

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS

LUCAS COSTA LAGE DE ASSIS

**VARIAÇÃO TEMPORAL DE SÓLIDOS EM SUSPENSÃO DO ESCOAMENTO
SUPERFICIAL URBANO**

Poços de Caldas/ MG

2020

LUCAS COSTA LAGE DE ASSIS

VARIAÇÃO TEMPORAL DE SÓLIDOS EM SUSPENSÃO DO ESCOAMENTO
SUPERFICIAL URBANO

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. Área de concentração: Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Silveira

Poços de Caldas/ MG

2020

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

Assis, Lucas Costa Lage de.
A848v Variação temporal de sólidos em suspensão do escoamento
superficial urbano / Lucas Costa Lage de Assis. -- Poços de
Caldas/MG, 2020.
57 f. –

Orientador(a): Alexandre Silveira.
Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) –
Universidade Federal de Alfenas, campus Poços de Caldas, 2020.
Bibliografia.

1. Ciclo hidrológico. 2. Escoamento superficial. 3. Transporte de
sedimentos. I. Silveira, Alexandre. II. Título.

CDD – 551.48

LUCAS COSTA LAGE DE ASSIS

**VARIAÇÃO TEMPORAL DE SÓLIDOS EM SUSPENSÃO DO ESCOAMENTO
SUPERFICIAL URBANO**

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 PósGraduação em Ciência e Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Alfenas. Área de Concentração: Ciência e Engenharia Ambiental.

Aprovada em: 17 de fevereiro de 2020.

Prof (a) Dr (a). Alexandre Silveira

Assinatura:



Instituição: Universidade Federal de Alfenas

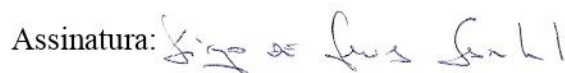
Prof (a) Dr (a). Rodrigo Braga Moruzzi
Instituição: Universidade Estadual Paulista

Assinatura:



Prof (a) Dr (a). Diego Souza Sardinha
Instituição: Universidade Federal de Alfenas

Assinatura:



AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

A produção de sedimentos nos cursos hídricos ocorre de maneira natural, no entanto a atividade antrópica pode intensificar esse processo e gerar impactos negativos ao meio ambiente. A urbanização, por exemplo, aumenta o escoamento superficial, devido a remoção da cobertura vegetal e a impermeabilização do solo da bacia hidrográfica, e conseqüentemente a erosão e o transporte de sedimentos. O maior aporte de sedimentos na bacia pode causar o aumento da incidência de cheias e alagamentos devido ao assoreamento de reservatórios e rios; redução da qualidade da água e prejuízo da biodiversidade. Para prevenir e controlar esses impactos é importante que sejam realizados estudos quantitativos dos sedimentos transportados nas bacias hidrográficas, por isso, o presente trabalho tem como objetivo estudar a variação da concentração de sólidos em suspensão (C_{ss}) no escoamento superficial em um ambiente urbano. Foi observado que as características das estações do ano têm influência no comportamento das curvas de C_{ss} , que a fórmula proposta no estudo permite obter resultados satisfatórios sobre a relação entre os dados de precipitação e os dados de C_{ss} e que ocorreu o fenômeno de *Mass First flush* em todos os eventos estudados. Os resultados sinalizam que a fórmula proposta no estudo pode trazer informações importantes sobre as alterações da descarga sólida de acordo com o comportamento dos eventos de precipitação., ela permitiu, através dos dados de precipitação, estimar o comportamento futuro da curva de C_{ss} ao longo do tempo, os métodos estudados na bibliografia não permitiam obter essas informações com antecedência.

Palavras-chave: Precipitação. Escoamento Superficial. Concentração de Sedimentos.

ABSTRACT

The production of sediments in water courses occurs naturally, however, human activity can intensify this process and generate negative impacts on the environment. Urbanization, for example, increases runoff due to the removal of vegetation cover and the waterproofing of soil in the watershed, and consequently erosion and sediment transport. The greater sediment input in the basin can cause an increase in the incidence of floods due to the silting up of reservoirs and rivers; reduction of water quality and damage to biodiversity. In order to prevent and control these impacts, it is important that quantitative studies are carried out of the sediments transported in the hydrographic basins, therefore, the present work aims to study the variation of the concentration of suspended solids (C_{ss}) in the surface runoff in an urban environment. It was observed that the characteristics of the seasons have an influence on the behavior of C_{ss} curves, that the formula proposed in the study allows to obtain satisfactory results on the relationship between precipitation data and C_{ss} data and that the phenomenon of Mass First flush occurred in all the events studied. The results indicate that the formula proposed in the study can bring important information about changes in solid discharge according to the behavior of precipitation events., It allowed, through precipitation data, to estimate the future behavior of the C_{ss} curve along the time, the methods studied in the bibliography did not allow obtaining this information in advance.

Keywords: Rainfal. Runoff. Sediments Concentration.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ciclo Hidrológico	12
Figura 2 - Formas de transporte de sedimentos	15
Figura 3 - Alterações no ciclo hidrológico pela urbanização	17
Figura 4 - Hidrograma de uma mesma bacia antes e depois da urbanização	18
Figura 5 - Área de Influência.....	35
Figura 6 - a) Variação Sazonal da C_{ss}^{pico} b) Variação Sazonal da C_{ss}^{med}	39
Figura 7 - Massa transportada ao longo dos eventos.	43
Figura 8 - a) Relação entre C_{ss}^{pico} x P_{10m} b) relação entre C_{ss}^{med} x P_{10m}	46
Figura 9 - a) Relação entre C_{ss}^{pico} x P_{7D} b) relação entre C_{ss}^{med} x P_{7D}	47
Figura 10 - a) Relação entre C_{ss}^{pico} x (P_{10m}/P_{7D}) b) Relação entre C_{ss}^{med} x (P_{10m}/P_{7D})	47
Figura 11 - a) Relação entre C_{ss}^{pico} x C_p b) Relação entre C_{ss}^{med} x CP	48
Figura 12 - Mass First Flush.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Poluentes urbanos.....	20
Tabela 2 - Dados dos eventos monitorados.....	37
Tabela 3 - Coeficientes de escoamento.....	44
Tabela 4 - Variáveis utilizadas nas análises.....	45

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	9
1.1	OBJETIVOS GERAIS	10
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
2.1	CICLO HIDROLÓGICO	11
2.2	CICLO HIDROSEDIMENTOLÓGICO	12
2.3	CICLO HIDROLÓGICO URBANO	16
2.4	QUALIDADE DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL URBANO.....	19
2.5	FIRST FLUSH.....	21
2.6	ESTADO DA ARTE.....	22
3	ARTIGO.....	30
4	CONCLUSÃO.....	53
5	REFERÊNCIAS	55

1 INTRODUÇÃO

Essencial para a composição bioquímica dos seres vivos, a água está em constante circulação na natureza em um fenômeno fechado, que ocorre entre a atmosfera e a superfície terrestre, conhecido como ciclo hidrológico. A energia solar, a gravidade e a rotação do planeta são as forças que promovem esse ciclo.

A água é considerada o recurso natural mais importante para a vida no planeta Terra, ela é utilizada como meio de vida de diversas espécies animais e vegetais e necessária para a manutenção dos ciclos geológicos, químicos e biológicos que permitem que o ecossistema se mantenha em equilíbrio. Para os seres humanos, é um insumo imprescindível para a produção agrícola e industrial e indispensável para a qualidade de vida da população.

A qualidade da água é o fator que define o tipo de uso a qual ela pode ser destinada e tem um papel importante para a prevenção da contaminação dos usuários por compostos prejudiciais à saúde. Esse fator é consequência da propriedade solvente da água e de sua capacidade de transportar partículas e está relacionado com a presença de diversos componentes que podem ter origem natural ou terem sido introduzidos por ação antrópica. Ações humanas como o desmatamento, a urbanização, a mineração e atividades agrícolas têm alterado as etapas do ciclo hidrológico e afetado a qualidade dos corpos hídricos.

O processo de urbanização, que vem ocorrendo de forma desordenada, faz com que o volume do escoamento superficial aumente, devido a impermeabilização do solo que diminui a infiltração e a evapotranspiração das águas das chuvas. O aumento do escoamento superficial, além de promover a ocorrência de enchentes, intensifica os processos de erosão e interfere no ciclo hidrossedimentológico, ciclo que representa o deslocamento dos sedimentos presentes nas bacias hidrográficas, comprometendo a qualidade da água devido ao acréscimo do material sólido transportado.

A intensificação do processo de produção e deposição de sedimentos pode trazer sérias consequências ao meio ambiente, tais como: aumento da incidência de cheias e alagamentos devido ao assoreamento de reservatórios e rios; redução da qualidade da água e prejuízo da biodiversidade. Além disso o sedimento em suspensão também serve como agente fixador para outros compostos poluidores, agindo como potencializador dos efeitos negativos de pesticidas, microrganismos patogênicos, compostos químicos oriundos do lixo, hidrocarbonetos provenientes do petróleo e metais como cobre, zinco, manganês, ferro e chumbo.

Para prevenir e controlar esses efeitos é de extrema importância realizar estudos quantitativos dos sedimentos transportados nas bacias hidrográficas, pois esses fornecem informações úteis para a análise do estado de degradação de uma bacia e para o planejamento do uso e manejo dos recursos hídricos de uma determinada região, por isso o presente trabalho estudou uma nova forma de análise do comportamento da curva de concentração de sólidos em suspensão de acordo com as características dos eventos de precipitação .

1.1 OBJETIVOS GERAIS

Estudar o comportamento da concentração de sólidos suspensos no escoamento superficial urbano.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Propor uma fórmula que permita relacionar os dados de precipitação com a concentração de sólidos suspensos (C_{ss}), estudar o comportamento sazonal da C_{ss} durante as estações do ano e investigar a ocorrência de *Mass First Flush* (MFF) no escoamento superficial dos eventos avaliados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CICLO HIDROLÓGICO

A água é um composto fundamental para a manutenção da vida no planeta Terra, estima-se que existam $1,36 \cdot 10^{18} \text{ m}^3$ de água disponíveis no planeta, no entanto, apenas 0,8% desse valor corresponde a água doce, que é distribuída em águas subterrâneas (97%) e águas superficiais (3%) (VON SPERLING, 1996).

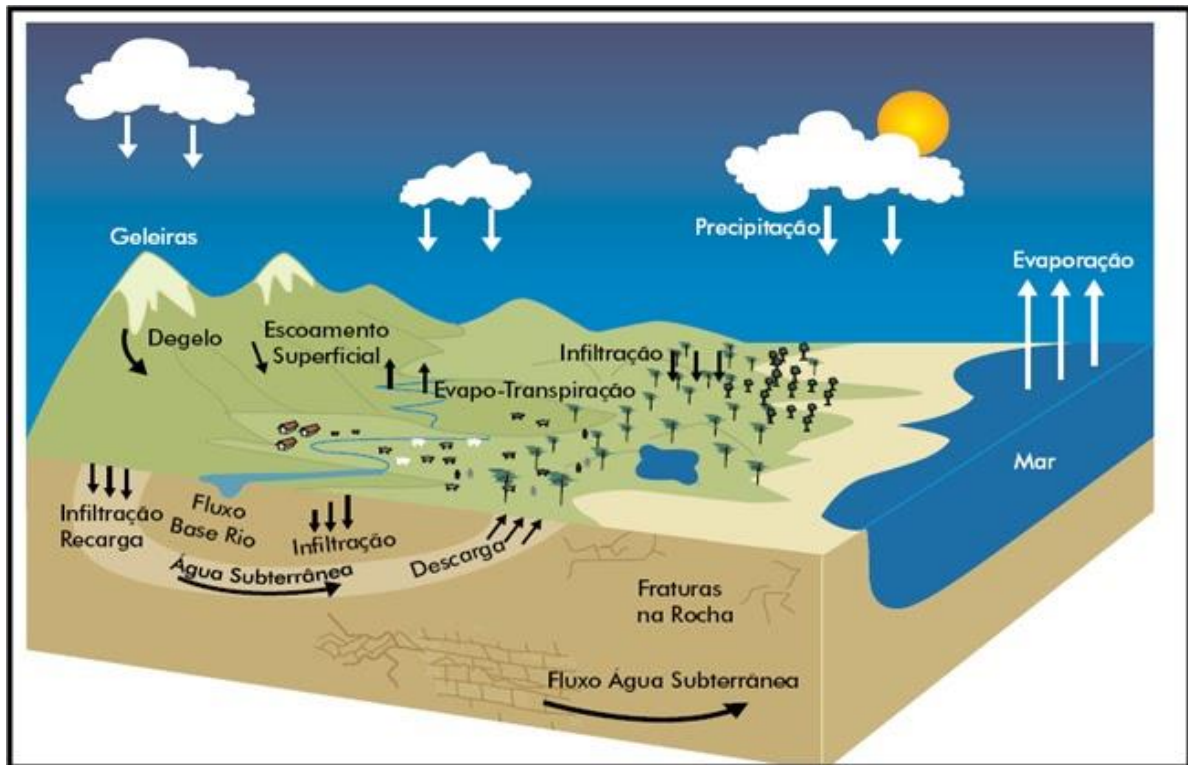
A água está em constante circulação na natureza em um fenômeno conhecido como ciclo hidrológico. Segundo Tucci (1993), ciclo hidrológico é o fenômeno global de circulação fechada da água entre a atmosfera e a superfície terrestre e as forças que atuam nesse ciclo são a energia solar, a gravidade e a rotação do planeta. As principais etapas desse ciclo são:

- Precipitação: As microgotículas de água presentes na atmosfera passam pelos fenômenos de aglutinação e crescimento e formam uma grande quantidade de gotas com tamanho e peso suficientes para que a força da gravidade supere a turbulência normal ou movimentos ascendentes atmosféricos. A forma mais comum é a chuva, mas também podem ocorrer na forma de neve ou granizo.
- Interceptação: As folhas e caules da cobertura vegetal interceptam parte do volume precipitado, esse volume pode sofrer evaporação ou, quando a capacidade de armazenamento da cobertura vegetal é excedida, reprecipitar para o solo.
- Infiltração: por se tratar de uma superfície porosa a água que atinge o solo se infiltra até atingir o ponto de saturação do mesmo, processo que forma os lençóis d'água. A partir do momento da saturação, inicia-se o escoamento superficial. Solos com maior cobertura vegetal tem a capacidade de infiltrar maior volume de água, evitando assim o excesso de escoamento superficial, prevenindo enchentes e inundações.
- Escoamento Superficial: é a movimentação da água sobre o solo, impulsionada pela ação da gravidade, das cotas mais altas para as mais baixas do terreno, essa etapa é responsável pela formação dos rios, córregos e lagos.
- Evapotranspiração: é a transferência da água para o meio atmosférico, sendo dividida em:
 - Evaporação: transferência da água superficial do estado líquido para o gasoso em função da temperatura e da umidade relativa do ar.

- Transpiração: remoção da água do solo pelas raízes das plantas, transferindo-a para as raízes das folhas e, após isso, ocorre a evaporação.

A Figura 1 representa as etapas do ciclo hidrológico:

Figura 1 - Ciclo Hidrológico



Fonte: MMA (2015, online).

2.2 CICLO HIDROSEDIMENTOLÓGICO

Sedimento é todo material oriundo de processos erosivos atuantes no solo que é capaz de ser transportado pela água ou pelo ar. Ao se desprenderem, os sedimentos tendem a se moverem continuamente até encontrarem um ponto específico onde podem se estabilizar, o destino dos sedimentos geralmente são os corpos hídricos (CARVALHO *et al.*, 2000; SIVIERO; COIADO, 1999).

Este material é constituído basicamente por três tipos de componentes: matéria orgânica, minerais particulados e componentes inorgânicos de origem biogênica (WETZEL; BOAVIDA, 1993). Alguns fatores externos podem afetar a quantidade de sedimentos transportados, segundo Siviero e Coiado (1999) os principais são:

- Natureza do solo: As propriedades do solo variam muito de acordo com o local, afetando sua coesividade, estrutura e fertilidade. Essas propriedades podem facilitar ou não que as partículas sejam destacadas pelos processos erosivos
- Cobertura vegetal ou tipo de cultura em exploração agrícola: A cobertura vegetal dissipa a energia cinética do impacto das gotas de chuva no solo e, com isso, reduzem o processo erosivo. A impermeabilização do solo, que pode ser causada pelo desmatamento e urbanização, aumenta o escoamento superficial e, conseqüentemente, o processo erosivo.
- Declividade da superfície do solo: Alta declividade aumenta a produção de sedimentos pois intensifica a ação erosiva do escoamento superficial.
- Clima: intensidade e duração da chuva: O impacto da chuva no solo inicia o processo erosivo liberando sedimentos para serem transportados. Chuvas com maior intensidade e duração têm maior potencial de desagregação de partículas (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1985).
- Tipo de prática conservacionista do solo: São práticas que buscam proteger o solo e evitar a sua erosão, podem ser naturais, através da cobertura vegetal, ou estrutural, como a terraplanagem.
- Granulometria, textura e quantidade do material erodível.

