

Erosão Acelerada em Canais de 2ª Ordem, em Regiões Arenosas de São Paulo, Afetando Infraestruturas, junto a esses Canais.

Cesar Augusto Costa
TBG, Campinas, Brasil, cesarcosta@tbg.com.br;

Marcelo Moya
TBG, Campinas, Brasil, moya@tbg.com.br;

Gilberto Luis Sanches Hernandez
TBG, Campinas, Brasil, ghernandes@tbg.com.br

Antônio Marcos de Almeida
TBG, Campinas, Brasil, aalmeida@tbg.com.br

Evaristo Bernardino dos Santos – TBG.
TBG, Campinas, Brasil, evaristo@tbg.com.br

Fernanda Hadad de Melo – TBG.
TBG, Rio de Janeiro, Brasil, fmelo@tbg.com.br

Guilherme de Lima
NHC, São Paulo, Brasil, glima@nhcweb.com

RESUMO: Apresenta-se estudo de caso de um riacho no município de Campinas-SP, no qual se caracterizam os fenômenos envolvidos nos processos erosivos, buscando definir as taxas atuais e potenciais de incisões ao longo do eixo do canal. A morfologia fluvial, de diversos riachos e córregos de regiões com solos arenosos, no estado de São Paulo, após a inumação de sua calha em passado recente, está sendo alterada drasticamente por processos de erosão remontante, associados à urbanização e/ou à intensificação da ocupação humana em suas microbacias. Esses processos erosivos têm potencial para alterar as premissas de projetos de algumas infraestruturas, como vias de tráfego, pontes, galerias, dutos e outras, implantadas junto a esses canais, com impacto em seus requisitos de segurança ou de vida útil. Para analisar essas interferências, foram levantadas informações plani-altimétricas, imagens aéreas e de satélite em diferentes períodos, realizadas sondagens de reconhecimento do solo e subsolo, analisadas informações disponíveis de chuvas, elaborados estudos hidrológicos da bacia de drenagem e estudos hidráulicos do canal. Nesses estudos foram incluídas as análises da evolução da geomorfologia fluvial. Entre as conclusões, verificou-se que o canal esteve entulhado por sedimentos recentes, que o mesmo passou de uma condição meandrante no fundo do vale, para uma forma retilínea e que houve o estabelecimento de um processo de erosão remontante, geradas após a intensificação da ocupação dos solos das vertentes. Também se concluiu que, o processo erosivo mantém tendências de rápido avanço remontante e de aprofundamento do perfil de equilíbrio até o nível de base estratigráfico do canal. Para essas novas condições de morfologia fluvial estudaram-se concepções alternativas de estabilização. Foram avaliadas as cheias de projeto descargas futuras estimadas para, e as medidas para mitigação do processo erosivo, estabilização e proteção do leito e das margens do riacho.

PALAVRAS-CHAVE: Geomorfologia Fluvial, Erosão Fluvial, Erosão Remontante, Canais de 2ª Ordem, Estudos Hidráulicos, Reabilitação de Infraestruturas.

1 INTRODUÇÃO

Diversos riachos e córregos em regiões de solos arenosos, no estado de São Paulo, estão submetidos a alterações bruscas e recentes na morfologia de seus canais, apresentando aprofundamento e alargamento do leito, especialmente por processos erosivos remontantes (Figura 1).



Figura 1. Erosão de canal, em processo remontante.
Fonte: Acervo TBG (2011).

A forma de evolução dos processos erosivos de um grande número de canais, em bacias de drenagem em que há predominância de solos arenosos, no estado de São Paulo, têm características muito similares. Muito embora estejam em regiões distantes e com ocupações diferentes, as características dessa evolução conduzem à conclusão de se tratar de uma “síndrome” de reativação das incisões das drenagens naturais. Essas erosões afetam diretamente, além dos atributos ambientais das bacias, as condições de implantação de infraestruturas, sua segurança e vida-útil.

