos de declividade da planície, da rede de drenagem e da linha de costa, que conduzem a migração lateral dos nutrientes de maior mobilidade. Sob a interpretação da Lei de Liebig, o vigor da vegetação em todos os sub-biomas está condicionado pelos teores de potássio. Do ponto de vista das classes agrícolas de fertilidade, todos os solos são ácidos, pouco férteis e de caráter alumínico, o que indica alta toxidez por Al<sup>+3</sup>. Isto sugere que as condições observadas são bastante adversas para a vida vegetal, sugerindo que o vigor da floresta se mantém através de um delicado equilíbrio na dinâmica da ciclagem dos nutrientes e de fatores físicos.*

*Palavras-chave: variabilidade espacial, fertilidade de solos, sub-biomas, planície costeira.*

---

<sup>1</sup> Apoio Financeiro: Fapesp (Proc. n° 2008/58549-0 e 2008/56341-2); CNPq (Proc. n° 143562/2008-8).

## 1. INTRODUÇÃO

A heterogeneidade espacial, tanto física como biótica, é uma característica importante da planície costeira do município de Bertioga (Baixada Santista, São Paulo). Esta área tem sido alvo de diferentes estudos visando à compreensão entre as associações dos diferentes remanescentes de vegetação, os ambientes sedimentares quaternários, seu comportamento hídrico e os solos associados, na busca de avaliar a sustentabilidade ambiental desses sub-biomas (Souza, 2007; Moreira, 2007; Lopes, 2007; Souza *et al.*, 2009; Badel-Mogollón & Souza, 2009).

O presente trabalho apresenta uma análise geostatística espacial do comportamento químico do horizonte O-A (0-20 cm) de solos presentes em três remanescentes de sub-biomas de florestas de Restinga presentes na bacia do Rio Itaguapé.

Esses sub-biomas, propostos por Souza *et al.* (2009), são: Floresta baixa de Restinga sobre Cordões Litorâneos Holocênicos com Neossolos Quartzarênicos (FbR/LHTb), Floresta alta de Restinga sobre Terraços Marinheiros Holocênicos com Espodossolos Humilúvicos (FaR/LHTa) e Floresta alta de Restinga sobre aos Terraços Marinheiros Pleistocênicos com Espodossolos Humilúvicos (FaR/LPTb) (Figura 1). A estrutura da FbR/LHTb é caracterizada por dossel aberto, altura média das árvores de 9,5 m, alta densidade de indivíduos arbóreos, com diâmetro médio de 15 cm de DAP, e fina camada de serapilheira (~ 3 cm). A FaR/LHTa apresenta dossel fechado, com indivíduos arbóreos de 18 m de altura média e indivíduos emergentes atingindo 30 m, estrutura diamétrica com DAP médio de 18 cm, e camada de serapilheira com 15 cm de espessura média. Na FaR/LHTb, o dossel é ainda mais fechado, com indivíduos arbóreos de 18,5 m de altura média e maior quantidade de indivíduos emergentes atingindo 30 m, o diâmetro médio é de 19,5 cm e camada de serapilheira tem 18 cm em média.

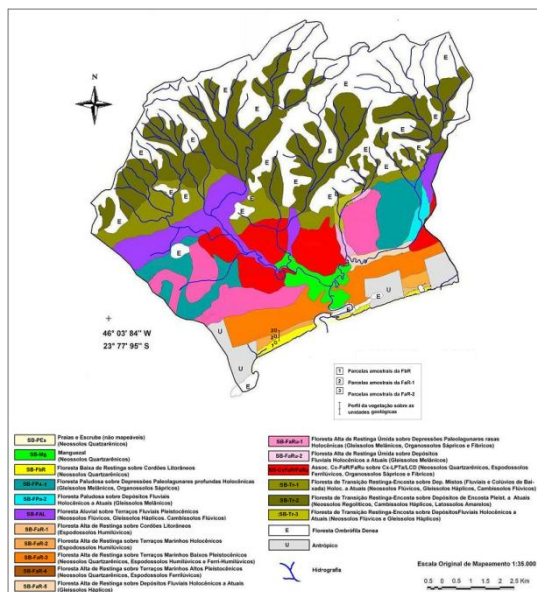


Figura 1. Sub-biomas de planície costeira e baixa-média encosta na bacia do Rio Itaguapé, Bertioga/SP (baseado em Souza *et al.* 2009).

