

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS

ELIANE ZAPAROLI QUILES

**INFLUÊNCIA DA IMPLANTAÇÃO DE BACIA DE DETENÇÃO E
DA OCUPAÇÃO NO AMORTECIMENTO DE HIDROGRAMAS E
DO TRANSPORTE DE MATERIAL SOLÚVEL UTILIZANDO
MODELO REDUZIDO**

Poços de Caldas/MG

2019

ELIANE ZAPAROLI QUILES

**INFLUÊNCIA DA IMPLANTAÇÃO DE BACIA DE DETENÇÃO E
DA OCUPAÇÃO NO AMORTECIMENTO DE HIDROGRAMAS E
DO TRANSPORTE DE MATERIAL SOLÚVEL UTILIZANDO
MODELO REDUZIDO**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia Ambiental pelo Instituto de Ciência e Tecnologia da Universidade Federal de Alfenas. Linha de pesquisa: Recursos Hídricos e Meio Ambiente. Orientador: Prof. Dr. Alexandre Silveira.

Poços de Caldas/MG

2019

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas
Biblioteca campus Poços de Caldas

Q6i Quiles, Eliane Zaparoli.
Influência da implantação de bacia de retenção e da ocupação no amortecimento de hidrogramas e do transporte de material solúvel utilizando modelo reduzido / Eliane Zaparoli Quiles. -- Poços de Caldas/MG, 2019.
89 f. –

Orientador(a): Alexandre Silveira.
Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) –
Universidade Federal de Alfenas, campus Poços de Caldas, 2019.
Bibliografia.

1. Recursos hídricos. 2. Escoamento de água de chuva. 3. Bacias hidrográficas. 4. Poluentes. 5. Hidrogramas. 6. Transporte de sedimento. I. Silveira, Alexandre. II. Título.

CDD – 628.1

ELIANE ZAPAROLI QUILES

**INFLUÊNCIA DA IMPLANTAÇÃO DE BACIA DE DETENÇÃO E DA
OCUPAÇÃO NO AMORTECIMENTO DE HIDROGRAMAS E DO
TRANSPORTE DE MATERIAL SOLÚVEL UTILIZANDO MODELO
REDUZIDO**

A banca examinadora abaixo-assinada, aprova a Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Ciência e Engenharia Ambiental, pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Alfenas.

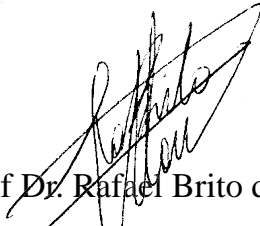
Área de Concentração: Ciência e Engenharia Ambiental.

Aprovada em: 18 de fevereiro de 2019.



Prof Dr. Alexandre Silveira

Instituição: Universidade Federal de Alfenas



Prof Dr. Rafael Brito de Moura
Instituição: Universidade Federal de Alfnas



Prof Dr. Jorge Manuel Guieiro Pereira Isidoro
Instituição: Universidade do Algarve

**Dedico este trabalho à minha
família, com todo meu carinho.**

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Genésio e Maria Helena por todo o amor, apoio e auxílio desde sempre. Devo a vocês minha vida e a realização deste trabalho.

Aos meus irmãos Flávio e Adriana que me ajudaram sempre de forma direta ou indireta. Amo muito vocês.

Ao meu orientador Alexandre Silveira por toda a paciência, disponibilidade, empenho e ensinamentos. Muito obrigada por sempre me corrigir sem nunca me desmotivar.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão da bolsa de estudos para a realização desta pesquisa.

Ao meu amor, Lucas Bastos, pelo apoio incondicional e todo o carinho que foram essenciais para que eu conseguisse chegar até aqui.

Aos professores Rafael Brito, Flávio Gonçalves, Jorge Isidoro e Rafael Tiezzi por esclarecerem minhas dúvidas e contribuírem para minha formação.

Aos servidores Marcel, Guilherme e Mansueto por me auxiliarem na montagem do aparato experimental e na execução dos experimentos.

A todos os meus amigos da UNIFAL e UNLV pela ajuda, motivação, suporte e amizade.

Enfim, a todos que de forma direta ou indireta auxiliaram na concretização deste trabalho. Muito obrigada.

“Nature, to be commanded, must be obeyed.”

(BACON, 1620)

RESUMO

A gestão dos recursos hídricos nas áreas urbanas é uma questão que vem ganhando importância nas últimas décadas, devido à crescente urbanização mundial. Diversos são os impactos ambientais, sociais e econômicos causados pelo planejamento, gestão e manutenção inadequadas e ineficientes das obras de drenagem de águas pluviais. Além de interferir no aspecto quantitativo dos recursos hídricos, a urbanização também interfere no seu aspecto qualitativo, pois, aumenta a variedade e a quantidade de poluentes e nutrientes que atingem os corpos hídricos que drenam as áreas urbanas. O objetivo deste trabalho é analisar a influência de uma bacia de retenção e da densidade de ocupação na redução da vazão de pico e do transporte de material solúvel sobre uma superfície impermeável, utilizando um modelo físico reduzido. Os testes consistem na aplicação de chuva simulada em uma superfície impermeável de 100m², alterando as variáveis independentes do estudo, que são: a massa de material solúvel aplicada à superfície, representada pelo cloreto de sódio; a posição do material em relação ao ponto exutório; a densidade de ocupação, representada por blocos de poliestireno expandido; e duração da chuva simulada. Um delineamento experimental composto central rotacional foi utilizado para otimizar os experimentos. Foram obtidos hidrogramas, polutogramas, equações e superfícies de resposta que mostraram que a bacia de retenção foi capaz de reduzir a vazão de pico, o transporte de material e retardar o tempo de pico da descarga mássica de material. Oito variáveis dependentes foram estudadas e relacionadas estatisticamente com as variáveis independentes, sendo elas: a vazão de pico, o volume de água escoado, a descarga mássica de pico, o tempo de pico do polutograma, o tempo inicial do polutograma, o tempo final do polutograma, a massa transportada e a porcentagem transportada. Pode-se concluir que a bacia de retenção foi capaz de amortecer o pico de vazão em aproximadamente 44%. Além disso, a bacia de retenção reduziu a descarga mássica de pico em uma média de 63%. Para cada variável dependente analisada, uma ou várias variáveis independentes demonstraram relação estatisticamente significativa, algumas com melhores ajustes do que outras. Foi possível concluir que o delineamento usado se mostrou adequado para este trabalho, sendo possível a obtenção de modelos estatísticos relevantes para o estudo.

Palavras-chave: Simulador de chuva de larga escala. Bacia de retenção. Transporte de poluentes. Modelagem física. DCCR.

ABSTRACT

The management of water resources in urban areas is an issue that has been growing in relevance in the last decades due to the rising urbanization of the world. There are several environmental, social and economic impacts caused by an inadequate planning, management and maintenance of rainwater drainage systems. In addition to interfering in the quantitative aspect of water resources, urbanization also interferes with the qualitative aspect of water resources, as it increases the variety and quantity of pollutants and nutrients that reach the water bodies that drain urban areas. The objective of this project is to analyse the influence of a detention basin and occupancy density on the reduction of peak flow and the transport of soluble material on an impermeable surface, using a reduced physical model and an experimental design. The tests were performed spreading simulated rainfall on an impermeable surface of 100m², altering the independent variables of the study, which are: the mass of soluble material applied to the surface, represented by sodium chloride, kept in an oven; the position of the material relative to the exudate; the occupancy density, represented by blocks of expanded polystyrene; and duration of simulated rainfall. A rotational central composite experimental design was used to optimize the experiments. Hydrographs, pollutographs, equations and response surfaces were obtained which showed that the holding basin was able to reduce peak flow, transport material and delay the peak time of the mass discharge of material. Eight dependent variables were studied and statistically related to the independent variables, it are: peak flow, volume of water drained, peak mass discharge, peak time of the polutogram, the initial time of the polutogram, the final time of the pollutogram, mass transported and percentage transported. It can be concluded that the detention basin was able to damp the flow peak by approximately 44%. In addition, the detention basin reduced the peak mass discharge by an average of 63%. For each dependent variable analyzed, one or several independent variables demonstrated a statistically significant relationship, some with better adjustments than others. It was possible to conclude that the design used was adequate for this work, and it was possible to obtain relevant statistical models for the study.

Key words: Large-scale rainfall simulator. Detention basin. Transport of pollutants. Physical modeling. DCCR.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Representação dos componentes do ciclo hidrológico.....	22
Figura 2 -	Ilustração do conceito de bacia hidrográfica.....	25
Figura 3 -	Hidrograma de saída e o hietograma de entrada de uma bacia.....	26
Figura 4 -	Processos resultantes da urbanização.....	29
Figura 5 -	Vista superior do aparato experimental.....	38
Figura 6 -	Vista em perspectiva do aparato experimental.....	39
Figura 7 -	Foto dos bicos aspersores com sistema corta-gotas.....	40
Figura 8 -	Dimensões do vertedor.....	41
Figura 9 -	Sistema de sucção da água da calha para a bacia de detenção.....	42
Figura 10 -	Hidrograma de entrada relacionando tempo e vazão resultante de uma chuva simulada de 2 minutos sobre a área.....	43
Figura 11 -	Disposição do material solúvel sobre a superfície (P_1 , P_2 , P_3 , P_4 ou P_5).....	46
Figura 12 -	Curva de calibração da condutividade em relação à concentração de sal.....	47
Figura 13 -	Disposição dos blocos sobre a superfície e suas respectivas porcentagens de ocupação.....	48
Figura 14 -	Hidrogramas referentes aos ensaios realizados sem bacia de detenção.....	50
Figura 15 -	Hidrogramas referentes aos ensaios realizados com bacia de detenção.....	51
Figura 16 -	Polutogramas referentes aos ensaios realizados sem bacia de detenção.....	52
Figura 17 -	Polutogramas referentes aos ensaios realizados com bacia de detenção.....	52
Figura 18 -	Superfície de resposta da variável Y_1 em relação à variável X_4 para o cenário com bacia de detenção.....	56
Figura 19 -	Superfícies de resposta da variável Y_2 em relação ao parâmetro X_4 , sendo a) cenário sem bacia e b) cenário com bacia.....	58
Figura 20 -	Superfície de resposta da variável Y_3 em relação às variáveis: a) X_1 e X_2 , b) X_2 e X_3 , ambas para o cenário sem bacia de detenção.....	60
Figura 21 -	Superfície de resposta da variável Y_3 em relação às variáveis X_1 e X_3 para o cenário sem bacia de detenção.....	61
Figura 22 -	Superfície de resposta da variável Y_3 em relação às variáveis: a) X_1 e X_2 , b) X_1 e X_3 , c) X_2 e X_3 , todas para o cenário com bacia de detenção.....	62
Figura 23 -	Superfície de resposta da variável Y_4 em relação às variáveis X_1 e X_2 para o cenário sem bacia de detenção.....	65
Figura 24 -	Superfície de resposta da variável Y_5 em relação à variável X_1 para o cenário sem bacia de detenção.....	66

Figura 25 - Superfície de resposta da variável Y_5 em relação às variáveis: a) X_1 e X_2 , b) X_1 e X_4 , c) X_2 e X_4 , todas para o cenário com bacia de detenção.....	68
Figura 26 - Superfície de resposta da variável Y_6 em relação às variáveis X_3 e X_4 para o cenário sem bacia de detenção.....	70
Figura 27 - Superfície de resposta da variável Y_6 em relação à variável X_3 para o cenário com bacia de detenção.....	71
Figura 28 - Superfície de resposta da variável Y_7 em relação às variáveis: a) X_2 e X_3 , b) X_2 e X_4 , c) X_3 e X_4 , todas para o cenário sem bacia de detenção.....	73
Figura 29 - Superfície de resposta da variável Y_7 em relação à variável X_3 para o cenário com bacia de detenção.....	74
Figura 30 - Superfície de resposta da variável Y_8 em relação às variáveis: a) X_2 e X_3 , b) X_2 e X_4 , c) X_3 e X_4 , todas para o cenário sem bacia de detenção.....	76
Figura 31 - Superfície de resposta da variável Y_8 em relação à variável X_3 para o cenário com bacia de detenção.....	77
Figura 32 - Gráficos dos valores experimentais <i>versus</i> valores preditos para as variáveis: a) Vazão de pico ($R^2= 18,00\%$), b) Volume escoado ($R^2= 97,51\%$).....	78
Figura 33 - Gráficos dos valores experimentais <i>versus</i> valores preditos para as variáveis: a) Descarga mássica de pico ($R^2= 72,46\%$), b) Tempo de pico do polutograma ($R^2= 74,97\%$).....	78
Figura 34 - Gráficos dos valores experimentais <i>versus</i> valores preditos para as variáveis: a) Tempo inicial do polutograma ($R^2= 63,71\%$), b) Tempo final do polutograma ($R^2= 76,08\%$).....	79
Figura 35 - Gráficos dos valores experimentais <i>versus</i> valores preditos para as variáveis: a) Massa transportada ($R^2= 97,43\%$), b) Porcentagem transportada ($R^2= 68,94\%$).....	79
Figura 36 - Gráficos dos valores experimentais <i>versus</i> valores preditos para as variáveis: a) Vazão de pico ($R^2= 26,98\%$), b) Volume escoado ($R^2= 98,34\%$).....	80
Figura 37 - Gráficos dos valores experimentais <i>versus</i> valores preditos para as variáveis: a) Descarga mássica de pico ($R^2= 89,86\%$), b) Tempo de pico do polutograma ($R^2= 10,38\%$).....	80
Figura 38 - Gráficos dos valores experimentais <i>versus</i> valores preditos para as variáveis: a) Tempo inicial do polutograma ($R^2= 72,91\%$), b) Tempo final do polutograma ($R^2= 54,63\%$).....	81
Figura 39 - Gráficos dos valores experimentais <i>versus</i> valores preditos para as variáveis: a) Massa transportada ($R^2= 89,63\%$), b) Porcentagem transportada ($R^2= 20,63\%$).....	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Causas e efeitos da urbanização nas inundações.....	28
Tabela 2 -	Variáveis independentes estudadas e seus níveis codificados.....	44
Tabela 3 -	Ensaio propostos no DCCR.....	45
Tabela 4 -	Valores extraídos dos experimentos realizados sem bacia de detenção.....	53
Tabela 5 -	Valores extraídos dos experimentos realizados com bacia de detenção.....	54
Tabela 6 -	Coeficientes de regressão para a resposta Y_1 , para ambos os cenários.....	55
Tabela 7 -	Coeficientes de regressão para a resposta Y_2 , para ambos os cenários.....	57
Tabela 8 -	Coeficientes de regressão para a resposta Y_3 , para ambos os cenários.....	59
Tabela 9 -	Coeficientes de regressão para a resposta Y_4 , para ambos os cenários.....	63
Tabela 10 -	Coeficientes de regressão para a resposta Y_5 , para ambos os cenários.....	66
Tabela 11 -	Coeficientes de regressão para a resposta Y_6 , para ambos os cenários.....	69
Tabela 12 -	Coeficientes de regressão para a resposta Y_7 , para ambos os cenários.....	71
Tabela 13 -	Coeficientes de regressão para a resposta Y_8 , para ambos os cenários.....	75
Tabela 14 -	Coeficientes de amortecimento da bacia de detenção.....	83

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ONU** – Organização das Nações Unidas
- MMA** – Ministério do Meio Ambiente
- PTS** – Partículas Totais em Suspensão
- LID** – *Low Impact Development*
- SUDS** – *Sustainable Urban Drainage System*
- BMP** – *Best Management Practices*
- WSUD** – *Water Sensitive Urban Design*
- SWMM** – *Storm Water Management Model*
- SC** – Simulador de Chuva
- MSR** – Metodologia de Superfície de Resposta
- DCCR** – Delineamento Composto Central Rotacional
- R²** – Coeficiente de Determinação
- X₁** – Posição do Material
- X₂** – Número de Blocos
- X₃** – Massa do Material
- X₄** – Duração da Chuva
- Y₁** – Vazão de Pico
- Y₂** – Volume Escoado
- Y₃** – Descarga Mássica de Pico
- Y₄** – Tempo de Pico do Polutograma
- Y₅** – Tempo Inicial do Polutograma
- Y₆** – Tempo Final do Polutograma
- Y₇** – Massa Transportada
- Y₈** – Porcentagem Transportada
- RQp** - Coeficiente de amortecimento da vazão de pico
- RV** - Coeficiente de amortecimento do volume escoado
- RDMp** - Coeficiente de amortecimento da descarga mássica de pico

RTp - Coeficiente de retardamento do tempo de pico do polutograma

RTi - Coeficiente de amortecimento do tempo inicial do polutograma

RTf - Coeficiente de retardamento do tempo final do polutograma

RMt - Coeficiente de amortecimento da massa transportada

RPt - Coeficiente de amortecimento da porcentagem transportada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	OBJETIVOS	20
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1	CICLO HIDROLÓGICO	21
3.2	ESCOAMENTO SUPERFICIAL	23
3.3	BACIA HIDROGRÁFICA	24
3.4	HIDROGRAMA E POLUTOGRAMA	25
3.5	TRANSPORTE DE POLUENTES E SEDIMENTOS	26
3.6	HIDROLOGIA URBANA	27
3.7	TÉCNICAS ALTERNATIVAS DE DRENAGEM URBANA	30
3.7.1	Bacias de detenção	32
3.8	MODELOS FÍSICOS	34
3.8.1	Simuladores de chuva	34
3.9	DELINEAMENTO EXPERIMENTAL	36
4	METODOLOGIA	38
4.1	APARATO EXPERIMENTAL	38
4.2	DIMENSIONAMENTO DA BACIA DE DETENÇÃO	42
4.3	DELINEAMENTO EXPERIMENTAL	43
4.4	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	45
4.5	CALIBRAÇÃO	48
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	50
5.1	HIDROGRAMAS E POLUTOGRAMAS	50
5.2	DELINEAMENTO EXPERIMENTAL	54
5.2.1	Vazão de pico (Y_1)	55
5.2.2	Volume de água escoado (Y_2)	57
5.2.3	Descarga mássica de pico (Y_3)	58
5.2.4	Tempo de pico do polutograma (Y_4)	63
5.2.5	Tempo inicial do polutograma (Y_5)	65
5.2.6	Tempo final do polutograma (Y_6)	68

5.2.7	Massa transportada (Y_7)	70
5.2.8	Porcentagem transportada (Y_8)	73
5.2.9	Adequação ao modelo	76
5.3	COEFICIENTE DE AMORTECIMENTO DA BACIA DE DETENÇÃO	81
6	CONCLUSÕES	84
	REFERÊNCIAS	86

1 INTRODUÇÃO

O gerenciamento dos recursos hídricos urbanos é uma questão que está amplamente ligada ao desenvolvimento das cidades, já que são imensuráveis os impactos ambientais, econômicos e sociais causados por uma má gestão desses recursos naturais. Na década de 2010, mais da metade da população mundial (54%) vive em áreas urbanas e estima-se que em 2050 a população urbana mundial atinja o valor de 66% (ONU, 2015).

Esta urbanização acelerada representa um grande desafio para o dimensionamento, a manutenção e a eficiência das obras de infraestrutura urbana, especialmente as obras de drenagem de águas pluviais. O crescimento das cidades, sem o devido planejamento, resulta em alterações no ciclo hidrológico dentro do ambiente urbano, como o aumento do escoamento superficial, o aumento do consumo de água e a diminuição do volume de água infiltrado no solo (VASCONCELOS et al., 2016).

Com a diminuição da taxa de infiltração de água no solo, parte do volume precipitado precisa ser alocado em outros espaços, o que ocasiona as enchentes e inundações, principalmente nos fundos de vale. No decorrer da história, os responsáveis pelas obras de infraestrutura urbana tentaram contornar este problema canalizando o escoamento superficial, para que ele atingisse, de maneira mais rápida, uma área fora da região urbanizada. Esta medida apenas transferiu para a jusante o problema originado pela redução dos espaços permeáveis, inundando áreas que anteriormente não sofriam tal distúrbio (CANHOLI, 2014).

Além disso, a urbanização não interfere apenas no aspecto quantitativo dos recursos hídricos, mas também resulta em problemas na qualidade da água, pois, aumenta a variedade e a quantidade de poluentes e nutrientes que atingem os corpos de água receptores (ZHOU, 2014). Estudos anteriores demonstraram que o escoamento superficial urbano foi identificado como uma das principais causas da presença de sólidos suspensos, metais pesados, compostos químicos orgânicos e indicadores de bactérias fecais nos rios urbanos (QINQIN et al., 2015).

A crescente urbanização faz com que mais veículos sejam utilizados e novos loteamentos sejam construídos, aumentando as fontes poluentes que normalmente são encontradas nas áreas urbanas. Entender o processo de transporte e acúmulo de materiais poluentes é essencial para a tomada de melhores decisões de gestão do ambiente urbano, para que seja possível a minimização dos impactos ambientais. Outra questão importante é a densidade de ocupação do solo, já que uma área mais impermeável e que contenha prédios e mais ruas pavimentadas, pode aumentar a geração de poluentes, alterar a qualidade e quantidade do escoamento superficial e modificar a dinâmica do transporte de poluentes (LIMA, 2017).

Reis (2015) mostrou, através de um modelo físico reduzido, que a densidade de ocupação e a altura de edifícios interferem no tempo de concentração da água dentro da bacia hidrográfica. No estudo, o tempo de concentração da bacia apresentou um aumento de 55% para um cenário com alta densidade de ocupação. Esta interferência demonstra que a densidade de ocupação pode apresentar também efeitos benéficos para o controle de cheias, dependendo do ponto de vista analisado.

Algumas técnicas alternativas de drenagem urbana vêm surgindo, desde 1970, para amenizar problemas que muitas vezes não são sanados pelos sistemas tradicionais de drenagem. Uma técnica comumente utilizada no mundo é a implantação de bacias de retenção, que tem como função principal o amortecimento de cheias. As bacias de retenção detêm um volume de água por um certo tempo e o libera, gradativamente, de volta ao corpo de água receptor. Essa estrutura faz com que o volume precipitado em chuvas intensas permaneça por mais tempo dentro da bacia hidrográfica (BAPTISTA et al., 2004).

Para avaliar como o escoamento superficial se comporta dentro de áreas urbanizadas se faz necessário um monitoramento hidrológico para identificação dos impactos quantitativos e qualitativos causados pela ação antrópica. O monitoramento hidrológico em bacias urbanas apresenta algumas dificuldades, como, por exemplo, a não uniformidade da chuva em relação à superfície de estudo; a variação espacial e temporal da precipitação; problemas relacionados à coleta de dados em campo durante os eventos de chuva; procedimentos trabalhosos de

concepção e operação de redes de monitoramento; e diferenças na umidade prévia do solo (NASCIMENTO; HELLER, 2005).

Devido às limitações presentes no monitoramento hidrológico em escala real, pode-se optar pela utilização de modelos físicos. Modelos físicos em escala reduzida possibilitam, pela troca de componentes, comparações entre diferentes situações, podendo ser utilizados em diferentes áreas, como engenharia estrutural (MELO, 2013), hidráulica (REIS, 2015), hidrologia (SILVEIRA et al., 2016; FELICE, 2017), entre outras. Um modelo físico muito utilizado para estudos de escoamento superficial é o simulador de chuva. Este equipamento é uma alternativa que facilita os estudos do comportamento da precipitação e do escoamento superficial na hidrologia urbana, já que os simuladores de chuva permitem um controle das características da chuva, como sua duração, intensidade e distribuição temporal e espacial.

Deste modo, este trabalho propõe a análise do processo envolvendo precipitação e escoamento em uma superfície impermeável, avaliando o transporte de material solúvel e as interferências de uma bacia de retenção e da densidade de ocupação nestes processos, sob a aplicação de chuva simulada em um modelo físico reduzido.

2 OBJETIVOS

O projeto tem como objetivo geral estudar a influência de uma bacia de detenção e da densidade de ocupação na redução da vazão de pico e no transporte de material solúvel em uma superfície impermeável, utilizando chuva simulada.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos são:

- Averiguar a influência da bacia de detenção na redução da vazão de pico;
- Investigar a diminuição do transporte de material solúvel devido à implantação da bacia de detenção;
- Avaliar se a densidade de ocupação interfere no transporte de material solúvel e no amortecimento de hidrogramas;
- Verificar se o uso do delineamento experimental, o Delineamento Composto Central Rotacional, se adéqua ao tipo de experimento realizado.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 CICLO HIDROLÓGICO

A Hidrologia é a ciência que aborda a ocorrência, circulação, distribuição e propriedades físicas e químicas da água na Terra. Além disso, a hidrologia estuda a relação da água com o meio ambiente, incluindo a sua relação com os seres vivos. Essa área do conhecimento é consideravelmente ampla e pode ser dividida nas seguintes subáreas: hidrometeorologia, potamologia, hidrogeologia, glaciologia e limnologia. Todos os processos físicos, químicos e biológicos envolvendo a água nos seus vários caminhos na atmosfera, sobre e sob a superfície da Terra e através das plantas, são de interesse para aqueles que estudam o ciclo hidrológico (TUCCI, 2001).