2 ASPECTOS DA OCORRÊNCIA DE SOLOS ARENOSOS, EM SÃO PAULO.

Os solos arenosos que ocorrem: na porção ocidental do estado de São Paulo, noroeste do Paraná, parte oriental do Mato Grosso do Sul, oeste do Triângulo Mineiro e sul de Goiás estão assentados sobre rochas do Grupo Bauru, em suas diferentes formações, na bacia do Paraná (Figura 2).

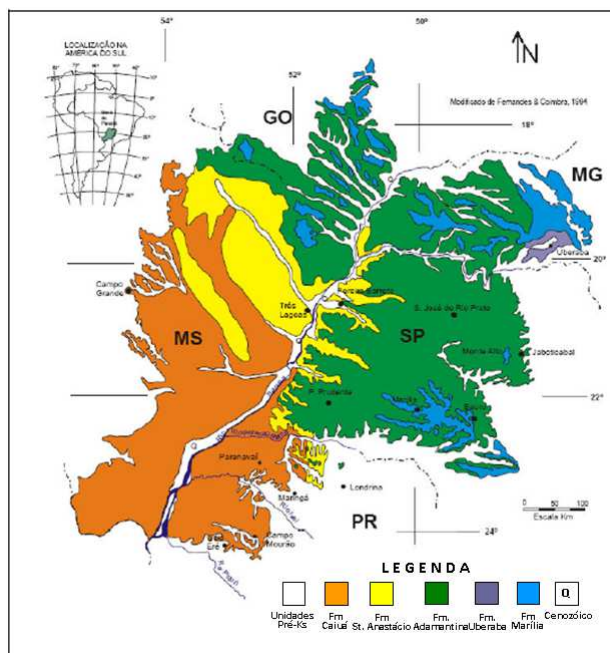


Figura 2. Área de ocorrência das unidades do Grupo Bauru, na bacia do Paraná. Fonte: Silva (2003), modificado de Fernandes e Coimbra (1994).

A bacia Bauru, uma sequência sedimentar neocretácea de origem continental interior, tem por substrato rochas vulcânicas básicas da Formação Serra Geral, que aflora em suas bordas. Desenvolveu-se por subsidência termomecânica, na parte centro-sul da plataforma Sul-Americana após o rompimento do megacontinente Gondwana (Fernandes, 2004).

Cessados os derrames de lava da Formação Serra Geral, que marcaram o final dos eventos deposicionais, sucedeu-se o soerguimento epirogênico das bordas da bacia do Paraná, tornando a zona central, na porção norte da bacia, uma área negativa, com embaciamentos localizados.

O preenchimento da Bacia Bauru ocorreu com o contínuo aporte de sedimentos clásticos originado das bordas e consequente colmatção do interior da bacia, acompanhado por progressiva expansão dos limites da área deposicional, segundo Fernandes & Coimbra, (2000).

Segundo Dal' Bó & Basilici (2011), a sucessão de eventos sedimentares ocorreu em condições desérticas na base. Sendo predominantemente flúvio-lacustres, em sua

fase intermediária e novamente áridas no topo, repercutindo no sequenciamento das diferentes unidades litoestratigráficas.

A Bacia Bauru, a oeste da linha divisória, no domínio da Depressão Periférica, no estado de São Paulo, está esculpida em rochas cretácicas, com presença de pequenos platôs basálticos, superfícies planálticas rebaixadas, que se caracterizam predominantemente por relevos de colinas amplas, com topos planos e vertentes convexas.

Os perfis dos solos apresentam regolitos espessos e horizontes superficiais em avançado estágio de intemperismo, com predominância de minerais de argila do tipo 1:1 e baixa quantidade de minerais primários.

Entre os tipos de solos minerais, não hidromórficos, predominam (Figura 3) os Latossolos Vermelho-amarelo, solos profundos com horizonte B latossólico, e Argissolos, solos com horizonte B textural (Podzólicos Vermelho-amarelos). Esses últimos são solos cuja espessura não excede a 200 cm, situados em áreas de relevo predominantemente ondulado e forte ondulado.

