ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe

Interação Solo-Atmosfera e Processos de Inundação e Alagamento na Cidade de Goiânia-GO

Gislaine Cristina Luiz¹, Patrícia de Araújo Romão²

¹Laboratório de Climatologia Geográfica; Professora do Programa de Pós-Graduação em Geografia IESA/UFG. E-mail: gislaine@ufg.br

²Laboratório CIPGEO, Professora do IESA/UFG.

Artigo recebido em 15/04/2019 e aceito em 11/11/2019

RESUMO

Os processos do ciclo hidrológico respondem diretamente às modificações no uso do solo. A cidade de Goiânia tem apresentado aumento de inundações e de alagamentos, ao mesmo tempo em que o padrão das chuvas demonstra diminuição dos dias com eventos pluviométricos e aumento da intensidade desses episódios. A pesquisa que ora se apresenta analisa as áreas sujeitas à inundação e alagamentos, correlacionando-as com o padrão dos episódios pluviais na cidade e às condições de infiltração do solo. Foram utilizados dados secundários obtidos junto ao 10º DISME/INMET, relativos à precipitação e, também informações de ocorrência de alagamentos e inundações concedidas pela Defesa Civil. As informações primárias consistiram na obtenção da duração e intensidade da chuva em cinco diferentes localidades da cidade; uso e ocupação do solo e; testes da capacidade de infiltração do solo de superfície, em 10 áreas distintas. Os episódios pluviais apresentaram em 24h intensidades entre 8,3 mm e 99,1 mm; intensidades em 10 minutos de 10,9 mm, 13,9 mm e 19,6 mm durante o período noturno e na madrugada; destaque para as intensidades entre 31,6 mm.h⁻¹ e 76,6 mm.h⁻¹, principalmente nas porções sul, norte e leste da cidade, também no período noturno. A capacidade de infiltração mensurada variou entre 0,012 mm/h e 373,25 mm/h, conforme uso e ocupação do solo. As intensidades observadas superaram capacidade de infiltração, aumentando o escoamento superficial das águas pluviais por causa do alto índice de impermeabilização. Tal fato, associado a condições naturais de baixas declividades e extensos comprimento das rampas, de grande parte de Goiânia, tem favorecido o aumento da velocidade do escoamento superficial e a ocorrência de alagamentos e inundações.

Palavras-chave: Climatologia, Precipitação, Inundação, Desastres Naturais, Seguridade Social.

Soil-Atmosphere Interaction and Flooding Processes in Goiania-GO City

ABSTRACT

The processes of the hydrological cycle respond directly to changes in land use. The city of Goiânia presented an increase of flooding processes, while the pattern of rains shows a decrease of the days with pluviometric events and increase of the intensity of these episodes. The research presented here analyzes the areas subject to floods and overflow, correlating them with the pluviometric pattern in the city and soil infiltration capacity. Secondary data obtained from the 10ºDISME/INMET on precipitation were used, as well as information on the occurrence of flooding processes granted by the Civil Defense. The primary information consisted in obtaining the duration and the intensity of the rain in five different localities of the city; use and occupation; and water infiltration measures at the soil surface in 10 different areas. The precipitation episodes presented intensities of 24 hours between 8.3 mm and 99.1 mm; intensities in 10 minutes of 10.9 mm, 13.9 mm and 19.6 mm during the night period and dawn; The intensities between 31.6 mm.h⁻¹ and 76.6 mm.h⁻¹ are prominent, mainly in the south, north and east of the city. The measured infiltration capacity varied from 0.012 mm/h to 373.25 mm/h, depending on the use and occupation of the soil. The observed intensities exceed the capacity, increasing the surface runoff of the rainwater due to the high waterproofing index; the low slopes and the long length of the ramps. This fact favored the increase of the velocity of the upstream and downstream surface runoff, potentiating the occurrence of flooding processes.

Keywords: Climatology, Precipitation, Flood, Natural Disasters, Social Security.

Introdução

Dos processos do ciclo hidrológico que podem ser enumerados, a precipitação pluvial, a infiltração e o escoamento superficial devem ser observados, na análise das consequências decorrentes das alterações do uso e ocupação do solo. No meio urbano, o escoamento superficial é um dos processos do ciclo hidrológico de destaque, pois alterações no uso do solo modificam as condições de escoamento (Leão Carvalho, 2013) e suscitam grandes problemas à população, tanto em curto quanto em longo prazo de tempo.

O primeiro problema, considerado imediato, é observado a partir da elevação dos volumes e velocidades dos fluxos superficiais, muitas vezes mal dimensionados, principalmente no caso de episódios extremos. O segundo, que pode ser considerado em longo prazo, refere-se à ineficiência do processo de infiltração, afetando a recarga dos mananciais. Sobretudo nos últimos 30 anos (Dantas; Cardoso; Roquete, 2018), a expansão das cidades gerou o aumento das superfícies impermeabilizadas, alterando o ciclo hidrológico, especialmente no que se refere aos processos de infiltração e de escoamento superficial.

No geral, a impermeabilização prevista é superada por ações não previstas quanto ao uso e ocupação do solo, o que inviabiliza a atuação eficiente dos sistemas convencionais de drenagem urbana, os quais não comportam a demanda dos atuais fluxos superficiais e quando atende à demanda, ainda é capaz de provocar problemas à jusante, nos locais de lançamentos, com erosões das margens dos cursos d'água, assoreamento e inundações (Leão Carvalho, 2013).

As relações ente os sistemas de drenagem e a atual forma de configuração espacial das cidades, das construções e obras de engenharia civil, já se mostram insuficientes para captar os fluxos superficiais decorrentes de episódios pluviais considerados dentro do padrão normal. Há que se considerar que os eventos pluviais nas regiões tropicais ocorrem na forma de chuvas rápidas e intensas (Ayoade, 1991). Em conjunto, a elevada impermeabilização e ainda, os sistemas de drenagem ineficientes, respondem pela alteração do ciclo hidrológico nas cidades com o acréscimo tanto da vazão, quanto da velocidade do escoamento superficial. A infiltração das águas pluviais não ocorre com a mesma eficiência, interferindo assim na recarga dos mananciais.

