



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL**

**IMPACTO DO AUMENTO DA TAXA DE PERMEABILIDADE NA EFICIENCIA DA
DRENAGEM URBANA. ESTUDO DE CASO: CENTRO DE CAMPINA GRANDE-PB**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CARLOS VINÍCIUS BESERRA SILVA

CAMPINA GRANDE - PB

2018

CARLOS VINÍCIUS BESERRA SILVA

**IMPACTO DO AUMENTO DA TAXA DE PERMEABILIDADE NA EFICIENCIA DA
DRENAGEM URBANA. ESTUDO DE CASO: CENTRO DE CAMPINA GRANDE-PB**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)
apresentado à Unidade Acadêmica de Engenharia
Civil da Universidade Federal de Campina Grande
(UFCG), como requisito parcial para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^a Dr^a Andréa Carla Lima Rodrigues

Campina Grande - PB

2018

CARLOS VINÍCIUS BESERRA SILVA

IMPACTO DO AUMENTO DA TAXA DE PERMEABILIDADE NA EFICIENCIA DA DRENAGEM URBANA. ESTUDO DE CASO: CENTRO DE CAMPINA GRANDE-PB

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado à Unidade Acadêmica de Engenharia Civil da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em _____ de _____ de 2018.

BANCA EXAMINADORA

Nota _____

Prof^{fa}. Dr^a. Andréa Carla Lima Rodrigues
(Orientadora – Universidade Federal de Campina Grande)

Nota _____

Ronaldo Amâncio Meneses
(Examinador Externo – Companhia de Água e Esgotos da Paraíba)

Nota _____

Prof. Dr. Ricardo de Aragão
(Examinador Interno – Universidade Federal de Campina Grande)

DEDICATÓRIA

A meu irmão Caio Matheus (*in memoriam*).

A minha sobrinha, Clara Luce.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por fornecer coragem, proteção e discernimento no dia-a-dia, e força nos momentos de dificuldades, dúvidas e inseguranças durante toda a minha vida.

Aos meus pais José Carlos e Quitéria, por serem porto seguro na caminhada e fornecerem apoio todas as horas, exemplos de amor, cooperação e cumplicidade. Muito obrigado por tudo, amo vocês!

Aos meus irmãos Chiara Catharina e Caio Matheus (*in memoriam*), mesmo longe sinto a presença a cada instante, representando proteção, carinho, cuidado e amor, amo vocês!

Ao meu cunhado Jedaías, pela disponibilidade de todas as horas, pelo cuidado e atenção, comigo e com todos que amo.

Aos meus tios, tias e primos, longe ou perto sempre trazem alegria e paz, fazendo se sentir amado e querido por todos.

A minha orientadora, Professora Andréa Carla, pela atenção, disponibilidade e pela cobrança justa e consciente. Muito Obrigado.

Aos amigos de Altinho, que são como uma grande família, cuidando e protegendo uns aos outros, parceiros nos momentos felizes e tristes.

Aos amigos de Campina Grande, Werley Targino, Ary, Anna Izabel, Amanda, Camila Farias, Matheus Abrantes, Flávia Carvalho, Raquel Gomes, André Mota, Jéssika Cunha, Cleydson Caetano e tantos outros, amizades que floresceram em meio a saudade de casa e nas tensões da vida universitária e hoje se tornaram parte fundamental da minha rotina. Levarei cada um em um lugar especial no meu coração.

Aos professores que doaram um pouco do seu tempo para compartilhar o que sabem com paciência e dedicação.

A todos que contribuíram para este trabalho, em forma de material ou conselhos, muito obrigado.

Aos que torcem e rezam pelo meu sucesso e realização profissional e pessoal, meu muito obrigado!

RESUMO

O aumento desordenado dos centros urbanos e, por consequência, a alteração do relevo nativo e o crescimento das áreas impermeáveis causam uma interferência no processo de infiltração natural, gerando escoamentos superficiais que, por vezes, a rede de drenagem pluvial não suporta, causando prejuízos e transtornos à população. O presente trabalho usa a modelagem computacional com o propósito de avaliar os impactos da impermeabilização excessiva no ambiente urbano, comparando cenários e visando o melhoramento da rede de drenagem existente. Para tal, foi usada uma área localizada no centro da cidade de Campina Grande -PB, que compartilha de problemáticas semelhantes a outros bairros da cidade, como pontos de alagamentos e inundações em eventos de precipitação elevada. O estudo foi realizado a partir do Mapa Base Urbano de Campina Grande -PB e através de levantamento de Campo, além de aplicativos como o Google Maps e Street View. Para a modelagem foi utilizado o software SWMM (*Storm Water Management Model*). Durante o estudo, foram avaliados três cenários: o cenário 1 apresenta a real condição da região que tem em média 92,78% de área revestida por pavimentos o que dificultam a permeabilidade; a segunda perspectiva foi simulada uma situação com 20% de área destinada a infiltração da água em cada lote; a terceira conjuntura apresenta a adição de 5% de área permeável devido ao uso de blocos intertravados, totalizando 25%. Os resultados obtidos para o Cenário 1 mostram que o sistema apresenta áreas com escoamento crítico mesmo após 60 minutos do término do evento chuvoso, em pelo menos 20 áreas se considerada um tempo de retorno de 10 anos. Quando aplicada a lei vigente (Cenário 2), há uma redução de 25% no número de lotes com escoamento considerados críticos. O Cenário 3, mostrou resultados positivos em relação ao Cenário 1, mas discretos em relação ao Cenário 2. Os lotes que apresentam grandes áreas superficiais permanecem, mesmo após 60 minutos do final da chuva, com escoamento crítico, porém nestes locais seria possível a implantação de blocos intertravados em toda a área, sem que haja prejuízos com o layout escolhido. Espera-se que os resultados encontrados colaborem para o desenvolvimento de soluções sustentáveis que conciliem custos com um correto uso do solo e respeito às leis vigentes.

Palavras-chave: modelagem computacional, SWMM, pavimentos permeáveis, medidas compensatórias.

ABSTRACT

The tumultuous increase of the urban centers and, consequently, the alteration of the native relief and the growth of the impermeable areas, cause an interference in the system of natural infiltration, generating high superficial flows that, sometimes, it is not supported by the artificial drainage network, causing damages and disorders to the population. The present paper uses computational modeling with the purpose of evaluating the impacts of exceeding waterproofing in the urban environment, comparing scenarios and aiming at improving the existing drainage network. For this purpose, an area located in the center of the city of Campina Grande-PB was used, which shares similar problems to other districts of the city, such as flood and flood points in high precipitation events. The study was carried out from the Urban Base Map of Campina Grande-PB and through Field survey, as well as applications such as Google Maps and Street View. For the modeling the software SWMM (Storm Water Management Model) was used. During the study, three scenarios were developed: the first presents the real condition of the region that has on average 92.78% of area covered by pavements that hinder permeability; the second perspective was simulated a situation with 20% of area destined to infiltrate the water in each lot; the third scenario presents the addition of 5% permeable area due to the use of interlocking blocks, totaling 25%. The results obtained for Scenario 1 show that the system shows failures even after 60 minutes of the end of the rainy event, in at least 20 areas if a return time of 10 years is considered. When applying the current law (Scenario 2), there is a 25% reduction in the number of plots considered critical. Scenario 3 showed positive results in relation to Scenario 1, but discrete in relation to Scenario 2. Plots with large surface areas remain, even after 60 minutes of rainfall, with critical runoff, but in these locations it would be possible to implement of blocks interlocked throughout the area, without any damage with the chosen layout. It is hoped that the results found will contribute to the development of sustainable solutions that will reconcile costs with a correct use of the soil and respect to the existing laws.

Key words: computational modeling, SWMM, permeable floors, compensatory measures.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução urbana e ocorrência de inundações	5
Figura 2 - Localização do município de Campina Grande - PB.....	16
Figura 3 – Alagamentos registrados em ruas da região	18
Figura 4 - Localização da área dentro das microbacias urbanas	18
Figura 5 - Área de estudo delimitada.....	19
Figura 6 – Situação de elementos de drenagem na área de estudo	20
Figura 7 – Gráfico da Intensidade x Duração para os tempos de 2, 5 e 10 anos	27
Figura 8 – Resumo das etapas metodológicas	29
Figura 9 - Mapeamento da área de estudo para precipitação de tempo de retorno de 2 anos no cenário real a) 0 minuto após o final do evento e b) 60 minutos após o final do evento.	31
Figura 10 - Mapeamento da área de estudo para precipitação de tempo de retorno de 5 anos no cenário real a) 0 minuto após o final do evento e b) 60 minutos após o final do evento	33
Figura 11 - Mapeamento da área de estudo para precipitação de tempo de retorno de 10 anos no cenário real a) 0 minuto após o final do evento e b) 60 minutos após o final do evento	34
Figura 12 - Mapeamento da área de estudo para precipitação de tempo de retorno de 2 anos a) 0 minuto após o final do evento e b) 60 minutos após o final do evento	35
Figura 13 - Mapeamento da área de estudo para precipitação de tempo de retorno de 5 anos a) 0 minuto após o final do evento e b) 60 minutos após o final do evento	36
Figura 14 - Mapeamento da área de estudo para precipitação de tempo de retorno de 10 anos a) 0 minuto após o final do evento e b) 60 minutos após o final do evento	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Crescimento da população brasileira e taxa de urbanização	4
Tabela 2 - Coeficiente de Rugosidade Manning	22
Tabela 3 – Valores aplicados na equação de Horton	23
Tabela 4 – Intervalos de valores para a capacidade de armazenamento em depressões (Superfícies impermeáveis e permeáveis)	24
Tabela 5 - Valores determinados no processo de adequação	24
Tabela 6 – Precipitação horária dos eventos selecionados em mm	25
Tabela 7 – Constantes do local da equação geral da relação IDF para Campina Grande	26
Tabela 8 - Tempo de Retorno para sistemas de drenagem urbana	26
Tabela 9 – Respostas das simulações dos Cenários 1, 2 e 3 para os tempos de retorno de 2, 5 e 10 anos.....	39

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Resumo dos Principais Processos Simulados Pelos Softwares de Modelagem Computacional.....	13
Quadro 2 - Parâmetros necessários na definição da sub-bacia para simulação.....	21
Quadro 3 - Parâmetros necessário para caracterizar os condutos.....	23

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação da Largura do Retângulo Equivalente	21
Equação do Coeficiente de Compacidade	22
Equação da Largura das Sub-Bacias	22
Equação Geral de Relação IDF	25

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

A – Área

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AI – Áreas Impermeáveis

AINC – Áreas impermeáveis não conectadas

CEBDS – Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável

CEMADEN – Centro Nacional de Monitoramento de Desastres Ambientais

CN – Curva Número

CNES - *Centre national d'études spatiales*

DATASUS – Departamento de Informática do Sistema Único de Saúde

DI - Capacidade de armazenamento em depressões- Superfícies impermeáveis

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

DP - Capacidade de armazenamento em depressões- Superfícies permeáveis

EMEPA – Empresa Estadual de Pesquisas Agropecuárias da Paraíba

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IDF – Intensidade-Duração-Frequência

IPH – Instituto de Pesquisas Hidráulicas

Kc – Coeficiente de Compacidade

Le – Largura do retângulo equivalente

NBR – Norma Brasileira

NRCS – *National Resources Conservation Service*

P – Perímetro

PB - Paraíba

PMCG – Prefeitura Municipal de Campina Grande

PMSB – Plano Municipal de Saneamento Básico

SECOM – Secretaria de Obras

SEPLAN – Secretaria de Planejamento, Gestão e Transparência de Campina Grande

SSD ABC - Sistema de Suporte a Decisões para Análise de Ondas de Cheia em Bacias Complexas

SWMM - *Storm Water Management Model*

TR – Tempo de Retorno

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UFCG – Universidade Federal de Campina Grande

USEPA - *United States Environmental Protection Agency*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVOS	2
1.1.1. Objetivo Geral	2
1.1.2. Objetivos Específicos	2
2. REFERENCIAL TEÓRICO	4
2.1. A DRENAGEM URBANA DENTRO DE UM CONTEXTO HISTÓRICO	4
2.2. A IMPORTÂNCIA DA DRENAGEM URBANA.....	5
2.3. IMPACTOS DA FALTA DE DRENAGEM NO AMBIENTE URBANO	8
2.3.1. Inundação de áreas ribeirinhas	8
2.3.2. Inundações devido à urbanização	8
2.4. ELEMENTOS COMPONENTES DOS SISTEMAS ESTRUTURAIS DE DRENAGEM URBANA	9
2.5. MEDIDAS NÃO ESTRUTURAIS EM DRENAGEM URBANA E SOLUÇÕES SUSTENTÁVEIS	10
2.5.1. Os Pavimentos Permeáveis.....	11
2.6. MODELOS HIDROLÓGICOS E DRENAGEM URBANA	12
2.6.1. Modelo SWMM.....	14
3. METODOLOGIA	16
3.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	16
3.1.1. Município de Campina Grande.....	16
3.1.2. Delimitação da área estudada	17
3.2. LEVANTAMENTO DE CAMPO	20
3.3. REPRODUÇÃO DA ÁREA NO MODELO SWMM.....	20
3.3.1. Sub-Bacias	21
3.3.2. Infiltração.....	23
3.3.3. Condutos.....	23
3.3.4. Nós.....	24
3.4. CALIBRAÇÃO DO MODELO	24
3.4.1. Dados hidrológicos utilizados	24
3.5. PERÍODOS DE RETORNO E GERAÇÃO DA CURVA DE INTENSIDADE PLUVIOMÉTRICA.....	26
3.6. CENÁRIOS ESTUDADOS.....	27
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	30

4.1.	CENÁRIO ATUAL: DIAGNÓSTICO DA ÁREA	30
4.2.	CENÁRIO LEGALIZADO – RESPEITO AOS LIMITES DE PERMEABILIDADE ESTABELECIDOS NO CÓDIGO DE OBRAS DO MUNICÍPIO.....	34
4.2.1.	Tempo de retorno de 2 Anos	35
4.2.2.	Tempo de retorno de 5 Anos	36
4.2.3.	Tempo de retorno de 10 Anos	37
4.3.	CENÁRIO SUSTENTÁVEL – ACRÉSCIMO DE 5% DE ÁREA PERMEÁVEL DEVIDO AO USO DE PAVIMENTO PERMEÁVEL.....	38
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	41
6.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	43

1. INTRODUÇÃO

O processo de urbanização provoca várias mudanças no ambiente natural e essas ocorrem principalmente pelas frequentes transformações antrópicas que visam atender às necessidades básicas ou que buscam o conforto para os indivíduos que habitam o local. Entre as principais alterações está o modo como o solo é tratado e revestido.

Nos centros urbanos, grandes áreas são impermeabilizadas para os mais diversos fins aumentando o escoamento superficial e modificando o ciclo hidrológico. Segundo Braga (2016) a ocorrência de enchentes, alagamentos e inundações em áreas urbanas pode ser explicada pelo agravamento do escoamento superficial natural, que sofre alterações substanciais em decorrência do processo de urbanização desordenada, como consequência da impermeabilização da superfície.

Com a expansão populacional há também o aumento da geração de resíduos sólidos e da produção de esgotos domésticos que, muitas vezes, são lançados nos canais de drenagem, comprometendo a eficiência do sistema e a qualidade das águas e levando o assunto para a ordem de saúde pública.

