U.PORTO

FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

# MODELAÇÃO E CALIBRAÇÃO DE REDES DE ÁGUAS RESIDUAIS EM CONDIÇÕES DE AFLUÊNCIAS INDEVIDAS

## Caso das Redes de Drenagem de São Lourenço de Selho e Gominhães

**RAFAEL FERREIRA MENDES**

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO HIDRÁULICA, RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTE**

Orientador: Professor Doutor José Carlos Tentúgal Valente

JULHO 2026

**MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2025/2026**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E GEORRECURSOS

Tel. +351-22-508 1901

✉ m.ec@fe.up.pt

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

✉ feup@fe.up.pt

http://www.fe.up.pt

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado em Engenharia Civil - 2025/2026 - Departamento de Engenharia Civil e Georrecursos, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2026*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

À minha família

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Professor Doutor José Carlos Tentúgal Valente, por todo o apoio, paciência, empatia e motivação que sempre transmitiu. Agradeço-lhe todo o acompanhamento e a total disponibilidade nas diversas fases do trabalho.

A todos os amigos que a vida académica me trouxe e que levo comigo para o resto da vida, por nunca terem deixado de me apoiar e motivar e por todos os momentos que vivemos em conjunto ao longo deste percurso. Fizeram da minha passagem pela faculdade uma experiência que me fez crescer muito enquanto pessoa.

À minha namorada, Catarina, por me motivar e nunca me deixar desistir, mesmo nos dias de muito cansaço após o trabalho. A sua resiliência e energia positiva foram cruciais e o seu apoio foi infindável.

E, por fim, mas não menos importante, à minha família. Em primeiro lugar, ao meu irmão, Bruno Miguel Ferreira Mendes, por me ter apresentado a possibilidade de implementação de Python e de automatização de processos, que moldaram profundamente o caminho deste trabalho, abdicando de muito do seu tempo livre para me ensinar uma ferramenta que utilizei tanto nesta dissertação como em vários processos do meu dia a dia laboral. Em segundo lugar, aos meus pais, pela confiança, pelo investimento e pelo sacrifício de muitos anos, para que pudesse ter a possibilidade de me formar academicamente, bem como por todos os valores de resiliência e luta que sempre me transmitiram.

## RESUMO

Os sistemas de drenagem de águas residuais são frequentemente afetados por afluências indevidas que sobrecarregam os coletores das redes de drenagem e as estações de tratamento, agravando os custos de exploração e que comprometem tanto a durabilidade como o desempenho ambiental dos sistemas. A sua quantificação é crucial para as entidades gestoras, mas é dificultada pelo seu carácter dinâmico e sazonal e pela sobreposição das suas várias componentes no caudal medido.

A presente dissertação tem como objetivo o desenvolvimento e a calibração de um modelo hidráulico em SWMM - *Storm Water Management Model*, usando o Python como base de automatização, capaz de reproduzir o comportamento real de uma rede de drenagem de águas residuais em condições de afluências indevidas. O caso de estudo corresponde a uma sub-bacia da freguesia de São Lourenço de Selho e Gominhães, no concelho de Guimarães num período entre os dias 2 e 13 de dezembro de 2019.

A estratégia adotada englobou a construção do modelo físico a partir dos dados relativos à infraestrutura existente, a calibração do caudal de tempo seco e do respetivo padrão de consumo da rede e, posteriormente, a calibração dos parâmetros de resposta à precipitação (RDII) através do algoritmo de otimização global SCE-UA. Todo o processo foi automatizado numa série de scripts, assentes nas bibliotecas PySWMM e SPOTPY, assegurando a reprodutibilidade das calibrações e permite a comparação de várias funções objetivo, complementadas por métricas de avaliação de desempenho. A cadeia de calibração automática desenvolvida constitui um método replicável, reduzindo drasticamente o esforço de calibração e fornece uma base necessária para a quantificação global das afluências indevidas na bacia em estudo. Tendo essa quantificação, contudo, não foi realizada no âmbito do presente trabalho.

**PALAVRAS-CHAVE:** Afluências Indevidas, Modelação Hidráulica, SWMM, Automatização, PySWMM

## ABSTRACT

Wastewater drainage systems are frequently affected by inflow and infiltration events, which overload sewers and treatment plants, increasing operating costs and compromising the environmental performance of the drainage system. Diagnosing inflow and infiltration is a must for the managing companies but it still remains hindered by its dynamic and seasonal nature and by the overlapping of its components in the real measured flow.

This dissertation aims to develop and calibrate a hydraulic model in SWMM, automated using Python, capable of reproducing the real behavior of the sewer drainage system under inflow and infiltration conditions. This case study is a sub-catchment in the São Lourenço de Selho e Gominães parish within the municipality of Guimarães regarding a period between the 2nd and 13th of December 2019.

The adopted strategy included the construction of the physical model of the drainage network from the existing one, the calibration of the dry weather flow and the network daily consumption pattern and, subsequently, the calibration of the rainfall derived inflow and infiltration (RDII) response parameters, using the SCE-UA global optimization algorithm. The entire process was automated using several scripts, based on Python libraries PySWMM and SPOTPY, ensuring the reproducibility of the calibrations, allowing the comparison of several objective functions and evaluation metrics. This automated calibration process is a replicable method that drastically reduces the calibration time and effort while providing the necessary basis for a global quantification of inflow and infiltration in the study catchment, although this quantification wasn't carried out within the scope of the present work.

**KEYWORDS:** Inflow and Infiltration, Hydraulic Modelling, SWMM, Automation, PySWMM.

## ÍNDICE GERAL

**AGRADECIMENTOS** ..... I

**RESUMO** ..... III

**ABSTRACT** ..... V

**1 INTRODUÇÃO** ..... 1

**1.1 ENQUADRAMENTO E MOTIVAÇÃO** ..... 1

**1.2 OBJETIVOS** ..... 3

**1.3 METODOLOGIA** ..... 3

**1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO** ..... 5

**2 SISTEMAS DE DRENAGEM URBANA, AFLUÊNCIAS INDEVIDAS E PROBLEMÁTICAS ASSOCIADAS** ..... 7

**2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS** ..... 7

**2.2 COMPOSIÇÃO DOS SISTEMAS DE DRENAGEM** ..... 9

**2.3 ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS (ETAR)** ..... 11

**2.4 PRINCIPAIS PROBLEMÁTICAS A RESOLVER NOS SISTEMAS DE DRENAGEM DE ÁGUAS RESIDUAIS URBANAS** ..... 12

**2.5 AFLUÊNCIAS INDEVIDAS EM SISTEMAS DE DRENAGEM URBANA** ..... 13

2.5.1 Tipos e origens de Afluências Indevidas ..... 14

*2.5.1.1 Afluências Indevidas diretas* ..... *15*

*2.5.1.2 Afluências Indevidas indiretas* ..... *16*

2.5.2 Consequências das Afluências Indevidas ..... 17

2.5.3 Quantificação de Afluências indevidas ..... 18

*2.5.3.1 Fase de projeto* ..... *18*

*2.5.3.2 Fase de exploração* ..... *19*

*2.5.3.3 Método RTK* ..... *19*

# 3 MODELAÇÃO HIDRÁULICA DE UMA REDE DE DRENAGEM ..... 23

## 3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS ..... 23

## 3.2 CONSTRUÇÃO DE UM MODELO HIDRÁULICO ..... 24

3.2.1 *Storm Water Management Model (SWMM)* ..... 25

## 3.3 PYTHON E O SWMM ..... 27

## 3.4 FUNÇÕES OBJETIVO ..... 28

3.4.1 Coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) ..... 28

3.4.2 Coeficiente NSE logarítmico (logNSE) ..... 29

3.4.3 Coeficiente de Determinação $R^2$ ..... 31

3.4.4 Raiz do erro quadrático médio (RMSE) ..... 30

3.4.5 Erro percentual de volume (PBIAS) ..... 31

3.4.6 Coeficiente de eficiência de Kling-Gupta (KGE) ..... **Erro! Marcador não definido.**

3.4.7 Síntese das funções objetivo ..... 32

## 3.5 ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO: SHUFFLED COMPLEX EVOLUTION – UNIVERSITY OF ARIZONA ..... 33

# 4 CASO DE ESTUDO ..... 39

## 4.1 INTRODUÇÃO ..... 39

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO DE ÁREA DE ESTUDO ..... 39

4.2.1 Enquadramento Geográfico ..... 39

4.2.2 Caracterização Hipsométrica ..... 41

4.2.3 Pluviosidade ..... 43

4.2.4 Uso e Ocupação do Solo ..... 45

4.2.5 Contexto Histórico de Degradação Ambiental e de Inundações no Rio Selho ..... 47

## 4.3 INFRAESTRUTURA DE DRENAGEM ..... 50

## 4.4 MONITORIZAÇÃO E OBTENÇÃO DE DADOS ..... 51

4.4.1 Dados de Caudal e Precipitação ..... 51

4.4.2 Tratamento de Edição de Dados ..... 53

**4.5 IMPLEMENTAÇÃO DA CALIBRAÇÃO DO SWMM ..... 54**
4.5.1 Calibração de parâmetros em tempo seco (DWF – Dry Weather Flow).....54
4.5.2 Parâmetros da sub-bacia e do RDII .....56
*4.5.2.1 Intervalos de calibração .....57*
*4.5.2.2 Algoritmo de otimização e funções objetivo .....58*
4.5.3 Resultados da calibração e comparação entre as funções objetivo.....60

