

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS DA NATUREZA
CAMPUS LAGOA DO SINO

LEONARDO PEDROTTI

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO HIDROLÓGICO DO *CAMPUS LAGOA DO SINO* DA
UFSCAR**

Buri-SP

2025

LEONARDO PEDROTTI

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO HIDROLÓGICO DO *CAMPUS* LAGOA DO SINO DA
UFSCAR**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Centro de Ciências
da Natureza da Universidade
Federal de São Carlos para
a obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Ambiental.

Orientadora: Prof^ª Dr^ª Anai
Floriano Vasconcelos

Buri-SP

2025

Pedrotti, Leonardo

Avaliação do impacto hidrológico do campus Lagoa do Sino da UFSCar / Leonardo Pedrotti -- 2025.
71f.

TCC (Graduação) - Universidade Federal de São Carlos,
campus Lagoa do Sino, Buri

Orientador (a): Anaí Floriano Vasconcelos

Banca Examinadora: Jorge Luis Pantoja Filho, Franciane
Mendonça dos Santos

Bibliografia

1. Modelagem hidrológica. 2. Mudança de uso do solo. 3.
Impacto hidrológico. I. Pedrotti, Leonardo. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática
(SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR


Bibliotecário responsável: Lissandra Pinhatelli de Britto - CRB/8 7539

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS DA NATUREZA
CAMPUS LAGOA DO SINO


CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

Folha de Aprovação


Assinatura dos membros da comissão examinadora que avaliou a defesa de Trabalho de Conclusão de Curso do candidato Leonardo Pedrotti, realizada em 17/11/2025:

Documento assinado digitalmente
 ANAI FLORIANO VASCONCELOS
Data: 17/11/2025 13:42:29-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^ª. Dr^ª. Anai Floriano Vasconcelos - Orientadora
Departamento de Ciências Ambientais - UFSCar - *Campus* São Carlos

Documento assinado digitalmente
 JORGE LUIS RODRIGUES PANTOJA FILHO
Data: 17/11/2025 22:04:31-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Jorge Luis Pantoja Filho - Avaliador
Centro de Ciências da Natureza - UFSCar - *Campus* Lagoa do Sino

Documento assinado digitalmente
 FRANCIANE MENDONÇA DOS SANTOS
Data: 17/11/2025 12:21:39-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^ª. Dr^ª. Franciane Mendonça dos Santos - Avaliadora
Centro de Ciências da Natureza - UFSCar - *Campus* Lagoa do Sino

Em memória a minha amada avó Davina.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me dado vigor e sabedoria em todos esses anos de dedicação. Foram períodos de muito aprendizado e empenho onde sem a minha fé não haveria êxito, meu eterno alicerce.

Aos meus Pais, obrigado por todo o apoio. Corpo e mente, confiança e esperança que foram depositados sobre mim para que eu pudesse trilhar um caminho de conquistas e amadurecimento, meu eterno agradecimento.

À minha irmã, que sempre esteve presente nos momentos de angústia e inquietação, sempre me apoiando e me dando forças. Ao meu sobrinho, com sua inocência e alegria, me fez suportar o insuportável. Á vocês dois meu eterno agradecimento.

Aos meus amigos, Bryan, Fernando e Renato, jamais esquecerei dos momentos no qual passamos, foram períodos que apesar de estar longe da família eu tive uma conexão genuína de conforto e quietude. Conheci vocês em um momento difícil para mim e por consequência demonstraram acolhimento. Á vocês, meu eterno agradecimento.

A minha Professora Anaí, me fez através de seu ensinamento e dedicação apreciar a sua área de pesquisa de forma harmoniosa em um período no qual eu não sentia expectativas e esperança para mim na graduação. Hoje eu tenho uma paixão pelo que é apresentado neste trabalho por causa da sua orientação. Á você, meu eterno agradecimento.

Aos meus dois amigos de fé e ensinamento Jamil e Cris, para mim fonte de inspiração, sempre me apoiando e me orientando em todos os momentos. Os dois sempre demonstrando uma calma, controle e um intelecto digno de um mestre Jedi. Zenão de Cítio ficaria orgulhoso meus amigos. Á vocês, meu eterno agradecimento.

Aos meus professores Jorge, Rafael e Beatriz que me deram apoio em certas decisões na graduação que me trouxe mais alento e tranquilidade. Á vocês, meu eterno agradecimento.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico e ao meu Campus, por propiciar o meu crescimento profissional e conceder recursos para que tivesse condições necessárias de desempenhar minhas atividades educacionais. Meu eterno agradecimento.

A todos aqueles que eu não citei, mas que de alguma forma contribuíram para a minha conclusão desse ciclo, meu perdão e meu eterno agradecimento.

RESUMO

A mudança de uso e ocupação do solo gera diversos impactos no meio ambiente, entre eles os impactos hidrológicos, como a alteração de volume e vazão de pico de escoamento superficial. A implantação do campus Lagoa do Sino da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) não é diferente e possui um potencial de geração desses impactos. Neste contexto, este trabalho visa avaliar os impactos hidrológicos da implantação do Campus Lagoa do Sino da UFSCar por meio de modelagem hidrológica utilizando o software HEC-HMS, e propor medidas mitigadoras desses impactos. O conhecimento destes impactos potenciais possibilita a adoção de medidas mitigadoras ao longo da implantação do campus, que é a fase mais propícia para isso. Os resultados mostraram que o cenário “Futuro”, ou seja, o cenário de total implementação do campus, terá um modesto aumento de vazão de pico e volume escoado se comparado com os cenários “Passado” e “Presente”, entretanto o resultado obtido de um aumento não expressivo se deve a ampliação das áreas de preservação permanente (APP) localizadas no Campus Lagoa do Sino.

Palavras-chave: modelagem hidrológica; mudança de uso do solo; urbanização; impacto hidrológico.

ABSTRACT

The changes in land use and occupation generate various impacts on the environment, including hydrological impacts, such as changes in the volume and peak flow of surface runoff. The implementation of the Lagoa do Sino campus of the Federal University of São Carlos (UFSCar) is no different and has the potential to generate these impacts. In this context, this study aims to assess the hydrological impacts of the implementation of the Lagoa do Sino Campus of UFSCar through hydrological modeling using HEC-HMS software, and to propose mitigating measures for these impacts. Understanding these potential impacts enables the adoption of mitigating measures throughout the campus's implementation, which is the most favorable phase for this. The results showed that the “Future” scenario, that is, the scenario of full implementation of the campus, will have a modest increase in peak flow and volume drained compared to the “Past” and “Present” scenarios, however the result obtained of a non-significant increase is due to the expansion of the permanent preservation areas (APP) located on the Lagoa do Sino Campus.

Keywords: hydrological modeling; land use change; urbanization; hydrological impact.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Bacias hidrográficas de Mukuvisi e Marimba no Zimbábue com as suas respectivas localizações de estações meteorológicas e medição de vazão.....	4
Figura 2: Resultados da classificação da cobertura do solo nas bacias hidrográficas de Marimba (área superior) e Mukuvisi (área inferior) para os anos de 1986, 1994 e 2008.....	5
Figura 3: Localização da Bacia Hidrográfica do Arroio Cadeia - RS.....	7
Figura 4: Classes de solo, uso e ocupação do solo e valores de CN para a Bacia Hidrográfica do Arroio Central.....	9
Figura 5: Localização da Bacia do Igarapé São Francisco com destaque para a (Sub-bacia 9).....	12
Figura 6: Hidrograma do exutório da Bacia do Igarapé São Francisco.....	13
Figura 7: Planta de lote com biorretenção.....	14
Figura 8: Pavimentos simulados (solo compactado; paralelepípedo; bloco de concreto; concreto; bloco vazado; concreto poroso).....	16
Figura 9: Escoamento superficial das superfícies simuladas.....	17
Figura 10: Localização da Bacia Hidrográfica do Alto Paranapanema.....	20
Figura 11: Localização do Campus Lagoa do Sino - UFSCar.....	21
Figura 12: Zoneamento das áreas urbanas do campus Lagoa do Sino.....	22
Figura 13: Percentual correspondente a cada área do campus Lagoa do Sino. O percentual urbano corresponde às zonas ZAC, ZCO, ZAD, ZSE e ZPH.....	23
Figura 14: Delineamento da implantação total do campus Lagoa do Sino de acordo com o Plano Diretor Físico-Ambiental.....	23
Figura 15: Delimitação do Campus Lagoa do Sino da UFSCar em amarelo; Delimitação da Bacia de contribuição em preto; Reservatórios e trechos de água em azul.....	28
Figura 16: Localização das sub-bacias de contribuição em preto no Campus Lagoa do Sino da UFSCar.....	29
Figura 17: Delimitação do uso e ocupação do solo de acordo com o cenário “passado”.....	31
Figura 18: Delimitação do uso e ocupação do solo de acordo com o cenário “Presente”.....	31

Figura 19: Delimitação do uso e ocupação do solo de acordo com o cenário “Futuro”	32
Figura 20: Comparação das perdas e ganhos de cada tipo de uso de solo dos três cenários de simulação em (ha).....	33
Figura 21: Comparação dos CN médios por sub-bacias e cenários de simulação.....	38
Figura 22: Comparação das abstrações iniciais por sub-bacias e cenários de simulação.....	38
Figura 23: Sub-bacias e nós de simulação.....	41
Figura 24: Comparação da vazão de pico para os três cenários de simulação.....	42
Figura 25: Comparação do volume escoado para os três cenários de simulação.....	42
Figura 26: Variação percentual de vazão de pico entre cenários.....	43
Figura 27: Variação percentual de volume escoado entre cenários.....	43
Figura 28: Hidrogramas correspondente a bacia toda para os três cenários de simulação.....	44
Figura 29: Localização das áreas construídas no cenário futuro nas sub-bacias 6, 7 e 8.....	48
Figura 30: Imagem da principal entrada de acesso ao campus, com o piso de 16 faces sendo predominante nas vias de circulação do campus.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Vazões médias e vazões máximas anual para os períodos nas bacias hidrográficas de Marimba e Mukuvisi.....	6
Tabela 2: Eventos chuva-vazão utilizados para a avaliação da metodologia.....	8
Tabela 3: Valores de CN e de precipitação efetiva dos cenários 1 e 2.....	10
Tabela 4: simulação de chuva nas parcelas de solo (1m ²).....	17
Tabela 5: Siglas para a representação de cada área do Campus Lagoa do Sino.....	22
Tabela 6: Classes padrão do uso e ocupação do solo de acordo com as cores dos cenários “Passado”, “Presente” e “Futuro” adotada.....	24
Tabela 7: Valores correspondentes ao CNs de cada uso e ocupação do solo.....	25
Tabela 8: Valor de CN para “zona de serviço fazenda.....	25
Tabela 9: Comparação entre as classes de solo da literatura e as classes solo padrão do Campus Lagoa do Sino a ser utilizada.....	26
Tabela 10: Comparação das perdas e ganhos de cada tipo de uso de solo dos três cenários de simulação em (ha).....	33
Tabela 11: Classes padrão e seus respectivos valores de CN.....	34
Tabela 12: Valores de CN médio ponderado e abstração inicial por sub-bacia para o cenário “Passado”.....	35
Tabela 13: Valores de CN médio ponderado e abstração inicial por sub-bacia para o cenário “Presente”.....	36
Tabela 14: Valores de CN médio ponderado e abstração inicial por sub-bacia para o cenário “Futuro”.....	37
Tabela 15: Parâmetros de entrada para serem inseridos no software HEC-HMS.....	39
Tabela 16: Parâmetros de comprimento, cota, declividade da bacia e tempo de concentração.....	39
Tabela 17: Parâmetros utilizados para a chuva de projeto.....	40
Tabela 18: valores para a lâmina precipitada da chuva de projeto a cada cinco minutos.....	40
Tabela 19: Cenários com seus respectivos valores de vazão de pico e volume escoado.....	44
Tabela 20: Tipos de alternativas e locais propícios para serem construídos no campus Lagoa do Sino.....	52

LISTA DE ABREVIATURAS

AC	Acre
AMC	Antecedent Moisture Content
APP	Área de Preservação Permanente
BH	Bacia Hidrográfica do Alto Paranapanema
CBH-ALPA	Comitê da Bacia Hidrográfica do Alto Paranapanema
CN	Curve Number
HEC-HMS	Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDE	Integrated Development Environment
IDF	Intensidade Duração Frequência
IGC-SP	Instituto Geográfico do Estado de São Paulo
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LID	Low-Impact Development
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
SCS Soil	Conservation Service
TOP MODEL	TOPography based MODEL
UGRHI	Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos
USACE	U.S. Army Corps of Engineers

LISTA DE SÍMBOLOS

A_i	Abstração Inicial
Cfa	Clima subtropical
CO ₂	Dióxido de carbono
ha	Hectares
I_a	Abstração Inicial (inglês)
i	Intensidade da chuva de projeto
Km ²	Quilômetros quadrados
L	comprimento do trecho
m	Metros
m ²	Metro quadrado
mm	Milímetro
mm/h	Milímetros por hora
min	Minutos
m ³	Metros cúbicos
m ³ /s	Metros cúbicos por segundo
P	Precipitação
P_e	Precipitação efetiva
Q_p	Vazão de pico
$Q_{méd}$	Vazão média
Q_{hst}	Vazão máxima anual
S	Declividade do rio principal
T_c	Tempo de concentração
T_R	Tempo de retorno
V_t	Vazão total
°C	Grau centígrados

SUMÁRIO

1. Introdução.....	1
2. Objetivos.....	2
2.1. Objetivo Geral.....	2
2.2. Objetivos Específicos.....	2
3. Revisão Bibliográfica.....	3
3.1. Conceitos básicos de hidrologia e urbanização.....	3
3.1.1. Estudo de caso sobre os impactos hidrológicos da urbanização de duas bacias hidrográficas em Harare, Zimbabwe.....	3
3.2. Método SCS para obtenção da precipitação efetiva.....	6
3.2.1. Aplicabilidade do método numérico da curva (CN/SCS) com base em valores de CN tabelados: estudo de caso na Bacia Hidrográfica do Arroio Cadeia.....	7
3.3. HEC-HMS.....	10
3.3.1. Modelagem utilizando HEC-HMS: estudo hidrológico da Bacia do Igarapé São Francisco - Rio Branco/AC.....	11
3.4. Estratégias de mitigação utilizando Low-Impact Development (LID).....	13
3.4.1. Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução de escoamento superficial.....	15
4. Metodologia.....	19
4.1. Fluxograma de trabalho.....	19
4.2. Área de estudo.....	19
4.2.1 Caracterização da Bacia Hidrográfica.....	19
4.2.2. Caracterização do campus.....	20
4.3. Plano Diretor Físico Ambiental.....	21
4.4. Delimitação da Bacia e das Sub-bacias de contribuição.....	24
4.5. Delimitação do uso e ocupação do solo e definição do curve number CN.....	24
4.6. Determinação dos parâmetros de entrada a serem utilizados no software HEC-HMS.....	26
5. Resultados.....	28
5.1. Delimitação da área de contribuição.....	28
5.2. Delimitação do uso e ocupação do solo.....	30

5.3. Obtenção do solo correspondente a área e determinação do curve number.....	33
5.4. Determinação do curve number e abstração inicial para cada sub-bacia e cenário.....	35
5.5. Dados de modelagem correspondentes a cada sub-bacia.....	39
5.6. Hietograma de projeto.....	39
5.7. Modelagem hidrológica utilizando o software HEC-HMS.....	40
5.8. Alterações hidrológicas decorrentes das alterações dos usos do solo.....	44
5.8.1. Observações gerais.....	47
5.9. Zoneamento Ambiental e medidas de mitigação de impacto LID.....	47
5.9.1. Zoneamento Ambiental.....	47
5.9.2. Compensação do impacto no escoamento pluvial.....	48
6. Conclusão.....	51
Referências.....	52

1. INTRODUÇÃO

De acordo com o Observatório do Clima (2021), a ação humana tem aquecido ainda mais o sistema climático e mudanças do clima rápidas e disseminadas pelo mundo já estão acontecendo, com secas severas e tempestades d'água ocorrendo em diversas partes do planeta. As atividades humanas, principalmente através das emissões de gases de efeito estufa, inequivocamente causaram o aquecimento global, com a temperatura da superfície global atingindo um valor 1,1°C mais alto entre 2011-2020 do que no período de 1850-1900 (IPCC, 2023). Tal aumento intensificou o comportamento de clima extremo no planeta no decorrer das medições realizadas.

A mudança do uso do solo tem causado intensos impactos em todo o planeta, onde segundo a OCDE (2017), o tipo de uso do solo tem sido associado a aproximadamente um terço de todas as emissões de CO₂ produzidos pelo homem. Estudo conduzido por Winkler (2021) revelou que houve uma perda líquida global de área florestal de 0,8 milhões de km² de 1960 a 2019. Em contrapartida, ocorreu uma expansão na agricultura, especificamente de áreas de plantio e pastagens, de 1,0 e 0,9 milhões de km², respectivamente. Como consequência da mudança do uso do solo, as bacias hidrográficas são alteradas sem um adequado planejamento físico-ambiental.

Consistindo parte fundamental das observações climáticas, a avaliação de desempenho de sistemas de previsão consiste na comparação entre a previsão e a observação ao longo de um determinado período de tempo (Boucher *et al*, 2012), sendo que sistemas hidrológicos de previsão são frequentemente utilizados em observações climáticas. Como parte da ocupação em uma determinada área, a ação do homem no planejamento e desenvolvimento da ocupação do espaço na Terra, requer cada vez mais uma visão ampla sobre as necessidades da população, os recursos terrestres e aquáticos disponíveis e o conhecimento sobre o comportamento dos processos naturais na bacia (Tucci, 2001), no sentido de que a ocupação humana seja realizada de forma racional e planejada.

O uso do solo desordenado em uma Bacia Hidrográfica é um problema frequente na sociedade atual, sendo que tal dinâmica de ocupação pode acarretar problemas sérios relacionados a desastres, como inundações e erosões de vários tipos. Logo, é imprescindível a avaliação e a execução de atividades mitigadoras de impacto hidrológico, pois de acordo com Souza *et al* (2017), as diferentes fases do ciclo hidrológico podem ser afetadas por intervenções humanas, e em cada ponto de intervenção as intensidades dos impactos ocorridos podem ser diferentes.

Tendo uma importância para a economia da região sudeste do estado de São Paulo, a Bacia Hidrográfica do Alto Paranapanema apresenta uma economia majoritariamente agrícola, com indústrias de papel e celulose, mineração de calcário e plantio e processamento de madeiras de reflorestamento (CBH-ALPA, 2023). Fatores econômicos como estes geram uma pressão sobre os recursos hídricos da Bacia, onde, de acordo com CBH-ALPA (2023), a agricultura irrigada (por pivôs) está presente na maior parte do território da UGRHI-14 Alto Paranapanema, sobretudo nos municípios de Itai, Itapeva, Paranapanema, Buri, Itaberá e Itapetininga.

O Campus Lagoa do Sino da UFSCar, localizado no município de Buri/SP iniciou suas atividades no ano de 2014 e possui uma extensão territorial com grande potencial de geração de impactos hidrológicos devido a sua implantação e a constituição já estabelecida de áreas de plantio e pivôs de irrigação. Entretanto, devido a fase inicial de implantação, associada à disponibilidade de área, é importante que sejam avaliados os impactos hidrológicos potenciais e as possibilidades de adoção de medidas mitigadoras desses impactos, para minimizar os impactos hidrológicos negativos da implantação do campus na bacia hidrográfica Alto Paranapanema na qual está inserido.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Avaliar o impacto hidrológico da implantação do Campus Lagoa do Sino da UFSCar, de acordo com o seu Plano Diretor Físico-Ambiental.

2.2. Objetivos específicos

- Delimitar a bacia hidrográfica onde está inserido o campus e obter os dados necessários para a modelagem hidrológica;
- Realizar a modelagem hidrológica para diferentes cenários temporais de ocupação do campus, de acordo com o seu Plano Diretor Físico-Ambiental;
- Analisar o impacto hidrológico da implantação do campus e propor ações mitigadoras desses impactos.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A urbanização tem efeitos significativos na dinâmica da hidrologia de uma determinada área em função de seu grau de impacto, onde de acordo com Miller *et al.* (2014), a perda de superfícies permeáveis reduz a infiltração no solo, enquanto a introdução de drenagem artificial substitui os cursos de água naturais. São diversas as formas de combater e até mesmo prever tais eventos, sendo possível a utilização de ferramentas que auxiliam na “antecipação” desses eventos. Ferramentas empíricas, como o método (SCS) possuem uma eficiência aceita entre aqueles que as utilizam. De acordo com Nascimento *et al.* (2011), a aplicação do método SCS requer a identificação do tipo e uso do solo na bacia, com o objetivo de obter o parâmetro CN, o qual é determinante na separação do volume de escoamento superficial na bacia. Associado a esta ferramenta, a utilização de *softwares* de modelagem, como o HEC-HMS, desenvolvido pelo corpo de engenheiros do exército dos Estados Unidos, podem auxiliar na determinação desses processos hidrológicos envolvendo a dinâmica de uso e ocupação do solo. Além disso, os resultados de uma análise hidrológica são uma ótima forma de propor medidas de mitigação de impacto para um determinado local.