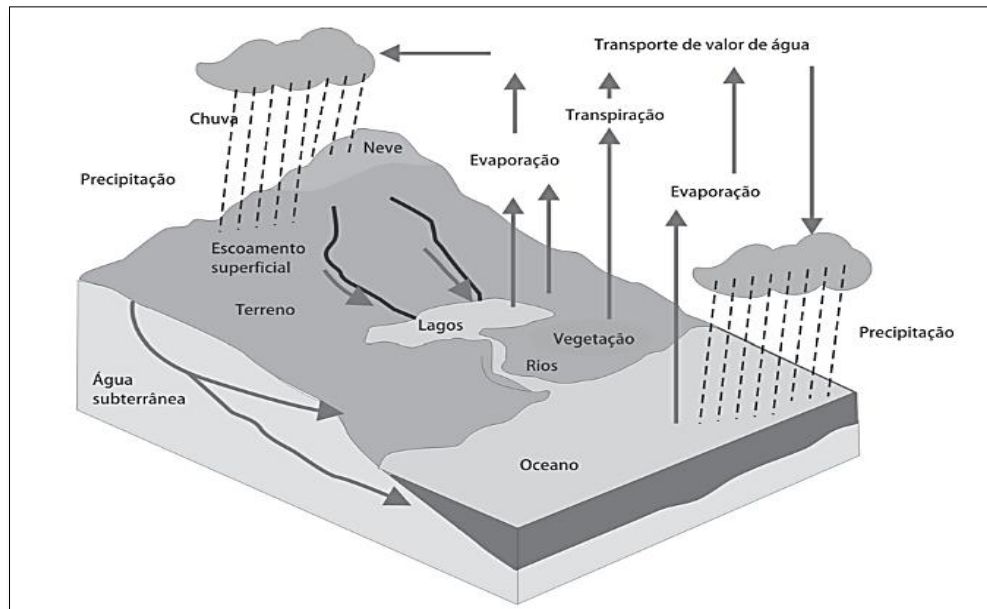
Na esfera da aplicação da hidrologia nos recursos hídricos, a mesma é entendida como a área que analisa o comportamento físico da ocorrência da água e o seu aproveitamento na bacia hidrográfica, através da quantificação dos recursos hídricos no tempo e no espaço, avaliando assim, o impacto de modificações da bacia hidrográfica sobre os processos hidrológicos. O desenvolvimento da hidrologia tem sido influenciado por aspectos próprios do uso da água, como atendimento da demanda de água e contenção de desastres (TUCCI, 2001).

Padrões de vida mais elevados, mudanças demográficas e políticas de uso da terra e água estão aumentando a demanda da água necessária para irrigação, produção de energia, usos domésticos, usos industriais e processos ecológicos. Dessa forma, a medida que as futuras demandas de água se tornam mais incertas, as sociedades se tornam mais vulneráveis a uma ampla gama de riscos associados ao abastecimento inadequado de água em quantidade e/ou qualidade (ONU, 2012).

O volume de água existente na Terra é constante, considerando-se a escala global, e é distribuído em três principais reservatórios: os oceanos, os continentes e a atmosfera. Entre estes três reservatórios há uma circulação contínua de água, através dos fenômenos de precipitação, interceptação, infiltração, escoamento superficial, evapotranspiração, entre outros, que estão ilustrados na Figura 1. Tais

fenômenos fazem parte do ciclo hidrológico, que é impulsionado pela energia proveniente do Sol (MMA, 2006).

Figura 1- Representação dos componentes do ciclo hidrológico.



Fonte: Adaptado de MMA (2006)

A circulação de água entre a superfície terrestre e a atmosfera ocorre nos sentidos superfície-atmosfera e atmosfera-superfície. No sentido superfície-atmosfera, o fluxo de água ocorre principalmente na forma de vapor, devido aos fenômenos de transpiração e evaporação. No sentido atmosfera-superfície o deslocamento de água ocorre em qualquer estado físico, sendo mais significativas as precipitações de chuva e neve (TUCCI, 2001).

A precipitação ocorre quando os fenômenos de aglutinação e crescimento das microgotículas formam uma grande quantidade de gotas com peso e tamanho suficientes para que a força da gravidade supere os movimentos ascendentes do meio atmosférico e a turbulência normal. Isso ocorre quando as nuvens possuem presença significativa de umidade (vapor de água) e núcleos de condensação, como poeira ou gelo por exemplo (TUCCI, 2001).

Ao precipitar, essa água pode sofrer interceptação pela vegetação e evaporar, ou pode atingir o solo. Quando há a presença de vegetação ou outra forma de obstrução ao escoamento, ocorre a retenção de parte da precipitação acima da superfície do solo, chamada de interceptação. O volume retido é perdido por

evaporação, retornando à atmosfera. Este processo interfere no balanço hídrico da bacia hidrográfica, reduzindo a variação da vazão dos rios ao longo do ano, além de retardar e reduzir o pico das cheias (TUCCI, 2001).

Quando a água precipitada atinge a superfície permeável, parte ou toda a água é infiltrada, de acordo com características do solo, como a sua capacidade de infiltração, tipo de solo, grau de umidade, compactação, cobertura vegetal, entre outras. A capacidade de infiltração de água no solo é uma propriedade que representa a intensidade máxima que o solo, em determinada condição e tempo, é capaz de absorver a precipitação aplicada a uma determinada taxa. Caso o volume de água que atinge a superfície não seja completamente infiltrado, ocorre o fenômeno de escoamento superficial. O escoamento superficial é impulsionado pela ação da gravidade para as cotas mais inferiores, vencendo o atrito com a superfície do solo (TUCCI, 2001).

2.1 ESCOAMENTO SUPERFICIAL

A água que origina o escoamento superficial é proveniente das chuvas e, em alguns países, do degelo da neve. No Brasil, que é um país tropical, a chuva é o tipo de precipitação mais importante para estudos da hidrologia, devido a sua capacidade de produzir escoamento superficial. O início do processo de escoamento superficial acontece quando a taxa de precipitação supera a taxa de infiltração de água no solo (MENEZES, 2010).

O escoamento superficial é o componente do ciclo hidrológico mais estudado, observado e modelado pela hidrologia, pois tem influência direta nos estudos de aproveitamento hídrico, dimensionamento de obras hidráulicas e manejo integrado de bacias hidrográficas (MELO, 2013). Ademais, durante o escoamento superficial, a água pode carrear partículas do solo, nutrientes e poluentes, como óleos, pesticidas e fertilizantes.

Dessa forma, o estudo do escoamento superficial é de extrema importância, já que este interfere diretamente na quantidade e na qualidade da água que atinge um corpo hídrico. Gupta (2011) afirma que o escoamento que ocorre em uma bacia hidrográfica pode ser dividido em quatro componentes: o escoamento superficial

direto, gerado pela chuva excedente que escoam diretamente sobre a superfície; o escoamento intra-superficial, que ocorre em uma camada levemente abaixo da superfície; o escoamento subterrâneo; e a precipitação direta sobre o canal.

A quantificação do escoamento superficial não é uma tarefa fácil, já que diversos fatores podem influenciar o volume de água escoada. Entre estes fatores pode-se citar a intensidade e a duração da precipitação, área e forma da bacia hidrográfica, a permeabilidade e capacidade de infiltração do solo e outros fatores de natureza fisiográfica (PINTO et al., 1976). É recomendado que os modelos de escoamento superficial das bacias levem em consideração a análise das características fisiográficas da bacia, o tipo de solo e a sua cobertura (MENEZES, 2010).

3.3 BACIA HIDROGRÁFICA

A bacia hidrográfica é considerada o elemento básico de análise do ciclo hidrológico, principalmente na sua fase terrestre, que é onde ocorre a infiltração e o escoamento superficial. A bacia é uma área definida topograficamente por divisores de água, onde toda água escoada contribui por gravidade para os rios até chegar a seção que define a bacia, o ponto exutório. Os principais atributos que caracterizam uma bacia hidrográfica são a área de drenagem, forma da bacia, elevação, tipo e densidade da rede de drenagem, comprimento do rio principal, declividade do rio e a declividade da bacia (MMA, 2006).

O papel hidrológico da bacia hidrográfica é o de transformar uma entrada de volume concentrada no tempo, a precipitação, em uma saída de água de forma distribuída no tempo, através do escoamento. O principal interesse em estudar a bacia hidrográfica é de que as suas características constituem um sistema natural de transformação de chuva em vazão (MMA, 2006). A Figura 2 ilustra o caminho que a água percorre desde o momento da precipitação até a sua saída no ponto exutório.

Figura 2- Ilustração do conceito de bacia hidrográfica.

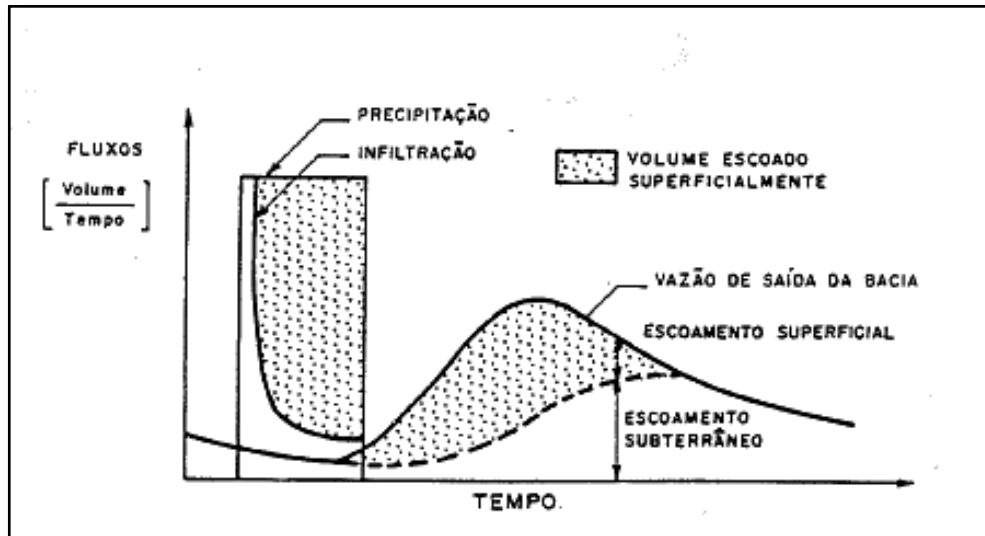


Fonte: CONCEIÇÃO (2011)

3.4 HIDROGRAMA E POLUTOGRAMA

Para se avaliar a relação entre o escoamento superficial e a precipitação dentro de uma bacia hidrográfica, se faz necessário o uso de hidrogramas, que podem ser definidos como gráficos que demonstram a variação da vazão no ponto exutório como resposta à precipitação que é distribuída no tempo e na área de drenagem da bacia (MMA, 2006). Desconsiderando-se as perdas intermediárias de água pela evapotranspiração e infiltração profunda, em um evento isolado podemos analisar a transformação da precipitação em vazão através da Figura 3.

Figura 3- Hidrograma de saída e o hietograma de entrada de uma bacia.



Fonte: adaptado de TUCCI (2001)

De maneira análoga ao hidrograma, pode-se construir gráficos das concentrações de poluentes carregados pela água pluvial em relação ao tempo, pois, assim como as vazões, as concentrações de poluentes no escoamento superficial variam ao longo do evento hidrológico. Tais gráficos são chamados de polutogramas (SILVA, 2009).

3.5 TRANSPORTE DE POLUENTES E SEDIMENTOS

Quando a água está se movimentando em direção a saída de uma bacia hidrográfica, ela passa por obstáculos, que são as rochas e os solos que formam ou revestem a rede de drenagem. Tais obstáculos determinam os caminhos que a água irá seguir e a velocidade que ela se deslocará, propiciando que partículas sejam removidas e transportadas rio abaixo. Embora eventuais, o deslocamento dos sedimentos carregados pela água podem ocasionar a alteração do ciclo hidrológico, e certamente afetar o uso, a conservação e a gestão dos recursos hídricos (BORDAS; SEMMELMANN, 1993).

Além dos sedimentos, diversos poluentes de fontes difusas também podem ser carregados pela água da chuva. A poluição difusa de origem pluvial que atinge os corpos de água receptores é proveniente dos poluentes atmosféricos arrastados pela precipitação e dos poluentes dispostos sobre a superfície da área urbana que

são transportados pelo escoamento superficial direto (SILVA, 2009). Além disso, esta poluição de origem pluvial muitas vezes não é percebida, pois altas cargas de poluentes geradas pelo lançamento de esgoto doméstico in natura mascaram a poluição proveniente do escoamento superficial (BAPTISTA et al., 2004).

De acordo com Porto (2005) os principais poluentes que são carreados pela água de origem pluvial são: sedimentos, partículas metálicas e de vidro, resíduos industriais e de construção civil, bactérias, material orgânico, diversos metais pesados, hidrocarbonetos provenientes do petróleo, nutrientes, pesticidas e poluentes suspensos na atmosfera, que são depositados sobre a superfície da bacia hidrográfica.

Outro fator importante relacionado à produção de sedimentos urbanos são as Partículas Totais em Suspensão (PTS) presentes na atmosfera que são carreadas para os corpos hídricos através da precipitação. As PTS podem ser definidas como partículas cujo o diâmetro aerodinâmico é menor que 50 μm . As PTS são oriundas principalmente de emissões antropogênicas, tais como queimas de resíduos, fuligem, combustão de veículos automotores, processos industriais, produção de energia, entre outros (CETESB, 2018).

Sedimentos urbanos são potencialmente poluidores devido a sua capacidade de associação a outros poluentes, como metais pesados, aumentando a possibilidade de contaminação dos corpos de água no ambiente urbano (SANTOS et al., 2017). Geralmente, os problemas de qualidade da água pluvial não são contemplados pelo sistema clássico de drenagem urbana, já que este sistema apenas retira a água pluvial das áreas urbanas, transferindo os problemas de inundação e poluição hídrica da montante para a jusante (BAPTISTA et al., 2004).

3.6 HIDROLOGIA URBANA

Nas últimas décadas, a urbanização dos espaços tem modificado radicalmente a paisagem nos arredores das cidades, o que evidencia a sua interferência nos processos que compõem o ciclo hidrológico. A alteração das condições naturais da superfície, devido às construções urbanas, diminui o potencial de infiltração de água no solo. Superfícies impermeáveis, como, por exemplo,

telhados, ruas e estacionamentos, apresentam uma rugosidade hidráulica menor, aumentando o volume e velocidade do escoamento superficial e os transportes de sedimentos (LIMA et al., 2010).

A hidrologia urbana é o ramo da hidrologia que abrange as regiões metropolitanas e as áreas de maior densidade populacional, e analisa o impacto do desenvolvimento urbano no ciclo da água e as possíveis soluções desses impactos. A grande maioria dos estudos de hidrologia urbana focam na análise do escoamento superficial direto, já que este tem potencial de causar enchentes e inundações. Na Tabela 1 estão apresentadas as principais causas e efeitos da urbanização nas inundações no ambiente urbano (TUCCI, 2001).

Tabela 1 - Causas e efeitos da urbanização nas inundações.

Causas	Efeitos
Impermeabilização	Maiores picos e vazões, maiores picos a jusante
Lixo	Degradação da qualidade da água, entupimento de bueiros e galerias
Redes de esgotos deficientes	Degradação da qualidade da água, moléstias de veiculação hídrica
Desmatamento	Maiores picos e volumes, aumento da erosão, assoreamento em canais e galerias
Ocupação das várzeas	Maiores, picos, maiores custos de utilidades públicas, maiores prejuízos

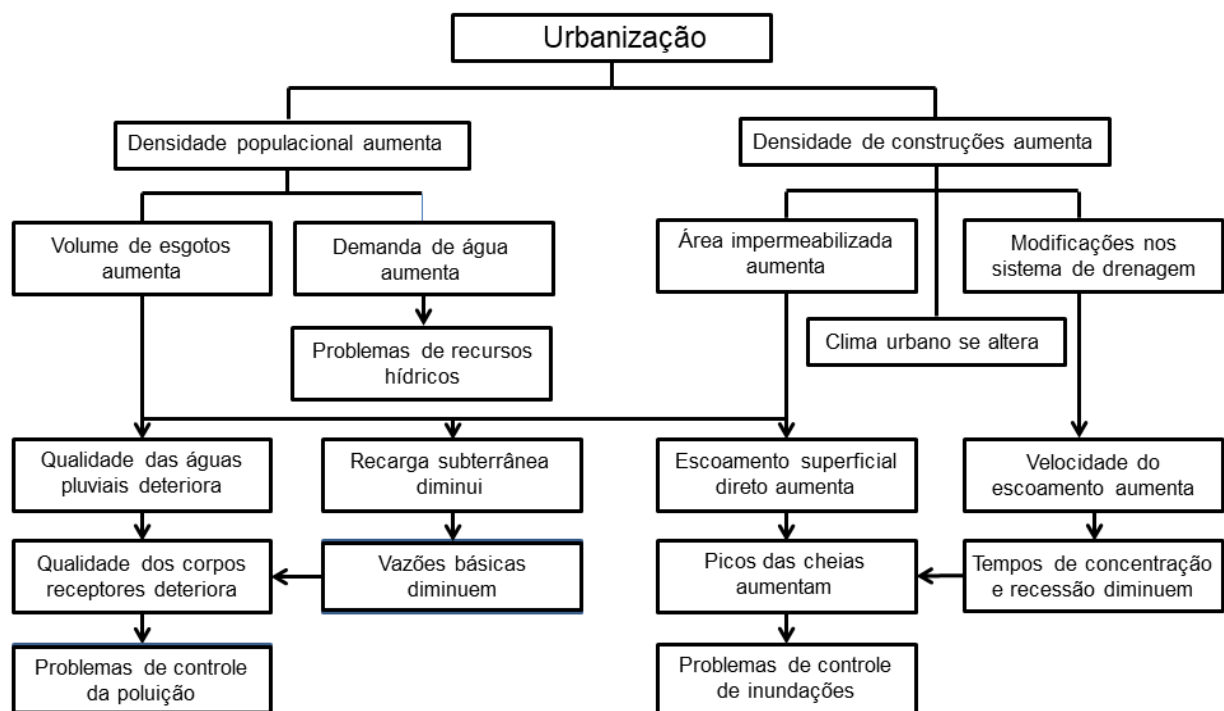
Fonte: Adaptado de TUCCI (2001)

O estudo de Coelho (2017) mostrou, através da aplicação do método do balanço hídrico, que para um cenário de aumento de 40% da área urbana da cidade de Goiânia, a cidade sofreria um aumento de 15,96% na parcela de escoamento superficial e uma redução de cerca de 45,29% na parcela infiltrada.

O fluxograma da Figura 4 exemplifica os processos que ocorrem quando uma área é urbanizada. Com o aumento da densidade populacional e de construções, os volumes de esgoto e de demanda de água aumentam, assim como a área

impermeabilizada. Esse processo faz com que haja problemas no manejo dos recursos hídricos e alterações no clima urbano, diminuindo a recarga das águas subterrâneas e as vazões básicas e aumentando o volume e a velocidade do escoamento superficial direto. Como consequência destes processos, tem-se o aumento dos picos de cheia e a deteriorização da qualidade das águas pluviais e dos corpos receptores, gerando problemas de controle da poluição e de inundações.

Figura 4- Processos resultantes da urbanização.



Fonte: Adaptado de Hall (1984)

Para mitigar os problemas causados pela urbanização desordenada, deve ser adotado o planejamento e a gestão de sistemas de drenagem urbana. Estes sistemas são métodos preventivos de inundações, principalmente nas áreas de menor altitude, mais sujeitas a alagamentos ou marginais de cursos de água naturais. Quando o sistema de drenagem de uma cidade não é pensado e projetado desde o início da formação urbana, é provável que o sistema tenha um alto custo e apresente deficiências. Desta forma, se faz necessário o planejamento da área urbana de forma integrada (FERNANDES, 2002).

Segundo Fernandes (2002), os sistemas de drenagem urbana são rotulados de acordo com as suas dimensões, sendo classificados como sistema de macrodrenagem ou microdrenagem. O sistema de microdrenagem é composto por pequenas e médias galerias que tem como função coletar e afastar as águas superficiais ou subterrâneas. O sistema de macrodrenagem inclui, além da microdrenagem, as galerias de porte maior (diâmetro maior que 1,5 m) e os corpos de água receptores, como canais e rios canalizados.

Genz e Tucci (1995) classificaram as medidas de controle de enchentes de acordo com a sua atuação na bacia, sendo: distribuída ou na fonte, quando a medida de controle atua sobre o lote, passeios e praças; na microdrenagem, quando o controle age sobre o hidrograma resultante de um ou mais loteamentos; e na macrodrenagem, quando a medida de controle atua sobre os principais riachos urbanos.

Um estudo conduzido por Seo (2012) mostrou que o tempo e a vazão mássica de pico apresentam relação com a configuração e a eficiência de rede de drenagem adotada por uma bacia hidrográfica, já que a direção e velocidade do movimento das chuvas intensas variaram significativamente com a configuração da rede drenagem no estudo.

3.7 TÉCNICAS ALTERNATIVAS DE DRENAGEM URBANA

Desde os anos 1970 uma abordagem alternativa vem sendo desenvolvida para minimizar os problemas gerados pelas águas pluviais, as técnicas compensatórias em drenagem urbana. Tais técnicas visam diminuir os impactos da urbanização sobre as etapas do ciclo hidrológico, estimulando a preservação ambiental e melhorias na qualidade de vida da população (BAPTISTA et al., 2004).

Enquanto os sistemas clássicos de drenagem urbana funcionam basicamente focados no aumento da eficiência do escoamento, os sistemas alternativos de drenagem focam nos processos de retenção e infiltração da água precipitada, aumento o tempo no qual a água permanece dentro da bacia, diminuindo ou acabando com as enchentes e inundações (BRITO, 2006).

A escolha dos sistemas alternativos de drenagem urbana está condicionada a diversos fatores, como, por exemplo: características hidrológicas do local; impacto do sistema nos processos hidrológicos na bacia; integração com o planejamento urbano; custos de implantação e manutenção; adoção de novas práticas de manutenção (NASCIMENTO et al., 1997). Segundo BAPTISTA et al. (2004) estes sistemas podem assumir diversas formas como, por exemplo, trincheiras, valas, poços, bacias de detenção e retenção, fossas, pavimentos com estrutura de reservação, planos de infiltração, bacias de percolação e pavimentos permeáveis.

Uma outra abordagem que vem sendo elaborada mundialmente para a minimização e redução dos impactos causados pelos sistemas de drenagem é o Sistema de Drenagem Urbana Sustentável (Sustainable Urban Drainage System - SUDS). O SUDS possui terminologias similares em diversas localidades, como: a Low Impact Development (LID) no Canadá, Best Management Practices (BMP) na costa leste dos Estados Unidos e Water Sensitive Urban Design (WSUD) na Austrália (FLETCHER et al., 2014).

Guan (2015) avaliou as mudanças hidrológicas que ocorrem durante o desenvolvimento urbano de uma área rural para uma área residencial de densidade de ocupação média, através de um Modelo de Gestão de Drenagem Urbana (Storm Water Management Model – SWMM). O pesquisador concluiu que a urbanização elevou as vazões de pico em uma ordem de magnitude maior que 10 e mais do que dobrou o volume total escoado, mas como o uso de diversas ferramentas LID, as vazões puderam retornar aos níveis de pré-desenvolvimento.

A ideologia dos SUDS, de maneira resumida, consiste em: diminuir as vazões e taxas de escoamento superficial e subsuperficial; reduzir os volumes de água adicionais consequentes da urbanização; diminuir a concentração de poluentes e atuar como zona de amortecimento em caso de acidentes que envolvam derramamento de contaminantes; possibilitar a recarga natural dos aquíferos; prover habitats para os animais e agregar valor estético para as áreas urbanas. Esta abordagem busca reproduzir o regime hidrológico das bacias hidrográficas antes da urbanização, no seu pré- desenvolvimento, através dos fenômenos de infiltração, filtragem, armazenamento e evaporação (FLETCHER et al., 2014).