**5 ANÁLISE E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....70**

**ANEXOS .....2**

**A.1 DADOS DA INFRAESTRUTURA DE DRENAGEM DE ÁGUAS RESIDUAIS EXISTENTE..... 4**

**A.2 DADOS RELATIVOS À PRECIPITAÇÃO E CAUDAL OBSERVADO (02/12/2019 A 13/12/2019) ..... 1**

**A.3 RESULTADOS DAS DIVERSAS CALIBRAÇÕES ..... 1**

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema simplificado de sistemas de drenagem unitários e separativos (EPA). ..... 8
Figura 2: Representação simplificada das afluências indevidas diretas, adaptado de (Kesik 2015). .. 16
Figura 3: Representação simplificada das afluências indevidas, adaptado (Kesik 2015). ..... 16
Figura 4: Soma de três hidrogramas unitários e respetivos parâmetros R, T e K (Vallabhaneni, C. Chan e H. Burgess 2007). ..... 21
Figura 5: Soma dos hidrogramas RDII, associados a três precipitações diferentes, P1, P2 e P3 (Vallabhaneni, C. Chan e H. Burgess 2007). ..... 21
Figura 6: Rio Ave – Bacia Hidrográfica ..... 40
Figura 7: Enquadramento geográfico entre a área de drenagem em estudo (5SELP3) e a Bacia de Drenagem do Selho. ..... 41
Figura 8: Hipsometria e Perfil Longitudinal do Rio Selho. ..... 42
Figura 9: Pluviosidade média anual no Município de Guimarães (worldclim.org 2020) ..... 43
Figura 10: Precipitação média mensal no Município de Guimarães. ..... 44
Figura 11: Normais Climatológicas - Estação Merelim Braga (2001-2020) (Instituto Português do mar e da Atmosfera 2026). ..... 45
Figura 12: Ocupação do Solo, Bacia de Drenagem 5SELP3 (Direção-Geral do Território 2019). ..... 46
Figura 13: Áreas Impermeáveis dentro da Bacia de Drenagem 5SELP (European Environment Agency. 2022). ..... 47
Figura 14 : Infraestrutura de drenagem da Bacia de Drenagem 5SELP3 ..... 51
Figura 15: Localização do medidor instalado no Ponto de Entrega da Bacia de Drenagem ..... 52
Figura 16: Hidrograma e Hietograma observados - Caixa Frutaria, jusante ponte (Este) 02 a 13 de dezembro de 2019. ..... 53
Figura 17: Calibração de caudal em tempo seco (DWF), no período de 02/12/2019 a 06/12/2019, excluindo as leituras nulas de caudal. Séries de caudal observado e simulador e padrão diurno médio horário (em baixo). ..... 56
Figura 18: Gráfico de dispersão da calibração feita para KGE para cada um dos parâmetros R, T, K. A verde, o conjunto de 5% referente às melhores soluções. A laranja, o melhor intervalo. ..... 61
Figura 19: Comparação entre os intervalos dos parâmetros R ..... 62
Figura 20: Comparação entre os intervalos dos parâmetros T ..... 63
Figura 21: Comparação entre os intervalos dos parâmetros K ..... 63
Figura 22: Comparação das funções objetivo - NSE vs PBIAS ..... 65
Figura 23: Diagramas de dispersão da calibração com a função-objetivo logNSE, para os nove parâmetros RTK. ..... 67
Figura 24: Gráficos de dispersão associados ao intervalo de parâmetros ótimo ..... 68
Figura 25: Hidrograma produzido usando os parâmetros ótimos produzidos. ..... 69

# ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Síntese comparativa dos três critérios de calibração adotados. ..... 32
Tabela 2: Intervalos de procura dos nove parâmetros RTK (valores de T e K segundo Vallabhaneni, Chan e Burgess, 2007, Tabela 5-2). ..... 35
Tabela 3: População inicial do exemplo reduzido e desempenho associado. ..... 36
Tabela 4: Complexo A antes do passo da evolução. ..... 36
Tabela 5: Centróide de A0 e A1, ponto refletido e confirmação de limites dos intervalos definidos. ... 37
Tabela 6: Parâmetros referentes ao novo ponto entre o centróide e o pior ponto de A1 e A0 ..... 37
Tabela 7: Mapa Comparativo dos indicadores para os seis cenários testados, com 3 abordagens para o tratamento dos caudais nulos. ..... 55
Tabela 8: Intervalos definidos para o arranque dos parâmetros candidatos a calibração ..... 57
Tabela 9: Critérios de classificação das métricas de desempenho utilizadas ..... 59
Tabela 10: Intervalos finais dos parâmetros candidatos a calibração ..... 62
Tabela 11: Desempenho da calibração RTK por função-objetivo otimizada ..... 67
Tabela 12: Parâmetros RTK finais. ..... 69
Tabela 13: Tabela de classificação das métricas obtidas ..... 70
Tabela 14: Câmaras de visita existentes na bacia de drenagem BAC5SELP3 e consideradas na definição da rede ..... 5
Tabela 15: Condutas existentes na bacia de drenagem 5SELP3 e consideradas para a definição da infraestrutura de drenagem ..... 13

## SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

| | |
|---|---|
| $K_1$, $K_2$, $K_3$ | *Razões de recessão dos três hidrogramas unitários do método RTK (componentes rápida, intermédia e lenta)* |
| $\overline{Q_{obs}}$, $\overline{Q_{sim}}$ | *Média dos caudais observados e simulados* |
| $Q_{obs,t}$ | *Caudal observado no instante t* |
| $Q_{sim,t}$ | *Caudal simulado no instante t* |
| $r$ | *Coeficiente de correlação linear de Pearson (componente do KGE)* |
| $R^2$ | *Coeficiente de determinação* |
| $R_1$, $R_2$, $R_3$ | *Frações do volume de precipitação afluentes à rede (componentes rápida, intermédia e lenta do método RTK)* |
| $T_1$, $T_2$, $T_3$ | *Tempos ao pico dos três hidrogramas unitários do método RTK* |
| $\alpha$ | *Razão de variabilidades entre as séries simulada e observada (componente do KGE)* |
| $\beta$ | *Razão de médias — balanço de volume (componente do KGE)* |
| $\theta$ | *Vetor dos parâmetros de calibração (nove parâmetros do método RTK)* |
| $\mu_{ln}$ | *Média dos logaritmos dos caudais observados* |
| $\mu_{obs}$, $\mu_{sim}$ | *Média dos caudais observados e simulados (componentes de β)* |

| | |
|---|---|
| *AI* | *Inteligência Artificial (Artificial Intelligence)* |
| *DECG* | *Departamento de Engenharia Civil e Georrecursos* |
| *DGT* | *Direção-Geral do Território* |
| *DR* | *Decreto Regulamentar* |
| *DWF* | *Caudal de tempo seco (Dry Weather Flow)* |
| *EPA* | *Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (United States Environmental Protection Agency)* |
| *ETAR* | *Estação de Tratamento de Águas Residuais* |
| *FEUP* | *Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto* |

| | |
|---|---|
| *GLO-30* | *Modelo Digital de Elevação global Copernicus, resolução de 30 m* |
| *IMD* | *Densidade de impermeabilização (Imperviousness Density, Copernicus)* |
| *INP* | *Ficheiro de entrada (input) do SWMM* |
| *IPMA* | *Instituto Português do Mar e da Atmosfera* |
| *KGE* | *Eficiência de Kling-Gupta (Kling-Gupta Efficiency)* |
| *LID* | *Dispositivos de controlo de baixo impacto (Low Impact Development)* |
| *logNSE* | *Coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe logarítmico* |
| *NSE* | *Coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (Nash-Sutcliffe Efficiency)* |
| *OWA* | *Open Water Analytics* |
| *PBIAS* | *Erro percentual de volume (Percent Bias)* |
| *PRIOS* | *Projeto de Reabilitação do Rio Selho* |
| *PySWMM* | *Interface Python para o SWMM* |
| *QGIS* | *Sistema de Informação Geográfica de código aberto* |
| *RDII* | *Afluência derivada da precipitação (Rainfall-Derived Inflow and Infiltration)* |
| *RH2* | *Região Hidrográfica 2 — Cávado, Ave e Leça* |
| *RMSE* | *Raiz do erro quadrático médio (Root Mean Square Error)* |
| *RTK* | *Método dos três hidrogramas unitários triangulares (parâmetros R, T e K)* |
| *SCE-UA* | *Shuffled Complex Evolution — University of Arizona* |
| *SIDVA* | *Sistema Integrado de Despoluição do Vale do Ave* |
| *SPOTPY* | *Statistical Parameter Optimization Tool for Python* |
| *SWMM* | *Storm Water Management Model (US EPA)* |

| | |
|---|---|
| *et al.* | *e outros (do latim et alii)* |
| *s.d.* | *sem data* |

# 1
# INTRODUÇÃO

## 1.1 ENQUADRAMENTO E MOTIVAÇÃO

Os sistemas de drenagem de águas residuais ou pluviais representam uma infraestrutura crucial no ciclo urbano da água, garantindo a recolha e o transporte dos efluentes em direção às Estações de Tratamento de Águas Residuais (ETAR) contribuindo de forma decisiva para proteção da saúde pública e meio recetor. No entanto, estes sistemas incorrem em vários problemas que comprometem o seu desempenho hidráulico e ambiental. De entre estas problemáticas destacam-se as afluências indevidas, que, resumidamente, constituem acréscimos de caudal não previstos em projeto que englobam a infiltração de águas subterrâneas através de fissuras, juntas e ligações domésticas defeituosas bem como as afluências de origem pluvial que podem ocorrer de forma direta ou indireta.

As consequências das afluências indevidas manifestam-se a vários níveis: (i) económico e operacional; (ii) estrutural e a (iii) nível ambiental. A sua quantificação e controlo constitui, por isso, uma prioridade para as entidades gestoras, visando a sustentabilidade financeira e a eficácia dos sistemas de drenagem.

O diagnóstico das afluências indevidas apresenta, no entanto, dificuldades práticas consideráveis. Trata-se de um fenómeno dinâmico e sazonal, cuja magnitude depende da intensidade e duração da chuvada, da humidade do solo e da posição do nível freático. A sua caracterização rigorosa exige, por isso, campanhas de monitorização contínua de caudal e de precipitação. Neste contexto, a modelação hidráulica assume-se como uma ferramenta privilegiada de análise, previsão e de apoio à decisão. Um modelo dinâmico de precipitação-escoamento, devidamente construído sobre o cadastro da rede, permite reproduzir o comportamento do sistema perante a existência de qualquer tipo de precipitação. O SWMM constitui uma referência consolidada neste domínio, integrando a simulação hidrológica das bacias contribuintes, a propagação hidráulica nos coletores e a modelação específica da resposta da rede à precipitação (RDII). A calibração é um processo que, realizado manualmente é moroso e fortemente dependente da experiência do modelador, envolvendo uma calibração com múltiplas dimensões e com interdependências não lineares. A existência de interfaces de programação, como o PySWMM, veio permitir o controlo integral da simulação através da utilização de Python tal como os algoritmos de otimização global à execução iterativa do modelo que transformam a calibração num processo sistemático e automatizado. Esta abordagem reduz drasticamente o esforço de calibração e permite explorar de forma infindável o domínio dos parâmetros. É na convergência destas vertentes que se enquadra a presente dissertação onde se pretende demonstrar um método fiável, automatizado e sistemático de reproduzir o comportamento de uma rede em condições de afluências indevidas e de fornecer uma base quantitativa para a priorização de intervenções.

## 1.2 OBJETIVOS

A presente dissertação consiste em desenvolver, calibrar e avaliar um modelo hidráulico da rede de drenagem de águas residuais numa zona das Freguesias de São Lourenço de Selho e Gominhães, capaz de reproduzir o comportamento do sistema em condições de afluências indevidas, recorrendo ao Storm Water Management Model (SWMM) e às potencialidades de automatização da linguagem de programação Python, aproveitando a interação já existente entre os dois.

Com este modelo, é pretendida a representação, de forma fiável, da resposta do sistema de drenagem de águas residuais a um período que inclui alguns eventos de precipitação, compreendido entre os dias 02 de dezembro de 2019 e 13 de dezembro de 2019, dados disponíveis à presente data. O desenvolvimento deste modelo, aliado à implementação de um processo de calibração automatizado, permite a transposição do procedimento a outros períodos temporais, bem como a outras bacias de drenagem, garantindo uma metodologia de calibração transversal que integra o SWMM com o Python e possibilita uma previsão fidedigna, independente da bacia e do evento de precipitação.