## MATERIAIS E MÉTODOS

Foram utilizados dados químicos de fertilidade apresentados por Moreira (2007), a partir de oito pontos de amostragem de solos localizados nos três sub-biomas, ao longo de um transecto perpendicular à linha de costa. A avaliação geostatística foi feita em função da análise espacial das variáveis P, K, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Matéria Orgânica (MO), C, Al, pH, Acidez potencial (H+Al), Saturação por Al (m%), Soma de Bases (SB), Saturação por Bases (V%), CTC

(capacidade de troca catiônica) efetiva e CTC a pH 7.0 (T).

Previamente e a partir do refinamento espacial dos ambientes sedimentares elaborado por Badel-Mogollón & Souza (2009), foram obtidas as classes de altitude e declividade

para cada sub-bioma a partir da análise geomorfológica efetuada em imagem de radar SRTM por meio da ferramenta TOPODATA (Badel-Mogollón & Souza (2010). Os resultados de altimetria para essa área foram: 1-2 m para FbR/LHTb, 2-3 m para FaR/LHTa e 3-4 m para FaR/LHTb. No sub-bioma FaR/LPTb a declividade diminui de SW para NE e de W para E, em função da influência da planície do Rio Itaguaré. Nos outros dois sub-biomas, a declividade diminui de N para S e de NE para SW, ou seja na direção da linha de costa.

A avaliação geostatística foi feita com auxílio do software GS+® (versão 5.0), incluindo a análise de semivariância e de regressão e, posteriormente, a interpolação, efetuada pelo método de krigagem e cokrigagem (blocos 2x2). A krigagem foi aplicada aos valores de CTC, T, SB, pH, m% e H+Al. A cokrigagem foi feita quando as variáveis amostradas nos mesmos locais dentro de um mesmo domínio espacial, mostravam significativo grau de correlação. No caso, foi aplicado para os valores dos macronutrientes (incluindo C e MO), e para a variável Al<sup>3+</sup>, utilizando-se os valores da SB como covariante no primeiro caso, e os valores de m% no segundo caso.

A partir disso foi feita uma validação cruzada dos resultados e gerados os mapas correspondentes para cada variável, usando o azimute 0° como eixo principal, e uma tolerância para o *offset* de 90.00°. A distância de defasagem ativa foi de 513.26 m, em intervalos de 51.33 m.

A interpretação dos valores dos teores dos macronutrientes e variáveis associadas foram baseadas nas classificações propostas por Camargos (2005) e Freire (2007).

## 2. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a verificação da normalidade dos dados através da aplicação de estatísticos descritivos aos mesmos, foi feita a avaliação geostatística das variáveis, cujos resultados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros geostatísticos a partir dos quais se construíram os semivariogramas e os mapas de variação espacial dos macronutrientes.