Durante séculos, a drenagem das águas pluviais foi feita por meio de medidas estruturais, frequentemente onerosas e complexas. Com o passar do tempo, conforme os hábitos da população foram se modificando, o sistema não apresentava por si só uma solução eficaz, sendo necessária a busca por medidas mais econômicas e efetivas. Surgem, então, os conceitos de medidas compensatórias e drenagem sustentável.

Uma boa estratégia para a drenagem urbana sustentável, que diferencia do sistema tradicional por apresentar propostas menos onerosas, é o planejamento sistêmico. Deve-se planejar de forma integrada a drenagem de toda a bacia hidrográfica como, por exemplo, uma infraestrutura verde multifuncional que infiltre as águas no local onde caem, maiores áreas permeáveis e arborizadas, desconectar áreas impermeáveis, dentre outros (HERZOG, 2013).

Para Tonetti et al. (2013) as medidas para a prevenção dos alagamentos devem conciliar o uso dos recursos tecnológicos com o desenvolvimento de técnicas que respeitem os processos ecológicos que envolvem o ciclo da água.

Assim, o controle da geração de escoamento de águas pluviais aparece como uma medida compensatória e sustentável, ou seja, aumentar o volume de água infiltrado, diminuindo o fluxo superficial. Entre as medidas mais utilizadas nos centros urbanos está o uso de

pavimento permeável. Segundo Pinto (2011) o pavimento permeável é uma medida compensatória capaz de reduzir volumes de escoamento superficial e vazões de pico em níveis semelhantes aos que eram observados antes da intensa urbanização. Seu uso promove a infiltração da água da chuva no solo urbano e atua como um retardador do tempo de pico das cheias, além de permitir a recarga do lençol freático e servir como armazenador e redutor de poluição da água (FELDE et al.,2015).

É possível avaliar a aplicação de medidas compensatórias sustentáveis, através de simulações computacionais, modelagem hidrológica e princípios de urbanismo sustentável. Dentro desse contexto, verifica-se a importância da simulação hidrológica-hidráulica para uma melhor compreensão dos fenômenos que ocorrem em uma bacia hidrográfica de forma a produzir o comportamento do sistema através da modelagem computacional (ALVES, 2017).

Dentre as ferramentas computacionais extensamente utilizadas na modelagem da drenagem urbana está o Storm Water Management Model (SWMM) que permite simular o sistema de drenagem urbana para controle de alagamentos, a avaliação de uso de sistemas de retenção de cheias e proteção da qualidade das águas, o mapeamento de áreas inundáveis, a análise do efeito de medidas compensatórias, entre outros (NÓBREGA, 2012).

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. *Objetivo Geral*

Avaliar os impactos do aumento da taxa de permeabilidade em uma rede de drenagem urbana a partir da modelagem computacional de uma região altamente urbanizada da cidade de Campina Grande-PB.

1.1.2. *Objetivos Específicos*

- Caracterizar o sistema de drenagem da área estudada mapeando as suas partes componentes e as deficiências existentes;
- Modelar área de estudo utilizando a ferramenta computacional SWMM de modo a diagnosticar e detectar pontos de alagamentos quando submetida a intensidades pluviométricas controladas;

- Avaliar a impacto do cumprimento do código de obras municipal na taxa de permeabilidade dos lotes da área;
- Estudar o comportamento do sistema de drenagem a partir da implantação de medidas compensatórias que busquem reduzir a impermeabilidade do solo e, assim, colaborar com o processo de tomada de decisão por parte da gestão pública.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. A DRENAGEM URBANA DENTRO DE UM CONTEXTO HISTÓRICO

O processo de urbanização mundial iniciado no século XVIII, trouxe inúmeras mudanças no estilo de vida e na perspectiva dos grupamentos. Entre as modificações pode-se citar o crescimento de áreas calçadas e, conseqüentemente não permeáveis, o aumento da poluição terrestre, a modificação do ciclo natural da água e a adoção de sistemas que transportem as águas das chuvas. Apesar de intensificado apenas no século XVIII, o conceito de drenagem pluvial é bastante antigo, povos como os gregos e sumérios já tratavam a definição dos cursos das águas com sistemas rudimentares que inspiraram os sistemas modernos.

No Brasil, o empenho com as águas pluviais ocorreu, de modo mais intenso, após a Proclamação da República, com as reformas dos padrões urbanísticos e a consolidação do conceito higienista do saneamento básico. Entretanto, somente em 1912 passou-se a adotar o sistema separador absoluto tornando obrigatória a criação de sistemas independentes para condução das águas pluviais e esgotamento sanitário em projetos urbanísticos. Também é dessa época a generalização do emprego de tubos de concreto em obras de drenagem urbana (CAMPOS, 2005)

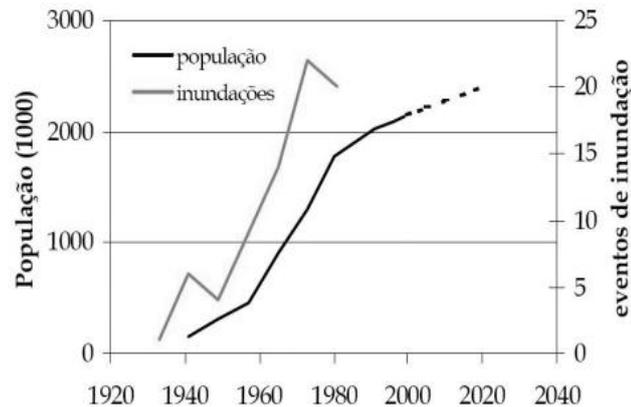
Para Tucci (2001), o desenvolvimento urbano brasileiro se expandiu no final dos anos 1960 até o final dos anos 1990, quando o país passou de cerca de 55 % de população urbana para 76 %, progredindo até os dias atuais (Tabela 1). Esta concentração de população ocorreu principalmente nas capitais, motivando um aumento da poluição e da frequência das inundações em função da impermeabilização e da canalização não dimensionada para o contingente (Figura 1).

Tabela 1 - Crescimento da população brasileira e taxa de urbanização

ANO	POPULAÇÃO (milhões de habitante)	PARCELA DA POPULAÇÃO URBANA (%)
1970	93,1	55,9
1980	118	68,2
1991	146,8	75,6
1996	157,1	78,4
2000	169,6	81,1
2010	190,7	84,4

FONTE: (IBGE, 2010)

Figura 1 - Evolução urbana e ocorrência de inundações



FONTE:(adaptado de RAMOS, 1998)

Ainda segundo o autor, o aumento da vazão ocasionada pela impermeabilização do solo e a ocupação populacional da bacia, pode ser seis vezes superior com relação à situação de pré-desenvolvimento. O fato ocorre em detrimento da redução da evapotranspiração e do escoamento subterrâneo e da diminuição do tempo de concentração da bacia.

Nos últimos anos, o aumento da população urbana ocorre principalmente nas periferias das cidades, geralmente ocupando áreas de mananciais desprotegidos e de desmoronamento, colocando em risco a vida daqueles que ali residem. O processo sem controle atua diretamente sobre as inundações pela falta de infraestrutura adequada, a falta de informação por parte da população e da incapacidade que o poder público possui para cobrar o cumprimento da legislação. Cidades acima de 1 milhão de habitantes crescem a uma taxa média de 0,9% no ano, enquanto os núcleos regionais como cidades entre 100 e 500 mil habitantes crescem à taxa de 4,8% ao ano. Portanto, para que os processos inadequados de urbanização e impacto ambiental que se observaram nas regiões metropolitanas não sejam reproduzidos nestas cidades de porte médio, estas merecem uma atenção especial (TUCCI, 2001).

2.2. A IMPORTÂNCIA DA DRENAGEM URBANA

A Lei Nº 13.308, de 6 de julho de 2016 estabelece a drenagem como o manejo das águas pluviais, limpeza e fiscalização preventiva das respectivas redes urbanas: conjunto de atividades, infraestruturas e instalações operacionais de drenagem urbana de águas pluviais, de

transporte, detenção ou retenção para o amortecimento de vazões de cheias, tratamento e disposição final das águas pluviais drenadas nas áreas urbanas.

Conforme Barros (2012), o Plano Diretor Urbano tem como função indicar critérios de ocupação da área urbana, estabelecendo ligação direta com a problemática do escoamento das águas pluviais. As leis de ocupação e uso que advêm do plano devem considerar basicamente as áreas de riscos de inundação de córregos e rios que cortam a cidade, além da proteção das áreas sujeitas a deslizamentos e encostas de morros. Essas áreas, quando desprotegidas, apresentam processos de erosão acelerados, gerando grandes volumes de sedimentos, que assoreiam galerias e rios, comprometendo a eficácia do sistema de escoamento.

A partir do ano 2000, houve um intenso debate ao redor do Código Florestal. As maiores discussões tiveram como centro a área rural, porém alguns aspectos se voltaram ao meio urbano e a drenagem, como a Lei 12.651/2012, que confere aos Municípios, através de seus Planos Municipais, a definição de regras específicas de restrição em lotes, desde que respeitando os limites da Lei (BRASIL, 2012).

A drenagem urbana faz parte dos quatro pilares do saneamento básico. Juntamente com o abastecimento de água, esgotamento sanitário e manejo de resíduos sólidos buscam preservar os recursos naturais e prevenir a proliferação de patógenos entre a população. Neste sentido, a Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007, conhecida como Lei do Saneamento, estabelece disponibilidade, em todas as áreas urbanas, de serviços de drenagem e manejo das águas pluviais, limpeza e fiscalização preventiva das respectivas redes, adequados à saúde pública e à segurança da vida e do patrimônio público e privado.

Em 2013, segundo o Ministério da Saúde (DATASUS, 2013), foram notificadas mais de 340 mil internações por infecções gastrointestinais no país. Se toda a população tivesse acesso à coleta de esgoto haveria uma redução, em termos absolutos, de 74,6 mil internações e 56% da redução ocorreria no Nordeste (Trata Brasil/CEBDS, 2014). Parte das doenças relacionadas a água também são causadas pela poluição das águas pluviais por esgotos clandestinos.

Autores como Neves e Tucci (2011); e Chebbo et al. (2001) apresentaram estudos onde são evidenciadas as relações entre o sistema de drenagem de águas pluviais e os outros componentes do saneamento básico, com ênfase para a presença significativa de resíduos sólidos, que exerce papel importante na falha do funcionamento das redes de drenagem, e para

o esgotamento sanitário, cuja mistura nos corpos d'água urbanos provoca a degradação das águas e cria um importante argumento para sua canalização.

Logo, o sistema de drenagem surge também como uma ferramenta utilizada para garantir a qualidade de vida da população. Compete então, impedir o aparecimento de inundações e alagamentos, afim de evitar transtornos como o desalojamento de famílias e o desenvolvimento de doenças de veiculação hídrica como a leptospirose e malária.

Deste modo, o sistema de drenagem urbana busca reduzir os efeitos dos fenômenos naturais na vida da população e garantir a preservação da integridade física das moradias, estradas e demais patrimônios públicos e privados.

Barros (2012) listou os principais problemas que reduzem a eficácia dos sistemas de drenagem nos países em desenvolvimento:

- O aumento gradativo do volume de escoamento superficial para o mesmo índice de precipitação, tornando o sistema existente obsoleto e incapaz de escoar as chuvas para a qual o mesmo foi projetado;
- O crescimento do volume de sedimentos afluentes aos canais, decorrentes da ocupação irregular da superfície e feito sem controle de erosão, causando assoreamento dos leitos dos rios e diminuindo a capacidade de transporte de água pelo sistema de drenagem;
- A existência de planos diretores das cidades que não consideram os aspectos de drenagem da bacia. Os projetos de ocupação do solo, da malha viária e das redes de água e esgoto, além de empreendimentos imobiliários e indústrias são incompatíveis com a hidrologia das bacias urbanas;
- A emissão de resíduos sólidos e lixo nos córregos, galerias e canais, decorrentes de sistemas deficientes, principalmente em áreas mais pobres como favelas, áreas ocupadas irregularmente e ribeirinhas;
- A falta de conscientização por parte da população que muitas vezes lança lixo e fazem ligações clandestinas de esgoto em canais pluviais;
- Obras mal executadas, galerias obstruídas, pontes com posicionamentos inadequado em relação a posição dos rios;
- Falta de legislação exclusiva para tratar os problemas de drenagem;
- Falta de informação hidrológicas e meteorológicas confiáveis para a execução de projetos de drenagem urbana. Muitos estudos empregam técnicas empíricas

propostas para países desenvolvidos e do hemisfério norte, que não se aplicam à realidade climática local.

2.3. IMPACTOS DA FALTA DE DRENAGEM NO AMBIENTE URBANO

O escoamento das águas pluviais pode ocorrer na forma de dois processos, que agem isoladamente ou combinados: Inundações de áreas ribeirinhas e Inundações devido à urbanização.

2.3.1. *Inundação de áreas ribeirinhas*

Segundo Tucci (2001), o leito maior do rio é inundado com risco a cada 1,87 anos em média e é decorrência do processo natural do ciclo da água, a problemática passa a existir quando há residentes no leito maior, estando sujeitos aos danos. Em geral, as conjunturas ocorrem devido as seguintes ações:

- A falta de restrição quanto ao loteamento de áreas de risco de inundações, por parte do Plano Diretor das Cidades. Em consequência de uma série de anos sem enchentes, é comum que empresários loteiem áreas ribeirinhas e, por vezes, estreitem o curso do rio;
- Invasão das áreas pertencentes ao poder público por parte da população de baixa renda;
- Ocupação de áreas de médio risco.

Os Impactos sofridos pela população são prejuízos de ordem materiais e humanos; contaminação por doenças de veiculação hídrica; contaminação da água pela inundação de depósitos de material tóxico, estação de tratamento, entre outros.

2.3.2. *Inundações devido à urbanização*

A medida que as cidades crescem, geralmente ocorrem impactos como o aumento das vazões máximas e da frequência decorrentes da crescente impermeabilização das superfícies; o aumento da produção de lixo urbano e a deterioração da qualidade da água devido à lavagem das ruas, ligações ilegais de esgotos residenciais e contaminação de aquíferos (RIGHETTO, 2009).

Um outro impacto ambiental é o aumento de temperatura nos centros urbanos, devido a regiões impermeáveis que absorvem parte da energia solar, gerando ilhas de calor. Como consequência do aumento da temperatura local observa-se a ocorrência de chuvas irregulares dentro de pequenas áreas. Pesquisa realizada por Silveira (1999) mostra que a parte central de Porto Alegre desenvolveu índices pluviométricos maiores que a parte periférica, nesta área as chuvas são mais intensas e de curta duração, agravando os alagamentos.

Aumento de resíduos sólidos também causa a redução da capacidade de escoamento do sistema existente, além do assoreamento de canais e contaminação de corpos hídricos, a exemplo dos açudes, quando existentes nos centros urbanos.

2.4. ELEMENTOS COMPONENTES DOS SISTEMAS ESTRUTURAIS DE DRENAGEM URBANA

Segundo Barros (2012), as medidas estruturais de um sistema de drenagem, variam de acordo com as características da área que se deseja atender, do uso do solo e sua ocupação. Segundo a dimensão de área de atuação, a rede ramifica em micro e macrodrenagem, estando interligadas. Ambas devem ser parte de um grande sistema que une toda a bacia hidrográfica.