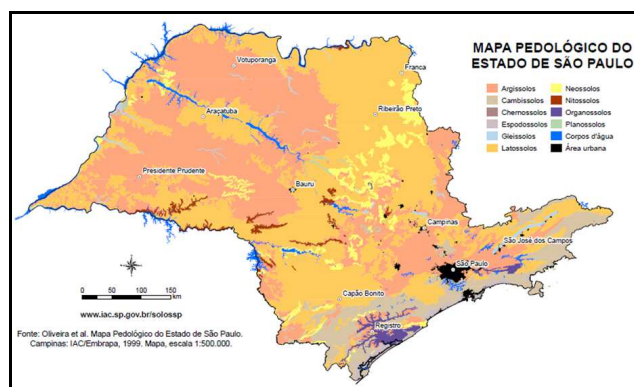


Figura 3 – Mapa Pedológico do Estado de São Paulo. Fonte: Oliveira et al. (1999).

Nos fundos de vale, pouco profundos, com características associadas com encharcamento e redundando em acúmulo de matéria orgânica na primeira camada ou fenômeno de redução nas camadas subjacentes, ocorrem os solos hidromórficos, que tiveram pedogênese com influência do lençol freático, condicionada, principalmente, por relevos planos. São classificados como solo de Glei Húmico ou Glei Pouco Húmico ou Solo Orgânico, a depender a proporção de acumulação de matéria orgânica

no horizonte superficial e presença de cores acinzentadas, característica da gleização.

3 EVOLUÇÃO NATURAL DA REDE DE DRENAGEM

Os sistemas fluviais têm um papel fundamental na modelação lenta do terreno, atuam sob ação dos processos de erosão, transporte e deposição, decorrentes da influência do clima (Monteiro-da-Costa, 2009).

Segundo Casseti (2006), a dissecação atual ou subatual encontra-se associada ao entalhamento da drenagem, de alguma forma influenciada pelo soerguimento do relevo, ou seja, com os mecanismos epirogenéticos positivos, responsáveis pela reativação da erosão remontante e conseqüentemente da incisão dos talvegues.

Em períodos mais recentes os terrenos da bacia hidrográfica do rio Paraná, estão sendo submetidos à dissecação ativa dos agentes climáticos, mostrando áreas com graus variados de degradação e de profundidade de encaixe dos vales.

4 EROSÃO EM CANAIS FLUVIAIS

A estabilidade ou alteração da calha (leito e margens) de um rio é o resultado da integração dos controles exercidos pelos aspectos de geologia, clima e uso da terra da bacia de captação. Por esta razão, para se compreender a evolução de um trecho do rio, deve-se avaliar a quantidade e o tipo de sedimentos, a forma como a água é fornecida a partir das cabeceiras de drenagem, o clima, a geologia e também se determinar os efeitos das condições a montante sobre o comportamento do canal a jusante, assim como as prováveis alterações do nível de base.

Para Lana e Castro (2012), os canais fluviais se deparam com diferentes níveis de base no seu caminho em direção ao nível de base regional (ou global). Citam que, o “nível de base” é o nível mais baixo ao qual a erosão da superfície da Terra busca atingir. É especialmente o nível abaixo do qual os rios não conseguem erodir seus depósitos.

O nível do mar é considerado o nível de base principal. O nível atual do leito de um trecho de rio serve de nível base local ou temporário para seus afluentes, a montante.

De acordo com Schumm (1981), apud García López (2013), um sistema fluvial pode receber influência significativa das variações de jusante que ocorrem especialmente no nível de base. Uma redução desse nível produz um “rejuvenescimento”, ou seja, uma forte tendência para escavar ou aprofundar o canal a montante.

O perfil de equilíbrio de um rio é a expressão de sua declividade, ou gradiente, representados pela relação entre altimetria e comprimento, para diversos pontos, situados entre a nascente e a foz. A inclinação do perfil de equilíbrio é uma função da descarga do rio e da carga sedimentar transportada (Cassetti, 2006).

Schumm (1977), apud Lana e Castro (2012), observou que um perfil de equilíbrio, totalmente liso, praticamente não é encontrado na natureza devido às influências dos níveis de base locais. Portanto, é plausível se referir a um perfil escalonado (*graded profile*), mais condizente com a realidade da maioria dos sistemas fluviais.