Constitui ainda objetivo do trabalho avaliar de que forma o critério de ajuste adotado condiciona os resultados da calibração, através da comparação de diferentes funções-objetivo, procurando identificar a combinação mais adequada à representação do fenómeno das afluências indevidas na rede em estudo.

A construção desta ferramenta permite não apenas dar uma base necessária para a quantificação do fenómeno das afluências indevidas, como também constituir uma base de apoio à decisão para as entidades gestoras, no que respeita à priorização de intervenções de reabilitação, à otimização da exploração da rede e à mitigação dos impactos ambientais e financeiros associados às afluências indevidas.

## 1.3 METODOLOGIA

A concretização destes objetivos assenta num processo faseado, que evolui desde a recolha de dados e tratamento da informação inicial até à avaliação crítica dos resultados da calibração. Descrevem-se, de seguida, as principais etapas do trabalho realizado.

A primeira etapa refere-se à construção do modelo hidráulico da bacia de drenagem no SWMM. Esta fase contempla a recolha e o tratamento de toda a informação base, tanto relativa à infraestrutura de drenagem (traçado da rede, coletores, câmaras de visita) como da medição de caudais e da precipitação no período de estudo. A partir destes elementos constrói-se o ficheiro ". INP" que gera toda a rede e simulação no SWMM.

A segunda etapa consiste em calibrar o modelo em tempo seco, Dry Weather Flow (DWF), usando as potencialidades de integração do Python no SWMM, foi desenvolvido um script que, partindo de uma estimativa inicial do padrão diurno das contribuições domésticos num período sem precipitação, ajustam padrões diurnos de forma a minimizar o erro quadrático médio entre o caudal simulado e o observado, permitindo definir um escoamento base verosímil.

Numa segunda fase, calibram-se os parâmetros do modelo de afluências indevidas induzidas pela precipitação (Rainfall Derived Infiltration and Inflow, RDII), através do método dos hidrogramas unitários RTK, o qual descreve, por meio dos parâmetros R (fração de precipitação convertida em afluência), T (tempo de pico) e K (relação entre o tempo de recessão e o tempo de pico), as respostas rápida, intermédia e lenta do sistema à precipitação.

A terceira etapa diz respeito à automatização do processo de calibração. Dada a natureza multiparamétrica do problema — que envolve, no caso do RDII, a determinação de nove parâmetros RTK —, torna-se inviável um ajuste manual por tentativa e erro que garanta a obtenção de soluções robustas. Neste sentido, desenvolve-se uma rotina em linguagem Python que comunica de forma automatizada com o motor de cálculo do SWMM, permitindo a execução iterativa de simulações e a leitura sistemática dos respetivos resultados. A esta rotina associa-se o algoritmo de otimização Shuffled Complex Evolution — University of Arizona (SCE-UA), método de pesquisa global amplamente reconhecido na calibração de modelos hidrológicos, que orienta a procura dos parâmetros ótimos dentro dos intervalos de calibração previamente definidos.

A quarta etapa incide sobre a comparação de funções-objetivo. A qualidade do ajuste entre as séries de caudal observado e simulado depende, de forma determinante, do critério quantitativo adotado para medir esse ajuste. Assim, implementam-se e comparam-se diversas funções-objetivo de uso corrente na modelação hidrológica, designadamente o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), a sua variante logarítmica (logNSE) e o coeficiente de eficiência de Kling-Gupta (KGE) e calculadas métricas de desempenho adicionais como o coeficiente de determinação ($R^2$), a raiz do erro quadrático médio (RMSE), o erro percentual de volume (PBIAS). Uma vez que cada uma destas métricas privilegia aspetos distintos do hidrograma — os caudais de ponta, os caudais de base, o volume total escoado ou a correlação entre séries — , a sua comparação permite compreender de que modo a escolha da função-objetivo condiciona os parâmetros calibrados e, em última análise, a representação do fenómeno das afluências indevidas.

Por fim, a quinta etapa corresponde à avaliação crítica dos resultados. Aplicam-se critérios de classificação do desempenho às métricas obtidas para cada função-objetivo, com o intuito de hierarquizar as diferentes soluções, identificar os intervalos ótimos dos parâmetros RTK e discutir as vantagens e limitações associadas a cada critério de calibração. Procura-se, deste modo, retirar conclusões fundamentadas quanto à combinação mais adequada de parâmetros e função-objetivo para a representação da rede em estudo, contribuindo para a formulação de recomendações com aplicabilidade prática na modelação de sistemas de drenagem sujeitos a afluências indevidas.

## 1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos complementados por anexos.

No presente capítulo é, naturalmente, realizado um enquadramento do tema, tendo sido apresentados os objetivos, metodologias e a organização da dissertação.

No capítulo 2, são caracterizados os sistemas de drenagem urbana, abordando a composição das redes, o papel das ETAR e as problemáticas associadas a estes sistemas, em especial, as afluências indevidas indicando os seus tipos e origens, as suas consequências e os métodos de quantificação. No capítulo 3 são apresentados os fundamentos da modelação hidráulica de redes de drenagem com especial ênfase para o SWMM e para a sua integração com o Python mediante as funções objetivo usadas na avaliação do desempenho como para o algoritmo de otimização SCE-UA. No capítulo 4 é abordado o caso de estudo, começando pela caracterização da bacia de drenagem e da infraestrutura de drenagem, avaliando e tratando os dados relativos à medição de caudal e precipitação feita e, por fim a implementação do modelo e respetiva calibração incluindo a respetiva análise dos resultados obtidos. No capítulo 5 são feitas as considerações e recomendações finais a considerar em calibrações futuras. Nos anexos podem ser encontrados os dados da infraestrutura de drenagem considerados, as séries de caudal e precipitação observadas e os resultados das diversas calibrações efetuadas.

# 2
# SISTEMAS DE DRENAGEM URBANA, AFLUÊNCIAS INDEVIDAS E PROBLEMÁTICAS ASSOCIADAS

## 2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os sistemas de drenagem urbana constituem um pilar essencial das infraestruturas necessárias à vivência e desenvolvimento dos aglomerados, em particular as relacionadas com o ciclo urbano da água. Com efeito, a intervenção humana introduz alterações significativas no padrão natural de escoamento da água, seja a utilizar, a restituir ou a resultante do escoamento superficial derivado de precipitação ou outro.

Os sistemas de drenagem convencionais, segundo o (DR 23/95) podem ser divididos em:

a) Separativos, constituídos por duas redes de coletores distintas, uma destinada às águas residuais domésticas e industriais e outra à drenagem das águas pluviais ou similares;
b) Unitários, constituídos por uma única rede de coletores onde são admitidas conjuntamente as águas residuais domésticas, industriais e pluviais;
c) Mistos, constituídos pela conjugação dos tipos anteriores, em que parte da rede de coletores, funciona como sistema unitário e a restante como sistema separativo;
d) Separativos parciais ou pseudo-separativos, em que se admite, em condições excecionais, a ligação de águas pluviais de pátios interiores ao coletor de águas residuais domésticas.

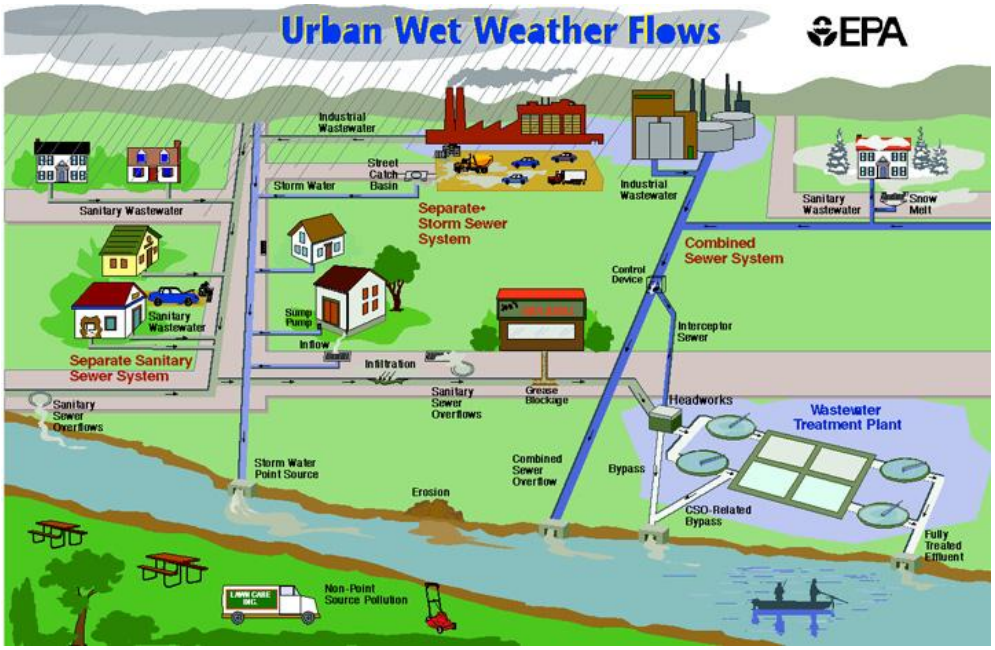



Figura 1: Esquema simplificado de sistemas de drenagem unitários e separativos (EPA).

Refere-se, no entanto, que podem ocorrer também, outros tipos de sistemas de drenagem, designados por não convencionais. Estes sistemas, com uma utilização muito mais reduzida em Portugal, são sobretudo, utilizados em núcleos populacionais de dimensões reduzidas e com condições geográficas muito desfavoráveis. Alguns exemplos são (Cardoso 2008):

- Sistema de esgotos decantados: constituídos por tanques intercetores, que recolhem os diferentes efluentes provenientes das habitações, onde é realizada uma pequena decantação e remoção de gorduras, sendo o efluente resultante conduzido a um emissário de pequeno diâmetro que o transporta até à ETAR.
- Sistema sob vácuo: baseado na criação de diferenciais de pressão para promover o transporte do efluente desde uma câmara de válvulas, localizada a jusante da habitação, até uma estação de vácuo. O movimento de ar provocado pela diferença de pressão entre o ramal de ligação e a de vácuo propulsiona a água residual no interior das condutas de pequeno diâmetro (mínimo 75 mm), na direção da estação de vácuo.
- Sistema sob pressão: composto por uma conduta principal de diâmetro (habitualmente entre 20 e 40 mm). Nos ramais de ligação é intercalado um tanque de bombagem, que contém uma bomba de baixa potência com a finalidade de pressurizar a água residual para ser transportada, através da conduta principal, à ETAR.

- Sistema Simplificado: sistema gravítico composto por coletores de pequeno diâmetro, geralmente inferior a 200 mm (tipicamente 150 mm), câmaras de visita e óculos de limpeza.
- Sistemas de ar comprimido: Em vez de dependerem da gravidade, estes sistemas utilizam injeções de ar comprimido para impulsionar o efluente ao longo dos coletores. São particularmente vantajosos em zonas de topografia acidentada, onde existem subidas e descidas sucessivas, uma vez que o escoamento por gravidade se torna inviável. O ar é injetado pontualmente em vários troços, por compressores e reservatórios dedicados, com frequência ajustada às necessidades de cada momento.