O padrão dos episódios pluviais, das características da morfologia do terreno e da cobertura e uso do solo, assumem importantes

papeis nas análises do aumento do fluxo das águas pluviais nas áreas urbanas. Tais aspectos intervêm de forma significativa no acréscimo do escoamento superficial e na ineficiência da infiltração. Qualquer modificação em um desses processos incide em alteração qualitativa e quantitativa no equilíbrio natural do ciclo hidrológico da cidade (Leão Carvalho, 2013).

As discussões acerca das mudanças climáticas têm apontado que é cada vez mais recorrente a ocorrência de episódios extremos, tanto aumentando em intensidades como também diminuindo o tempo no intervalo da recorrência desses eventos. Assim, evidencia-se cada vez com maior frequência e repercussão o aumento dos processos de inundação e alagamentos nas grandes cidades brasileiras, sendo justamente a população de maior vulnerabilidade social, ambiental e econômica, a mais afetada por tais processos. Para Mendonça (2010, p. 160),

Há, entretanto, uma crença generalizada nos cenários construídos por instituições como o IPCC (*International Panel on Climate Change*), que acenam para um forte aquecimento da atmosfera da Terra (e, portanto, dos climas) no século que acaba de se iniciar. Uma gama considerável de fenômenos meteorológicos e climáticos excepcionais, tais como chuvas torrenciais, secas, vendavais, furacões, etc. terão suas intensidade e repetitividade acentuadas, impondo profundas mudanças na espacialidade, forma e função das sociedades humanas, acenam os partidários das mudanças climáticas ligados ou partidários das ideias deste grupo hegemônico.

Ainda segundo Mendonça (2010, p. 160),

Considerando esta afirmação, ainda que eivada de importantes controvérsias, torna-se necessário refletir sobre o fato de que as mudanças climáticas globais terão repercussões diretas nas escalas espaciais da dimensão zonal, regional e local distintamente.

Outro aspecto a ser considerado refere-se às condições de superfície do solo não impermeabilizado, quanto a sua capacidade de infiltração, principalmente quando se consideram solos tropicais não saturados, altamente intemperizados, como é o caso dos solos de Goiânia. Dependendo das condições de superfície, estabelecidas na fronteira superfície-atmosfera, há favorecimento para o aumento do escoamento superficial das águas pluviais, no início da estação chuvosa, devido ao comportamento hidromecânico dos solos tropicais não saturados.

Luiz (2012) elucida que a camada de ar junto ao solo, influenciada pela elevada temperatura estabelecida na fronteira superfície e atmosfera, favorece maiores perdas de umidade no solo. A perda de umidade por longos períodos de estiagem confere ao solo condições de preenchimento dos vazios nos maciços, que eram ocupados pela água, por maior quantidade de ar. Logo, quando ocorrem as primeiras chuvas, em geral intensas nas regiões tropicais, a infiltração da água é dificultada pela presença do ar, tudo isso aliado ao fato de que, em geral, a própria intensidade da chuva é maior que a capacidade de infiltração da água pluvial. Essa alteração, dentre outros processos, tende a dificultar o processo de infiltração por um período no início da estação chuvosa, devido à tensão que o ar aprisionado promove dentro dos agregados do solo. Camapum de Carvalho (2011) afirma que à medida que os solos tropicais não saturados perdem a umidade, o ar tende a predominar entre as partículas e agregados, constituintes do solo, de forma que esta dinâmica contribui para alterar o comportamento hidromecânico do perfil intemperizado.

Além disso, mesmo que as cidades tenham áreas ainda não impermeabilizadas, os solos expostos às intempéries da atmosfera, em muitos casos, com uso destinado às atividades pecuárias (Luiz, 2012), por vezes possui as condições agravadas por causa da compactação de sua superfície. Consequentemente, no início da estação chuvosa, dependendo das condições de umidade estabelecidas na fronteira atmosfera e superfície do solo, há tendência do processo de infiltração ser substituído pelo processo de escoamento superficial.

Neste contexto, a região de Goiânia apresenta quadros físicos, bióticos e problemas ambientais bastante distintos, fruto das diferenças que apresenta quanto à geologia, ao relevo, aos solos, à vegetação e ao uso e cobertura do solo (Lopes & Romão, 2006).

Nos últimos 20 anos, tem-se observado na cidade um aumento nas ocorrências de alagamentos e inundações associado a eventos pluviométricos. São cada vez mais comuns, dentre os transtornos vividos pela comunidade goianiense, os alagamentos das vias públicas com arraste de automóveis (Gomes, 2015).

Considerando o caráter das chuvas tropicais, as quais se caracterizam por serem eventos rápidos e intensos e, associando ainda ao processo de urbanização da cidade de Goiânia e à possibilidade de ocorrerem chuvas isoladas e rápidas, a cidade tem a qualidade ambiental ameaçada pelos processos de inundação e

alagamentos em diferentes pontos (Leão Carvalho, 2013; Borges et al., 2014).

Por outro lado, o crescimento sem controle da cidade permitiu, por exemplo, a ocupação de áreas de recarga e de margens dos rios. Os rios, por sua vez, tiveram trechos canalizados à montante, o que tem contribuído, principalmente nas regiões ribeirinhas, para que as famílias que ocupam o leito maior sejam constantemente desabrigadas no período das cheias. Além disso, as redes de esgotamento pluvial, a exemplo de outras metrópoles, não suportam os fluxos que sempre são agravados pela quantidade de materiais sólidos que são carreados. Desse modo, nas regiões mais densamente povoadas, as vias de tráfego são alagadas e os fluxos são capazes de arrastar veículos e mesmo ceifar vidas humanas (Leão Carvalho, 2008).

Logo, a partir deste contexto, esta pesquisa destaca as principais áreas sujeitas aos processos de inundação e alagamentos na cidade, correlacionando-as com o padrão de uso e ocupação do solo; bem como, com o padrão de ocorrência das chuvas na cidade, associado às condições de infiltração das águas pluviais, no solo.

