

COMPACTAÇÃO E IMPERMEABILIZAÇÃO DO SOLO E IMPLICAÇÕES NOS CANAIS FLUVIAIS URBANOS

<https://doi.org/10.4215/rm2020.e19023>

Elizon Dias Nunes ^{a*} - Lucas Espíndola Rosa ^b

(a) Doutor em Geografia. Professor da Universidade Federal de Goiás (UFG), Goiânia (GO), Brasil.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5430-4841>. **LATTES:** <http://lattes.cnpq.br/4537975818670608>.

(b) Doutor em Geografia. Professor da Universidade Federal de Goiás (UFG), Goiânia (GO), Brasil.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2979-6546>. **LATTES:** <http://lattes.cnpq.br/6482962736631878>.

Article history:

Received 27 March, 2020

Accepted 10 August, 2020

Publisher 15 October, 2020

(*) CORRESPONDING AUTHOR

Address: Avenida Esperança, s/n, sala A-37 Bl. A, 1 Andar, CEP 74690-900, Câmpus Samambaia, Goiânia (GO), Brasil. Tel: (+55 62) 3521 1184, ramal 211.

E-mail: elizonnunes@ufg.br

Resumo

A expansão e o adensamento urbano vêm implicando em fenômenos relacionados à degradação de bacias hidrográficas. O objetivo deste trabalho é avaliar a influência do aumento da pressão antrópica nos desequilíbrios envolvendo processos erosivos e a consequente degradação da planície fluvial de uma bacia hidrográfica em Aparecida de Goiânia – GO. A metodologia compreendeu a correlação espaço-temporal entre redução do tempo de concentração, aumento das estimativas de escoamento superficial e a consequente degradação da planície em 1992, 2005 e 2016. Os resultados indicam aumento de erosões em segmentos de convergência de canais, de baixo gradiente altimétrico e ocorrência de Neossolo Flúvico, resultantes do aumento do volume e picos de vazão advindos de áreas com significativo processo de adensamento nos últimos 24 anos. Assim, destaca-se a importância do uso de indicadores de aumento da pressão antrópica na compreensão de impactos relacionados ao adensamento urbano.

Palavras-chave: Adensamento Urbano; Escoamento Superficial; Erosão Fluvial.

Abstract / Resumen

SOIL COMPACTION AND WATERPROOFING AND IMPLICATIONS IN URBAN FLUVIAL CHANNELS

Urban expansion and densification have resulted in phenomena related to the degradation of watersheds. This work evaluated the influence of increased anthropic pressure on the imbalances involving erosive processes and the consequent degradation of the river plain of a hydrographic basin in Aparecida de Goiânia - GO. The methodology analyses the spatial-temporal correlation between reduced concentration time, increased runoff estimates, and the consequent degradation of the plain in 1992, 2005, and 2016. The results indicate an increase in erosion in segments of channel convergence, with a low altimetric gradient and the occurrence of Fluvent Entisol, stemming from the increase in volume and flow peaks arising from areas with significant densification processes in the last twenty-four years. Thus, the importance of using indicators of increased anthropic pressure to understand the impacts related to urban density.

Keywords: Urban Density; Surface runoff; River Erosion.

COMPACTACIÓN E IMPERMEABILIZACIÓN DEL SUELO E IMPLICACIONES EN CANALES FLUVIALES URBANOS

La expansión y la densificación urbana han dado lugar a fenómenos relacionados con la degradación de las cuencas hidrográficas. El objetivo de este trabajo es evaluar la influencia del aumento de la presión antrópica sobre los desequilibrios que involucran procesos de erosión y la consecuente degradación de la llanura aluvial de una cuenca hidrográfica en Aparecida de Goiânia - GO. La metodología comprendió la correlación espacio-temporal entre la reducción del tiempo de concentración, el aumento de las estimaciones de escorrentía y la consiguiente degradación de la llanura en 1992, 2005 y 2016. Los resultados indican un aumento de erosiones en los segmentos de convergencia del cauce, con un gradiente altimétrico bajo y presencia de Neosuelo Flúvico, como resultado del aumento del volumen y de los picos del caudal que surgen de las áreas con un proceso de densificación significativo en los últimos 24 años. Así, se destaca la importancia del uso de indicadores de aumento de la presión antrópica para comprender los impactos relacionados con la densificación urbana.

Palabras-clave: Densificación Urbana; Escorrentía Superficial; Erosión Fluvial.

INTRODUÇÃO

A expansão e o adensamento urbano nas últimas décadas vêm implicando em uma série de alterações, sobretudo no ritmo dos processos ambientais, com a consequente ocorrência de fenômenos relacionados ao aumento da pressão antrópica em bacias hidrográficas. Essas mudanças têm levado esses sistemas naturais à degradação, especialmente nas grandes cidades, onde o aumento da área efetivamente edificada em cada domicílio vem contribuindo na redução generalizada das áreas destinadas à infiltração, impedindo que o solo desempenhe suas funções hidrológicas de forma eficiente (NUNES, L. 2015; TUCCI, 2016). Entre os principais impactos decorrentes destacam-se a retirada da cobertura vegetal de áreas ambientalmente sensíveis e a consequente alteração no funcionamento dos ecossistemas, levando-os à perda de biodiversidade e alteração no ritmo dos processos físicos (HAMMOND et al., 2013; LIN et al., 2017; GUZHA et al., 2018).

Dos principais processos físicos, destacam-se os hidrológicos, os quais resultam da interação da água das chuvas com as propriedades do terreno e do solo. Cotidianamente tendem a gerar efeitos mais notórios devido às situações adversas que podem proporcionar. Estas, na maioria das vezes, têm como causa a ocorrência de chuvas de longa duração e, principalmente, intensas, face à falta ou instalação de infraestruturas ineficientes, como estruturas de drenagem e arruamentos mal planejados que, associadas à compactação e à impermeabilização, implicam na redução da capacidade dos solos em desenvolver suas funções hidrológicas. Destas, destacam-se os processos de infiltração e retenção de água em subsuperfície que, se ineficientes, influenciam no aumento do escoamento superficial, alteram os fluxos entre o lençol freático e os canais de drenagem, implicam em sobrecarga de vazão nos períodos de chuva e, por consequência, prejudicam a perenidade do sistema durante os períodos de estiagem (SU et al., 2014; MOHAJERI et al., 2015).

Outro fator que potencializa a concentração e aumento do volume de fluxos é a forma de expansão e adensamento urbano. Esses tendem a se iniciar nas porções mais elevadas e amplas das bacias e, na maioria das vezes, se estendem até os segmentos mais rebaixados e próximos das planícies de inundação. Com isso, os fluxos de escoamento superficial, com maiores volumes e velocidades resultantes, convergem e incidem em áreas menores. Soma-se a isso a redução do tempo de concentração que implica em aumento da intensidade e, consequentemente, maior pressão nas áreas mais rebaixadas. Estas, por razões geométricas, tendem a se reduzir exponencialmente na medida em que se aproximam das nascentes e canais fluviais, resultando no aumento de diferença entre áreas produtoras e áreas receptoras de fluxos. Diante das chuvas fortes e passageiras, especialmente nos grandes centros urbanos brasileiros (WOLLMANN, 2015), o número e a frequência de alagamentos e inundações vêm crescendo nos últimos anos (LIMA; AMORIM, 2014; KOCORNIK-MINA et al., 2015; MUKHERJEE, 2016; GRIFFITHS et al., 2018).

No Brasil esse fenômeno passou a ser mais evidente após a década de 1960, em que a maior parte da população passou a viver nas cidades em detrimento do campo (OJIMA, 2008; TUCCI, 2016; PASQUALOTTO; SENA, 2017). A demanda por novas moradias em ambientes urbanos influenciou na expansão de áreas adjacentes e adensamento de regiões centrais já urbanizadas, além da ocupação de áreas menos favoráveis. O resultado foi uma maior e mais intensa modificação sobretudo na cobertura do solo e, por consequência, maiores interferências no equilíbrio dos sistemas naturais (CAMARGO; AMORIM, 2005; SANTOS et al., 2017). Neste contexto, e considerando tendências sociais, econômicas, climáticas e de expansão urbana em escala global, Tripathi et al. (2014) e Rubinato et al. (2018), sugerem que a frequência, a magnitude e, sobretudo, os custos relacionados a esses eventos tendem a aumentar.