3.7.1 Bacias de retenção

Entre as soluções adotadas pelas técnicas alternativas, pode-se citar as bacias (ou reservatórios) de retenção, também conhecidas como bacias de amortecimento de cheias. Tais estruturas permitem a acumulação temporária de águas pluviais, amortecendo as cheias geradas no ambiente urbano; reduzindo o volume do escoamento superficial, no caso das bacias de infiltração; e diminuindo a poluição difusa de origem pluvial e urbana (BAPTISTA et al., 2004).

A eficiência da diminuição do transporte de material poluente na bacia de retenção é geralmente limitada à remoção de sólidos suspensos e contaminantes associados devido ao assentamento por gravidade, já que diferente da bacia de retenção, a bacia de retenção é construída para liberar gradativamente todo volume de água que chega até ela (SOUZA, 2014).

Um estudo na sub-bacia hidrográfica do Lago Paranoá analisou a influência da implantação de 13 bacias de retenção em locais distintos para avaliar os efeitos do seu posicionamento na remoção de poluentes. O estudo concluiu que a eficiência de remoção dos poluentes foi maior em bacias instaladas mais a jusante dos corpos de água. A melhor alternativa dentre as 13 apresentadas no estudo foi a que utilizava apenas uma bacia de retenção localizada próxima ao exutório da bacia, apresentando a maior redução da vazão de pico e do transporte de poluente (SOUZA, 2014).

O volume útil de armazenamento de bacias de retenção é obtido a partir do cálculo dos aporte de montante (hidrogramas de entrada), cálculos dos aportes ao sistema de drenagem a jusante da bacia de retenção e da capacidade de drenagem desse sistema (BAPTISTA et al., 2004). Uma forma simplificada de se realizar o dimensionamento preliminar das bacias de retenção é o método proposto por Wycoff e Singh (1976). Este método considera os hidrogramas de entrada e saída da bacia de retenção, suas equações (Equações 1 e 2) foram determinadas a partir da regressão múltipla linear de um banco de dados observados.

$$V_r = \frac{1}{2} \cdot TB_0 \cdot Q_0 \quad (1)$$

$$\frac{V_s}{V_r} = \frac{1,291 \cdot \left(1 - \frac{Q_0}{Q_i}\right)^{0,753}}{\left(\frac{T_b}{T_p}\right)^{0,411}} \quad (2)$$

Sendo, V_r o volume total escoado; V_s o volume de saída; T_{B_0} o tempo de base do hidrograma de saída da bacia de detenção; Q_0 a vazão de pico do hidrograma de saída; Q_i a vazão de pico do hidrograma de entrada; T_b o tempo de base do hidrograma de entrada e T_p o tempo de pico do hidrograma de entrada.

Outra metodologia de cálculo para o planejamento de bacias de detenção foi proposta por Porto (2003), desenvolvida para o pré-dimensionamento de bacias de detenção que possuem órgãos extravasores, como orifícios e vertedores. Nesta metodologia, o autor demonstrou que o volume aproximado da bacia de detenção pode ser calculado a partir da Equação 3.

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot \pi}{n}} \cdot i_p \cdot t_p \quad (3)$$

Sendo V o volume estimado da bacia de detenção, em m^3 ; n um fator de aspecto da bacia hidrográfica, que varia de 4 a 10; i_p a vazão de pico do hidrograma de entrada, em m^3/s ; e t_p o tempo de pico do hidrograma de entrada, em s.

Segundo Porto (2003) a vazão de saída do orifício pode ser calculada através da Equação 4.

$$Q = C_d \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \quad (4)$$

Sendo Q a vazão de saída, em m^3/s ; C_d o coeficiente de descarga (adimensional); A a área do orifício retangular, em m^2 ; g a aceleração da gravidade ($9,8m/s^2$); e H a altura de água na bacia de retenção em relação ao orifício, em m .

3.8 MODELOS FÍSICOS

Em disciplinas do conhecimento onde são estudados os fenômenos naturais, como a climatologia e a hidrologia, os pesquisadores encontram dificuldades no desenvolvimento de pesquisas, devido à falta de dados. Nestes casos, costuma-se utilizar modelos de simulação para a geração de sequências artificiais de dados que possuem vínculo com os fenômenos que ocorrem naturalmente, facilitando seus estudos. Os modelos são muito utilizados para auxiliar a tomada de decisões em questões envolvendo controle de cheias, construção de barragens, sistemas de abastecimento de água e recursos hídricos. Geralmente são utilizados três tipos de modelo, o físico, o matemático e o analógico. Os modelos físicos utilizam uma forma física para imitar um segmento do mundo real (CHRISTOFOLLETTI, 1999).

Os estudos envolvendo fenômenos hidrológicos, como precipitação e escoamento superficial podem ser realizados utilizando-se modelos físicos reduzidos, que são representações simplificadas da realidade em escala reduzida. Trabalhos anteriores (SILVEIRA et al., 2016; FELICE, 2017, LIMA, 2017) mostraram que o modelo físico é uma ferramenta eficiente nos estudos de escoamento superficial em áreas impermeabilizadas e que eles possibilitam a obtenção de dados quantitativos precisos. Como há uma grande dificuldade na coleta de dados hidrológicos em campo, muitos estudos estão utilizando os simuladores de chuva em modelos físicos reduzidos (LIMA, 2017).

3.8.1 Simuladores de chuva

Para serem considerados eficientes, os simuladores de chuva (SCs) devem simular as características típicas das chuvas naturais, como, por exemplo, a intensidade de precipitação, velocidade de impacto e distribuição do tamanho das gotas de chuva, ângulo de impacto das gotas e a capacidade de reproduzir a intensidade e a duração dos eventos de chuvas intensas (BRANDÃO et al., 2004).

Geralmente, os SCs são diferenciados de acordo com a forma na qual as gotas são produzidas, seja através de bicos aspersores ou por gotejamento (WILDHABER et al., 2012). Nos SCs do tipo gotejamento, geralmente existe um tanque que contém furos uniformes pelos quais a água flui, produzindo várias gotas de intensidade controlada pelo diâmetro dos furos e pela carga hidráulica no tanque. Nos SCs formados por bicos aspersores, a água é pressurizada até os bicos aspersores, podendo gerar gotas que chegam à superfície com velocidades superiores às dos sistemas por gotejamento, gerando chuvas de maiores intensidades (CORONA et al., 2013).

Além disso, esses equipamentos podem ser classificados entre simuladores de grande e pequena escala. SCs de grande escala geralmente irrigam áreas acima de 40 m², enquanto SCs de pequena escala podem irrigar áreas de tamanho tão pequeno quanto 0.06 m². A escolha do tamanho do simulador utilizado deve ser feita de acordo com a informação que se deseja obter, pois cada tamanho de equipamento possui um grau de sensibilidade às características do local estudado (MAYERHOFER et al., 2017). Os SCs de pequeno porte são indicados, por exemplo, para estudos da erodibilidade de diferentes tipos de cobertura do solo, onde pequenas parcelas são suficientes (HUDSON, 1993).

De acordo com estudos anteriores, pode-se assumir que quanto maior a área irrigada pelos SCs, mais representativos são os resultados no que se refere à compreensão dos processos de escoamento superficial, em uma escala maior (MAYERHOFER et al., 2017). Dessa forma, para caracterização e manejo de uma bacia hidrográfica os SCs de grande escala são mais indicados, pois trabalham com parcelas maiores e mais representativas do local (SPOHR et al., 2015).

Apesar dos SCs serem utilizados em estudos de manejo de solos desde 1930, o uso de SCs em estudos sobre hidrologia urbana é um tanto recente (SPOHR et al., 2015). Podem ser citados, por exemplo, o trabalho realizado por Hergren et al. (2005) sobre a relação entre metais pesados e sólidos suspensos nas águas pluviais urbanas utilizando chuva simulada; a modelagem dos efeitos das mudanças nas características do evento de precipitação em cargas de sólidos suspensos totais no escoamento urbano (BORRIS et al., 2014); e a avaliação da

eficiência de superfícies permeáveis no controle do escoamento superficial em áreas urbanas (SILVA, 2006).

3.9 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

A metodologia de superfície de resposta (MSR) vem sendo amplamente utilizada na modelagem de pesquisas sobre otimização de processos experimentais. Esta metodologia possui diversos delineamentos que possibilitam ao pesquisador planejar os ensaios a serem realizados de maneira mais econômica, diminuindo o tempo de realização dos experimentos e o gasto de recursos (MENDONÇA, 2012).

Através da MSR, é possível aproximar um modelo empírico a uma relação entre as variáveis e as respostas do processo. A função que relaciona as variáveis é chamada de superfície de resposta. Geralmente em trabalhos de pesquisa científica, o pesquisador busca descobrir quais variáveis, também chamadas de fatores, que são importantes no estudo de uma superfície de resposta. Visando remover as variáveis sem importância, é comum a realização prévia de um delineamento experimental que relacione algumas variáveis independentes (MENDONÇA, 2012).

Os delineamentos compostos foram desenvolvidos por Box E Wilson (1951) para o estudo de funções polinomiais de resposta na indústria, onde as condições experimentais são facilmente controladas. Nessa condição, normalmente se repete apenas um ensaio, o ensaio relativo ao ponto central. Posteriormente, os delineamentos compostos centrais foram adaptados a diversos ramos da ciência.

O delineamento composto é um dos delineamentos mais populares para o ajuste de modelos de até segunda ordem e é constituído por três partes: a parte cúbica (fatorial), a axial (α) e a central. A parte fatorial do delineamento é responsável pela estimativa dos efeitos das interações entre os fatores, por isso, os pontos cúbicos são combinações geralmente utilizadas em ajustes de modelos de primeira ordem. Os pontos axiais estão situados nos eixos do sistema de coordenadas, com distância $\pm\alpha$ da origem e contribuem grandemente na estimativa dos termos quadráticos do modelo de segunda ordem. Os pontos centrais, além de contribuírem também para a estimativa dos efeitos quadráticos, possibilita a estimativa do erro puro, quando ele é repetido (MENDONÇA, 2012).

Box E Hunter (1957), citados por Perázio (2010), propuzeram o conceito de rotacionalidade como critério para a escolha do valor axial. O delineamento composto central é rotacional quando o valor axial (α) corresponder à relação presente na Equação 5.

$$\alpha = (2^k)^{1/4} \quad (5)$$

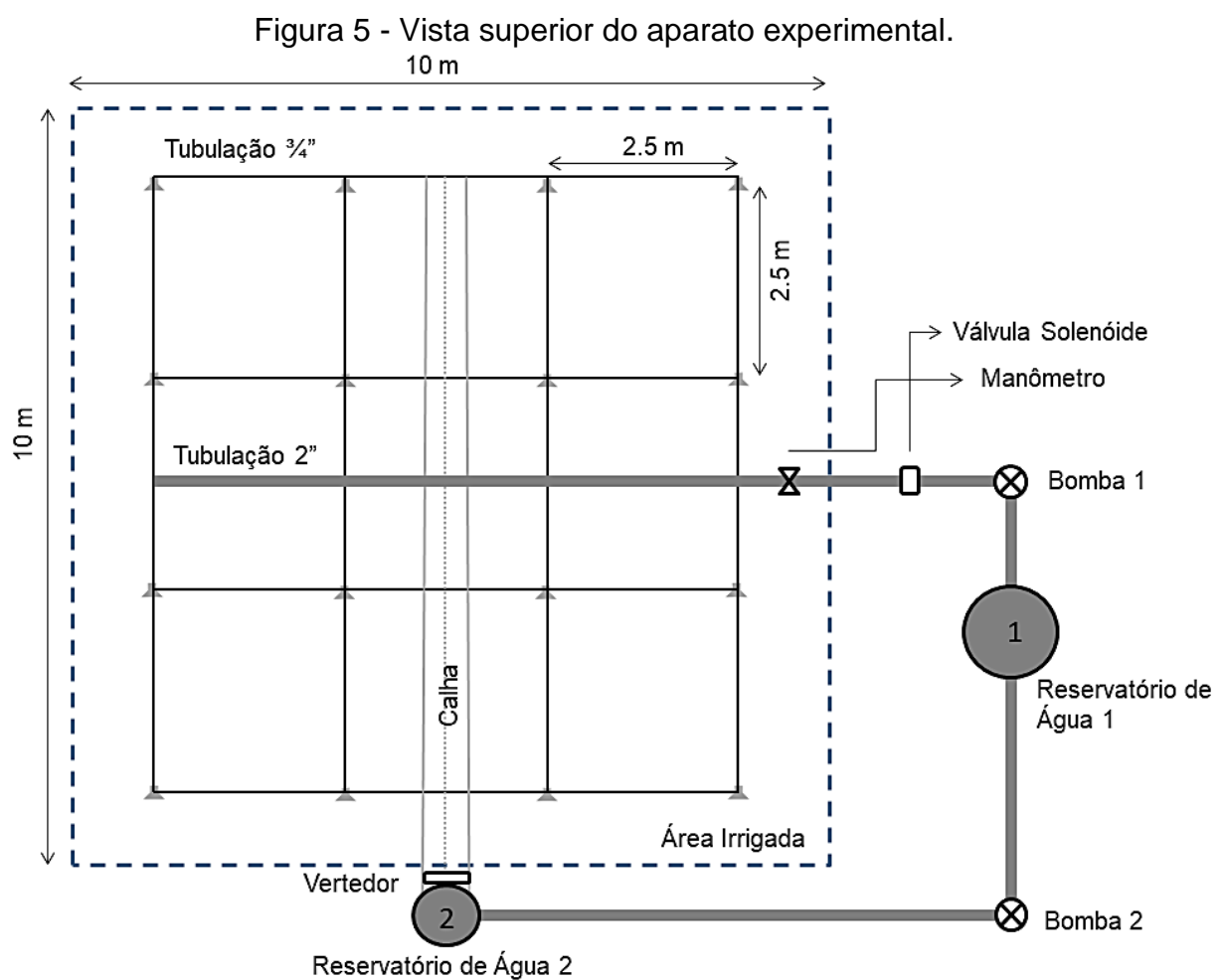
Na qual k corresponde ao número de fatores ou variáveis independentes.

Dessa forma, o DCCR correlaciona variáveis independentes que podem influenciar o fenômeno estudado, utilizando uma modalagem com função de segunda ordem. Estudo anterior (LIMA, 2017) demonstrou que o DCCR é um método adequado de delineamento experimental para trabalhos envolvendo simuladores de chuva de larga escala em modelo experimental reduzido.

4 METODOLOGIA

4.1 APARATO EXPERIMENTAL

O aparato experimental é composto por um simulador de chuva de grande escala sob uma superfície impermeável. O simulador de chuva é formado por uma malha quadrada de dezesseis bicos aspersores (*Spraying System*®, *FullJet HH-W 1/4*), distanciados de 2,5 m em 2,5 m, como pode ser observado na Figura 5.

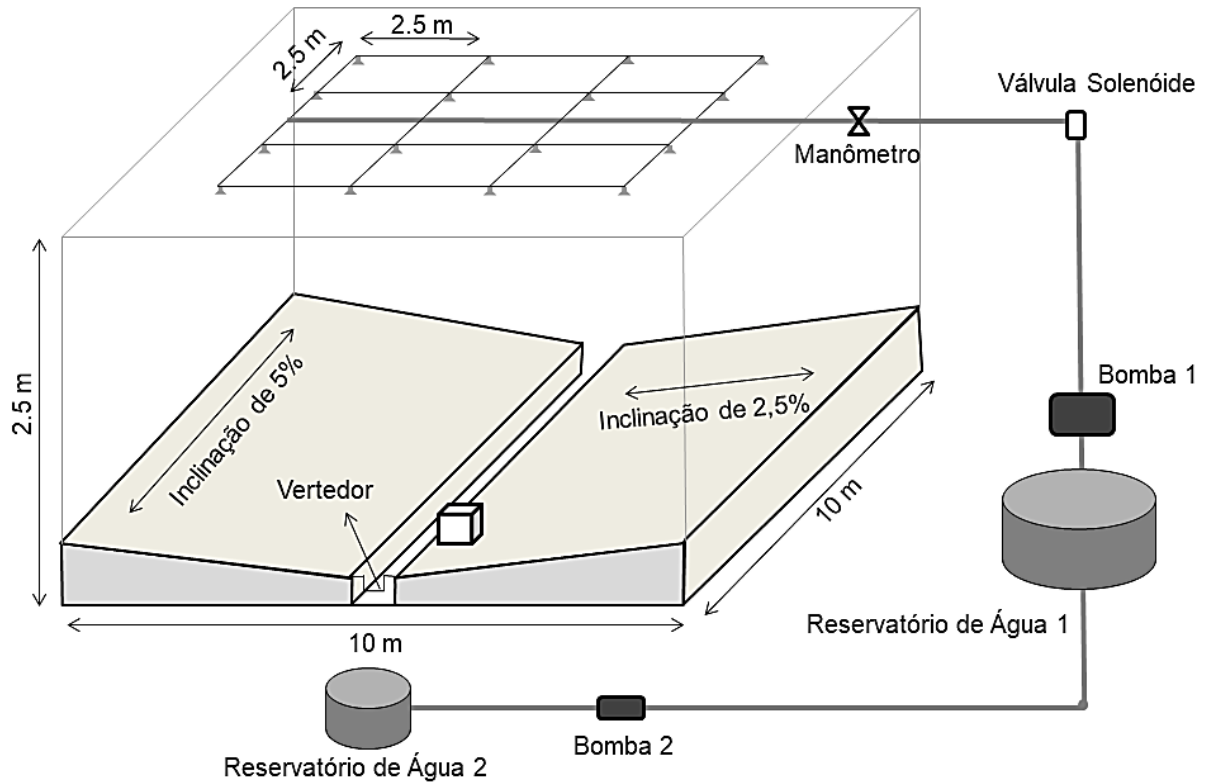


Fonte: da autora.

A superfície impermeável possui uma área total de 100 m², com 10m de comprimento e 10m de largura, sendo formada por uma base de concreto revestida com tinta Epóxi. A área é composta por duas vertentes separadas por uma calha metálica, possuindo cada vertente uma inclinação de 2,5% no sentido transversal e 5,0% no sentido longitudinal, como pode ser observado na Figura 6. O aparato

experimental é protegido lateralmente e coberto por uma estrutura de metal e policarbonato, o que evita as interferências externas, como vento e chuva natural.

Figura 6 - Vista em perspectiva do aparato experimental.



Fonte: da autora.

O sistema hidráulico é alimentado pela água proveniente do reservatório 1 através da tubulação com diâmetro de 1", pela bomba 1 da marca Schneider, modelo BC-21R 2, com potência de 5 CV. A água passa dessa tubulação de maior diâmetro para uma tubulação com diâmetro de $\frac{3}{4}$ ", onde estão instalados os bicos aspersores com sistemas corta-gotas, como pode ser observado na Figura 7.

Figura 7 - Foto de bicos aspersores com sistema corta-gotas.

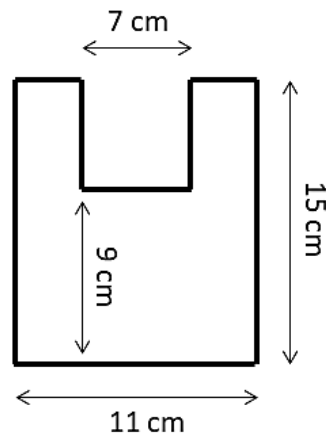


Fonte: Da autora.

A água precipitada escoar pela superfície impermeável e é dirigida para a calha metálica presente no centro da área. Depois disso, a água é transportada pela calha até o reservatório de água 2, onde é bombeada novamente para o reservatório de água 1, pela bomba 2, da marca Eletroplas, modelo ICS-110A, com potência de 1 CV. Nas sucções das bombas foram instalados filtros para proteção dos bicos aspersores e das bombas.

Anterior aos bicos aspersores estão instalados: um registro, para o controle da intensidade; um manômetro, para medição da pressão na tubulação; e uma válvula solenóide, para um melhor controle da vazão de água que adentra o simulador. Na porção inferior da calha está instalado um vertedor retangular que cria uma área alagada e facilita as medições realizadas. O vertedor possui as dimensões ilustradas na Figura 8.

Figura 8 - Dimensões do vertedor.



Fonte: Da autora.

Para o cálculo da vazão de água que passa pelo vertedor foi utilizada a Equação 6 proposta por Porto (2006).

$$Q = 1,838 \cdot L' \cdot H^{3/2} \quad (6)$$

Na qual Q é a vazão, em m³/s; L' é a correção da largura real da soleira do vertedor, em m; e H é a carga hidráulica acima da soleira, em m. A largura correção da largura real, a largura fictícia L', é calculada através da Equação 7 (Porto, 2006).

$$L' = l - 0,2 \cdot H \quad (7)$$

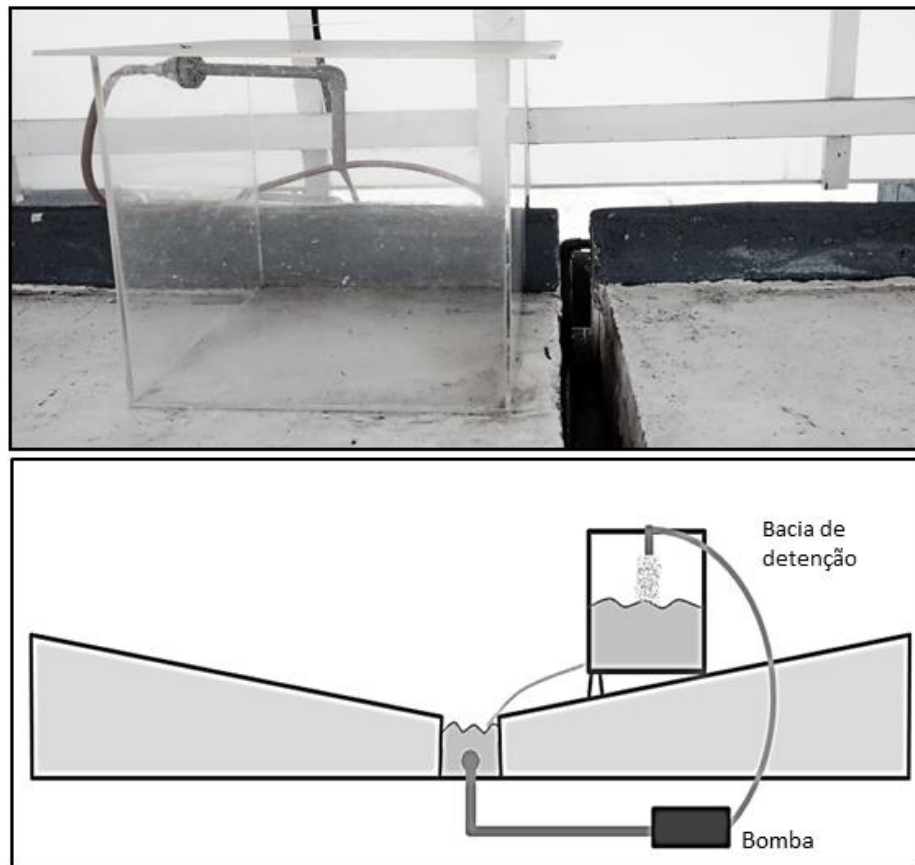
Na qual é L é a largura real da soleira, em m.

O material utilizado nos ensaios, como indicador de poluente solúvel, é o cloreto de sódio (NaCl), seco em estufa a 100°C por no mínimo 24 horas antes da realização do experimento. A secagem é necessária para a retirada da umidade do material. Para simulação da densidade de ocupação são utilizados blocos de poliestireno expandido, com dimensões de 40cm x 40cm x 60cm cada.

4.2 DIMENSIONAMENTO DA BACIA DE DETENÇÃO

A bacia de detenção é simulada por um reservatório retangular de polimetilmetacrilato. A água é bombeada, a uma vazão de aproximadamente 0.46L/s, da calha para a bacia de detenção e é liberada, gradativamente, por um pequeno orifício de saída de 1 centímetro de diâmetro. A Figura 9 ilustra de que forma o sistema está instalado e o caminho que parte da água escoada percorre no sistema.