O sistema de microdrenagem abrange a coleta instantânea das águas superficiais, através de pequenas e médias galerias. Geralmente são obras projetadas para fenômenos que devem ocorrer num período de 2, 5 ou, no máximo, 10 anos (TUCCI, 2001).

Quanto maior o período de retorno, mais risco de ocorrer o fenômeno esperado, portanto o sistema projetado deverá ser mais robusto. As áreas envolvidas, na sua maioria, são com menos de um quilometro quadrado, o que abrange ruas ou até mesmo quarteirões, e tendem a obedecer aos alinhamentos arquitetônicos já existentes nas ruas, ou seja, as vazões serão conduzidas de acordo com as ruas do projeto (BARROS, 2012).

O escoamento final se dá pelo sistema de macrodrenagem, que tem como função absorver o escoamento da microdrenagem, dos canais e dos rios canalizados. A macrodrenagem inclui obras dimensionadas para vazões grandes e maiores velocidades de escoamento, geralmente em sua projeção, são utilizados períodos de retornos de 20, 50 ou 100 anos (GOIS, 1998).

Do ponto de vista técnico, os sistemas de macro e microdrenagem são conjuntos de elementos estruturais, que funcionam como canalizadores das águas das chuvas afim de

conduzi-las para fora do ambiente urbano. As principais partes componentes desses sistemas, são:

- Galerias: Sistema de dutos destinados à condução e captação da água advinda das bocas coletoras;
- Bocas de Lobo: captam e conduzem as águas superficiais para as galerias, devendo ser colocadas nos pontos mais baixos do sistema viário, afim de evitar alagamentos e águas paradas;
- Poços de Visita: objetivam o acesso e inspeção às canalizações, de modo a mantê-las em bom estado de funcionamento;
- Sarjetas: trata-se da escoadora das águas nas ruas, avenidas e estradas, beirando o meio fio afim de conduzir as águas até as bocas-de-lobo;
- Canais: Valas artificiais destinadas a conduzir as águas advindas de um leito hídrico ou escoamentos pluviais.

Além desses elementos, ainda que usados com menos frequência existem os condutos forçados, estações de bombeamento e reservatórios urbanos ou bacias de detenção.

2.5. MEDIDAS NÃO ESTRUTURAIS EM DRENAGEM URBANA E SOLUÇÕES SUSTENTÁVEIS

As medidas de controle da drenagem urbana incluem diferentes soluções técnicas de engenharia, projetos de arquitetura e questões legais e econômicas. Alves (2017) definiu as medidas não estruturais como o uso do planejamento e de instrumentos legais, sem fazer uso de estruturas para alterar o regime de escoamento e com o objetivo de minimizar os impactos causados pela ação antrópica.

No Brasil, a principal medida não estrutural aplicada ainda é a legislação. Leis de uso e ocupação do solo são incorporadas aos Planos Diretores das cidades. A preservação de áreas verdes e áreas ribeirinhas é uma medida fundamental para não agravar o desempenho do sistema de drenagem e evitar o crescimento das vazões no tempo (BARROS, 2012).

Outra recomendação é o aumento da capacidade de infiltração do solo dentro do ambiente urbano. Dentro desta alternativa se destaca o uso de pavimentos permeáveis e a construção de jardins e praças afim de substituir calçadas convencionais por estruturas que permitam a infiltração da água no solo.

2.5.1. *Os Pavimentos Permeáveis*

Pavimentos permeáveis são aqueles que permitem a infiltração da água através de poros ou até mesmo de espaços entre os blocos. Este tipo de revestimento de solo busca reduzir o volume de água referente ao escoamento superficial, e por consequência, reduzir a solicitação de sistemas drenantes, não contribuindo para a recarga em caso de alagamentos e carreando menor quantidade de poluição difusa (FERGUSON, 2005).

O uso dos pavimentos permeáveis tem sido grandemente disseminado em países do exterior. Nos Estados Unidos, vários estados criaram leis mudando os objetivos e métodos de drenagem urbana, impondo a máxima infiltração ou armazenamento temporário da água de escoamento superficial. No Japão, o pavimento permeável é integrado a programas que incluem todas as técnicas de infiltração. Tais técnicas são utilizadas principalmente nos quarteirões das grandes cidades, em lugares disponíveis e que podem ser inundados, tais como quadras de esporte de universidades, pátios de escolas, etc. Na Suécia, a utilização do pavimento permeável foi incentivada por suas contribuições (ALVES, 2017).

No Brasil, o uso dos pavimentos permeáveis tem aumentado nos últimos anos. Sob o aspecto de legislação, já existe uma norma técnica ABNT - A NBR 16416 - criada em 2015 que apresenta os requisitos e procedimentos mínimos para a construção de pavimentos permeáveis de concreto.

Gonçalves e Oliveira (2014), classificam os tipos de pavimentos quanto a sua composição e infiltração. Quanto a primeira divisão, tem-se pavimentos de asfalto poroso, concreto poroso, blocos de concreto vazado, blocos de concreto e paralelepípedos. Quanto à infiltração podem ser agrupados em pavimentos com infiltração total onde todo o volume é infiltrado no solo, e pavimento com infiltração parcial em que necessário um sistema auxiliar com coletor e drenos. A estrutura do pavimento deve ser dimensionada considerando-se a intensidade da precipitação no local e as características do solo.

Estudos de comparação entre asfalto poroso e blocos vazados realizados na Universidade Federal do Rio Grande do Sul mostraram um desempenho hidráulico satisfatório, visto que houve um elevado controle do escoamento superficial, com valores de coeficiente de escoamento médios de 5% a 2,3%, para asfalto poroso e blocos vazados, respectivamente. (ACIOLI, 2005).

Azevedo (2018) fez um levantamento bibliográfico dos pavimentos permeáveis como ferramenta de drenagem e infiltração nas cidades, apresentando os tipos existentes e suas características, critérios de projeto e etapas construtivas, além de sua relação com pavimentos convencionais quando se trata de resistência, custo benefício e manutenção. Concluiu que o emprego dos pavimentos permeáveis no meio urbano traz em inúmeros benefícios, entre eles, a redução do escoamento superficial, no qual reduz a probabilidade de enchentes e, conseqüentemente, os transtornos gerados pela mesma.

Segundo Araújo *et al.* (2000), usualmente a água precipitada percorre os blocos permeáveis através de porosidades em caso de revestimentos asfálticos ou dos espaçamentos quando utilizados blocos de concreto, atravessa um filtro de agregados graúdos e são direcionados para reservatórios. Uma outra possibilidade, mais utilizada em projetos de reformas, é a infiltração direta sem a passagem pelo reservatório.

Dias e Antunes (2010) realizaram um estudo comparativo entre o uso de soluções convencionais e sustentáveis dentro do âmbito da drenagem urbana através da elaboração de projeto utilizados as duas alternativas em uma área do bairro da Tijuca no Rio de Janeiro. A solução sustentável gerou um custo de 9,5% mais elevado o uso do sistema convencional, entretanto, concluiu-se que a aplicação de pavimentos permeáveis é mais indicada pois gera benefícios ambientais que compensam a diferença de custos.

Dentro do contexto do uso de pavimentos permeáveis como solução sustentável para a redução de risco de alagamentos e inundações, a modelagem matemática pode ser uma ferramenta útil na realização de estudos que avaliem a eficácia dos materiais usados nos diferentes tipos de pavimentos, ou mesmo, como comparativo com os pavimentos convencionais.

2.6. MODELOS HIDROLÓGICOS E DRENAGEM URBANA

Os modelos hidrológicos são úteis em diversas etapas da gestão das águas pluviais urbanas sendo utilizados na fase de planejamento e de detalhamento de projeto, no caso de manutenção corretiva em que seja necessário realizar obras complementares e em casos onde se deseja simular cenários sobre o comportamento de sistemas drenadores submetidos a determinadas condições de escoamento. Quando na concepção de projeto, sua utilização integra a estimativa de custos e análise de viabilidade técnica e, em casos onde haja tomada de decisões como o transporte de efluentes para estações de tratamento (CABRAL, *et al.*, 2009).

Apesar da legislação brasileira recomendar que os sistemas de esgotamento sanitário e de drenagem de águas pluviais devem ser independentes, em muitos países e em algumas cidades brasileiras existe o sistema combinado, o que causa diferenças significativas no cálculo da vazão e comprometem ainda mais a qualidade das águas escoadas.

Outros aspectos que se incorporam aos modelos são a ferramentas de geoprocessamento e mapeamento por satélites, o que trazem facilidades nas entradas de dados e de representação espacial tornando os modelos mais precisos e eficazes. Os modelos possibilitam a análise do escoamento (velocidade, níveis, vazões e volumes), além de gerar modelos hidrológicos de transformação de chuva em vazão e modelos de qualidade da água.

Para Cabral *et al.* (2009), o objetivo de um modelo hidrológico para a drenagem urbana é a representação do escoamento da precipitação pela superfície do terreno, a interceptação, a infiltração (ainda que pequena, mas existente), a evapotranspiração e a interação destes processos com a rede de coleta de águas pluviais.

No Brasil, são utilizados o aplicativo ABC (desenvolvido na Universidade de São Paulo -USP), ou o modelo IPH II (desenvolvido no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - IPH - UFRGS), para a transformação de chuvas em escoamento. Em outros países os modelos mais utilizados são o SOBEK (*Delf Hydraulics*, Holanda), o InfoWorks (*Wallingford Institute*, Inglaterra) e o modelo SWMM (*USEPA*, Estados Unidos). Através do Quadro 1 Bastos (2007) apresenta a capacidade de modelagem de diferentes processos dos softwares mais utilizados no mundo.

Quadro 1 – Resumo dos Principais Processos Simulados Pelos Softwares de Modelagem Computacional

MODELO	Processos Simulados					
	Escoamento Superficial	Escoamento Subterrâneo	Erosão	Precipitação	Degelo	Qualidade da Água
SOBEK-URBAN	X			X		X
INFOWORKS	X	X				X
SWMM	X	X	X	X	X	X

Fonte: Adaptado de Bastos (2007)

A escolha do modelo resulta dos objetivos da modelagem ou da tecnologia empregada, além da disponibilidade dos dados e afinidade do modelador. No presente trabalho foi utilizado o Modelo SWMM devido as suas capacidades de simulações, domínio público e disponibilidade de dados.

2.6.1. *Modelo SWMM*

O *Storm Water Management Model* - SWMM é um modelo dinâmico chuva-vazão que simula a quantidade e qualidade do escoamento superficial. Utilizado principalmente em áreas urbanas, onde o transporte se dá por meio de sistemas compostos por tubulações, canais, dispositivos de armazenamento e tratamento, bombas e elementos de regulação (ROSSMAN, 2010)

O SWMM foi desenvolvido em 1971, pela *United States Environmental Protection Agency* (USEPA), agência estatal norte-americana incumbida de conceder e implementar ações que para balancear os impactos humanos na natureza. Desde a sua criação, o programa passou por diversas atualizações que buscam acompanhar a evolução dos sistemas e das questões referentes à área de estudo. A versão utilizada neste trabalho é a versão SWMM 5.0 que permite a geração de áreas de drenagem codificadas por meio de cores, mapas de sistemas de coletores de água, gráficos e tabelas de séries temporais, diagramas de perfil e análises estatísticas de frequência (ROSSMAN, 2010).

Para a obtenção de resultados são considerados diversos processos hidrológicos que produzem escoamentos procedentes de áreas urbanas, entre eles:

- Precipitações variáveis no tempo;
- Evaporação de águas empoçadas;
- Interceptação de precipitações por armazenamento em depressões;
- Infiltração das chuvas em camadas do solo não saturadas;
- Percolação da água infiltrada nas camadas dos aquíferos;
- Troca de fluxo entre os aquíferos e o sistema de drenagem;
- Modelagem do fluxo superficial por meio de reservatórios não lineares;
- Captação e retenção dos escoamentos em diversos dispositivos de baixo impacto.

Entre suas ferramentas tem-se a manipulação de redes de tamanhos ilimitados, modelagem de elementos espaciais para os condutos, tanto abertos como fechados além de modelagem de regimes de fluxos, entrada de carga e alagamentos, que é o foco do presente trabalho.

No software, a área a ser estudada é retratada na forma de um conjunto de sub-bacias, condutos e nós interconectados. Algumas das informações requeridas pelo modelo são

precipitação, coeficientes de Manning, declividade e largura relativa das sub-bacias, porcentagem de áreas permeáveis e impermeáveis, características de armazenamento em depressões e parâmetros de infiltração.

Os condutos são tubulações ou canais que transportam a água escoada das sub-bacias de um nó para outro, formando uma espécie de caminho para onde o fluxo deve seguir. No trabalho representam as sarjetas por onde a água não infiltrada deve ser transportada até chegar em uma boca de lobo.

Os nós representam fisicamente a confluência de canais superficiais naturais, poços de visita, bocas de lobo ou elementos de conexão de tubulação. O excesso de água em um nó pode conduzir a um escoamento parcialmente pressurizado, ou um alagamento no terreno acima do nó.

A infiltração é o fenômeno pelo qual a água precipitada penetra na zona não saturada do solo da área permeável. O modelo utilizado permite selecionar três modelos de infiltração (ROSSMAN, 2010):

- A equação de Horton: Baseado em observações empíricas, mostrando que a infiltração decresce de forma exponencial desde um valor inicial máximo até um certo valor mínimo ao longo do evento da chuva;
- Método Green-Ampt: Assume a existência de uma frente de umedecimento na coluna do solo, separando uma camada do solo com a umidade inicial de outra camada situada na parte superior onde o solo é saturado;
- Método SCS: Este método é uma aproximação a partir da Curva-Número (CN) do NRCS (*National Resources Conservation Service*) para estimar o escoamento superficial. Durante o evento da chuva, esta capacidade é selecionada em função da chuva acumulada e da capacidade de infiltração remanescente.

Devido à ausência de informações para a aplicação dos demais métodos, foi utilizado as equações de Horton, nas quais se necessita conhecer os parâmetros de capacidade de infiltração inicial (I_0), capacidade de infiltração final (I_f) e constante de decaimento (k).