No entanto, diante de todas essas implicações, o que atualmente ainda se verifica é a falta da instituição de indicadores relevantes e seguros que possam orientar uma ocupação mais harmoniosa e, assim, assegurar um crescimento urbano menos impactante (SILVA; TRAVASSOS, 2008; WEBBER et al., 2018). Entende-se que a melhor saída é a busca por um melhor equacionamento entre os fatores que influenciam nas áreas modificadas e produtoras de maiores inputs de energia, e os efeitos decorrentes nas áreas receptoras e ainda com características naturais, a fim de atenuar os desequilíbrios nos sistemas hidrográficos urbanos.

Neste sentido, o presente trabalho objetiva avaliar os efeitos do adensamento urbano no aumento da precipitação efetiva, bem como na concentração espaço-temporal das estimativas de volume de

escoamento superficial e seu impacto no equilíbrio dos canais fluviais nos anos de 1992, 2005 e 2016 na bacia hidrográfica do córrego Tamanduá no município de Aparecida de Goiânia – GO. Tal avaliação se mostra relevante, uma vez que, na Região Metropolitana de Goiânia, vem crescendo o número, bem como a intensidade da degradação de canais fluviais em áreas que passaram por processo de adensamento urbano nas últimas décadas.

MATERIAIS E MÉTODO

ÁREA DE ESTUDO

A bacia em pesquisa localiza-se na área urbana do município de Aparecida de Goiânia, conforme apresentado na Figura 1. Neste, o crescimento populacional se intensificou a partir da década de 1980 e vem ocorrendo via expansão urbana, com o surgimento de novos bairros em áreas adjacentes, e adensamento de edificações em núcleos parcialmente já urbanizados ou próximos às grandes vias de circulação. Trata-se de uma área representativa do processo de expansão e adensamento urbano transcorrido especialmente nas últimas três décadas e que resultou, sobretudo, na conurbação deste município com a capital Goiana (FERREIRA, 2013; BORGES; CUNHA, 2015). Por consequência, resultou em gradativo processo de compactação e impermeabilização do solo, o qual tem se mostrado espacial e temporalmente correlato às mudanças no regime hidrológico, resultando em incisões erosivas ao longo das vertentes e da planície com a consequente degradação dos canais fluviais.

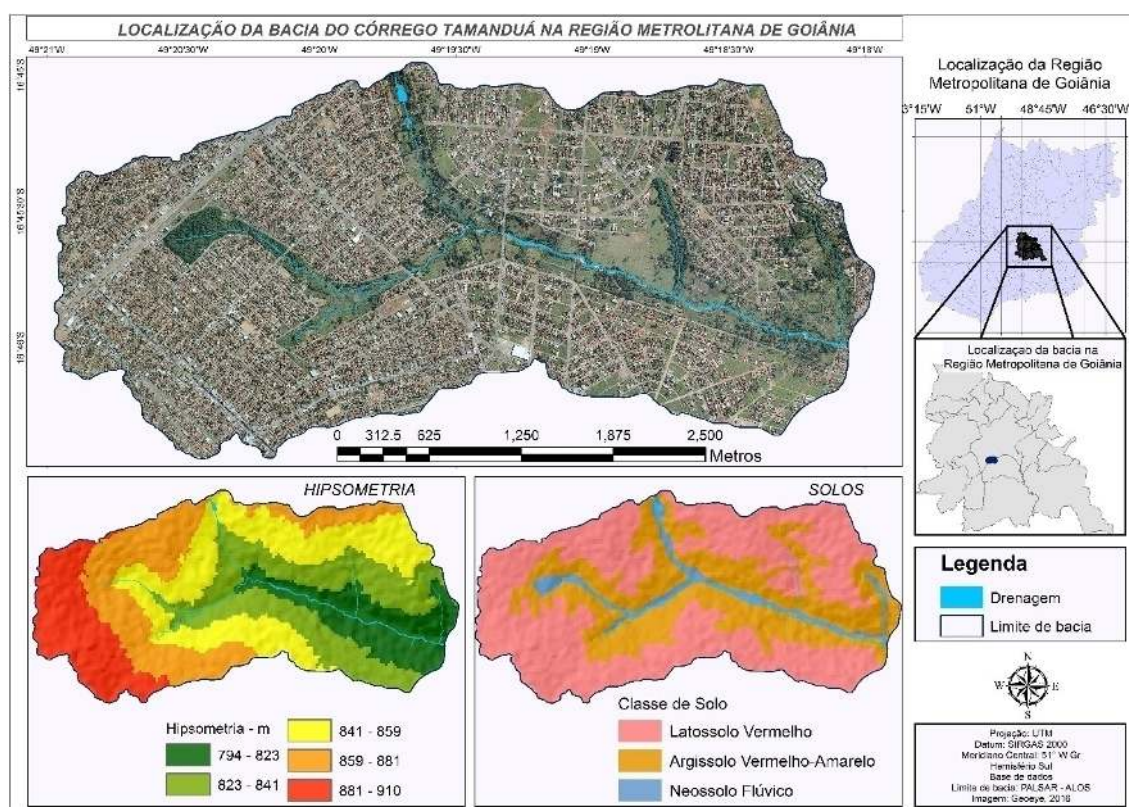


Figura 1 - Localização, hipsometria e classes de solo da bacia do córrego Tamanduá no município de Aparecida de Goiânia.

A geologia da área é formada por rochas metamórficas pertencentes ao grupo Araxá Sul de Goiás, com predominância de xistos que ocupam boa parte da bacia e afloram ao longo do canal principal. Ocorrem também quartzitos ricos em quartzo e concentrações variáveis de micas (LACERDA FILHO et al., 1999; FUCK et al., 2000). Essa condição geológica proporciona ao canal principal forte resistência ao aprofundamento, conferindo ao mesmo baixo gradiente altimétrico, o que resulta em maiores

condições de ocorrência de solos aluviais e hidromórficos. Nos segmentos mais elevados das vertentes predominam declives de 5%, com o predomínio de Latossolo Vermelho Distrófico e textura argilosa (RODRIGUES et al., 2005). Compreendem as primeiras áreas a passar pelo processo de compactação e impermeabilização do solo devido à implantação dos primeiros núcleos de edificação e as primeiras vias compactadas ainda nas décadas de 1970 e 1980 (PINTO, 2009). Na transição das altas para as médias vertentes a declividade se eleva a 11%, com o predomínio de Argissolo Vermelho-Amarelo de textura média à argilosa. São áreas que em 1980 ainda eram ocupadas por pastagens, tendo em vista que o processo de edificação ainda se restringia às áreas mais elevadas e planas. Por fim, nas proximidades dos canais fluviais a declividade se eleva a cerca de 28%, quando atinge a planície, voltando a se reduzir, ficando em torno de 3% ao longo de todo o canal fluvial. Com essa baixa inclinação o predomínio é de Neossolo Flúvico Distrófico de textura arenosa, por vezes sobrejacente ao Gleissolo Háptico Distrófico e de textura argilosa. De modo geral, quanto aos processos e formas geomorfológicas, constitui-se em uma bacia de vertentes predominantemente convexas, com concavidade pouca expressiva, mesmo próximo à planície de inundação.

O clima é tropical semiúmido, com duas estações distintas e acentuada sazonalidade climática (MONTEIRO, 1951; LUIZ; ROMÃO, 2019). O período quente, com média entre 29°C e 32°C, e chuvoso vai do final de setembro ao início de abril, sendo os meses de janeiro e dezembro de maior precipitação média acumulada com 268 mm. O período seco e de temperaturas amenas, com média entre 18°C e 21,5°C, vai de maio ao início de setembro, com a média dos menores valores acumulados, 8 mm, ocorrendo nos meses de junho e julho. A precipitação média anual é de 1572 mm, sendo que em anos de menor oferta a mesma pode chegar a 1236 mm, ao passo que naqueles de maior precipitação acumulada a mesma fica em torno de 1900, podendo excepcionalmente chegar a 2080 mm acumulados (OLIVEIRA et al., 2014; INMET, 2017).