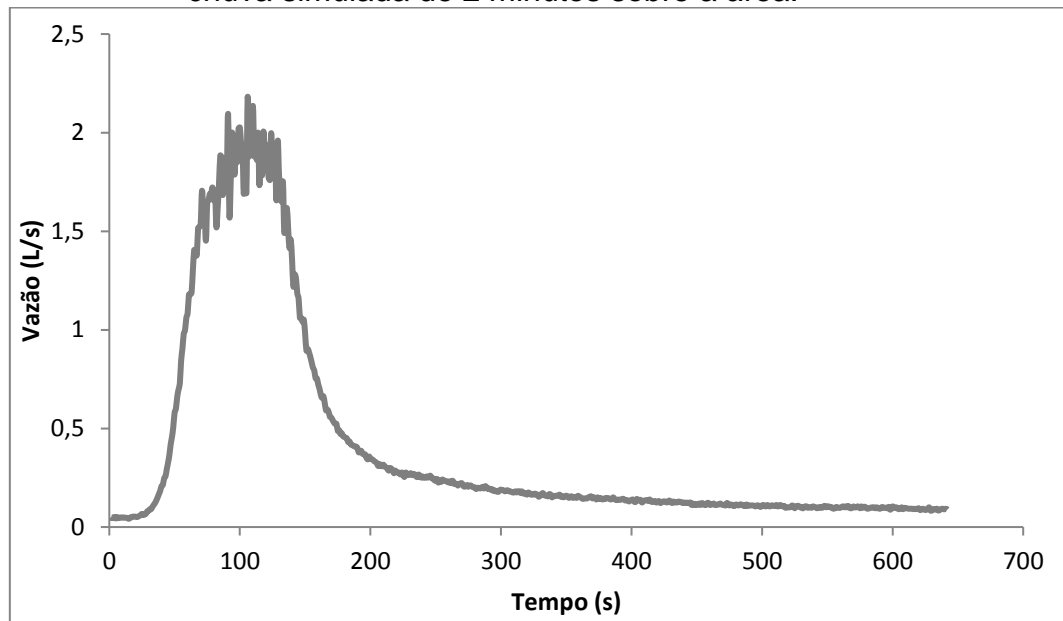
Figura 9 - Sistema de sucção da água da calha para a bacia de detenção.



Fonte: Da autora.

As dimensões da bacia de detenção são definidas com base no volume necessário para reduzir a vazão de pico para a vazão de restrição. Os dados preliminares utilizados no dimensionamento da bacia de detenção foram obtidos a partir do hidrograma presente na Figura 10.

Figura 10 - Hidrograma de entrada relacionando tempo e vazão resultante de uma chuva simulada de 2 minutos sobre a área.



Fonte: Da autora.

De acordo com o método proposto por Wycoff e Singh (1976), através das Equações 1 e 2 e os hidrogramas de entrada já existentes para a área de estudo, o volume necessário da bacia de retenção para a redução da vazão de pico pela metade é de 105,3 L. Utilizando-se a metodologia proposta por Porto (2003), através da Equação 3, a bacia de retenção deve possuir um volume de 105 L. Como pode-se perceber, os valores obtidos, utilizando-se os dois métodos distintos, são semelhantes. Dessa forma, a bacia de retenção deverá possuir um volume de, no mínimo, 105 L.

Para evitar problemas resultantes de variações nos volumes de água, a bacia de retenção projetada possui 0,5 m de altura, 0,5 m de largura e 0,5 m de comprimento, totalizando um volume de 125 L.

4.3 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

Visando uma posterior análise estatística dos dados e uma redução no número de ensaios, optou-se pela utilização de um delineamento estatístico denominado Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) para o planejamento dos experimentos a serem realizados.

Neste estudo, adotaram-se quatro variáveis independentes, sendo elas: a massa de material solúvel aplicada na superfície (X_3), a posição desse material em relação ao ponto exutório (X_1), o número de blocos (X_2) e a duração da chuva simulada (X_4). As variáveis dependentes escolhidas para o estudo foram: vazão de pico (Y_1), volume de água escoado (Y_2), descarga mássica de pico (Y_3), tempo de pico do polutograma (Y_4), tempo inicial do polutograma (Y_5), tempo final do polutograma (Y_6), massa transportada (Y_7) e porcentagem transportada (Y_8).

Após a determinação das variáveis independentes, foram escolhidos os valores referentes aos pontos centrais, axiais e quadrático, para cada variável, de acordo com dados obtidos através de testes realizados no aparato experimental e trabalhos anteriores na área, como o de (Lima, 2017) e (Felice, 2017). Os valores adotados estão presentes na tabela 2.

Tabela 2 - Variáveis independentes estudadas e seus níveis codificados.

Código	Variáveis Independentes	Níveis codificados e reais das variáveis independentes				
		$-\alpha$	-1	0	1	α
X1	Posição do material solúvel (m)	1	3	5	7	9
X2	Densidade de ocupação (nº de blocos)	0	40	80	120	160
X3	Massa de material solúvel (g)	10	30	50	70	90
X4	Duração da chuva (min)	1	2	3	4	5

Fonte: Da autora.

Por fim, calculou-se o valor de α (alfa), que é utilizado para o cálculo dos valores extremos a serem utilizados no experimento. No caso do DCCR, o α é calculado de acordo com a equação 5. O valor encontrado para α nesse estudo foi 2, pois foram escolhidas quatro variáveis independentes ($k=4$).

De acordo com o método do DCCR, foi possível elaborar um roteiro de ensaios que serão efetuados, presente na tabela 3, para posterior otimização dos experimentos e análise dos resultados.

Tabela 3- Ensaio propostos no DCCR. Fonte: da autora

Quadro de ensaios propostos no DCCR								
Ensaio	X1 - Posição do material solúvel (m)		X2 - Densidade de ocupação (blocos)		X3 - Massa de material solúvel (g)		X4 - Duração da chuva (min)	
	Código	V. real	Código	V. real	Código	V. real	Código	V. real
1	-1	3	-1	40	-1	30	-1	2
2	1	7	-1	40	-1	30	-1	2
3	-1	3	1	120	-1	30	-1	2
4	1	7	1	120	-1	30	-1	2
5	-1	3	-1	40	1	70	-1	2
6	1	7	-1	40	1	70	-1	2
7	-1	3	1	120	1	70	-1	2
8	1	7	1	120	1	70	-1	2
9	-1	3	-1	40	-1	30	1	4
10	1	7	-1	40	-1	30	1	4
11	-1	3	1	120	-1	30	1	4
12	1	7	1	120	-1	30	1	4
13	-1	3	-1	40	1	70	1	4
14	1	7	-1	40	1	70	1	4
15	-1	3	1	120	1	70	1	4
16	1	7	1	120	1	70	1	4
17	0	5	0	80	0	50	0	3
18	0	5	0	80	0	50	0	3
19	0	5	0	80	0	50	0	3
20	0	5	0	80	0	50	0	3
21	-2	1	0	80	0	50	0	3
22	2	9	0	80	0	50	0	3
23	0	5	-2	0	0	50	0	3
24	0	5	2	160	0	50	0	3
25	0	5	0	80	-2	10	0	3
26	0	5	0	80	2	90	0	3
27	0	5	0	80	0	50	-2	1
28	0	5	0	80	0	50	2	5

Fonte: Da autora.

4.4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os ensaios consistem na aplicação da chuva simulada sobre a superfície impermeável, alterando-se as variáveis independentes do estudo, de acordo com o

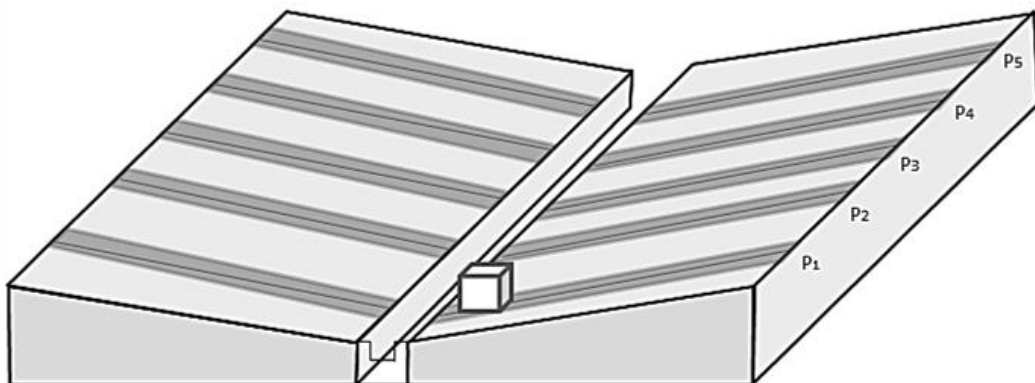
roteiro proposto no delineamento experimental. O roteiro é executado para dois cenários, o cenário com o funcionamento da bacia de detenção e o cenário com a ausência desta bacia. Ambos cenários serão executados para mensurar o efeito da bacia nos experimentos, permitindo a posterior análise da sua influência.

Para os ensaios realizados com a bacia de detenção, parte da água escoada para a calha é coletada por uma tubulação de $\frac{3}{4}$ " que succiona essa água, através de uma bomba da marca Eletroplas, modelo MCSE-200, com potência de 2 CV e a leva até a bacia de detenção através de uma mangueira flexível. A sucção da bomba está instalada em uma posição anterior à saída da bacia de detenção e possui uma vazão de aproximadamente 0.46 L/s.

O tempo que a bomba de sucção permanece ligada durante o ensaio varia de acordo com a duração da precipitação, pois quanto maior o tempo de precipitação, maior é o volume de água escoado e, portanto, maior é o volume de água que deve ser enviado para a bacia de detenção. Os tempos de funcionamento da bomba relativos a cada duração de chuva são: 30 segundos para a chuva de 1 minuto; 90 segundos para a chuva de 2 minutos; 150 segundos para a chuva de 3 minutos; 210 segundos para a chuva de 4 minutos; e 270 segundos para a chuva de 5 minutos.

O material solúvel é aplicado, com o auxílio de uma peneira, nas posições estabelecidas (1m, 3m, 5m, 7m, 9m) em faixas de 20 centímetros ao redor das posições. A delimitação dos 20 centímetros é necessária para garantir a repetibilidade do experimento. A Figura 11 ilustra a disposição do material sobre a superfície impermeável.

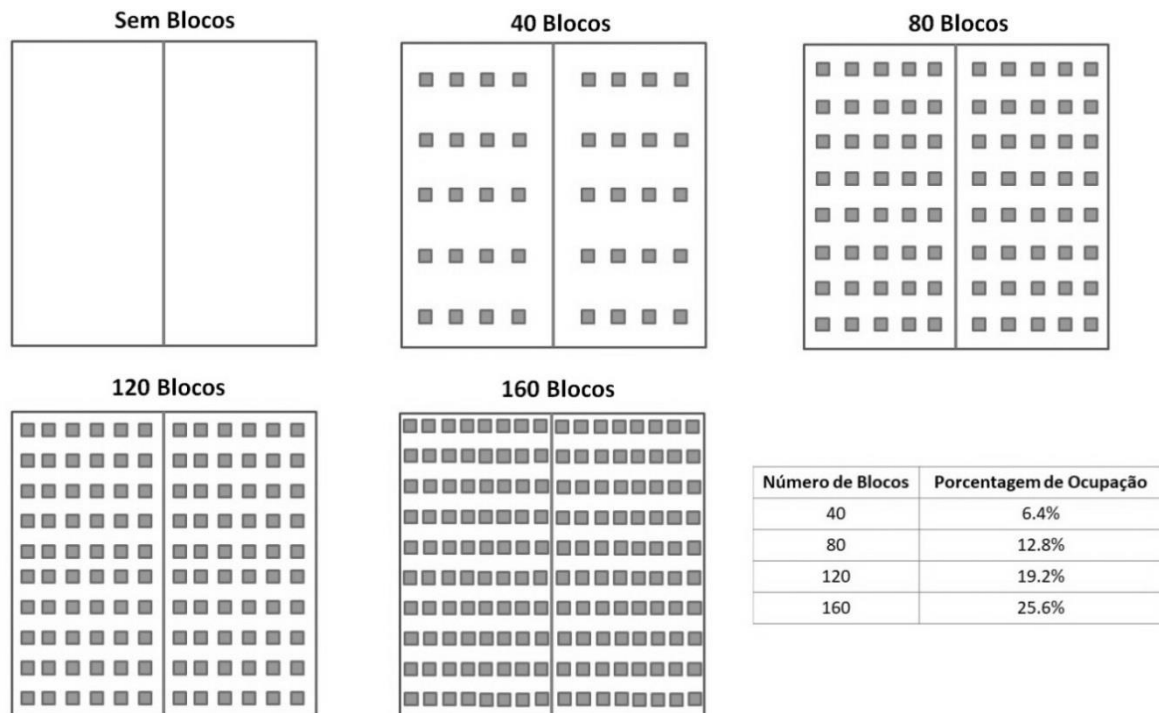
Figura 11 - Disposição do material solúvel sobre a superfície (P₁, P₂, P₃, P₄ ou P₅).



Fonte: Da autora.

Os blocos que simulam a densidade de ocupação são distribuídos de forma simétrica na superfície e estão alocados de acordo com as montagens ilustradas na Figura 12.

Figura 12 - Disposição dos blocos sobre a superfície e suas respectivas porcentagens de ocupação.



Fonte: Da autora.

Após o posicionamento dos blocos e do material solúvel, de acordo com os valores estabelecidos no delineamento experimental, um condutivímetro (marca *Vernier*, modelo *CON-BTA*) e um sensor de nível (sonda *levellogger* da marca *Solinst*, modelo *3001*) são posicionados próximos ao ponto exutório. O vertedor instalado no final da calha permite que um certo volume de água fique acumulado, facilitando as medições de nível e condutividade elétrica. Essas medições são necessárias para a elaboração de hidrogramas e polutogramas.

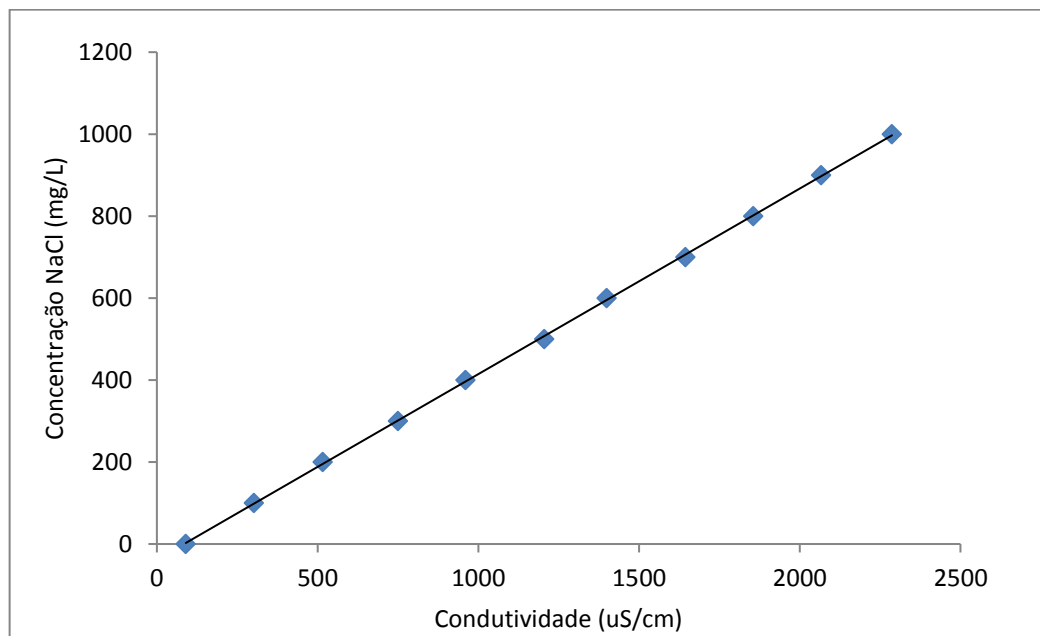
Após isto, o simulador é ligado e a condutividade elétrica e a variação no nível de água são medidas constantemente, em intervalos de 2 segundos. Os dados são coletados durante o tempo de precipitação e um tempo referente ao escoamento

superficial restante e esvaziamento da bacia de detenção. Os tempos referentes à duração total de medição variam de acordo com a duração de precipitação. Como padrão, as medidas são coletadas até o ponto no qual o escoamento final passa a ser do mesmo valor que o escoamento inicial.

4.5 CALIBRAÇÃO

Para a conversão do valor da condutividade elétrica medida em massa de cloreto de sódio transportada para posterior cálculo da descarga mássica presente no polutograma, foi necessária a realização de um teste de calibração, cujo resultado está presente na figura 13. Para a obtenção da curva de calibração, realizou-se em laboratório a diluição de massas de poluente solúvel (NaCl) em um litro de água proveniente do reservatório de alimentação do simulador de chuva. A cada grama 100 miligramas de cloreto de sódio adicionado a água, a condutividade elétrica da solução era medida.

Figura 13- Curva de calibração da condutividade em relação à concentração de sal.



Fonte: Da autora.

Com o ajuste linear foi possível a obtenção da Equação 8, que possui um coeficiente de determinação (R^2) de 0,9998.

$$Y = 0,4527 \cdot X - 38,213 \quad (8)$$

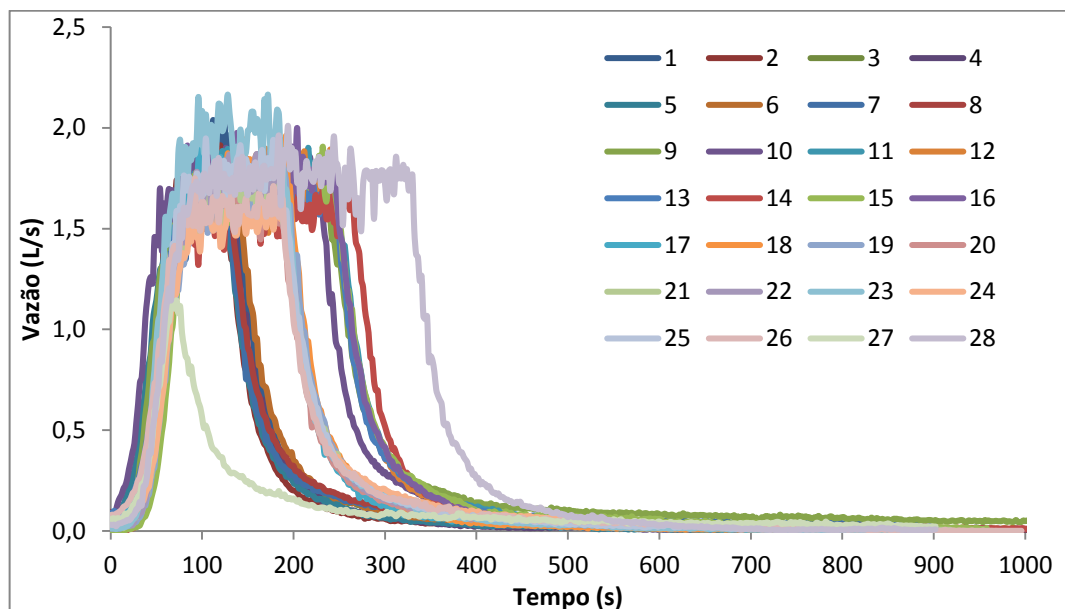
Na qual, Y é a concentração de cloreto de sódio (mg/L) e X é a condutividade elétrica ($\mu\text{S/cm}$).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 HIDROGRAMAS E POLUTOGRAMAS

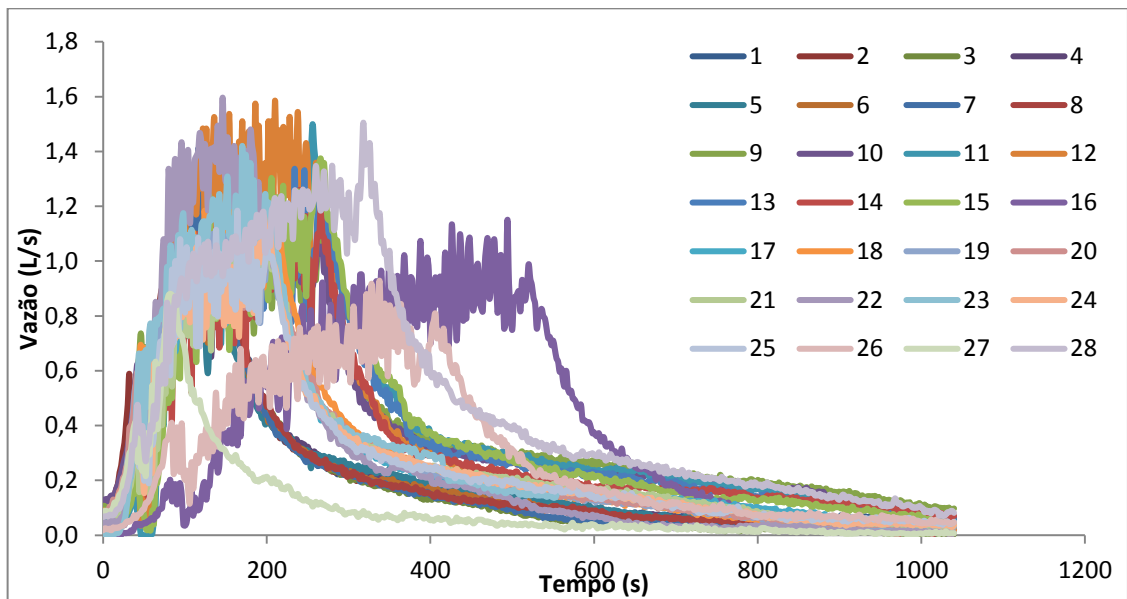
A Figura 14 apresenta os hidrogramas obtidos nos 28 ensaios realizados de acordo com o roteiro de ensaio elaborado através do método do DCCR, para o cenário sem bacia de detenção, enquanto a Figura 15 apresenta os hidrogramas obtidos para o cenário com bacia de detenção.

Figura 14 - Hidrogramas referentes aos ensaios realizados sem bacia de detenção.



Fonte: Da autora.

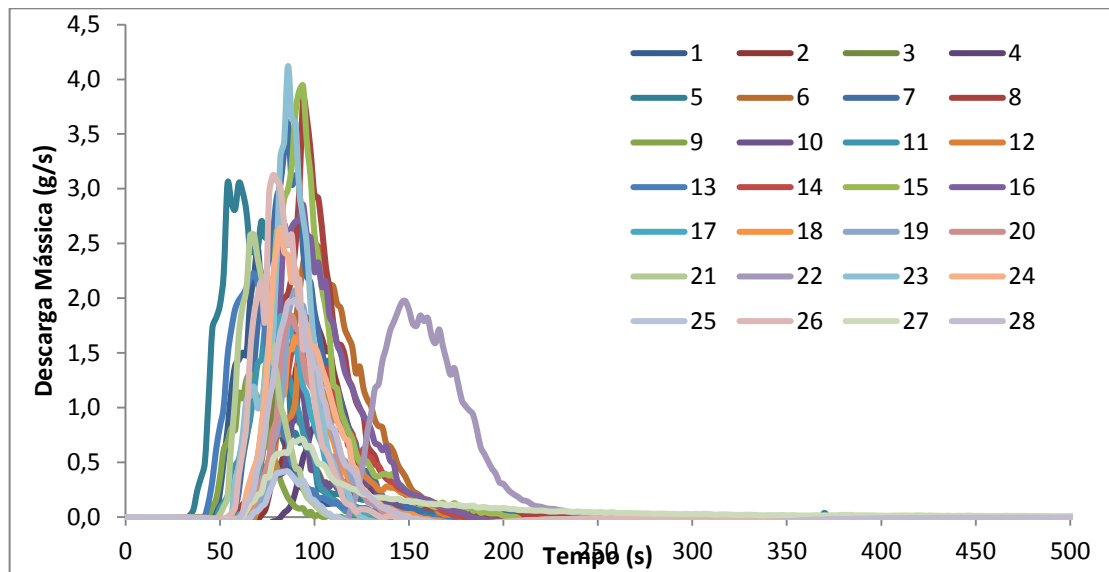
Figura 15 - Hidrogramas referentes aos ensaios realizados com bacia de detenção.



Fonte: Da autora.