García López (2013) apresenta que um sistema fluvial é dividido, ao longo de sua extensão, em três partes chamadas Zonas 1, 2 e 3, que correspondem, respectivamente, às etapas da juventude, maturidade e senilidade.

Juventude: é o trecho da bacia de drenagem, essencialmente área de produção de sedimentos. Maturidade: é o trecho de transferência ou transporte, com maior movimento de sedimentos (canais mais retilíneos) e Senilidade: trechos de depósito dos sedimentos (canais sinuosos e meandantes).

Os canais sofrem com cinco tipos principais de erosões: erosão de margens; degradação de canal; *scour* (revolvimento de leito); avulsão e retroerosão.

“Scour” refere-se ao ataque pontual de fluxos turbulentos, provocando uma diminuição do nível do leito do canal abaixo de uma posição de referência.

Esses tipos de erosão, embora rápidos em escala de tempo geológico, estão associados à

ocorrência de eventos de cheia e evoluem na dependência da sequência de vários desses eventos.

4.1 Erosão Acelerada de Canais Fluviais

A extrema sensibilidade dos canais fluviais ao ingresso de energia nos sistemas produz mudanças relativamente rápidas no seu sistema, acelerando os processos no sentido do reequilíbrio dinâmico destes (Monteiro-da-Costa, 2009). Grande parte das anomalias fluviais está associada às feições morfotectônicas, produzidas por perturbações neotectônicas. Elas afetam diretamente o comportamento dos canais de drenagem, produzindo cachoeiras, reativação de processos erosivos estabilizados, captura de rios, mudanças bruscas de direção, encaixamento do canal às estruturas (falhas e juntas), reincisão de terraços, estrangulamentos do vale, barramentos, formação de bolsões de retenção, reafeiçoamento das vertentes, entulhamento do vale com sedimentos, alterações no nível do lençol freático e intensificação da erosão remontante.

Processos de erosão remontante evoluem nos canais fluviais independentemente de haver eventos de cheias. Após terem suas condições iniciais com uma seção rebaixada, avançam continuamente e assim, tornam-se “acelerados”. Dominados por processos de “pipings” a montante, na base do leito, na frente erosiva, ocorrem solapamentos evoluindo remontantemente (Figura 4).

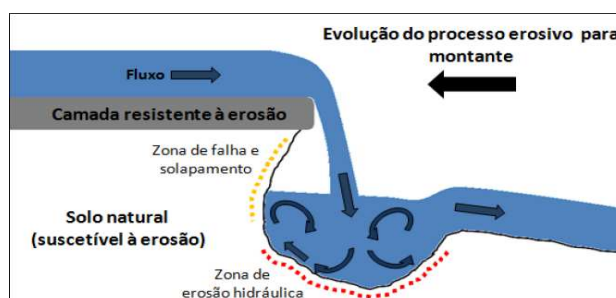


Figura 4 – Ilustração do processo de retroerosão em canais fluviais. Fonte: NHC (2011).

Posteriormente, esse processo tende a evoluir até que seja estabelecido um perfil longitudinal com um novo estado de equilíbrio, no transporte de sedimentos.

Uma sequência do processo de estabilização foi apresentada pela NHC (2011):

a) Início do processo (desnível propicia a criação de regime supercrítico com alto potencial erosivo, levando a uma rápida erosão do leito);

b) Momento intermediário onde ainda existe uma região de grande declividade e de regime supercrítico, continuando a rápida erosão do local;

c) O leito continua a sofrer processo de rebaixamento, porém em velocidade menor; e

d) O corpo hídrico atinge sua condição de "equilíbrio".

4.2 Exemplos de Canais Fluviais Submetidos à Retroerosão

Na região de solos arenosos da bacia sedimentar do Grupo Bauru das vertentes de 2ª ordem de afluentes do rio Paraná, no estado de São Paulo, são verificados diversos exemplos de canais fluviais submetidos à retroerosão.

No ribeirão Monte Serrat, afluente do rio Aguapeí, se desenvolvem erosões remontantes, bem evidenciadas (Figura 5).



Figura 5 – Erosão remontante no canal do ribeirão Monte Serrat, com taludes já sendo erodidos. Fonte: Acervo TBG (2011).