3. METODOLOGIA

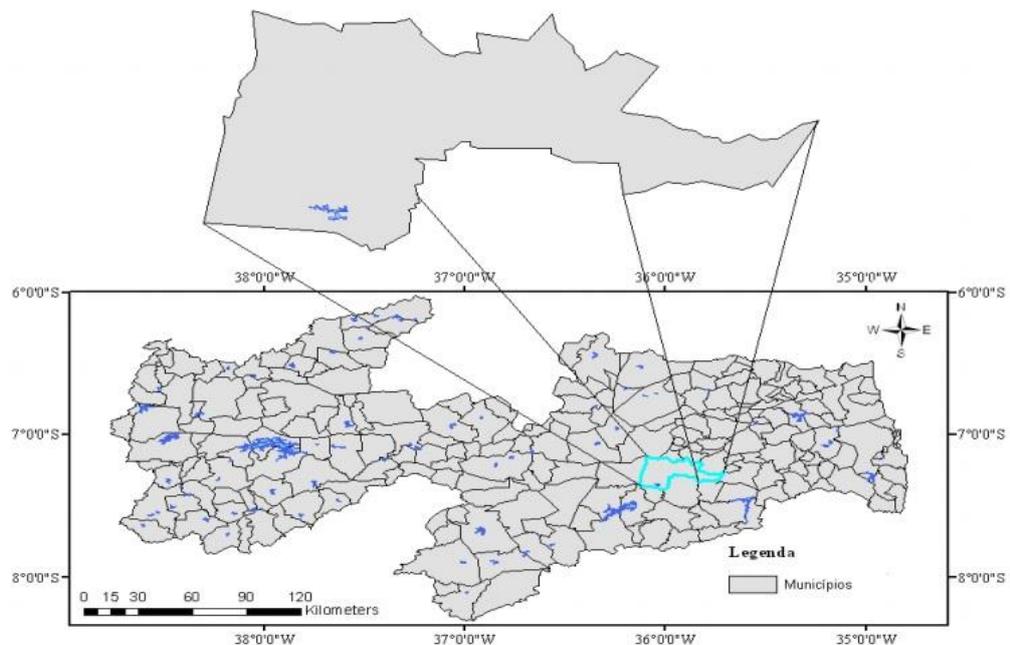
3.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1.1. *Município de Campina Grande*

Campina Grande é um importante pólo universitário e industrial, também conhecida por possuir um apelo turístico e bons índices de qualidade de vida. Localizado no interior do estado da Paraíba, na região do Nordeste brasileiro, com área territorial de 593,026 km² (Figura 2). Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), de acordo com o último censo demográfico realizado em 2010, o município apresentou uma população de 385.213 habitantes, e uma densidade demográfica de 648,31 hab./km². O instituto ainda estimou a população em 410.337 habitantes para o ano de 2017. Limita-se com os municípios de Pocinhos, Puxinanã, Lagoa Seca, Massaranduba, Caturité, Queimadas, Fagundes, Riachão de Bacamarte e Boa Vista.

O município é composto pela cidade de Campina Grande (sede) e pelos distritos de Catolé de Boa Vista, Catolé de Zé Ferreira, São José da Mata, Santa Terezinha e Galante, além da área rural que rodeia a cidade e distritos.

Figura 2 - Localização do município de Campina Grande - PB



FONTE: Macedo et al., 2011

Sua área está incluída na região semiárida brasileira, delimitada pelo Ministério da Integração Nacional em 2007. Essa delimitação foi feita tomando como base a precipitação

pluviométrica média anual (inferior a 800 mm), o índice de aridez de até 0,5 e o risco de seca como sendo maior que 60% (PEREIRA JÚNIOR, 2007).

O clima da cidade é tropical semiárido e altitude de 552 metros acima do nível do mar, possui área de 594 km² com vegetação tipicamente da caatinga, com umidade relativa do ar de 80%. A precipitação média anual da cidade é de 804,9 mm, com valores mensais concentrados entre março e junho, enquanto os meses de outubro e dezembro concentram os menores níveis de chuvas. (MACEDO *et al*, 2011)

Através de dados obtidos pelo IBGE (2010), o município apresenta 84,1% de domicílios com esgotamento sanitário adequado, quando comparado com os outros municípios do estado, se encontra na posição 4 de 223 municipalidades. Além disso, apresenta 82,5% de domicílios urbanos em vias públicas com arborização e apenas 19,4% de vias públicas com urbanização adequada (presença de bueiro, calçada, pavimentação e meio-fio).

3.1.2. *Delimitação da área estudada*

Historicamente, a cidade de Campina Grande releva importante papel no desenvolvimento socioeconômico do estado. A proximidade com três importantes capitais nordestinas (Natal, João Pessoa e Recife) e polos comerciais como Caruaru e Toritama, localizadas em Pernambuco, assegura à cidade uma localização estratégica. Dentro do próprio estado, situa-se no cruzamento das rodovias federais BR-230 e BR-104.

Durante os eventos chuvosos, são observados na cidade, variadas áreas com pontos críticos de alagamentos e empoçamentos. Para o realização do estudo foi escolhida uma área de grande relevância para a mobilidade urbana e que apresentasse transtornos quando submetida a precipitações intensas. Na Figura 3 são apresentados registros de alagamentos de algumas ruas contidas nessa área durante uma chuva intensa ocorrida nos anos de 2017 e 2018.

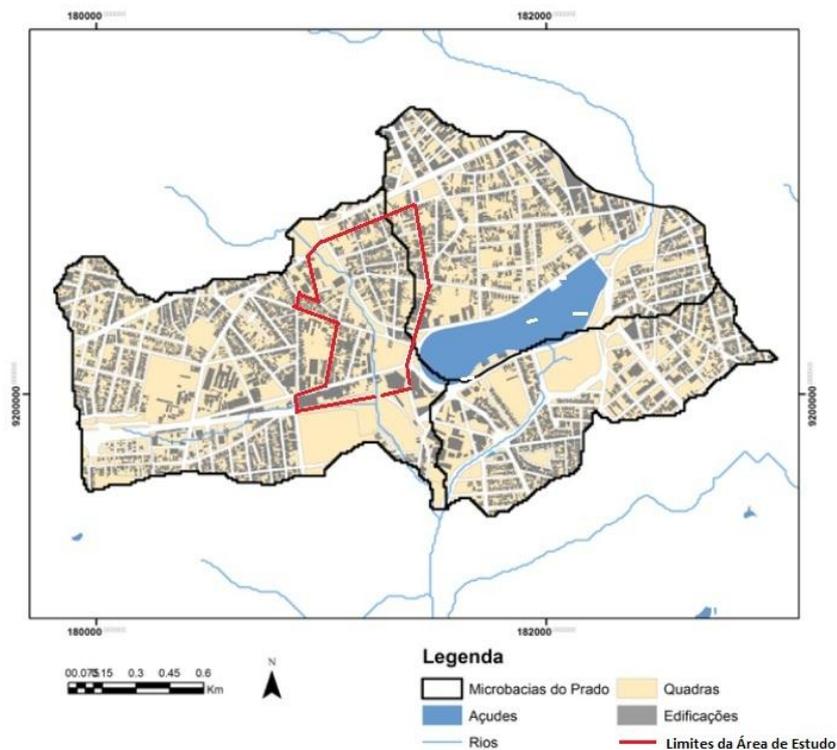
Figura 3 – Alagamentos registrados em ruas da região



Fonte: Jornal da Paraíba (*apud* BARROS, 2018)

A região encontra-se entre os bairros de São José e Centro e inserida na microbacia do Prado, conforme Figura 4. Sua área é de 327,13 km², divididos em 19 quarteirões com cotas topográficas variando de 542 m no ponto mais alto e 512,3 no ponto mais baixo, ou seja, uma diferença de aproximadamente 30 metros, o que favorece a drenagem por meio de sarjetas, visto que a força gravitacional obriga a água superficial a escoar em direção aos pontos mais baixos.

Figura 4 - Localização da área dentro das microbacias urbanas



FONTE: Adaptação de ALVES (2017)

No local está inserida uma grande distribuidora de produtos derivados do milho, além de restaurantes, supermercados, galerias comerciais e postos de gasolina, caracterizando uma importante área comercial do município. Também abriga o Parque do Povo, com uma área de cerca de 42.500 m². O local é palco d'O Maior São João do Mundo, principal evento turístico e econômico da cidade realizado durante o mês de junho. Nos meses restantes, o local oferece uma opção de lazer e esportes para a população, além de sediar eventos privados. Apesar de possuir um sistema de drenagem independente, o Parque do Povo apresenta pontos de alagamentos em dias de maior precipitação.

A área estudada é demarcada ao norte pelas ruas Treze de Maio, rua Lino Gomes da Silva e Av. Marechal Floriano Peixoto, ao sul pela Avenida Professor Almeida Barreto, a leste pela rua Irineu Joffily e a Praça Cel. Antônio Pessoa e, por fim, a oeste pelas ruas Major Belmiro, Dr. João Moura e Olegaria Azevedo (Figura 5).

Figura 5 - Área de estudo delimitada



FONTE: Google Earth, 2018.

3.2. LEVANTAMENTO DE CAMPO

No mês de setembro de 2018, foi realizado o levantamento de campo da área estudada, com a finalidade de determinar as características de uso do solo, localização e dimensão das bocas de lobo e levantamento de dimensões médias das sarjetas, assim como identificar possíveis obstáculos. Além das visitas *in loco*, foram utilizadas as ferramentas do *Google Earth* e *Google Street View* para a obtenção de dados e imagens de satélite.

Na Figura 6 são apresentados alguns elementos de drenagem da região, constatando problemas como falhas de manutenção, presença de resíduos sólidos, tampas danificadas, além da redução de bocas de lobo devido ao recalpeamento das ruas.

Figura 6 – Situação de elementos de drenagem na área de estudo



Fonte: O autor

3.3. REPRODUÇÃO DA ÁREA NO MODELO SWMM

Foi utilizado no trabalho o Mapa Base Urbano de Campina Grande-PB, de novembro de 2005, cedido pela Secretaria de Planejamento da Prefeitura Municipal de Campina Grande, na escala 1:10.000, de 2005, por meio eletrônico. Para visualização foi utilizado o software AutoCad em sua versão 2018.

A imagem de satélite que serviu como plano de fundo foi obtida através no aplicativo Google Earth Pro, versão 7, com imagens do satélite CNES/Airbus datadas de 08 de abril de 2017.

3.3.1. Sub-Bacias

As sub-bacias foram segmentadas conforme características de uso do solo e cobertura superficial para correta guarnição dos dados. Ao todo, a área foi subdividida em 262 sub-bacias. Para que a simulação ocorresse, as divisões foram qualificadas através dos parâmetros apresentados no Quadro 2.

Quadro 2 - Parâmetros necessários na definição da sub-bacia para simulação

PARÂMETROS	SIGLA	UNIDADE
Área da Sub-bacia	A	ha
Largura da Sub-bacia	W	%
Declividade da Sub-bacia	S	%
Áreas impermeáveis	AI	%
Coefficiente de Rugosidade de Manning - Superfícies Impermeáveis	NI	-
Coefficiente de Rugosidade de Manning - Superfícies Permeáveis	NP	-
Capacidade de Armazenamento em Depressões - Superfícies Impermeáveis	DI	mm
Capacidade de Armazenamento em Depressões - Superfícies Permeáveis	DP	mm
Áreas Impermeáveis Não Conectadas	AINC	%

As áreas e perímetros foram obtidos através do Mapa Base Urbano de Campina Grande.

A largura (W) foi determinada a partir da largura do retângulo equivalente (Le), conforme Equação 1 (Garcia, 2005):

$$Le = \frac{K_c \sqrt{A}}{1,12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,128}{K_c} \right)^2} \right] \quad (\text{Equação da Largura do Retângulo Equivalente})$$

Onde: Le = Largura do retângulo equivalente (m);

A = Área da bacia hidrográfica ou sub-bacia (m²);

K_c = Coeficiente de compacidade, definido como a relação entre perímetro e a circunferência de um círculo de área igual à da sub-bacia.

O K_c é determinado através da Equação 2:

$$K_c = 0,202 \cdot \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (\text{Equação do Coeficiente de Compacidade})$$

Onde: P = Perímetro da sub-bacia (m);

Os valores das larguras das sub-bacias foram determinados através da Equação 3:

$$W = \frac{A}{Le} \quad (\text{Equação de Largura das Sub-bacias})$$

Uma vez que o código de obras da cidade de Campina Grande não estipula uma declividade mínima para as áreas construídas, foi determinado uma declividade média (S) de 0,5%, baseado em legislações de cidades de características semelhantes.

Para as áreas impermeáveis (AI), foram estimados valores a partir do Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB) e imagens de satélites com a utilização do Google Earth. De acordo com o PMSB (2015), a área do centro tem uma média de 92,78% de sua área impermeabilizada. Portanto foi adotado este valor para as sub-bacias onde haviam habitação. As áreas onde foram constatadas terrenos baldios e vegetação descoberta foram consideradas 100% permeáveis.

Conforme a Tabela 2, foram determinados os coeficientes de Manning para as superfícies permeáveis (NP) e impermeáveis (NI).

Tabela 2 - Coeficiente de Rugosidade Manning

SUPERFÍCIE	n
Asfalto liso	0,011
Concreto liso	0,012
Revestimento de concreto comum	0,013
Madeira	0,014
Tijolo com argamassa de cimento	0,014
Argila vitrificada	0,015
Ferro fundido	0,015
Tubo metal corrugado	0,024
Superfície cimentada	0,024
Solos não cultiváveis	0,05
Solos cultiváveis	0,06 - 0,17

Solos com vegetação natural	0,04 - 0,80
-----------------------------	-------------

Fonte: McCuen, R. et al. (1996).

Após o levantamento de campo, foram constatadas características semelhantes nos lotes em relação a sua impermeabilização. A área a ser considerada impermeável em geral é constituída de superfície cimentada, enquanto a permeável pode ser considerada solos não cultiváveis.

3.3.2. Infiltração

Os parâmetros utilizados foram obtidos por Paixão et al. (2009) (Tabela 3), a partir de pesquisas na área experimental da Empresa Estadual de Pesquisas Agropecuárias da Paraíba (EMEPA), localizada no município de Lagoa Seca-PB. Entre os modelos estudados por Horton, o melhor que se ajustou a curva de infiltração real apresenta uma constante de decaimento de 2,677 l/h.

Tabela 3 – Valores aplicados na equação de Horton

CAPACIDADE DE INFILTRAÇÃO INICIAL (mm/h)	CAPACIDADE DE INFILTRAÇÃO FINAL (mm/h)	CONSTANTE DE DECAIMENTO (l/h)
396,10	7,10	6,677

Fonte: Paixão *et al* (2009)

3.3.3. Condutos

Rossman (2015) apresenta os parâmetros necessários a caracterização dos condutos no SWMM (Quadro 3).

Quadro 3 - Parâmetros necessários para caracterizar os condutos.

PARÂMETROS	SIGLA	UNIDADE
Comprimento do Conduto	L	m
Declividade	Sc	m/m
Coefficiente de Rugosidade de Manning	Ncn/Ng,s	-
Seção Transversal	-	-
Vazão de Base	Qb	m ³ /s
Offset de Saída	hoff	m

Devido à falta de projetos específicos, os parâmetros foram determinados através do levantamento de campo e do Mapa Base Urbano de Campina Grande-PB (SEPLAN, 2005).

3.3.4. Nós

Os parâmetros utilizados foram o coeficiente de Manning, coordenada geográfica de localização, capacidade de armazenamento e cota do radier.

3.4. ADEQUAÇÃO DO MODELO

A adequação do modelo é necessária para a determinação dos parâmetros de capacidade de armazenamento para superfícies permeáveis (DP) e impermeáveis (DI) e estimar as áreas impermeáveis não conectadas (AINC) no módulo Runoff do software. Na Tabela 4 são apresentados os valores sugeridos no Manual de Usuário do SWMM (ROSSMAN, 2015).

Tabela 4 – Intervalos de valores para a capacidade de armazenamento em depressões (Superfícies impermeáveis e permeáveis)

SIGLA	PARÂMETRO	MÍNIMO	MÁXIMO
DI	Capacidade de armazenamento em depressões- Superfícies impermeáveis (mm)	1,27	2,54
DP	Capacidade de armazenamento em depressões- Superfícies permeáveis (mm)	2,54	7,62

Os valores dos parâmetros adequados, DP, DI e AINC foram obtidos do trabalho de Nóbrega (2012) que, baseado em eventos reais de pequena duração e diferentes intensidades (médias e grandes), ajustou o modelo para a bacia estudada. Na Tabela 5 estão descritos os valores utilizados neste trabalho.