Localização e Caracterização da Área De Estudo

A cidade de Goiânia (Figura 1), fundada em 1933 e projetada para 50 mil habitantes, situa-se na porção centro-sul do estado de Goiás, entre as coordenadas E: 662.000 e 760.000 m e N: 8.141.000 e 8.179.000 m (M.C. -51°W Gr., Hem. Sul), com extensão territorial de 739.492 km² (LUIZ, 2012). Atualmente, ocupa o 12º lugar como município mais populoso do país, com população estimada de 1.448.639 habitantes e, conjuntamente com outros 19 municípios, forma a Região Metropolitana de Goiânia (RMG), totalizando 2.173.141 habitantes (IBGE, 2010).

A bacia hidrográfica do rio Meia Ponte compreende quase todo o perímetro da capital, abrangendo principalmente as microbacias do ribeirão Anicuns e córregos Botafogo, Capim Puba, Cascavel e Macambira, os quais, juntamente com os seus tributários, respondem pela esculturação recente do relevo.

Uma das principais características dos cursos d'água da capital é a de se constituírem em canais de primeira ordem, como é o caso das bacias hidrográficas dos córregos Vaca Brava e Capim Puba. Apresentando características de primeira ordem, essas bacias comportam pouco fluxo de água em seu estado natural e assim, em episódios pluviométricos intensos, problemas inerentes ao aumento do pico de vazão e ainda

sistema de drenagem urbano mal dimensionado para receber o fluxo na calha dos canais de drenagem, incide no rompimento de taludes,

inundações, dentre outros, acrescentando-se a isso o fato de serem áreas densamente ocupadas e impermeabilizadas (IBGE, 1999).

Figura 1. Mapa de Localização da cidade de Goiânia/GO.

Fonte: Laboratório de Climatologia Geográfica (Climageo/IESA), 2018.

Considerando os níveis escalares do clima, dos superiores em direção aos inferiores, a gênese do clima de Goiânia pode ser entendida a partir da origem, frequência e trajetória de sistemas isobáricos positivos (anticiclônicos) e negativos ou depressionários (ciclônicos), formados na América do Sul (Monteiro, 1951). Como consequência, os elementos atmosféricos obedecem ao controle da radiação de localidades tropicais, respeitando sua localização latitudinal, continentalidade e a dinâmica regional das massas de ar atuantes na América do Sul. Esses aspectos conferem à cidade de Goiânia sazonalidade bem definida, contemplando duas estações, sendo uma seca, de maio a setembro e outra chuvosa, de outubro a abril (Luiz; Martins; Camapum de Carvalho, 2012). A primavera e o verão concentram cerca de 70 % do total da pluviometria anual. A precipitação anual, a qual se apresenta irregular e expressiva variação interanual, nos últimos 50 anos, apontou variações entre 1064,3 mm e 2049,4 mm, com média anual em torno de 1.598,7 mm. A maior oferta pluviométrica ocorre de dezembro a março, com média mensal entre 220 e 270 mm, com

possibilidades de acumulo em 2h de 116 mm (Borges et al. 2014).

Um aspecto importante a ser considerado quanto à frequência das intensidades dos episódios pluviométricos em Goiânia durante a primavera e verão, é que estes apresentam tendência de ocorrer em eventos acumulados em 24h, com intensidades de até 25 mm, em torno 86 %. Por outro lado, eventos acumulados em 24 h, acima de 50 mm, tendem a ocorrer em frequência inferior, em torno de 3 %. Mesmo os eventos que concentram por volta de 25 mm em 24 h, ocorrem com maior frequência durante o período chuvoso (Luiz, 2012).

Luiz (2012) aponta tendência de mudança na distribuição das chuvas na cidade de Goiânia, a partir da diminuição dos dias com chuva, observando inclusive a tendência no aumento das intensidades dos episódios. A autora elucida ainda que a distribuição da precipitação que ocorre entre outubro e abril, quando dividida pelo número de dias com chuva, é máxima e praticamente constante no período chuvoso.

O período entre abril e setembro é corresponde à estação seca, quando a precipitação

média mensal é inferior a 10 mm. Durante o ano, a média da umidade relativa do ar se apresenta em torno de 63 %. Contudo, durante a estação seca, têm-se registros dos mais baixos índices de umidade relativa do ar do ano, inferiores a 20 %, podendo atingir índices inferior a 10 % nos momentos mais críticos do dia (Luiz, 2012). As temperaturas mais elevadas ocorrem nos meses de setembro, outubro e novembro, com médias mensais entre 29 °C e 32 °C. No entanto, os valores das temperaturas máximas diárias, principalmente durante os meses de setembro e outubro, caso haja o retardo do período chuvoso, atinge 41 °C. Os meses mais frios são junho e julho, com médias entre 16 °C e 18 °C, mas o valor da mínima diária pode atingir de 10 a 13 °C, durante a madrugada (Luiz, 2012).

Como consequência da troca de fluxo de calor e umidade entre superfície e atmosfera, a morfologia da cidade foi esculpida e é marcada por relevo suave/ondulado, distribuído em formas côncavas, convexas e tabulares. Conforme o grau de dissecação, Cassetti (1992) classifica o relevo de Goiânia em cinco unidades morfológicas: Planalto Dissecado de Goiânia, Planalto Embutido de Goiânia, Chapadas de Goiânia, Terraços e Planícies Fluviais. As declividades são predominantemente inferiores 8 %, exceto na porção leste do município, em que as declividades se apresentam variando entre 11 e 40% de declividade (Luiz, 2012).

A altitude apresenta variações de 700 metros nas áreas mais baixas, próximas aos rios e, atinge cotas de até 1.000 metros de altitude, nas áreas mais elevadas do município. Uma importante característica morfométrica da cidade deve-se ao fato de que as baixas declividades se estendem por vertentes que se apresentam extensas e rampeadas, o que favorece o aumento da energia cinética dos fluxos superficiais (Luiz, 2012).

Quanto às características do solo, Campos et al. (2003) os classificaram como Latossolo Vermelho, Latossolo Vermelho-Amarelo, Nitossolo Vermelho, Chernossolo Háplico, Cambissolo Háplico, Plintossolo Pétrico, Neossolo Litólico, Neossolo Flúvico e Gleissolo. Quanto ao comportamento hidromecânico, segundo Luiz (2012), são solos altamente lixiviados, com níveis baixos a muito baixos de matéria orgânica.