O riacho Jardim Novo Maracanã, afluente do córrego Piçarrão, na bacia do rio Capivari, que drena ao rio Tietê, está em área peri-urbana de Campinas-SP (Figura 6).



Figura 6 – Canal do riacho Jardim Novo Maracanã, após avanço de erosão regressiva pela seção inspecionada. Fonte: Acervo TBG (2015).

5 ESTUDO DE CASO DE EROSÃO ACELERADA EM CANAL FLUVIAL

Na bacia do riacho Jardim Novo Maracanã ocorreu cheia de grande tempo de retorno, em março de 2015.

Enquanto, em 2014 (Figura 7) o canal do riacho apresentava-se apenas com sinais de expansão lateral e aprofundamento do leito, em trecho jusante da seção de estudo, em 2015 houve evolução acelerada da retroerosão, atingindo trechos também a montante dessa seção (Figura 8).



Figura 7 – Imagem aérea de trecho e seção de estudo no riacho Jardim Novo Maracanã, em 2014. Fonte: Acervo TBG (2014).



Figura 8 – Imagem aérea da seção de estudo no riacho Jardim Novo Maracanã, em 2015, após avanço erosivo. Fonte: Acervo TBG (2015).

Para essa região, a Prefeitura Municipal de Campinas (2007), já apresentava em seu PLG - Plano Local de Gestão - Macrozona 5 – informações que nortearam os levantamentos desse estudo. Entre essas, menciona-se que “as cabeceiras de drenagens são geralmente áreas de nascentes ou de concentração (talvegues) de águas pluviais em que se instalam processos de erosão fluvial remontante. A abertura de ruas e o lançamento de águas pluviais e servidas nestas áreas aceleram a erosão que acaba danificando as infraestruturas implantadas no fundo de vale”.

5.1 Estudos Realizados na Microbacia do Riacho Jardim Novo Maracanã.

A concepção de projetos deve ter base em considerações concomitantes de geologia, hidráulica, hidrologia e geotecnia (García López, 2013).

O relatório das sondagens a percussão realizadas nas margens e no leito do riacho apresentou que o solo no trecho é arenoso e de característica não-coesiva. No leito, o substrato rígido (impenetrável à técnica de sondagem com amostrador tipo SPT), está localizado na cota aproximada de 562,4 m. A amostra nesse local indica uma camada de 2,8 m (cota aproximada 566,7 m) de material facilmente erodível (areia fina, pouco siltosa de baixa ou média compactação) e 4,30 m de material erodível (areia média a fina, pouco argilosa muito compactada). Na margem direita, a

coluna amostrada detectou camada de solo aluvial, de coloração cinza a amarelo variegado, nos primeiros 8 m, sobre camada de saprolito de rocha sedimentar arenosa, de 6 m de espessura.

Foram observados ao longo do curso d'água afloramentos de rocha tipo arenito e de camadas de solo tipo argila e matéria orgânica (turfa).

A aproximadamente 400 m a jusante da seção de estudo existe uma galeria de aproximadamente 2,0 m por 2,0 m sob Rua 11, na cota aproximada de 563,0 m. (Figura 9).



Figura 9 – Imagem da galeria pluvial a 400 m a jusante seção de estudo no riacho Jardim Novo Maracanã. Fonte: Acervo TBG (2015).

Muitas galerias de microdrenagem urbana descarregam as águas pluviais no leito do riacho, sem estruturas de dissipação de energia causando erosão localizada.

A bacia hidrográfica do riacho na seção de interesse apresenta área de drenagem de 0,81 km².

O comprimento do curso principal até a seção de interesse é de 984,8 metros, a declividade média obtida é de 0,0334 m/m e a declividade equivalente é 0,0238 m/m.

Para efeito da obtenção do coeficiente do coeficiente C do método racional, foi admitido índice de 0,50 para pastagem (37% da área total) e 0,90 para área urbanizada (63% da área total), resultando em um coeficiente médio ponderado igual a 0,75, para as condições atuais. Para as condições futuras foi adotado um coeficiente igual a 0,90, que caracteriza uma área densamente urbanizada.