Tabela 5 - Valores determinados no processo de adequação

PARÂMETROS CALIBRADOS		
Capacidade de armazenamento em depressões- Superfícies impermeáveis- DP (mm)	Capacidade de armazenamento em depressões- Superfícies permeáveis - DI(mm)	Áreas impermeáveis não conectadas (AINC)
1,91 mm	5,08 mm	10%

Fonte: Nobrega (2012)

3.4.1. Dados hidrológicos utilizados

Para a calibração realizada por Nóbrega (2012) foram utilizados os dados horários de precipitação correspondentes ao período de fevereiro de 2009 a julho de 2011 obtidos no

INMET. Com o intuito de comprovar o ajuste do modelo e garantir a confiabilidade dos resultados foram feitas novas calibrações a partir de dois eventos mais recentes ocorridos em março de 2017 e fevereiro de 2018 e obtidos junto ao Centro Nacional de Monitoramento de Desastres Ambientais – CEMADEN, com pluviógrafos localizados nos bairros do Centenário e Alto Branco. Na Tabela 6 são apresentadas as precipitações horárias utilizadas por Nóbrega (2012) e as mais recentes utilizadas neste estudo e que validaram os dados anteriores.

Para a simulação dos cenários propostos (item 3.8), foi utilizada a equação geral de relação IDF (Equação 4):

$$i = \frac{K \cdot T^m}{(t+B)^n} \quad (\text{Equação Geral de relação IDF})$$

Onde: i = intensidade máxima (mm/h);

T = frequência em termos de tempo de recorrência (em anos);

t = duração da chuva (em minutos);

B , n , m e K – constantes do local.

Tabela 6 – Precipitação horária dos eventos selecionados em mm

PRECIPITAÇÃO HORÁRIA										
HORA	INMET								CEMADEN	
	20/02/09	11/04/09	01/03/11	02/03/11	03/05/11	04/05/11	05/05/11	17/07/11	30/03/17	09/02/18
00:00	0,0	0,0	0,0	6,8	0,0	1,0	2,2	1,4	0,0	0,0
01:00	0,0	0,0	0,0	7,6	0,0	0,0	0,2	1,8	0,0	0,0
02:00	4,4	0,0	0,0	6,6	0,0	0,2	2,0	2,0	0,0	0,0
03:00	0,0	0,0	0,0	6,0	0,2	0,0	0,6	2,2	0,0	0,4
04:00	0,0	0,0	0,0	5,4	0,2	0,4	0,0	2,6	0,0	0,0
05:00	0,0	0,0	0,0	5,2	0,0	0,0	0,4	2,6	0,0	0,0
06:00	0,0	0,0	0,0	4,4	0,2	0,0	0,8	3,2	0,0	0,0
07:00	0,0	0,0	0,0	3,0	0,6	0,2	0,6	3,6	0,0	0,0
08:00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	0,0	4,0	0,0	0,0
09:00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	4,4	0,0	0,0
10:00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	4,4	0,0	4,6	0,0	0,0
11:00	0,0	0,0	0,0	0,0	4,4	2,2	0,0	4,4	0,0	0,0
12:00	0,0	0,0	0,0	0,0	2,2	4,0	0,0	5,0	0,0	0,0
13:00	0,0	0,0	0,0	0,0	8,6	0,0	0,0	5,4	29,2	0,0
14:00	0,0	0,0	0,0	0,0	14,8	11,2	0,0	5,4	1,8	0,0
15:00	0,0	0,0	0,0	0,0	36,8	4,8	2,2	5,6	0,0	0,0
16:00	0,0	0,0	0,0	0,0	6,8	0,4	0,6	5,6	0,0	0,0

17:00	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,2	1,2	5,8	0,0	0,0
18:00	22,2	0,0	0,4	0,0	0,0	0,8	0,2	5,6	0,0	0,0
19:00	23,6	0,4	7,0	0,0	0,0	7,6	0,8	4,8	0,0	0,0
20:00	0,0	7,2	8,4	0,0	0,0	16,8	0,0	4,0	0,0	42,4
21:00	0,0	16,6	9,0	0,0	0,0	1,6	0,0	4,0	1,2	33,6
22:00	0,2	15,8	8,8	0,0	0,0	0,8	4,6	3,4	0,0	0,0
23:00	0,0	4,8	7,6	0,0	0,0	0,2	0,0	3,0	0,0	0,0

Aragão et al. (2000) propuseram valores para as constantes da Equação IDF para a cidade de Campina Grande a partir de 15 postos pluviométricos da Paraíba. Esses valores, descritos na Tabela 7, foram adotados neste estudo.

Tabela 7 – Constantes do local da equação geral da relação IDF para Campina Grande

CONSTANTES DO LOCAL PARA CAMPINA GRANDE			
B	n	m	K
5,0	0,596	0,227	334,0

3.5. PERÍODOS DE RETORNO E GERAÇÃO DA CURVA DE INTENSIDADE PLUVIOMÉTRICA

Para o dimensionamento de uma obra hidráulica deve-se adotar o Tempo de Retorno (TR) baseado nos riscos e nos investimentos envolvidos (DNIT, 2005). Segundo Canholi (2014), para obras de microdrenagem são normalmente utilizados períodos menores que 5 anos, porém deve ser levado em consideração o impacto social da área em caso de falha do sistema. Na Tabela 8 são apresentados os TR considerados nos projetos de acordo com as características de cada área.

Tabela 8 - Tempo de Retorno para sistemas de drenagem urbana

SISTEMA	CARACTERÍSTICA	INTERVALO (anos)	VALOR FREQUENTE (anos)
Microdrenagem	Residencial	02 a 05	2
	Comercial	02 a 05	5
	Áreas comerciais e avenidas	05 a 10	10
Macro-drenagem	-	10 a 25	10

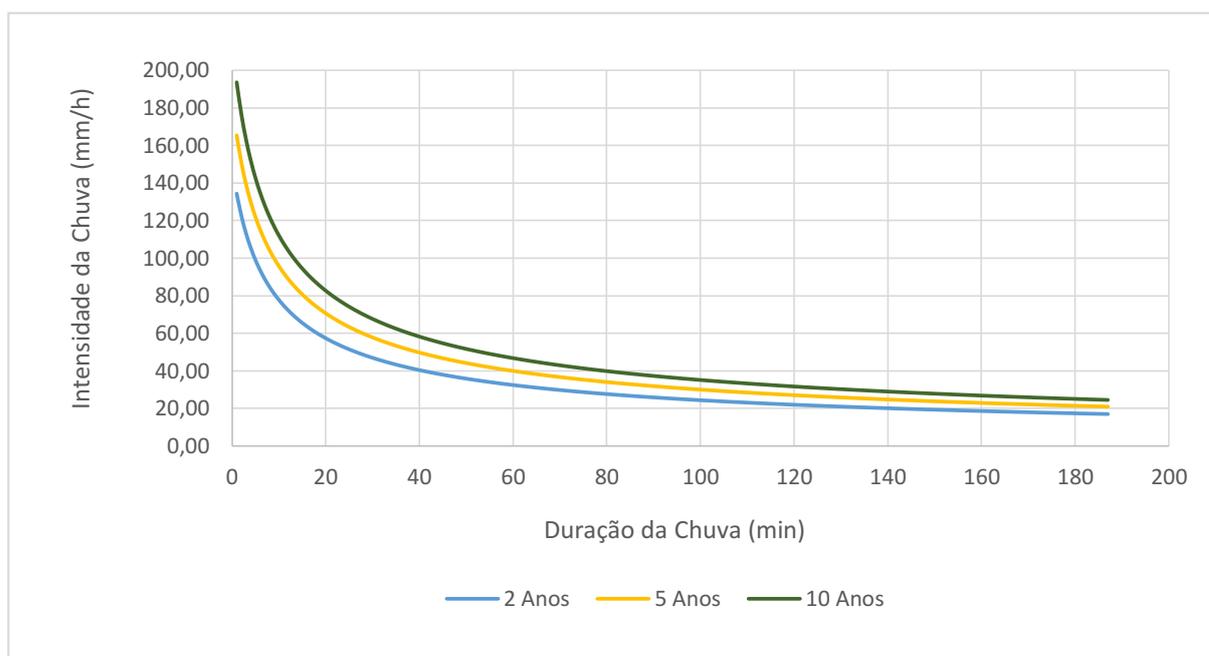
Fonte: Adaptado de Canholi, 2005

Como a área estudada apresenta características essencialmente residenciais e comerciais, foram adotados para a simulação eventos de precipitação para os períodos de tempo

de retorno de 2 e 5 anos. Porém em razão da área se encontrar na região central da cidade e abrigar importantes avenidas, também foi simulada uma precipitação de período de retorno de 10 anos com o intuito de avaliar a resposta do sistema de drenagem urbana para o caso de eventos de maiores intensidades.

Com o uso dos coeficientes B, n, m e K, obtidos por Aragão (1998) para a cidade de Campina Grande-PB e da equação geral da relação IDF, foi estimada a precipitação da área estudada. Para cada tempo, foram calculadas as intensidades para os eventos de duração de 0 a 180 minutos, resultando na curva de intensidade (Figura 7).

Figura 7 – Gráfico da Intensidade x Duração para os tempos de 2, 5 e 10 anos



Fonte: Adaptado de Nobrega (2012)

3.6. CENÁRIOS ESTUDADOS

Para a pesquisa foram estruturados três cenários de intervenção na área: i) Cenário Atual; ii) Cenário Legalizado; iii) Cenário Sustentável. Todos os cenários tinham como objetivo a avaliação da resposta da área quando submetida a diferentes intensidades pluviométricas e considerando diferentes intervalos de tempo após o término do evento chuvoso.

O Cenário atual representa a real situação em termos de impermeabilização e rede de drenagem, formada pelas sarjetas e bocas de lobo. Esse cenário foi simulado com vistas a

obtenção dos pontos críticos existentes na área e possibilitou o diagnóstico dos problemas existentes.

Para a simulação foi utilizada a média de impermeabilização de 92,78% na zona, entre áreas ocupadas por residências e ruas asfaltadas. Esse dado foi obtido com base no diagnóstico do Plano Municipal de Saneamento Básico de Campina Grande (PMSB-CG, 2015)

No Cenário Legal foi realizada a avaliação da resposta da área considerando que, em todos os lotes, a taxa de impermeabilização máxima estabelecida no Código de Obras Municipal é respeitada, ou seja, é um cenário que avalia o comportamento da área quando são respeitados aos aspectos estabelecidos pela legislação municipal vigente.

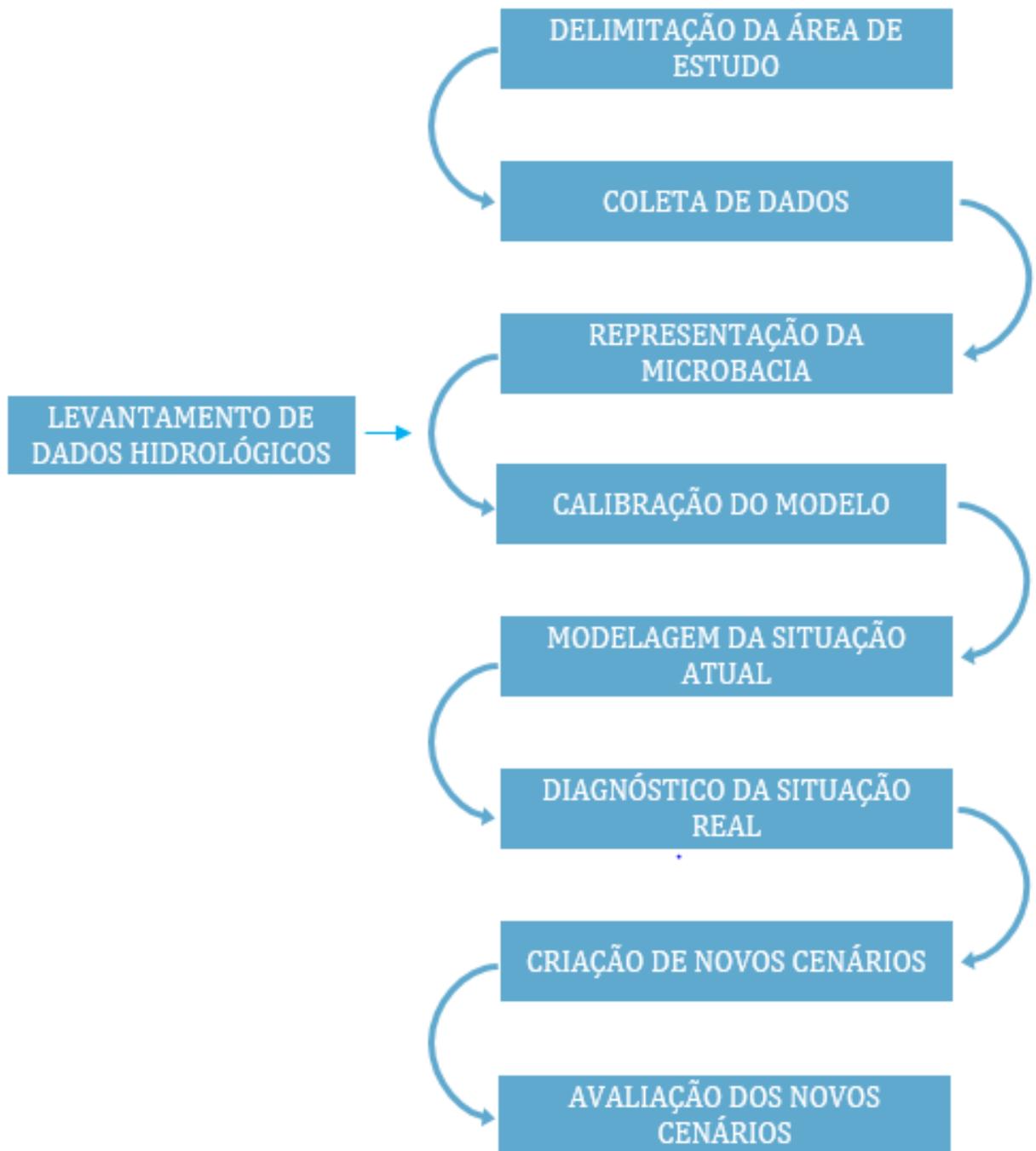
O Código de Obras das Cidade de Campina Grande-PB (Lei N° 5410/13) em seu Art. 248 prevê uma impermeabilização máxima de 80%, ou seja, um quinto do lote deverá ser descoberto e dotado de vegetação que contribua para a infiltração natural e equilíbrio climático. Assim sendo, no Cenário Legal foi utilizada uma impermeabilização de 80% das áreas dos lotes.

O terceiro cenário estudado (Cenário sustentável), caracteriza-se pelo aumento da área permeável através da substituição de superfícies cimentadas por pavimentos permeáveis (blocos intertravados).

Os lotes apresentam densa ocupação, portanto o uso dos pavimentos permeáveis pode colaborar para a redução da lâmina de escoamento superficial, aliviando o sistema público de drenagem. Portanto, objetivando avaliar a influência desses elementos na melhoria da drenagem pluvial, foi proposto, neste cenário, o aumento em 5% de área permeável do valor estabelecido legalmente a partir do uso de blocos intertravados. Sendo assim, utilizou-se na simulação um percentual de 75% de área impermeabilizada por lote.