3.1. Conceitos básicos de hidrologia e urbanização

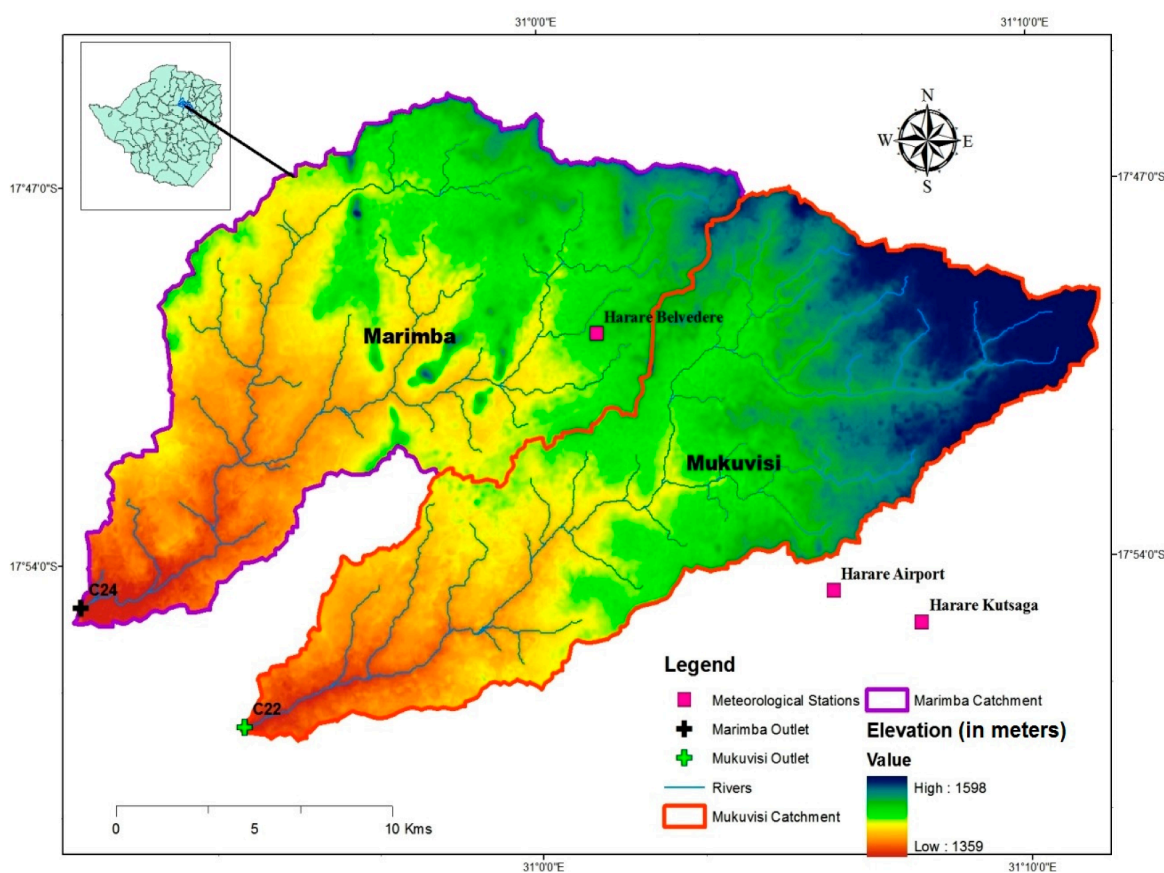
De acordo com Tucci (2007), a hidrologia é a ciência que trata do comportamento da água na terra, sua ocorrência, circulação e distribuição bem como suas relações com a vida. Ainda, engloba os conceitos de suas propriedades químicas e físicas. De acordo com o mesmo autor, a hidrologia aplicada estuda os fatores envolvidos na produção dos recursos hídricos em qualidade e quantidade para os seres vivos. Paralelo a estas causas, os impactos hidrológicos surgem em muitos casos do efeito da urbanização sobre o solo, sendo a principal característica dessa problemática a impermeabilização do solo, gerando, conseqüentemente, maiores probabilidades de eventos de alagamentos e inundações envolvendo todas as partes de uma determinada bacia hidrográfica.

O estudo de caso a seguir foi realizado em duas Bacias Hidrográficas no Zimbábue e expõe a problemática da ocupação desordenada em outros locais do planeta e como isso pode acarretar efeitos adversos relacionados a impactos hidrológicos. A localização latitudinal e as características do tipo de vegetação das duas Bacias Hidrográficas possuem fortes similaridades com a localização do campus Lagoa do Sino. Além disso, o fator da ocupação acelerada também pode caracterizar uma certa semelhança entre os estudos.

3.1.1. Estudo de caso sobre os impactos hidrológicos da urbanização de duas bacias hidrográficas em Harare, Zimbábue

Com o objetivo de avaliar os impactos hidrológicos da urbanização em duas bacias hidrográficas de médio porte do Zimbábue (Mukuvisi e Marimba), Gumindoga *et al* (2014), utilizaram modelagem hidrológica por um modelo de precipitação-escoamento orientado topograficamente (TOPMODEL) para os anos de 1986, 1994 e 2008. Na figura 1 é possível visualizar a localização das bacias hidrográficas no Zimbábue:

Figura 1: Bacias hidrográficas de Mukuvisi e Marimba no Zimbábue com as suas respectivas localizações de estações meteorológicas e medição de vazão.

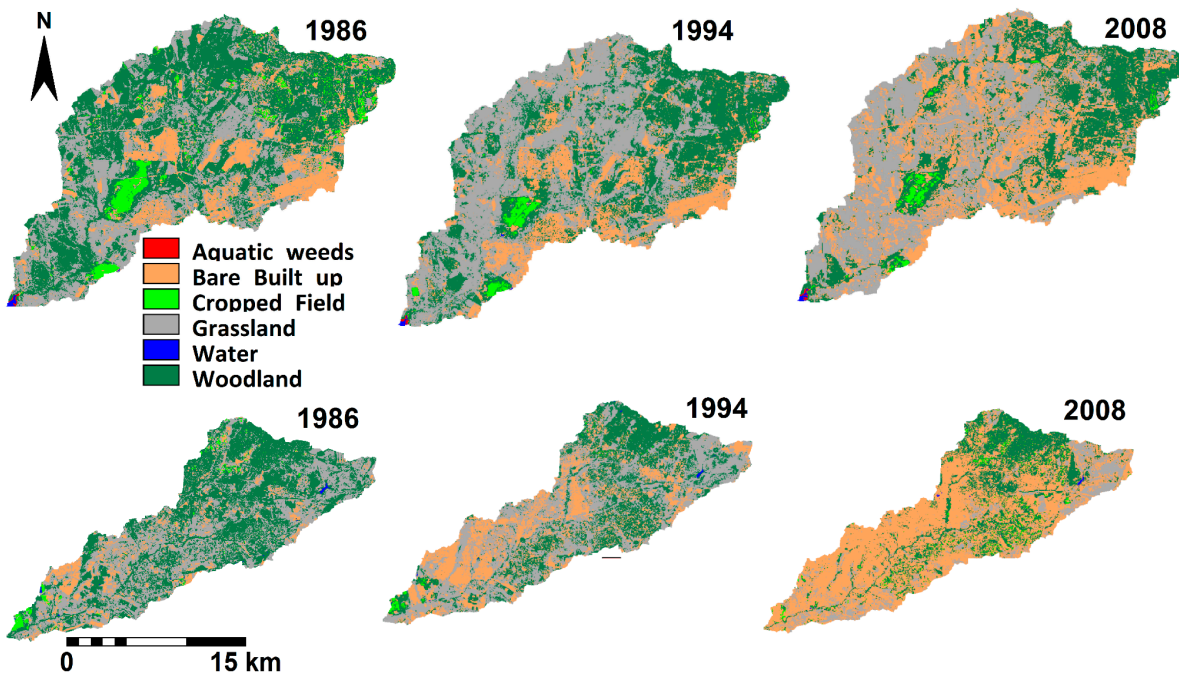


Fonte: Gumindoga *et al* (2014).

Posteriormente a caracterização da área de estudo, os resultados da classificação da cobertura do solo indicaram que as áreas urbanas aumentaram em mais de 600% na bacia hidrográfica de Mukuvisi e em mais de 200% na bacia hidrográfica de Marimba entre 1986 e 2008 (Gumindoga *et al*, 2014). Tal classificação indica que houve um aumento significativo da expansão das atividades antrópicas na bacia hidrográfica. Na figura 2 é possível visualizar a expansão das atividades antrópicas nos períodos analisados para as bacias hidrográficas de

Marimba e Mukuvisi, sendo que as cores em tom de “Bege” representam as áreas construídas, em cinza as áreas de pastagem, sendo grandes contribuintes para gerarem grandes valores de volume de escoamento superficial em relação a áreas em verde escuro que representam florestas.

Figura 2: Resultados da classificação da cobertura do solo nas bacias hidrográficas de Marimba (área superior) e Mukuvisi (área inferior) para os anos de 1986, 1994 e 2008.



Fonte: Gumindoga *et al.* (2014).

Para os resultados de vazão, simulações usando o TOPMODEL nas bacias hidrográficas de Marimba e Mukuvisi indicaram aumentos de vazão de 84,8% e 73,6%, respectivamente, de 1980 a 2010 (Gumindoga *et al.*, 2014), ou seja, esses aumentos de vazão coincidem com a expansão das atividades antrópicas nos locais em relação aos períodos analisados; na tabela 1 é possível visualizar as vazões médias anuais simuladas ($Q_{méd}$) e a vazão máxima anual (Q_{hst}) para os períodos analisados.

Tabela 1: Vazões médias e vazões máximas anual para os períodos nas bacias hidrográficas de Marimba e Mukuvisi

Período	Captação	Q médio (m ³ /s)	Q hst (m ³ /s)
1980–1990	Marimba	491,2	16,2
	Mukuvisi	529,8	21,9
1990–2000	Marimba	532,7	29,4
	Mukuvisi	574,1	27,2
2000–2010	Marimba	716,8	50,0
	Mukuvisi	771,0	34,0
		% Mudança na média Q	% Mudança em Q hst
1980–2000	Marimba	8,5	81,6
	Mukuvisi	8,4	55,6
1990–2010	Marimba	34,6	70,1
	Mukuvisi	33,3	24,9
		% Mudança em Qmean	% Mudança em Qhst
1980–2010	Marimba	45,9	208,8
	Mukuvisi	44,5	55,6

Fonte: Gumindoga *et al.* (2014).

Através dos resultados obtidos por Gumindoga *et al.* (2014), as vazões médias e as vazões históricas tiveram aumento nas bacias hidrográficas de Mukuvisi e Marimba nos intervalos de tempo analisados, sendo que tal aumento reflete como os impactos hidrológicos em uma bacia hidrográfica podem ser relevantes para proposição de medidas mitigadoras de impacto.

3.2 Método SCS para obtenção da precipitação efetiva

Entre alguns métodos para se calcular a precipitação efetiva, o método SCS desenvolvido pelo Soil Conservation Service, se torna usual para estimar o escoamento, onde de acordo com Cunha *et al.* (2015), o modelo SCS tem como principal parâmetro o CN, que depende da classificação hidrológica do solo, das condições antecedentes de umidade e da cobertura do solo, sendo que a classificação do solo está sujeita às características de cada área, com formas e capacidade de infiltração pertencentes a seu grupo hidrológico.

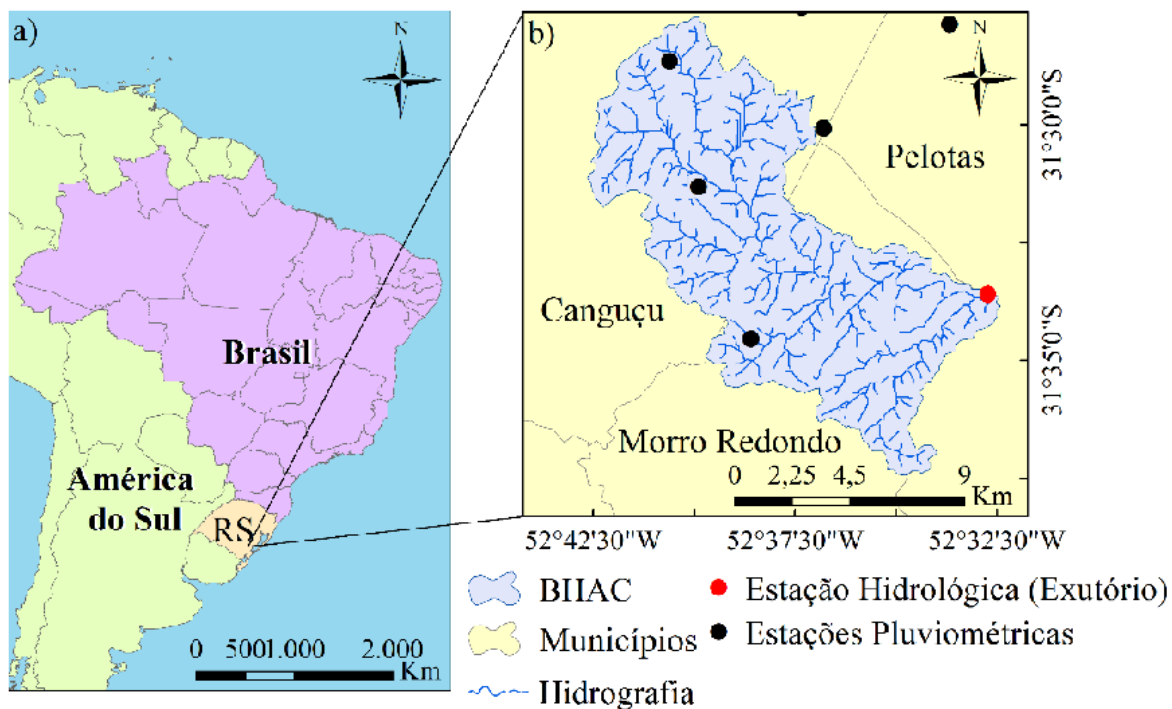
Apesar da simplicidade, praticidade e consequente aceitação do método, existem diversas críticas e dúvidas em relação à sua generalização (Cunha *et al.* 2015), ou seja, o método assume que o escoamento é o mesmo em toda a dimensão de uma bacia hidrográfica desconsiderando as características particulares de um solo, como exemplo a sua capacidade real de escoamento sub superficial ou subterrâneo.

O estudo de caso a seguir foi realizado em uma Bacia Hidrográfica do Rio Grande do Sul e utiliza o método (CN/SCS) com valores tabelados para estimar a precipitação efetiva no local. Os autores dividiram os valores de precipitação em oito eventos, sendo que tal estudo possui semelhanças com o estudo conduzido no campus Lagoa do Sino, já que ambos utilizam o método (CN/SCS) para a determinação da precipitação efetiva e a ausência da utilização de calibração para o modelo.

3.2.1. Aplicabilidade do método numérico da curva (CN/SCS) com base em valores de CN tabelados: estudo de caso na Bacia Hidrográfica do Arroio Cadeia

Estudo realizado na Bacia Hidrográfica do Arroio Cadeia, teve como objetivo avaliar o impacto da utilização de valores tabelados de CN sobre a estimativa de precipitação efetiva (P_e), tomando como base 8 eventos chuva-vazão na Bacia Hidrográfica do Arroio Cadeia (Cunha *et al.*, 2017). Para a realização da pesquisa os autores utilizaram estações de monitoramento, adquirindo dados de precipitação e cotas d'água, em intervalos de tempo de 5 minutos (Cunha *et al.*, 2017), sendo que os dados foram organizados com o objetivo de gerar hietogramas com intervalos de tempo de 30 minutos, sendo que a precipitação média foi obtida de acordo com a metodologia dos Polígonos de Thiessen (Chow *et al.*, 1988). Os dados de vazão e curva-chave para a seção de controle também foram organizados considerando um tempo de intervalo de 30 minutos. Na figura 3 é possível visualizar a localização da Bacia Hidrográfica do Arroio Cadeia no Estado do Rio Grande do Sul, compreendendo os municípios de Pelotas, Morro Redondo e Canguçu.

Figura 3 - Localização da Bacia Hidrográfica do Arroio Cadeia - RS



Fonte: Cunha *et al.*, (2017).

De acordo com Cunha *et al.* (2017) os solos da Bacia Hidrográfica do Arroio Cadeia foram enquadrados nos grupos C e D e os valores de CN foram obtidos a partir das tabelas apresentadas em SCS (1986), pertencentes a três condições de umidade antecedente do solo (AMC - Antecedent Moisture Content): AMC I (solo seco e precipitação acumulada dos 5 dias antecedentes (P5) de até 35 mm), AMC II (solo próximo à capacidade de campo e P5 entre 35 e 52,5 mm) e AMC III (solo muito úmido e P5 superior a 52,5 mm) (Cunha *et al.*, 2017). Para os cenários de simulação Cunha *et al.* (2017) elaboraram dois cenários de análise com base em 8 eventos chuva-vazão observados: Cenário 1: o valor médio de CN foi determinado para cada evento com base na análise hietograma-hidrograma a partir de valores observados de precipitação (P), abstração inicial (Ia) e precipitação efetiva (Pe). Para o cenário 2: os valores médios de CN foram obtidos pela ponderação dos valores tabelados do modelo e convertidos para a condição AMC de cada evento analisado (Cunha *et al.*, 2017), sendo que posteriormente comparou-se o CN determinado no cenário calibrado (1) e no CN tabelado (2).

Com base na umidade antecedente do solo, obtida pelos valores de P5, os eventos 1, 2, 3, 4 e 8 foram enquadrados no grupo AMC III, os eventos 5 e 6 no grupo AMC II e o 7 no grupo AMC I (Cunha *et al.*, 2017). Na tabela 2 é possível visualizar os eventos de chuva e a separação de (Pe) utilizados na metodologia.

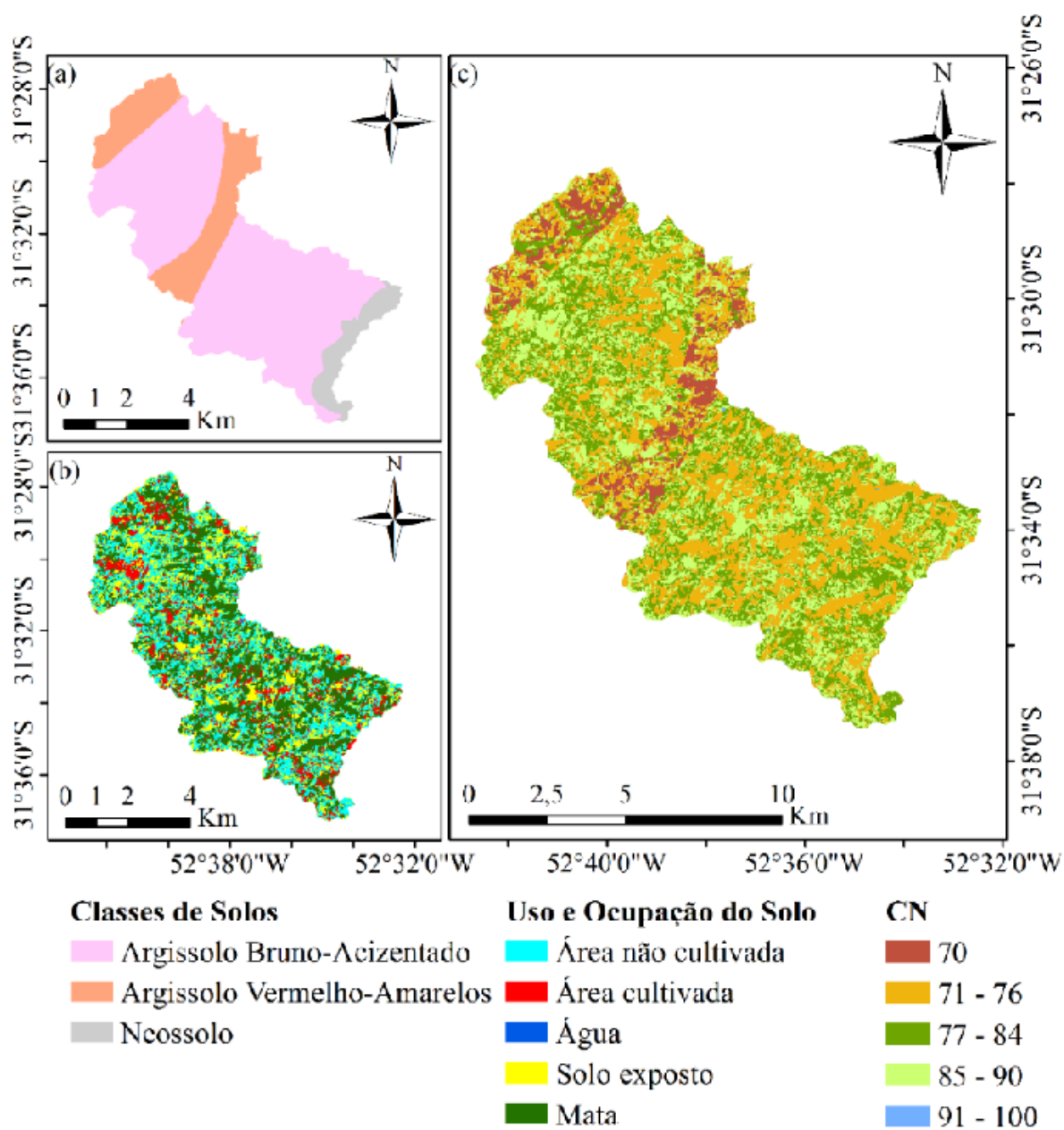
Tabela 2 - Eventos chuva-vazão utilizados para a avaliação da metodologia

Evento	Data	Ptotal (mm)	P5	P _e (mm)	Evento	Data	Ptotal (mm)	P5	P _e (mm)
1	21/09/2015	40,0	93,9	5,1	5	13/11/2015	31,0	45,4	2,5
2	23/09/2015	35,3	86,5	9,1	6	18/12/2015	28,8	50,8	2,7
3	15/10/2015	35,6	127,3	12,0	7	05/01/2016	49,4	4,5	2,1
4	20/10/2015	31,0	62,6	6,6	8	06/01/2016	34,4	73,5	5,6

Fonte: Cunha *et al.*, (2017).