## 2.2 Composição dos Sistemas de Drenagem

Segundo Cardoso (2008), os sistemas de drenagem de águas residuais na sua versão mais usual podem ser divididos em diferentes componentes, elementos acessórios e instalações complementares, os quais se enumeram de seguida:

- Coletores: a rede de coletores tem como principal função assegurar a condução do efluente, proveniente das diversas ligações existentes na rede. Os coletores podem ser constituídos por diversos materiais e apresentar diferentes formas na sua secção transversal;
- Câmaras de vista: permitem o acesso às infraestruturas de transporte de efluente, os coletores, possibilitando a sua inspeção, limpeza, desobstrução e verificação das condições de escoamento e ainda a instalação de equipamentos para monitorização de caudas, níveis e qualidade da água. As câmaras de visita são habitualmente realizadas em elementos de betão pré-fabricado, dispondo de um meio de acesso ora com degraus encastrados ora com uma escada fixa ou amovível. A legislação portuguesa através do Decreto Regulamentar nº 23/95 obriga à implementação de câmaras de visita em diversos pontos sendo eles:
    - início da rede de drenagem;
    - secções de confluência de coletores;
    - alterações ao traçado dos coletores, como mudanças de direção, diâmetro ou inclinação.
    - alinhamentos retos, com uma distância máxima de 60 metros para coletores não visitáveis e de 100 metros para coletores visitáveis.

  - trechos com grande desnível, onde se justifica uma câmara de queda.
- Caixa Ramal de Ligação: dispositivo através do qual é estabelecida a ligação entre o sistema predial e o respetivo ramal da rede pública (ramal de ligação), fica localizado junto ao limite da propriedade, sob jurisdição da entidade gestora.
- Ramal de ligação: tubagem que assegura a condução das águas residuais prediais, desde as Caixas de Ramal de Ligação, até à rede pública de drenagem. O diâmetro nominal mínimo admitido para estas condutas é de 125 mm (DR 23/95).
- Câmaras de corrente de varrer: com finalidade de limpeza dos coletores, em situações em que a autolimpeza do coletor não pode ser garantida, implantada, por norma, nos troços a montante das redes de águas residuais domésticas, podendo ser manuais ou automáticas, dependendo da natureza do seu manuseamento.
- Sarjetas e sumidouros: para a recolha de águas pluviais de modo a serem para a rede de drenagem pluvial. São instalados em pontos baixos da via pública, afastando o escoamento superficial da faixa de rodagem.
- Sifões invertidos. troço rebaixado do coletor onde o escoamento funciona sob pressão e utilizados visando a ultrapassagem de obstáculos. Especialmente em sistemas de drenagem de águas residuais é importante garantir a sua autolimpeza, visto serem suscetíveis à acumulação de sólidos em suspensão (DR 23/95).
- Descarregadores de tempestade/emergência: utilizados para desviar os caudais pluviais em excesso durante episódios de precipitação intensa, prevenindo a sobrecarga dos coletores a jusante e de outros componentes dos sistemas de drenagem, como as estações de tratamento de águas residuais (ETAR) e as estações elevatórios.
- Bacias de retenção: com o objetivo regularização do escoamento pluvial afluente, reduzindo os picos de caudal e adequando-os a limites pré-estabelecidos, ajudando na mitigação de inundações.
- Estações elevatórias: equipamentos utilizados na elevação de águas residuais nos casos em que é necessário ultrapassar um obstáculo ou como alternativa ao escoamento gravítico em condições de desníveis desfavoráveis.
- Desarenadores: Utilizados a montante de qualquer componente do sistema de drenagem com o objetivo de remover partículas sólidas, nomeadamente areia, evitando que estes se acumulem e depositem, provocando a sua degradação.

## 2.3 ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS (ETAR)

Dada a sua relevância no tema, optou-se por separar um dos componentes finais dos sistemas de drenagem de águas residuais dos restantes componentes já citados. As ETAR, mais do que um componente, constituem uma infraestrutura por si só, que reduzem a carga poluente das águas residuais recolhidas para que o efluente tratado possa ser descarregado no meio recetor sem prejudicar o meio recetor.

Nas ETAR são realizadas uma série de operações e processos de tratamento para remover substâncias poluentes e, em alguns casos, microrganismos patogénicos presentes nas águas residuais criando um efluente com a qualidade desejada, geralmente definida na licença de descarga do efluente no meio recetor (do Monte et al. 2016).

Os componentes da ETAR variam consoante o tipo de água residual tratada, a dimensão da ETAR, o nível de tratamento necessário e os requisitos específicos da licença de descarga. No entanto, os mais amplamente usados são os seguintes:

- Tratamento preliminar:
    - Gradeamento: para na remoção dos sólidos grosseiros, como plásticos, madeiras e outros detritos, que podem danificar os equipamentos a jusante. As grades podem ser finais ou grosseiras, manuais ou mecanizadas(do Monte et al. 2016).
    - Desarenamento: para remoção de areias e outras partículas inertes que podem desgastar os equipamentos ou reduzir e eficiência do tratamento biológica (do Monte et al. 2016).
    - Remoção de óleos e gorduras: Remove os óleos e gorduras que podem interferir com o tratamento biológico e causa problemas operacionais (Duarte 2020).
    - Tanque de equalização: Amortece as variações de caudal e de carga poluente, protegendo as etapas seguintes do tratamento.
- Tratamento Primário: fase em que é realizada uma decantação primária, onde são removidos os sólidos sedimentáveis e parte dos sólidos em suspensão, reduzindo a carga orgânica afluente ao tratamento secundário.
- Tratamento Secundário: consiste num tratamento biológico onde é removida a matéria orgânica biodegradável através da ação de microrganismos associada a uma decantação secundária onde é separada a água tratada da biomassa (lamas). Os processos mais comuns utilizados para este efeito são (do Monte et al. 2016):

- Sistemas de lamas ativadas: Processo biológico aeróbio em que os microrganismos são cultivados num tanque de arejamento, formando flocos que removem a matéria orgânica da água residual (Duarte 2020);
- Leitos percoladores: Processo biológico em que a água residual é pulverizada sobre um meio suporte, onde se desenvolve um biofilme que remove a matéria orgânica da água (Baptista 2021).
- Tanques de arejamento prolongado: Processo idêntico ao de lamas ativadas, mas com um tempo de tenção hidráulica mais longo (Baptista 2021).

- Tratamento Terciário: tipo de tratamento que é apenas, realizado quando as exigências da qualidade do efluente são mais exigentes, em função do seu local de descarga. A este nível os processos podem ser os seguintes:
  - Coagulação;
  - Decantação;
  - Microtamisação;
  - Desinfeção final.

Importa ainda salientar que as ETAR, sendo um equipamento localizado no final do sistema de drenagem, é o local onde aflui todo o caudal transportado pela rede, com a inclusão das afluências indevidas, sendo que a sua capacidade de tratamento de efluente é diretamente comprometida. O acréscimo de caudal pode exceder a capacidade hidráulica instalada, obrigando ao desvio de parte do caudal afluente e à sua descarga no meio recetor sem tratamento adequado. Por outro lado, o aumento da carga hidráulica reduz o tempo de retenção nos diferentes componentes, provocando o incumprimento do tempo estipulado para os processos biológicos e na condução da biomassa responsável pela sua concretização para o exterior do sistema (Duarte 2020)

## 2.4 Principais problemáticas a resolver nos sistemas de drenagem de Águas Residuais urbanas

A exploração dos sistemas de drenagem de águas residuais urbana incorre em vários problemas que podem reduzir a sua vida útil, a fiabilidade da sua exploração derivada e, por exemplo, de afluências indevidas e consequentes e possíveis problemas com inundações. Podem ser categorizados como:

- Deficiências estruturais: Os sistemas existentes apresentam frequente falta de capacidade de transporte, conduzindo à sobrecarga dos coletores e a inundações. Adicionalmente, a acumulação de sedimentos e a inadequação do dimensionamento original às condições de utilização atuais submetem os componentes do sistema às condições de utilização atuais submetem os componentes do sistema a esforços não previstos, conduzindo ao seu desgaste prematuro e ao agravamento do estado de conservação da rede (Cardoso 2008)
- Afluências indevidas: Constituem acréscimos de caudal a transportar, não previstos em projeto e que podem advir de várias formas: ligações indevidas à rede de drenagem; infiltrações de água subterrânea que por patologias estruturais comprometem a capacidade de transporte dos coletores e aumentam as descargas de emergência para o meio ambiente e elevam os custos de tratamento e exploração da rede (Cardoso 2008);
- Impactos ambientais. As descargas de águas residuais, sem o devido tratamento, prejudicam diretamente a qualidade do solo e dos cursos de água (Cardoso 2008).

É importante salientar que os problemas apresentados estão interligados entre si. A deterioração da rede, por exemplo, contribui para a entrada de afluências indevidas na rede, comprometendo a sua capacidade de transporte e aumentando o risco de inundações e contaminação do meio recetor.

## 2.5 AFLUÊNCIAS INDEVIDAS EM SISTEMAS DE DRENAGEM URBANA

As afluências indevidas constituem um tema atual que, durante décadas, foi negligenciado pelas entidades gestoras dos sistemas de drenagem que se têm dedicado maioritariamente à expansão da rede e da cobertura. Naturalmente, o desgaste da infraestrutura de drenagem deteriora o seu estado de conservação, permitindo a entrada de caudais não previstos e criando um aumento significativo dos volumes infiltrados repercutindo resultados extremamente negativos na *performance* do sistema (Bonito, Piqueiro e Valente 2014), em particular no funcionamento da ETAR com consequentes efeitos de índole ambiental.

Estes caudais não previstos e não considerados na fase de projeto, constituem o principal desafio para a eficácia do sistema de drenagem, conduzindo a uma série de problemáticas de foro estrutural, financeiro e ambiental. Estruturalmente, o acréscimo de caudal poderá colocar uma rede dimensionada para escoamento em regime livre para um escoamento sob pressão, colocando as condutas em carga e acentuado o seu desgaste. Do ponto de vista ambiental, existe a necessidade de descarregar estes caudais adicionais através, por exemplo, dos descarregadores de tempestade ou ligações *bypass*, degradando e poluindo o meio recetor. Por último, a nível financeiro, os caudais excedentários não são faturados ao cliente ou constituem custos de exploração que terão de ser suportados, por exemplo na tarifa a aplicar. No entanto, estes têm de ser igualmente transportados e tratados pelo que constituem um custo operacional acrescido que não é interessante na perspetiva de maximizar o ganho obtido na exploração da rede (Bonito, Piqueiro e Valente 2014).

Pelo exposto, a situação ideal seria a de um sistema de drenagem que, enquanto conjunto, fosse completamente estanque. Contudo, tal objetivo é, na prática, inatingível pelo que a quantificação dos volumes indevidos é crucial para aferir os custos monetários associados e, assim, assumir estratégias de operacionalidade, monitorização e manutenção, visando o funcionamento do sistema nas melhores condições possíveis e prolongar a sua vida útil (Bonito, Piqueiro e Valente 2014).