Parâmetros geostatísticos	pH em CaCl2	MO%	C%	P	K	Ca	Mg	Na	Al	H+Al	SB	T	V%	m%	CTC
<b>Variograma isotrópico</b>															
Modelo	linear	Esférico	Esférico	Esférico	Esférico	Esférico	Esférico	Esférico	linear	Exp	Exp	Exp	Exp	Esférico	Linear
Co	8.64E01	1.00E-03	1.00E-04	1.00E-01	1.00E-04	1.00E-03	1.00E-02	1.12E-01	6.88E01	4.05E03	4.05E03	1.00E-02	3.90E03	1.44E-02	1.58E01
Co + C	1.24E02	2.48E00	1.74E-01	3.86E01	8.32E-02	3.98E-01	1.20E01	1.16E00	1.64E02	2.11E03	2.11E04	2.35E01	2.30E04	1.50E-01	1.88E02
Ao	4.18E02	2.90E01	2.59E02	2.90E01	2.59E02	5.90E01	9.70E01	3.84E02	4.18E02	1.05E03	1.05E03	1.12E02	1.07E03	6.37E02	4.18E02
r2	5.90E-02	0.00E00	4.30E-02	0.00E00	4.30E-02	2.00E-03	3.90E-02	1.07E-01	5.00E-02	1.86E-01	1.86E-01	3.50E-02	2.18E-01	2.32E-01	2.37E-01
RSS	1.62E04	9.53E00	2.11E00	2.30E03	4.87E-01	6.15E00	2.28E03	1.03E01	8.88E04	1.29E08	1.29E08	6.25E03	1.26E08	3.97E-02	5.45E04
<b>Variograma Anisotrópico</b>															
Modelo	linear	linear	Esférico	Esférico	Esférico	linear	Exp	Exp	linear	linear	Exp	Linear	Linear	Linear	Exp
Co	1.00E-03	1.93E00	1.13E-01	2.77E02	5.40E-02	3.75E-01	5.54E00	7.00E-02	6.04E01	3.33E03	8.48E00	3.23E03	1.00E-02	8.00E-03	2.35E02
Co + C	3.30E-01	7.05E00	1.33E00	1.46E03	6.39E-01	2.81E00	6.45E01	4.33E00	4.76E02	2.20E04	1.08E02	3.12E04	6.82E01	2.88E-01	7.04E02
Classe parâmetro (maior A1)	1.06E03	2.26E03	6.58E04	1.06E04	6.50E04	7.52E04	2.63E03	1.18E03	1.61E03	1.11E03	2.36E03	1.23E03	7.87E02	8.90E02	1.91E03
Classe parâmetro (menor A2)	1.05E03	2.21E03	6.58E04	9.85E03	6.50E04	7.52E04	2.53E03	1.14E03	1.57E03	1.09E03	2.29E03	1.23E03	7.85E02	8.82E02	1.86E03
r2	2.82E-01	5.80E-02	3.00E-03	2.20E-03	3.00E-03	3.40E-02	1.40E-02	9.30E-02	5.00E-02	2.14E-01	2.00E-02	3.61E-01	4.79E-01	2.37E-01	2.90E-02
RSS	1.85E-01	3.59E01	8.70E00	8.64E05	2.01E00	2.47E01	9.29E03	4.19E01	5.30E05	1.00E-08	2.54E04	1.00E07	6.32E05	1.57E-01	6.02E05
<b>Validação cruzada</b>															
Coefficiente de regressão	2.29E-01	-6.73E-01	4.23E-01	-3.30E01	4.23E-01	5.72E-01	2.18E-01	1.07E00	-1.26E00	-2.18E00	1.18E-01	-2.03E00	-1.15E-01	-5.69E-01	1.02E00
Desvio padrão	4.79E-01	5.05E-01	5.23E-01	3.60E01	5.23E-01	4.29E-01	5.24E-01	2.00E-01	4.67E-01	8.13E-01	7.08E-01	8.46E-01	5.50E-01	8.57E-01	3.24E00
r2	3.70E-02	2.28E-01	9.80E-02	1.22E-01	9.80E-02	2.29E-01	2.80E-02	8.27E-01	5.46E-01	5.46E-01	5.00E-03	4.90E-01	7.00E-03	6.80E-02	1.60E-02
Intercepção com y	2.40E00	3.29E01	3.18E-01	4.24E01	3.20E-01	8.20E-01	3.72E00	-2.70E-01	7.47E01	6.22E02	9.06E00	6.24E02	6.94E00	1.13E02	-7.91E-01
predição desv padrão	2.66E-01	8.98E00	6.60E-01	1.68E01	6.60E-01	1.12E00	2.62E00	1.10E00	1.13E01	5.81E01	4.24E00	6.22E01	4.21E00	1.12E01	1.76E01

As variabilidades de Na, C/MO, P e Mg (Figura 2) são semelhantes, exibindo de maneira geral aumento progressivo dos teores do setor SE (FbR/LHTb) para NW (FaR/LPTb). Em relação ao Na, ao contrário do que se poderia esperar, não parece haver qualquer relação desse elemento com o *spray* marinho. O Ca, que apresenta teores sempre baixos, tem as maiores concentrações associadas a FbR/LHTb. Esta tendência é esperada, pois o Ca deve estar associado à presença de calcário biodetrítico (fragmentos

de concha e carapaças –  $\text{CaCO}_3$ ) presente nos sedimentos mais jovens, nos quais esses fragmentos ainda não tiveram tempo de ser completamente dissolvidos, como usualmente o são nos depósitos mais antigos. O K tem comportamento algo semelhante ao Ca, apresentando aumento progressivo das concentrações do interior da planície para a linha de costa. Seus teores são sempre muito baixos (os menores da área de estudo), como esperado para solos com pH extremamente baixo (entre 2,82 e 3,80 – Figura 3).