Na figura 4 é possível visualizar as classes de solos e uso e ocupação do solo, sendo os solos compostos por Argissolo Bruno-Acinzentado, Argissolo Vermelho-Amarelo e Neossolo. De acordo com Cunha *et al.*, (2017), foram obtidas 5 combinações de uso do solo para a classe do solo do grupo C, com valores de CN variando de 70 a 100 e área total de 23,6 km². Para o grupo D também foram obtidas 5 combinações, porém com CN variando de 76 a 100, cujas áreas somaram 97,7 km² (Cunha *et al.*, 2017).

Figura 4 - Classes de solo, uso e ocupação do solo e valores de CN para a Bacia Hidrográfica do Arroio Central.



Fonte: Cunha *et al.*, (2017).

Na tabela 3 é possível visualizar os valores de CN médios obtidos dos cenários 1 e 2 com seus respectivos eventos.

Tabela 3 - Valores de CN e de precipitação efetiva dos cenários 1 e 2

Evento	Observado		Tabelado		Evento	Observado		Tabelado	
	CN	P _e (mm)	CN	P _e (mm)		CN	P _e (mm)	CN	P _e (mm)
1	59,3	5,1	91,0	20,2	5	80,0	2,5	80,4	4,3
2	92,5	9,1	91,0	13,5	6	85,1	2,7	80,4	2,7
3	87,3	12,0	91,0	16,3	7	59,2	2,1	64,2	2,7
4	75,2	6,6	91,0	13,2	8	97,1	5,6	91,0	15,4

Fonte: Cunha *et al.*, (2017).

De acordo com os resultados apresentados, os valores de CN do cenário 2 (tabelado) foram superestimados em comparação com os valores do cenário 1 (observado). A superestimativa foi de 0,5 a 53,5%, enquanto a subestimativa foi de 1,6 a 6,3%, ou seja, os valores do método tabelado tendem a gerar valores de precipitação efetiva maiores do que os realmente observados, sendo que a magnitude dessa superestimação em termos de (Pe) varia muito de cenário, chegando a quase 300%, com variação percentual de 27,1 a 297,2% (Cunha *et al.*, 2017).

Analisando o estudo da Bacia Hidrográfica do Arroio Cadeia, pode-se inferir algumas implicações, sendo que usar valores tabelados de CN sem calibração pode levar a casos de superdimensionamento em relação a precipitação efetiva e escoamento. A importância de considerar a umidade antecedente ao solo, tipo de solo e seu uso são fatores que afetam o valor de CN.

3.3. HEC-HMS

Atualmente existem diversas formas e métodos de simular processos envolvendo precipitação e escoamento, dentre os métodos computacionais, softwares como o HEC-HMS possuem uma boa confiabilidade, sendo que o sistema de modelagem hidrológica foi projetado para simular os processos de precipitação-escoamento de sistemas de bacias hidrográficas (HEC-HMS User's Manual, 2023). Desenvolvido pelo corpo de engenheiros do exército dos Estados Unidos (USACE - U.S. Army Corps of Engineers), ele foi projetado para ser aplicável em diversas áreas geográficas, resolvendo a mais ampla gama possível de problemas, sendo que capacidades de simulação de chuva-vazão e propagação de ondas de cheia se destacam em suas funções.

Sendo o HEC-HMS um software de simulação, este também está propício a apresentar limitações, onde de acordo com o Manual do HEC-HMS User's Manual (2023) existem dois aspectos de limitação de projeto: formulação simplificada do modelo e representação simplificada

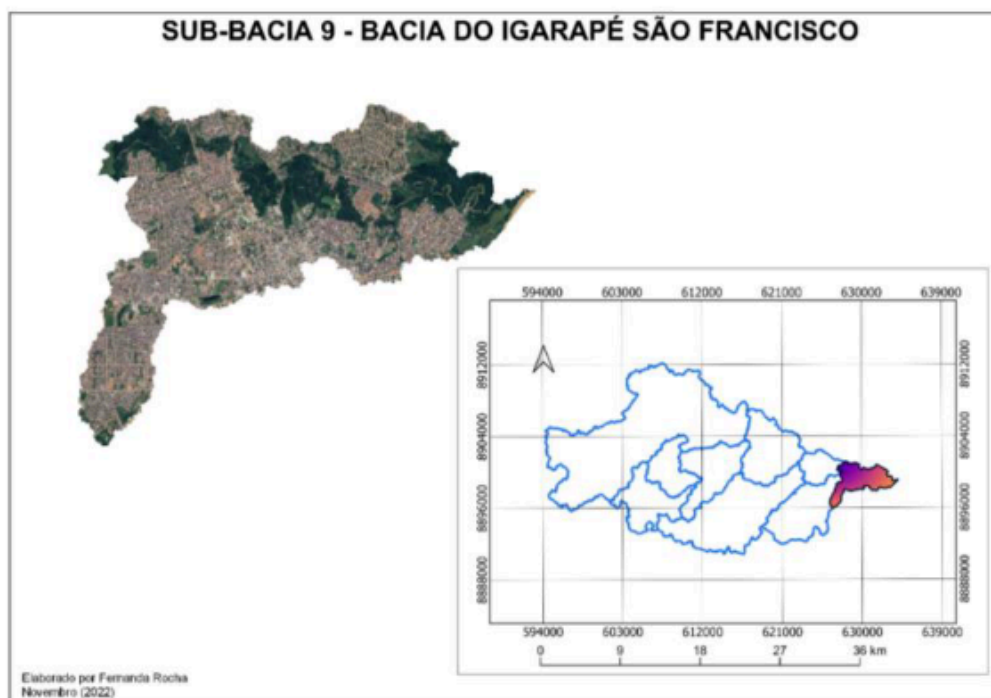
do fluxo, ou seja, o modelo apresenta boas funcionalidades para simulação de eventos como transformação de precipitação em escoamento, mas a complexidade e dinâmica das características do solo são muitas vezes simplificadas no modelo, prejudicando sua eficácia. Entretanto, o software apresenta um ambiente de trabalho totalmente integrado, incluindo banco de dados, ferramentas de entrada de dados, mecanismo de computação e ferramentas de geração de relatórios de resultados (HEC-HMS User's Manual, 2023).

O estudo de caso a seguir, utilizou o software HEC-HMS como forma de determinar a vazão e o volume em uma determinada Bacia hidrográfica no Acre, onde os autores destacam que o adensamento populacional pode ser um fator crucial na estimativa de vazão. Essa equivalência também é uma condicionante para a ocupação no território do campus Lagoa do Sino, ou seja, ambos demonstram que a ocupação e o uso desordenado do solo tem seus efeitos na geração de vazão e volume no ponto de exutório das bacias.

3.3.1. Modelagem utilizando HEC-HMS: estudo hidrológico da Bacia do Igarapé São Francisco - Rio Branco/AC

Estudo conduzido por Rocha *et al.* (2024), teve como objetivo apresentar uma modelagem hidrológica com base em um estudo realizado na bacia do Igarapé São Francisco, localizada em Rio Branco - AC, utilizando o software HEC-HMS. Inicialmente os autores identificaram a bacia do Igarapé São Francisco sendo que ao longo de seu curso recebe descarga de vários igarapés de menor tamanho, compondo uma rede fluvial de cursos d'água perenes e intermitentes, com três igarapés principais: Saituba, Dias Martins e Batista (Rocha *et al.*, 2024). Posteriormente, os autores optaram por focar a avaliação em apenas uma sub-bacia da bacia toda (Sub-bacia 9), sendo esta sub-bacia característica de grande adensamento urbano. Na figura 5 é possível visualizar a bacia do Igarapé São Francisco.

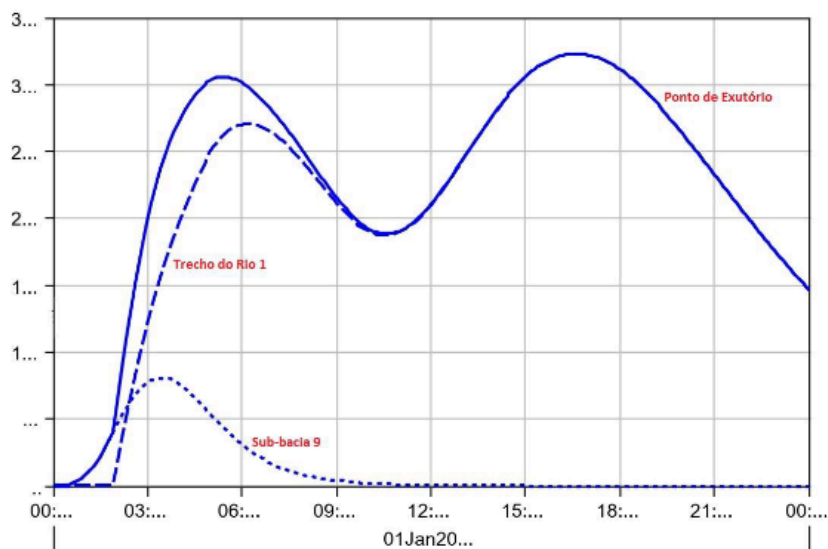
Figura 5: Localização da Bacia do Igarapé São Francisco com destaque para a (Sub-bacia 9)



Fonte: Rocha *et al.* (2024).

Após realizarem a caracterização da bacia e conseqüentemente sua modelagem hidrológica no HEC-HMS, os autores constataram que a sub-bacia 9 desempenha um papel crucial no comportamento hidrológico da Bacia do Igarapé São Francisco (Rocha *et al.*, 2024), ou seja, sendo o ponto de exutório da bacia toda, a sub-bacia 9 recebe as vazões das demais sub-bacias e possui em sua característica de uso e ocupação do solo áreas urbanizadas. De acordo com Rocha *et al.* (2024), a sub-bacia 9 apresentou um escoamento superficial de 69,71 mm e uma perda de 35,75 mm, sendo que tais números são um reflexo da intensa urbanização na sub-bacia., Na figura 6 é possível visualizar o hidrograma do ponto de exutório gerado pelo HEC-HMS.

Figura 6: Hidrograma do exutório da Bacia do Igarapé São Francisco



Fonte: Rocha *et al.* (2024).

Analisando a modelagem hidrológica realizada no software HEC-HMS, os autores destacaram que a precisão do modelo poderia ser melhor atendida se houvesse coleta de dados em campo, ou seja, a modelagem poderia ser melhor ajustada com dados empíricos. Para a realização do estudo, foi utilizado um tempo de retorno de 100 anos, sendo que a utilização de apenas um período limita a análise do comportamento da bacia, gerando projetos economicamente inviáveis. A utilização do software HEC-HMS mostrou-se eficiente na pesquisa, entretanto a utilização de modelos determinísticos nesse tipo de pesquisa pode apresentar problemas relacionados a precisão dos parâmetros como o solo, clima e condições de umidade, sendo o solo uma característica importante.

3.4. Estratégias de mitigação utilizando Low-Impact Development (LID)

Sendo parte de uma infraestrutura verde para compensar o impacto da carga de escoamento pluvial, o LID combina um projeto hidrológico funcional do local com medidas de prevenção da poluição para compensar os impactos do desenvolvimento do solo na hidrologia e qualidade da água (Maryland, 1999). A manipulação de um terreno em uma obra apresenta diversas características próprias, onde a hidrologia do local pode ser beneficiada através de técnicas de controle de escoamento, onde o uso dessas técnicas ajuda a reduzir o escoamento superficial e a garantir a recarga adequada das águas subterrâneas (Maryland, 1999).

O LID pode apresentar diversos tipos de práticas de mitigação de impacto, sendo muito comum a utilização de biorretenção, poços secos, faixas filtrantes, tampões vegetados,

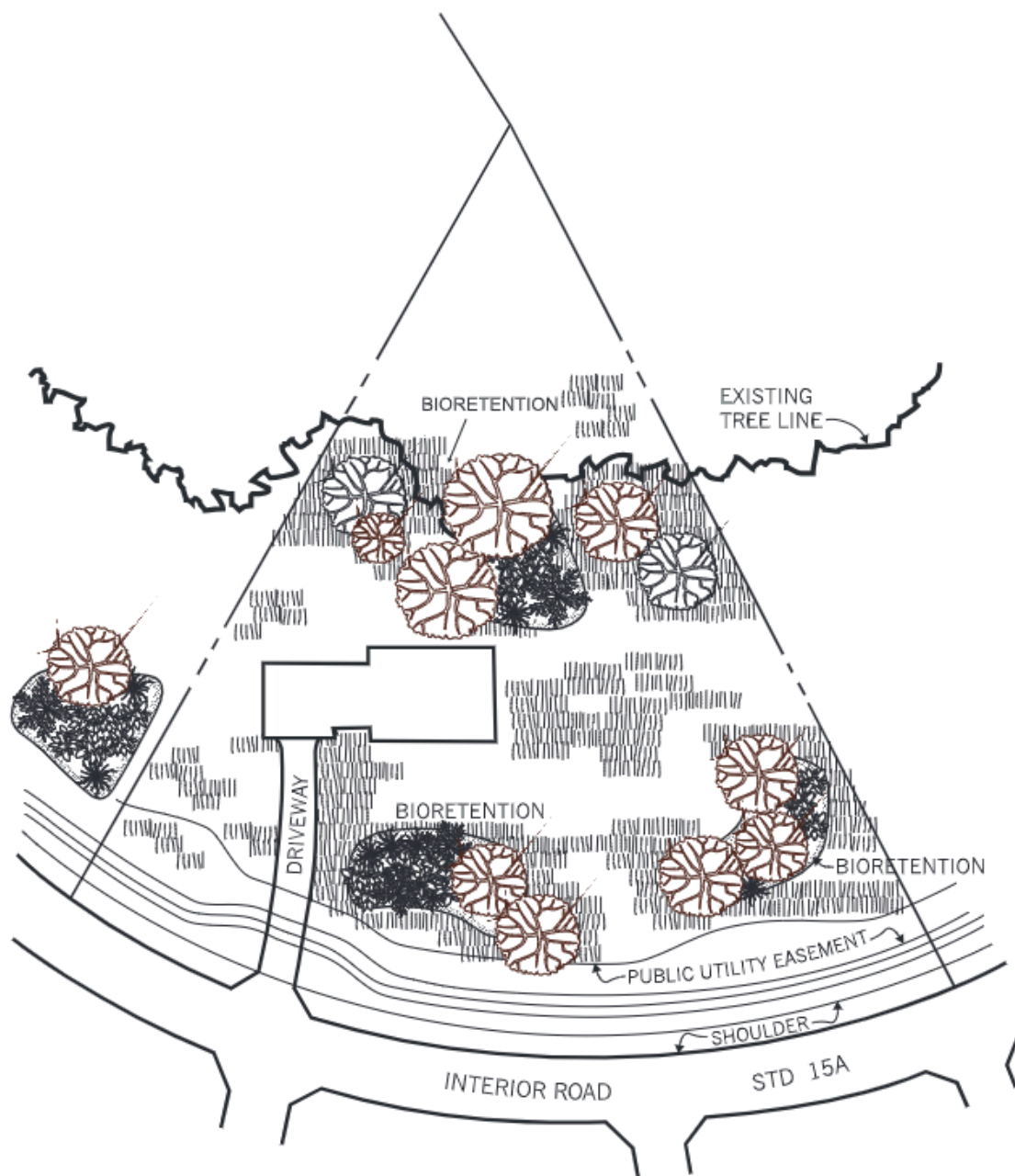
distribuidores de nível, valas gramadas, barris de chuva e trincheiras de infiltração. De acordo com Maryland (1999), os conceitos fundamentais do LID incluem: usar a hidrologia como estrutura integradora; pensar em microgestão; controlar as águas pluviais na fonte; usar métodos simplistas e não estruturais e criar uma paisagem multifuncional. No quadro 1 é possível visualizar os tipos de estratégia de (LID) e suas principais características, e na figura 7 é possível visualizar um lote com características de LID, sendo composto por superfícies permeáveis, ausência de tubulações de drenagem e locais com cobertura vegetal que favorecem a infiltração.

Quadro 1: Práticas de mitigação de impacto

Barris de chuva	Reservatórios de água conectados a calhas que possuem a capacidade de armazenar água da chuva
Biorretenção	Em geral, jardins com vegetação e solo estruturados a fim de reter, infiltrar e filtrar a água pluvial
Distribuidores de nível	Estruturas com a capacidade de receber o escoamento e espalhar uniformemente sobre um local com vegetação
Faixas filtrantes	Faixa de área composta por vegetação densa e rasteira, com capacidade de reduzir o escoamento superficial
Poços secos	Estrutura subterrânea composta por material granular tipo (Brita, pedra ou cascalho)
Tampões vegetados	Faixas mais largas de vegetação, geralmente encontram-se ao longo do curso d'água, funcionando como uma espécie de barreira filtrando sedimentos
Trincheiras de infiltração	Escavações rasas e alongadas preenchidas com material filtrante tipo (brita, cascalho ou pedra).
Valas gramadas	Valas compostas por gramas, tem uma superfície rasa e a capacidade de transportar a água da chuva lentamente
Pavimento permeável	Em sua maioria, constituído por blocos de concreto vazado ou blocos porosos que favorecem a infiltração.

Fonte: Maryland (1999); Adaptado de Araújo *et al.* (2010).

Figura 7 - Planta de lote com biorretenção



Fonte: Maryland (1999).

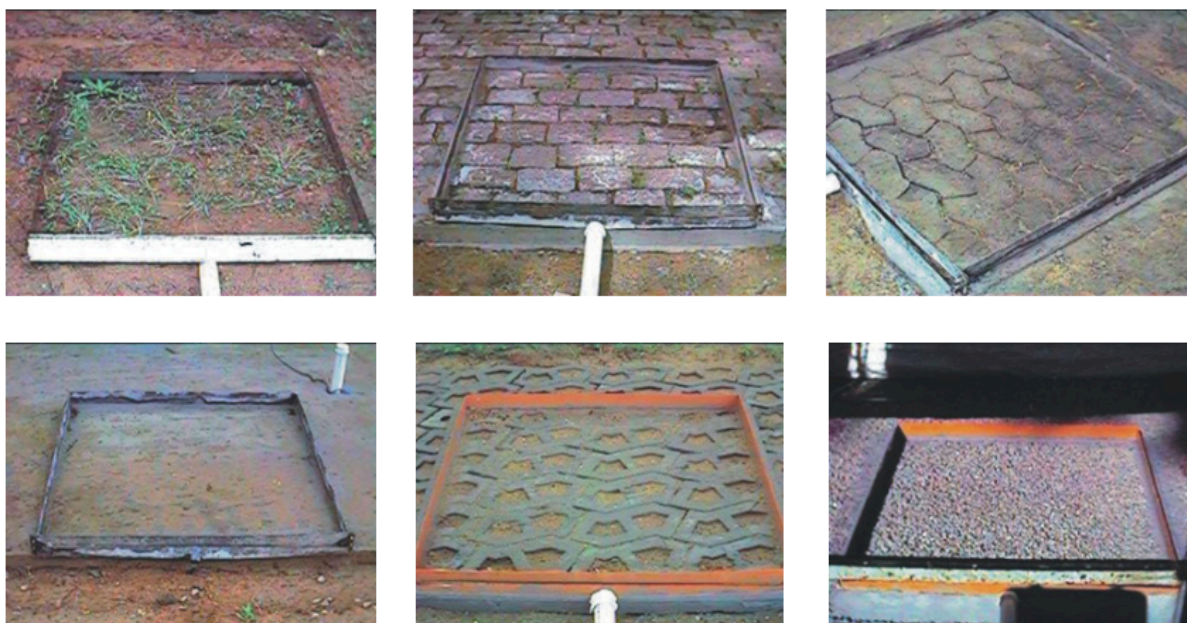
O estudo de caso a seguir demonstra indicativos de como o escoamento superficial pode ser afetado pelo tipo de pavimento, ou seja, os autores em seu estudo organizaram diversos tipos de blocos de pavimentos e a capacidade de infiltração de cada um é influenciada pela sua porosidade. As vias de circulação do campus Lagoa do Sino possuem em sua maioria pavimentos permeáveis que tem uma certa capacidade de infiltrar o escoamento superficial que é gerado, e o estudo conduzido por Araújo *et al.* (2010) possui entre os blocos simulados um tipo de pavimento

que é característico do campus Lagoa do Sino, sendo este o bloco de concreto com características de uma boa retenção de escoamento superficial.