### 2.5.1 Tipos e origens de Afluências Indevidas

Segundo (Schilperoot 2004) não existe uma formulação direta e claramente definida para este conceito. Contudo, o termo abrangente de Afluências Indevidas pode ser equiparado ao termo inglês *Infiltration and Inflow*, considerando como afluências indevidas todos os caudais que circulam num dado sistema e que não deveriam, uma vez que os sistemas de drenagem urbanos apenas são concebidos para drenagem e circulação de águas residuais, domésticas ou pluviais preferencialmente separados.

Pelo exposto e segundo Cardoso (2008) e numa primeira abordagem, pode dividir-se a proveniência das Afluências Indevidas em:

- Infiltração: entrada de água subterrânea nas infraestruturas enterradas através de deficiências estruturais nos componentes do sistema como coletores, juntas, ligações domésticas e câmaras de visita;

- Ligações indevidas: ligações adicionais não previstas, habitualmente em câmaras de visita, provenientes de caleiras dos telhados, caves e drenos de logradouros, drenos de fundações, sumidouros, instalações elevatórias, tampas de caixas de visita e coletores unitários;
- Ligações entre o sistema de drenagem pluvial e o residual: ligações resultantes de interligações entre as duas redes de drenagem construídas e admitidas por razões de segurança e de modo a evitar extravasamentos superficiais.

Não descurando a divisão acima descrita, salienta-se que em qualquer das situações descritas, coexiste uma forte associação com a precipitação, expondo-se, de seguida, o modo de como se relacionam com a ocorrência de precipitação, seja de forma direta ou indireta (Almeida e Monteiro 2004).

#### *2.5.1.1 Afluências Indevidas diretas*

Estas parcelas de caudal constituem uma reação rápida aos eventos pluviométricos e podem-se distinguir em escoamento direto ou drenagem rápida. Os caudais provenientes de escoamento direto surgem em períodos que podem variar de alguns minutos a algumas horas após o início de uma chuvada. Estes caudais surgem, na sua maioria, de ligações domiciliárias indevidas de ramais de descarga de águas pluviais à rede de drenagem (Almeida e Monteiro 2004).

Por outro lado, a drenagem rápida está associada à percolação de água através do solo que é inserida e drenada pelos coletores antes de retribuir para a recarga dos aquíferos, nesta situação, o tempo de resposta pode variar, dependendo das condições locais do solo, entre algumas horas a alguns dias. Os caudais infiltrados que se inserem neste âmbito chegam à rede essencialmente através de juntas ou fissuras existentes, tanto nos coletores como nas câmaras de visita. Estes caudais podem ser significativos, principalmente em episódios longos de precipitação (Almeida e Monteiro 2004).

Na conjugação de caudais do escoamento direto e da drenagem rápida, não obstante a sua curta duração no tempo, ocorrem elevados caudais de ponta nas redes de drenagem, em particular nas ETAR (Almeida e Monteiro 2004).

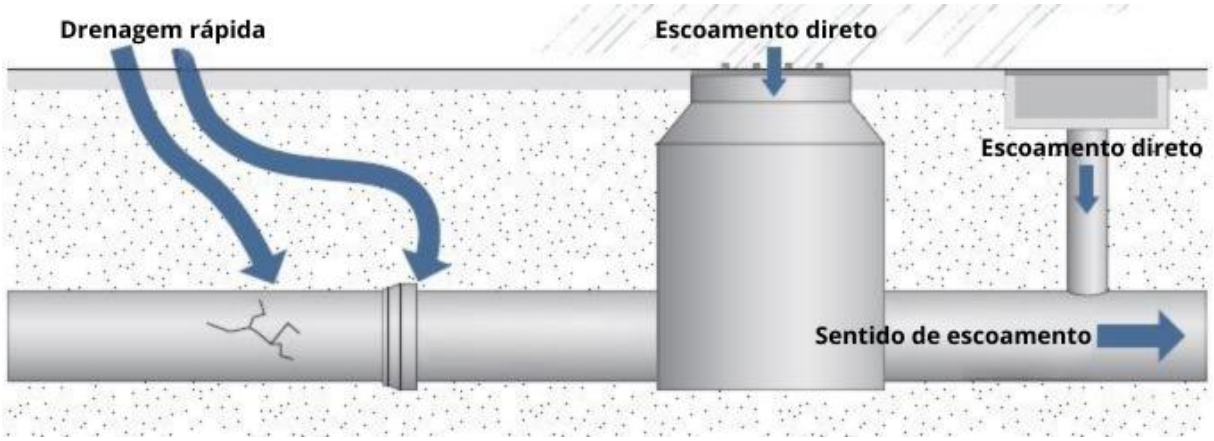



Figura 2: Representação simplificada das afluências indevidas diretas, adaptado de (Kesik 2015).

### *2.5.1.2 Afluências Indevidas indiretas*

Estes caudais, ainda que dependam de igual modo da precipitação, não se manifestam de forma direta, no tempo, após a ocorrência de precipitação. A sua presença está relacionada com a posição do nível freático em relação ao nível do coletor, provocando a infiltração de água dentro do coletor pelas juntas ou fissuras existentes numa rede. São pouco afetados por episódios de chuva isoladas. Todavia, têm tendência a ser um problema persistente ao longo do tempo e de teor sazonal (Almeida e Monteiro 2004).

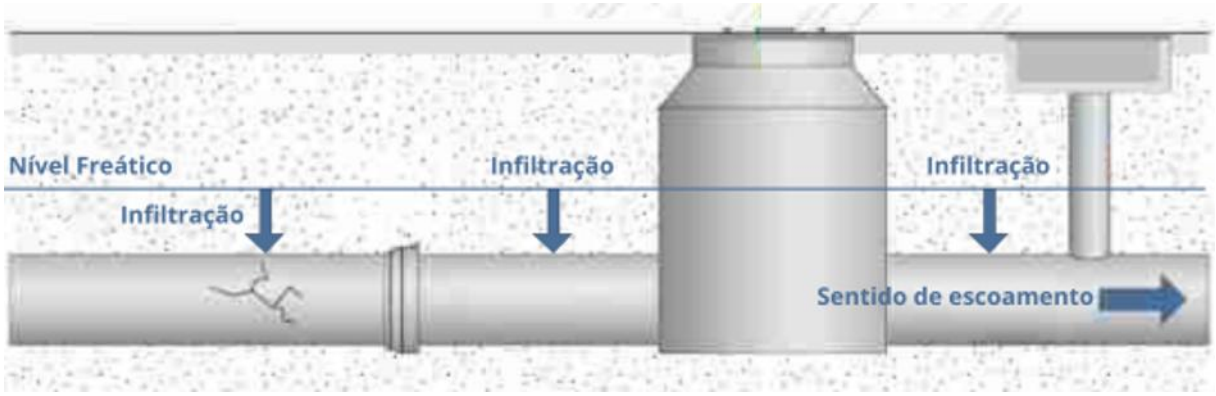



Figura 3: Representação simplificada das afluências indevidas, adaptado (Kesik 2015).

### 2.5.2 Consequências das Afluências Indevidas

As consequências das afluências indevidas manifestam-se em várias dimensões.

**Do ponto de vista económico e operacional**, os volumes associados a estas afluências podem igualar ou mesmo superar os caudais de águas residuais domésticas. Este acréscimo obriga as instalações elevatórias a funcionar durante mais tempo, o que aumento o consumo energético e reduz a vida útil dos equipamentos. Simultaneamente, o tratamento de volumes muito superiores aos previstos e a degradação acelerada do sistema agravam os custos de exploração, manutenção e reparação, comprometendo a sustentabilidade financeira das entidades gestoras (Paixão 2016).

**A nível estrutural**, a infiltração provoca um envelhecimento acelerado dos coletores, possibilitando a entrada de sedimentos presentes no solo pelas fendas e consequente arrastamento pela água escoada. Em situações de entrada em carga, podem ocorrer fenómenos de extravasamento pelas câmaras de visita agravando os episódios de cheias urbanas e problemas de saúde pública. Por fim, verifica-se perda de integridade estrutural da rede associada à degradação dos solos contíguos e à percolação de água, provocando o aparecimento de vazios e, consequentemente, assentamentos – que podem ser significativos, nos vários órgãos da rede. Estes assentamentos causam o aparecimento de tensões e deformações, provocando fissuração e até rotura total dos vários órgãos da rede (Paixão 2016).

Por último, a **nível ambiental**, o aumento dos caudais e do volume de águas a tratar reduz a eficácia do tratamento feito visto que os poluentes são diluídos neste volume de águas adicional. O acréscimo de caudal pode fazer com que o caudal de projeto da ETAR seja excedido sendo necessária a libertação de águas poluídas nos meios recetores, através de descarregadores de emergência. No mesmo plano de circulação das infiltrações, a entrada em carga dos coletores pode provocar a fuga de águas residuais para o exterior dos coletores com óbvios problemas ambientais associados (Paixão 2016).

### 2.5.3 Quantificação de Afluências indevidas

A quantificação das afluências indevidas constitui um procedimento essencial para o projeto e sustentação de qualquer rede de drenagem. Neste sentido, e face à impossibilidade de erradicar completamente este fenómeno, há que separar, o antes e o depois, da entrada em operação da rede. Numa primeira fase é feito um acréscimo ao caudal de projeto no dimensionamento do sistema de drenagem, de acordo com o regulamento em vigor, em função do diâmetro e da extensão da rede a montante (Paixão 2016).

Numa segunda fase, em exploração, é necessário medir e monitorizar criteriosamente a componente das afluências indevidas visando avaliar o desempenho do sistema em termos técnicos e económicos. (Coelho, Piqueiro e Tentúgal-Valente 2013) e a, partir daí, encontrar soluções de resolução ou de redução/mitigação.

#### *2.5.3.1 Fase de projeto*

Em Portugal, os princípios base para o dimensionamento de redes de saneamento de águas residuais estão regulamentos no Decreto Regulamentar nº 23/95 através do Artigo 126º, do Capítulo II. No ponto 4 é possível encontrar o seguinte excerto:

*"4 – Desde que não se disponha de dados experimentais locais ou de informações similares, o valor do caudal de infiltração pode considerar-se:*

a) *Igual ao caudal médio anual, nas redes pequenos aglomerados com coletores a jusante até 300 mm;*
b) *Proporcional ao comprimento e diâmetro dos coletores, nas redes de médios e grandes aglomerados; neste último caso, quando se trate de coletores recentes ou a construir, podem estimar-se valores de caudais de infiltração da ordem de 0,500 $m^3$/dia, por centímetro e por quilómetro de comprimento da rede pública, podendo atingir-se valores de 4 $m^3$/dia, por centímetro e por quilómetro, em coletores de precária construção e conservação.*
c) *Os valores referidos nas alíneas a) e b) podem ser inferiores sempre que estiver assegurada uma melhor estanquidade da rede, nomeadamente no que respeita aos coletores, juntas e câmaras de visita."*

Pela análise do exposto, consegue verificar-se que apenas são consideradas as afluências indevidas de natureza indireta e ainda que no ponto 2 deste mesmo Artigo 126º, seja referido que o valor dos caudais de infiltração é função das características locais do terreno e do estado de conservação da rede, não existe uma forma claramente definida de estimar estes caudais em fase de projeto (Paixão 2016).