O ciclo hidrossedimentológico representa o deslocamento dos sedimentos presentes no solo das bacias hidrográficas, esse ciclo é aberto, pois as partículas não têm a capacidade de retornar ao local de origem, dependente e vinculado ao ciclo hidrológico (BORDAS; SEMMELMANN, 1993; D'ALKMIN TELLES, 2012).

Bordas e Semmelmann (1993) apresentam os principais fenômenos que compõem o ciclo hidrossedimentológico:

- Desagregação: é o desprendimento das partículas do solo que ocorre devido a ação mecânica, a variações de temperatura e a reações químicas. Esse material solto fica exposto a ação do escoamento superficial que o remaneja no deslocamento das águas.
- Erosão: ocorre quando as forças hidrodinâmicas exercidas pelo escoamento em uma partícula são maiores que as forças de resistência exercida por ela, gerando o deslocamento das partículas do seu local de origem.
- Transporte: é a movimentação das partículas sólidas pelo fluxo hídrico.

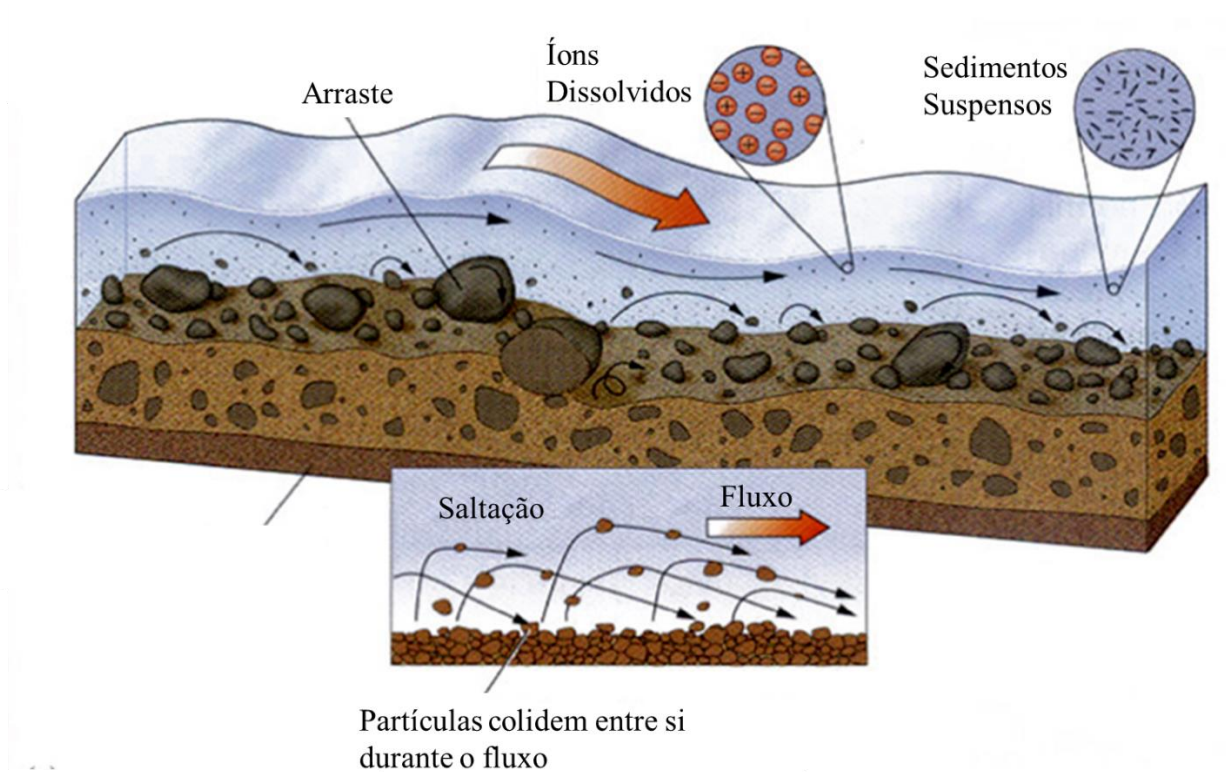
- Sedimentação ou decantação: as partículas transportadas em suspensão descem ao fundo do leito por ação da gravidade. A resistência do fluido auxilia no processo de decantação.
- Depósito: é a parada total da partícula transportada. Difere da decantação pois uma partícula decantada pode continuar sendo transportada no fundo do leito.
- Consolidação: ocorre depois do depósito e significa o acúmulo das partículas e a compactação do depósito pelo peso delas, pela pressão hidrostática, ou qualquer outro fenômeno que aumente a densidade do depósito.

A capacidade de transporte de um curso hídrico, vai depender da sua geometria, da declividade do canal, da velocidade do fluxo, rugosidade do fundo e turbulência do fluxo (MORRIS; FAN, 1997; JULIEN, 1998; VANONI, 1977). O transporte de sedimentos ocorre em maior quantidade nos períodos chuvosos, estima-se que 70% a 90% do transporte ocorra nesse período (CARVALHO, 2008). Segundo Silva (2003) o transporte pode ser realizado de três formas:

- Em suspensão: ocorre em partículas menores e mais leves que movimentam na velocidade da corrente de água, geralmente representam a maior quantidade de carga sólida do curso hídrico
- Por arraste: ocorre em partículas com maior granulometria que rolam ou escorregam longitudinalmente nos cursos d'água e, devido ao atrito, têm uma velocidade menor do que as partículas em suspensão.
- Por saltação: são partículas que saltam ao longo do curso hídrico devido ao impacto com outras partículas.

A Figura 2 apresenta as formas que o transporte de sedimentos pode ser realizado nos cursos hídricos.

Figura 2 - Formas de transporte de sedimentos



Fonte: Adaptado de MARSHAK (2005).

Normalmente a carga em suspensão corresponde a 95% da descarga sólida total, essa contribuição percentual varia de acordo com a posição da seção, tipo de escoamento, velocidade do escoamento, granulometria e profundidade (CARVALHO, 2008).

Apesar de ser um processo natural do meio ambiente, a produção e transporte de sedimentos pode ser intensificada pela ação antrópica. Segundo Carvalho *et al* (2000) a influência humana pode elevar a taxa de erosão em até 100 vezes, o que pode provocar o processo de assoreamento que gera diversos efeitos negativos, tais como: impactos a biodiversidade aquática, eutrofização, encarecimento do tratamento da água, diminuição da água disponível, prejuízos ao lazer e aumento da frequência e intensidade das inundações (CARVALHO, 2008; MORRIS; FAN, 1997).

A quantidade de energia presente no processo de transporte de sedimentos interfere na relação entre a deposição e a produção de sedimentos no curso hídrico. A agração ocorre quando parte do que é transportado pelo escoamento fica retida no leito do canal devido à falta de energia para o transporte desse material, já a degradação ocorre quando existe energia

suficiente para que parte do material presente no leito do curso hídrico seja transportado pelo escoamento (BROOKS *et al.*, 2012; VANONI, 1977).

É importante conhecer essa dinâmica pois, além dos problemas já citados anteriormente, os sedimentos podem servir de catalizadores, carreadores e agentes fixadores de produtos químicos e agentes poluidores. Os produtos químicos se assimilam nas partículas e possíveis trocas iônicas entre os sedimentos e esses produtos podem intensificar a sua capacidade poluidora (CARVALHO *et al.*, 2000).

2.3 CICLO HIDROLÓGICO URBANO

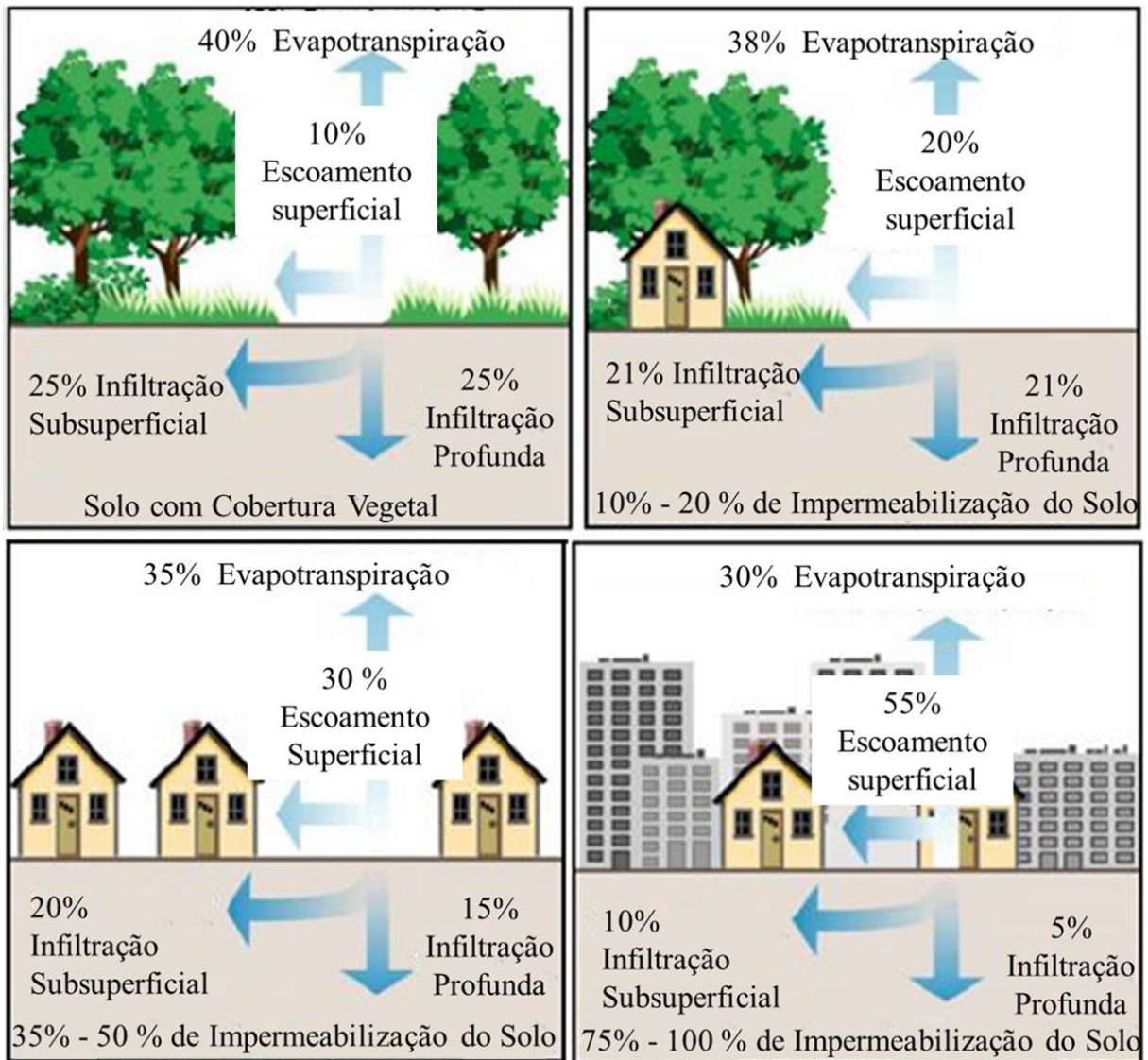
Devido a urbanização o percurso das águas do escoamento superficial, que anteriormente era determinado pelas características topográficas e pela cobertura vegetal de uma região, passa a ser determinado pelo traçado das ruas e das redes de drenagem. O escoamento superficial gerado pelas chuvas incidentes em uma área urbana é captado pelo sistema de microdrenagem, através dos bueiros e bocas de lobo, e conduzido até o sistema de macrodrenagem (RIGHETTO, 2009).

O sistema de microdrenagem é constituído pelas vias, pelas sarjetas, bocas de lobo, meio-fio, tubos, conexões e condutos forçados, esse sistema tem como função coletar e conduzir a água pluvial até o sistema de macrodrenagem para retirar a água das vias públicas e evitar os alagamentos e demais danos associados. A microdrenagem normalmente é projetada para atender precipitações de risco moderado, com período de retorno de até 10 anos. A macrodrenagem envolve os cursos de água naturais ou canais de maiores dimensões que recebem os escoamentos oriundos do sistema de microdrenagem.

O excesso de áreas impermeabilizadas, uma das consequências da urbanização não planejada, aumenta o escoamento superficial, reduz a evapotranspiração, causa o rebaixamento do nível do lençol freático e prejudica a qualidade das águas superficiais devido a alta carga de matérias sólidos carreados pela chuva, além disso sobrecarrega o sistema de microdrenagem, que é dimensionado para chuva com períodos de retorno pequenos, e gera problemas relacionados a inundação de centros urbanos.

A Figura 3 a seguir apresenta a consequência de diferentes níveis de impermeabilização no ciclo hidrológico.

Figura 3 - Alterações no ciclo hidrológico pela urbanização



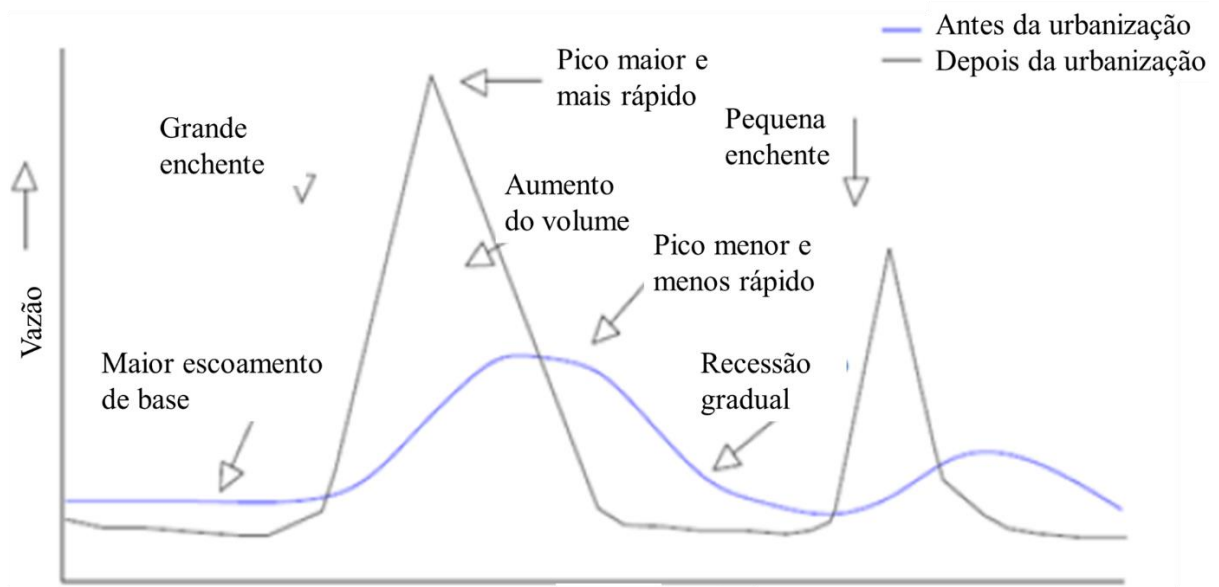
Fonte: EPA (1998, p. 3-23, tradução nossa).

O desenvolvimento urbano modifica a cobertura do solo e isso altera o ciclo hidrológico natural, uma bacia hidrográfica em condições moderadas de desenvolvimento pode gerar um escoamento superficial 50% maior do que uma bacia com cobertura vegetal, para o mesmo evento de precipitação (SCHUELER, 1987)

Em uma bacia urbanizada o pico de vazão do escoamento superficial é atingido muito mais rápido e é muito maior do que em uma bacia preservada, essa diferença ocorre porque em uma bacia urbanizada as áreas impermeáveis ajudam a produzir um maior escoamento do que em uma bacia que tem a cobertura vegetal preservada, pois, a interceptação, realizada pelas folhas e caules, e a maior infiltração retardam e diminuem o volume escoado. Esse excesso de escoamento produzido intensifica o processo de erosão e sobrecarrega o sistema de

microdrenagem gerando alagamentos e inundações nas cidades. A Figura 4 apresenta a diferença entre os hidrogramas de uma mesma bacia, antes e depois do processo de urbanização

Figura 4 - Hidrograma de uma mesma bacia antes e depois da urbanização



Fonte: SCHUELER (1987, p. 2-8, tradução nossa).