METODOLOGIA ADOTADA

A metodologia compreendeu a correlação espaço-temporal entre o aumento do volume e redução do tempo de concentração do escoamento superficial na área da bacia e a degradação ao longo da planície por meio de erosão das bordas no período de 1992 a 2016. Especificamente, para a determinação das estimativas de escoamento superficial aplicou-se o modelo hidrológico Método Racional, cujos primeiros registros sistematizados foram feitos por Pierre Parraut ainda no século XVII. Posteriormente os princípios foram adaptados por Mulvaney (1851) e Kuichling (1889), sendo uma das fórmulas mais conhecidas expressa pela seguinte equação:

$$Q_{max} = CiA / 3.6$$

Equação 1

Em que: Q_{max} = vazão máxima do escoamento superficial, estimada em m³/s; C = coeficiente de escoamento superficial ou razão entre o volume escoado e o total precipitado, adimensional; i = média das intensidades máximas de precipitação, em mm/h, sendo que, para a estimativa de vazão máxima no exutório considerado, a duração do evento pluviométrico admitida deve ser igual ou maior que o tempo necessário para que toda a bacia possa contribuir com o escoamento; A = área da bacia, em km²; e 3,6 = fator de conversão entre unidades.

COEFICIENTES DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL

Os coeficientes de escoamento superficial foram determinados com base na proposta do Serviço de Conservação do Solo (SCS – Soil Conservation Service), do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (U. S. Department of Agriculture), (1971). A referida proposta foi revisada e aplicada pela Administração Federal de Autoestradas (FHA – Federal Highway Administration – U. S. Department of Transportation), (2013), e consiste na razão entre a precipitação efetiva – ou volume convertido em escoamento superficial – e a precipitação total durante o evento considerado, como apresentado na seguinte equação:

$$C = \left[\frac{(P-0,2 S)^2}{(P+0,8 S)} \right] / P$$

Equação 2

Em que: C = coeficiente de escoamento superficial, adimensional; P = precipitação ou altura pluviométrica considerada, em mm; S = coeficiente ou potencial de armazenamento de água no solo, em mm; e $I_a \Rightarrow 0,2 S$ = abstração ou perda inicial considerada. Como observado na primeira parte da Equação 2, na precipitação efetiva considera-se uma perda inicial de cerca de 20% do volume precipitado em decorrência das intercepções e retenções em depressões. Isso implica em afirmar que precipitações com volume acumulado menor do que 20% do coeficiente de armazenamento não proporcionam escoamento superficial.

Os valores de S foram estimados com base nos valores de CN (número de escoamento), conforme o Natural Resources Conservation Service (NRCS) – USDA (1997), como expressão na equação 3.

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

Equação 3

Para tanto, os valores de CN foram determinados com base na avaliação de grupos hidrológicos (GH), resultantes da avaliação dos tipos de solo – em especial textura e profundidade –, das condições de cobertura e uso e da umidade antecedente. Neste método, os valores de CN variam de 0 – baixa capacidade de escoamento –, a 100 – elevada capacidade de escoamento. Ressalta – se também que para o cálculo considerou-se o solo nas condições intermediárias de umidade, com a precipitação acumulada variando entre 13 e 53 mm nos últimos 5 dias.

Os mapas de cobertura e uso do solo foram elaborados por meio da avaliação sequencial e lógica de fotografias aéreas de 1992 em níveis de cinza e resolução espacial de 33 cm; imagens dos satélites QUICKBIRD de 2005 e GEOEYE de 2016, coloridas e com resolução espacial de 50 cm. Para tanto, adotou-se classificação supervisionada por meio do agrupamento de pixels adjacentes e com características espectrais semelhantes, detalhe espectral de 18 e espacial de 8, ambos considerando uma escala de 1 a 20; e segmento ou agrupamento mínimo de 4 pixels. As validações de campo ocorreram por meio de visitas aos locais representativos de cada classe e em áreas que se mantiveram inalteradas ao longo do período. Os processos erosivos foram mapeados por meio de inspeção visual, tendo como base as mesmas imagens. O uso de imagens de altíssima resolução espacial tem se mostrado muito eficiente na determinação de classes com distintas condições de cobertura e uso e, por consequência, melhor detalhamento dos níveis de impermeabilização, conforme constatado por Lechiu et al. (2012).

MÉDIAS DAS INTENSIDADES MÁXIMAS DE PRECIPITAÇÃO

As médias das intensidades máximas de precipitação foram estimadas de acordo com a proposta de Vilela e Mattos (1975), que relaciona a intensidade - duração - frequência (IDF) dos eventos meteorológicos. Para tanto, utilizou-se a equação proposta por Oliveira et al. (2005), a qual resulta do histórico de chuvas sistematizado para a região de Goiânia por meio da seguinte relação:

$$Im = \frac{K \times T^a}{(t+b)^c}$$

Equação 4

Em que: Im = média das intensidades máximas de precipitação, em mm/h; K, a, b e c = parâmetros próprios da estação climatológica; T = tempo de retorno, em anos para um evento extremo; e t = tempo de concentração do escoamento superficial que deve ser menor ou igual ao tempo de duração da precipitação na área da bacia, em minutos. No presente trabalho considerou-se um tempo de retorno

de 12 anos, compatível com áreas comerciais e vias arteriais de tráfego (PORTO et al., 2004). Já os tempos de duração das precipitações resultaram do tempo de concentração do escoamento superficial, de toda a bacia, estimados para os anos de 1992, 2005 e 2016. Estes foram determinados pelo Método Cinemático, conforme o SCS-USDA (1971) por meio da seguinte equação:

$$T_c = 1/60 \times \sum \frac{L_i}{V_i}$$

Equação 5

Em que: T_c = Tempo de concentração do escoamento superficial, em min; 1/60 fator de transformação de segundos para minutos; L_i comprimento de fluxo no segmento considerado, em m; e V_i = Velocidade do escoamento superficial, em m/s.

A velocidade de escoamento superficial foi estimada com base na avaliação dos coeficientes K e da declividade, por meio da seguinte equação (PORTO, 1995):

$$V_i = K \times S_i^{0.5}$$

Equação 6

Em que: V_i = velocidade de escoamento superficial, em m/s; K = coeficiente, conforme coeficiente n de rugosidade de Manning e raio hidráulico, adimensional; e S_i = declividade, em m/m, elevada ao expoente 0,5.

Pelo fato de a bacia possuir área superior a 3 km², aos resultados do Método Racional aplicou-se um coeficiente de retardamento em função da área da mesma, resultando no que se conhece como Método Racional Modificado, conforme proposto por Euclides (1987), cuja fórmula é apresentada:

$$\theta = 0.278 - 0.00034 S$$

Equação 7

Em que: θ = coeficiente de retardamento em função da área da bacia; 0,278 e 0,00034 são constantes e S = área da bacia em km²

ÁREA DE CONTRIBUIÇÃO DA BACIA

Para a elaboração dos modelos de declividade, comprimento de fluxo e área da bacia utilizou-se do Modelo Digital de Elevação (MDE) ALOS – PALSAR, corrigido e com resolução espacial de 12,5 metros. A variável área da bacia foi utilizada de forma cumulativa, isto é, transferência do volume de células à montante para aquela à jusante, resultando no acúmulo de escoamento superficial em função da área de contribuição específica (NUNES; BORBA, 2018). Este artifício proporcionou a aplicação de todas as equações e, conseqüentemente, de todos os cálculos para cada uma das 65.894 células de 12,5 m² do MDE, pertencentes a bacia, o que permitiu a elaboração de um modelo espacialmente distribuído, com o maior valor de estimativa de vazão correspondendo ao exutório. Do contrário ter-se-ia realizado apenas um cálculo, com o valor resultante sendo representativo de toda a área da bacia, sem uma representação da variabilidade espacial dos volumes de escoamento.

ESTIMATIVAS DE PRESSÃO NA PLANÍCIE FLUVIAL

Já para o cálculo de pressão sobre planície fluvial e conseqüente erosão das bordas dos canais nos momentos de chuva aplicou-se a fórmula que representa o conceito de energia cinética ou energia de uma dada porção de massa em movimento por meio da seguinte equação:

$$Ec = m * v^2 / 2$$

Equação 8

Em que: E_c = energia cinética do escoamento, em J; m = massa representada pelo volume de escoamento superficial e considerando a densidade da água igual a 1; e v = velocidade do escoamento superficial, em m/s.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

ADENSAMENTO URBANO, AUMENTO DOS COEFICIENTES DE ESCOAMENTO E DA PRECIPITAÇÃO EFETIVA

Os resultados, especialmente da aplicação das Equações 2 e 3, e considerando uma intensidade de precipitação de 73,37 mm/h durante 32,42 minutos para o ano de 2016, podem ser conferidos na Tabela 1. Nesta, apresenta-se a relação entre as classes de cobertura e uso do solo consideradas e mapeadas, os grupos hidrológicos (GH) e os valores de CN, resultando em valores de coeficientes de infiltração (S), Precipitação Efetiva e Coeficientes de Escoamento Superficial. Ressalta-se que os valores de Precipitação Efetiva e Coeficientes de Escoamento Superficial dependem, além das condições de cobertura e uso, do tempo de duração, bem como da intensidade da precipitação considerada face aos coeficientes de infiltração.