Os solos analisados por Luiz (2012), considerados por ela representativos dos existentes em Goiânia, possuem estrutura formada por agregação das frações finas, principalmente da fração argila, pois esses minerais são frequentemente os agentes cimentantes dessas

agregações. Ainda sobre a mineralogia dos solos presentes em Goiânia, segundo Luiz (2012), a presença de hematita, de ilmenita, de magnetita e da goethita pode ser explicada pela influência dos granulitos, principalmente dos ortogranulitos, e a presença do quartzo, na região norte, como mineral principal, na fração granular, pelo substrato rochoso granulítico bandado e paraderivado. Luiz (2012) também observou para a região sul, como para a região norte, o elevado grau de intemperismo, a partir da análise da composição mineralógica dos solos, com predomínio de argilominerais, como a caulinita; óxidos hidratados de alumínio, como a gibbsita; óxidos de ferro, como a hematita e óxidos hidratados de ferro, como a goethita. Porém as análises realizadas para região sul, por essa autora, indicaram maior presença de materiais primários, como o quartzo, provavelmente por causa da influência do substrato rochoso associado aos xistos e quartzitos, do Grupo Araxá Sul de Goiás.

Quanto à textura e à estrutura dos solos do município em questão, Luiz (2012) observou, por meio de ensaio de caracterização geotécnica, que a fração argila dos solos, em geral, encontra-se agregada na forma de areia e que, preservado o teor de silte, tem-se, nos mantos de intemperismo analisados, solos com características bimodais de distribuição de poros, compostos por microporos e por macroporos. Essas características bimodais refletem em comportamentos quanto à permeabilidade, semelhantes aos das areias, mesmo que se trate de solos predominantemente argilosos. Essas condições associadas à granulometria fornecem informações relevantes na previsão de cenários. Por exemplo, por causa do efeito desagregador das águas servidas e de certos insumos agrícolas, a presença de tais contaminações nesses solos poderiam desencadear problemas, tais como rupturas de encosta e deflagração ou aceleração de processos erosivos, bem como colmatação dos macroporos existentes, gerando perda da capacidade de infiltração das águas pluviais.

Tendo em vista as características do meio físico, descritas neste item, é possível destacar que os efeitos do processo de urbanização, sem consideração dos condicionantes associados aos recursos hídricos, à geologia, ao relevo, aos solos e às características climáticas, podem desencadear diversos problemas, tais como a Carta de Risco do município de Goiânia, elaborada em 1991, já apontava: a deflagração e aceleração dos processos erosivos, bem como o agravamento dos processos de alagamento e inundações (Nascimento & Podestá Filho, 1993), os quais a

população goianiense tem padecido até os dias atuais.

Desse modo, o objetivo geral do presente trabalho é analisar a relação entre a precipitação pluvial e os eventos de inundações ou alagamentos, por meio do entendimento da interação entre a atmosfera e a superfície do solo em Goiânia-GO. Para se atingir tal objetivo, os procedimentos metodológicos abrangeram a compreensão dos processos de infiltração, de escoamento superficial e das condições na fronteira solo-atmosfera.

Procedimentos Metodológicos

Os procedimentos metodológicos da pesquisa consistiram na coleta de dados primários e obtenção de informações secundárias. As informações primárias se referem à obtenção de dados de chuva e de infiltração de superfície. As informações de chuva foram obtidas utilizando pluviômetros da marca *Irriplus*, modelo P-500, com sistema *datalogger*, distribuídos na cidade de forma a contemplar os quadrantes norte, sul, leste e oeste, totalizando cinco instrumentos. Os pluviômetros foram instalados em haste de metal de 90 mm a 1,5 metros da superfície do solo, contemplando área de 3 m² sem nenhuma barreira física no seu entorno, para garantir maior interação do instrumento com a atmosfera (Figura 2).

Figura 2. Pluviômetro instalado na região leste da cidade de Goiânia/GO

Fonte: Autora

O referido instrumento constitui de uma balança (sensor de medição de precipitação), cuja capacidade é de acumular 0,33 mm de chuva.

No momento em que a balança atinge a sua capacidade máxima de armazenamento de água, um dispositivo do instrumento é acionado e a água coletada é descartada e o tempo é registrado. As informações coletadas são armazenadas e resgatadas utilizando-se *software* específico (P500AD) do instrumento. A partir das informações coletadas, as mesmas foram organizadas de forma a obter as intensidades dos eventos considerando os acumulados em 24 h e também em 10 minutos.

Os dados de infiltração de superfície foram obtidos a partir metodologia dos cilindros concêntricos, indicada para análise de infiltração de superfície, conforme especifica Oliveira e Silva (2005). A taxa de infiltração é obtida em função do tempo em que a coluna d'água infiltra no solo e o instrumento utilizado consiste em dois cilindros concêntricos, sendo um externo e o outro interno. O cilindro externo cumpre o papel de direcionar o fluxo d'água verticalmente e assim reduzir o efeito de dispersão lateral. O cilindro interno é mantido constantemente com lâmina d'água e a infiltração ocorre em direção vertical, conforme modelo indicado na Figura 3.

Figura 3. Modelo do ensaio da taxa de infiltração pelo infiltrômetro de cilindros concêntricos.

Fonte: Leão Carvalho (2008).

O procedimento para a realização do ensaio consistiu na limpeza do local e a cravação dos cilindros. Com o objetivo de preservar as condições de infiltração, as superfícies internas dos cilindros foram recobertas com saco plástico, do tipo utilizado para acondicionamento de lixo, de forma a amortecer o impacto da água no solo no momento da colocação do líquido no interior dos cilindros. Após esta preparação, a água foi despejada no interior dos dois cilindros até o nível de referência, aproximadamente 0,15 m de altura, em seguida a cobertura do plástico foi retirada e

iniciaram-se os procedimentos do ensaio, controlando a infiltração no solo ao longo do tempo.

A taxa de infiltração é obtida a partir da leitura do rebaixamento do nível d'água utilizando-se régua graduada no cilindro interno e é considerada a taxa de infiltração quando o valor da leitura da água infiltrada no solo se repetir por três vezes. Após a estabilização das leituras para a mesma altura de infiltração, a taxa é obtida a partir da Equação (1) atribuída ao modelo empírico de Kostiaikov-Lewis, conforme sugere Oliveira e Silva (2005).

$$L_{ai} = kt^a + f_0t \quad (1)$$

Onde: f_0 = obtida a partir de três valores de Δt = constante (final do teste).