A alteração no escoamento superficial gerado pela urbanização também gera impacto na dinâmica dos sedimentos das bacias hidrográficas. Essa alteração intensifica o processo erosivo, aumenta a capacidade do transporte de sedimentos pelo escoamento, causa os assoreamentos de rios e lagos e conseqüentemente prejudica a qualidade das águas dos corpos hídricos (TUCCI, 2005).

A qualidade da água está relacionada a grande variedade de impurezas que a água pode incorporar, devido à sua capacidade de transportar partículas e a sua propriedade de solvente (DREVER, 1988). O uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica é o principal fator determinante para a qualidade de água.

O homem pode realizar diversas atividades que afetam a qualidade da água, tais como: despejo de efluentes domésticos e industriais, uso de defensivos agrícolas e remoção da cobertura vegetal, que introduz compostos indesejados e aumentam a quantidade de sedimentos transportados pelo escoamento (NORMAN *et al.*, 2006).

O lançamento do escoamento superficial urbano nos corpos d'água pode afetar a qualidade dos recursos hídricos de diversas maneiras. Tucci (2003) subdividiu esses impactos em seis categorias:

- Impactos estéticos: pode aumentar a turbidez da água devido ao aumento da concentração de sólidos em suspensão, alteração da cor devido o lançamento de sólidos e produtos químicos e pode gerar odores devido a decomposição de matéria orgânica
- Assoreamento: devido ao lançamento de altas cargas sólidas o leito do curso hídrico pode ser alterado, por consequência, diminuir a capacidade do escoamento e prejudicar a vida aquática devido a alteração do habitat.
- Diminuição da concentração de oxigênio dissolvido: devido a decomposição da matéria orgânica presente no escoamento superficial.
- Contaminação por microrganismos patogênicos: Gera risco à saúde humana ao usar o curso hídrico em atividades de lazer e subsistência.
- Eutrofização: devido ao lançamento de nutrientes carregados pelo escoamento superficial, ocorre o crescimento desequilibrado da população de macrófitas e algas, que reduz a concentração de oxigênio dissolvido e prejudica a vida aquática
- Contaminação por compostos tóxicos: pesticidas, compostos químicos oriundos do lixo, hidrocarbonetos provenientes do petróleo e metais como cobre, zinco, manganês, ferro e chumbo podem ser transportados pelo escoamento superficial e serem lançados nos corpos hídricos podendo gerar danos à saúde de quem utiliza o recurso hídrico contaminado. Os sedimentos em suspensão servem como agente fixador desses compostos poluidores, agindo como potencializador dos efeitos negativos.

2.4 QUALIDADE DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL URBANO

Os poluentes presentes na atmosfera e nas superfícies urbanas são transportados e lançados nos corpos receptores, o lançamento dos poluentes apresenta variações de acordo com a intensidade, duração e recorrência dos eventos chuvosos, e esse processo pode ser intensificado de acordo com as características da bacia (TUCCI, 2003). A fonte da poluição hídrica de uma bacia pode ser classificada em fontes difusas, cuja origem provém de diversas áreas da bacia e não pode ser precisamente estabelecida ou localizada, e concentradas, cuja fonte pode identificada, cadastrada e controlada Mays (2001).

A acumulação de poluentes nas superfícies urbanas pode ser causada por diversas atividades, tais como: desgaste da pavimentação, lançamento de poluentes por veículos, lançamento de efluente doméstico, poluentes industriais, entre outros. Righetto (2009) afirma que os compostos presentes no escoamento superficial variam de acordo com a localização, presença de cobertura vegetal, condições meteorológicas e a carga acumulada no período antecedente ao evento de precipitação. A Tabela 1 apresenta as origens e os impactos gerados pelos principais poluentes urbanos.

Tabela 1 - Poluentes urbanos

Origem	Natureza dos poluentes
Circulação de automóveis	<ul style="list-style-type: none"> • Hidrocarbonetos • Metais provenientes de desgaste de pneus • Óxidos de nitrogênio • Poluentes procedentes da erosão de pavimentos e vias
Industria	<ul style="list-style-type: none"> • Metais • Poluentes químicos orgânicos e inorgânicos • Resíduos de petróleo orgânicos
Lançamento de efluentes domésticos	<ul style="list-style-type: none"> • Organismos patogênicos • Matéria orgânica
Animais	<ul style="list-style-type: none"> • Matéria orgânica proveniente de dejetos
Resíduos sólidos	<ul style="list-style-type: none"> • Matéria orgânica, plástico, metais, papéis, etc. oriundos da lixiviação das superfícies urbanas., depósitos ilegais, aterros mal geridos
Erosão do solo	<ul style="list-style-type: none"> • Material particulado sedimentável e em suspensão
Vegetação	<ul style="list-style-type: none"> • Matéria orgânica • Nitrato e fosfato proveniente de adubos • Compostos organoclorados (pesticidas e herbicidas)

Fonte: Adaptado de RIGHETTO (2009).

Segundo Tucci (2005) a quantidade de material em suspensão no escoamento superficial urbano pode ser superior à observada no esgoto in natura. Tomaz (2009) afirma que os valores de sólidos totais em suspensão no escoamento superficial variam muito de acordo com a situação do local, e, por isso, é muito difícil estimar a carga de sólidos geradas nele.

Os métodos para determinar a descarga sólida em suspensão dos cursos hídricos se dividem entre diretos e indiretos. Segundo Carvalho (2008) o que difere os dois métodos é a complexidade dos cálculos exigidos para determinar a concentração de sedimentos. Dentre os métodos mais difundidos pode-se destacar a amostragem e o turbidímetro.

A amostragem é uma metodologia bem difundida, e consiste basicamente na coleta de amostras de água por amostradores específicos e acondicionados em frascos graduados e, após isso, é feita a análise das amostras em laboratório para determinar a concentração e características dos sedimentos.

A medição da concentração pelo turbidímetro é realizada estabelecendo uma relação entre a concentração de sedimentos em suspensão e a intensidade luminosa captada pela célula do equipamento (COIADO, 2001). Ao medir a turbidez também é coletado amostras para a medição de sólidos em suspensão, a partir disso se relaciona ambas as variáveis para possibilitar a determinação da concentração de sólidos em suspensão e com a vazão medida pode-se determinar a descarga sólida.

2.5 FIRST FLUSH

First Flush ou primeira descarga é a presença significativamente alta de poluentes ou de massa na parte inicial do escoamento superficial (SANSALONE; CRISTINA, 2004). Alguns estudos já identificaram que as concentrações de poluentes no escoamento são significativamente maiores do que a concentração na parte final da chuva de acordo com a intensidade e duração da chuva. (URBONAS; STAHERE, 1993)

Para se caracterizar a ocorrência de *First Flush* é feita a relação entre a massa transportada normalizada, que corresponde ao valor de massa transportada acumulada até um determinado instante dividido pela massa total transportada durante todo o evento de precipitação, e o volume do escoamento superficial normalizado, que corresponde ao valor de volume escoado acumulada até um determinado instante dividido pelo volume total escoado ao longo do evento de precipitação. Quando for observado que o valor da massa normalizada é maior que o valor do volume normalizado correspondente, no início do escoamento, fica caracterizado o efeito do *First Flush* (FELICE *et al.*, 2018)

O *First Flush* relacionado a concentração de poluentes dissolvidos é observado com maior frequência do que o relacionado a massa. Para os poluentes dissolvidos é necessária uma energia de transporte menor do que os sólidos suspensos, por isso, esse material é mais fácil de

ser transportado, facilitando a ocorrência do fenômeno (FELICE *et al.*, 2018; STENSTROM; KAYHANIAN, 2005).

Podem ser observados dois tipos de *First Flush*, um relacionado ao escoamento superficial de um evento de precipitação e o outro relacionado ao escoamento do início da temporada de chuva, conhecido como *First Flush* sazonal. Para ocorrer o *First Flush* sazonal é necessário um período prolongado de seca antes das primeiras chuvas, e para observar esse fenômeno é necessário o acompanhamento dos dados da chuva ao longo de vários anos. Durante o *First Flush* sazonal observa-se uma concentração de poluentes mais elevada durante os primeiros eventos de uma estação chuvosa (STENSTROM; KAYHANIAN 2005).

O *First Flush* ocorre devido a três causas: os poluentes dispersos na atmosfera são lavados pela precipitação, os poluentes acumulados na superfície da bacia hidrográfica são transportados pelo escoamento e o transporte dos poluentes acumulados na rede de drenagem. Além disso, Deletic (1998) afirma que alguns fatores podem afetar a ocorrência do *First Flush*, entre eles:

- Fatores relacionados a precipitação: Intensidade e duração da chuva; altura de chuva precipitada; volume de escoamento superficial, tempo de ascensão e de retardamento e vazão de pico.
- Condições climáticas anteriores
- Características da bacia: a ocorrência de *first flush* normalmente está associada a captações menores e impermeáveis.
- Características do escoamento: Concentração de sólidos suspensos, condutividade e pH
- Poluente: a ocorrência do *first flush* é mais intensa para alguns tipos de poluentes do que para outros, dependendo da captação, da intensidade da chuva e do uso do solo

2.6 ESTUDOS RECENTES SOBRE O ASSUNTO

O estudo do ciclo hidrológico nos mostra que a vazão (Q) de um curso hídrico é diretamente influenciada pela precipitação ocorrida em sua bacia hidrográfica e que o ciclo hidrossedimentológico sofre influência do ciclo hidrológico, por isso pesquisas são realizadas a fim de investigar a relação desses dois ciclos e a influência dos fatores climáticos na C_{ss} .

Beeler e Mitchell (2017), por exemplo, realizaram um estudo no lago Whatcom nos Estados Unidos da América, que se encontra em uma bacia hidrográfica que possui 81% da sua

área coberta por vegetação sendo que 80% dessa vegetação corresponde à floresta madura. O lago serve como fonte de água potável para aproximadamente 100000 pessoas da região. Foram coletados dados de Q e amostras de água para a análise da C_{ss} e de fósforo, na foz dos riachos que abastecem o lago. As amostras foram coletadas durante os eventos de precipitação com o auxílio de um amostrador automático Teledyne ISCO com objetivo de obter os dados durante todo o desenvolvimento do hidrograma. Durante a análise dos dados Beeler e Mitchell (2017) fizeram a relação entre a Q e a C_{ss} e obtiveram valores significativos de relação entre as variáveis na maioria dos riachos.

Alguns estudos identificaram que as estações do ano, devido a suas características climáticas, tendem a influenciar o comportamento do ciclo hidrossedimentológico. Bezak, Šraj e Mikoš (2016), por exemplo, utilizaram dados de C_{ss} obtidos em estações de medição dos cursos hídricos ao longo de todo o território nacional da Eslovênia e compararam com os respectivos dados de Q a fim de tentar identificar uma relação entre as variáveis. Foram utilizados dados de 12 estações de medição diferentes, sendo que todas elas tinham pelo menos 3 anos de dados de C_{ss} com a Q correspondente.

Bezak, Šraj e Mikoš (2016) realizaram análises de tendência, mudança, sazonalidade, latência e frequência nos dados estudados. Os resultados das análises não comprovaram que os métodos utilizados no trabalho foram suficientes para obter uma relação entre C_{ss} e Q que pudesse ser utilizada para estimar valores de C_{ss} a partir dos dados de Q . No entanto, a análise de sazonalidade mostrou que as características dos dados estudados estavam de acordo com o regime hídrico de cada estação, para a maioria dos dados analisados o valor máximo de C_{ss} ocorreu no período chuvoso e os valores mínimos ocorreram no período seco.

A influência da sazonalidade também foi identificada por Kämäria *et al.* (2018) em um estudo no rio Vantaa, no sul da Finlândia, que possui a característica de ficar parcialmente congelado durante o inverno. Foram levantados os dados de Q , a espessura do gelo durante o período congelado, a precipitação diária e a temperatura diária. Para estimar a C_{ss} , a demanda química de oxigênio (DQO) e NO_3-N foi realizado a calibração dos dados obtidos por um espectrofotômetro ultravioleta visível e a validação em relação aos valores amostrais do monitoramento nacional da qualidade da água situado 3,8 km a jusante do local de monitoramento in situ. O monitoramento foi realizado ao longo de 4 anos.

Kämäria *et al.* (2018) identificaram que a C_{ss} mensal ponderada apresentou valores mais altos durante o período de degelo da primavera, e a C_{ss} apresentou os picos mais altos durante

o período chuvoso. Nos períodos em que o rio está coberto com a camada de gelo a turbidez é menor do que quando o canal do rio está aberto. Foi identificado uma relação positiva moderada entre a turbidez e o pico de tempestade, um teste de Mann-Whitney indicou que a faixa média de turbidez foi significativamente maior nas tempestades da primavera e outono em comparação com as tempestades inverno.

Além da vazão, a precipitação também tem sido utilizada como parâmetro para investigar a relação entre os dois ciclos. He *et al.* (2019) realizaram um estudo no estuário do rio Yangtze no sudeste da China, nesse local já havia sido identificado uma distribuição desigual da C_{ss} e da concentração de eutrofização. Por isso, o estudo buscou modelar as C_{ss} e a concentração de clorofila (Chla) nesse estuário com base nas imagens MODIS e descrever a influência das condições meteorológicas nas variáveis de qualidade da água. As variáveis meteorológicas selecionadas para o estudo foram temperatura, velocidade do vento e precipitação e os seus dados foram obtidos na estação meteorológica de Chongming. Além disso, foi desenvolvido um modelo levando em consideração valores de C_{ss} obtidos in situ e a refletância da banda MODIS para que fosse possível estimar os valores de C_{ss} .

Durante o estudo He *et al.* (2019) buscaram relacionar os valores médios de precipitação dos 15 dias anteriores com a C_{ss} utilizando o índice de correlação de Pearson e encontraram uma correlação significativa e positiva entre as duas variáveis. Foi identificado que os períodos chuvosos são os que apresentam maiores valores de C_{ss} e que a região mais próxima a costa tem melhor correlação do que a região mais distante (no sentido ao mar) pois apresentam sedimentos com maior granulometria.

Pizarro *et al.* (2014) estudaram 19 diferentes bacias hidrográficas no sul do Chile com a finalidade de avaliar a influência do uso do solo e do clima na C_{ss} do escoamento superficial. Foi obtido a precipitação média anual de cada bacia com base nas séries históricas e os dados de C_{ss} foram informados pela *Dirección General de Aguas* (DGA) do Chile. Foi utilizado modelos lineares de efeito misto (MLE) para determinar os efeitos da precipitação e do uso da terra na C_{ss} . Pizarro *et al.* (2014) concluíram que anos com mais precipitação estão associados a maiores C_{ss} . Além disso, como mostrado por MLE, o tipo de precipitação contribuiu significativamente para explicar a dinâmica da carga de sedimentos em suspensão. É provável que os solos das bacias hidrográficas expostos a precipitação de neve estejam menos susceptíveis à erosão do que aqueles expostos à chuva. A proporção de áreas urbanas e desmatadas também foi um fator que contribuiu positivamente na C_{ss} nas bacias hidrográficas do sul do Chile.

Silva *et al.* (2008) investigaram os impactos da precipitação na qualidade da água do rio Purus, localizado no estado do Amazonas. As informações de qualidade de água foram obtidas por amostras feitas durante o período de 1998-2005 para as variáveis de: temperatura da água, pH, turbidez, condutividade elétrica, OD e sólidos em suspensão. Os dados de chuva usados nessa pesquisa foram obtidos a partir de estimativas feitas por meio de informações coletadas pelos sensores do satélite Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM).

Silva *et al.* (2008) afirmam que os resultados obtidos na pesquisa mostram que a precipitação parece ser o principal agente influenciador da qualidade da água do rio Purus, uma vez que foi observado que as principais variáveis monitoradas se correlacionaram significativamente com o regime de chuvas do local. A precipitação parece favorecer a diminuição da turbidez, enquanto contribui para aumento da temperatura, condutividade, sólidos em suspensão e OD.