Condição do Terreno	GH	CN	S - mm	Precipit. Efetiva - mm	Coef. Esc. Sup.
Área Edificada	A	77	75,87	5,96	0,150
	C	90	28,22	18,57	0,468
	D	92	22,08	21,64	0,546
Superfície Pavimentada	A C D	98	5,18	34,03	0,858
Solo Exposto Compactado	A	72	98,77	3,33	0,084
	C	87	37,95	14,67	0,370
	D	89	31,39	17,18	0,433
Solo Exposto não Compactado	A	49	264,36	0,00	0,00
	C	79	67,51	7,29	0,184
	D	84	48,38	11,45	0,289
Gramínea Compactada	A	39	397,28	0,00	0,000
	C	74	89,24	4,27	0,107
	D	80	63,50	8,02	0,202
Gramínea não Compactada	A	30	592,66	0,00	0,000
	C	71	103,74	2,90	0,073
	D	78	71,64	6,60	0,166
Árvores Isoladas	A	56	199,57	0,00	0,000
	C	86	41,34	13,53	0,341
	D	91	25,12	20,05	0,506
Mata de Galeria	A	25	762,00	0,00	0,000
	C	70	108,85	2,51	0,063
	D	77	75,87	5,96	0,150

Tabela 1 - Classes de uso e ocupação do solo, grupos hidrológicos e respectivos coeficientes de infiltração, precipitação efetiva e de escoamento superficial. Fonte: elaborados pelos autores a partir dos dados de CN constantes em Tucci e Marques (2001), por meio das equações 2 e 3.

Os resultados do mapeamento multitemporal das classes de cobertura e uso do solo indicam uma bacia em crescente processo de expansão da urbanização –, especialmente para suas porções mais rebaixadas e próximas ao canal principal –, bem como adensamento de edificações nas áreas mais elevadas e planas. O ritmo desse processo tem implicado em um substancial aumento das áreas com elevados coeficientes de escoamento superficial e, por consequência, elevada precipitação efetiva. Entre as classes que tiveram redução de área pode-se destacar Gramínea não Compactada, Solo Exposto não Compactado e Mata de Galeria. As duas primeiras contribuíram com o aumento da Área Edificada, ao passo que a terceira cedeu espaço à expansão das edificações nas proximidades dos canais de drenagem. Em ambas as formas, a Área Edificada passou de 16,49 % em 1992, para 28,46% em 2005, atingindo 56,02% em 2016. A classe de Solo Exposto Compactado cedeu espaço principalmente à Superfície

Pavimentada, sendo que esta passou de 0% em 1992, para 9,6% em 2005, e destes para 14,08% em 2016, conforme demonstrado ao longo da Figura 2.



Figura 2 - Áreas - % - de cada classe de cobertura e uso do solo, de coeficientes de escoamento superficial e de precipitação efetiva nos anos de 1992, 2005 e 2016.

Considerando os efeitos da expansão e do adensamento urbano face à ocorrência de chuvas, a tendência geral foi de redução das áreas com baixos coeficientes de escoamento e consequente aumento daquelas com valores acima de 0,37. Trata-se de um reflexo direto do aumento da Área Edificada e, principalmente, do surgimento da Superfície Pavimentada que elevou o valor extremo do coeficiente, o qual, de 0,55 em 1992, passou para 0,86 a partir do ano de 2005. Neste sentido, e considerando os cenários de eventos pluviométricos para 1992, 2005 e 2016, a tendência geral foi de redução das áreas com coeficientes de escoamento superficial de 0,1 a 0,25 e aumento daquelas com coeficientes de escoamento de 0,38 a 0,86, bem como das áreas com elevada precipitação efetiva.

Desta forma, em 1992, considerando uma intensidade de 72,47 mm/h, durante um tempo de concentração estimado em 33,13 minutos, obteve-se uma altura pluviométrica de 40,03 mm. Nestas condições percebe-se que cerca de 3,41% da área da bacia não proporcionavam precipitação efetiva; 38,36% possuíam uma lâmina de escoamento com espessura entre 0,1 e 9 mm; 8,61% entre 9,1 e 14 mm; e 49,62% uma coluna pluviométrica excedente que podia atingir até 21,98 mm, conforme pode ser observado na Figura 2. Com base na mesma figura e considerando uma intensidade de 72,87 mm/h durante 32,81 minutos no ano de 2005, a altura pluviométrica estimada foi de 39,85 mm. Diante de um estágio mais avançado de compactação e impermeabilização do solo percebe-se que a área que não proporcionava precipitação efetiva permanecia quase inalterada; 31,34% proporcionava precipitação efetiva entre 0,1 e 9 mm; 6,56% entre 9,1 e 14 mm; e 58,57% entre 14,1 e 34,23 mm. Já para o ano de 2016 e considerando uma intensidade de 73,37 mm/h durante um período de concentração de 32,42 minutos, a altura pluviométrica estimada foi de 39,64 mm. Nestas condições, cerca de 17% da bacia possuía precipitação efetiva entre 0,1 e 9 mm; 0,17% entre 9,1 e 14 mm; e 79,38% entre 14,1 e 34,04 mm, o que representa grandes limitações para o solo em desenvolver suas funções de infiltração e armazenamento de água, bem como regulação dos fluxos hídricos.

Quanto à distribuição espacial dos condicionantes e respectivos efeitos do processo de expansão e adensamento urbano verifica-se que o aumento das áreas edificadas, bem como o surgimento daquelas pavimentadas se intensificou das partes mais elevadas para aquelas mais rebaixadas e próximas aos canais de drenagem, conforme apresentado ao longo da Figura 3. Para o ano de 1992 é possível verificar que os elevados coeficientes de escoamento e sua correspondência em elevada precipitação efetiva estavam restritos às partes edificadas e mais elevadas da bacia, permitindo que aquelas mais rebaixadas e ainda com baixos coeficientes de escoamento amortecessem os efeitos decorrentes do acúmulo de fluxo a montante. Entretanto, para os anos seguintes a tendência foi de expansão da área edificada para os segmentos de média e baixa vertente, resultando em aumento exponencial das áreas com elevados coeficientes de escoamento e, portanto, geradoras de fluxo que gradativamente entram em convergência.

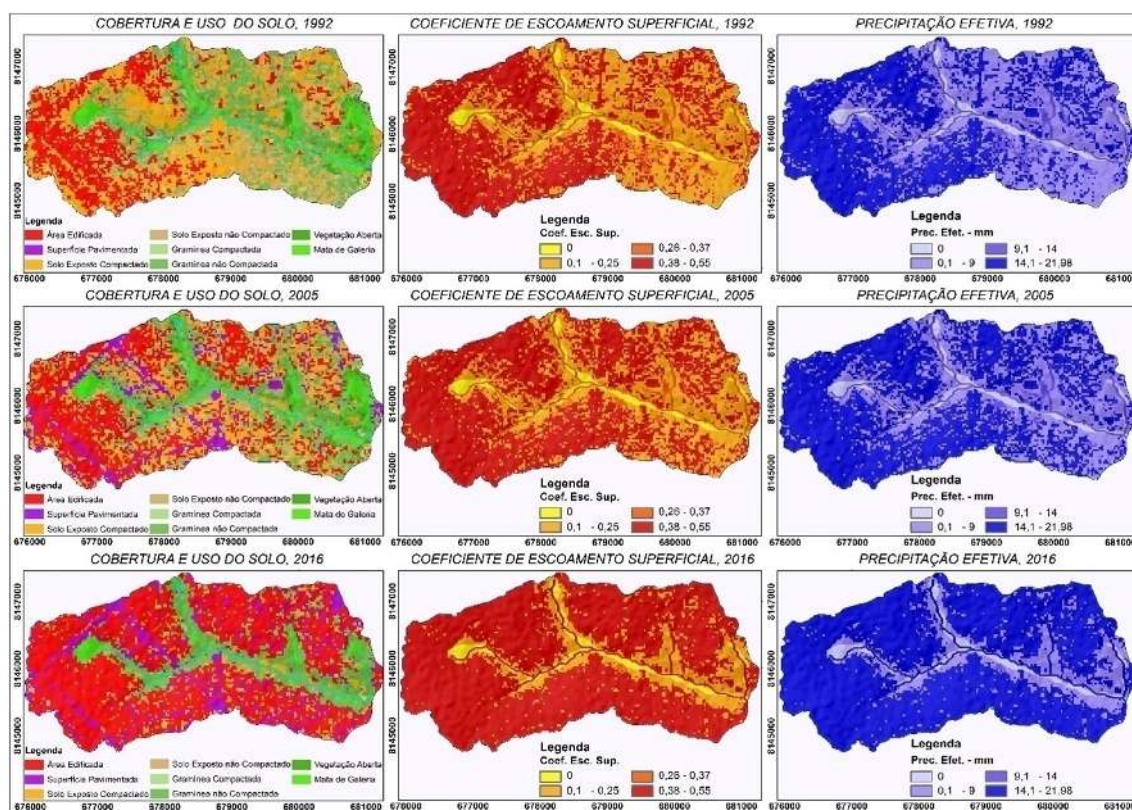


Figura 3 - Mapas de cobertura e uso do solo e respectivos coeficientes de escoamento superficial e precipitação efetiva nos anos de 1992, 2005 e 2016.