Os ensaios de infiltração foram realizados em 10 (dez) pontos distintos, considerando a cobertura e o uso do solo, realizados em áreas de cobertura de pastagem; cobertura natural (Cerrado *Sensu Strictu*) e; também, áreas de preservação (Figura 4). A realização dos ensaios ocorreu

durante o período seco, no início do mês de setembro, de forma a registrar a capacidade de infiltração da superfície do solo no auge do referido período. Especificamente os testes de capacidade de infiltração, foram realizados em áreas em que as declividades apresentaram variações de até 8 %, em altitudes com variações entre 780 m e 930 m.

Além das informações primárias relativas à chuva e à infiltração, foram utilizadas informações secundárias, obtidas junto ao 10º DISME / INMET (Distrito de Meteorologia/Instituto Nacional de Meteorologia), relativas à precipitação acumulada em 24 h. A estação meteorológica do INMET encontra-se no Aeroporto de Goiânia, com coordenadas geográficas -16.6428° e -49.2202°, e altitude de 727 m. Também foram obtidas informações da ocorrência de alagamentos e inundações, concedidas pela Defesa Civil, do Corpo de Bombeiros Militar do Estado de Goiás (CBPMGO), por meio dos relatórios resultantes dos atendimentos à população em dias de chuva, as quais foram espacializadas utilizando *software ArcGis/ESRI*, versão 10.

(a)

(b)

(c)

(d)

Figura 4. Ensaio de infiltração superfície utilizando o método de cilindros concêntricos em área de pastagem: (a) limpeza da área; (b) umedecimento do local; (c) – cilindros instalados; e (d) realização do ensaio.

Resultados e Discussões

A vegetação natural original do município de Goiânia era constituída por floresta, savanas Luiz, G.C., Romão, P.A.

(Cerrado) e áreas de transição. Atualmente se apresentam como remanescentes restritos e isolados, na forma de pequenos e médios capões, nos interflúvios e ao longo dos cursos d'água. A

partir Tabela 1, pode ser observado que a área urbana da cidade apresenta maior expressão em área, seguida pela classe de solo exposto e de vegetação natural, da pastagem e em menor expressão, da agricultura e dos corpos hídricos. Os testes de infiltração foram realizados especificamente em áreas de pastagem e de cobertura natural (menos alterada possível).

Tabela 1. Vegetação, uso e cobertura do solo: Goiânia-GO.

Classes	Área (ha)	Área relativa (%)
Área urbana	26223,72	36,10
Solo exposto	15515,10	21,36
Agricultura	4141,88	5,70
Pastagem	8789,65	12,10
Vegetação natural	16846,79	23,19
Corpos hídricos	1134,47	1,56
Área total	72651,61	100,0

Fonte: Luiz, 2012.

Quanto aos episódios de chuva, obtidos a partir da instalação de pluviógrafos em cinco localidades distintas, esses corresponderam ao período de outubro de 2015 a maio 2016. Para a análise das informações, consideraram-se como chuvas intensas os episódios de 60 mm/24 h e de 10 mm/10 min, conforme proposta do INMET (1999). A partir da Tabela 2, é possível observar, para o período estudado, a elevada variabilidade temporal e espacial da precipitação na cidade de Goiânia.

Ao se considerar os valores acumulados para o período estudado, os quadrantes norte, sul e leste apresentaram maiores alturas pluviométricas, quando comparados com os quadrantes oeste e sudoeste. A região central da cidade indicou acúmulo de 1.401,3 mm, com destaque para o mês de janeiro, quando o acumulado mensal da Estação Meteorológica do INMET indicou pluviometria de 484,8 mm, bastante superior, quando comparado com os volumes indicados para as demais localidades.

Quanto à intensidade dos eventos em 24 h (Tabela 3), as informações apresentaram variações entre 8,3 mm e 99,1 mm. Os eventos superiores a 60 mm/24h, conforme Tabela 3, demonstram que a região central da cidade, assim como a porção norte, apresentaram as maiores pluviometrias, ressaltando o dia 27 de novembro. Especificamente os dias 27 e 28 de novembro, a região central da cidade indicou acumulados de 136,3 mm em 48 horas, assim como o episódio ocorrido no dia 20 de janeiro/2016, cujo acumulado em 24 horas atingiu altura de 99,1 mm. Essas intensidades superam as indicações do INMET (1999), como chuva intensa cuja altura pluviométrica de 60 mm/24h e por outro lado, confirma o que Luiz (2012) encontrou para o início estação chuvosa: episódios de elevada intensidade em 24 h.

Tabela 2. Total mensal dos episódios entre outubro de 2015 e maio de 2016 – Goiânia-GO.

Local	TOTAL MENSAL - PRECIPITAÇÃO (mm)								
	out	nov	dez	jan	fev	mar	abr	mai	Total
Bairro Jardim das Rosas (W)	s/d	s/d	85,3	112	96	42	0	2,3	337,6
Setor Faicalvalle (SW)	s/d	s/d	82	3,3	68	52,6	0	12,3	218,2
Bairro Parque Alvorada (E)	4,6	11,3	84,3	277,6	156,3	128,6	0	18,6	681,3
Jardim Curitiba 2 (N)	12,3	147,3	78,1	218,6	211,6	152,3	0,6	23	843,8
Serrinha (S)	0	85,3	217	219	211,3	179,3	1,3	22,3	935,5
INMET / centro	18	354	206,7	484,8	155,1	148,2	1,3	33,2	1401,3

s/d – sem dados

Fonte: Luiz, 2012.

Tabela 3. Episódios máximos em 24 horas obtidas por pluviógrafos e Estação Meteorológica INMET outubro/2015 a maio/2016 – Goiânia-GO

Local	EPISÓDIOS MÁXIMOS EM 24h (mm)				
	27/nov	28/nov	14/jan	15/jan	20/jan
Região Oeste – Jardim das Rosas (P1)	s/d	s/d	16,6	8,3	12,7
Região Sudoeste - Façalville (P2)	s/d	s/d	32,3	14,6	9,3
Região Leste - Parque Alvorada (P3)	0,3	12,6	16,3	32,3	18,6
Região Norte - Jardim Curitiba 2 (P4)	77,6	23,3	19,2	25,6	14,6
Região Sul - Serrinha (P5)	16,6	15,3	45,6	22,3	46,0
INMET / Centro	70,2	66,1	51,4	45,9	99,1

s/d – sem dados

Fonte: Luiz, 2012.