Hagemann e Gastaldini (2016) avaliaram pH, condutividade elétrica, turbidez, Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO₅), sólidos totais, sólidos suspensos, sólidos dissolvidos e *Escherichia coli* da água da chuva na cidade de Santa Maria, RS, analisando a variação desses parâmetros ao longo da precipitação. Foram coletadas amostras da água de chuva diretamente da atmosfera e de um telhado para ser possível avaliar a variação da qualidade da água após passar pela superfície de captação. Foram analisados 16 eventos de precipitação entre abril e novembro de 2008.

Hagemann e Gastaldini (2016) observaram que os valores de C_{ss} são maiores no início do escoamento, efeito da lavagem que ocorre nos primeiros momentos da chuva, e que os parâmetros turbidez, sólidos totais, sólidos suspensos e sólidos dissolvidos sofrem mais influência da característica da precipitação. Outro ponto observado foi que nos eventos com fraca intensidade do início ao fim da precipitação, os valores dos parâmetros de qualidade da água da chuva coletada dos telhados foram menores em relação a eventos mais intensos, mesmo com maiores períodos secos antecedentes, indicando a influência do poder de arraste da chuva na qualidade da água coletada.

Outro aspecto importante que tem sido observado nesses estudos é a influência que a C_{ss} tem em outros parâmetros de qualidade de água. Zhang *et al.* (2017) realizaram um estudo no reservatório de Yugiaono nordeste de Tianjin, na China. Foram coletadas amostras, com frequência quinzenal, do reservatório entre os anos 2000 e 2011. As amostras foram analisadas em diversos parâmetros físicos, químicos e biológicos, entre eles C_{ss} . Os dados de temperatura

média diária, precipitação e velocidade do vento do local foram obtidos do Sistema de Serviço de Compartilhamento de Dados Meteorológicos da China. Após serem divididos de acordo com a estação do ano, foram realizadas análises estáticas dos dados com o auxílio do programa R.

Zhang *et al.* (2017) descobriram boas correlações durante as análises entre a C_{ss} e os fatores meteorológicos. No período chuvoso os valores de C_{ss} aumentaram de acordo com o aumento da precipitação. Outro ponto observado no estudo é que a C_{ss} tem um forte efeito sobre os demais parâmetros de qualidade de água, alguns nutrientes e contaminantes foram encontrados em maior concentração durante os maiores valores de C_{ss} , isto devido a adsorção destes compostos aos sedimentos.

Righetto *et al.* (2017) monitoraram entre julho e outubro de 2013 nove eventos de precipitação em uma bacia urbana da cidade de Natal, Rio Grande do Norte e quantificaram a carga de poluente dos escoamentos superficiais gerados pelos eventos. Amostras dos primeiros 24 min de escoamento superficial foram coletadas em intervalos de 1 min com o auxílio de um amostrador automático Teledyne ISCO 6712. Os dados de precipitação dos eventos foram obtidos utilizando uma estação pluviométrica monitorada pelo Projeto Manejo de Águas Pluviais Urbanas (MAPLU/FINEP), localizada na área de monitoramento do projeto.

Righetto *et al.* (2017) analisaram os dados com o objetivo de identificar a variação da qualidade da água ao longo da chuva e traçaram a curva de massa X volume para os seguintes parâmetros: DQO, fósforo total (FT), teor de óleos e graxas (TOG), sólidos totais (ST) e C_{ss} e identificaram que os eventos que resultaram em maior C_{ss} foram os que apresentaram maior correlação entre FT X C_{ss} e DQO X C_{ss} associados às maiores intensidades de precipitação pluviométrica nos primeiros minutos dos eventos medidos.

No entanto, fenômenos antrópicos e naturais podem interagir com esses ciclos e interferir na relação esperada entre eles. Lubis *et al.* (2015) realizaram um estudo na bacia hidrográfica de Padang, na Indonésia, utilizando o modelo Linear Dinâmico Bayesiano para avaliar a relação entre a Q do rio e a intensidade da precipitação, variáveis de entrada, com a C_{ss} , variável de resposta. Os dados de C_{ss} e Q foram tirados de duas sub-bacias de Padang durante julho de 2012 a julho de 2013. Os dados de precipitação diários foram retirados das estações de Rambutan e Brohol. O modelo Linear Dinâmico Bayesiano foi utilizado com o objetivo de identificar as tendências de relação de curto prazo entre a C_{ss} X Q e C_{ss} X Intensidade da Chuva.

Lubis *et al.* (2015) identificaram uma correlação muito fraca entre a C_{ss} e a Q , e a C_{ss} e a intensidade da chuva durante o período estudado. Por isso, o trabalho chegou à conclusão que o modelo linear dinâmico bayesiano não seria o mais indicado para relacionar essas variáveis nas saídas das sub-bacias de Padang estudadas. A bacia de Padang teve grande parte de sua área de floresta substituídas por áreas agrícolas, Lubis *et al.* (2015) recomendam em seu trabalho que essa abordagem precisa ser aplicada a outros dados hidrológicos e geofísicos de séries temporais mais longas para se obter uma maior compreensão do dinamismo dos sistemas hidrológicos e sua sensibilidade às mudanças climáticas, bem como à influência antrópica.

Fraga *et al.* (2012) monitoraram a qualidade da água utilizada em produções agrícolas familiares para a irrigação de morangueiros na cidade de Turuçu, RS. Foram coletadas, entre agosto de 2007 e novembro de 2008, amostras mensais, nas fontes de captação da água utilizada para irrigação, para que fosse realizado análises físico-químicas. Os parâmetros avaliados foram: condutividade elétrica, DBO, alcalinidade, OD, sólidos suspensos, sólidos dissolvidos, sólidos totais e turbidez. Além disso, foram instalados pluviômetros do tipo “Ville Paris” em cada propriedade rural estudada para a coleta dos dados das chuvas.

Fraga *et al.* (2012) relacionou os parâmetros de qualidade de água com a precipitação, mas não foi possível estabelecer uma relação entre as variáveis estudadas. A qualidade da água das fontes pode ser mais influenciada por fatores além dos avaliados no estudo, por exemplo as atividades antrópicas realizadas dentro da propriedade.

Alencar *et al.* (2019) avaliaram a influência da precipitação sobre parâmetros físico-químicos da qualidade de água no estuário Guajarinó em Belém no Pará. Foram monitorados 5 pontos com coletas de amostras mensais entre janeiro de 2014 e janeiro de 2016, os dados de precipitação usados nessa pesquisa foram obtidos por meio de informações a partir dos dados coletados do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) da estação meteorológica de Belém. Os parâmetros avaliados foram: temperatura, pH, condutividade elétrica, sólidos totais dissolvidos (STD), salinidade, OD, turbidez, cor real e DBO.

Alencar *et al.* (2019) observaram que durante o período chuvoso, quando ocorrem as chuvas intensas nessa região, os parâmetros de pH, temperatura, condutividade elétrica, STD, salinidade, OD e turbidez, tendem a diminuir suas concentrações. No período menos chuvoso, ocorre o contrário, esses valores de concentração aumentam consideravelmente. Tais comportamentos desses parâmetros se devem pela junção da hidrodinâmica local da Baía do

Guajará com o efeito climático, decorrente da interferência da entrada e saída das correntes oceânicas e superficiais (produto de marés).

Oliveira e Cunha (2014) estudaram a influência da precipitação na qualidade físico-química da água no Baixo Rio Jari-AP. Foram realizadas coletas mensais de água superficial durante novembro de 2009 e novembro de 2010. Os dados de precipitação mensal para os eventos amostrais da qualidade da água foram obtidos da estação hidrometeorológica de São Francisco da Agência Nacional de Águas (ANA). Oliveira e Cunha (2014) não identificaram relação entre a precipitação e a C_{ss} no local estudado, os parâmetros físicos que apresentaram sofrer influência da precipitação mensal foram cor e a turbidez.

Para contornar esse problema alguns estudos são realizados em bacias menores, para que seja possível conhecer as interferências externas no ciclo. Gong *et al.* (2016) realizou um estudo em um campus universitário na cidade de Beijing, China que possui 2,8 ha de área de drenagem com 76,5% da área de captação impermeável. Para a coleta de dados foi instalado um medidor de vazão por efeito doppler Teledyne ISCO 2150 próximo à saída da rede de drenagem, uma estação meteorológica automatizada para registrar os dados de precipitação e um amostrador automático Teledyne ISCO 6712 para a coleta de amostras do escoamento superficial e determinação posterior da C_{ss} . Usando a C_{ss} como indicador, a poluição urbana na área de estudo foi simulada, sob diferentes padrões de precipitação, com o auxílio modelo SWMM calibrado e validado com os dados observados em dois eventos de precipitação: 21 de julho de 2012 (precipitação severa de 221,2 mm em 16 h, com um período de retorno de 20 a 50 anos) e 7 de junho de 2013 (precipitação de 16,6 mm).

Segundo Gong *et al.* (2016) os resultados de modelagem do SWMM mostraram as influências não apenas das características da chuva, mas também da inundação da superfície na C_{ss} . Os resultados e conclusões do estudo de caso são específicos do local e podem não ser geralmente aplicáveis a todas as bacias urbanas, mas são representativos de muitas bacias porque as inundações de superfície urbana são uma ocorrência comum, especialmente sob fortes chuvas.

Zuraini *et al.* (2018) investigaram a influência da característica da precipitação na C_{ss} , em dois eventos de chuva, do escoamento de águas pluviais *no campus* universitário da na Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Teknologi Malaysia Skudai, Johor, Malásia. As amostras foram coletadas manualmente, em intervalos de dois minutos, em frascos de 1 L desde o início do escoamento até a conclusão do evento, e o tempo de amostragem e o nível da

água foram registrados. As amostras foram levadas para laboratório para a análise da C_{ss} . Um pluviômetro tipo balde de chuva (ISCO) foi utilizado para coletar os dados de precipitação.

Zuraini *et al.* (2018) relacionaram as duas variáveis e observaram que o padrão de precipitação tem influência na C_{ss} ao longo do evento. A precipitação com alta intensidade de chuvas no início do evento produziu maior C_{ss} no início do evento em relação à precipitação com alta intensidade de chuva no meio do evento.

Também existem estudos realizados em ambientes controlados, onde é possível determinar as variáveis estudadas e isolá-las das interferências externas, Zhang *et al.* (2018) realizaram um estudo utilizando um simulador de chuva com o objetivo de identificar os efeitos da intensidade da chuva e da declividade do solo na C_{ss} e na concentração de Fósforo. A intensidade da chuva simulada variou entre 30, 50, 65 e 100 mm/h com duração correspondente de 3, 3, 2 e 1 hora, a declividade variou entre 0°, 5° e 10° e o tipo de solo variou entre nu e com grama. Foram coletadas amostras do escoamento superficial gerado pela chuva simulada e foi realizado as análises da C_{ss} e concentração de fósforo.

Zhang *et al.* (2018) relacionaram a intensidade da chuva e a declividade do solo com a C_{ss} e concluíram que existe uma relação significativa e positiva entre as variáveis, sendo que a intensidade da chuva apresentou maior influência do que a declividade do solo na C_{ss} . O solo com grama apresentou uma redução na erosão comparado ao solo nu, no entanto esse efeito fica menor de acordo com o aumento da declividade.

Felice *et al.* (2018) utilizaram um simulador de chuva para avaliar o transporte de partículas em suspensão e poluentes dissolvidos no escoamento superficial sobre uma superfície impermeável em escala laboratorial. No estudo, a posição da fonte poluidora variou entre quatro posições pré-definidas, e o tipo de transporte variou entre em suspensão, para partículas de areia, e dissolvido, para o cloreto de sódio, resultando assim em oito combinações diferentes. Para cada combinação foram realizados 5 ensaios, 40 ensaios no total, para que fosse possível a análise estatística dos resultados.

Felice *et al.* (2018) observaram que o instante que ocorre o pico do transporte de poluentes dissolvidos ou em suspensão é o mesmo quando a fonte de poluição está localizada próxima ao exutório, no entanto, quando a fonte está longe do exutório o transporte de poluentes dissolvidos é muito mais rápido do que o transporte das partículas em suspensão

3 ARTIGO

DESENVOLVIMENTO DE FÓRMULA PARA RELACIONAR A PRECIPITAÇÃO E A VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO NO ESCOAMENTO SUPERFICIAL URBANO¹

RESUMO

Os ciclos hidrológicos e hidrossedimentológicos estão diretamente relacionados, sendo possível observar a influência do primeiro no segundo. As características da vazão (Q) e precipitação (P) alteram a dinâmica dos sedimentos nos cursos hídricos. Devido a esse fato diversos estudos buscam encontrar formas para correlacionar os dados hidrológicos com os parâmetros físicos de qualidade de água, entre eles os sedimentos em suspensão. O presente trabalho tem como objetivo propor uma fórmula que permita relacionar os dados de precipitação com a concentração de sólidos suspensos (C_{ss}), estudar o comportamento sazonal da C_{ss} e investigar a ocorrência de *Mass First Flush* (MFF) no escoamento superficial dos eventos avaliados. Foi utilizado um amostrador automático para coleta de amostras de escoamento superficial de 28 eventos de precipitação, as amostras foram levadas para laboratório para determinação da C_{ss} , paralelamente foi realizado o monitoramento pluviométrico na região da coleta e a medição da altura da lâmina d'água do escoamento para a determinação da vazão. A fórmula proposta no trabalho obteve coeficientes de relação linear com valores de $R^2= 0,7394$ e $R^2= 0,8154$ para os dados de concentração de sólidos suspensos de pico (C_{ss}^{pico}) e médio (C_{ss}^{med}), respectivamente, trazendo como inovação a possibilidade de prever o comportamento da curva de C_{ss} de acordo com o comportamento da precipitação que ocorreu antes do escoamento superficial. Na análise de MFF foi observado que o fenômeno ocorreu na maior parte dos eventos estudados, o que era esperado pelas características da área de estudo e na análise de sazonalidade foi observado que as características das estações do ano têm influência no transporte de C_{ss} .

Palavras-chave: Escoamento Superficial, Concentração de Sedimentos, Precipitação.

¹ Artigo submetido a revista Engenharia Sanitária e Ambiental no dia 30/01/2020

DEVELOPMENT OF FORMULA TO RELATE THE PRECIPITATION AND THE VARIATION OF THE CONCENTRATION OF SEDIMENTS IN SUSPENSION IN URBAN SURFACE FLOW

ABSTRACT

The hydrological and hydrosedimentological cycles are directly related, being possible to observe the influence of the first in the second. The flow (Q) and precipitation (P) characteristics alter the dynamics of the sediments in the water courses. Due to this fact, several studies seek to find ways to correlate the hydrological data with the physical parameters of water quality, including suspended sediments. The present work aims to propose a formula that allows to relate the precipitation data with the concentration of suspended solids (C_{ss}), to study the seasonal behavior of the C_{ss} and to investigate the occurrence of Mass First Flush (MFF) in the runoff of the evaluated events. An automatic sampler was used to collect runoff samples from 28 precipitation events, the samples were taken to the laboratory to determine the C_{ss} , in parallel the rainfall monitoring in the region of collection was carried out and the height of the water depth was measured. flow for determining the flow. The formula proposed in the work obtained coefficients of linear relation with values of $R^2 = 0.7394$ and $R^2 = 0.8154$ for the peak (C_{ss}^{peak}) and average (C_{ss}^{avg}) suspended solids concentration data, respectively, bringing as an innovation, the possibility of predicting the behavior of the C_{ss} curve according to the behavior of precipitation that occurred before surface runoff. In the MFF analysis, it was observed that the phenomenon occurred in most of the events studied, which was expected due to the characteristics of the study area and in the seasonality analysis, it was observed that the characteristics of the seasons have an influence on C_{ss} transport.

Key words: Runoff, Sediments Concentration, Rainfall.

3.1 INTRODUÇÃO

O estudo do ciclo hidrológico mostra que a vazão de um curso hídrico é diretamente influenciada pela precipitação ocorrida em sua bacia hidrográfica e que o ciclo hidrossedimentológico sofre influência do ciclo hidrológico, por isso pesquisas são realizadas a fim de investigar a relação desses dois ciclos e a influência da precipitação na concentração de sólidos suspensos.