3.4.1. Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução de escoamento superficial

O estudo conduzido por Araújo *et al.* (2000), teve como objetivo central avaliar a eficiência dos pavimentos permeáveis na redução do escoamento superficial, através de simulações experimentais, comparando o escoamento gerado em diversos tipos de pavimento e no solo compactado. Inicialmente os autores analisaram amostras de 1 m² de superfícies (terreno existente, superfície semi-permeável, superfície impermeável e superfície permeável) com simulação de chuva utilizando um simulador, onde a água é bombeada a uma vazão constante até um aspersor fixado a um braço, cujo movimento pendular define a intensidade da chuva aspergida sobre a parcela de 1m² (Araújo *et al.*, 2000). Na figura 8 é possível visualizar os tipos de pavimentos simulados.

Figura 8 - Pavimentos simulados (solo compactado; paralelepípedo; bloco de concreto; concreto; bloco vazado; concreto poroso).



Fonte: Araújo *et al.* (2000).

Para a realização da simulação, foram efetuadas simulações da chuva de projeto (duração de 10 min, período de retorno de 5 anos e intensidade de 111,9 mm/h) sobre as parcelas de solo analisadas (Araújo *et al.*, 2000). Na tabela 4 é possível visualizar o resultado das simulações de

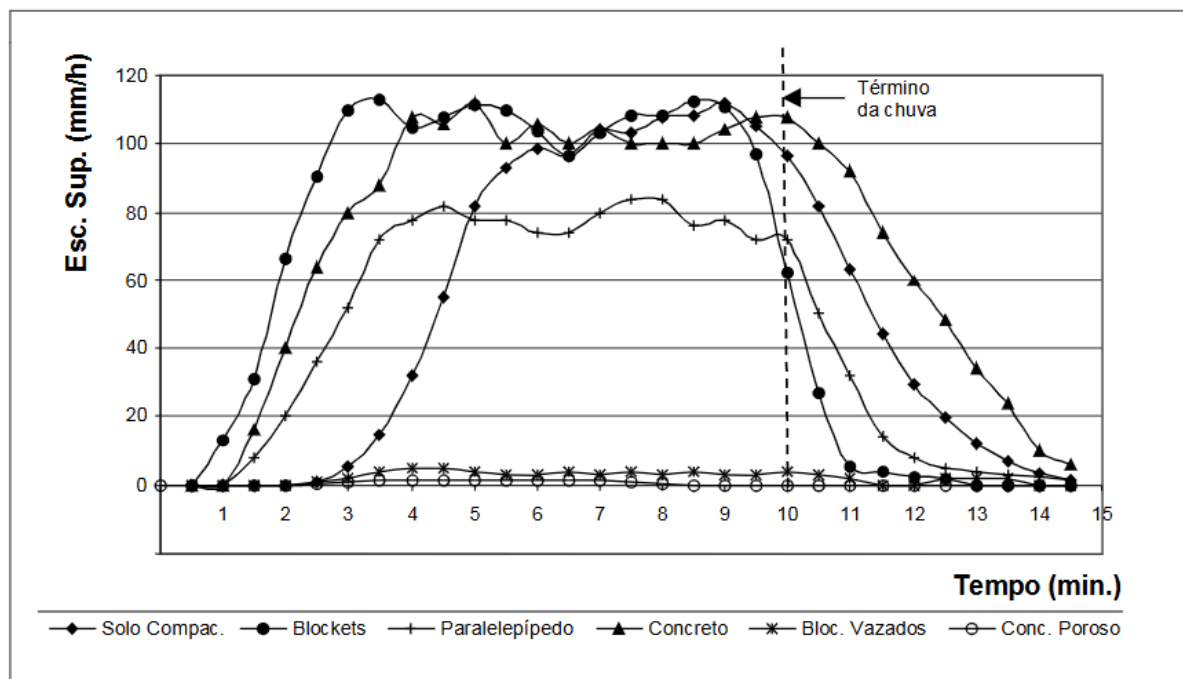
chuva nas superfícies e na figura 9 um gráfico de escoamento superficial (mm/h) em função do tempo (min) dessa simulação.

Tabela 4 - simulação de chuva nas parcelas de solo (1m²)

	Solo Compactado	Concreto	Bloco de Concreto	Paralelepípedo	Concreto Poroso	Blocos Vazados
Data	03/06/98	28/10/98	29/07/98	13/10/98	13/04/99	27/01/99
Hora Início	14h06min	15h15min	15h20min	11h20min	14h55min	10h08min
Intensidade simulada (mm/h)	112	110	116	110	120	110
Chuva total (mm)	18,66	18,33	19,33	18,33	20,00	18,33
Escoamento total (mm)	12,32	17,45	15,00	10,99	0,01	0,5
Coefficiente de escoamento	0,66	0,95	0,78	0,60	0,005	0,03
Umidade inicial do solo (cm ³ /cm ³)	32,81	32,73	32,71	32,72	0,329	32,24

Fonte: Araújo *et al.* (2000).

Figura 9 - Escoamento superficial das superfícies simuladas



Fonte: Araújo *et al.* (2000).

De acordo com as simulações realizadas nas amostras de solo, as parcelas que possuem agregados mais compactados como o concreto e bloco de concreto possuem uma menor capacidade de infiltração ou até em alguns casos nula, enquanto parcelas de solo que possuem um agregado mais disperso como os solos de concreto poroso e bloco vazado possuem uma

capacidade de infiltração maior. Entretanto, deve-se ressaltar que o pavimento apresentará uma melhoria importante para inundações frequentes e de alto risco, no entanto quando o reservatório estiver cheio para grandes volumes de precipitação o pavimento poderá apresentar uma menor eficiência do que apresentada nos experimentos (Araújo *et al.*, 2000).

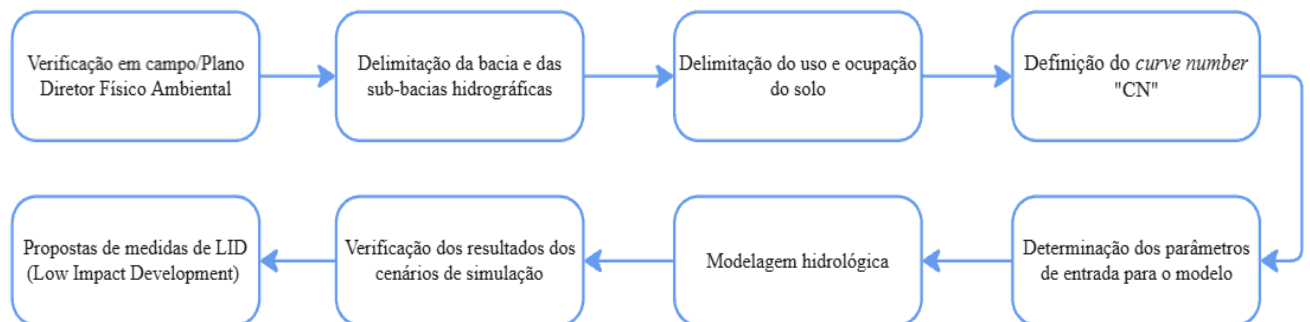
Como mencionado pelo próprio autor, a capacidade de infiltração de pavimentos permeáveis poderá ser comprometida caso o solo esteja completamente saturado ou seu reservatório esteja totalmente cheio, evidenciando a ineficiência em períodos de chuvas intensas para uma determinada área. O fator risco ambiental em relação a contaminação também deve ser analisado para uma implementação em uma determinada área, com o risco de contaminação freática sendo de extrema importância. Variabilidade espacial e climática também devem ser considerados, visto que as características do solo e clima variam em cada área e a sua capacidade de infiltração pode ser comprometida.

4. METODOLOGIA

4.1. Fluxograma de trabalho

Para melhor entendimento dos processos envolvidos no passo a passo do trabalho, foi desenvolvido um fluxograma que auxilia a compreender os processos de cada etapa, sendo este apresentado no fluxograma 1.

Fluxograma 1: fluxo de execução do trabalho



Fonte: Autoria Própria (2025).

Inicialmente foi realizada uma verificação em campo com o objetivo de delimitar a bacia e as sub-bacias de contribuição de acordo com as curvas de nível do local. De acordo com as sub-bacias de contribuição e o plano diretor do campus, delimitou-se o uso e ocupação do solo para cada área utilizando o CN médio ponderado para cada tipo de solo e cenário de simulação. A determinação dos parâmetros de entrada para o modelo se baseou nos dados referentes a cota de montante e jusante de cada sub-contribuinte, declividade, comprimento do rio principal e área de cada sub-contribuinte. A modelagem hidrológica foi executada no *software* HEC-HMS, onde o modelo gerou três cenários de simulação, estes correspondente a passado, presente e futuro, sendo que propostas de mitigação foram elaboradas com o objetivo de amenizar efeitos decorrentes do escoamento ocasionados no cenário futuro.

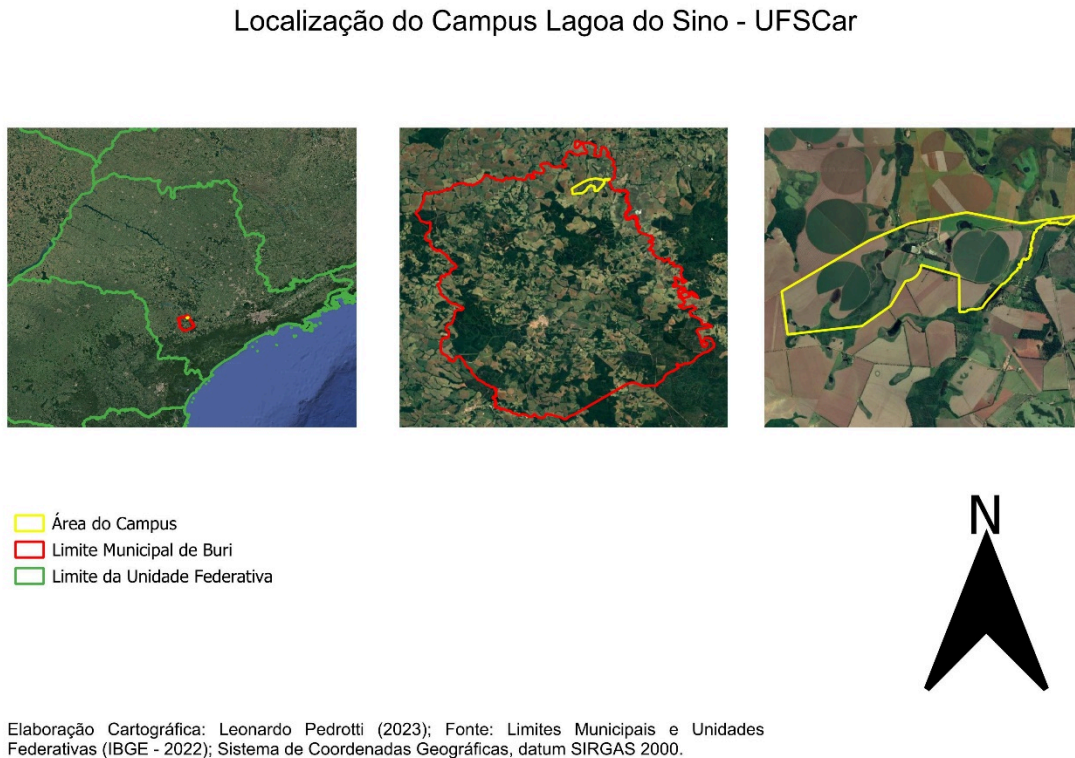
4.2. Área de estudo

4.2.1. Caracterização da Bacia Hidrográfica

A área de estudo compõe a unidade de gerenciamento de recursos hídricos da bacia hidrográfica do Alto Paranapanema. No geral, a bacia hidrográfica do Alto Paranapanema (CBH-ALPA) possui uma área de drenagem de 22.689 km² (UGRHI, 2016), sendo que a sua

consequentemente um impacto hidrológico. Na figura 11 é possível visualizar a localização do Campus Lagoa do Sino da UFSCar.

Figura 11 - Localização do Campus Lagoa do Sino - UFSCar



Fonte: Autoria Própria (2024).

4.3. Plano Diretor Físico Ambiental

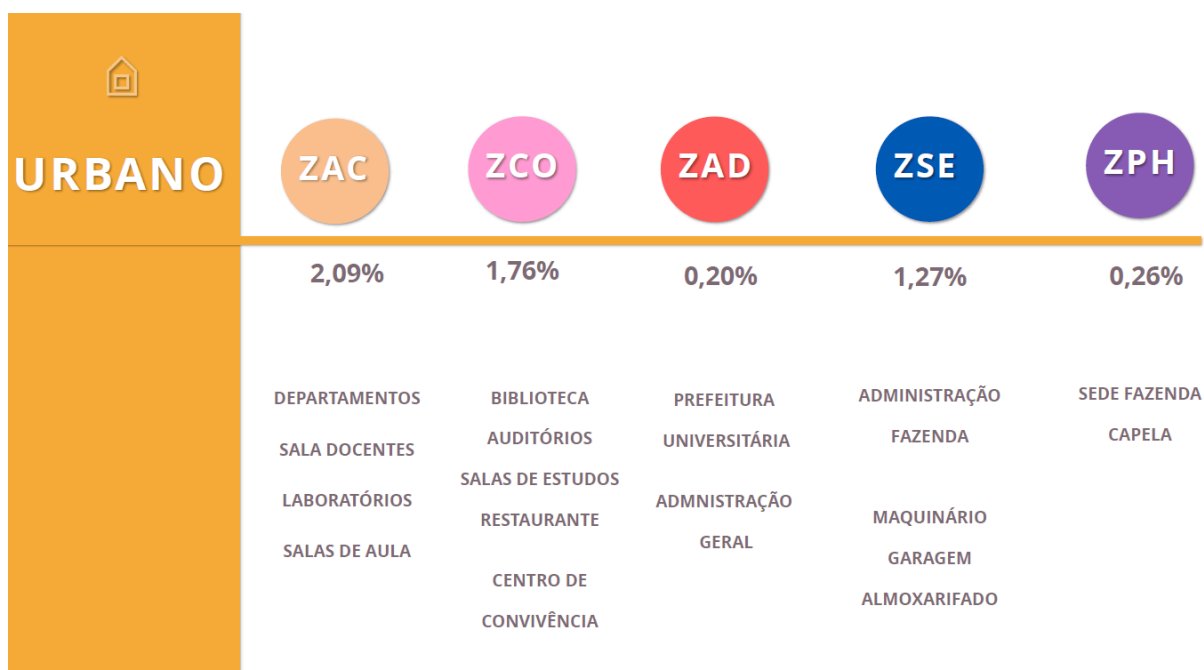
O Plano Diretor Físico-Ambiental do campus Lagoa do Sino consiste em uma estrutura de três demandas, sendo elas ambiental, acadêmica e cultivo. A primeira demanda consiste em uma regularização de áreas degradadas de acordo com o código florestal, visto que as zonas de proteção permanente encontram-se em áreas alagáveis. A segunda demanda consiste na construção de edificações acadêmicas e infraestrutura viária, porém, áreas de plantio experimental para o auxílio de estudos e pesquisa, também fazem parte desta demanda. A terceira demanda, está relacionada às áreas de cultivo do campus, sendo estas compostas por sequeiro, irrigação e áreas administrativas ligadas a silos e maquinários. Algumas informações do Plano Diretor Físico-Ambiental do Campus Lagoa do Sino da UFSCar que são relevantes para a modelagem hidrológica são apresentadas na tabela 5 e nas figuras 12, 13 e 14.

Tabela 5 - Siglas para a representação de cada área do Campus Lagoa do Sino.

ZPP	zona de preservação permanente
ZCU1	zona de cultivo 1 sequeiro
ZCU2	zona de cultivo 2 irrigada
ZACE	zona acadêmica de experimentação
ZAC	zona acadêmica
ZCO	zona comunitária
ZAD	zona administrativa
ZSE	zona de serviço
ZPH	zona de patrimônio histórico

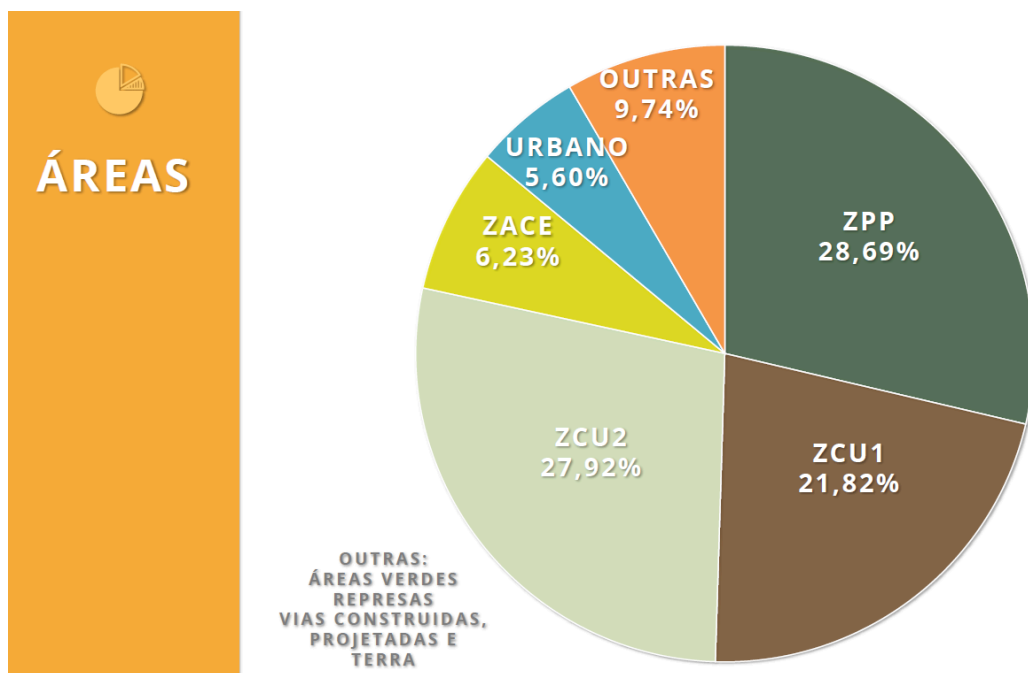
Fonte: Plano Diretor Físico-Ambiental do campus Lagoa do Sino (2019).

Figura 12 - Zoneamento das áreas urbanas do campus Lagoa do Sino.



Fonte: Plano Diretor Físico-Ambiental campus Lagoa do Sino (2019).

Figura 13 - Percentual correspondente a cada área do campus Lagoa do Sino. O percentual urbano corresponde às zonas ZAC, ZCO, ZAD, ZSE e ZPH.



Fonte: Plano Diretor Físico-Ambiental do campus Lagoa do Sino (2019).

Figura 14 - Delineamento da implantação total do campus Lagoa do Sino de acordo com o Plano Diretor Físico-Ambiental.



Fonte: Plano Diretor Físico-Ambiental Campus Lagoa do Sino (2019).

4.4. Delimitação da Bacia e das Sub-bacias de contribuição

Inicialmente foi verificado em uma carta topográfica 1:50.000 obtida através do banco de dados do IBGE (2025), as curvas de nível do local, sendo que posteriormente foi realizado uma verificação em campo com o objetivo de validar as informações da carta topográfica, sendo que tal verificação consistiu nos pontos de interesse (pontos de exutório de cada reservatório, nascentes e fluxo de canais). Após a verificação de todos os pontos de interesse dentro do campus, foi realizado o processo de determinação das bacias de contribuição e sub-bacias de contribuição que estão localizados dentro do limite do Campus utilizando o *software* QGis.

4.5. Delimitação do uso e ocupação do solo e definição do Curve number “CN”

Para delimitar o uso e ocupação do solo do bacia hidrográfica gerada, inicialmente foi necessário criar três cenários de uso e ocupação, ou seja, um cenário chamado “passado” (2013), que corresponde ao cenário antes da implantação do campus Lagoa do Sino, o cenário “presente”, que corresponde ao atual momento do campus, neste caso o ano de 2023, e o cenário “futuro” que corresponde a total implementação do campus de acordo com o Plano Diretor (sem previsão de término). Os cenários “passado” e “presente” foram delimitados com base em imagens de satélite disponíveis no Google Earth (2013 e 2023, respectivamente). Em seguida foi necessário definir uma classe de atributos chamada “classe padrão” para padronizar as cores dos três cenários de simulação, ou seja, de acordo com as cores definiu-se atributos para classificar o uso e ocupação do solo das sub-bacias, como pode ser visualizado na tabela 6.

Tabela 6 - Classes padrão do uso e ocupação do solo de acordo com as cores dos cenários “Passado”, “Presente” e “Futuro” adotada.

Classes padrão
cultivo de sequeiro
cultivo em pivô
vegetação rasteira
vegetação arbórea
zona acadêmica
zona de serviço fazenda
superfície de água

Fonte: Autoria Própria (2024).

Para a definição dos CN de cada uso e ocupação do solo, utilizou-se a consulta em literatura, onde primeiramente obteve-se a tabela de acordo com (Mútua *et al*, 2007), onde ele estabelece os CN de acordo com a tabela 7.

Tabela 7 - Valores correspondentes ao CNs de cada uso e ocupação do solo.