#### *2.5.3.2 Fase de exploração*

Durante a fase de exploração é corrente dividir-se a quantificação de afluências indevidas em quatro diretrizes possível:

(i) Balanços: Metodologia baseada na subtração dos volumes afluentes a montante, aos volumes de jusante, em que, habitualmente, o último é a água residual que aflui à ETAR;

(ii) Hidrogramas: Procedimento desenvolvido com base na utilização de hidrogramas de cheia (semelhantes aos preconizados para estudos de hidrologia e de recursos hídricos);

(iii) Marcadores: Processo no qual é quantificado o volume indevido em função de uma característica distinta das águas sépticas;

(iv) Modelos de simulação: Modelos Computacionais que recorrem a algoritmos idênticos aos modelos de percolação e à introdução de dados característicos da bacia hidrográfica em questão. (Coelho, Piqueiro e Tentúgal-Valente 2013).

Na presente dissertação é adotada a quarta abordagem, em específico o método RTK, implementado em SWMM *(Storm Water Management Model),* da US EPA *(Environmental Protection Agency)* dada a sua possibilidade de automatização e integração com Python e calibrado através de um algoritmo de otimização desenvolvido especificamente para modelos hidrológicos e que de seguida se explicita.

#### *2.5.3.3 Método RTK*

Na presente dissertação e de entre outras possíveis metodologias, é utilizado o método RTK dado o seu potencial de automatização e integração dentro do SWMM.

Desenvolvido em 1983, por *Giguere* e Rick, o método RTK baseia-se no princípio do Hidrograma Unitário Sintético Triangular para representar a resposta do sistema de drenagem residual à precipitação. Esta resposta, denominada de RDII, *Rainfall-Derived Inflow and Infiltration*, é decomposta em três hidrogramas triangulares – designados por componentes i (1,2 ou 3; rápida, média e lenta, respetivamente), sobrepostos e que correspondem, fisicamente, a três escalas temporais distintas da resposta do sistema de drenagem: uma componente rápida (que deriva de ligações diretas e escoamento superficial), uma componente média (ligada à percolação através de fissuras e juntas dos coletores) e uma terceira componente lenta (relacionada com a infiltração proveniente do nível freático). Cada um dos hidrogramas é definido na íntegra por três parâmetros (Vallabhaneni, C. Chan e H. Burgess 2007):

- R: Fração do volume de precipitação convertida em RDII na componente i (1,2 ou 3; rápida, média e lenta, respetivamente);
- T: Tempo decorrido entre o centro da chuvada e o pico do hidrograma triangular, em horas (h), na componente i (1, 2 ou 3);
- K: Razão entre o tempo de recessão e o tempo de subida, sendo esta, uma variável adimensional, na componente i (1, 2 ou 3);

Este método, na prática, é um *curve-fitting method* (ajuste de curvas), na medida em que os parâmetros resultantes, que são nove, $R_1$, $T_1$, $K_1$, $R_2$, $T_2$, $K_2$, $R_3$, $T_3$, $K_3$, são determinados por calibração, comparando com séries observadas de caudal e precipitação (Vallabhaneni, C. Chan e H. Burgess 2007).

O hidrograma unitário é a resposta de caudal resultante de uma unidade de precipitação aplicada durante uma unidade de tempo sobre sub-bacia drenada, sendo que, cada um três dos hidrogramas triangulares é completamente caracterizado pelos parâmetros de R, T e K. A resposta RDII para um determinado momento, resulta da soma dos três hidrogramas unitários e a soma dos três parâmetros tem de cumprir a condição: $R_1 + R_2 + R_3 \leq 1$, dado que que cada um define a fração total do volume de precipitação que é convertida em RDII, não pode ser superior ao volume total de precipitação.

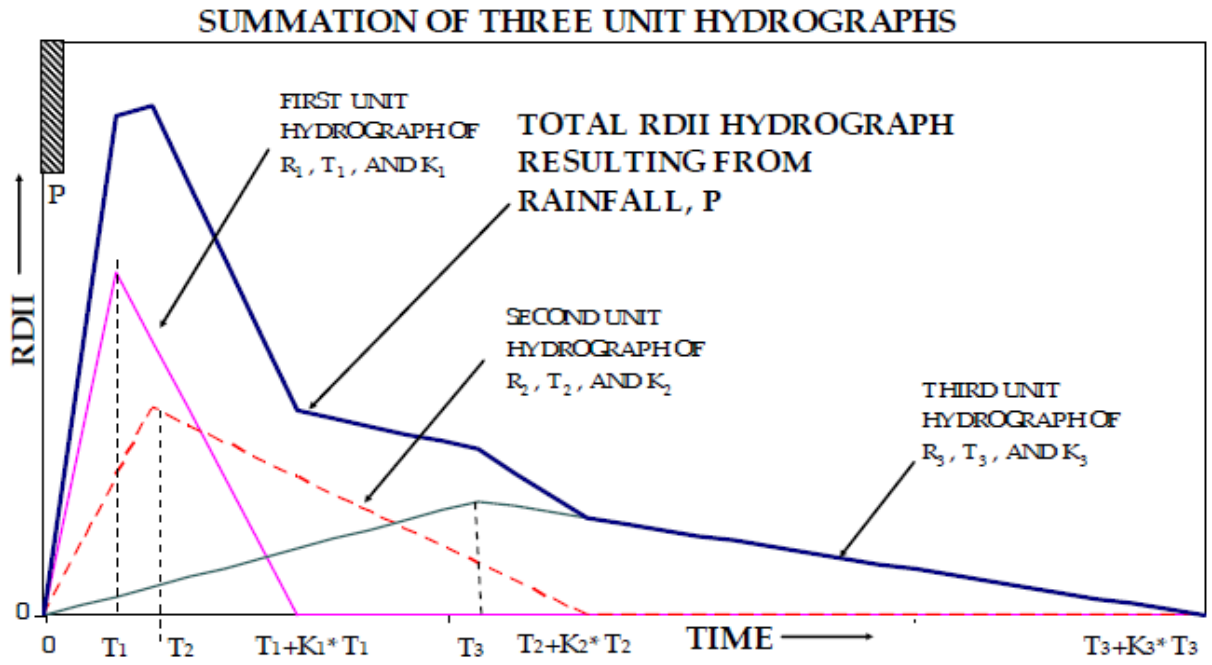



Figura 4: Soma de três hidrogramas unitários e respetivos parâmetros R, T e K (Vallabhaneni, C. Chan e H. Burgess 2007).

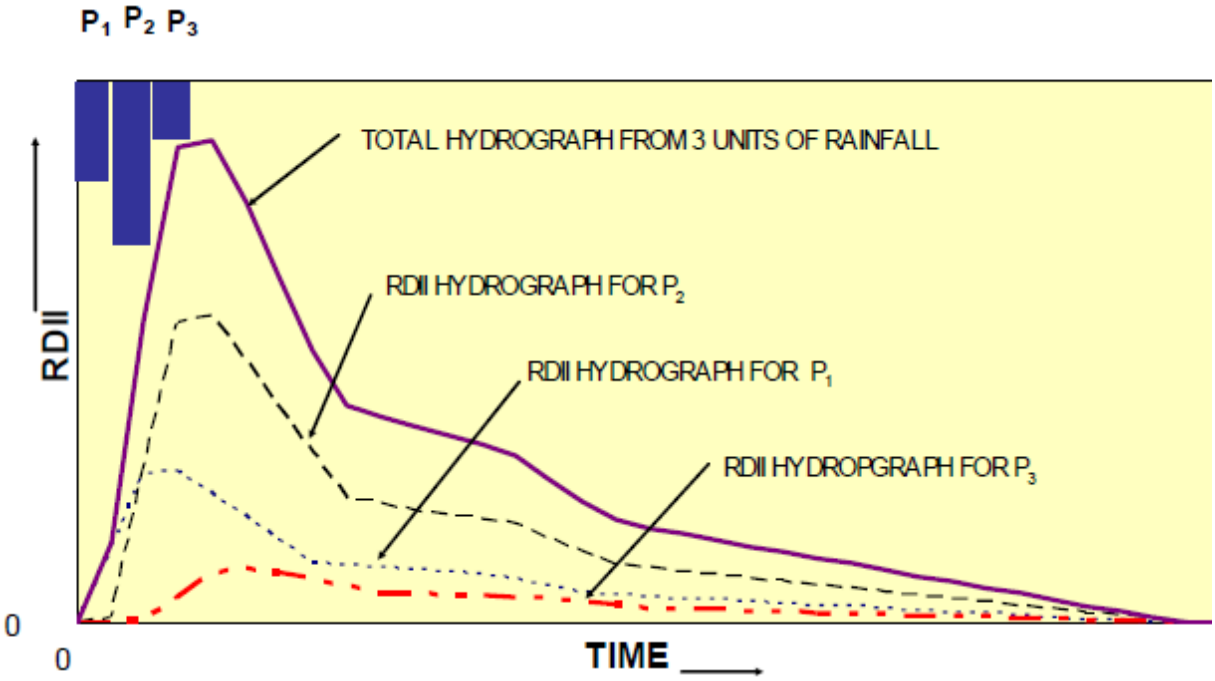



Figura 5: Soma dos hidrogramas RDII, associados a três precipitações diferentes, P1, P2 e P3 (Vallabhaneni, C. Chan e H. Burgess 2007).

Este método, é incluído dentro do *software* SWMM e é bastante utilizado no estudo de afluências indevidas em rede de drenagem residual. As suas vantagens metodológicas passam por (Vallabhaneni, C. Chan e H. Burgess 2007):

(i) apenas necessita de dados de caudal e precipitação monitorizados, sem necessidade de informação hidrológica complementar ou de modelação física detalhada do meio recetor;

(ii) a sua decomposição em três componentes temporais distintas permite rotular um significado hidrológico aos parâmetros calibrados, facilitando a avaliação de impacto das intervenções de reabilitação, aplicando fatores de redução específicos a cada componente bem como uma previsão do impacto da componente rápida e lenta nos caudais de ponta e nos volumes totais de afluências indevidas;

(iii) revela-se adequado para aplicações mais complexas com múltiplos eventos pluviométricos, sub-bacias com tipologia e estado de conservação heterogéneas;

(iv) sensível à variação sazonal, conseguindo simular a resposta da rede em condições de tempo húmido, logo que existam medições temporais de caudal e precipitação ao longo das várias estações do ano, permitindo a adaptação a contextos em que o nível freático ou o teor de humidade do solo variam significativamente.