Beeler e Mitchell (2017), por exemplo, realizaram um estudo no lago Whatcom nos Estados Unidos da América, coletando dados de vazão (Q) e amostras de água para a análise da concentração de sólidos suspensos (C_{ss}) e de fósforo, fizeram a relação entre a Q e C_{ss} e obtiveram valores significativos de correlação entre as variáveis na maioria dos riachos (com coeficientes tau de kendall variando de 0,442 a 0,668). Souza e Gastaldini (2014) avaliaram a qualidade da água em diferentes bacias hidrográficas no município de Santa Maria, no sul do Brasil, e observaram relações entre a vazão e C_{ss} em uma bacia que estava em estado mais preservado. Garrido *et al.* (2018) desenvolveram um estudo na sub-bacia hidrográfica do rio Piranhas realizando medições hidrossedimentológicas com o objetivo de determinar as curvas-chave que representam as cargas de sedimentos em suspensão do rio e concluíram que a concentração de material transportado no rio Piranhas está diretamente relacionada com a quantidade de precipitações e as curvas-chave de descarga sólida em suspensão e total apresentaram bons coeficientes de determinação, tanto para o período seco ($R^2= 0,8123$ e $0,8149$) quanto para o período chuvoso ($R^2= 0,9030$ e $0,9370$).

Estudos identificaram que as estações do ano, devido a suas características climáticas, tendem a influenciar o comportamento do ciclo hidrossedimentológico. Bezak, Šraj e Mikoš (2016) utilizaram dados de C_{ss} obtidos em estações de medição dos cursos hídricos ao longo de todo o território nacional da Eslovênia e identificaram que o valor máximo de C_{ss} ocorreu no período chuvoso, enquanto os valores mínimos ocorreram no período seco. A influência da sazonalidade também foi observada por Kämäria *et al.* (2018) que, em um estudo no rio Vantaa, no sul da Finlândia, identificaram que a C_{ss} mensal ponderada apresentou valores mais altos durante o período de degelo da primavera, e a C_{ss} apresentou os picos mais altos durante o período chuvoso. He *et al.* (2019) realizaram um estudo no estuário do rio Yangtze no sudeste da China que buscou modelar as C_{ss} e a concentração de clorofila ($Chla$) com base nas imagens MODIS e descrever a influência das condições meteorológicas nas variáveis de qualidade da água. Nesse trabalho foi identificado que os períodos chuvosos são os que apresentam maiores

valores de C_{ss} . Zhang *et al.* (2017) realizaram um estudo no reservatório de Yugiaono nordeste de Tianjin na China, onde coletaram amostras com frequência quinzenal entre os anos 2000 e 2011 e foi observado que os valores de C_{ss} aumentaram de acordo com o aumento da precipitação no período chuvoso.

Além da vazão, a precipitação também tem sido utilizada como parâmetro para investigar a relação entre os ciclos hidrológicos e hidrossedimentológicos. O estudo realizado por He *et al.* (2019) buscou relacionar os valores acumulados de precipitação dos 15 dias anteriores com a C_{ss} utilizando o índice de correlação de Pearson e encontraram uma correlação significativa e positiva entre as duas variáveis (com coeficiente de correlação de Pearson variando entre 0,328 a 0,608). Pizarro *et al.* (2014) investigaram 19 diferentes bacias hidrográficas no sul do Chile, a partir da precipitação média anual de cada bacia e as C_{ss} , obtidas nas séries históricas e concluíram que anos com mais precipitação estão associados a maiores C_{ss} e que as características da precipitação contribuem significativamente na dinâmica da carga de sedimentos em suspensão. Silva *et al.* (2008) investigaram os impactos da precipitação na qualidade da água do rio Purus, no estado do Amazonas. As informações de qualidade de água foram obtidas por amostras feitas durante o período de 1998-2005 para diversas variáveis e os resultados mostram que a precipitação parece ser o principal agente influenciador da qualidade da água, uma vez que o regime de chuva se relaciona com as principais variáveis monitoradas, entre elas sólidos em suspensão. Hagemann e Gastaldini (2016) avaliaram diversos parâmetros de qualidade de água, entre eles sólidos em suspensão, na cidade de Santa Maria, no sul do Brasil, analisando a variação deles ao longo da precipitação. Foram coletadas amostras da água de chuva diretamente da atmosfera e após a passagem por telhado e observaram que os valores de C_{ss} são maiores no início do escoamento, efeito da lavagem que ocorre nos primeiros milímetros da chuva e que os parâmetros turbidez, sólidos totais, sólidos em suspensão e sólidos dissolvidos sofrem mais influência da precipitação. Righetto *et al.* (2017) monitoraram entre julho e outubro de 2013 nove eventos de precipitação em uma bacia urbana da cidade de Natal, no nordeste do Brasil e quantificaram a carga de poluente dos escoamentos superficiais gerados pelos eventos, para identificar a variação da qualidade da água ao longo da chuva. Identificaram que os eventos que resultaram em maior C_{ss} foram os que apresentaram maior intensidades de precipitação pluviométrica nos primeiros minutos dos eventos medidos.

Fenômenos naturais ou antrópicos podem interagir com os ciclos hidrológicos e hidrossedimentológicos e interferir na relação entre eles. Alguns estudos foram realizados em bacias menores, para que seja possível conhecer as interferências externas nos ciclos. Gong *et*

al. (2016), por exemplo, realizaram um estudo em um campus universitário na cidade de Beijing, China, utilizando o programa computacional SWMM para simular a poluição urbana tendo como indicador a C_{ss} sob diferentes padrões de precipitação. Os resultados mostraram as influências não apenas das características da chuva, mas também da inundação da superfície na C_{ss} . Zuraini *et al.* (2018) investigaram a influência da característica da precipitação na C_{ss} do escoamento de águas pluviais de um campus universitário em Johor, Malásia, e observaram que a precipitação tem influência na C_{ss} ao longo do evento.

Com o objetivo de identificar a ocorrência do fenômeno da primeira descarga de lavagem (*Mass First Flush*) (MFF), Zhang *et al.* (2018) realizaram um estudo utilizando um simulador de chuva com o objetivo de identificar os efeitos da intensidade da precipitação e da declividade do solo na C_{ss} e na concentração de Fósforo. Concluíram que a intensidade da chuva apresentou maior influência do que a declividade do solo na C_{ss} e que a C_{ss} apresentou maiores valores no início do escoamento superficial, efeito similar ao MFF, independente da declividade. Felice *et al.* (2018) utilizaram um simulador de chuva para avaliar o transporte de partículas em suspensão e dissolvidas no escoamento superficial sobre uma superfície impermeável em escala laboratorial. Observaram que o instante que ocorre o pico do transporte de poluentes dissolvidos ou em suspensão é o mesmo quando a fonte de poluição está localizada próxima ao exutório. No entanto, quando a fonte está afastada do exutório o transporte de poluentes dissolvidos é muito mais rápido do que o transporte das partículas em suspensão. No transporte de partículas em suspensão só foi observado o efeito do MFF quando a fonte de poluição estava próxima ao exutório. No material dissolvido foi observado o MFF em todas as situações. Girão *et al.* (2017) realizaram um estudo com o objetivo de modelar um sistema de drenagem em situação de inundação e o transporte de poluentes associados, utilizando a C_{ss} como parâmetro, e observou um pico de C_{ss} no início dos escoamentos simulados caracterizando a ocorrência de MFF.

O presente trabalho tem como objetivo investigar o comportamento da C_{ss} no escoamento superficial urbano para que seja possível propor uma fórmula que permita relacionar os dados de precipitação com a C_{ss} , estudar o comportamento sazonal da C_{ss} e investigar a ocorrência de *Mass First Flush* (MFF) nos eventos estudados.

3.2 MATERIAIS E MÉTODOS

ÁREA DE ESTUDO

O presente estudo foi realizado no prédio do restaurante universitário da Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL - MG), *campus* Poços de Caldas, MG. Foram coletadas amostras do escoamento superficial gerado no telhado metálico de uma edificação e na área impermeabilizada em seu entorno. O ponto de coleta foi a montante de um vertedor instalado na canaleta do edifício (1% de declividade).

A área de influência é de 311,26 m² sendo 49,35 m² correspondentes ao piso de concreto e 261,91 m² ao telhado metálico. A Figura 5 apresenta a área de influência.

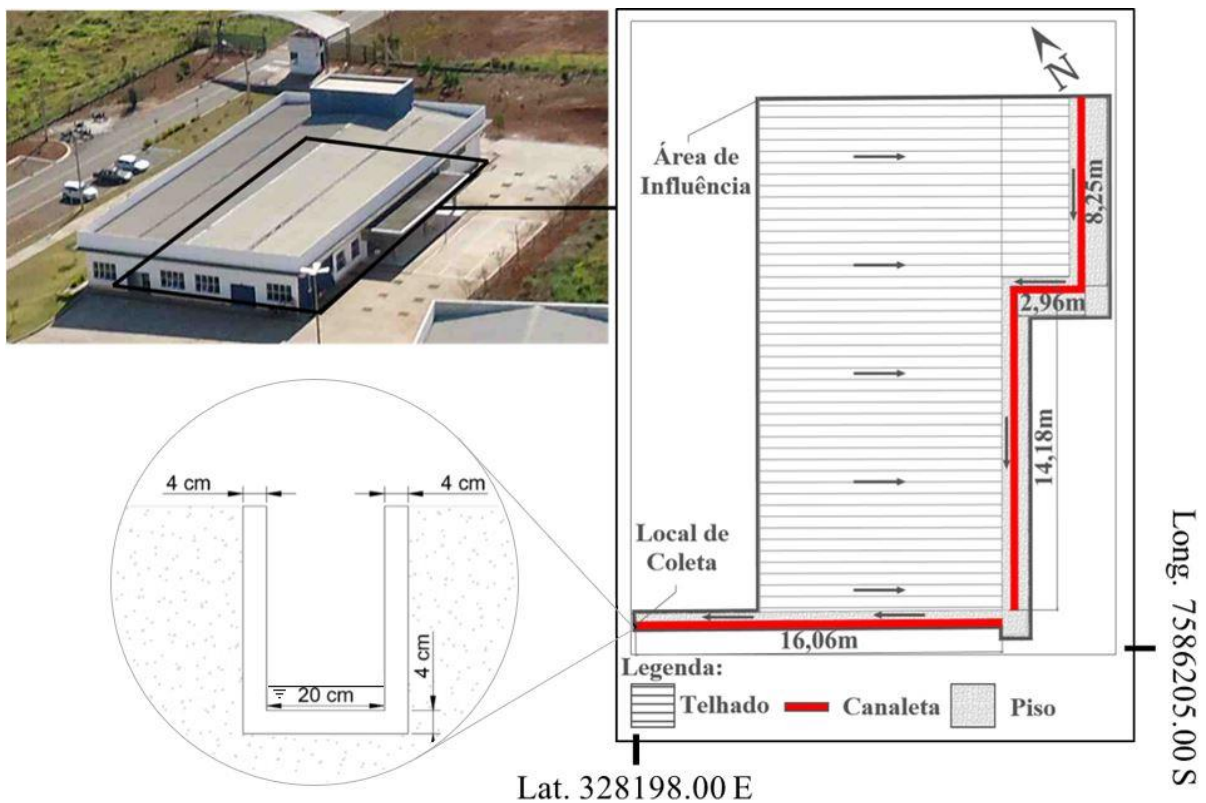


Figura 5: Área de Influência

MATERIAIS

Um vertedor retangular com contração lateral foi instalado na canaleta para permitir a coleta das amostras de escoamento superficial. O vertedor é construído em acrílico e possui

dimensões de 20cm de largura, 4cm de altura da soleira, com contração lateral de 4cm em ambos os lados, como apresentou a Figura 5.

A coleta das amostras foi realizada pelo amostrador automático Teledyne ISCO 6712 F com um atuador de nível 1640 Teledyne ISCO acoplado para detectar a presença da água da chuva na canaleta. Em seguida a amostra é succionada através de uma mangueira de vinil (plástico ABS – Acrylonitrile Butadiene Styrene) com diâmetro de 3/8” que possui um filtro com corpo em polipropileno e aço inox nas extremidades para evitar a entrada de sólidos que possam entupir a mangueira. Após serem coletadas, as amostras seguem para o interior do amostrador com o auxílio de uma bomba peristáltica e são armazenadas em frascos apropriados. O amostrador 6712 F tem capacidade de coletar 24 amostras por evento e os frascos tem a capacidade de armazenar volume de até um litro.

Foi utilizado uma bomba a vácuo Primatec modelo 121 e filtros de fibra de vidro com porosidade de 1 μ m e diâmetro de 47 mm para filtrar as amostras do escoamento superficial. Após a realização da filtragem os filtros foram dispostos em cadinhos de porcelana e levados a estufa modelo SL-102 da Solab e pesados em uma balança analítica modelo FA2204B para determinar a C_{ss} .

Um pluviômetro semiautomático Delta Ohm HD-2013-DB instalado no *campus* de Poços de Caldas da UNIFAL -MG, nas coordenadas utm lat. 328247.00 e, long. 7586236.00 s, foi utilizado para monitorar a precipitação do local paralelamente à coleta das amostras.

Para obtenção da carga hidráulica sobre o vertedor, utilizou-se um sensor de nível (sonda levellogger da marca Solinst, modelo 3001), possibilitando o cálculo da vazão do escoamento superficial gerada pelos eventos de precipitação.

MÉTODO

O amostrador foi programado para a coleta sequencial de amostras, com volume de 100 ml cada. A coleta se inicia após a detecção de água na canaleta pelo atuador de nível, e se encerra ao completar o limite de 24 frascos do equipamento ou cessar o escoamento. Após a coleta, as amostras foram levadas ao laboratório para realização das análises de C_{ss} , seguindo a metodologia de análise APHA (2005) descrita a seguir.

Inicialmente preparou-se o filtro de fibra de vidro, através da sucção com água destilada e em seguida a secagem na estufa e aferição da massa com auxílio da balança analítica. Este procedimento foi realizado até que os valores de pesagem fossem constantes ou apresentassem diferença inferior a 4%.

Em seguida, realizou-se a filtração da amostra, e um novo ciclo de secagem na estufa com posterior aferição de massa, seguindo o mesmo procedimento do preparo as pesagens foram realizadas até que se obtivessem massas constantes ou apresentassem diferença inferior a 4%.

A C_{ss} foi determinada através da relação entre os valores de massa dos sólidos obtida através da pesagem e o volume das amostras (100ml).

A vazão do escoamento superficial foi calculada através do método indicado por Porto (2001) para vertedores com influência de contração lateral, através da Equação 1, apresentada a seguir:

$$Q = 1,838. (L - 0,20h). h^{3/2} \quad (1)$$

Sendo Q a vazão em m^3/s , L a largura do vertedouro em metros e h altura da lâmina da água do escoamento superficial ajustada pela altura correspondente da soleira em metros. A altura da lâmina d'água foi determinada através do sensor de nível e subtraída pela altura da soleira.

A descarga sólida foi determinada multiplicando os valores de vazão pela C_{ss} . O volume foi calculado pela integral do hidrograma, e a massa pela integral do polutograma, traçados para os eventos.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram realizadas coletas de amostras de escoamentos superficiais gerados por 28 eventos de precipitação diferentes durante janeiro de 2019 a janeiro de 2020. Para todos os eventos foram obtidos os dados das precipitações e realizada a análise da C_{ss} das amostras. A Tabela 2 apresenta os resultados.

Tabela 2: Dados dos eventos monitorados.

Evento	Data	P_{total} (mm)	P_{amos} (mm)	C_{ss}^{pico} (mg/L)	C_{ss}^{med}
--------	------	---------------------	--------------------	---------------------------	----------------

						(mg/L)
1	22/01/19	4,0	4,0	142	24,93	
2	23/01/19	2,0	1,8	100	14,00	
3	31/01/19	11,2	3,4	16	7,16	
4	04/02/19	5,8	5,6	153	29,38	
5	06/02/19	4,8	2,4	54	16,00	
6	14/03/19	14,2	2,2	15	5,75	
7	08/04/19	23,0	2,6	8	3,96	
8	16/04/19	13,0	3,6	9	2,00	
9	14/05/19	3,6	3,0	39	6,38	
10	16/05/19	41,4	1,2	24	7,41	
11	20/08/19	4,0	1,8	49	11,70	
12	03/09/19	4,2	3,4	67	13,25	
13	25/09/19	70,6	4,2	134	33,00	
14	25/09/19	70,6	0,6	31	3,58	
15	07/10/19	7,8	0,6	56	9,39	
16	24/10/19	5,2	3,4	52	7,75	
17	29/10/19	3,0	2,4	27	5,50	
18	31/10/19	2,6	2,6	49	7,50	
19	05/11/19	21,6	0,2	24	8,25	
20	05/11/19	21,6	2,2	30	3,88	
21	05/12/19	7,4	2,4	26	8,75	
22	11/12/19	19,2	1	8	2,26	
23	12/12/19	16,2	6,4	24	2,25	
24	08/01/20	1,6	0,6	26	7,36	
25	08/01/20	1,6	0,2	24	6,32	
26	10/01/20	1	0,6	11	2,04	
27	20/01/20	8,2	8	13	3,25	
28	22/01/20	2,8	1,4	12	2,88	

Em que:

P_{total} : a precipitação total medida pelo pluviômetro durante o dia da coleta da amostra

P_{amos} : a precipitação durante o período em que foram coletadas as amostras

C_{SS}^{pico} : o maior valor obtido de concentração de sólidos em suspensão dentre as amostras coletadas no evento

C_{SS}^{med} : a média das concentrações de sólidos em suspensão de todas as amostras coletadas no evento.