	A	B	C	D
Terras urbanas e construídas	73	82	88	90
Terras agrícolas e pastagens secas	71	80	86	86
Terras agrícolas e pastagens irrigadas	64	74	81	84
Mosaico de terras agrícolas/pastagens	63	73	82	87
Mosaico de terras agrícolas/florestas	51	68	78	82
Pastagens	60	76	81	89
Arbustos	48	62	73	78
Savana	44	65	77	82
Floresta decídua de folhas largas	55	66	74	79
Floresta de folhas largas perenes	55	66	74	79
Corpos d'água	100	100	100	100
Área úmida herbácea	100	100	100	100
Área úmida arborizada	100	100	100	100
Área estéril ou com vegetação esparsa	75	80	85	90

Fonte: Adaptado de Mútua *et al*. (2007).

Para a classe padrão denominada “zona de serviço fazenda”, foi necessário a busca em outra literatura, sendo o motivo correspondente a falta de classificação necessária para esta área na tabela, sendo que o CN para esta classe foi definido de acordo com Tucci (2014), como pode ser visualizado na tabela 8.

Tabela 8 - Valor de CN para “zona de serviço fazenda”.

zona residencial com 20% de área impermeável	51	68	79	84
--	----	----	----	----

Fonte: Adaptado de Tucci (2014).

Tabela 9 - Comparação entre as classes de solo da literatura e as classes solo padrão do Campus Lagoa do Sino a ser utilizada.

Classes de solo retirados da Literatura	Classes solo padrão do Campus
Terras urbanas e construídas	zona acadêmica
Terras agrícolas e pastagens irrigadas	cultivo em pivô
Mosaico de terras agrícolas/pastagens	vegetação rasteira
Floresta decídua de folhas largas	vegetação arbórea
Corpos d'água	superfície de água
zona residencial com 20% de área impermeável	zona de serviço fazenda

Fonte: Autoria Própria (2025).

Para a definição da escolha de qual grupo hidrológico utilizar, sendo eles (A, B, C, D), foi necessário realizar uma consulta da predominância de tipo de solo no local, sendo esta obtida através de um arquivo “shapefile” do (IBGE, 2018) com o mapa pedológico. Para se obter a perda de chuva ou a capacidade de infiltração do solo por tipo de uso e ocupação do solo, a abstração inicial (A_i) foi determinada de acordo com o CN de cada ocupação do solo, de acordo com a equação 1.

$$A_i(mm) = 0,2 * ((25400/CN \text{ médio}) - 254) \quad (1)$$

A_i = abstração inicial em milímetros

CN médio = CN médio ponderado da classe de solo por sub-bacia

4.6. Determinação dos parâmetros de entrada a serem utilizados no software HEC-HMS.

Para o processamento dos dados utilizando o software HEC-HMS foi necessário primeiramente determinar os parâmetros de entrada, sendo eles o comprimento do rio principal em metros, as cotas de montante e jusante em metros, a declividade das redes de drenagem de cada sub-bacia em m/m, o tempo de concentração pelo método de Kirpich em minutos e o lag time em minutos. É importante destacar que os parâmetros determinados acima são válidos para os três cenários de simulação. Em seguida foi necessário determinar os parâmetros para o hietograma de projeto, onde inicialmente foram determinados os parâmetros de comprimento do rio principal, as cotas de montante e jusante e a declividade do rio principal. Para a determinação da declividade do rio principal e o tempo de concentração, foram utilizadas as equações 2 e 3.

$$S (m/m) = (cota \text{ montante} - cota \text{ jusante}) / (comprimento \text{ rio principal})$$

(2)

S = declividade do rio principal em metros por metros

$$tc(min) = 3,989 * ((L^{0,77})/1000) * (S^{-0,385})$$

(3)

tc = tempo de concentração em minutos

L = comprimento do rio principal em metros

S = declividade do rio principal em metros por metros

Em seguida foram determinados os parâmetros que correspondem a tempo de retorno, sendo este correspondente a um período de 25 anos em virtude do tamanho da bacia na qual será feita a modelagem (porte pequeno), onde de acordo com (SUDERHSA, 2002), para sistemas de macrodrenagem o intervalo recomendado corresponde entre 10 à 50 anos. Para intensidade da chuva de projeto foi adotado a curva IDF que corresponde ao município mais próximo do Campus Lagoa do Sino que possui curva IDF disponível, sendo este o município de Itararé-SP, com uma distância de 139 km do campus. A equação utilizada pode ser visualizada na equação 4.

$$i(t, T) = 20,0196 (t + 10) - 0,7961 + 11,4493 (t + 10) - 0,9224 [- 0,4778 - 0,9046 \ln \ln (T/T - 1)]$$

(4)

i(t, T) = intensidade, em milímetros por minutos

t = duração em minutos

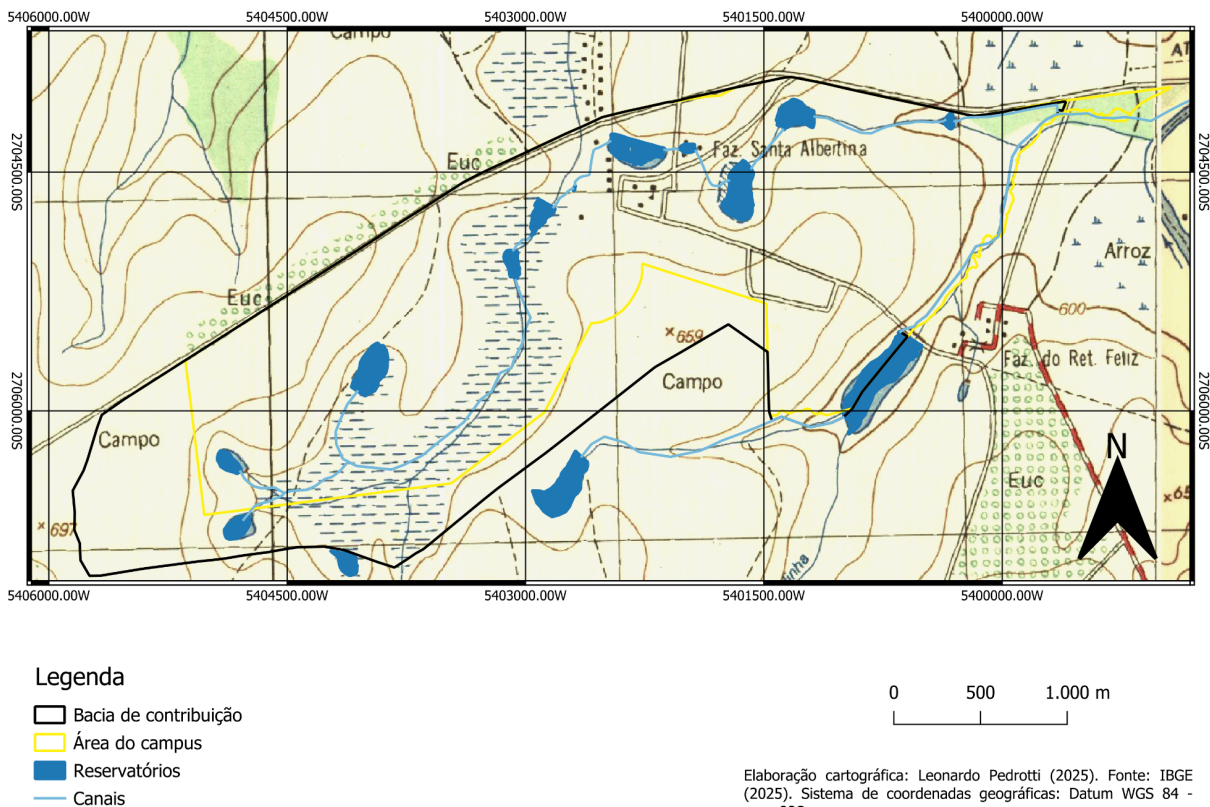
T = tempo de retorno em anos

5. RESULTADOS

5.1. Delimitação da área de contribuição

Inicialmente foi verificado através de imagem de satélite a existência de um canal na propriedade vizinha com a possível indicação de sentido ao campus. Dessa forma, foi feita diversas tentativas de comunicação com a fazenda vizinha ao campus, a fim de verificar esta possibilidade, entretanto não houve sucesso na obtenção de informações referente ao canal, sendo que posteriormente a hipótese de passagem do canal para o interior do campus foi descartada através da verificação na carta topográfica 1:50.000 (IBGE/IGC-SP). Devido a declividade do terreno, houve algumas mudanças no limite da bacia de contribuição, ou seja, tal mudança ocasionou em uma bacia de contribuição que ultrapassa os limites do Campus com um total de 807 hectares, como pode ser observado na figura 15.

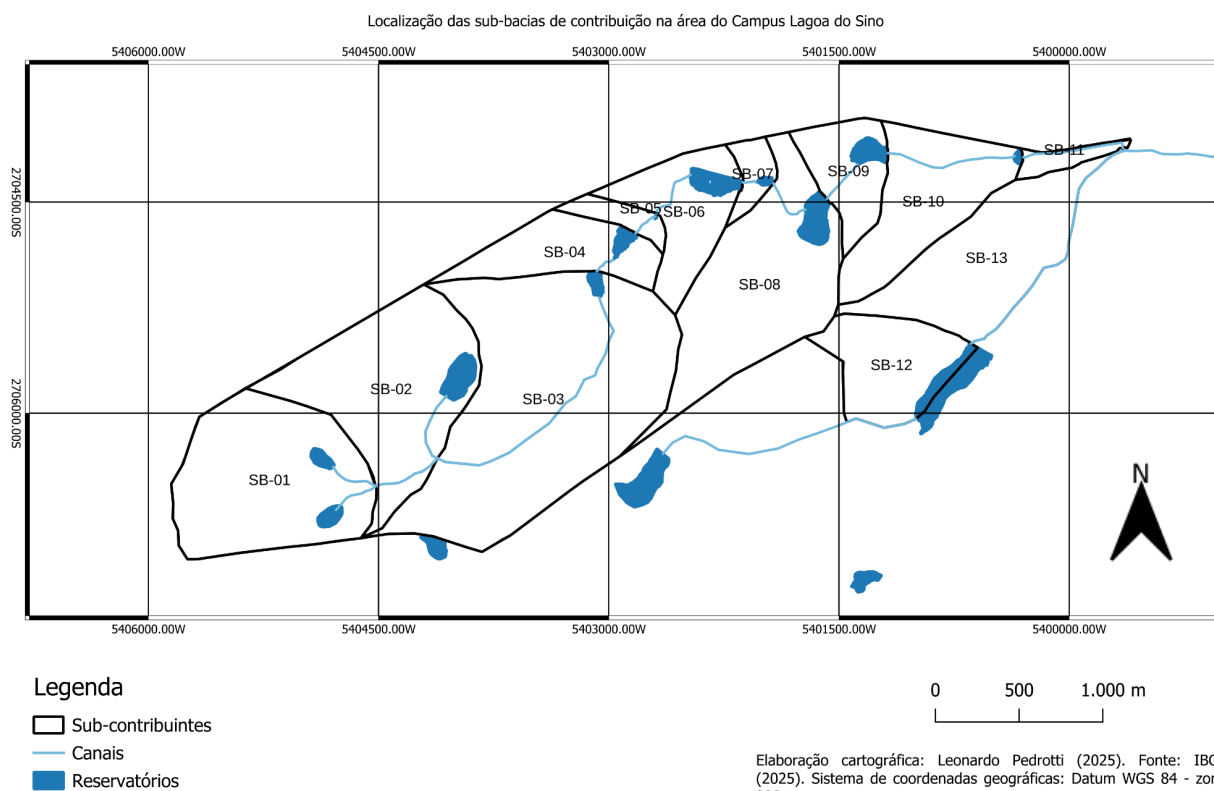
Figura 15 - Delimitação do Campus Lagoa do Sino da UFSCar em amarelo; Delimitação da Bacia de contribuição em preto; Reservatórios e trechos de água em azul.



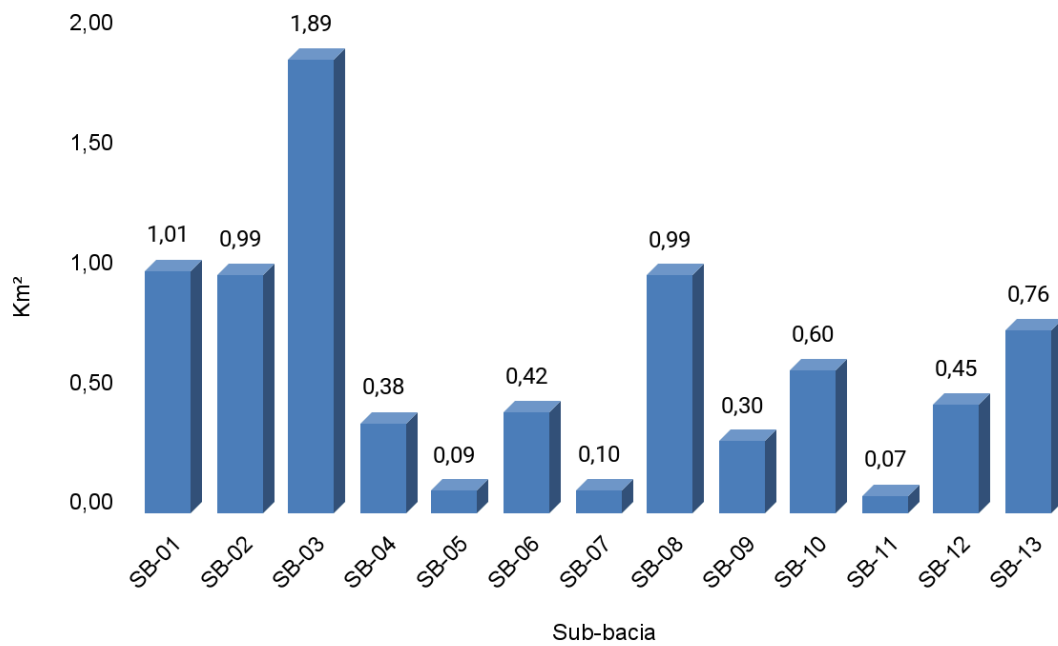
Fonte: Autoria Própria (2025).

Para a determinação das sub-bacias de contribuição, considerou-se como base a delimitação da bacia de contribuição com contorno em preto e para cada reservatório localizado dentro da bacia foi delimitado uma sub-bacia, como pode ser observado na figura 16 e também suas respectivas áreas em km² no gráfico 1.

Figura 16 - Localização das sub-bacias de contribuição em preto no Campus Lagoa do Sino da UFSCar.



Fonte: Autoria Própria (2025).

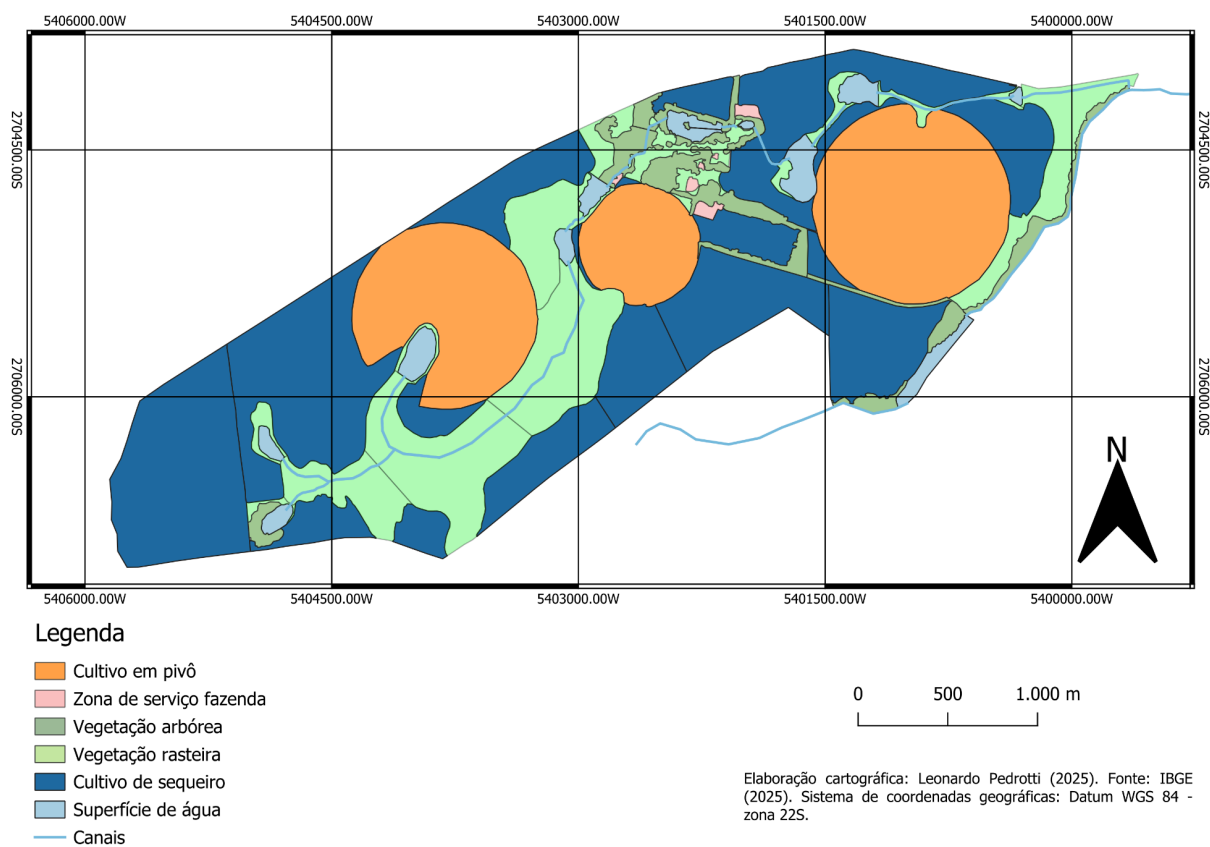
Gráfico 1 - Total de área em km² correspondente às sub-bacias

Fonte: Autoria própria (2025).

5.2. Delimitação do uso e ocupação do solo

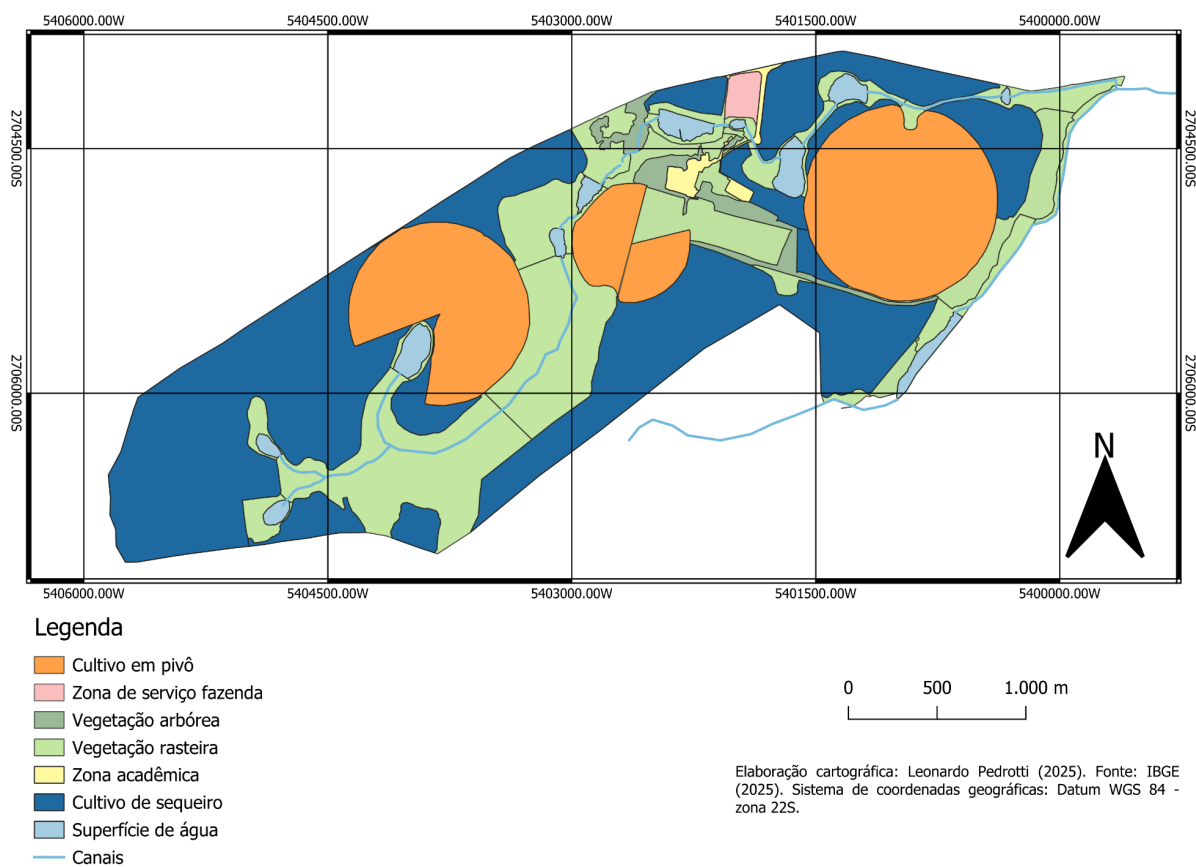
As delimitações correspondentes ao uso e ocupação do solo dos três cenários podem ser visualizadas nas figuras 17, 18 e 19, com as suas respectivas classificações de atributos nas legendas.