Quanto às intensidades de episódios em 10 minutos, foram registrados eventos que ocorreram às 01h40min na porção norte da cidade, no setor Jardim Curitiba, com intensidade de 10,9 mm; às 01h50min, episódio de 19,6 mm e; às 2h, chuva de 13,9 mm, nos meses de outubro, novembro e janeiro.

No que se refere às intensidades dos episódios no início da estação chuvosa, ressalta-se que os sistemas atmosféricos provenientes do quadrante norte e noroeste avançam para as regiões central e sul da cidade. Nesse deslocamento, encontra condição de superfície e atmosfera sobrejacente aquecida (região central e região conurbada com o município de Aparecida de Goiânia), do que é possível considerar como fator que potencializa os sistemas convectivos do ar e justificar as chuvas mais intensas na porção sul e central da cidade. Um importante aspecto chamou a atenção durante a organização das informações coletas *in situ*, se refere aos acumulados por um período de uma hora. Observaram-se episódios acima de 30 mm.h⁻¹ no início da estação chuvosa, no mês de outubro. Os eventos pluviométricos ocorreram especialmente nas porções sul, norte e leste da cidade, com episódios de 31,6 mm.h⁻¹ (Parque Alvorada); de 37,3 mm.h⁻¹, no setor Serrinha e; de 51,9 mm.h⁻¹, no Jardim Curitiba. Outros eventos extremos de precipitação acima de 30 mm.h⁻¹ ocorreram no dia 27 de novembro no Jardim Curitiba, registrado 77,6 mm.h⁻¹; no dia 14 de janeiro no Sesc Façalville e no Setor Serrinha, respectivamente episódios de 32,3 mm.h⁻¹ e 45,6 mm.h⁻¹ e; 15 de janeiro, no Parque Alvorada, registro de evento de 32,3 mm.h⁻¹.

A partir do uso e a ocupação do solo, Luiz (2012) observou uma expressiva variação sazonal da umidade no perfil do solo, considerando a camada junto à superfície (até 0,5 m), durante o

período seco, representado pelos meses agosto/setembro. A autora observou as maiores perdas de umidade para as áreas destinadas à pastagem, sendo a umidade registrada entre 3 e 8 %; para as áreas inseridas em formas de cobertura do tipo de Preservação e Cerrado *Sensu Strictu*, ambos alterados. Tais condições de umidade influenciam diretamente na capacidade de infiltração da água da chuva no perfil do solo.

Em referência aos ensaios de cilindros concêntricos, foram realizados no final do mês de agosto, a partir do dia 27 e, no início do mês de setembro, até o dia 6, de forma obter a capacidade de infiltração de superfície do solo em diferentes formas de uso e ocupação, durante o período de estiagem, momento em que a camada de até 0,5 m indica elevada demanda de umidade no solo. Segundo Barraud (2005), considerando as diversas aplicabilidades cuja finalidade seja verificar a capacidade de infiltração superficial do solo, entende-se obter a capacidade de infiltração a partir de ensaios utilizando cilindros concêntricos, seja compatível com eventos de chuva numa superfície em que se pretende realizar projetos de infiltração de água pluviais urbanas, ou para entender os mecanismos de infiltração e escoamento superficial no solo.

Para o método utilizado, Reichart (1990) considera valores que caracterizam elevada capacidade de infiltração aqueles que sejam superiores a 30 mm/h e, considera muito baixa capacidade de infiltração, aqueles que apresentam valores inferiores a 5 mm/h.

A taxa de infiltração foi obtida quando a velocidade de infiltração assumiu valores constantes em três momentos. A Tabela 4 apresenta os resultados das 10 áreas de realização do teste. Conforme pode ser observado, quanto à capacidade de infiltração em superfície das áreas

estudadas, os valores variaram entre 0,012 e 373,25 mm/h.

As áreas que apresentaram as menores taxas de infiltração referem-se: à área que se caracteriza como Pastagem (P10) e à de Gramínea invasora (P8), respectivamente, 9,88 mm/h e 0,012 mm/h. O local de realização do teste, indicado pelo P8, apresenta histórico de trânsito de máquinas para a retirada da cobertura natural, a área foi recentemente desmatada e constitui-se de

gramínea do tipo invasora. O valor de 0,012 mm/h indica o selamento da superfície à infiltração.

Quanto ao ponto indicado pelo P10, o teste do anel de cilindros concêntricos apresentou baixa capacidade de infiltração. Nessa área, a cobertura do solo é de pastagem, contudo, não se tem informações detalhadas do histórico da área quanto a práticas e manejo agrícola que justifique as baixas taxas encontradas.

Tabela 4. Taxa de infiltração em superfície – método Cilindro Concêntrico

Uso e ocupação do solo	Taxa de infiltração mm/h
Pastagem – P1	47,55
Pastagem – P2	195,2
Pastagem – P3	36,02
Área de Preservação/Mata (alterada) – P4	373,25
Pastagem – P5	30,48
Gramínea invasora – P6	68,8
Pastagem – P7	105,86
Gramínea invasora – P8	0,012
Área de preservação/Cerrado (alterada) – P9	42,84
Pastagem - P10	9,88

Fonte : Luiz, 2012

Ressaltam-se os valores encontrados para as áreas de Pastagens nos pontos P2, P4 e P7, considerados de elevada capacidade de infiltração, segundo proposta de Reichart (1990), pois apresentaram os valores, respectivamente: 195,20 mm/h, 373,25 mm/h, 105,86 mm/h. Para os pontos em questão, apenas o ponto P4 se refere à área de Preservação, enquanto os demais, P2 e P7, são áreas de Pastagem. A elevada capacidade de infiltração para os pontos em análise, em

áreas de pastagens, justifica-se pelo fato de que para o P2, observou-se a influência da bioturbação (Figura 5), nas proximidades do local onde o ensaio foi realizado, pela presença de galerias formadas pela ação de cupins e formigas. Por outro lado, para o ponto P7, justificam-se por apresentar alta capacidade de infiltração, apesar da cobertura do solo ser destinada à atividade de pastagem, as características de baixas declividades e a proximidade a áreas de nascentes.