Neste sentido, vale resaltar que os efeitos do adensamento não se devem exclusivamente a ao aumento das áreas com elevada precipitação efetiva. Se devem também à disposição – radial e circundante em relação às cabeceiras e canais de drenagem – desse elevado percentual de áreas pavimentadas e edificadas, as quais proporcionam elevado escoamento superficial. A tendência a convergência de fluxo faz com que a energia cinética resultante do volume, bem como da velocidade e menor tempo de concentração do escoamento se concentre em áreas menores e principalmente frágeis – planícies desprotegidas e com solos de textura arenosa –, o que eleva substancialmente o potencial de impactos, especialmente na forma de processos erosivos.

IMPERMEABILIZAÇÃO DO SOLO E IMPLICAÇÕES NA DINÂMICA HIDROLÓGICA

O crescente processo de impermeabilização do solo resultou em impactos diretos na dinâmica hidrológica. Especificamente, destacam-se aumentos na precipitação efetiva, na velocidade - com a consequente redução do tempo de concentração -, bem como aumento no volume de escoamento superficial, cuja intensidade resultante pode ser constatada nos ambientes de maior convergência de fluxo, como as cabeceiras e canais de drenagem. Como pode ser verificado na Figura 4, em 1992 predominavam na maior parte da bacia (41,68%), velocidades de até 0,56 m/s, com a máxima atingindo 3,26 m/s. Já a partir de 2005 passaram a predominar classes acima de 0,56 m/s, sendo que em 31,25% da bacia as estimativas eram de 1,36 m/s a 3,29 m/s. Para o ano de 2016 as estimativas de velocidade de escoamento maior que 1,36 m/s abrangiam cerca de 42,75% da bacia e podiam alcançar até 3,33 m/s. Uma decorrência direta desse aumento, inclusive da área abrangida pelas maiores classes de velocidade, tem sido a redução do tempo de concentração e o consequente aumento da intensidade ou vazão do escoamento superficial.

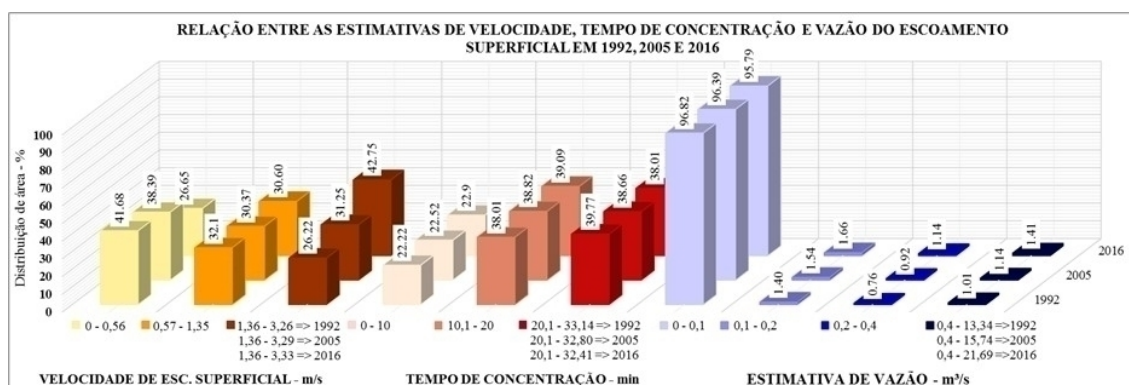


Figura 4 - Classes de velocidade de escoamento superficial; de tempo de concentração; de estimativas de vazão e respectivos percentuais de área nos anos de 1992, 2005 e 2016.

Nas condições de cobertura e uso de 1992 eram necessários 33,14 minutos para que toda a bacia contribuísse com o exutório. Com o avanço e o adensamento da urbanização o tempo para esse processo se reduziu para 32,8 minutos em 2005 e 32,41 minutos em 2016. Considerando o aumento das áreas com elevada precipitação efetiva, o aumento das velocidades e consequente redução do tempo de concentração do escoamento superficial, a principal resultante tem sido o considerável aumento das estimativas de vazão durante os eventos de chuva ao longo do período considerado. Deste modo, considerando as condições de cobertura e uso do solo em 1992 face à intensidade e duração dos eventos pluviométricos extremos, as estimativas de vazão máxima eram de 13,34 m³/s no exutório. Para as condições vigentes em 2005 as estimativas se elevaram para 15,74 m³/s. Aumento maior pode ser estimado ao longo dos 11 anos que se seguiram, em que as estimativas atingiram 21,69 m³/s, conforme sistematizado ao longo da Figura 4.

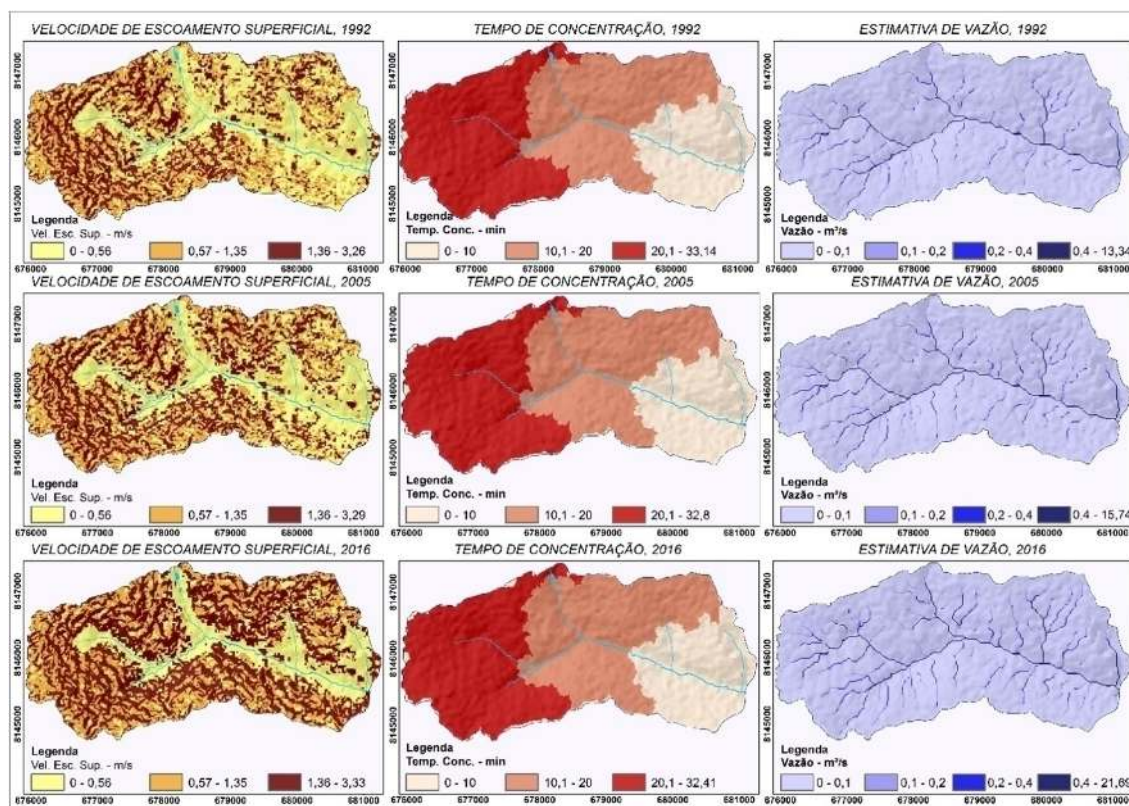


Figura 5 - Mapas de estimativas de velocidade; tempo de concentração e volume de escoamento superficial para os anos de 1992, 2005 e 2016.