Figura 17 - Delimitação do uso e ocupação do solo de acordo com o cenário “passado”.



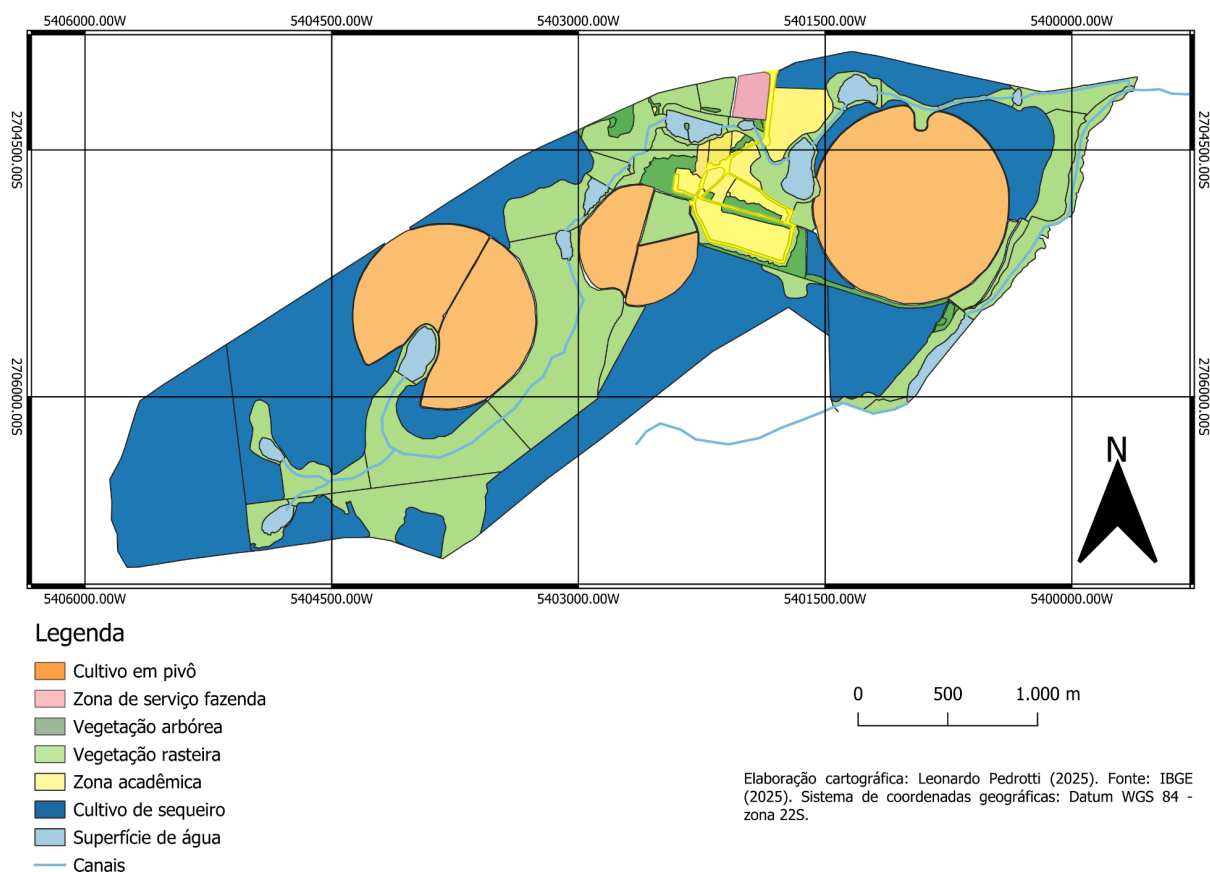
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 18 - Delimitação do uso e ocupação do solo de acordo com o cenário “Presente”.



Fonte: Autoria própria (2025).

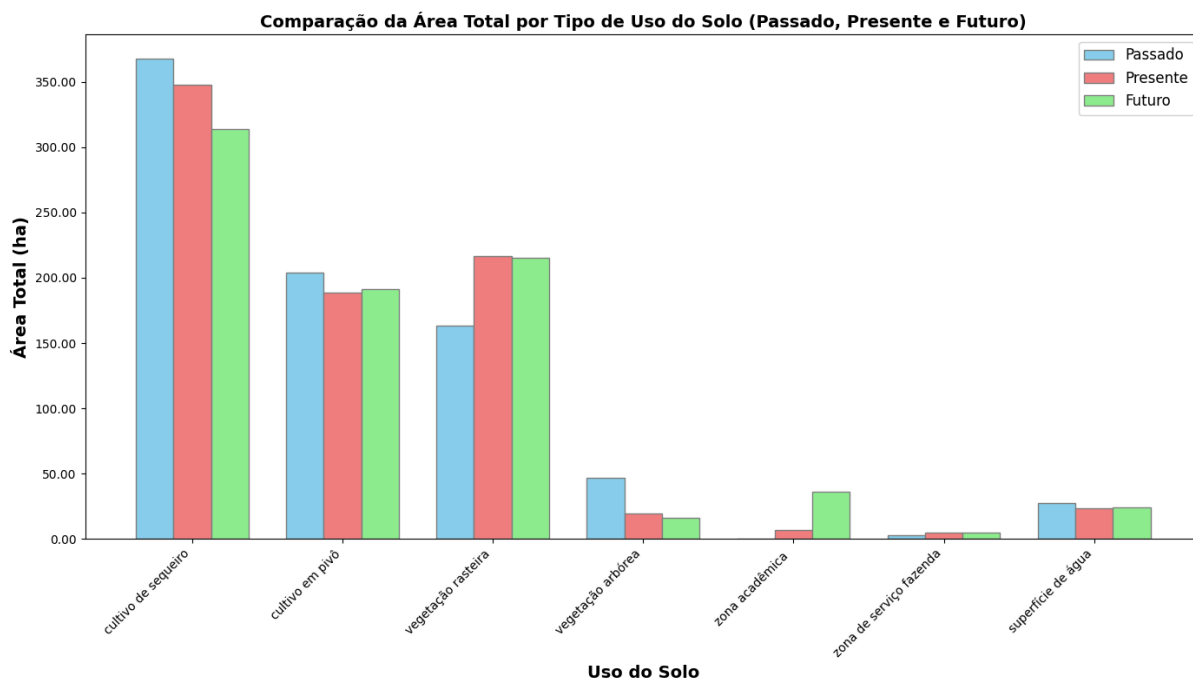
Figura 19 - Delimitação do uso e ocupação do solo de acordo com o cenário “Futuro”.



Fonte: Autoria Própria (2025).

Utilizando o ambiente de desenvolvimento integrado - IDE da Google (*Google Colab*), foi possível gerar um gráfico e uma tabela resumo no qual é possível visualizar as perdas e os ganhos de área para cada tipo de uso de solo dos três cenários de simulação, onde na figura 20 e na tabela 10 é possível visualizar todos os tipos de uso de solo.

Figura 20 - Comparação das perdas e ganhos de cada tipo de uso de solo dos três cenários de simulação em (ha).



Fonte: Autoria própria (2025).

Tabela 10 - Comparação das perdas e ganhos de cada tipo de uso de solo dos três cenários de simulação em (ha).

	Área (Hectares)						
	cultivo de sequeiro	cultivo em pivô	vegetação rasteira	vegetação arbórea	zona acadêmica	zona de serviço fazenda	superfície de água
Passado	367,84 →	204,25 →	163,24 →	46,89 →	0,0 →	2,71 →	27,17 →
Presente	348,0 ↓	188,54 ↓	216,6 ↑	19,19 ↓	6,71 ↑	4,63 ↑	23,51 ↓
Futuro	314,07 ↓	191,61 ↑	215,0 ↓	15,84 ↓	35,91 ↑	4,52 ↓	23,83 ↑

Fonte: Autoria Própria (2025).

5.3. Obtenção do solo correspondente a área e determinação do curve number

Através da busca no banco de dados do IBGE (2024), foi possível encontrar um arquivo “shapefile” que possui a classificação pedológica do estado de São Paulo, sendo esta correspondente ao solo “Latosolo vermelho”, onde através da imagem foi possível verificar uma predominância desse tipo de solo em toda a região de estudo. Com isto foi possível definir que o grupo hidrológico pertencente ao latossolo vermelho é o grupo A (IBGE, 2024), sendo que posteriormente ficou definido todas as classes padrão com o seu respectivo CN, como pode ser visto na tabela 11.

Tabela 11 - Classes padrão e seus respectivos valores de CN.

Classes padrão	CN Grupo A
cultivo de sequeiro	71
cultivo em pivô	64
vegetação rasteira	63
vegetação arbórea	55
zona acadêmica	73
zona de serviço fazenda	51
superfície de água	100

Fonte: Autoria própria (2024).

5.4. Determinação do *curve number* e abstração inicial para cada sub-bacia e cenário

Após determinado o grupo hidrológico do solo A para cada classe padrão, foi necessário determinar o CN médio ponderado e a abstração inicial (mm) para cada uma das treze sub-bacias para cada cenário, ou seja, “Passado”, “Presente” e “Futuro”. Estas informações podem ser visualizadas nas tabelas 12, 13 e 14:

Tabela 12 - Valores de CN médio ponderado e abstração inicial por sub-bacia para o cenário “Passado”.

Sub-bacia	Passado	
	CN médio	Abstração inicial (mm)
SB-01	70,89	20,86
SB-02	69,30	22,50
SB-03	65,60	26,64
SB-04	68,41	23,46
SB-05	66,57	25,52
SB-06	63,44	29,28
SB-07	63,88	28,72
SB-08	69,78	22,00
SB-09	71,07	20,68
SB-10	66,31	25,81
SB-11	63,82	28,81
SB-12	70,95	20,80
SB-13	64,20	28,33

Fonte: Autoria própria (2025).

Tabela 13 - Valores de CN médio ponderado e abstração inicial por sub-bacia para o cenário “Presente”.

Sub-bacia	Presente	
	CN médio	Abstração inicial (mm)
SB-01	70,80	20,95
SB-02	69,74	22,04
SB-03	65,35	26,93
SB-04	67,98	23,93
SB-05	67,05	24,96
SB-06	66,36	25,76
SB-07	63,68	28,98
SB-08	68,20	23,69
SB-09	70,65	21,11
SB-10	66,17	25,97
SB-11	64,28	28,23
SB-12	70,59	21,17
SB-13	64,92	27,45

Fonte: Autoria própria (2025).

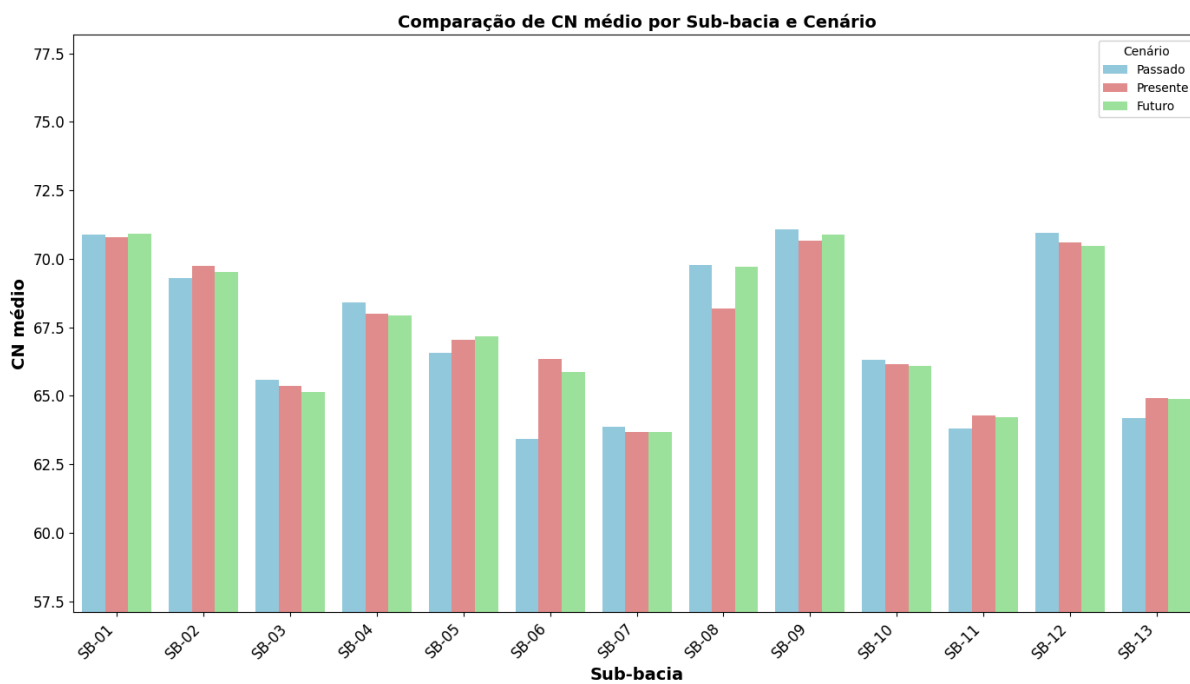
Tabela 14 - Valores de CN médio ponderado e abstração inicial por sub-bacia para o cenário “Futuro”.

Sub-bacia	Futuro	
	CN médio	Abstração inicial (mm)
SB-01	70,92	20,83
SB-02	69,53	22,26
SB-03	65,15	27,17
SB-04	67,94	23,98
SB-05	67,18	24,82
SB-06	65,86	26,34
SB-07	63,66	28,99
SB-08	69,70	22,09
SB-09	70,90	20,85
SB-10	66,09	26,06
SB-11	64,23	28,29
SB-12	70,48	21,28
SB-13	64,88	27,50

Fonte: Autoria própria (2025).

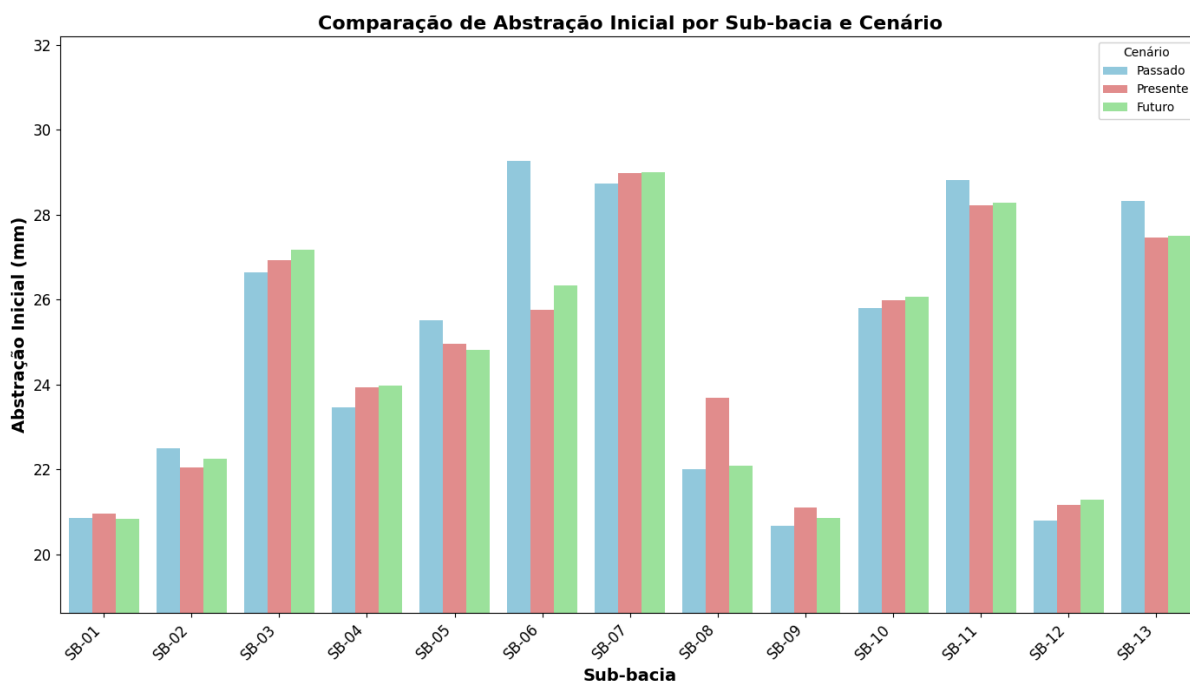
Nas figuras 21 e 22 é possível visualizar as médias de CN e as abstrações iniciais (mm) para os três cenários de simulação, onde o azul representa o cenário passado, o vermelho representa o cenário presente e o verde representa o cenário futuro. Nas sub-bacias 8 e 9, onde estão localizados a maior parte da infraestrutura do campus, é possível visualizar que ambas possuem um CN alto e uma abstração inicial baixa, característica de solos impermeáveis.

Figura 21 - Comparação dos CN médios por sub-bacias e cenários de simulação.



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 22 - Comparação das abstrações iniciais por sub-bacias e cenários de simulação.



Fonte: Autoria própria (2025).

5.5. Dados de modelagem correspondentes a cada sub-bacia

Os parâmetros de entrada necessários para realizar a modelagem podem ser visualizados na tabela 15.

Tabela 15 - Parâmetros de entrada para serem inseridos no software HEC-HMS.

Sub-bacia	Comprimento do rio principal (m)	Cota mont.(m)	Cota jusan. (m)	Declividade do rio principal (s) m/m	tc (Kirpich) (min)	Lag time (min)
SB-01	1343,00	696	658	0,0283	4,03	2,42
SB-02	1479,00	688	653	0,0237	4,65	2,79
SB-03	2523,00	671	638	0,0131	8,82	5,29
SB-04	1413,00	679	634	0,0318	4,01	2,40
SB-05	677,00	656	634	0,0325	2,26	1,35
SB-06	1022,00	649	633	0,0157	4,10	2,46
SB-07	475,00	648	632	0,0337	1,69	1,02
SB-08	2246,00	655	622	0,0147	7,71	4,63
SB-09	891,00	632	615	0,0191	3,42	2,05
SB-10	1624,00	640	596	0,0271	4,75	2,85
SB-11	740,00	605	587	0,0243	2,70	1,62
SB-12	1178,00	645	596	0,0416	3,14	1,89
SB-13	2361,00	641	587	0,0229	6,76	4,05

Fonte: Autoria própria (2025).

5.6. Hietograma de projeto

Considerando todas as sub-bacias presentes no campus Lagoa do Sino, os valores utilizados para o cálculo do tempo de concentração podem ser visualizados na tabela 16.

Tabela 16 - Parâmetros de comprimento, cota, declividade da bacia e tempo de concentração.

Comprimento rio principal (m)	Cota mont.	Cota jusan.	Declividade rio principal (s) (m/m)	tc Kirpich (min)
7556,00	696,00	587,00	0,0144	19,76

Fonte: Autoria própria (2025).

Para valor de precipitação em milímetros, este foi obtido conforme os resultados de tempo de concentração da bacia toda e a intensidade da chuva de projeto que corresponde a curva IDF do

município de Itararé - SP. Foi utilizado como critério próprio a definição de cinco minutos para o intervalo da chuva de projeto, devido ao tamanho da área de análise ser pequena em relação às práticas de projetos de hidrologia. Ambos os resultados podem ser visualizados nas tabelas 17 e 18.

Tabela 17 - Parâmetros utilizados para a chuva de projeto.

TR	25	anos
t=tc	20	min
i	2,54	mm/min
P	50,71	mm
Intervalos de chuva	5	min

Fonte: Autoria própria (2025).

Tabela 18 - valores para a lâmina precipitada da chuva de projeto a cada cinco minutos.

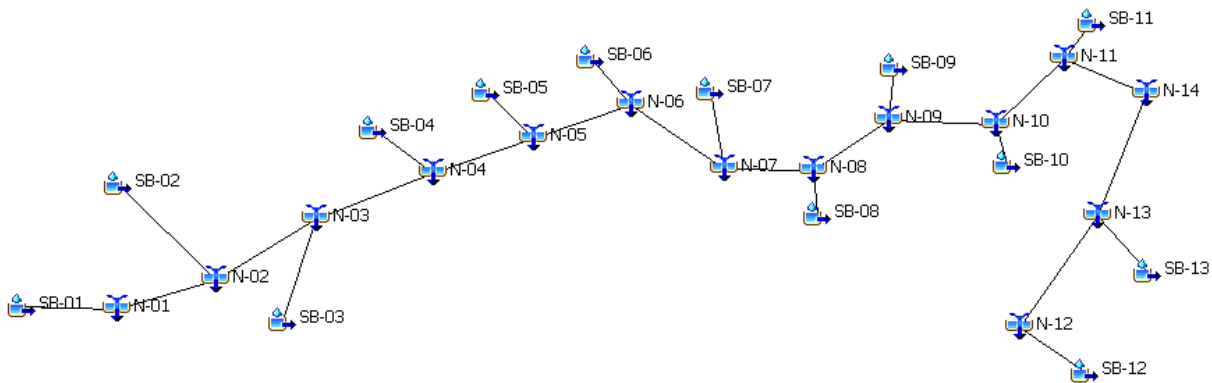
Tempo (min)	Tempo (h)	P (mm)
0	0,000	0
5	0,083	12,68
10	0,167	12,68
15	0,250	12,68
20	0,333	12,68

Fonte: Autoria própria (2025).