Na obtenção do tempo de concentração foram utilizados os seguintes dados: o

comprimento do talvegue igual a 984,8 m, a declividade média igual a 0,0334 m/m. Com base na fórmula do método cinemático, o tempo de concentração é de 22 minutos.

Os estudos hidrológicos de cheia para fins de projetos foram estabelecidos com base nas precipitações associadas a períodos de retorno (TR) de 50 e 100 anos.

A estimativa da precipitação máxima foi realizada com base na precipitação diária, para as duração de 20 minutos. O procedimento de desagregação da precipitação (Silveira, 2000), incluiu a passagem da precipitação diária para a de 24 horas, multiplicando-se a precipitação diária pelo coeficiente 1,14. A partir da precipitação de 24 horas e multiplicando-se pelo coeficiente 0,263 foi obtida a precipitação para a duração de 20 minutos.

Os períodos de retorno adotados foram 50 e 100 anos, considerados para obras de macrodrenagem.

As vazões máximas, considerando a intensidade de precipitação com duração de 20 minutos, são apresentadas na Tabelas 1:

Tabela 1 – Precipitações Máximas e Vazões de cheia na microbacia, nas condições atuais e futuras.

Vazões de Cheias, nas condições atuais e futuras, para TR de 50 e 100 anos e tempo de duração de chuva de 20 min.				
		Precipitação Máxima (mm/h)	Vazão de Cheia Atual (m ³ /s)	Vazão de Cheia Futura (m ³ /s)
Período de Retorno - TR (anos)	50	141,4	23,9	28,6
	100	154,9	26,2	31,4

Fonte: Elaborada pelos autores (2015).

A comparação dos dados topográficos (IGC, 2002), baseadas em modelo digital de terreno (MDT) de aerolevanteamento realizado em 2001, com o levantamento topográfico realizado em maio de 2015, caracterizou um rebaixamento do leito do riacho de aproximadamente 3,0 m na seção estudada, no período 2001 a 2015 (Figura 10).

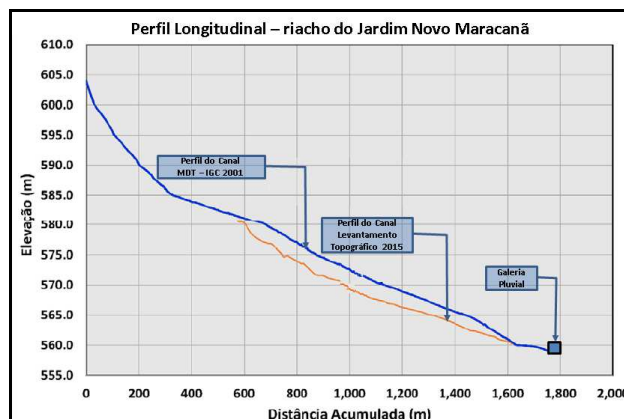


Figura 10 – Esboço do perfil longitudinal, do trecho em estudo no riacho Jardim Novo Maracanã. Bases: Aerolevanteamento IGC, 2001 e Levantamento Topográfico, de 2015. Fonte: Elaborado pelos autores (2015).

Este rebaixamento, possivelmente, foi devido às obras do cruzamento da Rua 11, entre os anos de 2005 e 2006.

Dois fatores importantes que poderão influenciar diretamente a estabilização do processo de rebaixamento. Sendo esses, a presença de substrato rígido na cota aproximada de 570,0 m e a presença da galeria de concreto no cruzamento do riacho com a Rua 11, na cota aproximada de 563,0 m.

6 CONCLUSÕES

As características das retroerosões de canais estudadas conduzem à conclusão de se tratar de uma “síndrome” de reativação das incisões das drenagens naturais. Essas erosões afetam diretamente, além dos atributos ambientais das bacias, as condições de implantação de infraestruturas, sua segurança e vida-útil.

Pelos levantamentos em imagens históricas e sondagens geotécnicas da microbacia do riacho Jardim Novo Maracanã verificou-se que o canal passou, no período de 1994 a 2015, de uma condição meandrante no fundo do vale, para uma forma retilínea, que o mesmo esteve entulhado por sedimentos recentes e que houve o estabelecimento de um processo de erosão remontante associado à elevação da magnitude das descargas de cheia, geradas após a intensificação da ocupação dos solos das vertentes, nesse período.