A expressão espacial dessas mudanças e sua resultante na redução do tempo concentração e consequente aumento das velocidades e volume de escoamento superficial ao longo do período pode ser visualizada ao longo da Figura 5.

Por meio desta é importante ressaltar que no período considerado, os maiores aumentos de velocidades ocorreram nos segmentos de média a baixa vertente, evidenciando a influência do adensamento urbano em superfícies de maior declividade na dinâmica hidrológica da bacia. Observa-se também que a interrupção de volumes maiores que $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$ nas proximidades dos canais se deve à ocorrência de gramíneas não compactadas e algum remanescente de Mata de Galeria. Entretanto, considerando o predomínio de gramíneas em detrimento da vegetação natural, entende-se que o impacto causado pelas elevadas velocidades, bem como volume do escoamento superficial foram decisivos para a degradação das margens e consequente aumento da largura do canal principal.

AUMENTO DA PRESSÃO ANTRÓPICA E DESEQUILÍBRIOS NA PLANÍCIE FLUVIAL

Considerando as transformações urbanas e a dinâmica hidrológica ao longo dos anos de 1992, 2005 e 2016, constata-se uma bacia hidrográfica sob acentuado aumento de volume, concentração espaço-temporal de fluxos superficiais e consequente degradação da planície fluvial. Tal situação fica evidenciada pelas crescentes estimativas de velocidade e principalmente volume de escoamento, os quais resultam em picos de vazão em áreas de convergência de fluxo, tais como cabeceiras de drenagem e principalmente ao longo dos canais principais.

Conforme demonstrado por meio da Figura 6, a estimativa máxima de energia advinda do volume pela velocidade de escoamento superficial passou de $20,8 \text{ Mg.m}^2.\text{s}^{-2}$ em 1992, para $32,2 \text{ Mg.m}^2.\text{s}^{-2}$ em 2005 e destes para $44,2 \text{ Mg.m}^2.\text{s}^{-2}$ em 2016. Com comportamento semelhante o canal principal apresentou largura média de $7,08 \text{ m}$ em 1992; $18,58 \text{ m}$ em 2005 e $71,13 \text{ m}$ em 2016. Da relação entre as duas grandezas constata-se que para estimativas de até $0,2 \text{ Mg.m}^2.\text{s}^{-2}$ não houve constatação de processos erosivos associados em todo o período analisado. No entanto, para estimativas maiores que $0,2 \text{ Mg.m}^2.\text{s}^{-2}$, especialmente para os anos de 2005 e 2016, fica evidente a relação entre o aumento da estimativa de energia do escoamento e a largura média do canal, que, a partir de 2005 sempre esteve acima de 18 m .



Figura 6 - Relação temporal entre as estimativas de energia cinética e largura média do canal de drenagem nos anos de 1992, 2005 e 2016.

No que se refere a distribuição espacial das classes de energia cinética e sua relação com a erosão ao longo dos canais principais, observa-se que ao longo do período as menores estimativas foram gradativamente cedendo espaço para estimativas maiores que $0,2 \text{ Mg.m}^2.\text{s}^{-2}$, as quais passaram a predominar também em outros ambientes, isto é, para além dos canais de drenagem, conforme pode-se constatar ao longo da Figura 7. Neste sentido, em 1992 as classes menores que $0,1 \text{ Mg.m}^2.\text{s}^{-2}$ ocorriam em áreas planas, sendo que aquelas entre $0,1$ e $0,2 \text{ Mg.m}^2.\text{s}^{-2}$ ocorriam nas vertentes mais inclinadas e faziam transição para aquelas maiores, chegando até $20,8 \text{ Mg.m}^2.\text{s}^{-2}$ ao longo do canal principal. Nessa situação a largura excepcionalmente ultrapassava os $7,08 \text{ m}$ em segmentos côncavos com indícios de

erosão mais acentuada.

Para o ano de 2005 a classe de $0,1$ a $0,2 \text{ Mg.m}^2.\text{s}^{-2}$ passou a predominar ao longo das vertentes mais íngremes e cabeceiras de drenagem, evidenciando forte aumento do poder erosivo mesmo em áreas que antecederam a planície fluvial. No entanto, foi ao longo da planície fluvial e, agora, com estimativas de até $32,2 \text{ Mg.m}^2.\text{s}^{-2}$ que o aumento da energia cinética foi determinando no aumento dos processos erosivos resultando em uma largura média de $18,58 \text{ m}$. Já para o ano de 2016 nota-se o gradativo aumento de áreas com estimativas de até $0,2 \text{ Mg.m}^2.\text{s}^{-2}$, especialmente associadas a áreas pavimentadas que drenam direto para os canais principais, conforme ilustrado ao longo da Figura 7. Em decorrência dessa convergência de fluxo sob elevadas velocidades as estimativas de energia chegaram a $44,2 \text{ Mg.m}^2.\text{s}^{-2}$ implicando em processos erosivos que resultaram em uma largura média de $71,13 \text{ m}$.

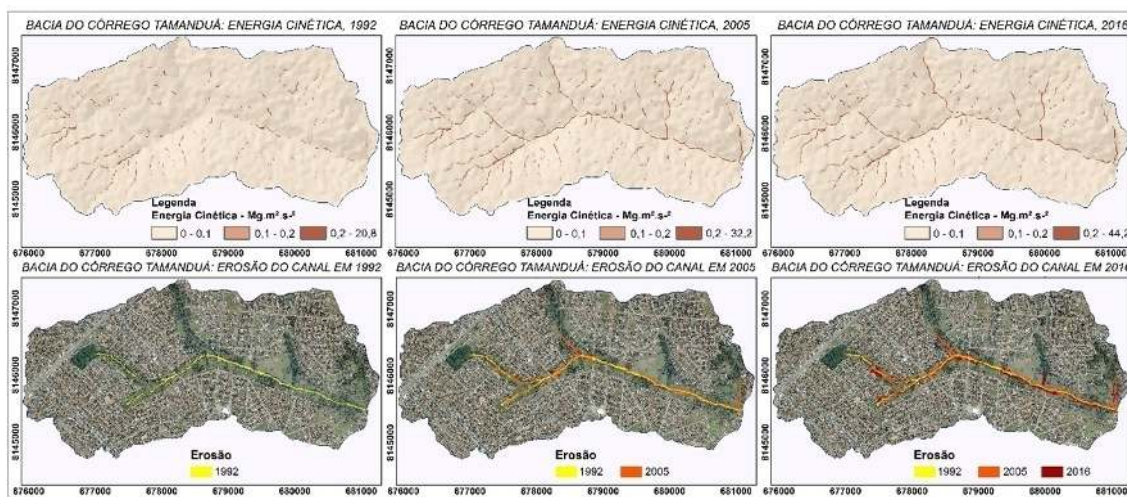


Figura 7 - evolução da erosão por solapamento de bordas e consequente alargamento do canal e degradação da planície do córrego Tamanduá nos anos de 1992, 2005 e 2016.

Analisando detalhadamente os locais desprovidos de vegetação de borda e que não tiveram infraestrutura instalada, percebe-se que os mesmos foram os mais afetados por processos erosivos. Destaca-se também que estes são antecidos por áreas de contribuição específica que passaram por processo de aumento dos coeficientes de escoamento superficial e, por consequência, aumento de vazão nos últimos anos. Nesses ambientes constata-se o avanço de processos erosivos por mecanismo de solapamento de borda ou erosão de margem em solos de textura arenosa, tais como Neossolo Flúvico, por vezes, sobrejacente ao Gleissolo Háptico de textura argilosa. Situação mais degradante pode ser observada em segmentos onde os processos erosivos evoluem para solos que tradicionalmente não estavam em contato com os fluxos hídricos do canal, tais como os Argissolos, resultando em maior aprofundamento das encostas. Esse processo ocorre mediante erosão das margens côncavas e consequente avanço das bordas até mesmo para terrenos que outrora não faziam parte do processo.