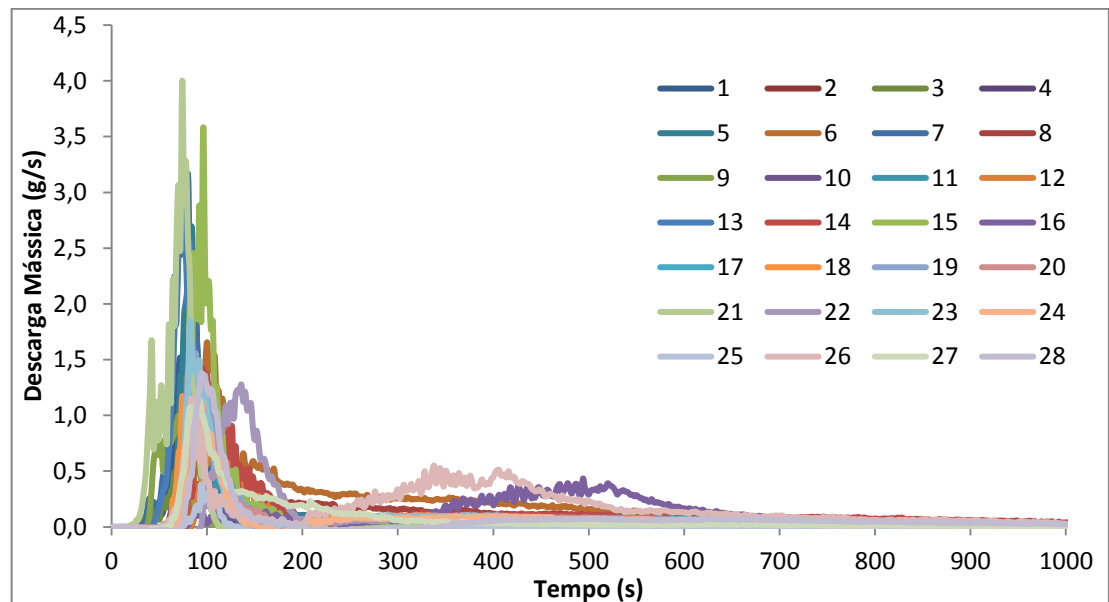
Os gráficos da descarga mássica em relação ao tempo, denominados polutogramas, são apresentados nas Figuras 16 e 17 para ambos os cenários.

Figura 16 - Polutogramas referentes aos ensaios realizados sem bacia de detenção.



Fonte: Da autora.

Figura 17 - Polutogramas referentes aos ensaios realizados com bacia de detenção



Fonte: Da autora.

Nota-se que a análise de 56 hidrogramas e 56 polutogramas de ensaios distintos sem a utilização das ferramentas do delineamento experimental se mostra árdua e inconclusiva. Dessa forma, os dados referentes às variáveis dependentes extraídos

dos hidrogramas e polutogramas foram agrupados nas Tabelas 4 e 5 para seu posterior uso na ferramenta *Protimiza Experimental Design*.

Tabela 4 - Valores extraídos dos experimentos realizados sem bacia de detenção

Ensaio	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅	Y ₆	Y ₇	Y ₈
1	2,02	227,2	2,46	70	46	132	28,9	96,3
2	1,95	217,1	1,82	100	72	184	29,5	98,3
3	1,80	206,4	2,60	86	66	126	32,6	100,0
4	1,84	202,7	2,11	106	84	166	30,4	100,0
5	1,76	214,5	6,11	60	34	690	61,0	87,1
6	1,90	227,5	4,94	102	68	658	57,0	81,4
7	1,77	215,4	7,21	86	56	348	63,1	90,1
8	1,90	233,1	7,62	94	58	312	61,4	87,7
9	1,72	447,0	2,61	66	44	108	30,9	100,0
10	1,86	423,7	2,46	92	66	152	29,7	99,1
11	1,90	428,5	4,37	78	50	118	27,1	90,3
12	1,96	400,2	3,31	92	70	168	28,6	95,3
13	1,80	409,7	4,45	68	42	152	70,4	100,0
14	1,71	395,1	3,33	90	66	178	70,4	100,0
15	1,88	408,3	7,88	94	66	206	63,0	90,0
16	1,97	419,2	5,71	94	64	182	60,8	86,9
17	1,92	304,4	3,66	82	60	136	50,3	100,0
18	1,95	313,6	3,29	90	64	154	51,8	100,0
19	1,84	303,8	4,14	90	68	142	49,3	98,7
20	1,78	300,5	3,68	88	62	142	50,4	100,0
21	1,80	302,6	5,16	68	50	108	50,8	100,0
22	1,91	309,8	1,98	148	120	282	50,7	100,0
23	2,16	347,8	8,24	86	58	124	48,6	97,2
24	1,62	293,8	5,28	82	62	144	42,1	84,2
25	1,95	324,6	0,83	86	68	112	9,4	94,3
26	1,75	307,3	6,24	78	54	142	90,9	100,0
27	1,13	119,9	1,42	94	62	900	45,2	90,4
28	1,96	552,0	3,97	90	62	150	50,5	100,0

Fonte: Da autora.

Tabela 5 - Valores extraídos dos experimentos realizados com bacia de detenção

Ensaio	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅	Y ₆	Y ₇	Y ₈
1	1,08	228,5	0,85	76	44	1200	25,2	84,0
2	1,17	222,4	0,39	92	72	1200	24,4	81,3
3	1,20	199,9	1,51	82	28	1200	29,0	96,7
4	1,03	209,7	0,53	102	82	1200	27,0	90,0
5	0,91	208,0	2,69	84	62	1200	56,7	81,0
6	1,10	203,6	1,66	100	76	1200	39,3	56,1
7	1,41	217,6	3,18	74	30	1200	60,2	86,0
8	1,14	215,2	0,98	92	72	1200	58,4	83,4
9	1,09	442,4	1,00	70	36	1200	23,5	78,3
10	1,20	419,6	0,48	74	54	1200	23,8	79,3
11	1,50	419,1	1,35	90	72	1200	25,5	85,0
12	1,59	405,3	0,80	108	84	1200	27,6	92,0
13	1,34	408,1	2,82	74	44	1200	69,0	98,6
14	1,26	385,5	1,42	96	74	1200	67,0	95,7
15	1,35	398,4	3,58	96	76	1200	61,8	88,3
16	1,02	404,6	0,43	494	78	1200	56,6	80,9
17	1,13	303,5	1,10	100	66	1200	48,8	97,6
18	1,22	316,7	1,22	88	62	1200	48,5	97,0
19	1,22	305,4	1,63	84	68	1200	47,8	95,6
20	1,11	307,1	1,10	90	56	1200	46,1	92,2
21	1,14	298,2	4,00	74	10	1200	48,8	97,6
22	1,60	312,6	1,28	136	94	1200	44,1	88,2
23	1,42	335,7	1,84	82	38	1200	47,6	95,2
24	1,16	299,2	1,11	94	68	1200	41,0	82,0
25	1,18	302,4	0,38	94	74	132	3,7	37,0
26	0,92	311,2	1,15	84	52	1200	87,8	97,6
27	0,88	112,6	1,14	92	58	1200	43,3	86,6
28	1,51	526,8	1,38	94	74	1200	39,2	78,4

Fonte: Da autora.

5.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

Foram realizadas avaliações estatísticas para todas as variáveis dependentes do estudo, obtidas a partir dos experimentos propostos no DCCR para quatro variáveis independentes nos dois cenários.

5.2.1 Vazão de pico (Y_1)

Os valores da vazão de pico variaram de 1,13 L/s (ensaio 27) a 2,16 L/s (ensaio 23) para o cenário sem bacia de retenção e de 0,88 L/s (ensaio 27) a 1,60 L/s (ensaio 22) para o cenário com bacia de retenção. Os menores valores da vazão de pico ocorreram no ensaio 27, já que este é o único ensaio com 1 minuto de precipitação. Este tempo é menor que o tempo de concentração da bacia de 88 segundos, por isso não se observa a formação de patamar no hidrograma deste ensaio.

O tempo de concentração da bacia foi calculado através da média dos tempos de pico das precipitações. No tempo médio de 88 segundos, a maior parte das precipitações atingiram seu valor de pico, formando um patamar que se estendeu até o final da duração da chuva.

Os coeficientes obtidos pela análise de múltipla regressão para a variável dependente Y_1 estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Coeficientes de regressão para a resposta Y_1 , para ambos os cenários

Cenário	Parâmetro	Coeficiente	Erro Padrão	t calc.	p-valor	R ² (%)
Sem bacia	X_4^*	-0,07	0,03	-2,39	0,024	18,00
Com bacia	X_4^*	0,11	0,03	3,10	0,005	26,98

Fonte: Da autora. * Coeficiente não significativo

Para o cenário sem bacia de retenção, a variável Y_1 não mostrou dependência a nenhuma das variáveis independentes, a um nível de confiança de

99%, já que o p-valor foi maior que o nível de significância de 0,01 (1%). O modelo resultante apresentou a média das vazões de pico amostradas, que é 1,84 L/s.

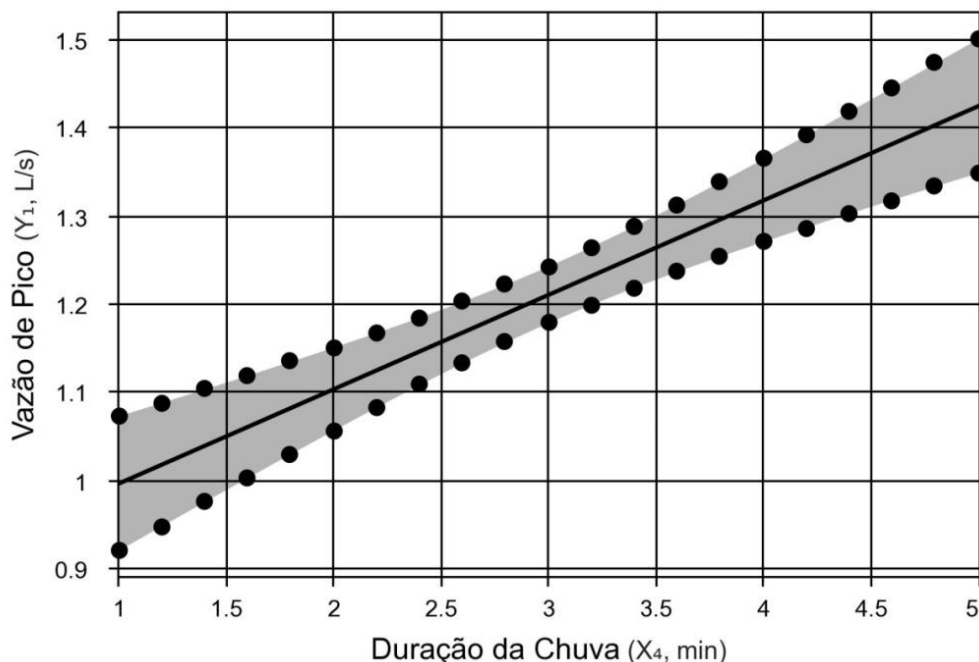
Quanto ao cenário com bacia de detenção, o modelo ajustado mostrou que a variável Y_1 é dependente da variável X_4 , isto é, neste experimento, a duração da chuva interfere no valor da vazão de pico neste cenário, para um nível de confiança de 99%.

Com a obtenção do parâmetro foi possível o ajuste da Equação 9.

$$Y_1 = 1,21 + 0,11 \cdot X_4 \quad (9)$$

A Figura 18 apresenta a superfície de resposta para a variável Y_1 .

Figura 18 - Superfície de resposta da variável Y_1 em relação à variável X_4 para o cenário com bacia de detenção.



Fonte: Da autora.

Percebe-se que conforme a duração da chuva é maior, a vazão de pico também tende a ser maior no cenário com bacia de detenção, já que as variáveis Y_1 e X_4 apresentam uma relação linear.

Como pode-se observar, o coeficiente de correlação do ajuste apresentou um valor baixo (26,98%), o que mostra que o modelo não possui um bom ajuste aos dados experimentais para a variável vazão de pico no cenário com bacia de detenção.

5.2.2 Volume de água escoado (Y_2)

Os valores de volume de água escoado variaram de 119,9 L (ensaio 27) a 552,0 L (ensaio 28) para o cenário sem bacia de detenção e de 112,6 L (ensaio 27) a 526,8 L (ensaio 18) para o cenário com bacia de detenção. Considerando-se os volumes de chuva escoados, a área da superfície irrigada e os tempos de chuva, pode-se calcular a intensidade média da precipitação de 64 mm/h.

Para a variável Y_2 , os coeficientes obtidos pela análise de múltipla regressão estão apresentados na tabela 7, para um nível de confiança de 99%.

Tabela 7 - Coeficientes de regressão para a resposta Y_2 , para ambos os cenários.

Cenário	Parâmetro	Coeficiente	Erro Padrão	t calc.	p-valor	R ² (%)
Sem bacia	X_4	102,16	3,20	31,92	0,000	97,51
Com bacia	X_4	100,27	2,17	46,22	0,000	98,34

Fonte: Da autora.

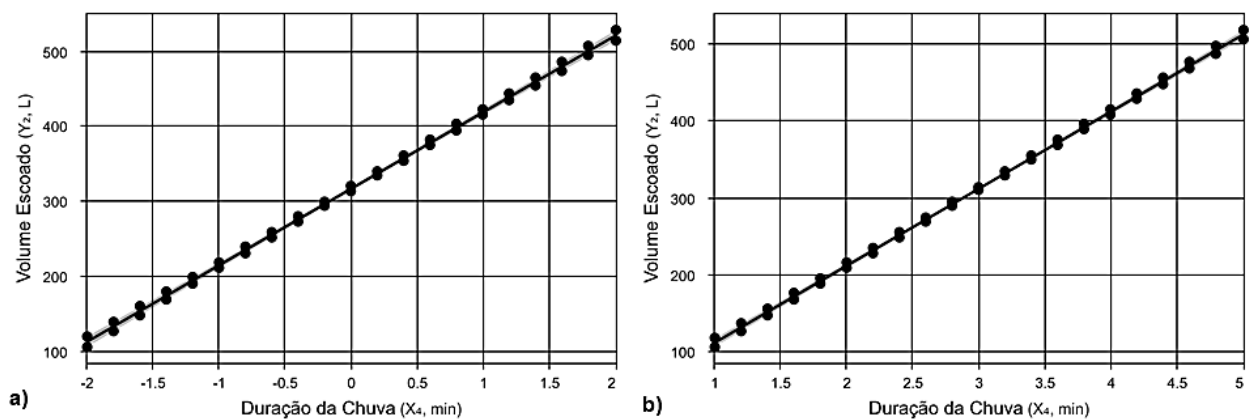
As Equações 10 e 11 mostram as relações para a variável Y_2 , para os cenários sem e com bacia de detenção, respectivamente.

$$Y_2 = 316,29 + 102,16 \cdot X_4 \quad (10)$$

$$Y_2 = 311,40 + 100,27 \cdot X_4 \quad (11)$$

A Figura 19 ilustra as superfícies de resposta para a variável Y_2 em ambos os cenários.

Figura 19 - Superfícies de resposta da variável Y_2 em relação ao parâmetro X_4 , sendo a) cenário sem bacia e b) cenário com bacia.



Fonte: Da autora.

Nota-se que para os dois cenários as superfícies de resposta tiveram resultados que seguem a mesma tendência, ou seja, a duração da chuva foi a única variável estatisticamente significativa para o volume de água escoado nos dois casos.

Para ambos os cenários o coeficiente de correlação apresentou um valor muito alto (97,51% e 98,34%), o que mostra que o modelo apresenta um bom ajuste para a análise da variável dependente volume escoado para os dois cenários.

5.2.3 Descarga mássica de pico (Y_3)

Os valores de descarga mássica de pico variaram de 0,83 g/s (ensaio 25) a 8,24 g/s (ensaio 23) para o cenário sem bacia de detenção e de 0,38 g/s (ensaio 25) a 4,00 g/s (ensaio 21) para o cenário com bacia de detenção. Para a variável Y_3 , os

coeficientes obtidos pelo modelo estão presentes na Tabela 8. para um nível de confiança de 95%.

Tabela 8 - Coeficientes de regressão para a resposta Y_3 , para ambos os cenários.

Cenário	Parâmetro	Coeficiente	Erro Padrão	t calc.	p-valor	R^2 (%)
Sem bacia	X_1	-0,53	0,23	-2,30	0,031	72,46
	X_2^2	0,83	0,22	3,86	0,001	
	X_3	1,51	0,23	6,55	0,000	
Com bacia	X_1	-0,66	0,07	-9,31	0,000	89,86
	X_1^2	0,33	0,07	4,92	0,000	
	X_3	0,47	0,07	6,74	0,000	
	X_3^2	-0,14	0,07	-2,10	0,048	
	$X_1 \cdot X_2$	-0,22	0,09	-2,52	0,020	
	$X_1 \cdot X_3$	-0,33	0,09	-3,82	0,001	

Fonte: Da autora.

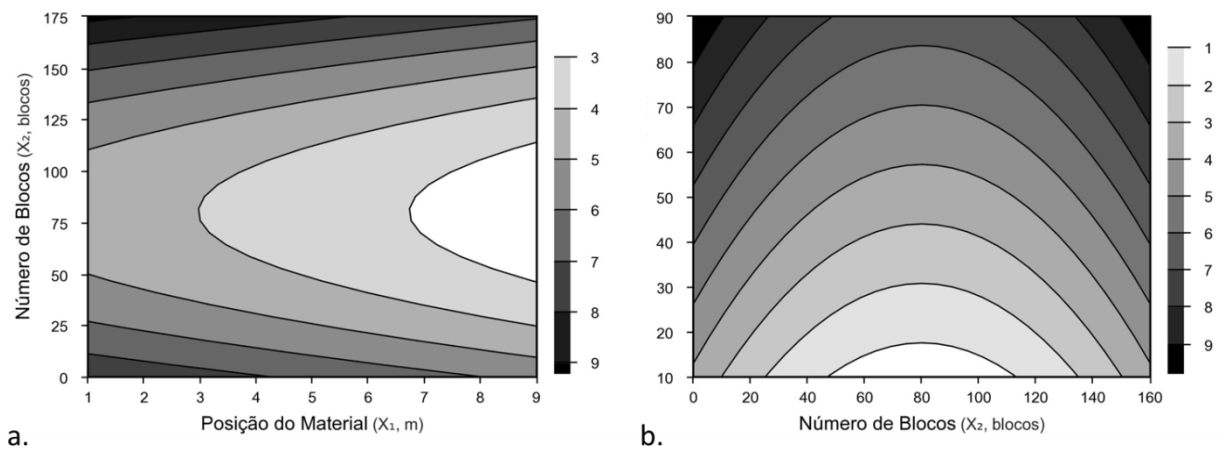
No caso da variável dependente Y_3 a Equação 12 considera o efeito linear dos parâmetros X_1 e X_3 e o efeito quadrático do parâmetro X_2 , para o cenário sem bacia de detenção. Para o outro cenário, a Equação 13 considera os efeitos lineares e quadráticos das variáveis X_1 e X_3 e as interações entre X_1 e X_2 e entre X_1 e X_3 .

$$Y_3 = 3,46 - 0,53 \cdot X_1 + 0,83 \cdot X_2^2 + 1,51 \cdot X_3 \quad (12)$$

$$Y_3 = 1,30 - 0,66 \cdot X_1 + 0,33 \cdot X_1^2 + 0,47 \cdot X_3 - 0,14 \cdot X_3^2 - 0,22 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,33 \cdot X_1 \cdot X_3 \quad (13)$$

A Figura 20a apresenta a superfície de resposta da variável dependente descarga mássica de pico em relação às variáveis independentes posição do material e número de blocos, para o cenário sem bacia de detenção, enquanto a Figura 20b apresenta a superfície de resposta da mesma variável dependente em relação às variáveis independentes número de blocos e massa do material, para o mesmo cenário.

Figura 20 - Superfície de resposta da variável Y_3 em relação às variáveis: a) X_1 e X_2 , b) X_2 e X_3 , ambas para o cenário sem bacia de detenção.



Fonte: Da autora.

Na Figura 20a nota-se que para posições mais distantes do ponto exutório da bacia o valor da descarga mássica de pico diminuiu, tendo seus valores máximos nas posições mais próximas do ponto exutório (1 a 3 metros) e seus valores mínimos nas posições mais afastadas (7 a 9 metros).

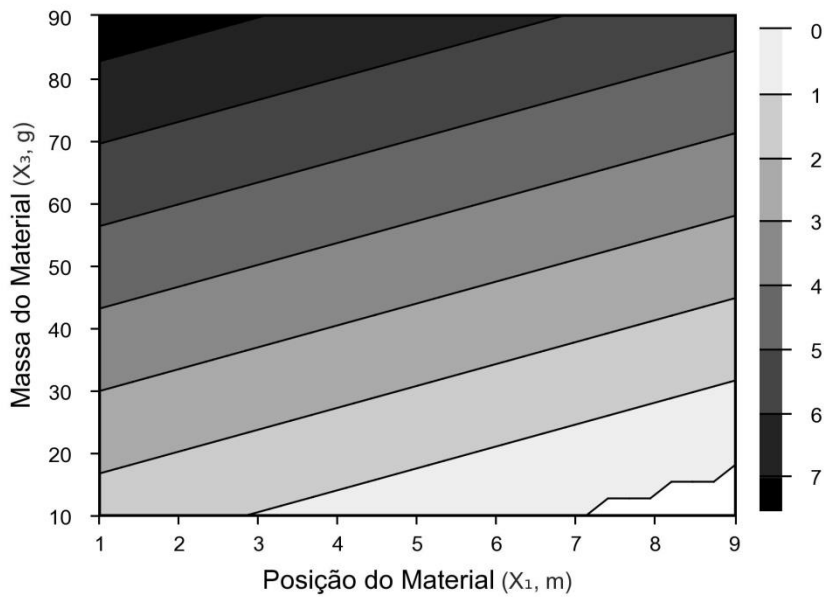
Nota-se, nas Figura 20a e 20b que a variável Y_3 é maior para as condições com número mínimo e máximo de blocos, enquanto Y_3 é menor nas condições intermediárias de número de blocos, próximo ao ponto central (80 blocos).

Sem blocos o transporte de material ocorre de maneira mais rápida e tende a diminuir com o aumento do número de blocos que provocam obstáculos à passagem do escoamento. No entanto, após o número de 80 blocos o valor de Y_3 aumenta, para um mesmo valor de posição do material, provavelmente devido ao fato de que com o aumento do número de blocos a área disponível para o escoamento diminui, o que aumenta a velocidade do escoamento.

Verifica-se pela Equação 12 que a variável independente que mais apresenta influência em Y_3 é o número de blocos, pois está presente de maneira quadrática na equação.

A Figura 21 apresenta a superfície de resposta da variável dependente descarga mássica de pico em relação às variáveis independentes posição do material e massa do material, para o cenário sem bacia de detenção.

Figura 21 - Superfície de resposta da variável Y_3 em relação às variáveis X_1 e X_3 para o cenário sem bacia de detenção.

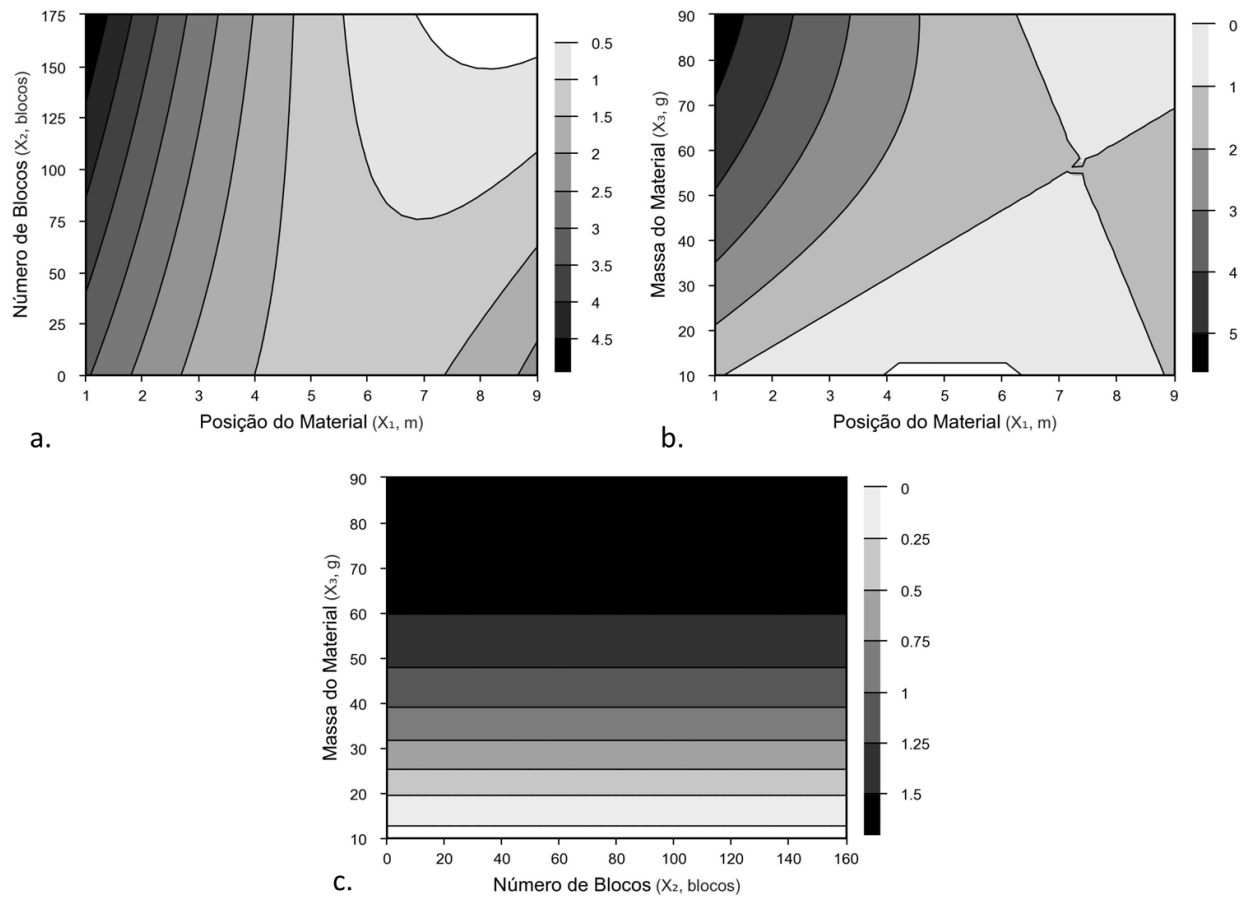


Fonte: Da autora.