5.7. Modelagem hidrológica utilizando o software HEC-HMS

Inicialmente, através do software HEC-HMS, foi necessário caracterizar as sub-bacias e os nós de simulação conforme o arquivo “shapefile”, sendo que a caracterização corresponde aos três cenários de simulação, como pode ser visualizado na figura 23.

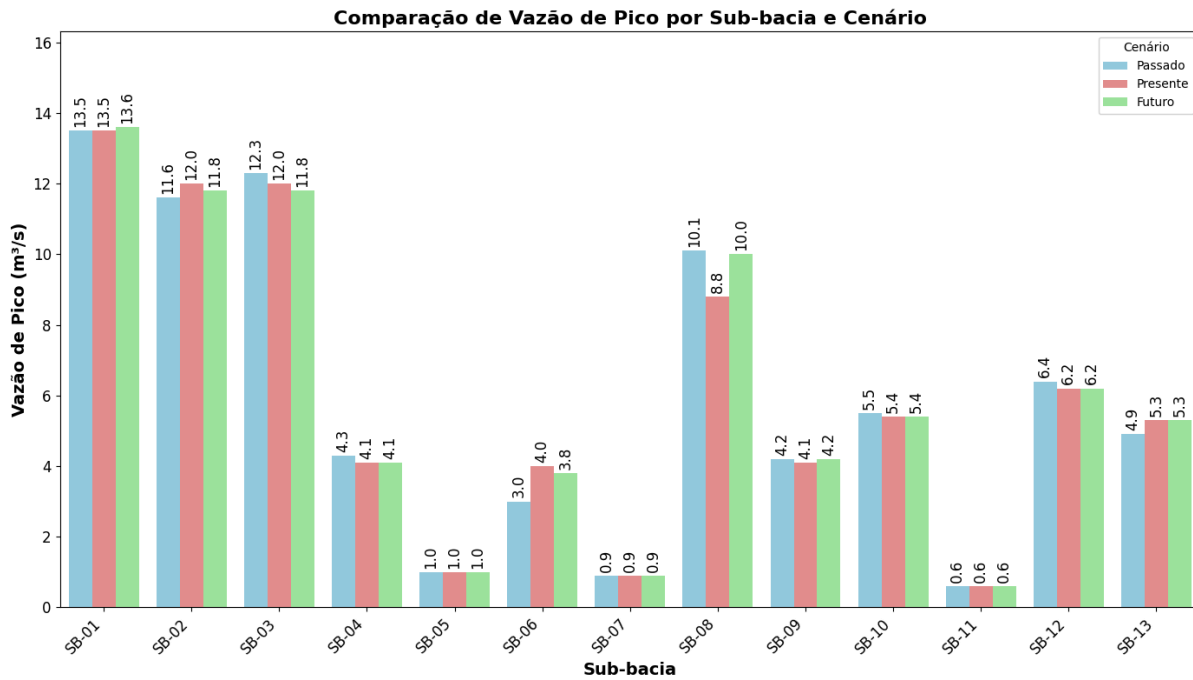
Figura 23 - Sub-bacias e nós de simulação.



Fonte: Autoria própria (2025).

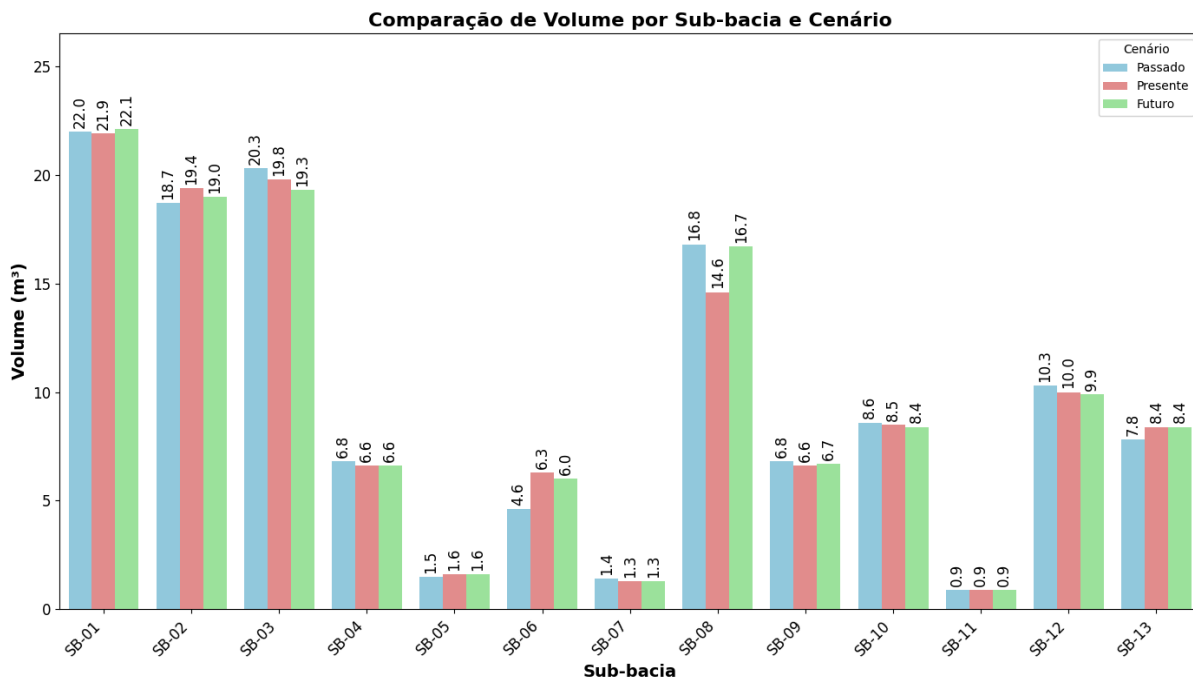
Na sequência foram inseridos os dados de entrada para a realização da modelagem hidrológica para o primeiro cenário, ou seja, o “passado”. Foi obtido um resultado de $75 \text{ m}^3/\text{s}$ para vazão de pico e um volume de $126,6 \text{ m}^3$ para o nó 14 (exutório da bacia), sendo estes dois resultados correspondentes a bacia toda. Posteriormente foi realizado para o cenário “presente”, onde foi obtido um valor de $74,6 \text{ m}^3/\text{s}$ para vazão de pico e $125,9 \text{ m}^3$ de volume para o nó 14. Por fim, para o cenário “futuro” foi obtido um valor de $75,3 \text{ m}^3/\text{s}$ para vazão de pico e $127,1 \text{ m}^3$ de volume correspondente ao nó 14. Nas figuras 24 e 25, é possível visualizar a vazão de pico e o volume escoado para cada sub-bacia nos três cenários de simulação.

Figura 24 - Comparação da vazão de pico para os três cenários de simulação.



Fonte: Autoria própria (2025).

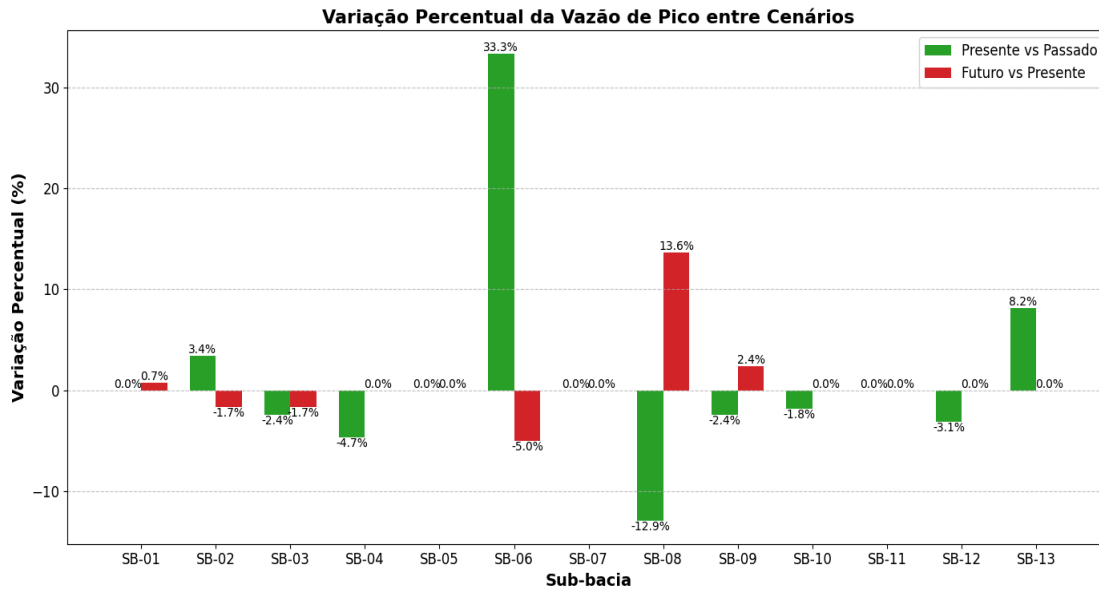
Figura 25 - Comparação do volume escoado para os três cenários de simulação.



Fonte: Autoria própria (2025).

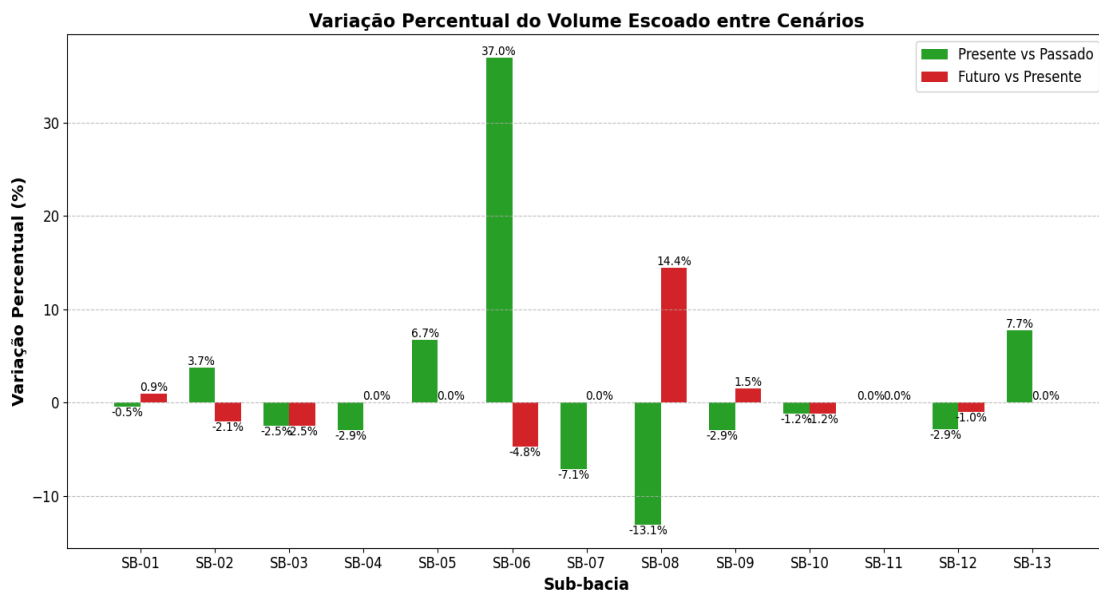
Nas figuras 26 e 27 é possível visualizar as variações percentuais de vazão de pico e volume escoado entre os cenários.

Figura 26 - Variação percentual de vazão de pico entre cenários



Fonte: Autoria própria (2025).

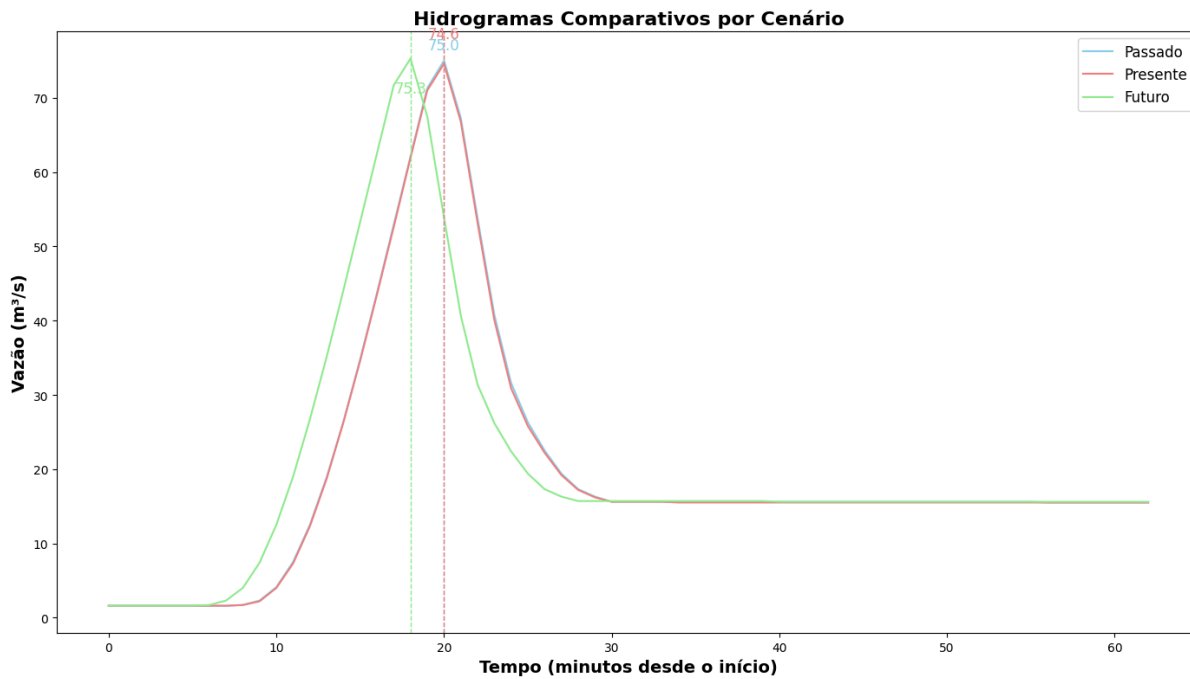
Figura 27 - Variação percentual de volume escoado entre cenários



Fonte: Autoria própria (2025).

Na figura 28 é possível visualizar os hidrogramas correspondentes aos cenários de simulação (passado, presente e futuro) para o exutório da bacia, sendo o cenário “futuro” com o maior valor de vazão entre os três cenários de simulação, onde seu adiantamento de pico é resultado das mudanças de solo na bacia toda, ou seja, o escoamento superficial atinge o ponto de exutório mais rápido em função aceleração do escoamento na superfície do solo na bacia.

Figura 28 - Hidrogramas correspondente a bacia toda para os três cenários de simulação.



Fonte: Autoria própria (2025).

Na tabela 19 é possível visualizar os valores de vazão de pico e volume escoado para os três cenários de simulação, onde ambos correspondem ao nó 14 da bacia.

Tabela 19 - Cenários com seus respectivos valores de vazão de pico e volume escoado.

Cenário	Nó	Vazão de pico (m ³ /s)	Volume (m ³)
Passado	N-14	75	126,6
Presente	N-14	74,6	125,9
Futuro	N-14	75,3	127,1

Fonte: Autoria própria (2025).

5.8. Alterações hidrológicas decorrentes das alterações dos usos do solo

Para uma maior compreensão dos resultados provenientes da modelagem hidrológica, no quadro 1 é possível visualizar os impactos decorrentes das mudanças de uso do solo nos diferentes cenários nas vazões e volume escoado nas sub-bacias.

Quadro 2 - Principais mudanças na vazão e volume em função da alteração do tipo de uso do solo (continua)

Sub-bacia	Tipo de ocupação no solo			Principais fatores de mudança
	Passado	Presente	Futuro	
SB-01	predominante cultivo de sequeiro (Qp = 13,5 m ³ /s; Vt = 22 m ³)	Predominante cultivo de sequeiro (Qp = 13,5 m ³ /s; Vt = 21,9 m ³)	Acréscimo de vegetação rasteira (Qp = 13,6 m ³ /s; Vt = 22,1 m ³)	Retirada de pouca vegetação arbórea -> aumento do volume escoado e da vazão de pico
SB-02	Predominante cultivo de sequeiro e pivô (Qp = 11,6 m ³ /s; Vt = 18,7 m ³)	Diminuição da área de pivô (maior vazão/volume) (Qp = 12 m ³ /s; Vt = 19,4 m ³)	Acréscimo da área de pivô (Qp = 11,8 m ³ /s; Vt = 19,0 m ³)	Redução da área de pivô no presente -> aumento de escoamento
SB-03	Menor área de pivô + vegetação rasteira (maior volume/vazão) (Qp = 12,3 m ³ /s; Vt = 20,3 m ³)	Aumento da área de pivô (não significativo) (Qp = 12 m ³ /s; Vt = 19,8 m ³)	Aumento da vegetação rasteira (significativo) (Qp = 11,8 m ³ /s; Vt = 19,3 m ³)	Cenário futuro com menor escoamento em relação a passado e presente devido a uma maior área de vegetação rasteira
SB-04	Maior área de superfície de água (maior volume/vazão) (Qp = 4,3 m ³ /s; Vt = 6,8 m ³)	Redução da área de água do reservatório (Qp = 4,1 m ³ /s; Vt = 6,6 m ³)	Redução da área de água do reservatório (Qp = 4,1 m ³ /s; Vt = 6,6 m ³)	Cenário passado possui maior área de reservatório -> maior escoamento e vazão
SB-05	Menor vegetação arbórea (Qp = 1,0 m ³ /s; Vt = 1,5 m ³)	Aumento da vegetação arbórea (maior volume/vazão) (Qp = 1,0 m ³ /s; Vt = 1,6 m ³)	Aumento da vegetação arbórea (maior volume/vazão) (Qp = 1,0 m ³ /s; Vt = 1,6 m ³)	O aumento de vegetação arbórea aumentou o escoamento no cenário presente e irá aumentar no cenário futuro
SB-06	Maior vegetação arbórea (menor volume/vazão) (Qp = 3,0 m ³ /s; Vt = 4,6 m ³)	Redução da área de pivô e vegetação arbórea (Qp = 4,0 m ³ /s; Vt = 6,3 m ³)	Aumento da vegetação rasteira (Qp = 3,8 m ³ /s; Vt = 6,0 m ³)	Cenário presente: mais escoamento pela retirada da vegetação; cenário futuro: redução do escoamento pela vegetação rasteira

Quadro 2 - Principais mudanças na vazão e volume em função da alteração do tipo de uso do solo (Continuação)

Sub-bacia	Tipo de ocupação no solo			Principais fatores de mudança
	Passado	Presente	Futuro	
SB-07	<p>Maior área de cultivo de sequeiro + vegetação rasteira (maior volume/vazão) (Qp = 0,9 m³/s; Vt = 1,4 m³)</p>	<p>Maior área de zona de serviço fazenda (Qp = 0,9 m³/s; Vt = 1,3 m³)</p>	<p>Redução de sequeiro e vegetação rasteira (Qp = 0,9 m³/s; Vt = 1,3 m³)</p>	<p>Redução das áreas de sequeiro e vegetação rasteira ocasionou a diminuição do escoamento no futuro</p>
SB-08	<p>Maior cultivo de sequeiro (maior volume/vazão) (Qp = 10,1 m³/s; Vt = 16,8 m³)</p>	<p>Menor cultivo de sequeiro (Qp = 8,8 m³/s; Vt = 14,6 m³)</p>	<p>Aumento da zona acadêmica (Qp = 10,0 m³/s; Vt = 16,7 m³)</p>	<p>Passado apresenta maior escoamento, entretanto futuro tem menor escoamento que passado</p>
SB-09	<p>Maior área de cultivo de sequeiro (Qp = 4,2 m³/s; Vt = 6,8 m³)</p>	<p>Redução da área de cultivo de sequeiro -> zona acadêmica (Qp = 4,1 m³/s; Vt = 6,6 m³)</p>	<p>Redução da área de cultivo de sequeiro -> zona acadêmica (Qp = 4,2 m³/s; Vt = 6,7 m³)</p>	<p>A alteração na área de cultivo de sequeiro em zona acadêmica reduziu o volume/vazão</p>
SB-10	<p>Maior área de cultivo de sequeiro (maior volume/vazão) (Qp = 5,5 m³/s; Vt = 8,6 m³)</p>	<p>Menor cultivo + vegetação rasteira (Qp = 5,4 m³/s; Vt = 8,5 m³)</p>	<p>Menor cultivo + vegetação rasteira (Qp = 5,4 m³/s; Vt = 8,4 m³)</p>	<p>Substituição da área de sequeiro por área de vegetação rasteira ocasionou redução do escoamento e vazão</p>
SB-11	<p>Cultivo de sequeiro (Qp = 0,6 m³/s; Vt = 0,9 m³)</p>	<p>Sem alterações significativas (Qp = 0,6 m³/s; Vt = 0,9 m³)</p>	<p>Pequeno aumento da área de vegetação rasteira (Qp = 0,6 m³/s; Vt = 0,9 m³)</p>	<p>Alterações não perceptíveis -> não houve mudanças expressivas de volume e vazão</p>
SB-12	<p>Maior área de cultivo de sequeiro (maior volume/vazão) (Qp = 6,4 m³/s; Vt = 10,3 m³)</p>	<p>Menor área de cultivo + vegetação rasteira (Qp = 6,2 m³/s; Vt = 10,0 m³)</p>	<p>Menor área de cultivo + vegetação rasteira (Qp = 6,2 m³/s; Vt = 9,9 m³)</p>	<p>Redução da área de cultivo de sequeiro ocasionou a uma diminuição do escoamento nos cenários presente e futuro</p>
SB-13	<p>Maior área de vegetação arbórea (menor volume/vazão) (Qp = 4,9 m³/s; Vt = 7,8 m³)</p>	<p>Aumento da área de cultivo de sequeiro e substituição por vegetação rasteira (Qp = 5,3 m³/s; Vt = 8,4 m³)</p>	<p>Aumento da área de cultivo de sequeiro e substituição por vegetação rasteira (Qp = 5,3 m³/s; Vt = 8,4 m³)</p>	<p>Alteração na área de vegetação arbórea por vegetação rasteira contribuiu para maior escoamento</p>

Fonte: Autoria própria (2025).