Do processo de degradação do canal por processos erosivos é possível observar que as maiores taxas de degradação possuem segmentos com características distintas no que se refere aos condicionantes naturais em face das modificações antrópicas. Neste sentido, por meio da parte a da Figura 8, é possível observar que em 1992 o canal exibia uma notável sinuosidade em meio à planície. Entretanto, considerando uma tendência de aumento da vazão em situações de pico essa morfologia não se mostra propícia ao escoamento de grandes volumes de água em intervalos cada vez menores, o que necessariamente leva o canal a se adaptar às novas condições. Essa adaptação passa pelo processo de erosão das margens côncavas e posterior deposição parcial do material nas margens convexas. Neste sentido, além de uma maior largura, o mesmo passa a adquirir um caráter mais retilíneo, permitindo que volumes cada vez maiores possam fluir em menores intervalos de tempo. Dessa forma, o mesmo segmento observado em 1992 encontrava-se bastante degradado em 2005, conforme pode-se observar na parte b da mesma figura. Já em 2016 o mesmo segmento encontrava-se bastante degradado com notável comprometimento de parte dos terrenos adjacentes ao canal.

Sob o aspecto natural, a predominância de rochas metamórficas tais como micaxistos e quartzitos ao longo do canal contribuíram para a ocorrência de um menor gradiente altimétrico e, por consequência, propício à ocorrência de solos hidromórficos, como Gleissolos, e solos aluviais como o Neossolo Flúvico. Com isso, ao longo de quase todos os segmentos de baixo gradiente altimétrico houve significativo alargamento em decorrência da menor resistência dos solos ali predominantes. O Neossolo Flúvico, devido ao seu caráter arenoso e de fácil desagregação e transporte, contribuiu significativamente para o alargamento do canal e consequente degradação da planície.



Figura 8 - Situação de um segmento de baixo gradiente altimétrico do canal de drenagem em 1992 (a); em 2005 (b); e em 2016 (c).

Além dos segmentos de baixo gradiente, outros também se mostraram propícios à ocorrência de processos erosivos. Trata-se daqueles onde ocorre a confluência de canais, cujas bordas foram interceptadas por lineamentos de fluxos advindos de áreas que passaram por grandes transformações na cobertura e uso no período considerado, como ilustrado ao longo da Figura 9. Dessa forma, na parte a tem-se um ponto de convergência de canais que em 1992, sob baixa estimativa de escoamento, bem como ausência pico de vazão, ainda se mostrava muito preservado. Já em 2005, sob acentuada estimativa de vazão, o mesmo já apresentava notável recuo ou concavidade de borda devido à interceptação pelo fluxo e consequente solapamento das laterais. Em 2016, devido à continuidade de interceptação pelo fluxo, o processo de concavização ou recuo de borda continuava a progredir, aumentando significativamente a largura do segmento considerado. Como principal fator de potencialização de processo pode-se destacar o acentuado processo de adensamento urbano que ocorreu nos últimos 24 anos, conforme pode-se observar por meio dos mapas de cobertura e uso e respectivos coeficientes de escoamento e precipitação efetiva dispostos ao longo da Figura 3.



Figura 9 - Ponto de confluência de dois canais de drenagem em 1992 (a); em 2005 (b); e em 2016 (c).

O efeito cumulativo advindo de mudanças, como aumento da intensidade de precipitações, aumento dos coeficientes de escoamento, aumento das velocidades e volume de fluxo, bem como a consequente redução do tempo de concentração ao longo de uma bacia hidrográfica, implica em aumento de intensidade dos processos hidrológicos superficiais. Esse processo ocorre na forma de aumento de pressão nas paredes laterais das encostas nos momentos de vazão de pico. Tal processo pode ser considerado como a expressão espacial e temporal do aumento da pressão antrópica, especialmente nos momentos de chuva. Posterior aos eventos pluviométricos tem-se o alívio de pressão sobre os canais que passam então a ficar expostos ao regime de margens plenas, o que implica em mais erosões laterais por solapamento de bordas.

Essa dinâmica de aumento e alívio de pressão, necessariamente, leva o sistema fluvial à uma adaptação face ao novo padrão de comportamento do fluxo hídrico. Tal adaptação passa, a priori, por

mudanças especialmente na largura destinada ao fluxo hídrico em situações de picos de vazão. Consequentemente, implica em desequilíbrios ao longo dos canais principais na forma de degradação da planície de inundação. No entanto, entende-se que esses desequilíbrios podem ser reduzidos mediante a instalação de bacias de retenção, bem como barramentos, ambos reguladores de vazão, ao longo das vertentes e principais canais tributários, respectivamente. Trata-se de uma forma de preservar parte do tempo de concentração pré-ocupação, especialmente ao longo das vertentes.

CONCLUSÃO

No que se refere ao processo de expansão e adensamento urbano, entende-se que se trata de uma evolução inerente ao crescimento das cidades, especialmente aquelas das grandes regiões metropolitanas. Esse crescimento, necessariamente, implica em alterações no ritmo dos processos físicos, em especial os hidrológicos. No entanto, a crítica que se faz acerca deste processo refere-se à falta de estudos rigorosos que permitam fazer prognósticos mais precisos acerca dos possíveis impactos quanto da implantação de loteamentos e consequente alteração das propriedades do solo, do terreno, sua interação com os eventos pluviométricos e sua relação com o comportamento das águas de superfície.

Diante do exposto, destaca-se a possibilidade de aplicação da presente metodologia nos estudos geográficos voltados ao planejamento urbano a fim de dimensionar de forma mais fidedigna os prováveis impactos decorrentes do processo de expansão e adensamento urbano. Considerando que a mesma envolve as principais variáveis que avaliam o funcionamento do sistema hidrológico, é possível avaliar os efeitos decorrentes da compactação e impermeabilização do solo e, por consequência, definir as medidas mitigadoras ou reparadoras mais adequadas. Entre estas pode-se citar a contenção da convergência espaço-temporal de fluxos hídricos superficiais, definição de leis que visem a destinação de um percentual adequado de área para infiltração em cada domicílio, bem como a definição de estruturas destinadas a recepção dos elevados volumes quando da ocorrência de chuvas.

Conforme observado nos últimos anos, as cidades crescem mediante expansão e/ou adensamento urbano. De todo modo a existência de materiais cartográficos com crescente precisão e acurácia, bem como metodologias em constante processo de aperfeiçoamento, tornam possível dimensionar com considerável precisão os impactos que esse processo pode proporcionar.

REFERÊNCIAS

- BORGES, E. M. B.; CUNHA, D. F. Dinâmica imobiliária recente e seus impactos na reconfiguração urbana e socioespacial da Região Metropolitana de Goiânia. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE ARQUITETURA, TECNOLOGIA E PROJETO, 2015, Anápolis. Anais... Anápolis: UEG, 2015.
- CAMARGO, C. E. S.; AMORIM, M. C. C. T. Qualidade ambiental e adensamento urbano na cidade de Presidente Prudente – SP. Scripta Nova - Revista Eletrônica de Geografia y Ciencias Sociales. Universidad de Barcelona, v. 9, n. 194, p. 1 – 11, 2005. <http://dx.doi.org/10.1344/sn2005.9.962>.
- EUCLYDES, H.P. Saneamento agrícola. Atenuação de cheias: metodologia e projeto. Belo Horizonte: Rural Minas, 1987. 320 p.
- FERREIRA, L. C. G. Uma reflexão sobre a expansão e a mobilidade urbana: Uma análise do Plano Diretor de Goiânia – GO. OBSERVATORIUM: Revista Eletrônica de Geografia. v. 5, n. 15, p. 62 – 86, 2013.
- FHA. Federal Highway Administration. Urban Drainage Design Manual, Hydraulic Engineering. 3. Ed. Washington D. C.: National Highway Institute, USDOT, 2013. p. 478.
- FUCK, R. A. et al. The basement of the Brasília Fold Belt and the Goiás Magmatic Arc. In: CORDANI, U. G.; MILANI, E. J.; THOMAZ-FILHO, A.; CAMPOS, D. A. (Ed.). The Tectonic Evolution of South America. Rio de Janeiro, p. 195 – 229. 2000.
- GRIFFITHS, J. A.; ZHU, F. F.; CHAN, F. K. S.; HIGGITT, D. L. Modelling the impact of sea-level rise on urban flood probability in SE China. Geoscience Frontiers, In Press. 2018.

<https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.02.012>.

GUZHA, A. C.; RUFINO, M. C.; OKOTH, J.; JACOBS, R. L. B. Impacts of land use and land cover change on surface runoff, discharge and low flows: Evidence from East Africa. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, v. 15, p. 49 – 67. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.11.005>.