Figura 5. Bioturbação influenciando nas taxas de infiltração: (a) – visão geral da área com presença de cupins; (b) galeria formadas a partir de ação de cupins/e/ou formigas.

Fonte: Luiz, 2012.

Para as áreas de Pastagens representadas pelos pontos P1, P3 e P5, apesar de um pouco mais baixos que os anteriormente apresentados, registraram-se capacidade de infiltração entre 30 mm/h e 47,55 mm/h. De acordo com Reichart (1990), tais taxas são caracterizadas também como de boa capacidade de infiltração. Os valores encontrados para os pontos P3 e P5 indicaram pouco mais de 30 mm/h, que é considerado boa capacidade de infiltração, contudo, há que se considerar o fato de que a metodologia dos cilindros concêntricos tende a superestimar a infiltração, por causa da coluna de água gerando peso o que pode facilitar a entrada da água na superfície do solo. No caso dos eventos

pluviométricos, a gota da chuva não exerce essa influência, podendo inferir que os pontos P1, P3 e P5, também se apresentaram como áreas em que a capacidade de infiltração pode ser baixa.

Em relação às informações de ocorrências de processos de alagamentos e inundações na cidade de Goiânia, tais foram obtidas junto ao CBMGO (Corpo de Bombeiro Militar do Estado de Goiás). Ressalta-se que os relatórios consultados não apresentam clareza quanto ao tipo de processo ocorrido, se de alagamento ou de inundação. Mediante essa constatação, optou-se por proceder com a espacialização sem diferenciar os processos (Figura 6).

Figura 6. Pontos de ocorrência de processos de alagamentos e inundações na cidade de Goiânia/GO (modificado de Borges et al., 2014).

Fonte: Luiz, 2012.

Quanto à análise integrada dos pontos de maior ocorrência dos processos de alagamentos e inundações na cidade de Goiânia, as áreas de maior ocorrência desses processos ocorreram principalmente na porção central; nos bairros localizados às margens do rio Meia Ponte, devido às características do manancial, como sua larga planície de inundação e seu grande volume de água, associadas a terrenos impermeabilizados, sobre solos, em sua maioria, do tipo Gleissolo e Neossolo Flúvicos. Ressalta-se ainda, as áreas que

compreendem o córrego Cascavel e Botafogo, afluentes do ribeirão Anicuns, descritas como áreas de fundos de vales bastante encaixados, cujas margens são compostas predominantemente por solos do tipo Latossolo e; áreas cortadas por canal de primeira ordem e pequenas dimensões, o que dificulta a vazão pluvial durante intensos episódios pluviométricos.

Os fluxos das águas pluviais tendem a se concentrar na porção central de Goiânia, devido às características fisiográficas, que associadas à

impermeabilização e às características pluviométricas intensas e de rápida duração, agravam os problemas decorrentes dos processos de inundação e alagamentos. De acordo com os dados do CBMG e os dados das intensidades dos episódios, a defesa civil registrou ocorrências de atendimento à população em ocorrência de inundação e alagamentos a partir de eventos de 10,6 mm a 116, mm. Foi possível acompanhar durante a realização desta pesquisa, que episódios de 10 mm em 10 minutos já são suficientes para ocorrer alagamentos em diferentes pontos da cidade.

Por outro lado, o modelado da superfície se apresenta sob a forma de extensas rampas entre os interflúvios, o que favorece o escoamento superficial e o acréscimo na velocidade do fluxo superficial. Tal aspecto associado a chuvas intensas favorece os processos de alagamentos e inundações à jusante dos canais de drenagem. Quando há episódios pluviométricos rápidos e intensos, os canais fluviais não suportam o *input* hidrológico, favorecendo também a potencialização desses processos à montante.

No que se refere ao padrão de chuva e a capacidade de infiltração de superfície do solo, ressalta-se que as informações obtidas apontam para padrão de chuva de elevada intensidade, ocorrendo em 10 minutos e também em uma hora. Mediante tais eventos, a capacidade de infiltração não é suficiente, haja vista que houve teste que apresentou característica de baixa capacidade de infiltração (P1, P3 e P5) e de selamento da superfície (P8 e P10), e os demais testes, apesar de apresentar, conforme metodologia utilizada, capacidade de infiltração. No entanto, o teste pode mascarar esta capacidade, devido à sobrecarga do volume d'água durante o ensaio. Tais aspectos, associados à baixa umidade do solo junto a superfície, variação de 3% a 8%, e a elevada intensidade dos episódios, há o favorecimento, mesmo em áreas de solos não impermeabilizados e com características físicas e mineralógicas para elevada infiltração, de ocorrer maior escoamento superficial. Ressalta-se que dentre as áreas em que se realizou o teste de capacidade de infiltração, apenas um ensaio indicou elevada capacidade de infiltração (373,25mm/h), e esta área se situa em ambiente de preservação, especificamente do tipo de mata.

Conclusões

A análise do padrão dos episódios de chuva permitiu observar que o início da estação chuvosa, especialmente os meses de outubro e de novembro apresentaram ocorrência de chuvas intensas, especialmente durante os períodos da

noite e da madrugada. Esses episódios intensos ocorreram entre 31,6 mm.h⁻¹ e 51,9 mm.h⁻¹. Os episódios intensos não foram restritos ao período de início da estação chuvosa, mas também ocorreram eventos com intensidades variando entre de 32,3 mm.h⁻¹ e de 76,6 mm.h⁻¹, no auge do período chuvoso. Igualmente, considera-se relevante a informação dos episódios extremos, correspondentes às intensidades dos eventos, relativas a 10 min. também em período noturno, cujas intensidades variaram entre 10,9 e 19,6 mm/10 min. Mediante o padrão das intensidades dos episódios pluviométricos ocorrerem no período noturno, torna-se possível entender que os processos de alagamento, inundação e enchentes são previsíveis e, portanto, passíveis de serem reguláveis, desde que sejam adotadas medidas preventivas.