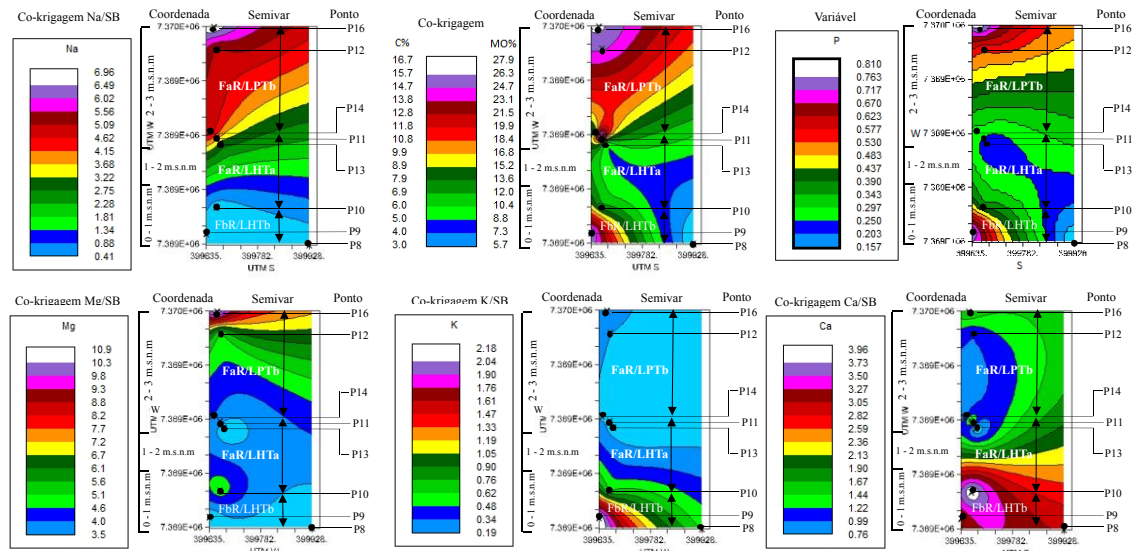


Figura 2. Variabilidade espacial dos teores de macronutrientes nos sub-biomas.

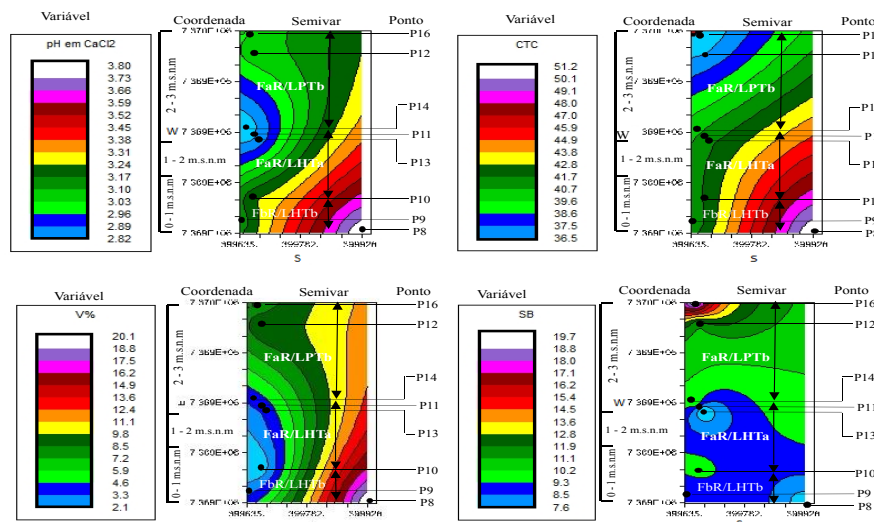


Figura 3. Variabilidade espacial para as variáveis pH, CTC, V% e SB.