De acordo com a Figura 21, a descarga mássica de pico é maior quando a posição do material é mais próxima da saída e a sua massa é maior. Para uma mesma faixa de valor de massa de material, conforme sua posição for mais distante da saída, menor será a descarga mássica de pico.

A Figura 22 apresenta a superfície de resposta da variável dependente descarga mássica de pico em relação às variáveis independentes: a) posição do material e número de blocos, b) posição do material e massa do material e c) número de blocos e massa do material, todas para o cenário com bacia de detenção.

Figura 22 - Superfície de resposta da variável Y_3 em relação às variáveis: a) X_1 e X_2 , b) X_1 e X_3 , c) X_2 e X_3 , todas para o cenário com bacia de detenção.



Fonte: Da autora.

Observa-se o notório efeito de amortecimento da bacia de detenção com relação à variável dependente Y_3 , quando comparado ao transporte de material no cenário sem bacia de detenção (Figura 20).

Na Figura 22a, nota-se que a descarga mássica de pico é maior quando a posição do material é mais próxima ao ponto exutório e quando há um maior número de blocos. A menor descarga mássica de pico ocorre quando o material está mais distante do ponto exutório e quando há também um número maior de blocos.

Com muitos blocos e posição mais próxima do material, a bacia de detenção não consegue amortecer o transporte tanto quanto ocorre na situação com maior número de blocos e posição mais distante do material.

Observa-se na figura 22b que Y_3 é máxima quando a posição do material é mais próxima da saída e a sua massa é maior.

Percebe-se através da Figura 22c que conforme maior é a massa do material, maior é a descarga mássica de pico, de maneira homogênea entre os diferentes números de blocos.

5.2.4 Tempo de pico do polutograma (Y_4)

Os valores de tempo de pico do polutograma variaram de 60s (ensaio 5) a 148s (ensaio 22) para o cenário sem bacia de detenção e de 70s (ensaio 9) a 494s (ensaio 16) para o cenário com bacia de detenção. Observa-se que a bacia de detenção conseguiu amortecer a descarga mássica de pico, mas manteve aproximadamente o mesmo tempo de pico do polutograma, com exceção do ensaio 16.

Para a variável Y_4 , os coeficientes de regressão para a resposta Y_4 no cenário sem bacia de detenção estão apresentados na Tabela 9. Para o cenário com bacia, o ajuste concluiu que nenhuma das variáveis independentes demonstraram uma interferência significativa, já que os valores obtidos de probabilidade de significância (p-valor) foram maiores que o nível de significância de 5%. Dessa forma, apenas o cenário sem bacia foi analisado através do modelo. para um nível de confiança de 95%.

Tabela 9 - Coeficientes de regressão para a resposta Y_4 , para ambos os cenários.

Cenário	Parâmetro	Coeficiente	Erro Padrão	t calc.	p-valor	R^2 (%)
Sem bacia	x_1	13,42	1,76	7,62	0,000	
	x_1^2	4,86	1,65	2,95	0,007	74,97
	$x_1 \cdot x_2$	-4,87	2,16	-2,26	0,033	
Com bacia	x_1^*	26,50	15,27	1,73	0,094	10,38

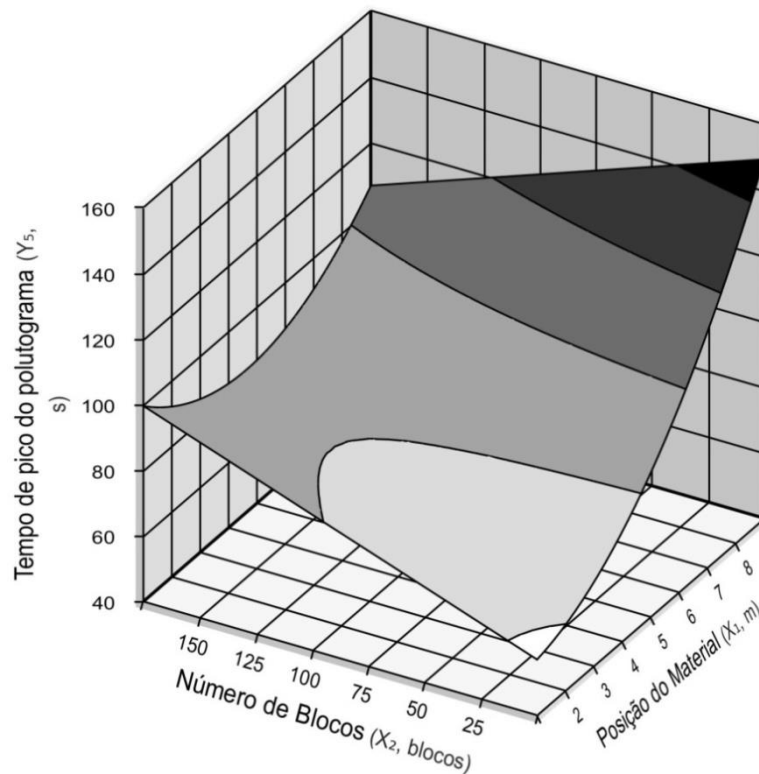
Fonte: Da autora. * Coeficiente não significativo

Para a variável independente Y_4 , o modelo proposto considera na Equação 14 os parâmetros X_1 , X_1^2 e a interação entre X_1 e X_2 , ou seja, a posição do material tanto em seu efeito linear quanto quadrático e a sua interação com o número de blocos. Observa-se que X_1 é a variável independente de maior influência no modelo.

$$Y_4 = 83.69 + 13.42 \cdot X_1 + 4.86 \cdot X_1^2 - 4.87 \cdot X_1 \cdot X_2 \quad (14)$$

A Figura 23 ilustra a relação entre variável dependente tempo de pico do polutograma e as variáveis independentes posição do material e número de blocos, para o cenário sem bacia de detenção.

Figura 23 - Superfície de resposta da variável Y_4 em relação às variáveis X_1 e X_2 para o cenário sem bacia de detenção.



Fonte: Da autora.

Pela Figura 23 nota-se que o tempo de pico do polutograma é maior quando há o número mínimo de blocos e a posição do material é máxima e menor quando o número de blocos é baixo e a posição do material é mais próxima da saída.

5.2.5 Tempo inicial do polutograma (Y_5)

Os valores de tempo inicial do polutograma variaram de 34s (ensaio 5) a 120s (ensaio 22) para o cenário sem bacia de detenção e de 10s (ensaio 21) a 94s (ensaio 22) para o cenário com bacia de detenção.

Para a variável Y_5 , o modelo proposto considerou relevantes os parâmetros X_1 e X_1^2 , no cenário sem bacia, e os parâmetros X_1 , X_2 e a interação entre X_2 e X_4 no cenário com bacia de detenção, para um nível de confiança de 95%. A Tabela 10 e as Equação 15 e 16 demonstram esta relação.

Tabela 10 - Coeficientes de regressão para a resposta Y_5 , para ambos os cenários

Cenário	Parâmetro	Coeficiente	Erro Padrão	t calc.	p-valor	R^2 (%)
Sem bacia	X_1	11,83	1,96	6,024	0,000	63,71
	X_1^2	5,06	1,84	2,755	0,011	
Com bacia	X_1	15,33	2,21	6,95	0,000	72,91
	X_2	5	2,21	2,27	0,033	
	$X_2 \cdot X_4$	9	2,70	3,33	0,003	

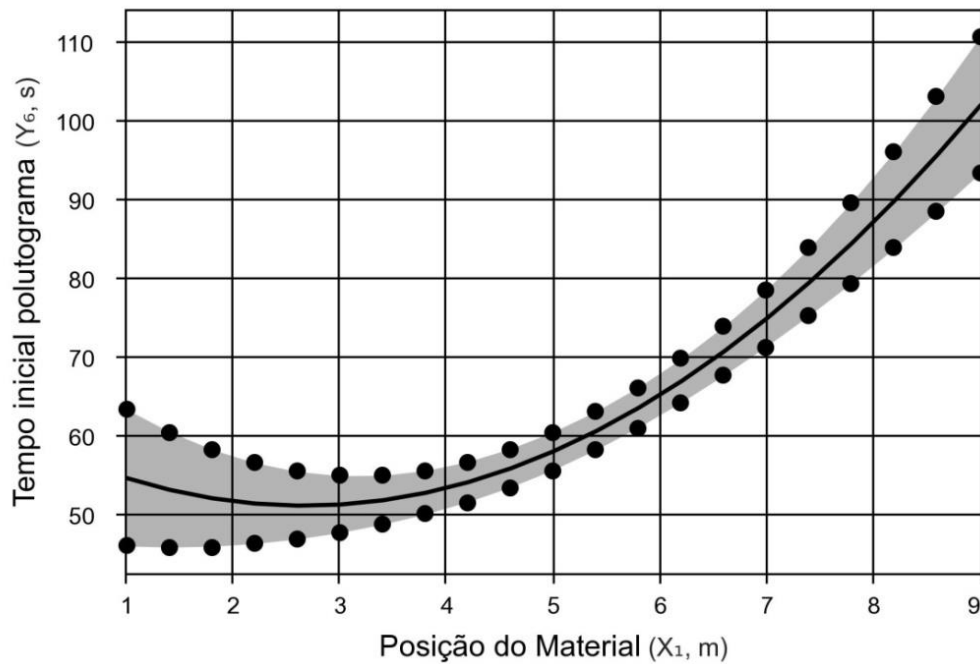
Fonte: Da autora.

$$Y_5 = 57,87 + 11,83 \cdot X_1 + 5,06 \cdot X_1^2 \quad (15)$$

$$Y_5 = 60,86 + 15,33 \cdot X_1 + 5 \cdot X_2 + 9 \cdot X_2 \cdot X_4 \quad (16)$$

A superfície de resposta para o cenário sem bacia de detenção está ilustrada na Figura 24.

Figura 24 - Superfície de resposta da variável Y_5 em relação à variável X_1 para o cenário sem bacia de detenção.

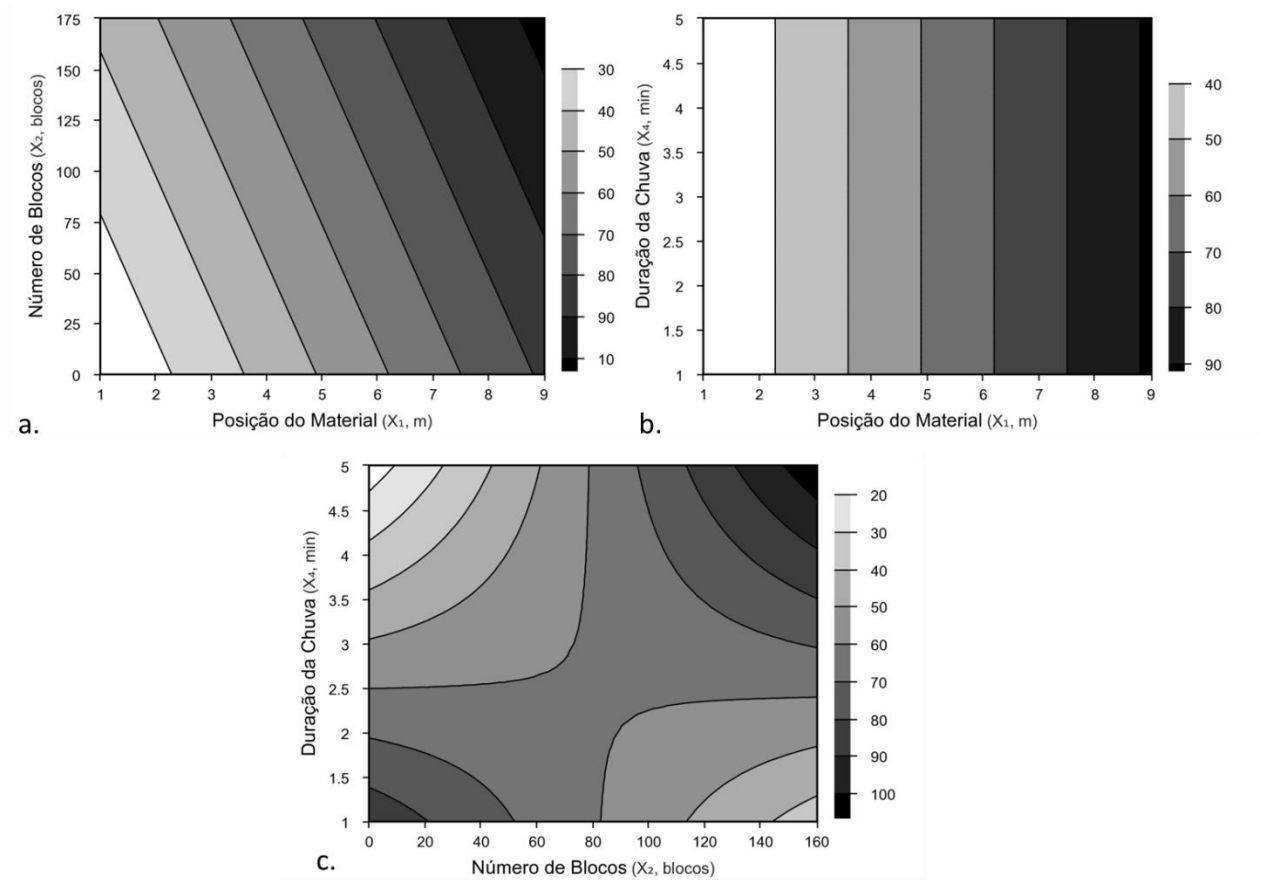


Fonte: Da autora.

Para o cenário sem bacia de detenção, nota-se que a posição do material tem uma influência linear e quadrática no tempo de início do polutograma.

A Figura 25 apresenta a superfície de resposta da variável dependente tempo inicial do polutograma em relação às variáveis independentes: a) posição do material e número de blocos, b) posição do material e duração da chuva e c) número de blocos e duração da chuva, todas para o cenário com bacia de detenção.

Figura 25 - Superfície de resposta da variável Y_5 em relação às variáveis: a) X_1 e X_2 , b) X_1 e X_4 , c) X_2 e X_4 , todas para o cenário com bacia de detenção.



Fonte: Da autora.

Percebe-se na Figura 25a que conforme mais distante é a posição do material, maior é o tempo de início do polutograma, porém o número de blocos intensifica essa relação, ou seja, para uma mesma posição do material, o tempo de início do polutograma pode ser maior se o número de blocos também for maior.

Nota-se, através da Figura 25b que quanto mais distante é a posição do material da saída, maior é o valor de Y_5 para uma mesma duração da chuva.

Observa-se na Figura 25c, que para uma situação com número de blocos tendendo a zero e duração da chuva maior, o tempo de pico do polutograma foi o menor registrado. Para as situações com alto número de blocos e alta duração da chuva e baixo número de blocos e baixa duração da chuva, os tempos iniciais do polutograma foram os maiores registrados.

5.2.6 Tempo final do polutograma (Y_6)

Os valores de tempo final do polutograma variaram de 108s (ensaio 9) a 900s (ensaio 27) para o cenário sem bacia de detenção e de 132s (ensaio 25) a 1200s (praticamente todos os ensaios) para o cenário com bacia de detenção. Esta é mais uma variável dependente que confirma o efeito do amortecimento da bacia de detenção.

Para a variável Y_6 o modelo considerou os parâmetros X_3 , X_4 , X_4^2 e a interação $x_3 \cdot x_4$, para o cenário sem bacia, e os parâmetros X_3 e X_3^2 para o cenário com bacia de detenção, como pode ser visto na Tabela 11, para um nível de confiança de 95%.

Tabela 11 - Coeficientes de regressão para a resposta Y_6 , para ambos os cenários

Cenário	Parâmetro	Coeficiente	Erro Padrão	t calc.	p-valor	R^2 (%)
Sem bacia	x_3	68	21,17	3,21	0,004	76,08
	x_4	-118,83	21,17	-5,61	0,000	
	x_4^2	94,08	19,80	4,75	0,000	
	$x_3 \cdot x_4$	-76,75	25,93	-2,96	0,007	
Com bacia	x_3	89	28,84	3,09	0,005	54,63
	x_3^2	122,37	26,98	-4,54	0,000	

Fonte: Da autora.

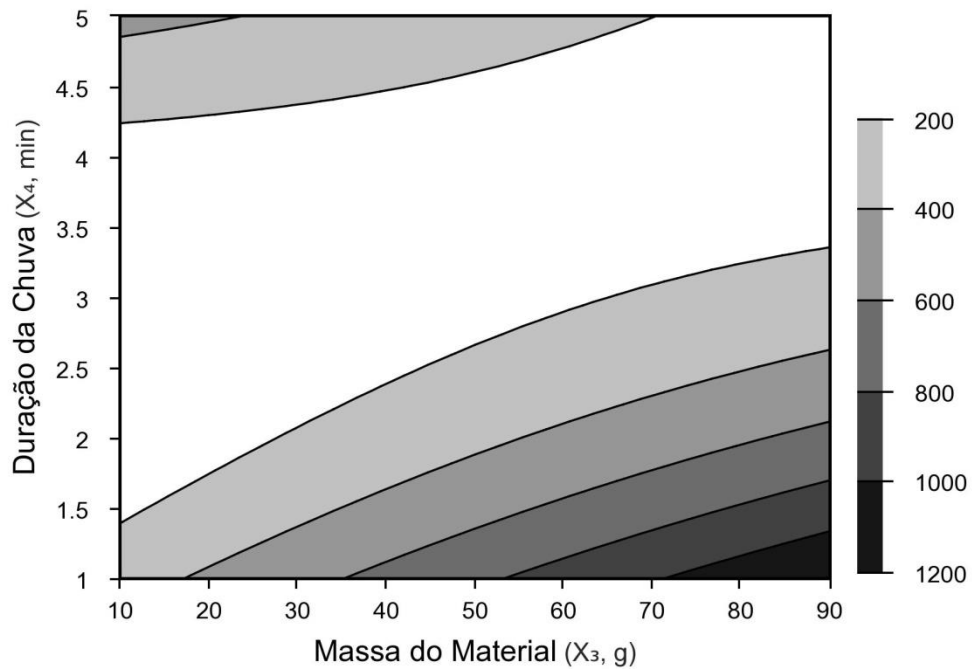
As equações 17 e 18 apresentam as relações para o cenário sem bacia e com bacia de detenção, respectivamente.

$$Y_6 = 148,50 + 68 \cdot X_3 - 118,83 \cdot X_4 + 94,08 \cdot X_4^2 - 76,75 \cdot X_3 \cdot X_4 \quad (17)$$

$$Y_6 = 1266,75 + 89 \cdot X_3 + 122,37 \cdot X_3^2 \quad (18)$$

As Figuras 26 e 27 mostram as superfícies de resposta para a variável Y_6 em ambos os cenários.

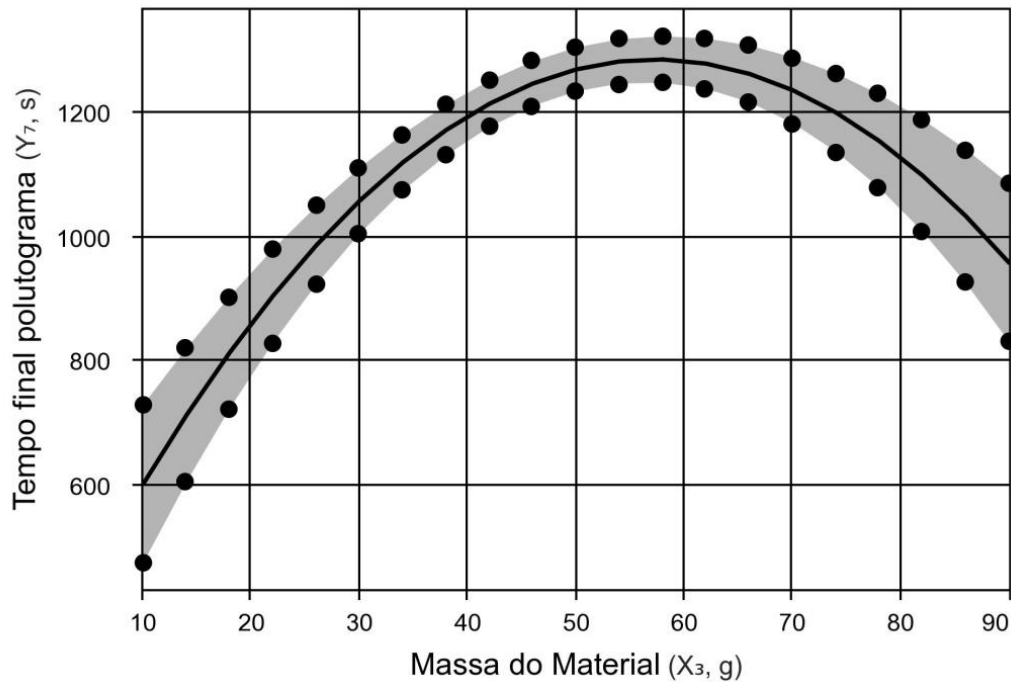
Figura 26 - Superfície de resposta da variável Y_6 em relação às variáveis X_3 e X_4 para o cenário sem bacia de detenção.



Fonte: Da autora.

Para o cenário sem bacia de detenção o tempo final do polutograma é menor para durações de chuva entre 3 e 4 minutos, independentemente da massa do material. Para chuvas com duração menor que 3 minutos, o tempo final do polutograma é maior, quando maior for a massa do material. Para chuvas com duração maior que 4 minutos, acontece o inverso, o tempo final do polutograma é menor conforme maior for a massa do material.

Figura 27 - Superfície de resposta da variável Y_6 em relação à variável X_3 para o cenário com bacia de detenção.



Fonte: Da autora.

Para o cenário sem bacia de detenção, nota-se que a massa do material tem uma influência linear e quadrática no tempo final do polutograma. Ou seja, para massas do material de até 60g o tempo final do polutograma aumenta conforme maior for a massa. Para massas de material maiores que 60g, o tempo final do polutograma diminui quadraticamente.

5.2.7 Massa transportada (Y_7)

Os valores de massa transportada variaram de 9,4g (ensaio 25) a 90,9g (ensaio 26) para o cenário sem bacia de detenção e de 3,7g (ensaio 25) a 87,8g (ensaio 26) para o cenário com bacia de detenção. Para a variável Y_7 os parâmetros e coeficientes encontrados pelo modelo estão apresentados na Tabela 12, para um nível de confiança de 95%.

Tabela 12 - Coeficientes de regressão para a resposta Y_7 , para ambos os cenários

Cenário	Parâmetro	Coeficiente	Erro Padrão	t calc.	p-valor	R^2 (%)
Sem bacia	x_2^2	-1,33	0,58	-2,31	0,030	97,43
	x_3	18,02	0,62	29,21	0,000	
	$x_2 \cdot x_4$	-2,06	0,76	-2,73	0,012	
	$x_3 \cdot x_4$	1,70	0,76	2,25	0,034	
Com bacia	x_3	17,97	1,20	14,99	0,000	89,63

Fonte: Da autora.