ANÁLISE DE SAZONALIDADE

A Figura 6 apresenta os gráficos com as variações das precipitações totais e das C_{SS}^{pico} e C_{SS}^{med} ao longo dos meses em que foram realizadas as coletas das amostras.

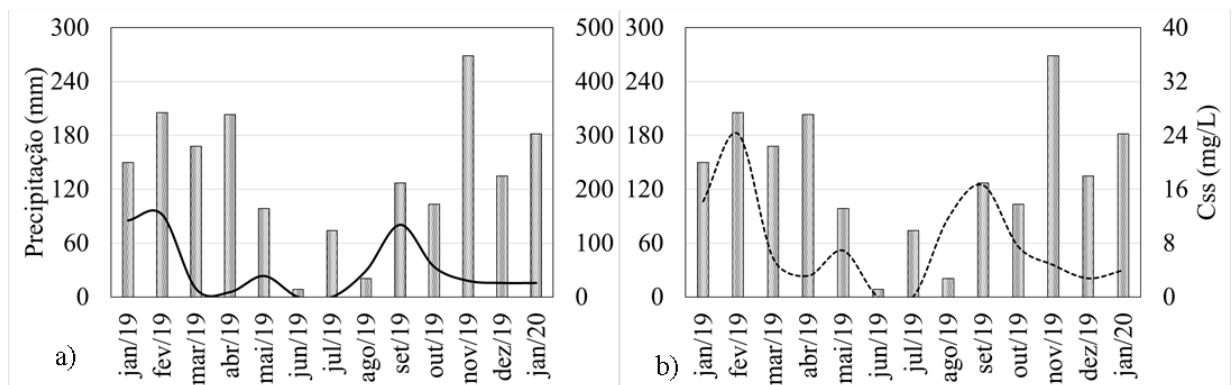


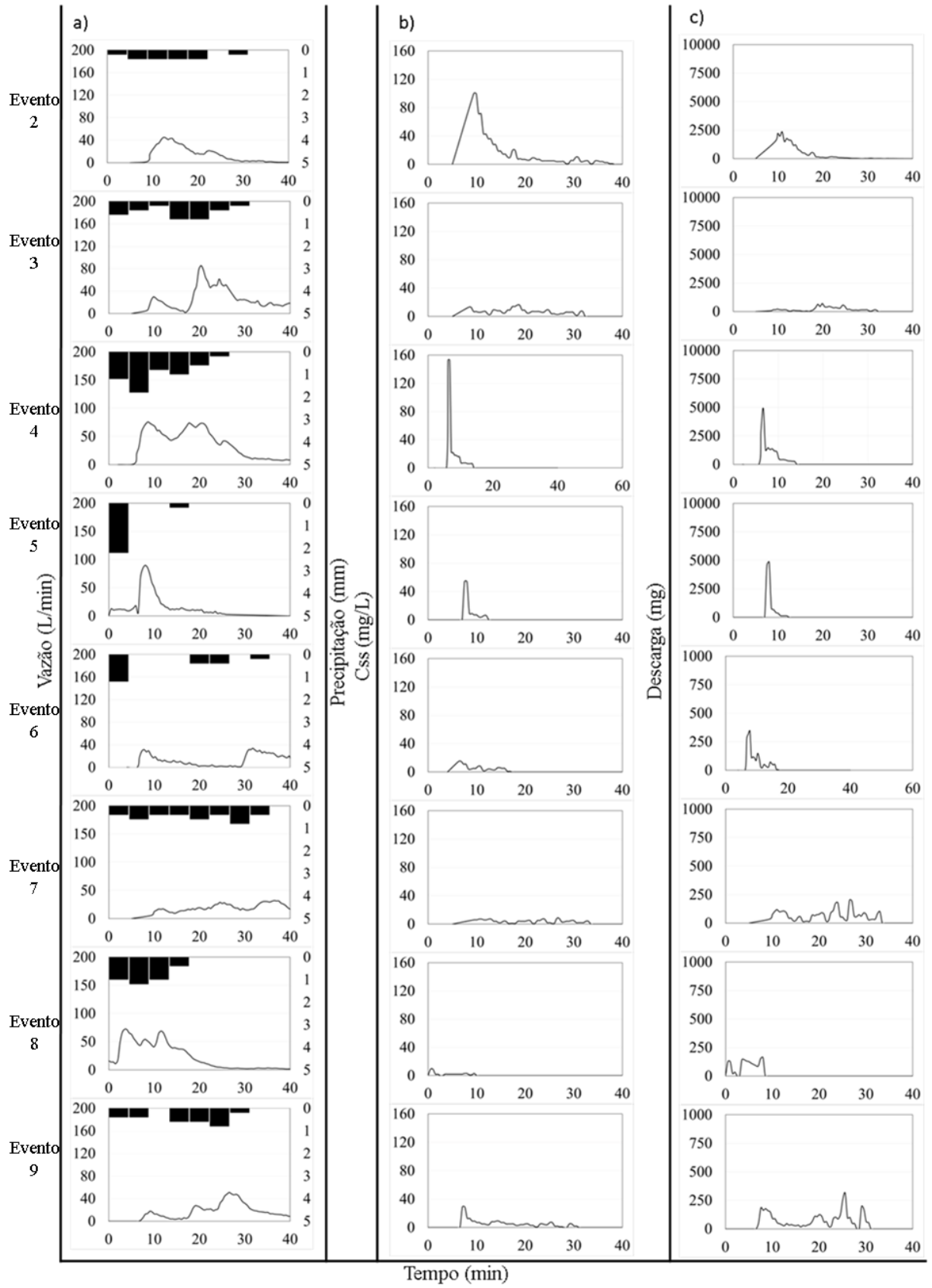
Figura 6: a) Variação Sazonal da C_{SS}^{pico} b) Variação Sazonal da C_{SS}^{med} .

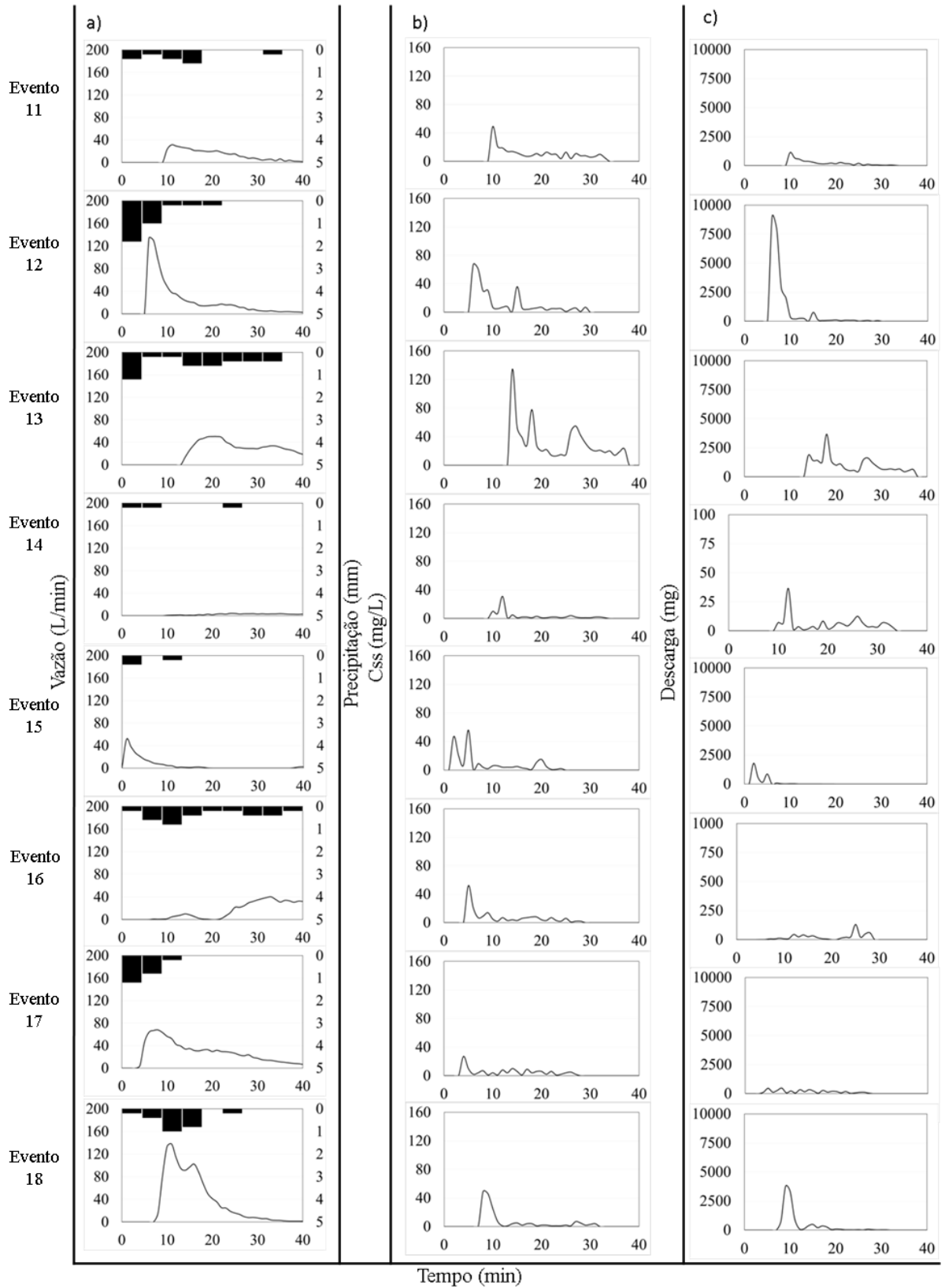
O período chuvoso apresentou os maiores valores de C_{SS}^{pico} e C_{SS}^{med} . Foi observado nos meses de março, abril, novembro, dezembro e janeiro de 2020 baixos valores de C_{SS}^{pico} e C_{SS}^{med} , apesar de ter ocorrido altos valores de precipitação, isso provavelmente ocorreu devido ao efeito da lavagem da superfície proporcionada pelos eventos anteriores. A análise da Figura 6 permite observar a sazonalidade mostrando que os dados corroboram com o que foi observado nos estudos de Bezak, Šraj e Mikoš (2016), Kāmāria *et al.* (2018), He *et al.* (2019) e Zhang *et al.* (2017) que observaram influência das características das estações do ano no comportamento das curvas de C_{SS} .

CÁLCULO DA VAZÃO, VOLUME E MASSA TRANSPORTADA

Foram medidas as vazões de 23 destes eventos, através do método indicado, nos demais eventos não foi possível medir a vazão pois os dados da altura da lâmina d'água foram perdidos devido a problemas operacionais com o equipamento de medição.

Com os dados de precipitação, vazão e C_{ss} desses eventos foi calculado a descarga sólida ao longo do tempo e foram traçados gráficos Vazão x Tempo, Precipitação x Tempo, C_{ss} x Tempo e de Descarga Sólida x Tempo, como mostra a Figura 7.





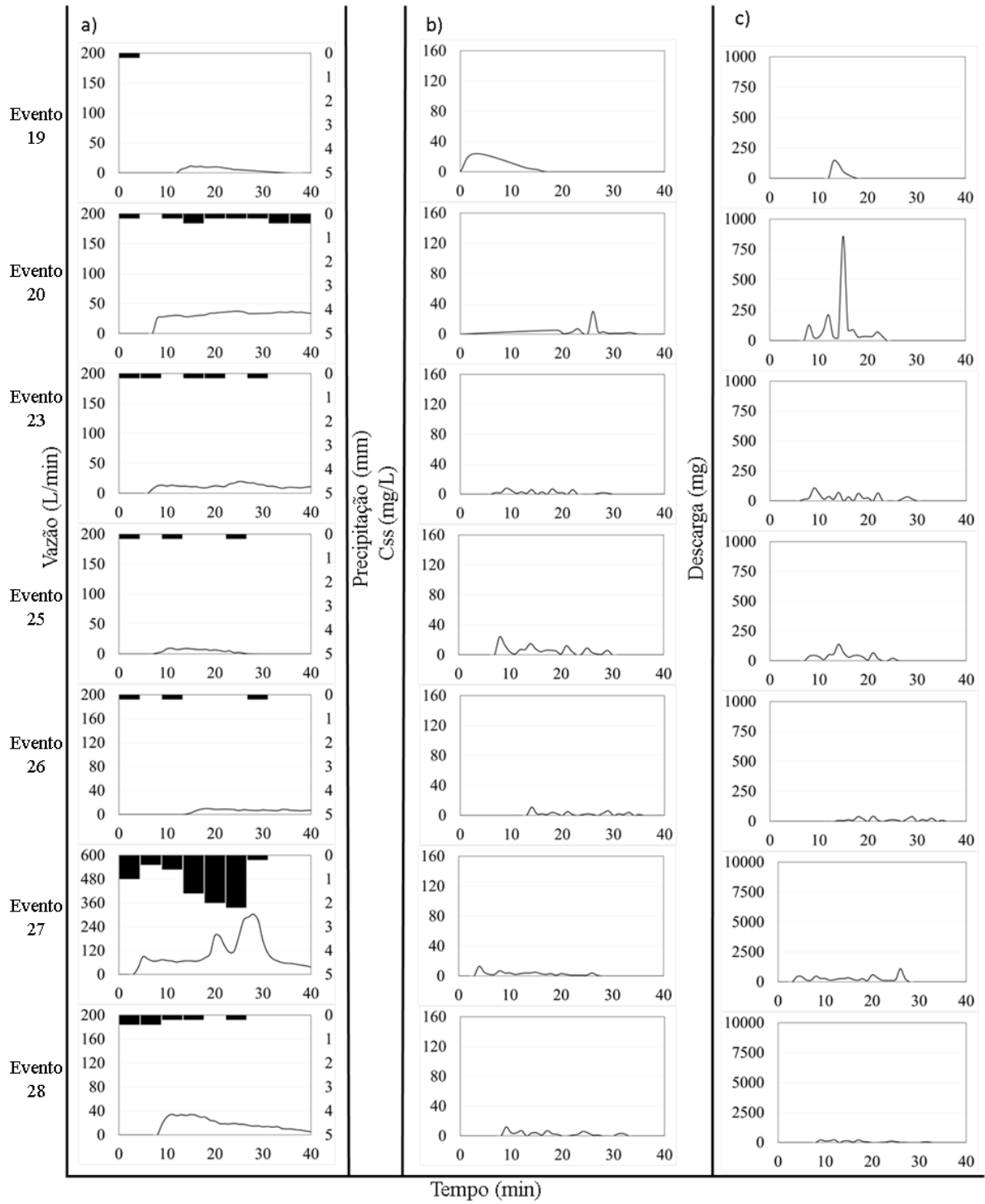


Figura 7: Massa transportada ao longo dos eventos.

Na Figura 7, a coluna “a” apresenta o hidrograma que permite obter as informações sobre a vazão escoada e a precipitação ocorrida no local de estudo, a coluna “b” apresenta o comportamento da C_{ss} ao longo do tempo e a coluna “c” apresenta o polutograma que permite obter as informações sobre a massa de sedimentos em suspensão transportadas pelo escoamento

superficial. Essas informações são apresentadas para os primeiros quarenta minutos dos eventos de precipitação.

Determinou-se o volume de água escoado correspondente a cada evento de precipitação, pela integral do hidrograma, e a massa total transportada dos eventos pela integral do polutograma. A Tabela 3 foi elaborada com base nos dados obtidos desses eventos.

Tabela 3: Coeficientes de escoamento.