A Figura 8 apresenta, de forma resumida, as etapas metodológicas aplicadas para o desenvolvimento do estudo.

Figura 8 – Resumo das etapas metodológicas



Fonte: O autor

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante as simulações foram gerados mapas de inundação a cada minuto antes, durante e após o evento fornecido. Para cada cenário foram adotadas precipitações correspondentes aos tempos de retorno de 2, 5 e 10 anos, 32,48 mm/h, 39,99 mm/h e 46,8 mm/h, respectivamente. Também foram escolhidos para análise os tempos 0 min e 60 min, imediatamente após o término do evento chuvoso.

Os resultados foram apresentados através de mapas de escoamento superficial indicados através de uma escala de cores. O vermelho refere-se à situação mais crítica, seguido das cores amarela, verde, azul clara e por último, azul escura que indica a menor lâmina superficial de água escoada. Assim, a representação gráfica permitiu uma visualização dos pontos mais críticos de alagamentos e o comportamento das sub-bacias em um intervalo de tempo após cessada a chuva. Os cenários propostos neste estudo e a comparação entre eles serão apresentados a seguir.

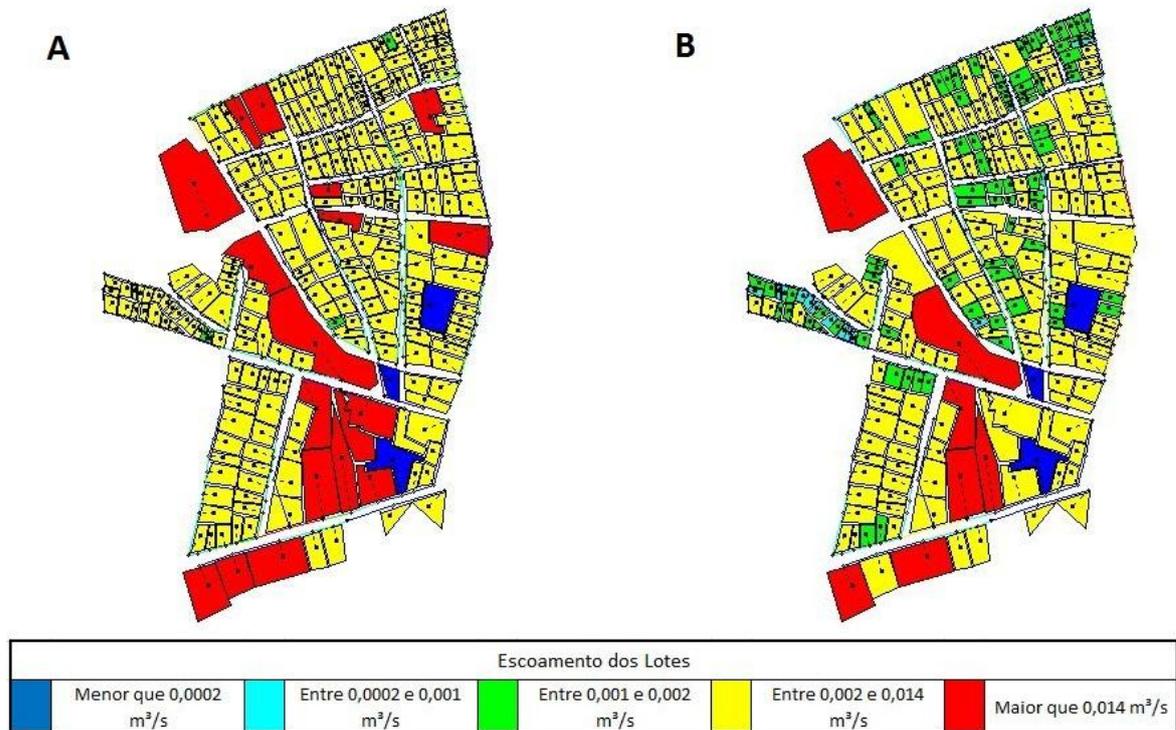
4.1. CENÁRIO ATUAL: DIAGNÓSTICO DA ÁREA

4.1.1 *Tempo de retorno de 2 anos*

Na Figura 9a é apresentado o mapa de escoamento superficial logo após o final do evento chuvoso com intensidade de 32,48 mm/h. De acordo com a figura, das 262 sub-bacias analisadas, 237 sub-bacias (90,4%) apresentaram escoamento superior a 2 L/s (em amarelo) e 19 (7,2%) apresentam escoamento maior que 14 L/s representado pelas áreas em vermelho e apenas 6 sub-bacias (2,3%) tiveram escoamento abaixo de 2 L/s (em verde, azul-claro e azul-escuro). Esse comportamento era esperado uma vez que a análise foi feita imediatamente após cessada a chuva.

A Figura 9b ilustra a situação da área estudada após passados 60 minutos do final do evento chuvoso. Constatou-se que 160 sub-bacias (61,8%) ainda se encontravam com escoamento superior a 0,2 L/s e 7 com escoamento acima de 14 L/s (2,7%). Essas sete áreas podem ser identificadas com as mais críticas e que necessitaram de intervenções mais urgentes por parte dos gestores.

Figura 9 - Mapeamento da área de estudo para precipitação de tempo de retorno de 2 anos no cenário real a) 0 minuto após o final do evento e b) 60 minutos após o final do evento.



Comparando os dois mapas (0 e 60 minutos) é possível observar que houve uma redução de apenas 63,1% das áreas ditas críticas após a primeira hora do evento o que, para um tempo de retorno tão pequeno, pode ser considerado preocupante.

Apesar de um período de retorno de apenas 2 anos, a área, de um modo geral, não se recupera, possivelmente, em decorrência do elevado percentual de impermeabilização (acima do máximo estabelecido pela legislação) e também devido a problemas associados ao sistema de drenagem existente, a exemplo de condutos obstruídos por lixo, bocas de lobo reduzidas pelo pavimento das vias, entre outros, que foram observados durante o levantamento de campo.

Os resultados obtidos corroboram com o estudo feito na mesma bacia de drenagem por Alves (2017) que afirma que os altos índices de impermeabilização e as baixas declividades registradas na bacia dificultam o escoamento da água e potencializam as áreas inundáveis.

Por outro lado, Braga (2015) afirma que a presença de lixo em ambientes urbanos propicia à ocorrência de alagamentos, pois os resíduos sólidos podem ser levados pela água para a rede de drenagem, entupindo as bocas-de-lobo e acarretando em outros alagamentos. A presença do lixo também ocasiona outros problemas à população e ao meio ambiente local,

como a proliferação de doenças pela água contaminada e o escoamento dessas águas pluviais para os córregos.

4.1.2 Tempo de retorno de 5 anos

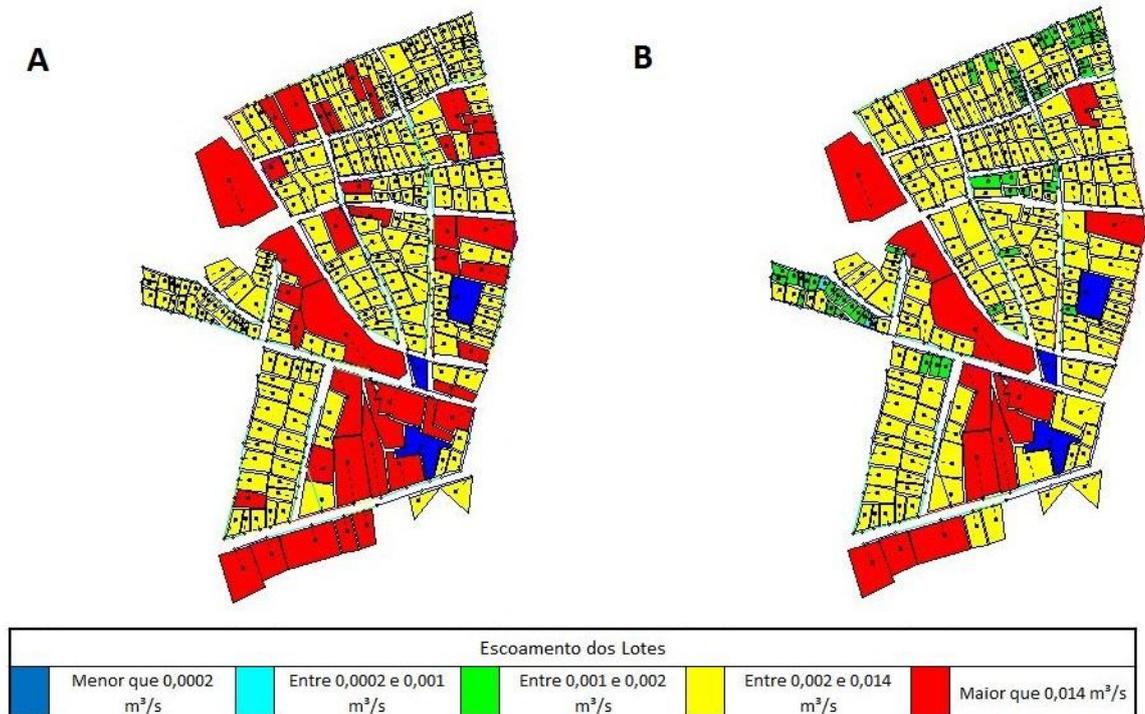
Nesta simulação utilizou-se um evento de precipitação com período de retorno de 5 anos. O objetivo foi avaliar o escoamento advindo de uma intensidade pluviométrica maior que a da primeira simulação levando-se em consideração que os sistemas de drenagem em ambientes comerciais e residenciais são normalmente projetados para atender um período de retorno de até 5anos.

A precipitação adotada foi de 39,99 mm, distribuídas em 60 minutos de chuva. Após a simulação, os resultados mostraram que 219 sub-bacias obtiveram escoamento superior a 2 L/s, 18 a menos que os valores obtidos para TR=2 anos. Entretanto, em 41 sub-bacias (22 a mais que para TR=2 anos) o escoamento superou a vazão de 14 L/s (Figura 10a) mostrando que várias áreas que estavam em amarelo em TR=2 anos (Figura 9a) passaram para a cor vermelha em TR=5 anos (Figura 10a). De fato, percebe-se que nesta simulação um número maior de áreas críticas (em vermelho) podem ser visualmente identificadas.

Ao final da primeira hora após o evento chuvoso (Figura 10b), foi observada uma redução de 219 para 195 sub-bacias com escoamento superior a 2 L/s, e redução de 41 para 14 sub-bacias com escoamento superior a 14 L/s. Apesar da diminuição de áreas em relação ao $t=0$ minutos, este dado indica que houve um aumento de 100% das áreas identificadas como críticas (7 para 14 sub-bacias) em relação a simulação utilizando o período de retorno de 2 ano.

Segundo Tonetti, et al. (2013) a formação de áreas críticas de alagamentos ambientes urbanos podem ocasionar congestionamentos, redução de mobilidade de vias e avenidas, perda de bens materiais, estragos em automóveis e, em caso mais severos, ferimentos e mortes.

Figura 10 - Mapeamento da área de estudo para precipitação de tempo de retorno de 5 anos no cenário real a) 0 minuto após o final do evento e b) 60 minutos após o final do evento



4.1.3 Tempo de retorno de 10 anos

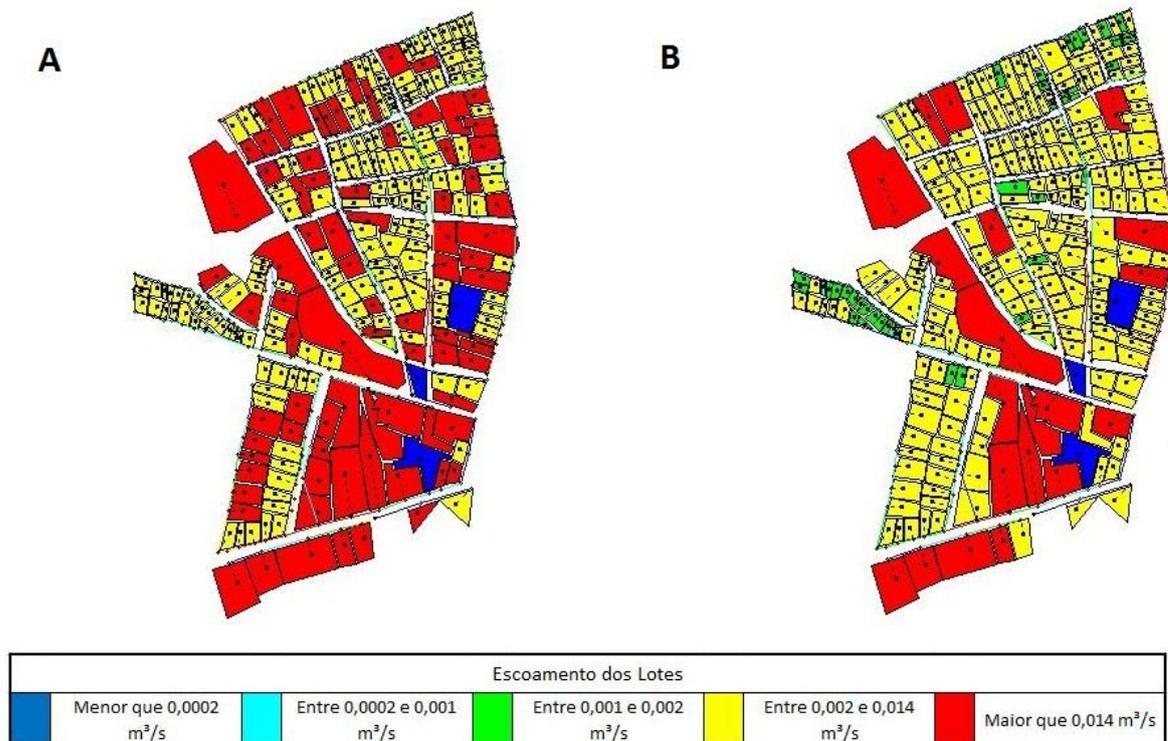
Às vezes, em Campina Grande, ocorrem eventos críticos como o registrado no mês de fevereiro de 2018 onde choveu, em cerca de 1 hora e meia, 76 mm segundo registros CEMADEM (2018). Assim, com essa simulação pretende-se avaliar as limitações associadas ao sistema de drenagem urbana estudado quando submetido a precipitações maiores. Para tanto, foi utilizada a precipitação de 46,8 mm, em um evento de 60 minutos (Figura 11).

A Figura 12a ilustra o comportamento da superfície dos lotes no exato momento em que a chuva termina. É notória a maior quantidade de sub-bacias em vermelho (escoamento superior a 14 L/s) em relação as Figuras 10a e 11a indicando mais formações de pontos críticos.

Analogamente aos itens anteriores, uma hora após o término da chuva foram observadas 20 sub-bacias com escoamento superior a 14 L/s (Figura 11b). Comparando esses resultados com os dos demais períodos de retorno, percebe-se que foram registradas 6 sub-bacias a mais que o resultado obtido para TR=5 anos (42,8% de incremento) e 13 a mais que o obtido para TR=2 anos, um aumento de (185,7%).