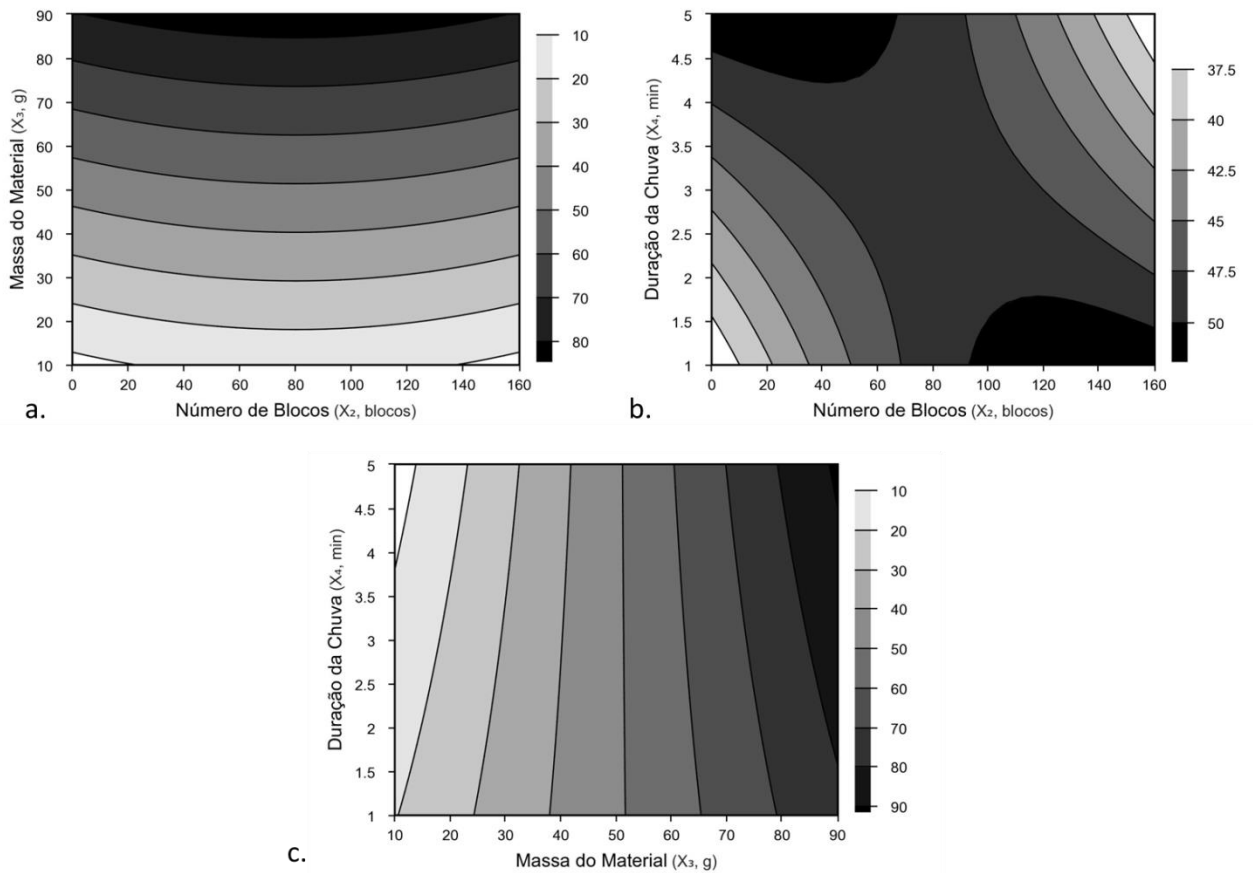
Para a variável Y_7 , o modelo proposto considera na Equação 19 os parâmetros X_2^2 , X_3 e as interações entre X_2 e X_4 e entre X_3 e X_4 para o cenário sem bacia. Para o cenário com bacia, o modelo considerou estatisticamente significativa apenas a variável X_3 , como pode-se notar na Equação 20.

$$Y_7 = 48,81 - 1,33 \cdot X_2^2 + 18,02 \cdot X_3 - 2,06 \cdot X_2 \cdot X_4 + 1,70 \cdot X_3 \cdot X_4 \quad (19)$$

$$Y_7 = 43,63 + 17,97 \cdot X_3 \quad (20)$$

As superfícies de resposta para a variável Y_7 , no cenário sem bacia, estão representadas na Figura 28.

Figura 28 - Superfície de resposta da variável Y_7 em relação às variáveis: a) X_2 e X_3 , b) X_2 e X_4 , c) X_3 e X_4 , todas para o cenário sem bacia de detenção.



Fonte: Da autora.

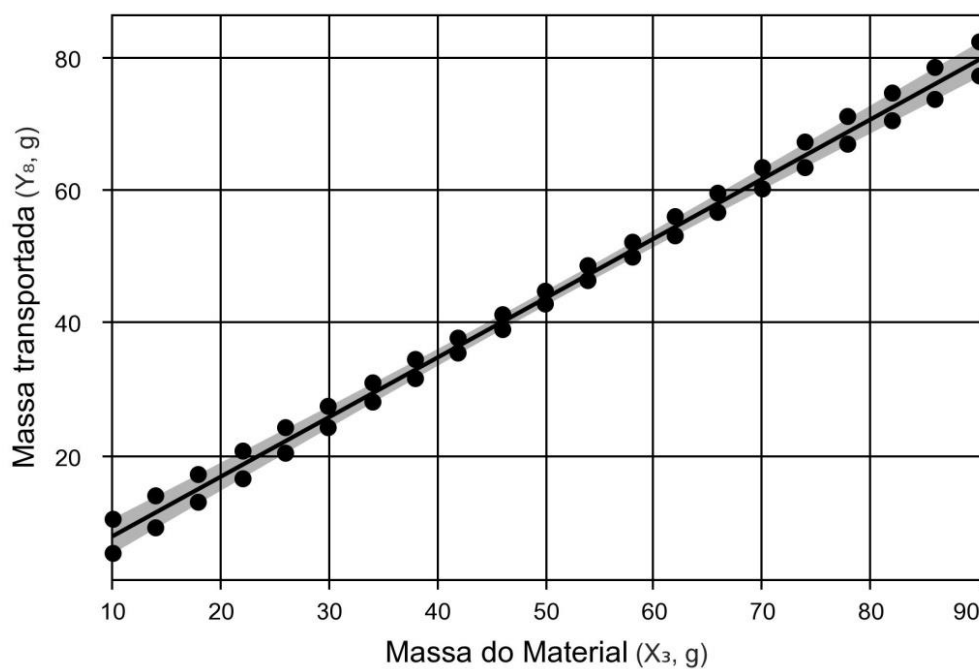
Observa-se, através da Figura 28a que a massa do material é a variável independente que mais influencia na massa transportada e que o número de blocos pouco influencia. Observando a Equação 19, embora o modelo considere como variáveis que interferem no processo, X_2 , X_3 e X_4 , o coeficiente multiplicador de X_3 é mais alto do que os demais termos da equação.

Na Figura 28b, nota-se que as menores massas transportadas ocorrem quando o número de blocos e duração da chuva são baixos ou quando o número de blocos e duração da chuva são altos. Percebe-se também, que as maiores massas transportadas ocorrem quando o número de blocos é alto e a duração da chuva é baixa ou quando o número de blocos é baixo e a duração da chuva é alta.

Percebe-se, através da Figura 28c que conforme maior a massa do material, maior também é a massa transportada e a duração da chuva causa uma pequena interferência nessa relação.

Para o cenário com bacia de detenção, tem se o gráfico da Figura 29, relacionando, de maneira linear, a massa transportada com a massa do material.

Figura 29 - Superfície de resposta da variável Y_7 em relação à variável X_3 para o cenário com bacia de detenção.



Fonte: Da autora.

Percebe-se que conforme a massa do material é maior, a massa transportada também tende a ser maior no cenário com bacia de detenção.

5.2.8 Porcentagem transportada (Y_8)

Os valores de porcentagem transportada variaram de 81,4% (ensaio 6) a 100% (diversos ensaios) para o cenário sem bacia de detenção e de 37% (ensaio 25) a 98,6% (ensaio 13) para o cenário com bacia de detenção.

Para a variável Y_8 , o modelo utilizado considera restaticamente significativos os parâmetros X_2 , X_2^2 , X_3 , X_4 e as interações $X_2 \cdot X_4$ e $X_3 \cdot X_4$ no cenário sem bacia, e o parâmetro X_3^2 no cenário com bacia de detenção. A Tabela 13 e as Equação 21 e 22 demonstram esta relação, para um nível de confiança de 95%.

Tabela 13 - Coeficientes de regressão para a resposta Y_8 , para ambos os cenários

Cenário	Parâmetro	Coeficiente	Erro Padrão	t calc.	p-valor	R^2 (%)
Sem bacia	x_2	-2,00	0,75	-2,65	0,015	68,94
	x_2^2	-2,12	0,70	-3,01	0,007	
	x_3	-1,86	0,75	-2,47	0,022	
	x_4	1,66	0,75	2,21	0,039	
	$x_2 \cdot x_4$	-3,21	0,92	-3,47	0,002	
	$x_3 \cdot x_4$	2,53	0,92	2,74	0,012	
Com bacia	X_3^2 *	-5,96	2,29	-2,60	0,015	20,63

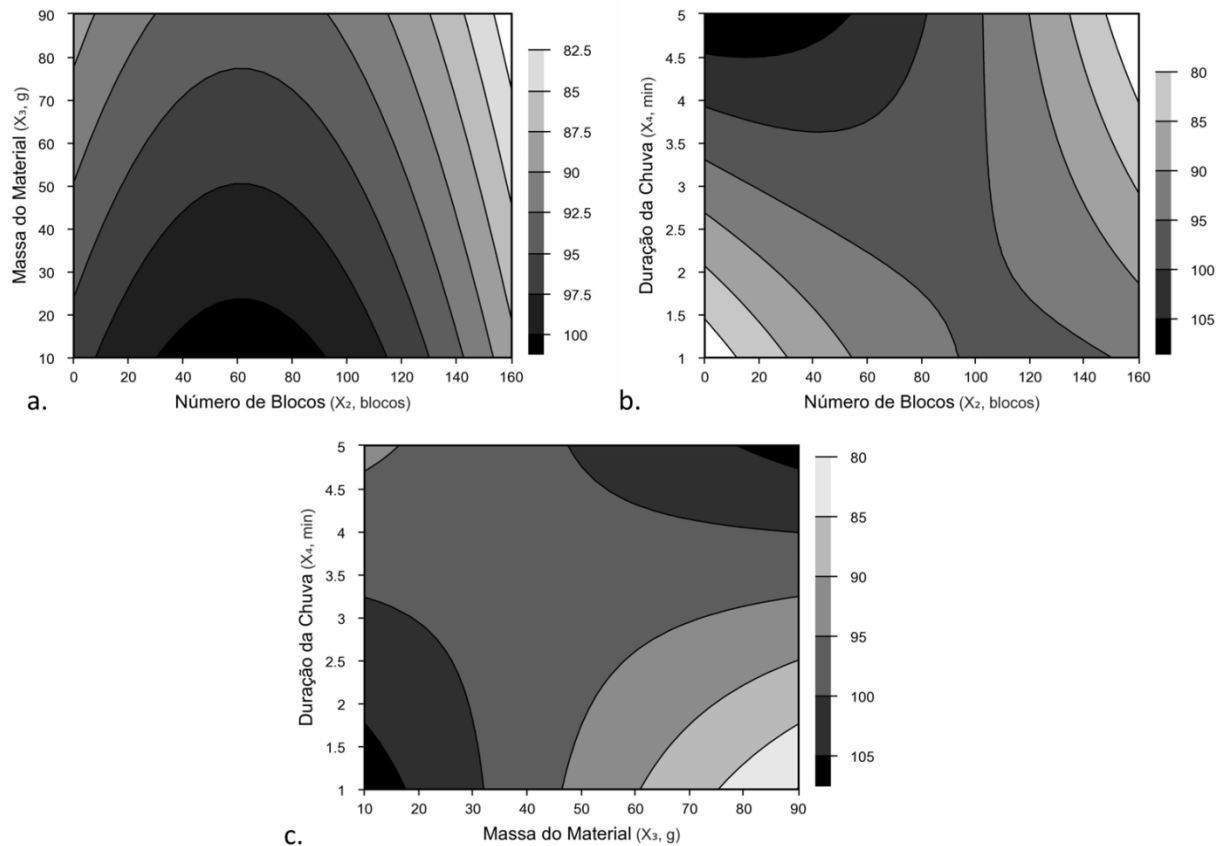
Fonte: Da autora. * Coeficiente não significativo

$$Y_8 = 97,08 - 2 \cdot X_2 - 2,12 \cdot X_2^2 - 1,86 \cdot X_3 + 1,66 \cdot X_4 - 3,21 \cdot X_2 \cdot X_4 + 2,53 \cdot X_3 \cdot X_4 \quad (21)$$

$$Y_8 = 90,88 - 5,96 \cdot X_3^2 \quad (22)$$

A Figura 30 apresenta as superfícies de resposta para a variável dependente porcentagem transportada, no cenário sem bacia de detenção, em relação às variáveis: a) massa de material e número de blocos, b) número de blocos e duração da chuva, c) massa do material e duração da chuva.

Figura 30 - Superfície de resposta da variável Y_8 em relação às variáveis: a) X_2 e X_3 , b) X_2 e X_4 , c) X_3 e X_4 , todas para o cenário sem bacia de detenção.



Fonte: Da autora.

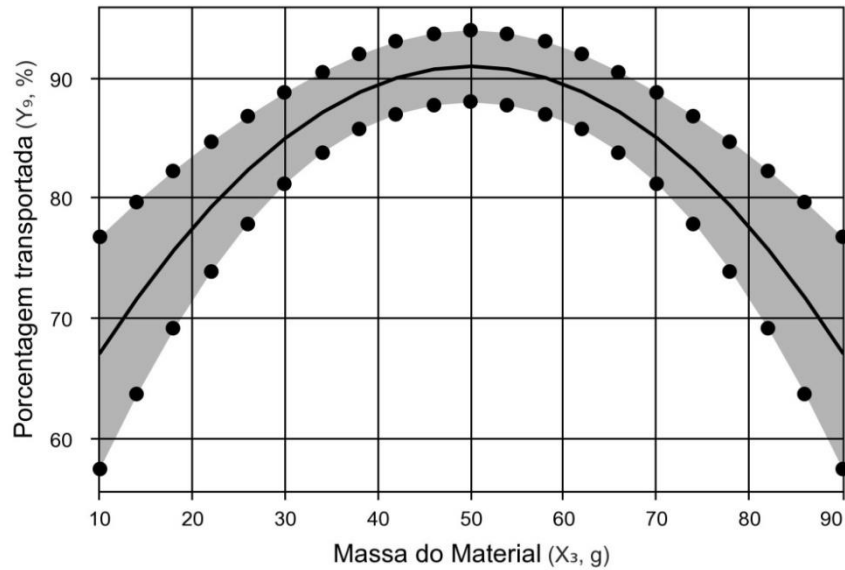
Nota-se, na Figura 30a, que a porcentagem de massa transportada é maior para menores massa de material e número de blocos entre 40 e 80. Conforme maior e menor o número de blocos, menor também é a porcentagem transportada para maiores massas do material.

Através da Figura 30b, tem-se que quanto a duração da chuva, a maior porcentagem de massa transportada ocorreu para durações altas com número de blocos baixo.

Além disso, de acordo com a Figura 30c, as maiores porcentagens de massa transportada ocorreram para massa do material e duração de chuva baixas e para massa do material e duração de chuva altas.

A Figura 31 ilustra a superfície de resposta para a variável Y_8 para o cenário com bacia de detenção.

Figura 31 - Superfície de resposta da variável Y_8 em relação à variável X_3 para o cenário com bacia de detenção.



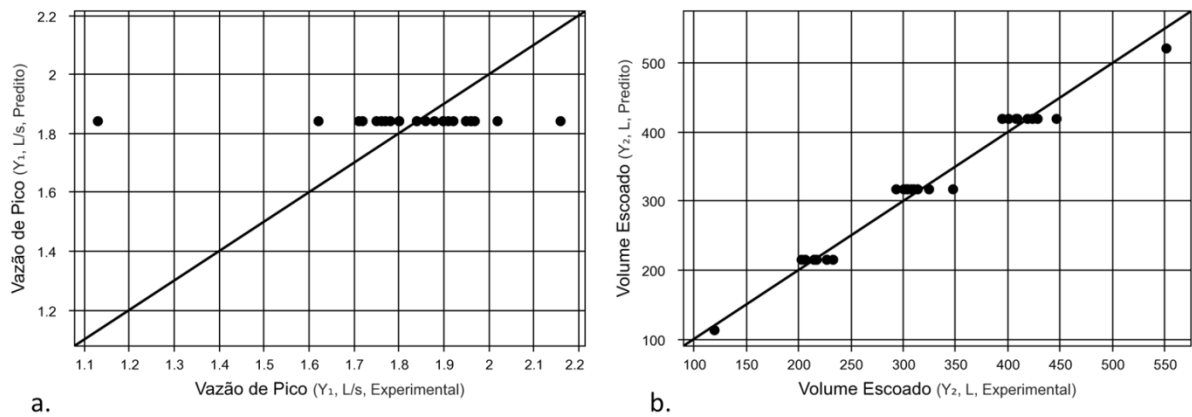
Fonte: Da autora.

A porcentagem transportada foi maior nos experimentos onde a massa de material estava próxima ao valor do ponto central, entre 40 e 60g. Para massas maiores e menores a porcentagem transportada foi menor.

5.2.9 Adequação ao modelo

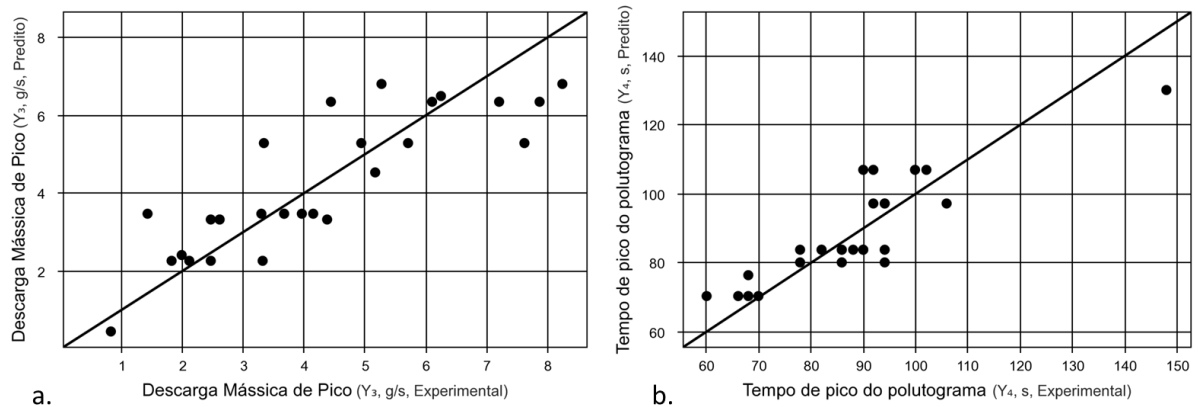
Os gráficos que relacionam os valores experimentais e os valores preditos para cada variável dependente estão apresentados nas Figuras 32, 33, 34 e 35, para o cenário sem bacia de detenção.

Figura 32 - Gráficos dos valores experimentais *versus* valores preditos para as variáveis: a) Vazão de pico ($R^2= 18,00\%$), b) Volume escoado ($R^2= 97,51\%$).



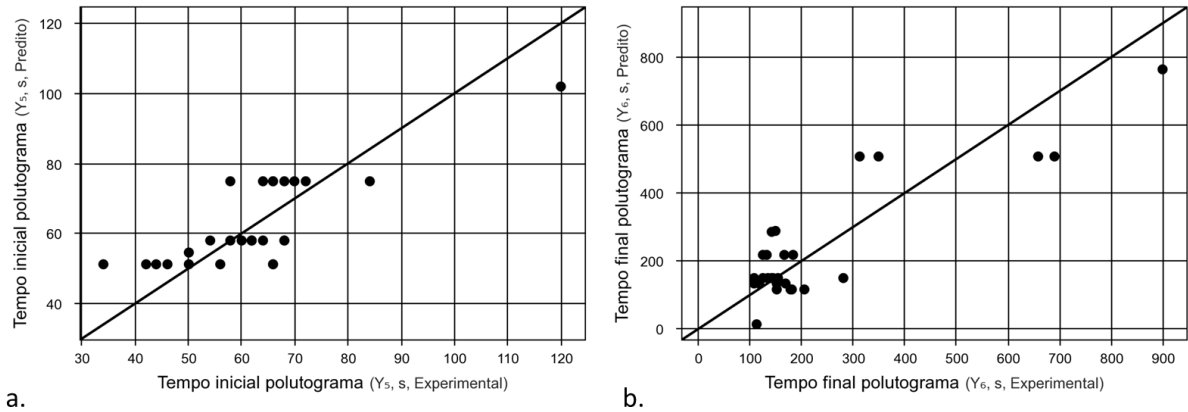
Fonte: Da autora.

Figura 33 - Gráficos dos valores experimentais *versus* valores preditos para as variáveis: a) Descarga mássica de pico ($R^2= 72,46\%$), b) Tempo de pico do polutograma ($R^2= 74,97\%$).



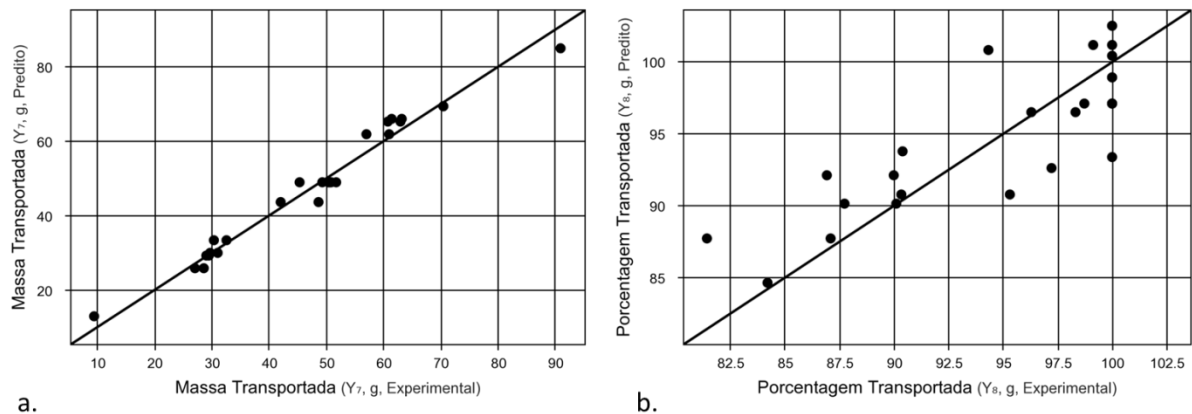
Fonte: Da autora.

Figura 34 - Gráficos dos valores experimentais *versus* valores preditos para as variáveis: a) Tempo inicial do polutograma ($R^2= 63,71\%$), b) Tempo final do polutograma ($R^2= 76,08\%$).



Fonte: Da autora.

Figura 35 - Gráficos dos valores experimentais *versus* valores preditos para as variáveis: a) Massa transportada ($R^2= 97,43\%$), b) Porcentagem transportada ($R^2= 68,94\%$).