Assim, o K não é dependente dos demais macronutrientes, mas estes parecem ser dependentes entre si.

A soma de bases (SB) (Figura 3) apresenta um padrão de distribuição semelhante ao do conjunto de macronutrientes Na, C/MO, P e Mg, com os valores aumentando de SE para NW, o que demonstra que o Na, o Mg e o P são os macronutrientes mais importantes. De maneira geral, pode-se dizer que o pH, o V% (saturação por bases) e a

CTC (capacidade de troca catiônica) efetiva aumentam de FaR/LPTb para FbR/LHTb, apresentando, portanto, um padrão inverso às distribuições de Na, C/MO, P e Mg. Sabe-se que a CTC, além do poder de reter nutrientes, também pode acarretar a retenção de elementos que deprimem o crescimento vegetal, como H e  $Al^{+3}$ . T (CTC a pH 7.0) e H+Al (Figura 4) mostram padrões de distribuição iguais entre si e semelhantes ao do conjunto de macronutrientes Na, C, MO, P e Mg e da SB, mas padrões inversos aos de CTC ativa, pH e V%.

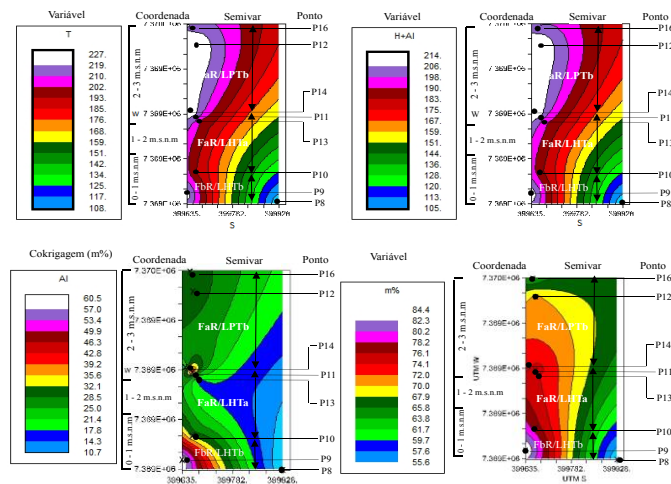


Figura 4. Variabilidade espacial para as variáveis T, H+Al, Al e m%.

## CONCLUSÕES

De maneira geral, os valores de Na, P, Mg, C/MO, SB, T e H+Al aumentam progressivamente da linha de costa para o interior da planície costeira, ou seja, dos ambientes mais jovens (FbR/LPTb) para os ambientes mais antigos e com florestas estruturalmente mais desenvolvidas (FaR/LPTb). O Ca tem comportamento inverso devido à presença de calcário biodetrítico ainda não dissolvido nos depósitos mais jovens. O K mostrou-se muito baixo em toda a área e com distribuição não correlacionável aos demais elementos, sugerindo dependência de outros fatores. Sob condições de deficiência desse elemento, as raízes perdem a capacidade oxidante e sofrem o processo de toxidez, por não serem mais capazes de excluir o tóxico, especialmente sob condições fortemente redutoras e altas concentrações do elemento redutor na solução do solo. Neste sentido, o fato de P9 apresentar concentrações anômalas de K (maiores teores da área) e altos teores de P e C/MO podem explicar os elevados valores de Al, m% (saturação por Al) e H+Al. Aliás, esses comportamentos podem sugerir que haja interdependência entre todos esses componentes.

Depreende-se de tudo isso que, se as anomalias em P9 não existissem, os padrões de distribuição espacial da maioria dos componentes estudados se daria ao longo do eixo norte-sul, visto que os outros nutrientes apresentam pouca variabilidade em P8 e P9.

Não obstante, sob a óptica da Lei de Liebig (Lei do Mínimo), sendo K o nutriente presente em menores teores, ele seria aquele que tem efeito limitante sobre as plantas e, portanto, o vigor da vegetação em todos os sub-biomas estaria condicionado a ele.