# 3
# MODELAÇÃO HIDRÁULICA DE UMA REDE DE DRENAGEM

## 3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A modelação de uma rede de drenagem de águas residuais é um instrumento essencial no estudo e gestão deste tipo de infraestruturas, permitindo estudar e simular o comportamento do escoamento da rede em variados cenários e em diferentes condições. Com a crescente urbanização das malhas urbanas e alteração ao padrão natural do escoamento das águas pluviais, bem como a necessidade de drenagem das águas residuais provenientes da utilização doméstica e industrial, torna-se essencial prever o comportamento das redes quando submetidas a eventos de pluviosidade elevada e/ou acréscimo de ligações de águas residuais resultantes da construção de novos edifícios. Esta análise de comportamento da rede possibilita a identificação de pontos críticos que poderão ser sujeitos a intervenção de correção ou de reabilitação.

Na presente Tese, a análise hidráulica é realizada recorrendo a ferramentas informáticas de simulação, como o SWMM *(Storm Water Management Model)*, da US EPA (*Environmental Protection Agency)*, que consiste num modelo dinâmico de precipitação-escoamento onde é possível a modelação dos diversos processos hidrológicos, do escoamento superficial e do transporte da água na rede, a análise da qualidade da água bem como a simulação de diferentes cenários de controlo. A simulação tem por base a rede projetada ou desenhada no próprio *software* onde são introduzidos os dados locais da rede e da bacia de drenagem, desempenhando estes um papel preponderante na obtenção de resultados fidedignos pelo que a sua aferição assume um papel crucial na correta modelação de uma rede de drenagem.

A análise da simulação é decisiva na avaliação de potenciais áreas onde podem ocorrer extravasamentos e inundações e quais as diferentes medidas que são passíveis de serem aplicadas para mitigar os estragos e, permitindo avaliar o impacto de novos empreendimentos urbanos no escoamento da rede e como gerir os sistemas de drenagem existentes, simulando o seu funcionamento sob diferentes condições.

## 3.2 CONSTRUÇÃO DE UM MODELO HIDRÁULICO

A modelação de sistemas de drenagem urbana é um processo complexo que envolve a definição matemática e computacional do comportamento hidráulico desses sistemas. O seu principal objetivo passa pela simulação do escoamento superficial e do transporte de águas residuais pluviais e domésticas, permitindo a avaliação de infinitos cenários visando a análise e otimização da rede em estudo. O processo contempla várias etapas:

- Recolha de dados - construção do modelo exige uma grande quantidade de dados para que se possa definir os diferentes componentes do sistema de drenagem, incluindo:
    - Dados topográficos, como Mapas Topográficos para caracterizar a elevação e a declividade do terreno bem como os limites da bacia de drenagem;
    - Dados hidrológicos, de precipitação, recorrendo por exemplo a equipamentos de medição *in loco*, para caracterizar os diferentes eventos de pluviosidade necessários ao estudo a desenvolver;
    - Dados hidráulicos, relativos aos diversos componentes da rede de drenagem como por exemplo, o traçado da rede, comprimentos e diâmetros de coletores, cotas das diferentes câmaras de visita, materiais utilizados nos coletores, estações elevatórias, bacias de drenagem e outros componentes que façam parte da rede em estudo;
    - Dados de uso e ocupação do solo, para aferir a permeabilidade das diferentes superfícies e avaliar qual o escoamento superficial.
- Construção do modelo, utilizando o software de simulação hidráulica inserido no SWMM e onde é realizada a representação e definição tanto de todos os componentes da rede de drenagem como da área drenar e, também, de todas as topologias de superfície nela inseridas (por exemplo cotas de terreno, coeficientes de escoamento).

- Calibração e validação do modelo - após a construção do modelo, é necessária a calibração de vários parâmetros do *software* para permitir que a simulação reproduza resultados de escoamento satisfatórios e semelhantes a caudais de referência e de comparação já previamente medidos.
- Simulação de cenários, depois de calibrados os diferentes parâmetros do software, podem ser testados diferentes cenários onde a rede de drenagem é colocada em diferentes condições de exploração de forma a verificar o seu comportamento.

### 3.2.1 *Storm Water Management Model (SWMM)*

O Storm Water Management Model (SWMM) é um *software* que consiste num modelo dinâmico de simulação de precipitação-escoamento desenvolvido pela US EPA (*Environmental Protection Agency)* e é utilizado para a gestão de drenagem urbana através da simulação e qualidade do escoamento superficial, especialmente nas áreas urbanas (Piqueiro 2020).

O *software* em causa permite a simulação para eventos únicos e de longo prazo de precipitação bem como a drenagem de águas residuais. A simulação é desenvolvida numa escala temporal e espacial, dividindo a área em estudo em áreas de captação, de dimensão menor e definidas como sub-bacias. O escoamento superficial é depois conduzido para um ponto de saída de cada sub-bacia onde pode ser feita a ponte com o sistema de drenagem a jusante. O conjunto versátil de ferramentas disponibilizado na sua interface é utilizado para definir os escoamentos superficiais e as contribuições externas de adução ou vazão, por intermédio de uma rede com variadas estruturas de transporte (Piqueiro 2020).

A simulação permite também considerar vários cenários hidrológicos que podem influenciar o escoamento tais como(Piqueiro 2020):

- Precipitações variáveis no tempo;
- Evaporação de águas em planos de água;
- Acumulação e degelo da neve;
- Interceção dos escoamentos pluviais por armazenamento em bacias de retenção;
- Infiltração das precipitações em camadas do solo não saturadas;
- Percolação de água infiltrada nas camadas dos aquíferos;
- Troca de escoamentos entre os aquíferos e o sistema de drenagem;
- Modelação do escoamento superficial por ação de albufeiras e outros reservatórios;

- Captação e retenção das precipitações e dos escoamentos em diversos dispositivos de baixo impacto.

Para além das características supramencionadas associadas à Modelação Hidráulica, o SWMM também possui a capacidade ao nível da Modelação da Qualidade, podendo estimar a produção e a evolução de cargas poluentes associadas ao escoamento, contemplando os seguintes processos (Piqueiro 2020):

- Acumulação do poluente durante o tempo seco, para diferentes usos do solo;
- Lixiviação do agente poluente como função do tipo de uso de solo;
- Contribuição direta decorrente da própria chuva;
- Redução da poluição acumulada devido à limpeza da rua;
- Redução da carga de poluentes arrastados pela enxurrada devido a boas práticas de exploração;
- Entrada de águas residuais em tempo seco e outras contribuições externas a especificar, em qualquer ponto do sistema de drenagem;
- Propagação de substâncias associadas à qualidade de água ao longo do sistema de drenagem (modelação espacial);
- Redução na concentração do poluente por meio de tratamentos em reservatórios ou devido a processos naturais em tubagens, aquedutos e canais;

Na presente dissertação, o SWMM, foi utilizado como base de construção da rede existente na área de estudo, aproveitando os ficheiros de *input* que são gerados pelo programa após a inserção dos dados reais. E, estes dados são posteriormente exportados para os *plugins* em *Python*. Nesta linguagem de programação que será definida em 3.2.2., é realizada a simulação e calibração dos parâmetros, de forma a obter os valores mais próximos possível do real medido *in loco*. Esta análise permite calibrar e definir o comportamento base da rede de drenagem, contemplando as afluências indevidas e, posteriormente, simular e analisar o comportamento da rede sobre os mais variados eventos críticos de precipitação.

## 3.3 PYTHON E O SWMM

Python, é uma linguagem de programação amplamente utilizada na *Data Science* e em *Machine Learning*. Lançada no início da década de 1990, por *Guido van Rossum*, Python foi criada com foco na simplicidade, contrariando as linguagens utilizadas na época para que, programadores de todos os níveis de experiência, conseguissem ler, perceber e escrever rapidamente qualquer código. *Guido*, ao lançar este projeto de forma *Open Source* permitiu a curiosos que partilhassem a mesma paixão pela simplicidade, inspecionarem o código e contribuir para o crescimento da linguagem, corrigindo qualquer *bug* ou problema, e fazendo sugestões abertas sobre a evolução da mesma.

A programação em *Python* ganhou nestes últimos anos o indisputável trono como "a linguagem para AI" devido às suas bibliotecas dedicadas à visualização de dados e manipulação numérica e matricial. Estas *open source*, atraíram uma comunidade enorme de investigadores e programadores, que não só contribuíram diretamente para o crescimento e afinação das bibliotecas, mas também para a criação de fóruns de resolução de problemas e outros recursos como tutoriais de aprendizagem. A natureza *interpreted* de Python, aliada à sua rapidez de escrita permite, num processo de rápida exploração ou prototipagem, organizar a lógica por módulos e correr *snippets* de código de forma interativa – ao contrário de linguagens compiladas que executam, de início a fim, sem fácil observabilidade ou adaptação durante o processo. Esta qualidade permite a um programador ir visualizando o estado após cada pedaço de código executado e, se necessário, adaptar o seu programa antes de avançar para os passos seguintes, como executar algum tratamento extra nos dados.

As "bibliotecas" revelaram-se cruciais para o desenvolvimento desta dissertação essencial para a simulação e calibração do Modelo, aproveitando bibliotecas existentes por exemplo, desenvolvidas pela *Open Water Analytics* (OWA) (wateranalytics.org, s.d.).

O projeto PySWMM, em conjunto com o desenvolvimento do SWMM5-API, está a ser desenvolvido pela OWA, de forma a permitir que o Python consiga aceder ao modelo do SWMM e permitindo acelerar o processo de modelação bem como alterar as configurações de um dado modelo, dentro da própria simulação. O PySWMM possui melhorias ao código base do SWMM, permitindo ampliar as capacidades físicas da rede, introduzir caudais pontuais externos nos diferentes nós e manipular os parâmetros que caracterizam os dispositivos de controlo de baixo impacto (LID) (Barnhart 2020).

O PySWMM produz uma estrutura única que consegue acoplar uma série de funções do SWMM, facilitando a edição de parâmetros hidrológicos e da rede. Este funcionamento permite que os modelos de escoamento sejam otimizados com mais celeridade, aumentando a eficácia da abordagem à resolução das problemáticas associadas ao escoamento de águas pluviais e residuais (Barnhart 2020).

## 3.4 FUNÇÕES OBJETIVO E MÉTRICAS DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

As funções objetivo constituem a medida escalar que procuram traduzir, através de um número, a qualidade do ajuste entre o hidrograma simulado e o hidrograma real, enquanto o algoritmo de otimização procura maximizar tal medida que assume valores de classificação diferentes para cada função objetivo. Cada "função objetivo" privilegia aspetos diferentes da forma do hidrograma, como o ajuste aos picos de caudal, aos caudais baixos ou o volume total.

O presente subcapítulo descreve em detalhe as três "funções objetivo" utilizadas nesta dissertação, (i) o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE), (ii) a sua variante logarítmica (logNSE) e (iii) o coeficiente de eficiência de Kling-Gupta (KGE). Adicionalmente foram também calculadas três métricas clássicas, o coeficiente de determinação ($R^2$), o erro quadrático médio (RMSE) e o erro percentual de volume (PBIAS).