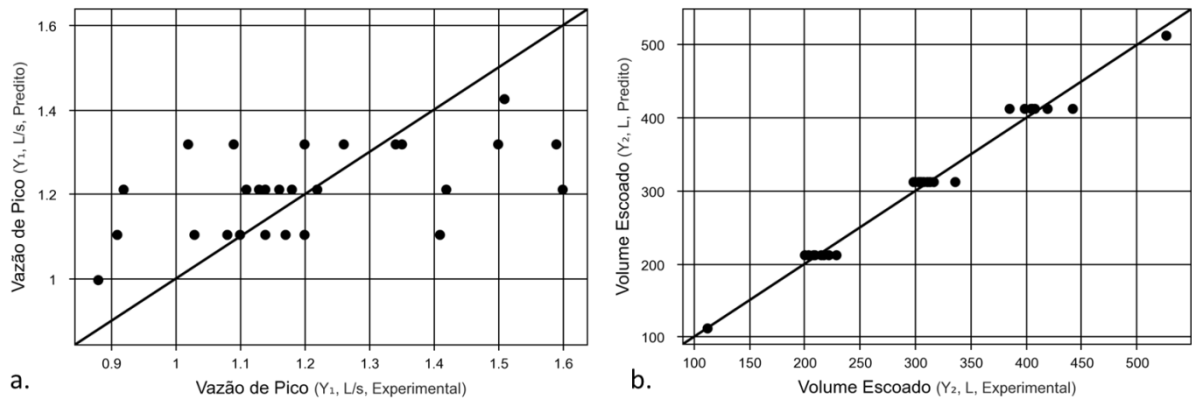


Fonte: Da autora.

Percebe-se, analisando o coeficiente de correlação das variáveis dependentes que o modelo não demonstrou bom ajuste apenas para a variável vazão de pico (Y_1). Para todas as demais variáveis o modelo apresentou um ajuste muito bom, sendo as variáveis volume escoado (Y_2) e massa transportada (Y_7) as que mostraram o melhor ajuste.

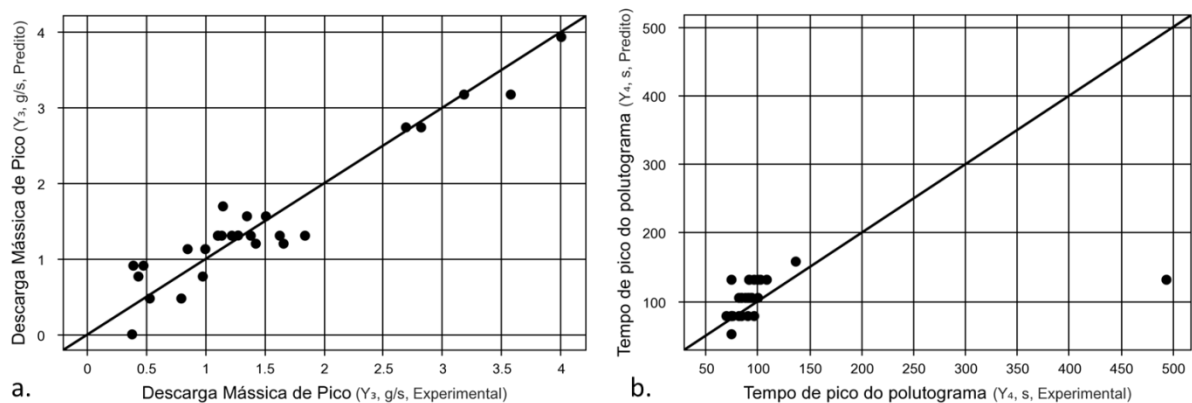
Os gráficos que relacionam os valores experimentais e os valores preditos para cada variável dependente estão apresentados nas Figuras 36, 37, 38 e 39, para o cenário com bacia de detenção.

Figura 36 - Gráficos dos valores experimentais *versus* valores preditos para as variáveis: a) Vazão de pico ($R^2= 26,98\%$), b) Volume escoado ($R^2= 98,34\%$).



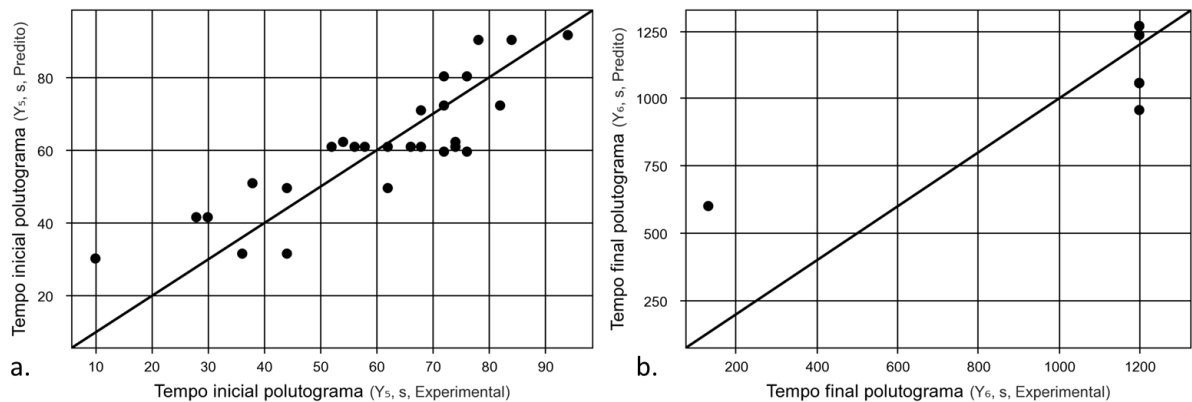
Fonte:Da autora.

Figura 37 - Gráficos dos valores experimentais *versus* valores preditos para as variáveis: a) Descarga mássica de pico ($R^2= 89,86\%$), b) Tempo de pico do polutograma ($R^2= 10,38\%$).



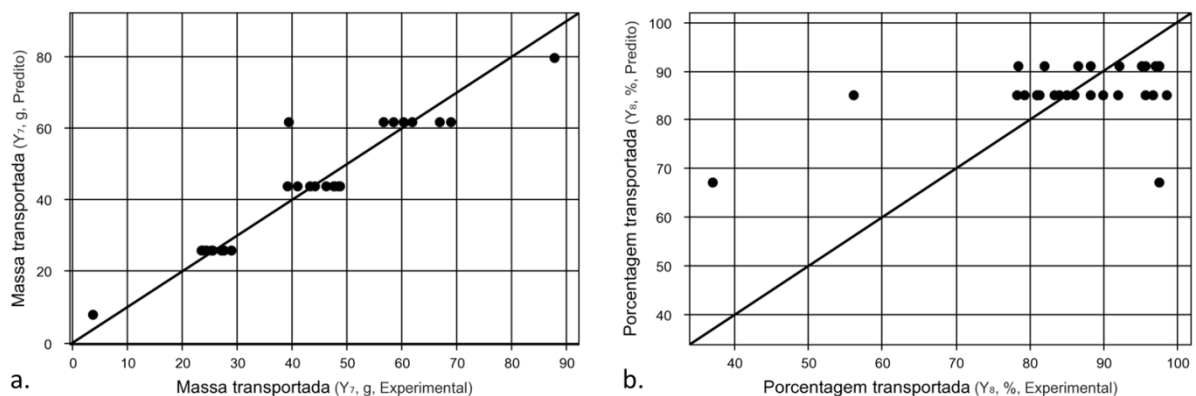
Fonte:Da autora.

Figura 38 - Gráficos dos valores experimentais *versus* valores preditos para as variáveis: a) Tempo inicial do polutograma ($R^2= 72,91\%$), b) Tempo final do polutograma ($R^2= 54,63\%$).



Fonte: Da autora.

Figura 39 - Gráficos dos valores experimentais *versus* valores preditos para as variáveis: a) Massa transportada ($R^2= 89,63\%$), b) Porcentagem transportada ($R^2= 20,63\%$).



Fonte: Da autora.

Para o cenário com bacia de detenção, nota-se, analisando o coeficiente de correlação das variáveis dependentes que o modelo não demonstrou bom ajuste para as variáveis vazão de pico (Y_1), tempo de pico do polutograma (Y_4) e porcentagem transportada (Y_8). Para todas as demais variáveis o modelo apresentou um ajuste bom, sendo as variáveis volume escoado (Y_2), descarga mássica de pico (Y_3) e massa transportada (Y_7) as que mostraram o melhor ajuste.

5.3 COEFICIENTE DE AMORTECIMENTO DA BACIA DE DETENÇÃO

Através dos dados obtidos nos experimentos, presentes nas Tabelas 4 e 5, foi possível estabelecer uma relação entre as variáveis dependentes estudadas para o cenário com bacia de detenção e para o cenário sem bacia de detenção. Dividindo-se os valores encontrados para o cenário com bacia pelos valores encontrados para o cenário sem bacia de detenção, foi possível calcular os coeficientes de amortecimento da bacia de detenção, presentes na Tabela 14. As siglas adotadas se referem a: RQp - coeficiente de amortecimento da vazão de pico; RV - coeficiente de amortecimento do volume escoado; RDMp - coeficiente de amortecimento da descarga mássica de pico; RTp - coeficiente de retardamento do tempo de pico do polutograma; RTi - coeficiente de amortecimento do tempo inicial do polutograma; RTf - coeficiente de retardamento do tempo final do polutograma; RMt - coeficiente de amortecimento da massa transportada; e RPt - coeficiente de amortecimento da porcentagem transportada.

O coeficiente de amortecimento referente ao tempo final do polutograma não pode ser calculado porque em quase todos os ensaios com bacia de detenção o tempo final foi igual ao tempo total de medição. Tecnicamente, o transporte de material solúvel não foi completamente finalizado nesses ensaios, devido à presença da bacia de detenção, que acumula uma parte da massa transportada.

Tabela 14 - Coeficientes de amortecimento da bacia de detenção.

Ensaio	RQp	RV	RDMp	RTp	RTi	RTf	RMt	RPt
1	0.53	1.01	0.35	1.09	0.96	9.09	0.87	0.87
2	0.60	1.02	0.21	0.92	1.00	6.52	0.83	0.83
3	0.67	0.97	0.58	0.95	0.42	9.52	0.89	0.97
4	0.56	1.03	0.25	0.96	0.98	7.23	0.89	0.90
5	0.52	0.97	0.44	1.40	1.82	1.74	0.93	0.93
6	0.58	0.89	0.33	0.98	1.12	1.82	0.69	0.69
7	0.80	1.01	0.44	0.86	0.54	3.45	0.95	0.95
8	0.60	0.92	0.13	0.98	1.24	3.85	0.95	0.95
9	0.64	0.99	0.38	1.06	0.82	11.11	0.76	0.78
10	0.64	0.99	0.19	0.80	0.82	7.89	0.80	0.80
11	0.79	0.98	0.31	1.15	1.44	10.17	0.94	0.94
12	0.81	1.01	0.24	1.17	1.20	7.14	0.97	0.97
13	0.74	1.00	0.63	1.09	1.05	7.89	0.98	0.99
14	0.74	0.98	0.43	1.07	1.12	6.74	0.95	0.96
15	0.72	0.98	0.45	1.02	1.15	5.83	0.98	0.98
16	0.52	0.97	0.08	5.26	1.22	6.59	0.93	0.93
17	0.59	1.00	0.30	1.22	1.10	8.82	0.97	0.98
18	0.63	1.01	0.37	0.98	0.97	7.79	0.94	0.97
19	0.66	1.01	0.39	0.93	1.00	8.45	0.97	0.97
20	0.62	1.02	0.30	1.02	0.90	8.45	0.92	0.92
21	0.63	0.99	0.78	1.09	0.20	11.11	0.96	0.98
22	0.83	1.01	0.65	0.92	0.78	4.26	0.87	0.88
23	0.66	0.97	0.22	0.95	0.66	9.68	0.98	0.98
24	0.71	1.02	0.21	1.15	1.10	8.33	0.97	0.97
25	0.61	0.93	0.46	1.09	1.09	1.18	0.39	0.39
26	0.52	1.01	0.18	1.08	0.96	8.45	0.97	0.98
27	0.78	0.94	0.80	0.98	0.94	1.33	0.96	0.96
28	0.77	0.95	0.35	1.04	1.19	8.00	0.78	0.78
Média	0.66	0.98	0.37	1.19	0.99	6.87	0.89	0.90

Fonte: Da autora.

Através das medias dos coeficientes obtidos nota-se que em média, a redução da vazão de pico foi de 44%, a diminuição do volume escoado foi de apenas 2%, a redução da descarga mássica de pico foi de 63%, o retardamento do tempo de pico foi de 19%, a redução do tempo inicial do polutograma foi de 1%, a diminuição da massa transportada foi de 11% e a redução na porcentagem de massa transportada foi de 10%. Nota-se também que houve um aumento do tempo final do polutograma de 6 vezes, o que indica que a presença da bacia de detenção atrasou o tempo de transporte do material solúvel.

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi utilizado um simulador de chuva e um modelo físico reduzido que simula uma área urbana impermeabilizada. Foram estudados os fenômenos de escoamento superficial e transporte de material solúvel em ensaios com e sem a implantação de uma bacia de retenção. Concluiu-se que a bacia de retenção foi capaz de amortecer o pico de vazão, na média, em aproximadamente 44%. Além disso, a bacia de retenção reduziu a descarga mássica de pico em uma média de 63%. Notou-se também que a implantação da bacia implicou num retardamento no tempo de pico do polutograma.

Foram analisadas quatro variáveis independentes que de alguma forma se demonstraram estatisticamente significativas em relação a oito variáveis dependentes. Concluiu-se que para o cenário sem bacia, nenhuma variável dependente se mostrou estatisticamente significativa no valor da vazão de pico, o que já era esperado, já que normalmente elas não apresentam relação. Nos ensaios com bacia de retenção a duração da chuva demonstrou uma relação linear com a duração da chuva, mas o ajuste não foi satisfatório, o que indica pouca relação entre as duas variáveis.

Para ambos os cenários, a duração da chuva foi a única variável independente que se mostrou estatisticamente significativa para o valor do volume escoado, através de relações lineares, com um alto coeficiente de correlação. Além disso a quantidade de blocos e a massa e posição do material mostraram ser variáveis que interferem na descarga mássica de pico, para estes dois cenários.

O cenário sem bacia de retenção foi o único que apresentou variáveis dependentes que demonstraram relação com o tempo de pico do polutograma. Para esse cenário, o modelo considerou estatisticamente significativa a posição do material tanto em seu efeito linear quanto quadrático e a sua interação com o número de blocos.

Para o cenário sem bacia de retenção, concluiu-se que a posição do material tem uma influência linear e quadrática no tempo inicial do polutograma. Para o cenário com bacia de retenção, a posição do material, a quantidade de blocos e a sua interação com a duração da chuva foram as variáveis que interferiram no tempo

inicial do polutograma. No cenário sem bacia de detenção, conforme maior foi a massa do material maior foi a massa transportada. Esta relação é maior para números de blocos próximos ao ponto central e é amortecida conforme for maior ou menor foi o número de blocos. Para o cenário com bacia de detenção, concluiu-se que a massa do material e a massa transportada apresentam uma relação linear.

Para o cenário sem bacia de detenção, o modelo utilizado considerou estaticamente significativas para a porcentagem transportada as variáveis número de blocos, massa do material e duração da chuva. Para o cenário com bacia de detenção, a porcentagem transportada foi maior nos experimentos onde a massa de material estava próxima ao valor do ponto central, entre 40 e 60g. Para massas maiores e menores a porcentagem transportada foi menor.

Neste trabalho foi utilizado um delineamento experimental, o DCCR, para facilitar e melhorar a qualidade da análise dos dados. Foi possível concluir que o delineamento usado se mostrou adequado para este trabalho, sendo possível a obtenção de modelos estatísticos relevantes para o estudo. Com este trabalho foram analisados aspectos do escoamento superficial e do transporte de material solúvel em áreas impermeáveis e a influência da implantação de uma bacia de detenção, com o objetivo de ganhar conhecimento sobre o processo chuva-vazão, associado a problemas ambientais contemporâneos.

Este é apenas o passo inicial e como desenvolvimentos futuros a este trabalho, propõe-se experimentos de laboratório com outras variáveis como, por exemplo, diversas intensidades de precipitação, diferentes tipos de cobertura da área, outros tipos de materiais poluentes, entre outros. É sugerido também o uso e a criação de modelos computacionais que tornem estudos deste tipo mais aplicáveis para situações reais.

REFERÊNCIAS

- BAPTISTA, M.B; NASCIMENTO, N.O.; BARRAUD, S. **Técnicas compensatórias em Drenagem Urbana**. Belo Horizonte: ABRH, 2004.
- BORDAS, M.P.; SEMMELMANN, F.R. Elementos de engenharia de sedimentos. In: TUCCI, C.E.M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: UFGS; São Paulo: USP/ABRH, 1993.
- BORRIS, M.; VIKLANDER, M.; GUSTAFSSON, A. M.; MARSALEK, J. Modelling the effects of changes in rainfall event characteristics on TSS loads in urban runoff. **Hydrological Processes**, v. 28, n.4, p. 1787–1796, 2014.
- BOX, G.E.P.; WILSON, K.B. On the experimental attainment of optimum conditions. **Journal of the Royal Statistical Society**, Reino Unido, v.13, p.1-45, 1951.
- BRANDÃO, V. S.; PRUSKI, F. P.; SILVA, D. D. **Infiltração da água no solo**. 2. ed. Viçosa: UFV, 2004.
- BRITO, D.S. **Metodologia para seleção de alternativas de sistemas de drenagem**. 2006. 117f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Universidade de Brasília, Brasília-DF, 2006.
- CANHOLI, A. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.
- CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Qualidade do ar: poluentes**. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/ar/poluentes/>>. Acesso em: 23 maio 2018.
- COELHO, J. A. P. F. et al. Análise quantitativa dos efeitos da urbanização sobre a infiltração e o escoamento superficial na cidade de Goiânia – GO. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS-SBRH, 22., 2017, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ABRH, nov. 2017.
- CORONA, R.; WILSON, T.; D'ADDERIO, L. P.; PORCÙ, F.; MONTALDO, N.; ALBERTSON, J. On the Estimation of Surface Runoff through a New Plot Scale Rainfall Simulator in Sardinia, Italy. **Procedia Environmental Sciences**, v.19, p. 875–884, 213.
- CHRISTOFOLETTI, A. et al. **Modelagem de sistemas ambientais**. São Paulo: Edgard Blucher, 1999.
- FELICE, J. G. **Transporte de material em suspensão e solúvel em modelo físico com superfície impermeável utilizando chuva simulada**. 2017. 57f. Dissertação(Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, 2017.
- FERNANDES, C. **Microdrenagem: um estudo inicial**. Campina Grande: DEC/CCT/UFPB, 2002.

- FLETCHER T.D. et al. SUDS, LID, BMPs, WSUD and more: the evolution and application of terminology surrounding urban drainage. **Urban Water Journal**, v. 12, n.7, p. 525-542, 2014.
- GUAN, M.; SILLANPÄÄ, N.; KOIVUSALO, H. Modelling and assessment of hydrological changes in a developing urban catchment. **Hydrol. Process**, v. 29, p. 2880–2894, 2015.
- GUPTA, S. K. **Modern hydrology and sustainable water development**. New Delhi: Wiley-Blackwell, 2011.
- HALL, M. J. **Urban Hydrology**. Belfast – Ireland: The Universities Press, Elsevier Applied Science Publishers Ltd., 1984.
- HERNGREN, L.; GOONETILLEKE, A.; AYOKO, G. A. Understanding heavy metal and suspended solids relationships in urban stormwater using simulated rainfall. **Journal of Environmental Management**, v.76, n.2, p.149–158, 2005.
- HUDSON, N. W. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Field measurement of soil erosion and runoff**. 1993. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/t0848E/t0848e00.htm>>. Acesso em: 19 maio 2018.
- LIMA, B.O. **Influência da densidade da ocupação urbana no transporte de poluentes solúveis pelo escoamento superficial produzido por um simulador de chuva sobre uma superfície impermeável**. 2017. 69f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, 2017.
- MAYERHOFER, C. et al. Comparison of the results of a small-plot and a large-plot rainfall simulator – effects of land use and land cover on surface runoff in alpine catchments. **Catena**, n.156, p.184-196, mar. 2017.
- MELO, C.R.; SILVA, A.M. **Hidrologia: princípios e aplicações em Sistemas Agrícolas**. Lavras: Editora UFLA, 2013.
- MENDONÇA, L.A. **Desempenho do delineamento composto central em experimentos com alto coeficiente de variação**. 2012. 68f. Dissertação (Mestrado em Estatística Aplicada e Biometria) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.
- MENEZES, P.H.B.J. **Avaliação do efeito das ações antrópicas no processo de escoamento superficial e assoreamento na bacia do Lago Paranoá**. 2010. 117f. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas) - Universidade de Brasília, Brasília-DF, 2010.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Avaliação ambiental integrada de bacia hidrográfica**. 2006. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/sqa_pnla/_arquivos/sqa_3.pdf>. Acesso em: 18 maio 2018.

NASCIMENTO, N. D. O. N. ; HELLER, L. Ciência, tecnologia e inovação na interface entre as áreas de recursos hídricos e saneamento. **Eng. Sanit. Ambient**, v.10, n.1, p.36–48, 2005.

PERÁZIO, B.A.A. **Efeitos dos pontos axiais e centrais sobre a eficiência do delineamento composto central**. 2010. 57f. Dissertação (Mestrado em Estatística Aplicada e Biometria) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

PINTO, N. L. S. et al. **Hidrologia básica**. São Paulo: Blucher, 1976.

PORTO, R.M. Metodologia de Cálculo para o Planejamento de Bacias de Detenção. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.8, n.3, p.135-149, jul. 2003.

PORTO, R. M. **Hidráulica Básica**. 4.ed. São Paulo: Editora USP Projeto REENGE, 2006.

QINQIN, L.; QIAO, C.; JIANCAI, D.; WEIPING, H. The use of simulated rainfall to study the discharge process and the influence factors of urban surface runoff pollution loads. **Water Science and Technology**, v.72, n.3, p.484–490, 2015.

REIS, S. S. **Influência da Densidade e da Altura de Edificações na Transformação de Precipitação-Escoamento Utilizando Chuva Simulada em Modelo Reduzido de Bacia Hidrográfica Urbana com Diferentes Declividades**. 2015. 89f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, 2015.

SANTOS, C.M.S.M.; SIQUEIRA E.Q.; ARIZA B.G. Caracterização e avaliação da distribuição de sedimentos em superfícies urbanas. **Holos Environment**, v.17, n.1, p.15-34, 2017.

SEO Y. E SCHMIDT A.R. The effect of rainstorm movement on urban drainage network runoff hydrographs. **Hydrological Processes**, v.26, n.25, p.3830-3841, 2011.

SILVA, G.B.L. **Avaliação Experimental Sobre a Eficiência de Superfícies Permeáveis com Vistas ao Controle do Escoamento Superficial em Áreas Urbanas**. 2006. 180f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade de Brasília, Brasília-DF, 2006.

SILVA, A.H.C.L. **Controle da poluição difusa de origem pluvial em uma via de tráfego intenso por meio de trincheira de infiltração e vala de detenção**. 2009. 169f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal De Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

SILVEIRA, A. et al. Modelling runoff on ceramic tile roofs using the kinematic wave equations. **Water Science and Technology**, v.73, n.11, p.2824-2831, 2016.

SOUZA, F.P. **Monitoramento e modelagem hidrológica da subbacia do Lago Paranoá - Brasília/DF - e avaliação de bacia de detenção**. 2014. 139f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) Universidade de Brasília, Brasília-DF, 2014.

SPOHR, R. et al. Desenvolvimento e validação de um simulador de chuvas portátil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.20, n.2, p.411-417, 2015.

TUCCI, C. E. M.; GENZ, F. Controle do impacto da urbanização. In: **Drenagem urbana**. TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L. L.; BARROS, M. T. Porto Alegre: UFRGS, 1995.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: UFRGS, 2001.

ONU. United Nations. World Urbanization Prospects 2014. **World Urbanization Prospects (Vol. 2014 revisão)**. 2015. Disponível em: <<https://esa.un.org/unpd/wup/publications/files/wup2014-highlights.pdf>>. Acesso em 18 maio 2018.

VASCONCELOS, A.F; MIGUEZ, M. G.; VAZQUEZ, E. G. Critérios de projeto e benefícios esperados da implantação de técnicas compensatórias em drenagem urbana para controle de escoamentos na fonte, com base em modelagem computacional aplicada a um estudo de caso na zona oeste do Rio de Janeiro. **Eng. Sanit. Ambient.**, v.21, n.4, p.655-662, out/dez 2016.

WILDHABER, Y. S.; BÄNNINGER, D.; BURRI, K.; ALEWELL, C. Evaluation and application of a portable rainfall simulator on subalpine grassland. **Catena**, v.91, p.56-62, 2012.

WYCOFF, R.L. E SINGH, U.P. Preliminary hydrologic design of small flood detention reservoirs. **Water Resources Bulletin**, v.12, n.2, 1976.

ZHOU, Q. A Review of Sustainable Urban Drainage Systems Considering the Climate Change and Urbanization Impacts. **Water**, v.6, n.4, p.976-992, 2014.