Logo, as elevadas intensidades dos episódios pluviométricos encontrados nesta pesquisa apontam que, tanto no início das chuvas quanto no decorrer dela, é justificável a ocorrência dos processos de alagamentos e de inundações na cidade. Nas primeiras chuvas, portanto, há a possibilidade de se ter com maior recorrência os alagamentos em diversos pontos das vias públicas, considerando as elevadas intensidades dos episódios, em curto intervalo de tempo e a elevada sucção do solo, devido à perda de umidade e ao comportamento dos solos tropicais não saturados. Por outro lado, no decorrer da estação chuvosa, o perfil de solo continua com baixa capacidade de infiltração, devido à elevada umidade, ou aumento do grau de saturação. Além disso, as elevadas intensidades dos episódios pluviais em áreas impermeabilizadas, sobre superfícies de baixas declividades, em extensas rampas, caracterizando fluxo superficial médio e longo, associados a um sistema de drenagem urbana ineficiente, justificam os problemas vivenciados atualmente na cidade de Goiânia, relativos aos alagamentos e às inundações.

Outro fato de destaque deve-se ao processo de infiltração na superfície do solo, para a porção sul da cidade, apresentando o terreno, nesse caso, baixa capacidade de infiltração. O padrão dos episódios de chuva, de 32,3 mm.h⁻¹ a 77,6 mm.h⁻¹, supera em muito a capacidade de infiltração dessas áreas, do que é possível inferir, que o elevado fluxo de escoamento superficial das águas pluviais da região sul em direção à jusante, justamente para a região central, resulta em diversos pontos de alagamentos e inundações, ao longo dos cursos d'água e em diversos pontos da cidade.

Referências

- Ayoade, J.O., 1991. Introdução à Climatologia para os Trópicos. 3ªed. Bertrand, Rio de Janeiro.
- Barraud, S., 2009. Guide Technique: Recommandations Pour La Faisabilite, La Conception et la gestion des Ouvrages D'Infiltration des Eaux Pluviales en Milieu Urbain, Programa MGD Infiltration, INSA de Lyon, França. 62 p.
- Borges, B.O., Luiz, G.C., Santos, J.G.R., Silva, V.R., Gomes, M.N., 2014. Distribuição espacial das áreas de ocorrências a processos de alagamentos e inundações na cidade de Goiânia-GO. XII Simpósio Brasileiro de Climatologia Geográfica. Curitiba-PR. Anais...
- Camapum de Carvalho, J., 2011. Os solos não saturados no contexto de alguns problemas socioambientais no Brasil. VII Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados. Pirenópolis.
- Campos, J.E.G., Rodrigues, A.P., Almeida, L., Magalhães, L.F., Maranhão Sá, M.A., 2003. Diagnóstico Hidrogeológico da Região de Goiânia. AGIM/GO. Superintendência de Geologia e Mineração da Secretaria da Indústria e Comércio, Goiânia, GO, 125 p.
- Cassetti, V., 1992. Geomorfologia do município de Goiânia-GO. Boletim Goiano de Geografia, 12(1). P.65-85.
- Dantas, L.D.M., Cardoso, A.D., Roquete, M.L.S.T., 2018. Expansão urbana e regulação no entorno das cidades. International Scientific Journal – ISSN: 1679-9844 N° 2, volume 13, article n° 6, InterSciencePlace – International Scientific Journal P: 89-184.
- Gomes, M.N., 2015. Distribuição espacial das áreas de inundações e alagamentos na cidade de Goiânia segundo critérios de riscos adotados pela defesa civil de Goiânia no período de 2008 a 2012. Monografia (Graduação), Goiânia, UFG.
- IBGE., 2011. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Sinopse do Censo Demográfico, 2010. Disponível: www.ibge.gov.br. Acesso: 25 nov. 2011.
- IBGE. 1999. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Saneamento básico e problemas ambientais em Goiânia 1992. IBGE: Divisão de Geociências do Centro Oeste, Rio de Janeiro, 81 p.
- INMET, 1999. Instituto Nacional de Meteorologia. Manual de Observações Meteorológicas. Ministério da Agricultura e do Abastecimento, Brasília, 3ª ed. p.36-62.
- Leão Carvalho, E.T., 2008. Avaliação de Elementos de Infiltração de Águas Pluviais na Zona Norte da Cidade de Goiânia. Dissertação (Mestrado), Goiânia, UFG.
- Leão Carvalho, E.T., 2013. Avaliação Geotécnica de Pontos de Infiltração de Águas Pluviais. Tese (Doutorado), Brasília, UnB.
- Lopes, L.M.; Romão, P.A., 2006. Guia de excursões Centro-Oeste: Geomorfologia urbana da região metropolitana de Goiânia., VI Simpósio Nacional de Geomorfologia, UFG/IESA, Goiânia, pp.31-58.
- Luiz, G.C., 2012. Influência na relação solo-atmosfera no comportamento hidromecânico de solos tropicais não saturados: estudo de caso - Município de Goiânia – GO. Tese (Doutorado), Brasília, UnB.
- Luiz, G.C.; Martins, L.F.R.; Camapum De Carvalho, J., 2012. A influencia do clima na infiltrabilidade do solo. In: Camapum De Carvalho, J. C.; Gitirana Junior, G. N.F.; Carvalho, E.T.L. (Orgs.). Tópicos sobre infiltração: teoria e pratica aplicadas a solos tropicais. Serie Geotecnia, v.4, UnB, Brasília.
- Mendonça, F., 2010. Riscos e vulnerabilidades socioambientais urbanos: a contingência climática. Mercator - Revista de Geografia 9, 153-163.
- Monteiro, C.A.F., 1951. Notas para o estudo do clima do Centro-Oeste Brasileiro. Revista Brasileira de Geografia, p.22-45.
- Nascimento, M.A.L.S.; Podestá Filho, A., 1993. Carta de Risco de Goiânia. Boletim Goiano de Geografia 13, 95-105.
- Oliveira, C.A.S., Silva, C.L., 2005. Quantificação do processo de entrada de água (infiltração), através da superfície do solo saturada, usando um cilindro Infiltrômetro. FAV/UnB. 2 p.
- Reichardt, K., 2005. A água em sistemas agrícolas. Editora Manole Ltda, São Paulo.