Os resultados confirmam que a medida que a intensidade pluviométrica cresce, o número de lotes em situação crítica vai aumentando e se recuperando mais lentamente na primeira hora o que poderá causar sobrecarga da rede de drenagem existente e, conseqüentemente, alagamentos das ruas.

Figura 11 - Mapeamento da área de estudo para precipitação de tempo de retorno de 10 anos no cenário real a) 0 minuto após o final do evento e b) 60 minutos após o final do evento



Nos cenários seguintes buscou-se avaliar o regime de escoamento por meio de intervenções na área estudada, assim, esses são cenários hipotéticos uma vez que não retratam a situação atual existente na área, entretanto, importantes, pois permitem a visualização dos impactos de algumas ações a serem realizadas.

4.2. CENÁRIO LEGALIZADO – RESPEITO AOS LIMITES DE PERMEABILIDADE ESTABELECIDOS NO CÓDIGO DE OBRAS DO MUNICÍPIO

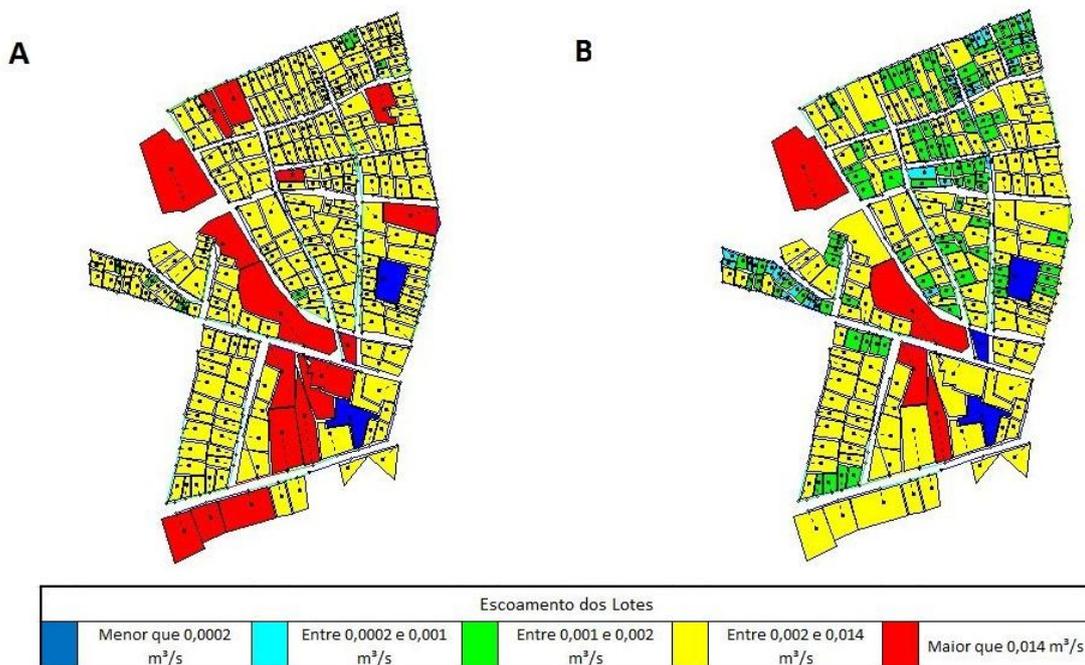
Afim de se evitar, entre outros problemas, a sobrecarga do sistema urbano de drenagem, a legislação surge como um meio de designar aos ocupantes, medidas adequadas de uso do solo. No caso estudado, o código de obras da cidade de Campina Grande, indica uma área mínima de 20% nos terrenos destinada a infiltração das águas superficiais. Portanto, este cenário teve

como principal objetivo verificar o comportamento do escoamento superficial na área de estudo, caso todos os proprietários dos lotes tivessem respeitados o percentual de impermeabilização estabelecido na legislação.

4.2.1. Tempo de retorno de 2 Anos

Na Figura 12 é apresentado o comportamento da área logo após o término da chuva e 60 minutos depois de finalizada. Pode-se observar uma visível redução das áreas críticas (76,5%), ou seja, como era previsível, o aumento das áreas permeáveis permite uma infiltração mais rápida da água em alguns pontos dos terrenos desafogando os locais onde a água não pode infiltrar e reduzindo a lâmina superficial escoada.

Figura 12 - Mapeamento da área de estudo para precipitação de tempo de retorno de 2 anos a) 0 minuto após o final do evento e b) 60 minutos após o final do evento



Fazendo uma comparação com o cenário real já no primeiro instante após cessada a chuva, o número de divisões com escoamento inferior a 2 L/s cresceu de 6 para 10 lotes (66,7%). Após passados 60 minutos do fim do evento, as áreas que apresentaram escoamento superior a 2 L/s (em amarelo) reduziram 13,7%, e aquelas com fluxo maior que 14 L/s (vermelhas), 42,8 %.

Analisando os mapas destas simulações constatou-se que, apesar da redução de taxa de impermeabilização, algumas áreas ainda permaneceram críticas. Curiosamente, tais área

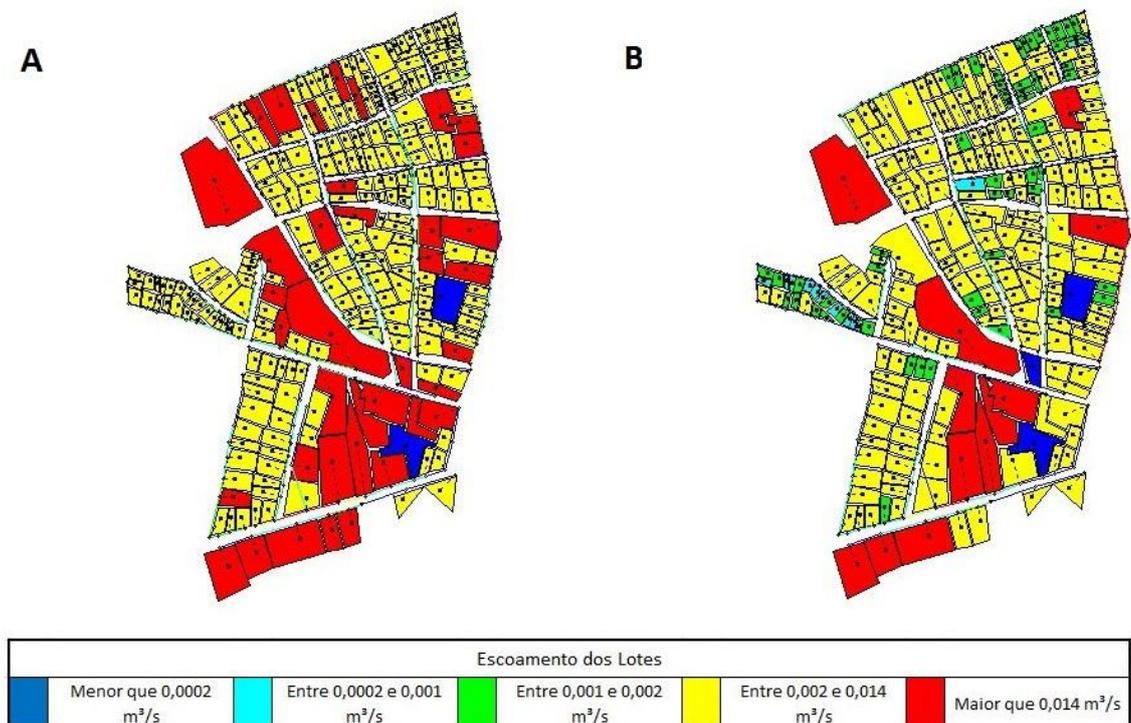
possuem características semelhantes: grandes dimensões e baixa taxa de ocupação. Assim, são importantes aspirantes a sofrerem intervenções de melhor uso do solo, sem que seja necessária uma modificação drástica no arranjo do local. Uma opção interessante a ser estudada para esses locais é o uso de pavimentos permeáveis convencionais ou cobogramas que possuem uma superfície de infiltração ainda maior e, a depender da finalidade a que estão destinadas as áreas, não há perda de espaço.

Batezzini (2009) afirma que o aumento de índice de vazios nos pavimentos ainda apresenta resistência suficiente para ser utilizado em áreas de fluxo de veículos leves e de pedestres.

4.2.2. Tempo de retorno de 5 Anos

Os resultados obtidos para uma chuva com período de retorno de 5 anos são mostrados na Figura 14. Avaliando as Figura 14a e 14b percebe-se que a maior avanço se deu principalmente nas áreas que apresentam escoamento menor que 1 L/s, representados nas cores azul-claro e azul-escuro e que passam de 2 lotes no momento inicial para 15 lotes após a primeira hora e as verdes que saltaram de zero para 54, no mesmo intervalo de tempo.

Figura 13 - Mapeamento da área de estudo para precipitação de tempo de retorno de 5 anos a) 0 minuto após o final do evento e b) 60 minutos após o final do evento



Comparando-se os mapas das Figuras 13b (TR = 2 anos; t = 60 min) e 14b (T = 5 anos; t = 60 min), observa-se principalmente a redução das áreas azul clara e verde em 53,8% e 40,6%, respectivamente, e o aumento das áreas em amarelo (2 L/s e 14 L/s) e vermelho (acima de 14 L/s) em 31,16% e 200% respectivamente.

O aumento da intensidade pluviométrica ainda é sentido mesmo com a presença de mais áreas permeáveis. Apesar de terem se passado 60 minutos após o final da chuva alguns lotes ainda apresentam escoamento crítico, mas em número mais reduzido do que considerando a situação atual. Este fato, reforça a necessidade do respeito às normas e leis vigentes a ainda alertam para a questão de que os regulamentos normativos estabelecem valores mínimos a serem seguidos e que podem ser extrapolados para obtenção de melhores resultados.

Nobrega (2012) realizou um estudo similar em uma região igualmente urbanizada da cidade de Campina Grande, e chegou a resultados semelhantes, sendo sugerido um novo dimensionamento da rede de drenagem da região.

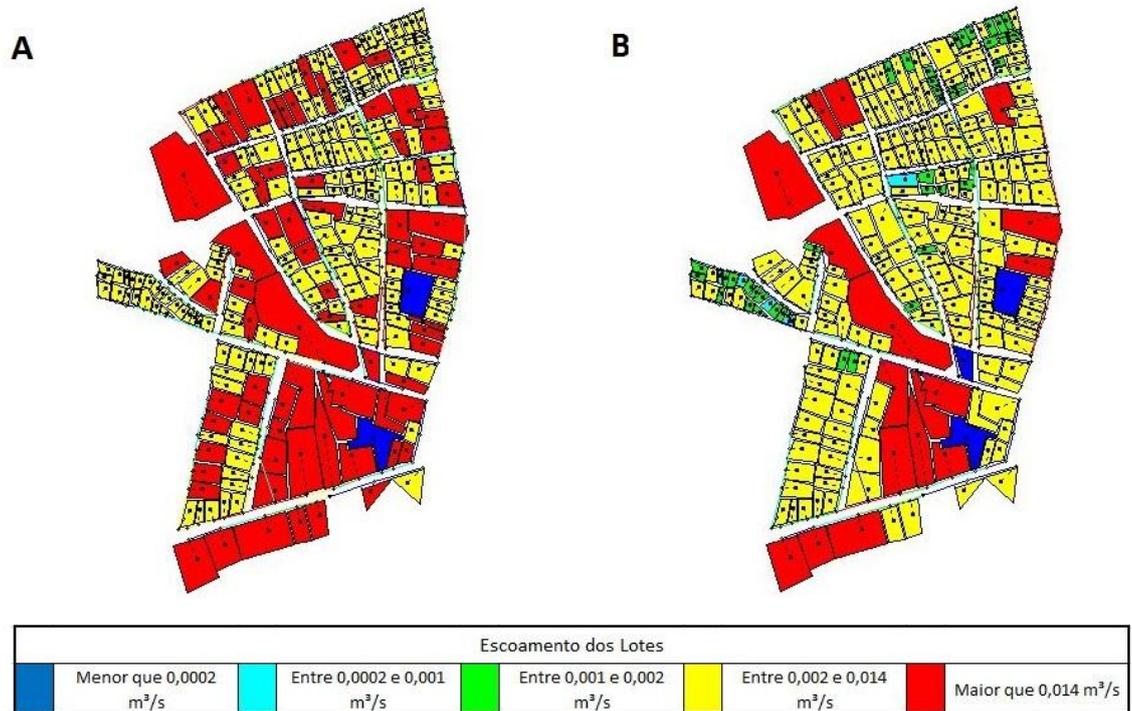
4.2.3. *Tempo de retorno de 10 Anos*

Simulando uma precipitação de 46,8 mm/h, obtive-se o resultado mostrado na Figura 14. Foi registrada uma redução de número lotes com escoamento superior a 14 L/s, representadas em vermelho de 71 para 15 (78,9%) na primeira hora, entretanto, ainda se observa um número grande de áreas críticas.

Por se tratar de uma zona no centro da cidade onde o fluxo diário de veículos é grande, principalmente nos horários de pico, considerar a possibilidade de alagamentos é arriscado uma vez que poderá implicar em um trânsito mais lento, engarrafamentos, erosão do solo e prejuízos financeiros ocasionados por danos a veículos. A problemática ainda pode ser mais agravada se for considerada a falta de manutenção da rede de drenagem e a presença de lixo no sistema que dificulta a vazão nas bocas de lobo.

Tonetti, et al. (2013) afirmam que os alagamentos aparecem na cena urbana como um dos principais problemas que afetam questões ambientais, sociais e econômicas. Os autores sugerem como medidas mitigadoras dos alagamentos, ao aumento das áreas permeáveis e com cobertura vegetal, a utilização de pavimentos que possibilitem a infiltração da água no solo, e a promoção da retenção da água no lote por meio de cisternas, telhado verde, entre outras.

Figura 14 - Mapeamento da área de estudo para precipitação de tempo de retorno de 10 anos
a) 0 minuto após o final do evento e b) 60 minutos após o final do evento



4.3. CENÁRIO SUSTENTÁVEL – ACRÉSCIMO DE 5% DE ÁREA PERMEÁVEL DEVIDO AO USO DE PAVIMENTO PERMEÁVEL

Como já mencionado anteriormente, no Código de Obras de Campina Grande-PB (2013), o uso de superfícies permeáveis representa 20% da área do terreno. Assim, o acréscimo de 5% de permeabilidade na superfície, sugerido neste cenário, deve ser feito através do uso de blocos intertravados gerando um total de 25% área de permeável.

A proposta de redução feita nesta pesquisa foi discreta mas a intensão era propor uma alternativa que fosse exequível na prática. Como a resposta obtida foi igualmente discreta e com difícil visualização, em mapas, das diferenças ocorridas, principalmente em relação ao cenário 2, optou-se por apresentar os resultados em forma de tabela, para uma melhor percepção das possibilidades e do potencial dessa alternativa.

A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos nas simulações de precipitação para tempos de retorno de 2, 5 e 10 anos, e tempos de recuperação de 0, 30 e 60 minutos na área estudada. Foram atribuídas cores às colunas da tabela para permitir uma melhor associação dos resultados descritos com os visualizados nos mapas de escoamento superficial. Assim, foram realizadas as comparações entre os três cenários e feitas as discussões pertinentes.

Tabela 9 – Respostas das simulações dos Cenários 1, 2 e 3 para os tempos de retorno de 2, 5 e 10 anos.