Evento	Data	Volume (L)	Massa Transportada (mg)
2	23/01/19	486,63	11615,96
3	31/01/19	878,99	4951,57
4	04/02/19	1497,81	9258,04
5	06/02/19	598,70	6049,95
6	14/03/19	543,61	1027,84
7	08/04/19	991,51	1689,23
8	16/04/19	934,92	782,60
9	14/05/19	766,86	2018,54
11	20/08/19	431,54	5572,56
12	03/09/19	880,03	24573,25
13	25/09/19	1047,04	25425,64
14	25/09/19	94,51	147,67
15	07/10/19	94,45	3555,52
16	24/10/19	878,87	558,39
17	29/10/19	542,67	4239,70
18	31/10/19	654,87	11208,69
19	05/11/19	55,99	362,46
20	05/11/19	536,12	1826,49
23	11/12/19	206,62	617,30
25	08/01/20	55,99	714,06
26	10/01/20	94,31	285,13
27	20/01/20	2167,47	6915,18
28	22/01/20	318,56	1679,65

Relação entre precipitação e C_{ss}

Diversos estudos em todo o mundo vêm demonstrando que a C_{ss} no escoamento superficial é influenciada pela precipitação, por exemplo os estudos de He *et al.* (2019), Pizarro *et al.* (2014), Hagemann e Gastaldini (2016) e Righetto *et al.* (2017). Nesse estudo buscou-se relacionar os dados de precipitação obtidos nos eventos com os dados de C_{ss} utilizando os dados apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Variáveis utilizadas nas análises.

Evento	P_{10m} (mm)	P_{7D} (mm)	C_{ss}^{pico} (mg/L)	C_{ss}^{med} (mg/L)
1	4,0	15,2	142	24,93
2	1,2	14,6	100	14,00
3	1,0	47,4	16	7,16
4	3,0	12,0	153	29,38
5	2,2	18,6	54	16,00
6	1,2	12,0	15	5,75
7	1,2	44,2	8	3,96
8	2,2	145,2	9	2,00
9	0,8	10,4	39	6,38
10	0,6	14,0	24	7,41
11	0,6	-	49	11,70
12	2,8	29,0	67	13,25
13	1,4	-	134	33,00
14	0,4	67,0	31	3,58
15	0,4	8,2	56	9,39
16	0,8	5,6	52	7,75
17	0,8	55,0	27	5,50
18	0,6	65,4	49	7,50
19	0,2	38,0	24	8,25
20	0,2	38,2	30	3,88
21	2,4	59,0	26	8,75

22	0,4	47,4	8	2,26
23	3,2	81,8	24	2,25
24	0,2	80,6	26	7,36
25	0,2	82,0	24	6,32
26	0,2	31,2	11	2,04
27	1,4	20,6	13	3,25
28	0,8	23,6	12	2,86

Em que:

P_{10m} : a precipitação acumulada nos primeiros 10 minutos dos eventos

P_{7D} : a precipitação acumulada nos 7 dias anteriores aos eventos amostrados

C_{SS}^{pico} : o maior valor obtido de concentração de sólidos em suspensão dentre as amostras coletadas no evento

C_{SS}^{med} : a média das concentrações de sólidos em suspensão de todas as amostras coletadas no evento.

Considerando que alguns autores como Hagemann e Gastaldini (2016) e Righetto *et al.* (2017) observaram que os valores de C_{SS} são maiores no início dos escoamentos superficiais e que eventos com maiores intensidades de precipitação no início do escoamento apresentam maiores valores de C_{SS} , foi realizada a relação entre a C_{SS}^{pico} e C_{SS}^{med} com a P_{10m} dos eventos, como mostra a Figura 8.

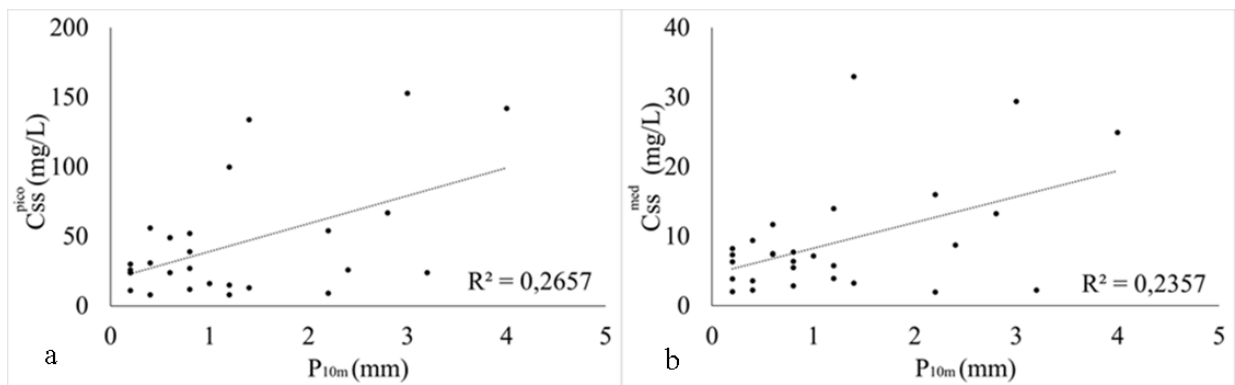


Figura 8: a) Relação entre C_{SS}^{pico} x P_{10m} b) Relação entre C_{SS}^{med} x P_{10m} .

Observou-se baixa relação, evidenciada pelo coeficiente de determinação. Considerando que a precipitação do período anterior aos eventos amostrados ocasiona a lavagem da superfície e reduz a quantidade de sedimentos em suspensão transportados durante os eventos amostrados, optou-se por relacionar a P_{7D} com a C_{SS} , como apresenta a Figura 9.

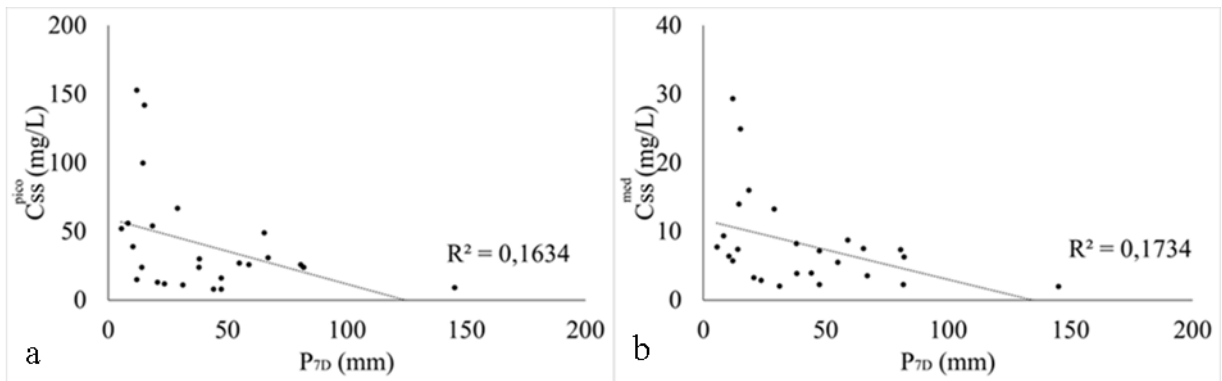


Figura 9: a) Relação entre C_{SS}^{pico} x P_{7D} b) Relação entre C_{SS}^{med} x P_{7D}

Após verificar que a relação entre a P_{7D} e a C_{SS} não foi satisfatória, relacionou-se a C_{SS} em função de P_{10m}/P_{7D} , pois espera-se que a P_{7D} seja inversamente proporcional à C_{SS} e possa aprimorar os resultados obtidos anteriormente. Levando em conta essas considerações, a P_{10m} foi dividida pela P_{7D} e relacionada com as C_{SS}^{pico} e C_{SS}^{med} , como mostra a Figura 10.

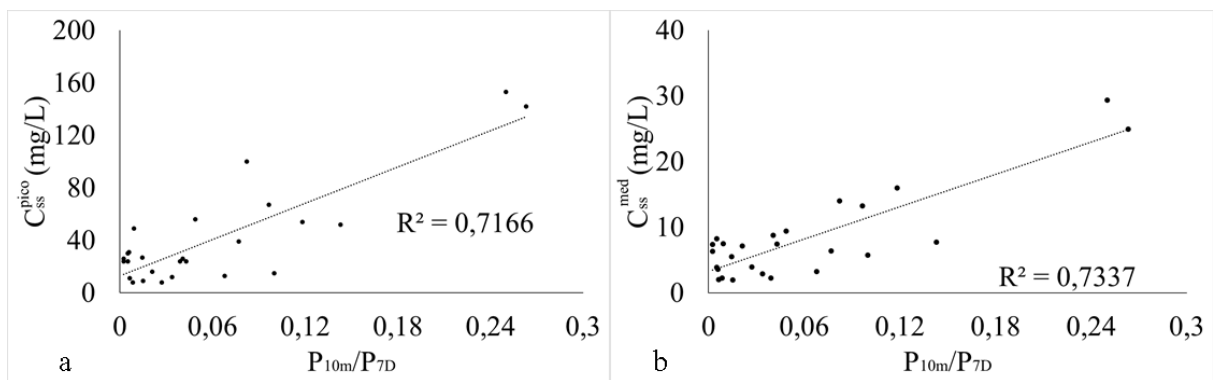


Figura 10: a) Relação entre C_{SS}^{pico} x (P_{10m}/P_{7D}) b) Relação entre C_{SS}^{med} x (P_{10m}/P_{7D}) .

Observa-se uma melhora significativa na relação entre a precipitação e a C_{SS} , R^2 aumentou de 0,2657 e 0,2357 para 0,7166 e 0,7337, para C_{SS}^{pico} e C_{SS}^{med} , respectivamente. A análise, a partir da P_{7D} , apresenta como limitações eventos específicos, pois o período de apenas

7 dias anteriores é curto e pode não ocorrer precipitação. Devido a essa limitação não foi possível realizar a análise dos eventos 11 e 13.

Para aprimorar as análises e incluir os dados dos eventos 11 e 13 foi utilizada uma constante (K). K é uma constante de correção utilizada apenas quando a $P_{7D} < 1$ mm, ela foi ajustada para cada situação pelo método dos mínimos quadrados. Para realizar a relação com os valores de C_{ss} foi obtido o coeficiente de precipitação pela Equação 2:

$$C_p = P_{10m} / (K + P_{7D}) \quad (2)$$

Onde:

C_p = Coeficiente de precipitação

P_{10m} = Precipitação acumulada dos primeiros 10 minutos do evento

P_{7D} = Precipitação acumulada dos 7 dias anteriores ao evento

K = Constante de correção utilizada apenas quando a $P_{7D} < 1$ mm e ajustada pelo método dos mínimos quadrados.

A C_p foi relacionada com os valores de C_{ss} , como mostra a Figura 11.

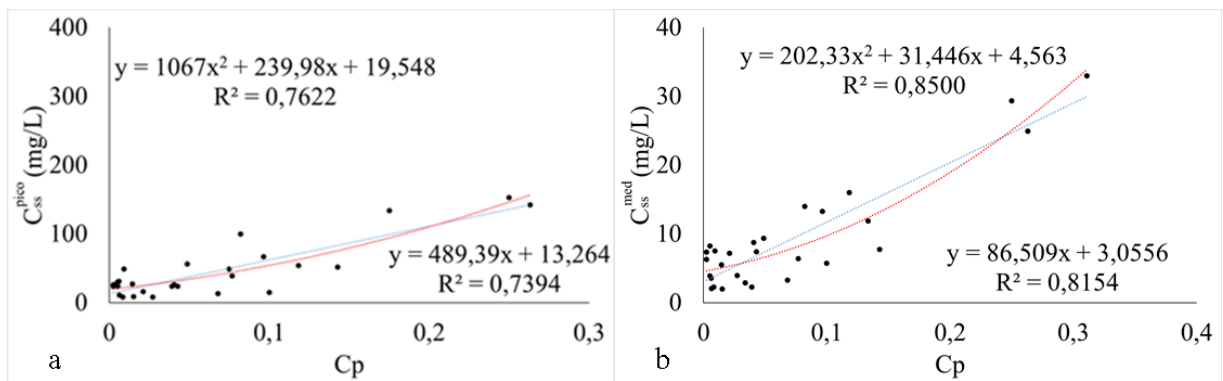


Figura 11: a) Relação entre C_{ss}^{pico} x C_p b) Relação entre C_{ss}^{med} x C_p

A constante K foi ajustada em 6 mm para obter o melhor coeficiente de determinação com a C_{ss}^{pico} e em 4,5 mm para obter o melhor coeficiente de determinação com a C_{ss}^{med} . Incluindo a constante K na análise foi possível encontrar valores de relação satisfatórios para as variáveis e incluir os eventos que não apresentaram precipitação nos dias anteriores.

PRIMEIRA DESCARGA DE LAVAGEM (*MASS FIRST FLUSH*)

A Figura 12 apresenta a relação entre a massa transportada (M^*) e o volume do escoamento superficial (V^*), ambos normalizados. M^* corresponde ao valor de massa transportada acumulada até um determinado instante dividido pela massa total transportada no evento, V^* corresponde ao valor de volume escoado acumulado até um determinado instante dividido pelo volume total escoado ao longo do evento. A legenda da Figura 12 corresponde ao número dos eventos.

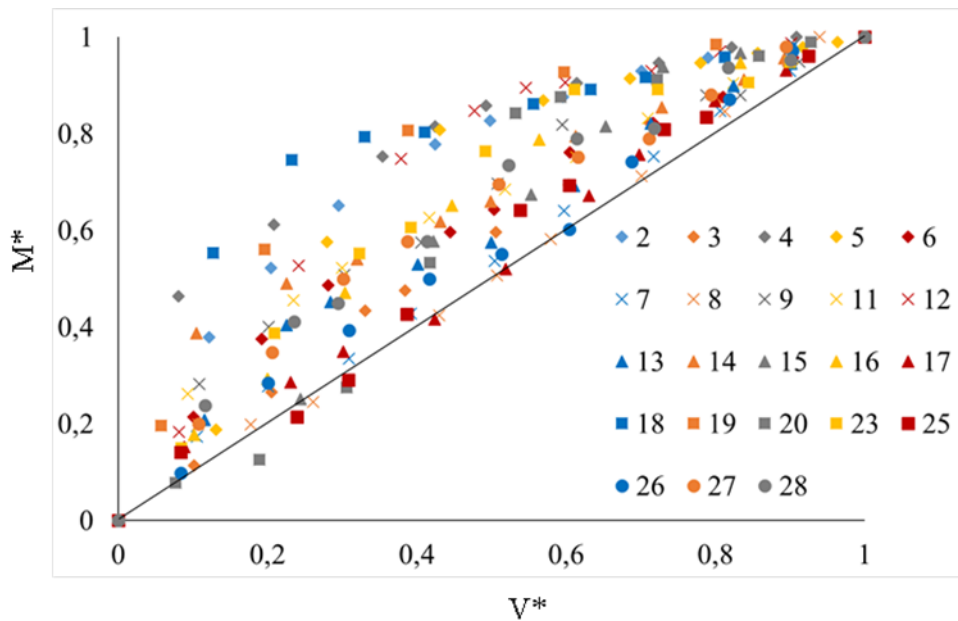


Figura 12: Mass First Flush

Para análise dos dados foi utilizado o conceito de *Mass First Flush* (MFF), utilizando a Equação 3:

$$MFF = M^*/V^* \quad (3)$$

Quando o valor de MFF é superior a 1 significa que a massa foi transportada mais rapidamente que o volume de água escoado indicando a ocorrência do fenômeno de *First Flush*.

A maioria dos eventos a ocorrência de *First Flush*. No entanto, nos eventos 8,17, 20 e 25 esse fenômeno ocorreu em menor intensidade e foi possível observar períodos em que o

MFF era menor do que 1. Os eventos 2, 4, 5, 12, 18 e 19 foram os que apresentaram maior intensidade de *First Flush*.

3.4 CONCLUSÃO

Foram realizadas análises de C_{ss} em amostras de escoamento superficial gerados por 28 eventos de precipitação durante os meses de janeiro de 2019 a janeiro de 2020. Buscou-se avaliar a influência da sazonalidade nas C_{ss} , relacionar as características da precipitação com a C_{ss} e avaliar a ocorrência de MFF nos eventos.

Na análise de sazonalidade foi observado que as características das estações do ano têm influência no transporte de C_{ss} . O período chuvoso apresentou os maiores valores de C_{ss}^{pico} e C_{ss}^{med} e no período seco os menores, corroborando com o que foi verificado na literatura.