5.8.1. Observações gerais

De acordo com a modelagem hidrológica realizada nos três cenários temporais, foi verificado que o cenário passado tende a apresentar maiores valores de vazão e volume em algumas sub-bacias, sendo o fator principal dessa causa, as áreas de cultivo de sequeiro e menores áreas de vegetação arbórea. Além disso, de acordo com plano diretor, o cenário “futuro”, terá um pequeno acréscimo em sua vazão de pico se comparado com os cenários “passado” e “presente” para a bacia toda, sendo que parte dessa contribuição para o cenário futuro se deve as sub-bacias 01, onde parte de sua área de vegetação arbórea será substituída por vegetação rasteira e na sub-bacia 08, onde esta terá um acréscimo significativo de áreas construídas, ou seja zona acadêmica. As diferenças entre os cenários, podem ser pequenas com relação a vazão de pico e volume escoado, entretanto ressalta-se a importância dos resultados para as áreas onde estão localizados os edifícios acadêmicos (sub-bacias 6, 7 e 8).

Ressalta-se as limitações da modelagem, sendo que a variabilidade da característica do solo seguiu uma proposição de verificação em dados externos (IBGE, 2018), ou seja, como descrito nos estudos conduzido por Cunha *et al.* (2015), uma das principais críticas ao modelo SCS é a sua generalização no caso de bacias hidrográficas, desconsiderando as características particulares do solo. Entretanto, para o caso de uma bacia hidrográfica do campus Lagoa do Sino (porte pequeno), este fator é desconsiderado. O software HEC-HMS apesar de apresentar uma boa representação dos eventos simulados está propício a apresentar limitações assim como descrito em seu manual (HEC-HMS User's Manual, 2023), sendo que a simplificação de eventos complexos como a simulação de chuva e escoamento em eventos determinísticos podem não representar a realidade. Entretanto, para o caso da simulação da bacia hidrográfica da Lagoa do Sino, variáveis complexas como capacidade de infiltração do solo, outros tempos de retorno e variabilidade espaço-temporal da chuva foram desconsiderados na simulação.

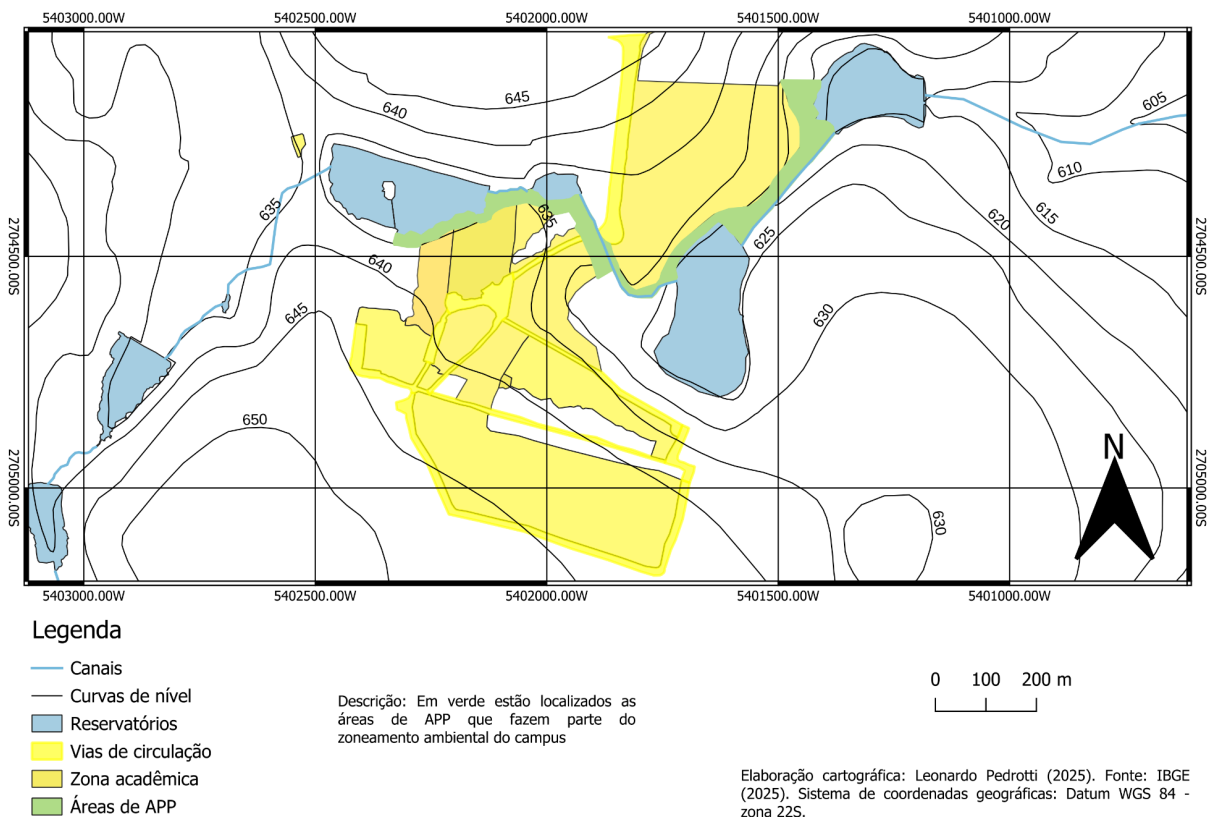
5.9. Zoneamento Ambiental e medidas de mitigação de impacto LID

5.9.1. Zoneamento Ambiental

Devido ao aumento gradual das áreas construídas nas sub-bacias 6, 7 e 8, pode-se inferir que ambas estão categorizadas como áreas críticas, ou seja, em decorrência do volume que será escoado nesses locais do campus no cenário futuro, medidas de mitigação de impacto surgem como uma alternativa. Uma medida encontrada para minimizar possíveis efeitos de alagamentos é a gestão da água pluvial e o zoneamento ambiental já incorporado ao Plano Diretor Físico-Ambiental do campus. Na figura 29 é possível visualizar em verde as áreas de APP que fazem parte da área de zoneamento ambiental, onde de acordo com Naghettini *et al.* (2007), os

sistemas hidrológicos podem ser impactados por eventos extremos, tais como tempestades, grandes cheias e secas. A magnitude de um evento extremo é inversamente relacionada a sua frequência de ocorrência, uma vez que os eventos muito severos ocorrem com menor frequência do que os mais moderados, sendo as áreas de APP uma importante zona de amortecimento de volume escoado.

Figura 29 - Localização das áreas construídas no cenário futuro nas sub-bacias 6, 7 e 8.



Fonte: Autoria própria (2025).

5.9.2. Compensação do impacto no escoamento pluvial

Como mencionado por Maryland (1999), uma infraestrutura verde pode compensar o impacto gerado pelo escoamento superficial em um projeto hidrológico funcional, onde medidas de prevenção podem ser adotadas através de técnicas de controle de escoamento no campus, ou seja, o escoamento superficial de áreas impermeabilizadas pode ser direcionado para áreas permeáveis. Uma possível alternativa para as vias de circulação dentro do Campus é a implementação de pavimentos permeáveis, sendo que este pavimento pode ser introduzido nas vias de circulação do campus a fim de gerar uma maior infiltração do volume escoado. Como

mencionado anteriormente nos estudos conduzidos por (Araújo *et al*, 2000), uma das alternativas de tipo de pavimento permeável é o concreto poroso ou bloco vazado, onde estes podem apresentar um coeficiente de escoamento superficial menor em relação a solos compactados ou totalmente impermeáveis, como o asfalto. Na figura 30 é possível visualizar o atual tipo de pavimento (Piso 16 faces) de circulação nas vias no interior do campus.

Figura 30 - Imagem da principal entrada de acesso ao campus, com o piso de 16 faces sendo predominante nas vias de circulação do campus



Fonte: Proace (2025).

Em comparação com pavimentos totalmente impermeáveis, o atual pavimento do campus, exibido na imagem acima, apresenta melhores condições de infiltração do volume. No entanto, o concreto poroso ou o bloco vazado são recomendados para melhores condições de escoamento, como mencionado nos estudos conduzidos por Araújo *et al.* (2000), com a sua eficiência podendo ser comprometida pela saturação do solo em virtude do tempo de chuva. Entretanto, como mencionado no estudo conduzido por Maryland (1999) o LID pode oferecer diversos tipos de práticas de mitigação, como valas gramadas ou trincheiras de infiltração que podem ser posicionadas nas laterais das vias de circulação. E estruturas como os poços secos para o controle e a captação de escoamento de estruturas e edificações do campus. Os distribuidores de nível

podem ser posicionados em zonas de cultivo que apresentem uma diferença de cota que propicie o escoamento superficial com o objetivo de beneficiar o plantio. Entretanto, eventuais diagnósticos das áreas de implementação devem ser analisados com o objetivo de obter conhecimento da capacidade de infiltração do solo e a sua declividade. Na tabela 20 é possível visualizar onde tais estruturas podem ser construídas no campus Lagoa do Sino.

Tabela 20 - Tipos de alternativas e locais propícios para serem construídos no campus Lagoa do Sino.

Tipos de alternativas para compensação de impacto de escoamento pluvial	Locais no campus onde as estruturas podem ser alocadas
Pavimentos permeáveis	Em todas as vias de circulação de veículos.
Valas gramadas	No centro da via de circulação de veículos que compreende entre a entrada do campus Lagoa do Sino seguindo até o final da primeira rotatória.
Trincheira de infiltração	Na lateral da via de circulação de veículos que compreende entre a entrada do campus Lagoa do Sino seguindo até o final da primeira rotatória e em todas as laterais de vias de circulação.
Poços secos	Em todas as edificações do campus Lagoa do Sino, com destaque para os ciclos básicos.
Distribuidores de nível	Zonas de cultivo que apresentam um declive, sendo áreas correspondentes sub-bacias 1, 2, 3, 9, 10 e 13.

Fonte: Autoria própria (2025).

6. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos através da modelagem hidrológica para os cenários “passado”, “presente” e “futuro” revelaram que o cenário futuro terá um pequeno aumento de sua vazão e volume escoado. Entretanto, o resultado não é significativo ao ser comparado com os outros cenários. Ou seja, a total implementação do Campus Lagoa do Sino da UFSCar terá uma maior área de construções e pavimentações, sendo este um grande contribuidor para o escoamento superficial, porém tal medida será “amortecida” pela ampliação das áreas de APP, também propostas para o plano diretor do Campus. É importante destacar que houve uma diminuição na vazão e volume escoado entre os cenários “passado” e “presente”, tal acontecimento se deve pelo fato da implementação das áreas de APP dentro do campus, visto que para o cenário “passado” as áreas de APP estavam menores e totalmente fragmentadas. Estes resultados demonstram o potencial de aplicação de LID para mitigação dos impactos da urbanização.

Ao eventual acréscimo de volume escoado na bacia toda, é possível propor medidas de mitigação de impacto, ou seja, algumas áreas da bacia, sendo elas as sub-bacias 6, 7 e 8 onde estão localizadas as áreas de construção do campus podem adotar medidas de zoneamento a fim de evitar perdas materiais, sendo uma proposta de mitigação para minimizar o impacto hidrológico da implantação total do campus o LID.

Apesar da relevância dos resultados, a análise apresenta algumas limitações em relação à metodologia, sendo que primeiramente o estudo se baseou em dados secundários (IBGE) para a definição do curve number, sendo que estes dados poderiam ser extraídos em campo, tornando os parâmetros mais robustos. A utilização do software HEC-HMS, apesar de ser amplamente utilizado e aceito, apresenta simplificações que podem subestimar a complexidade dos processos hidrológicos. Os reservatórios do campus não foram modelados, visto que o modelo avalia apenas cenários comparativos, ou seja, apesar dos reservatórios serem importantes devido a regulação de vazões e a sua retirada de água para a irrigação, o modelo segue o princípio fundamental do balanço hídrico.

Embora os resultados apresentem pouca variação de vazão e volume escoado na bacia toda, as áreas mais sensíveis a estas variações de vazão, como as sub-bacias (6, 7 e 8) podem adotar medidas de mitigação de impacto como soluções baseadas em LID. Assim, a análise evidencia a importância de um planejamento integrado de expansão da infraestrutura do Campus Lagoa do Sino da UFSCar.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, R. P.; et al. Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução de escoamento superficial. RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Vol 5, nº3. Jul/Set 2000, 21-29. Porto Alegre - RS. 2000. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/232484/000277295.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 16 set. 2025.

BOUCHER, M. A.; TREMBLAY, D.; DELORME, Luc. Hydro-economic assessment of hydrological forecasting systems. Journal of Hydrology, Amsterdam, v. 416-417, p. 133-144, jan. 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169411008274>. Acesso em: 16 set. 2025.

CBH ALPA. Relatório de situação dos recursos hídricos das bacias hidrográficas do Estado de São Paulo. Unidade de gerenciamento de recursos hídricos - Alto Paranapanema - UGRHI - 14. 2023 - Ano Base 2022. Piraju - SP. Disponível em: https://cbhalpa.org/wp-content/uploads/2023/11/RS_2023_ab_2022_UGRHI_14_v2.pdf#page=20.57. Acesso em: 24 nov. 2025.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO PARANAPANEMA - CBH-ALPA. Apresentação. São Paulo: CBH-ALPA, [s.d.]. Disponível em: <https://sigrh.sp.gov.br/cbhalpa/apresentacao>. Acesso em: 16 set. 2025.

CUNHA, A. Z *et al.* Aplicabilidade do método número da curva (CN/SCS) com base em valores de CN tabelados: estudo de caso na bacia hidrográfica do Arroio Cadeia. Associação Brasileira de Recursos Hídricos. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Florianópolis - SC. 2017. Disponível em: <https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/60/PAP022838.pdf>. Acesso em: 16 set. 2025.

CUNHA, S. F; SILVA, F. E. O; MOTA, T. U.; PINHEIRO, M. C. Avaliação da acurácia dos métodos do SCS para cálculo da precipitação efetiva e hidrogramas de cheia. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v. 20, nº4, p. 837-848, out./dez. 2015. ISSN 2318-0331. Disponível em:

https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/156/3b19fed36cf52712e217179a3483b424_fdcc62cf56145d1962c8b009e5280268.pdf. Acesso em: 16 set. 2025.

GUMINDOGA, W.; Rientjes, T.; Shekede, M.D.; Rwasoka, D.T.; Nhapi, I.; Haile, A.T. Hydrological Impacts of Urbanization of Two Catchments in Harare, Zimbabwe. *Remote Sens.* **2014**, *6*, 12544-12574. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs61212544>. Acesso em: 16 set. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Mapas pedológicos na escala 1:250.000. Rio de Janeiro: IBGE, [s.d]. Disponível em: https://geofp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/pedologia/mapas/escala_250_mil/. Acesso em: 16 set. 2025.

INSTITUTO FLORESTAL. Floresta Estadual de Paranapanema: Ficha resumo de área protegida. São Paulo: Instituto Florestal, 2018. Disponível em: <https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/institutoflorestal/wp-content/uploads/sites/234/2018/09/F-Paranapanema.pdf>. Acesso em: 16 set. 2025.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. Relatório síntese. Genebra: IPCC, 2023. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc/arquivos/pdf/copy_of_IPCC_Longer_Report_2023_Portugues.pdf#page=20.06. Acesso em: 16 set. 2025.

NASCIMENTO, A. F; SALIBA, A; TOMÉ, F; SILVA, F; DINIZ, M; SOUSA, G; ALVES, C. O método do soil conservation service revisitado: verificação de validade de premissas e aplicabilidade em projetos de mineração. XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Disponível em: https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/153/41a35e0193cf0a17013e1022e3f33a46_09333fe68c700bcbd4da102533bf72bd.pdf#page=1.00&gsr=0. Acesso em: 24 nov. 2025.

NAGHETTINI, M; PINTO, A. J. É. Hidrologia Estatística. Serviço geológico do Brasil. Ago. 2007.

MILLER, J. D; KIM, H; KJELDSSEN, R. T; PACKMAN, J. GREBBY, S. DEARDEN, R. Avaliação do impacto da urbanização no escoamento superficial em uma bacia hidrográfica periurbana, utilizando a variação histórica da cobertura impermeável. Revista de hidrologia. Vº 515, 16 jul. 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169414002856>. Acesso em: 24 nov. 2025.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA; IPCC (via observatório do clima). IPCC AR6 WG1: Resumo comentado - Principais conclusões. São Paulo: Observatório do Clima; CEMADEN, 2021. Disponível em: https://www.oc.eco.br/wp-content/uploads/2021/08/OC-IPCC-AR6-FACTSHEET_FINAL.pdf. Acesso em: 16 set. 2025.

PICKBRENNER, K. PINTO, E. J. A. Atlas Pluviométrico do Brasil: Equações Intensidade-Duração-Frequência: estação pluviográfica Itararé; códigos 02449002 (ANA) e F6-004R (DAEE), município Itararé, SP. Porto Alegre: Serviço Geológico do Brasil - CPRM, 2023. Programa de gestão de riscos e de desastres. Disponível em: https://rigeo.sgb.gov.br/bitstream/doc/24515/1/itarare_sp_relatorio_idf_2023.pdf. Acesso em: 16 set. 2025.

PLANO DIRETOR FÍSICO-AMBIENTAL CAMPUS LAGOA DO SINO. 2019. UFSCAR. Disponível em: <https://www.soc.ufscar.br/coad/2019/arquivos/pauta-da-52-reuniao-ordinaria-do-coad-04-10-2019/plano-diretor-fisico-ambiental-campus-lagoado-sino.pdf>. Acesso em: 16 set. 2025.

PRINCE GEORGE'S COUNTY, Maryland. Low-Impact Development: An Integrated Environmental Design Approach. Largo, MD: Prince George's County Department of Environmental Resources, 1999. Disponível em: https://www.princegeorgescountymd.gov/sites/default/files/media-document/dcv86_low-impact-development-design-strategies-pdf.pdf#page=63.99. Acesso em: 16 set. 2025.

ROCHA, L. F; PORTO, A. A; AGUILAR, T. S. D; SERRANO, P. O. R. Modelagem utilizando HEC HMS: Estudo Hidrológico da Bacia do Igarapé São Francisco - Rio Branco - AC. Congresso técnico-científico da engenharia e da agronomia. 2024. CONTECC. Rio Branco - AC. Disponível em:

https://www.confea.org.br/midias/uploads-imce/contecc%202024/EXP/MODELAGEM_UTILIZANDO_O_HEC_HMS__ESTUDO_HIDROL%C3%93GICO_DA_BACIA_DO_IGARAP%C3%89_S%C3%83O_FRANCISCO_EM_RIO_BRANCO-AC.pdf. Acesso em: 16 set. 2025.

SOUZA, S. N. & SOUZA, J. W. & CARDOSO, S. M. J. 2017. Caracterização hidrológica e influência da cobertura do solo nos parâmetros de vazão do Rio das Fêmeas. Engenharia Sanitária e Ambiental, V.22, nº3. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/jKBdnLybP3rCWK7rdfmftPy/?lang=pt>. Acesso em: 16 set. 2025.

SUDERHSA. Manual de drenagem urbana. Região metropolitana de Curitiba - PR. Versão 1.0 - Dezembro/2002. Disponível em: https://www.iat.pr.gov.br/sites/agua-terra/arquivos_restritos/files/documento/2020-07/mdu_versao_01.pdf. Acesso em: 24 nov. 2025.

TUCCI, C. E. M. Hidrologia: Ciência e Aplicação. 2. ed. Porto Alegre: ABRH, 2001.

THE GOVERNANCE OF LAND USE - Policy Highlights, OCDE, 2017. Disponível em: <https://www.oecd.org/cfe/regionaldevelopment/governance-of-land-use-policy-highlights.pdf>. Acesso em: 16 set. 2025.

UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. HEC-HMS: User's Manual, version 4.11. US Army Corps of Engineers, 18 out. 2023. Disponível em: https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS_User%27s_Manual-v4.11-20231018.pdf. Acesso em: 16 set. 2025.

WINKLER, K. & FUCHS, R. & ROUNSEVELL, M. & HEROLD, M. 2021. Global land use changes are four times greater than previously estimated. Nature communications. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41467-021-22702-2.pdf>. Acesso em: 16 set. 2025.