As distribuições espaciais dos parâmetros analisados sugerem ainda que a área sofre a atuação de processos ligados à lixiviação de elementos químicos autóctones aos

sedimentos e à incorporação e eluviação/iluviação paulatinas de novos elementos a partir do desenvolvimento e maturação das florestas (auto-ciclagem) que eles sustentam. Esses processos, por sua vez, seriam decorrentes da influência de fatores como: idade relativa dos depósitos e maturidade dos solos associados (aumentam da praia para o interior da planície); contribuição do tipo de floresta (serapilheira) para a ciclagem de nutrientes; inclinação da planície costeira, para o mar e para a calha do Rio Itaguapé (a calha se situa na porção oriental da área); e microgeomorfologia dos depósitos (P9 está localizado numa depressão intercordões e P11 numa depressão, por isso são mais ricos em MO; P13/P11/P14 estão no contato entre terraços marinhos holocênicos e pleistocênicos; os demais pontos estão situados no topo dos depósitos).

Os resultados mostram que todos os sub-biomas apresentam solos muito ácidos e com alta toxidez por  $Al^{+3}$ , mesmo em áreas com os menores percentis de m% (m>20% é considerado alta toxidez). Os valores de V% sugerem que até nos locais de maior saturação de bases, os teores não são suficientemente altos para que esses solos sejam considerados distróficos, ou seja, ricos em nutrientes.

Embora do ponto de vista da fertilidade do solo (baseada em parâmetros estabelecidos para solos agrícolas), as condições observadas sejam bastante adversas para a vida vegetal, o vigor natural das florestas de restinga só se explica pela manutenção de um delicado equilíbrio na dinâmica da ciclagem dos nutrientes, certamente condicionada aos fatores físicos apresentados e até a outros. Isto significa que qualquer alteração na dinâmica natural da ciclagem dessas florestas, somada às condições de deficiência de potássio observadas, pode levar a processos irreversíveis de simplificação da estrutura e da composição das mesmas, sem contar os efeitos dessas alterações sobre os outros macronutrientes, cujos teores também são baixos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Badel-Mogollón, J.E. & Souza, C.R. de G. 2009. Refinamento espacial com imagens de radar dos ambientes sedimentares litorâneos no município de Bertioga (SP). 9th Coast-GIS/V Congresso sobre Planejamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países da Expressão Portuguesa, Itajaí, Brasil. Resumo Expandido (CD-Rom).
- Badel-Mogollón, J.E. & Souza, C.R. de G. 2010. Quantificação da perda da estrutura nas unidades quaternárias do litoral norte do município de Bertioga, SP (Brasil) pelo processo de artificialização do espaço. VI Seminário Latino-Americano de Geografia Física/II Seminário Ibero-Americano de Geografia Física, Coimbra, Portugal. Anais (<http://www.uc.pt/fluc/cegot/VISLAGF/actas/tema3/jaime>).
- Camargos, S.L. 2005. *Interpretação de Análise de Solo*. Universidade Federal de Mato Grosso, Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária. Apostila. Ed. Departamento de Solos e Engenharia Rural. Disciplina Solos II. Cuiabá – MT.
- EMBRAPA. 2006. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília: Embrapa Produção da Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 306p.
- Freire, F.M.; Pitta, G.E.V.; Alves, V.M.C.; França, G.E.; Coelho, A.M. 2002. Cultivo do milho, interpretação de resultados de análise de solo. *Com. Téc.* 43. Embrapa Sete Lagoas, MG.
- Moreira, M.G. 2007. *Associações entre os Solos, os Ambientes Sedimentares Quaternários e as Fitofisionomias de Planície Costeira e Baixa Encosta nas Bacias dos Rios Itaguapé e Guaratuba (Bertioga-SP)*. Dissertação (Mestrado). Instituto de Botânica da Secretaria de Estado do Meio Ambiente. 157p.
- Souza, C.R. de G. 2007. Ambientes sedimentares de planície costeira e baixa-média encosta em Bertioga (SP). XI Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário, Belém (PA). Anais (CD-ROM).

Souza, C.R. de G., Moreira, M.G., Lopes, E.A. 2009. Coastal plain and low-medium slope sub-biomes: a new approach based on studies developed in Bertioga (SP). *Brazilian Journal of Ecology*, v. 8, p. 1-13.