Os resultados dos estudos e análises permitiram concluir que depois de fortes chuvas

que ocorreram em março de 2015, o leito do riacho sofreu um rebaixamento no trecho a montante da galeria pluvial. O processo de erosão consistiu no colapso e solapamento das margens e aprofundamento do canal. O processo erosivo mantém as tendências de rápido avanço remontante e de aprofundamento do perfil de equilíbrio até o nível de base estratigráfico do canal. O escoamento no trecho imeditamente a jusante da seção de estudo, continuará a ser supercrítico, com formação de ressalto hidráulico, para as diversas vazões. Isso determina a tendência de aprofundamento do leito do riacho em aproximadamente 3,0 m abaixo das cotas do leito atual, no trecho da seção estudada.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cassetti, V. (2006) *Geomorfologia*. (Acesso em: www.funape.org.br/geomorfologia).
- Brown, S. A. & Clyde, E. S. (1989). *Design of riprap revetment*. U.S. Federal Highway Administration, Washington, DC. EUA.
- Dal' Bó, P.F.F. & Basilici, G. (2011). *Relações entre Sedimentação e Paleopedogênese em um Antigo Lençol de Areia Eólica*. São Paulo, UNESP, Geociências, Vol. 30, n. 4, p. 509-528.
- Fernandes, L. A. (2004). *Mapa Litoestratigráfico da Parte Oriental da Bacia Bauru (pr, sp, mg), escala 1:1.000.000*. Boletim Paranaense de Geociências, n. 55, Editora. UFPR . Curitiba. p. 53-66,.
- Fernandes, L.A. & Coimbra, A.M. (2000). *Revisão Estratigráfica da Parte Oriental da Bacia Bauru (Neocretáceo)*. Revista Brasileira de Geociências. Vol. 30(4), p.717-728.
- García López, M. (2013) *Estudios para el diseño de cruces de cuerpos de agua*. ASME 2013 International Pipeline Geotechnical Conference (IPG2013). Bogota, Colombia, Tutorial A - Parte 2.
- IGC - Instituto Geográfico e Cartográfico. (2002). *Mapeamento do Estado de São Paulo – folhas 077/097, escala 1:10.000*. São Paulo.
- Lana, C. E. e Castro, P. de T. A. (2012). *Evolução histórica e filosófica do conceito de nível de base fluvial*. TERRÆ DIDÁTICA. V. 8(1). p. 51-57.
- Monteiro-da-Costa, P.S. (2009). *Interações Sistêmicas em Ambientes Naturais sob Efeito de Neotectônica, Mediadas por Sistemas Fluviais: Observações no Município de Atibaia (SP, Brasil)*. In.: Resumos - XII Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário. La Plata, Argentina, p. 388.
- NHC – Northwest Hydraulic Consultants. (2011). *Apresentações*. Pipeline River Crossing Workshop. Treinamento Interno. Universidade Petrobras. Rio de Janeiro.
- Oliveira et al. (1999). *Mapa Pedológico do estado de São Paulo*. IAC/Embrapa – Campinas. Mapas, escala 1:500.000.
- Prefeitura Municipal de Campinas (2006). *Plano Diretor – Revisão 2006*. Campinas - SP.
- Silva, F. de P. e. (2013). *Geologia de subsuperfície e hidroestratigrafia do Grupo Bauru no estado de São Paulo*. Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas Rio Claro. P. 166.
- Silva, F. de P; Kiang, C. H. & Chang, M. R. C. (2005). *Estratigrafia de Subsuperfície do Grupo Bauru (K) no Estado de São Paulo*. Revista Brasileira de Geociências N. 35(1). p:77-88.
- Silveira, A. L. L. (2000). *Equação para os Coeficientes de Desagregação de Chuva*. RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos, V.5, nº4, Porto Alegre, RS. p. 143-147.
- USACE - US Army Corps of Engineers (2010). *HEC-RAS River Analysis System: Hydraulic Reference Manual - Version 4.1*. US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center.