CENÁRIO ATUAL						
Tempo de Retorno	Tempo de Recuperação	Nº de Áreas				
		Esc. abaixo de 0,2 L/s	Esc. entre 0,2 e 1 L/s	Esc. entre 1 e 2 L/s	Esc. entre 2 e 14 L/s	Esc. acima de 14 L/s
T = 2 anos	0 min	3	0	3	237	19
	30 min	3	1	43	202	13
	60 min	3	12	80	160	7
T = 5 anos	0 min	3	0	0	218	41
	30 min	3	0	16	223	20
	60 min	3	4	46	195	14
T = 10 anos	0 min	3	0	0	178	81
	30 min	3	0	4	221	34
	60 min	3	2	35	202	20
CENÁRIO LEGALIZADO						
Tempo de Retorno	Tempo de Recuperação	Nº de Áreas				
		Esc. abaixo de 0,2 L/s	Esc. entre 0,2 e 1 L/s	Esc. entre 1 e 2 L/s	Esc. entre 2 e 14 L/s	Esc. acima de 14 L/s
T = 2 anos	0 min	2	0	8	235	17
	30 min	2	3	51	194	12
	60 min	3	26	91	138	4
T = 5 anos	0 min	2	0	0	222	38
	30 min	2	1	25	217	17
	60 min	3	12	54	181	12
T = 10 anos	0 min	2	0	0	189	71
	30 min	2	1	10	224	25
	60 min	3	6	40	198	15
CENÁRIO SUSTENTÁVEL						
Tempo de Retorno	Tempo de Recuperação	Nº de Áreas				
		Esc. abaixo de 0,2 L/s	Esc. entre 0,2 e 1 L/s	Esc. entre 1 e 2 L/s	Esc. entre 2 e 14 L/s	Esc. acima de 14 L/s
T = 2 anos	0 min	2	0	10	233	17
	30 min	2	3	54	192	11
	60 min	3	27	101	127	4
T = 5 anos	0 min	2	0	1	224	35
	30 min	2	1	27	215	17
	60 min	3	13	60	175	11
T = 10 anos	0 min	2	0	0	189	71
	30 min	2	1	12	222	25
	60 min	3	9	44	191	15

A partir da tabela é possível observar de forma mais detalhada a dinâmica de escoamento e como o sistema sofre alterações quando simulados eventos de precipitações diferentes sobre a área. Para as ações de gestão, as áreas em vermelho são as que necessitam de atenção prioritária uma vez que, considerando a existência de diversas outras áreas críticas na cidade, não seria possível resolver todos os problemas em um curto espaço de tempo.

Comparando o cenário sustentável com o cenário legalizado poucas modificações podem ser observadas em relação as áreas críticas vermelhas (acima de 14 L/s) e também as áreas amarelas (2 L/s e 14 L/s). As melhores respostas parecem ter sido alcançadas na faixa de vazão variando entre 0,001 m³/s e 0,002 m³/s (verde) e para menores períodos de retorno (TR=2 anos), ou seja, menores intensidades pluviométricas. A partir desse resultado é possível constatar que para escoamentos menores o sistema responde de forma mais eficiente mesmo com um pequeno acréscimo de permeabilidade.

Com relação ao cenário atual, quando comparados os dados, pode-se constatar que a resposta foi positiva principalmente em relação a redução de áreas críticas (vermelhas e amarelas) entretanto, muito semelhante aos resultados obtidos entre o cenário legalizado e atual já discutidos anteriormente.

Portanto, pode-se concluir que em relação ao sistema de drenagem como um todo, o acréscimo de 5% nas áreas permeáveis trouxe poucos benefícios. Todavia, a nível local, ou seja, quando avaliados lote a lote, os resultados obtidos podem propiciar maiores benefícios.

Em relação a modelagem matemática de sistemas de drenagem urbana, o SWMM mostrou-se como uma importante ferramenta pois tem a capacidade de identificar as áreas mais susceptíveis a alagamentos e inundações e permite, de modo mais eficiente, a tomada de decisão do gestor direcionando-o para as questões mais urgentes.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados obtidos e considerando o objetivo principal da pesquisa que foi avaliar os impactos do aumento da taxa de permeabilidade em uma rede de drenagem urbana a partir da modelagem computacional de uma região altamente urbanizada da cidade de Campina Grande-PB, algumas conclusões foram alcançadas.

A partir da caracterização feita a partir das visitas *in loco* e das imagens aéreas pode-se constatar que o sistema de drenagem da área estudada encontra-se deficiente e apresenta problemas como presença de lixo, tampas danificadas e redução de bocas de lobo devido ao recapeamento das ruas. Essa situação agrava os problemas de alagamentos observados na área em períodos de chuva e alerta para a necessidade de uma gestão mais eficiente da drenagem urbana da área incluindo campanhas educativas e de conscientização para a população.

A modelagem matemática utilizando o SWMM apresentou resultados coerentes com a realidade local, sendo uma ferramenta satisfatória para este estudo de caso.

Com a modelagem matemática foi possível diagnosticar as áreas mais críticas e que merecem atenção mais urgente por parte dos órgãos gestores. Também se constatou que a medida que a intensidade pluviométrica cresce, o número de lotes em situação crítica aumenta potencializando o risco de alagamentos no setor e a sobrecarga da rede de drenagem existente. O alagamento das ruas é uma situação completamente indesejável principalmente devido à alta densidade de trânsito no local.

Quando simulado o comportamento da área a partir do cumprimento da taxa de permeabilidade estabelecida pelo código de obras municipal, houve uma redução expressiva no número de lotes com escoamento crítico, apesar de ainda serem observados lotes alagados após a primeira hora de recuperação. Pode-se concluir com esse cenário que se todos os proprietários dos lotes respeitassem as exigências contidas na legislação, havia uma redução dos problemas de drenagem vivenciados atualmente na área. Assim, alerta-se para a necessidade de respeito a legislação vigente e de uma maior fiscalização em relação ao cumprimento dos legais.

Em relação a proposta de intervenção adicionando 5% à taxa mínima de permeabilidade através do uso de pavimentos permeáveis constatou-se uma melhoria no sistema de drenagem em comparação com a situação atual. Entretanto, quando comparado com os resultados obtidos em relação ao cumprimento da taxa de permeabilidade estabelecida pelo município, verificou-se que o impacto no sistema de drenagem foi pequeno e, provavelmente, os benefícios

observados seriam mais locais. Assim, para melhores resultados, sugere-se a expansão do percentual de áreas permeáveis com o uso desse tipo de pavimento, principalmente em locais abertos e de prédios, calçadas e estacionamentos.

Em todos os cenários estudados, as áreas consideradas mais críticas foram estacionamentos privados e o local de eventos ‘Parque do Povo’, todos compartilham de uma característica comum: a grande extensão superficial e pequena taxa de ocupação, o que torna viável a substituição do revestimento existente, por outro que permita mais infiltração.

Nos demais locais, o principal empecilho para o aumento de áreas que permitam a infiltração natural é a alta taxa de ocupação. Portanto, deve-se buscar soluções sustentáveis que coexistam com as características da zona estudada. Neste contexto, o uso de telhados verdes e armazenamento de água da chuva para reaproveitamento são soluções possíveis.

Logo, propõe-se para estudos futuros a investigação de outros instrumentos que aumentem a interceptação da água da chuva, evitando a dependência da rede de drenagem urbana.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACIOLI, LAURA ALBUQUERQUE. *Estudo experimental de Pavimentos Permeáveis para o Controle do Escoamento Superficial na Fonte*. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005.

ALVES, P. B. R. *Simulações De Medidas Compensatórias Sustentáveis De Drenagem: Propostas Em Duas Microbacias Urbanas*. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos da Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2017.

ARAGÃO, R.; FIGUEIREDO, E.E.; SRINIVASAN, V.S.; GÓIS, R.S.S. Chuvas Intensas no Estado da Paraíba. In: Anais do V Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, volume 2, p 74-85, 2000.

ARAÚJO, P. R., TUCCI, C. E. M., GOLDEFUM J. A. *Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução do escoamento superficial*. Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRG. Porto Alegre, 2000.

BATEZINI, R., “*Estudo preliminar de concretos permeáveis como revestimento de pavimentos para áreas de veículos leves*”, dissertação (mestrado em engenharia de transportes) – EPUSP, São Paulo, 2013, pp. 133.

BARROS, A.H.C.; ARAÚJO FILHO, J.C. DE; SILVA, A.B. DA; SANTIAGO. G.A.C.F. 2012. *Climatologia do Estado de Alagoas*. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento n.211. Recife: Embrapa Solos, 32p.

BRASIL. Lei 12.651/2012. *Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa*. Brasília, DF. BRASIL. CONSTITUIÇÃO DA REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL DE 1988. Brasília, DF

BRAGA, Júlia Oliveira. *Alagamentos e inundações em áreas urbanas: estudo de caso na cidade de Santa Maria – DF*. Distrito Federal, Brasília. Agosto de 2016. 33p. UNB/IH/GEA, Bacharelado, 2016.

BRAGA, T.M.; OLIVEIRA, E. L.; GIVISIEZ G. H. N.. *Avaliação de metodologias de mensuração de risco e vulnerabilidade social a desastres naturais associados à mudanças climáticas*. Anais do XV Encontro Nacional de Estudos Populacionais, ABEP, realizado em Caxambu, MG, Brasil, de 18 a 22 de setembro de 2006.

CABRAL, J.J.S.P.; MASCARENHAS, F.B.; CASTRO, M.A.S; MIGUEZ, M.G.; PEPLAU, G.R.; BEZERRA A.A. “*Modelos Computacionais para Drenagem Urbana*”. Programa de Pesquisa em Saneamento Básico, Natal-RN. 2009

CAMPANA, N.; TUCCI, C.E.M. "Estimativa de área impermeável de macrobacias urbanas", Caderno de Recursos Hídricos V12 n°2 p19-94. 1994.

CAMPOS, C. *A promoção e a produção das redes de águas e esgotos na cidade de São Paulo, 1875-1892*. Programa de pós-graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.

CANHOLI, A. P. (2005). *Drenagem Urbana e Controle de Enchentes*. 2. Ed. – São Paulo: Oficina de Textos, 2014.

CEMADEN – Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais. Disponível em: <<http://www.cemaden.gov.br/mapainterativo/>>

CHEBBO G, Gromaire MC, Ahyerre M, Garnaud S. *Production and transport of urban wet-weather pollution in combined sewer systems: the “marais” experimental urban catchment in Paris*. Urban Water 2001;3:3 – 15

DATASUS – Departamento de Informática do SUS. Disponível em <<http://datasus.saude.gov.br/informacoes-de-saude/tabnet/indicadores-de-saude>>. Acesso em 05 ago. 2018.

DIAS, F.S.; ANTUNES, T. S. C. Estudo Comparativo de Projeto de Drenagem Convencional e Sustentável para Controle de Escoamento Superficial em Ambientes Urbanos. Rio de Janeiro: UFRJ, 2010. (Monografia de Graduação).

FELDE, J. T.; REINELLI, C. W. B. S.; FILHO, P. C. O., Impermeabilização do espaço urbano de porto união, santa catarina: estudo de caso com fotografias aéreas digitais de altíssima resolução, Ciencia e Natura,v37, n.1, 2015, jan-abr. p. 104-114. Revista do Centro de Ciências Naturais e Exatas – UFSM, 2015.

FERGUSON, B. K. *Porous Pavements – Integrative Studies In Water Management and Land Materials*. *Journal of Materials in Civil Engineering*, V. 7, No. 3, p. 183-191, 1995.

FGV. *Plano Nacional de Recursos Hídricos*. Fundação Getúlio Vargas, Secretaria de Recursos Hídricos, MMA. 1998.

GOOGLE. Google Earth. Version Pro. Ano 2018. Disponível em: <<https://www.google.com.br/intl/pt-BR/earth/>>. Acesso em: 10 set. 2018.

Góis, E. R. C., 2007, "*Simulação Numérica do Escoamento em Tomo de Um Cilindro Utilizando o Método das Fronteiras Imersas*", Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação e Matemática Computacional) - Universidade de São Paulo, São Carlos.

HERZOG, C. P., (2013) *Cidades para todos: (re) aprendendo a conviver com a Natureza*. Rio de Janeiro: Mauad X: Inverde.

IBGE. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/painel/>>. Acesso em 05/08/2018.

LEOPOLD, L.B. *Hydrology for urban planning - A guide book on the hydrologic effects on urban land use*. USGS circ. 554, 18p. 1968.

MACEDO, M. J. H.; GUEDES, R. V. S.; SOUSA, F. A. S. *Monitoramento e Intensidade das Secas e Chuvas na Cidade de Campina Grande/PB*. Revista Brasileira de Climatologia, 2011.

NEVES, M. G. F. P., & TUCCI, C. E. M. *Resíduos sólidos e drenagem urbana: Estudo de caso [Solid wastes and urban drainage: A case study]*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 13, 43–54. 2008.

NÓBREGA, P. V. M. "*Análise do Sistema De Drenagem de Campina Grande/Pb para Proteção De Áreas de Risco de Inundação*". Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, 2012.

PINTO, L. L. C. A. *O Desempenho de Pavimentos Permeáveis como Medida Mitigadora da Impermeabilização do Solo Urbano*. 256p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

PMCG - PREFEITURA MUNICIPAL DE CAMPINA GRANDE. Lei 3968/01 de 28 de Novembro de 2001. *Promove a revisão do Plano Diretor do Município de Campina Grande*.

_____. *Relatório Técnico do Plano Municipal de Campina Grande*. 2015.

_____. Lei Complementar nº 042 de 29 de setembro de 2012. *Institui o código de defesa do meio ambiente do município de campina grande e dá outras providências*. 2007.

_____. Lei Nº 5410/13 de 23 de dezembro de 2013.

ROSSMAN, L.A. *Storm Water Management Model User's Manual Storm Water Management Model User's Manual Version 5.0*. United States Environ. Prot. Agency. Rossman, L., 2015.

RIGHETTO, A. M. *Manejo de águas pluviais urbanas*. Rio de Janeiro: ABES, 2009. 396 p.: il. (Projeto PORSAB).

SICEPOT -MG. *Apresentação: Pavimentos permeáveis*. Workshop Pavimentos Drenantes com Revestimento Asfáltico. 2011.

COLLODEL, M. G. *Aplicação do modelo hidrológico SWMM na avaliação de diferentes níveis de detalhamento da bacia hidrográfica submetida ao processo de transformação chuva-vazão*. Dissertação de mestrado – USP, São Carlos, 2009.

TONETTI, E. L.; NUCCI, J. C.; SOUZA, F. X. S.; VALASKI, S. *Alagamentos Frequentes na área urbana de Paranaguá-PR*. Universidade Federal de Londrina. 2013.

TUCCI, C.E.M. "*Coefficiente de escoamento e vazão máxima de bacias urbanas*". RBRH V5 nº1 p. 61-68. 2000.

TUCCI, C. E. M., ESPAÑOL, I., CORCEIRO NETO, O. M., *Gestão da Água no Brasil*. UNESCO, Brasil, 2001.

TUCCI, C.E.M. "*Parâmetros do Hidrograma Unitário para bacias urbanas brasileiras*". Artigo submetido à RBRH. 2002.

URBANAS, B.; Stahre, P. *Stormwater best management practices and detetion*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey. 450p. 1993.