Para a relação das características da chuva com a C_{ss} foi proposta uma fórmula que baseou-se nos dados de precipitação acumulada nos primeiros dez minutos dos eventos e na precipitação acumulada nos 7 dias anteriores aos eventos. Com essa fórmula foi possível obter valores de relação linear significativos com valores de $R^2= 0,7394$ e $R^2= 0,8154$ para os dados de C_{ss}^{pico} e C_{ss}^{med} , respectivamente, trazendo como inovação a possibilidade de prever o comportamento da curva de C_{ss} de acordo com o comportamento da precipitação que ocorreu antes do escoamento superficial. A fórmula se mostrou satisfatória para aplicação em uma pequena área, com alto índice de impermeabilização e pouca interferência externa.

Na avaliação de *Mass First flush* foi identificado em todos os eventos estudados a ocorrência do fenômeno, apenas em quatro eventos ocorreram períodos que o valor do MFF foi menor do que 1. Por se tratar de uma bacia com alto índice de impermeabilidade é esperado que a maior parte da massa seja transportada no início do escoamento.

A fórmula proposta nesse trabalho apresentou resultados satisfatórios para a característica da área de estudo, no entanto seria interessante testar sua aplicabilidade em bacias com características distintas, como por exemplo bacias maiores, com interferência externa e menor grau de impermeabilidade.

3.5 REFERÊNCIAS

APHA *Standard methods for the examination of water and waste water*, 21st ed. American Public Health Association, Washington, DC, 2005

BEELER, K. R.; MITCHELL, R. J. *Sediment and Phosphorus Inputs from Perennial Streams to Lake Whatcom, Washington State*. Environmental & Engineering Geoscience. Washington, Estados Unidos, p. 153-164, 2017.

BEZAK, N.; FRAJ, M.; MIKOŁ, M.. *Analyses of suspended sediment loads in Slovenian rivers*. Hydrological Sciences Journal, [s.l.], v. 61, n. 6, p.1094-1108, 2016.

FELICE, J. G. *et al. Simulação do transporte de partículas em suspensão e de poluentes dissolvidos pelo escoamento em superfícies impermeáveis: uma contribuição ao saneamento urbano*. Engenharia Sanitária e Ambiental, [s.l.], v. 23, n. 2, p.405-414, 2018.

GARRIDO, J. W. A. *et al. Determinação das curvas-chave de descargas de sedimentos em suspensão na bacia hidrográfica do Rio Piancó-Piranhas-Açu*. Engenharia Sanitária e Ambiental, [s.l.], v. 23, n. 1, p.69-75, fev. 2018.

GIRÃO, L. F. O. *et al. Modelação hidráulica e de qualidade da água dos sistemas de drenagem em meios urbanos*. Engenharia Sanitária e Ambiental, [s.l.], v. 22, n. 2, p.351-360, 19 jan. 2017.

GONG, Y. *et al. Influence of Rainfall Characteristics on Total Suspended Solids in Urban Runoff: A Case Study in Beijing, China*. Water. Beijing, China, p. 278-285, 2016.

HAGEMANN, S. E.; GASTALDINI, M. C. C. *Variação da qualidade da água de chuva com a precipitação: aplicação à cidade de Santa Maria - RS*. Rbrh, [s.l.], v. 21, n. 3, p.525-536, 2016.

HE, C. *et al. Exploring the Influence Mechanism of Meteorological Conditions on the Concentration of Suspended Solids and Chlorophyll-a in Large Estuaries Based on MODIS Imagery*. Water. Shanghai, China, 2019.

KÄMÄRIÄ, M. *et al. High-frequency monitoring reveals seasonal and event-scale water quality variation in a temporally frozen river*. Journal of Hydrology. Joensuu, Finlândia, p. 619-639, 2018.

PIZARRO, J. *et al. Influence of land use and climate on the load of suspended solids in catchments of Andean rivers*. Environmental Monitoring and Assessment. Santiago, Chile, p. 835-843, 2014.

PORTO, R. M. *Hidráulica básica*. 2. ed. São Carlos: EESC- USP, 2001

RIGHETTO, A. M. *et al.* *Poluição difusa nas águas pluviais de uma bacia de drenagem urbana*. Engenharia Sanitária e Ambiental, [s.l.], v. 22, n. 6, p.1109-1120, 2017.

SILVA, A. E. P. *et al.* *Influência da precipitação na qualidade da água do Rio Purus*. Acta Amazônica, [s.l.], v. 38, n. 4, p.733-742, 2008.

SOUZA, M. M.; GASTALDINI, M. C. C. *Avaliação da qualidade da água em bacias hidrográficas com diferentes impactos antrópicos*. Engenharia Sanitária e Ambiental, [s.l.], v. 19, n. 3, p.263-274, 2014.

ZHANG, C. *et al.* *Analysing the correlations of long-term seasonal water quality parameters, suspended solids and total dissolved solids in a shallow reservoir with meteorological factors*. Environmental Science and Pollution Research. Tianjin, China, p. 6746-6756, 2017.

ZHANG, R. *et al.* *Influence of rainfall intensity and slope on suspended solids and phosphorus losses in runoff*. Environmental Science and Pollution Research. Pequim, China, p. 1-13, 2018.

ZURAINI, N. *et al.* *Influence of Rainfall Characteristics on Total Suspended Solid Concentration*. Journal of Physics: Conference Series. Johor Bahru, Malásia, 012039, 2018.

4 CONCLUSÃO

O crescimento desordenado dos centros urbanos, que vem ocorrendo nas últimas décadas, desencadeou diversos problemas ambientais. O processo de urbanização provoca a remoção da cobertura vegetal e a impermeabilização do solo da bacia hidrográfica, isso altera as etapas dos ciclos hidrológicos intensificando o escoamento superficial, e conseqüentemente a erosão e transporte de sedimentos.

O sedimento transportado no escoamento superficial serve como agente fixador para compostos poluidores potencializando seus efeitos negativos. Além disso o aumento do volume do escoamento superficial e da massa de sólidos transportados traz prejuízos para as bacias urbanizadas, podendo ser observado: o aumento da incidência de cheias e alagamentos devido ao assoreamento de reservatórios e rios; redução da qualidade da água e prejuízo da biodiversidade.

Nesse trabalho foi realizado o estudo do transporte de sedimentos em suspensão do escoamento superficial na canaleta lateral de um edifício, a área de influência do estudo era o telhado metálico e o piso de concreto em volta do prédio. Para que fosse possível avaliar o comportamento da descarga sólida ao longo do tempo, foi realizada a determinação da vazão do escoamento, coleta de amostras da água escoada de forma sequencial e o monitoramento pluviométrico do local.

Na análise dos resultados foi avaliado a variação da concentração de sedimentos ao longo dos eventos e ao longo do ano. Com os dados buscou-se propor uma fórmula que permita relacionar os dados de precipitação com a concentração de sólidos suspensos (C_{ss}) e investigar a ocorrência de *Mass First Flush* (MFF) no escoamento superficial dos eventos avaliados, sendo possível concluir que:

- a) As características das estações do ano têm influência no comportamento das curvas de C_{ss} . O verão, período em que ocorre a maior quantidade de precipitação, apresentou os maiores valores de C_{ss}^{pico} e C_{ss}^{med} e o inverno, o período seco, os menores.
- b) A fórmula proposta para relação entre os dados de precipitação e os dados de C_{ss} apresentou resultados satisfatórios. Foi possível obter relações lineares fortes e positivas com valores de $R^2 = 0,7394$ e $R^2 = 0,8154$ para os dados de C_{ss}^{pico} e C_{ss}^{med} , respectivamente.

- c) Em todos os eventos estudados foi observado a ocorrência do fenômeno de *Mass First flush*. Por se tratar de uma bacia com alto índice de impermeabilidade é esperado que a maior parte da massa seja transportada no início do escoamento.

Assim, os resultados sinalizam que a fórmula proposta no estudo pode trazer informações importantes sobre as alterações da descarga sólida de acordo com o comportamento dos eventos de precipitação para que possa ser proposto ações que previnam os possíveis impactos ambientais gerado pelo crescimento urbano desordenado, trazendo como inovação a possibilidade de prever o comportamento da curva de C_{ss} de acordo com o comportamento da precipitação que ocorreu antes do escoamento superficial.

Como sugestão de trabalhos futuros tem-se a aplicação da fórmula de relação, entre os dados de precipitação e os dados de C_{ss} , em bacias com características distintas, como por exemplo bacias maiores, com interferência externa e menor grau de impermeabilidade, para testar sua funcionalidade.

REFERÊNCIAS

- ALENCAR, Vívian Evelyne Silva Araújo *et al.* Análise de parâmetros de qualidade da água em decorrência de efeitos da precipitação na baía de Guajará – Belém– PA. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Belém, Pa, v. 12, n. 2, p.661-680, 2019.
- BEELER, Katherine R.; MITCHELL, Robert J. Sediment and Phosphorus Inputs from Perennial Streams to Lake Whatcom, Washington State. **Environmental & Engineering Geoscience**, Washington, Estados Unidos, p. 153-164, 2017.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. Piracicaba: Livroceres, 1985.
- BEZAK, Nejc; HRAJ, Mojca; MIKOŁ, Matjaž. Analyses of suspended sediment loads in Slovenian rivers. **Hydrological Sciences Journal**, [s.l.], v. 61, n. 6, p.1094-1108, 2016.
- 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. p.915-43.
- BROOKS, K. N.; FFOLLIOTT, P. F.; M., J. A. **Hydrology and the Management of Watersheds**. John Wiley & Sons, 2012.
- CARVALHO, N. O.; FILIZOLA JR., N. P.; SANTOS, P. M. C.; LIMA, J. E. F. W. **Guia de Práticas Sedimentométricas**. Brasília: ANEEL, 154p, 2000.
- CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia pratica**. 2 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2008.
- COIADO, E. M. Uso do amostrador fixo programável na determinação da concentração dos sedimentos transportados em suspensão no Rio Atibaia/SP. *In: Simpósio Brasileiro De Recursos Hídricos*, 14, 2001, Aracajú. **Anais Gestão dos recursos hídricos: o desafio da prática**. Aracajú: ABRH, 2001.
- D'ALKMIN TELLES, D. **Ciclo Ambiental da Água: da Chuva à Gestão**. *In: D'ALKMIN TELLES, D*, 504 p, 2012.
- DELETIC, A. The First Flush Load of Urban Surface Runoff. *Water Research*, 32: 24 62 - 2470. 1998.
- DREVER, J. I. **The Geochemistry of natural waters**: New Jersey: Prentice Hall, 1988.
- EPA. **Stream Corridor Restoration – principles, processes and practices**. Environmental Protection Agency, EUA, 1998
- FELICE, Jéssica Giacchetto *et al.* Simulação do transporte de partículas em suspensão e de poluentes dissolvidos pelo escoamento em superfícies impermeáveis: uma contribuição ao saneamento urbano. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [s.l.], v. 23, n. 2, p.405-414, 2018.
- FRAGA, Rosiméri da Silva *et al.* Influência da precipitação sobre parâmetros de qualidade da água utilizada para irrigação do morangueiro no município de Turuçu-RS. **Revista Brasileira de Agrociência**, Turuçu, Rs, v. 18, p.81-94, 2012.
- GONG, Yongwei *et al.* Influence of Rainfall Characteristics on Total Suspended Solids in Urban Runoff: A Case Study in Beijing, China. **Water**. Beijing, China, p. 278-285, 2016.

HAGEMANN, Sabrina Elicker; GASTALDINI, Maria do Carmo Cauduro. Variação da qualidade da água de chuva com a precipitação: aplicação à cidade de Santa Maria - RS. **RBRH**, [s.l.], v. 21, n. 3, p.525-536, 2016.

HE, Cheng *et al.* Exploring the Influence Mechanism of Meteorological Conditions on the Concentration of Suspended Solids and Chlorophyll-a in Large Estuaries Based on MODIS Imagery. **Water**. Shanghai, China, 375, 2019.

JULIEN, P.Y. **Erosion and Sedimentation**. Cambridge: Cambridge University Press.1998, 280p.

KÄMÄRIÄ, M. *et al.* High-frequency monitoring reveals seasonal and event-scale water quality variation in a temporally frozen river. **Journal Of Hydrology**. Joensuu, Finlândia, p. 619-639, 2018.

LUBIS, Kemala Sari *et al.* Dynamic Model Of Suspended Sediment Concentration, River Discharge And Rainfall Intensity At Padang Watershed North Sumatra, Indonesia. **International Journal of Scientific & Technology Research**. Medan, Indonésia, p. 68-73, 2015.

MARSHAK, S. **Essentials of geology**. 5 ed. New York: W.W. Norton, 2005

MAYS, L.W. **Stormwater collection systems design handbook**. New York: McGraw-Hill, 2001.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Ciclo hidrológico**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/agua/recursos-hidricos/aguas-subterraneas/ciclo-hidrologico>>. Acesso em: 21 dez. 2019.

MORRIS, G. L.; FAN, J. **Reservoir sedimentation handbook: design and management of dams, reservoirs, and watersheds for sustainable use**. New York: McGraw Hill Professional. 1997

NORMAN E., MEYBECK, M., CHAPMAN D. Effects of Human Activities on Water Quality. **Encyclopedia of Hydrological Sciences**, 2006.

OLIVEIRA, Brunna Stefanny Sangel de; CUNHA, Alan Cavalcanti da. Correlação entre qualidade da água e variabilidade da precipitação no sul do Estado do Amapá. **Revista Ambiente & Água, Macapá**, Ap, v. 9, n. 2, p.261-275, 2014.

PIZARRO, J. *et al.* Influence of land use and climate on the load of suspended solids in catchments of Andean rivers. **Environmental Monitoring And Assessment**. Santiago, Chile, p. 835-843, 2014.

RIGHETTO, A.M. Manejo de Águas Pluviais Urbanas. In: PROSAB 5- **Manejo de Águas Pluviais Urbanas**. Rio de Janeiro: ABES , 2009.

RIGHETTO, Antonio Marozzi *et al.* Poluição difusa nas águas pluviais de uma bacia de drenagem urbana. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [s.l.], v. 22, n. 6, p.1109-1120, 2017.

SANSALONE, J. J., e CRISTINA, C. M. First flush concepts for suspended and dissolved solids in small impervious watersheds. **Journal of Environmental Engineering**, 2004.

SCHUELER, T.R. **Controlling Urban Runoff: A Practical Manual for Planning and Design Urban BMPs**. Washington: Metropolitan Council of Government. 1987.

SILVA, A. M., **Erosão e Hidrossedimentologia em Bacias Hidrográficas**, São Carlos: Rima, 2003.

SILVA, Ana Elisa Pereira *et al.* Influência da precipitação na qualidade da água do Rio Purus. **Acta Amazonica**, [s.l.], v. 38, n. 4, p.733-742, 2008.

SIVIERO, M.R.L, COIADO, E.M. A produção de sedimentos a montante de uma seção no rio Atibaia associada à descarga sólida transportada. **Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Belo Horizonte, MG. 1999.

STENSTROM, M. AND KAYHANIAN, M. **First flush phenomenon characterization** Sacramento: California Department of Transportation Division of Environmental Analysis, 2005

TOMAZ, P. Custo e eficiência das BMPs In: TOMAZ, P. **Curso de manejo de águas pluviais**. 2009.

TUCCI, Carlos E. M.. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Rio Grande do Sul: Editora da UFRGS, 1993.

TUCCI, C. E. M. **Drenagem Urbana. ciência e cultura**, Gestão da Águas/Artigos, v. 55, n. 4, São Paulo, 2003.

TUCCI, C.E.M. **Gestão de Águas Pluviais Urbanas** , Ministério das Cidade, Global Water Partnership, Wolrd Bank, Unesco, 2005.

URBONAS, B. E STAHERE, P. **Stormwater- Best management practices and detenion for water quality, drainage, and CSO management**, New Jersey: PTR Prentice Hall, 1993.

VANONI, V.A. Sedimentation Engineering. **Manual and reports on Engineering Practice**, New York: ASCE. 1977.

VON SPERLING, Marcos. **Introdução a qualidade das águas e ao tratamento de esgoto**. 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, 1996.

WETZEL, Robert G.; BOAVIDA, Maria J. **Limnologia**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1993.

ZHANG, Chen *et al.* Analysing the correlations of long-term seasonal water quality parameters, suspended solids and total dissolved solids in a shallow reservoir with meteorological factors. **Environmental Science And Pollution Research**. Tianjin, China, p. 6746-6756, 2017.

ZHANG, Ruiru *et al.* Environmental Science and Pollution Research. **Environmental Science And Pollution Research**. Pequim, China, p. 1-13, 2018.

ZURAINI, N *et al.* Influence of rainfall characteristics on total suspended solid concentration. **Journal Of Physics: Conference Series**. Johor Bahru, Malásia, 012039, 2018.