HAMMOND, M. J.; CHEN, A. S.; DJORDJEVIĆ, S.; BUTLER, D.; MARK, O. Urban flood impact assessment: A state-of-the-art review. *Urban Water Journal*, v. 12, p. 14 – 29. 2013. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2013.857421>.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. Rede de Estações, Automáticas, Gráficos, Estação A002, Goiânia. Brasília, DF, Brasil. Disponível em . Acesso em: 21 de maio de 2017.

KOCORNIK-MINA, A.; McDERMOTT, T.; MICHAELS, G.; RAUCH, F. Flooded cities. London: Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment. Working Paper n. 248, 2015. 45 p.

KUICHLING, E. The relation between the rainfall and the discharger of sewers in populous districts. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, v. 20, n. 1, p. 1 – 60. 1889.

LACERDA FILHO, J. V.; SOUZA, J. O.; REZENDE, A.; SILVA, A. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil – Geologia e Recursos Minerais do Estado de Goiás e Distrito Federal. Goiânia: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 1999, 269 p.

LECHIU, B. C. G.; FILHO, P. C. O.; SOUSA, J. B. Utilização de imagens orbitais de alta resolução em superfícies com níveis distintos de impermeabilização do solo urbano: caso Irati – PR. *Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas*, Londrina, v. 33, n. 2, p. 127 – 140, 2012. <http://dx.doi.org/10.5433/1679-0375.2012v33n2p127>.

LIMA, A. P.; AMORIM, M. C. C. T. Análise de episódios de alagamentos e inundações urbanas na cidade de São Carlos a partir de notícias de jornal. *Revista Brasileira de Climatologia*. v. 15, ano 10, p. 182 – 2004, 2014. <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v15i0.33406>.

LIN, S.; SUN, J.; MARINOVA, D.; ZHAO, D. Effects of Population and Land Urbanization on China's Environmental Impact: Empirical Analysis Based on The Extended STIRPAT Model. *Sustainability, MDPI Open Access Journal*, v. 9, n. 825, p. 1 – 21, 2017. <http://dx.doi.org/10.3390/su9050825>.

LUIZ, G. C.; ROMÃO, P. A. Interação solo-atmosfera e processos de inundação e alagamentos na cidade de Goiânia-GO. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 12, n. 05, p. 1891 - 1903, 2019. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v12.5.p1891-1903>.

MOHAJERI, N.; GUDMUNDSSON, A.; SCARTEZZINI, J. L. Expansion and densification of cities: linking urban form to urban ecology. In: *International Conference on Future Building e Districts Sustainability From Nano to Urban Scale*, 2015, Lausanne, Switzerland. École polytechnique fédérale de Lausanne, 2015.

MONTEIRO, C. A. F. Notas para o estudo do clima do Centro-Oeste Brasileiro. *Revista Brasileira de Geografia*, p. 22 – 45, jan – mar, 1951.

MUKHERJEE, D. Effect of urbanization on flood – a review with recent flood in Chennai (INDIA). *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology*, v. 5, p. 451 – 455, 2016. <https://doi.org/10.5281/zenodo.57002>.

MULVANEY, T. J. On the use of self-registering rain and flood gauges in making observations of the relations of rainfall and flood dischargers in a given catchment. *Trans. Inst. Civil Eng. Ireland*, v. 4, p. 18-33, 1851.

NRCS. National Resources Conservation Service. Estimation of direct runoff from storm rainfall. In: _____. *National Engineering Handbook Hidrology Chapters*. NRCS: Washington, D. C., 1997. 79 p.

NUNES, L. H. Urbanização e desastres naturais, abrangência América do Sul. São Paulo: Oficina de Textos, 2015, 112 p.

- NUNES, E. D.; BORBA, L. Avaliação dos efeitos do adensamento urbano na dinâmica hidrológica de bacias hidrográficas – Aparecida de Goiânia – GO. *Boletim Goiano de Geografia*, Goiânia, v. 38, n. 2, p. 428 – 449, 2018. <https://doi.org/10.5216/bgg.v38i2.54617>.
- OJIMA, R. Novos contornos do crescimento urbano brasileiro? O conceito de urban sprawl e os desafios para o planejamento regional e ambiental. *Geographia*, Rio de Janeiro, v. 10, n. 19, p. 46 – 59, 2008. <https://doi.org/10.22409/geographia.v10i19.234>.
- OLIVEIRA, L. F. C. et al. Intensidade-duração-frequência de chuvas intensas para localidades no estado de Goiás e Distrito Federal. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, Goiânia, v. 35, n. 1, p. 13 – 18, 2005.
- OLIVEIRA, R. B. et al. Distribuição espacial das áreas de ocorrências a processos de alagamentos e inundações na cidade de Goiânia-GO. In: XI Simpósio Brasileiro de Climatologia Geográfica, 2014, Curitiba. *Anais...Curitiba: UFPR*, 2014.
- PASQUALOTTO, N.; SENA, M. M. Impactos ambientais urbanos no Brasil e os caminhos para cidades sustentáveis. *Educação Ambiental em Ação*, Novo Hamburgo, n. 61, Ano XVI, p. 1 – 9, 2017.
- PINTO, J. V. C. Desconstruindo a “cidade dormitório”: centralidades e espaço intra-urbano de Aparecida de Goiânia. *Mercator – Revista de Geografia da UFC*, n. 16, ano 8, p. 45 – 59, 2009. <https://doi.org/10.4215/rm2009.0816.0004>.
- PORTO, R. L. L. Escoamento superficial direto. In: TUCCI, C. D. M.; PORTO, R. L. L.; BARROS, M T.de. (Org.). *Drenagem urbana*. Porto Alegre: ABRH, 1995. p. 107 – 162. (v. 5).
- PORTO, R. L. L.; ZAHED, K.; TUCCI, C.; BIDONE, F. Drenagem urbana. In: TUCCI, C. E. M. (Org.). *Hidrologia: ciência e aplicação*. Porto Alegre: ABRH, 2004. p. 805-847.
- RODRIGUES, A. P. et al. Caracterização do meio físico, dos recursos minerais e hídricos do município de Aparecida de Goiânia. Goiânia: Superintendência de Geologia e Mineração, 2005. 107 p.
- RUBINATO, M.; MARTINS, R.; SHUCKSMITH, J. D. Quantification of energy losses at a surcharging manhole, *Urban Water Journal*, v. 15, n. 3, p. 234 – 241, 2018. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2018.1424217>.
- SANTOS, K. A.; RUFINO, I. A. A.; FILHO, M. N. M. B. Impactos da ocupação urbana na permeabilidade do solo: o caso de uma área de urbanização consolidada em Campina Grande – PB. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 22, n. 5, p. 943 – 952, 2017. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522016146661>.
- SCS. Soil Conservation Service. Design hydrographs, section 4, hydrology. In: MOKUS, V. *National Engineering Handbook*, USDA, Washington D. C., 1971. 127 p.
- SILVA, L. S.; TRAVASSOS, L. Problemas ambientais urbanos: desafios para a elaboração de políticas públicas integradas. *Cadernos Metrópole*, São Paulo, n. 19, p. 27 – 47, 2008. <http://dx.doi.org/10.1590/8708>.
- SU, W.; YE, G.; YAO, S.; YANG, G. Urban land pattern impacts on floods in a New District of China. *Sustainability*, MDPI Open Access Journal, v. 6, p. 6488 – 6508, 2014. <https://doi.org/10.3390/su6106488>.
- TRIPATHI, R. et al. Climate change, urban development, and community perception of an extreme flood: A case study of Vernonia, Oregon, USA. *Applied Geography*, v. 46, p. 137 – 146, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2013.11.007>.
- TUCCI, C. E. M.; MARQUES, D. M. L. da M. Avaliação e controle da drenagem urbana. Porto Alegre: Ed. UFRGS, 2001. 558 p.
- TUCCI, C. E. M. Inundações urbanas. *Coleção Associação Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 11. Porto Alegre: ABRJ/RHAMA, 2016. 389 p.
- VILLELA, S. M.; MATTOS, A. *Hidrologia aplicada*. São Paulo: Mc Graw-Hill do Brasil, 1975. 245 p.

WEBBER, J. L. et al. Rapid assessment of surface-water flood-management options in urban catchments, *Urban Water Journal*, v. 15, n. 3, p. 210 – 217, 2018. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2018.1424212>.

WOLLMAN, C. A. Revisão teórico-conceitual do estudo das enchentes nas linhas de pesquisa da Geografia Física. *Revista Eletrônica Georaguaia*, Barra do Garças, v. 5, n. 1, p. 27 – 45, 2015.