### 3.4.1 Coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE)

O coeficiente de Nash-Sutcliffe foi proposto em 1970, numa tentativa de criar uma forma sistemática de desenvolver e testar modelos hidrológicos. Constitui o critério de ajuste mais difundido na modelação hidrológica e é definido pela seguinte expressão:

$$NSE = 1 - \frac{\sum(Q_{obs,t} - Q_{sim,t})^2}{\sum(Q_{obs,t} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (3.1)$$

onde $Q_{obs,t}$ e $Q_{sim,t}$ corresponde ao caudal observado e caudal simulado no instante $t$ e $\overline{Q_{obs}}$ corresponde à média dos caudais observados. No numerador é contabilizado o erro quadrático da simulação e o denominador avalia a variância das observações face à média dos caudais observados.

Os valores de NSE, segundo Moriasi et al. 1983, são compreendidos entre o valor de 1 - correspondente ao ajuste perfeito, e o valor de 0 significa que o modelo adotado não é melhor do que aquele de prever, em todos os instantes, a média dos caudais observados e, valores negativos, que indicam que o desempenho do modelo é inferior ao apenas usar a média dos caudais observados.

A característica mais relevante do NSE, resulta do facto de os desvios tanto no numerador como no denominador, serem elevados ao quadrado, conduzindo a que as diferenças de maior grandeza que ocorrem nos caudais elevados, vão dominar a soma. Pelo contrário, os erros mais pequenos, característicos de caudais mais baixos, quase não penalizam o resultado obtido. Desta forma, o NSE é um critério orientado para os picos de hidrograma recompensa a reprodução da resposta rápida, correspondente aos parâmetros $R_1$ e $T_1$.

### 3.4.2 Coeficiente NSE logarítmico (logNSE)

O coeficiente logNSE resulta de, na expressão do NSE anterior, introduzir os valores dos caudais sob a forma de logaritmos naturais, conforme a seguinte expressão:

$$logNSE = 1 - \frac{\sum(ln\, Q_{obs,t} - ln\, Q_{sim,t})^2}{\sum(ln\, Q_{obs,t} - \mu_{ln})^2} \quad (3.2)$$

Sendo que comparativamente ao cálculo do NSE a variável, $\mu_{ln}$ designa a média dos logaritmos dos caudais observados. A implementação do logaritmo natural comprime a gama alta do hidrograma e expande a gama baixa, modificando completamente a distribuição do peso dos erros quadráticos do denominador e do numerador e, por consequência, um erro relativo de 50% no caudal de base passa a pesar tanto quanto um erro no pico do hidrograma. Por este motivo, o logNSE é o espelho do NSE, sendo um critério orientado para o ajuste aos caudais baixos e para as recessões em detrimento da reprodução fiel dos picos.

Dada a indefinição do logaritmo para valores de caudais nulos, as séries temporais com zeros requerem tratamento prévio dos dados, removendo estes registos ou considerando um valor muito baixo. Outra precaução a ter com o logNSE passa pelo facto de, ao amplificar o peso relativo dos caudais baixos, o chamado 'ruído' de medição também é amplificado, aspeto que é relevante em séries com muitos registos de caudal próximos do limiar de deteção do equipamento.

### 3.4.3 Coeficiente de eficiência de Kling-Gupta (KGE)

O KGE foi proposto for (Gupta et al. 2009) com a perspetiva de colmatar as limitações do NSE e é calculado através da expressão:

$$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + (\alpha-1)^2 + (\beta-1)^2} \quad (3.6)$$

Em vez de misturar os três aspetos do ajuste num único número de forma implícita, o KGE trata-os como três qualidades independentes, forma, amplitude e volume, medindo explicitamente a proximidade ao valor ideal em cada uma. Cada componente descreve um aspeto diferente do hidrograma simulado. O *r*, ou coeficiente de correlação linear refere-se à adequabilidade da simulação aos momentos em que o caudal sobe e desce e se o faz da forma ideal, capturando a mesma informação do parâmetro $R^2$. A razão de variabilidade, α, analisa se as oscilações têm a dimensão certa, um valor de α = 1, indica que os picos e as recessões têm a profundidade certa. Por outro lado, α < 1 indica um hidrograma exagerado e α > 1 denuncia um hidrograma demasiado achatado. Por fim, a razão de média, β, em que $\beta = \mu_{sim}/\mu_{obs}$ refere-se ao volume total e reflete o ajuste do volume simulado face ao observado, um β = 1.20, por exemplo, indica que a simulação sobrestima o volume em 20%. O ajuste perfeito corresponde, portanto, a (r, α, β) = (1,1,1).

Em contexto de calibração, existem duas propriedades que tornam o KGE especialmente adequado. Em primeiro lugar, as componentes são individualmente diagnosticáveis permitindo perceber se o problema está na forma (*r*), na amplitude (α) ou no volume (β). Em segundo lugar, o KGE elimina o incentivo característico do NSE à subestimação dos picos.

Importa referir, contudo, que a escala de KGE não é idêntica à do NSE. (Knoben, Freer e Woods 2019) demonstraram que o desempenho equivalente ao NSE = 0 ocorre para um KGE = -0.41.

### 3.4.4 Raiz do erro quadrático médio (RMSE)

Contrariamente aos critérios adimensionais, o RMSE tem como unidade L/s e indica o erro típico da simulação em cada instante. O RMSE é definido pela seguinte expressão, em que *n* é o número de registos:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{t}\left(Q_{sim,t} - Q_{obs,t}\right)^2} \quad (3.4)$$

Analogamente ao NSE, dá mais ênfase aos caudais elevados e não é comparável entre bacias ou períodos com gamas de caudal diferentes, motivo pelo qual se usa como mero complemento de análise e não como critério de classificação.

### 3.4.5 Erro percentual de volume (PBIAS)

O PBIAS é uma métrica que se refere ao erro percentual de volume, quantificando o desvio acumulado entre os volumes simulados e observados ao longo do período de análise e é representado pela seguinte expressão:

$$PBIAS = 100 \cdot \frac{\sum_t \left(Q_{sim,t} - Q_{obs,t}\right)}{\sum_t Q_{obs,t}} \quad (3.5)$$

Para valores positivos de PBIAS podemos considerar que o modelo sobrestima o volume observado e o no caso contrário indica que o modelo subestima o volume observado. O valor ótimo é zero indicando um ajuste perfeito no volume das duas séries.

### 3.4.6 Coeficiente de Determinação $R^2$

O coeficiente de determinação, $R^2$, reflete o quadrado do coeficiente de correlação linear, entre as séries observada e simulada, e é calculado segundo a expressão:

$$R^2 = \frac{\left[\sum\left(Q_{obs,t} - \overline{Q_{obs}}\right)\left(Q_{sim,t} - \overline{Q_{sim}}\right)\right]^2}{\sum\left(Q_{obs,t} - \overline{Q_{obs}}\right)^2 \cdot \sum\left(Q_{sim,t} - \overline{Q_{sim}}\right)^2} \quad (3.3)$$

Os valores de $R^2$ variam entre 0 e 1 e quantifica a relação entre a fração variância dos caudais observados com qualquer tipo de desenvolvimento linear da simulação. Em termos práticos, o caudal observado oscila permanentemente, sobe nos eventos de precipitação e desce em períodos secos ou de menor consumo sendo que $R^2$ quantifica a percentagem dessas oscilações que a simulação modelada acompanha. Um $R^2$ de 0,85 traduz-se em 85% do movimento do caudal observado em torno da sua média ocorre em sintonia com o movimento da simulação.

A limitação desta métrica está associada ao facto de apenas procurar linearidade entre as séries. Uma simulação que reproduza metade do caudal observado em todos os instantes tem os pontos perfeitamente alinhados sobre uma reta de declive 0,5 e obtêm um $R^2 = 1$ apesar de errar a amplitude em 50% e o volume em metade. Por este motivo, o $R^2$ constitui uma métrica que é insensível a erros de amplitude e de volume e não deve ser interpretado isoladamente.

### 3.4.7 Síntese das funções objetivo

No desenvolvimento da presente dissertação foram utilizadas as seguintes 3 funções objetivo:

(i) NSE;

(ii) logNSE;

(iii) KGE.

A escolha destas três funções resulta do seu carácter complementar face às componentes do hidrograma que se pretende reproduzir. Dado que as afluências indevidas integram simultaneamente uma componente rápida e uma componente lenta, nenhuma métrica isolada garante uma calibração equilibrada. A utilização das três funções objetivo, em calibrações independentes, permite avaliar a sensibilidade dos parâmetros ótimos à função escolhida e identificar a solução mais robusta para o caso de estudo. A Tabela 1 resume as propriedades das três funções objetivo usadas nesta dissertação. Na ótica da calibração do modelo em condições de afluências indevidas, o NSE reforça a calibração no sentido de aproximar à componente rápida, o logNSE orienta a calibração para a componente lenta e o KGE procura um equilíbrio entre a forma e o balanço de volume.

Tabela 1: Síntese comparativa dos três critérios de calibração adotados.

| Função | Ênfase | Intervalo | Ótimo | Limitação |
|---|---|---|---|---|
| **NSE** | Picos e caudais elevados | (−∞; 1] | 1 | Subestima a variabilidade; quase insensível aos caudais baixos e ao balanço de volume |
| **logNSE** | Caudais baixos e recessões | (−∞; 1] | 1 | Atenua os erros nos picos; indefinido para caudais nulos |
| **KGE** | Compromisso forma–variabilidade–volume | (−∞; 1] | 1 | Escala não comparável à do NSE (referência da média em ≈ −0,41) |

## 3.5 ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO: SHUFFLED COMPLEX EVOLUTION – UNIVERSITY OF ARIZONA

A calibração do modelo hidráulico consiste em determinar qual o conjunto de parâmetros que minimiza a diferença entre o caudal simulado e o caudal observado no medidor na secção em que foram realizadas medições. Este conjunto de parâmetros constitui um vetor de valores, chamado θ, composto pelos nove parâmetros do método RTK: $R_1$, $T_1$, $K_1$, $R_2$, $T_2$, $K_2$, $R_3$, $T_3$, $K_3$. De forma a poder quantificar o ajuste entre a curva de caudais simulada e a curva real foram utilizadas funções-objetivo e procurou-se o vetor θ que otimiza esta função.

A maior dificuldade na resolução deste problema de calibração, reside na forma como a função objetivo varia no espaço com as várias dimensões dos parâmetros envolvidos, que se designará de F(θ), e em que os modelos de precipitação-escoamento não apresenta uma superfície regular, mas antes com múltiplos ótimos locais, regiões de descontinuidade, curvas de nível encurvadas que refletem a interligação entre parâmetros e ainda, sensibilidades muito desiguais consoante o parâmetro. (Duan, Sorooshian e Gupta 1992)

Nestas condições, os métodos de otimização local como é o caso, tendem a convergir para o ótimo mais próximo do ponto de partida da calibração, que raramente coincide com o conjunto ótimo global. Com o intuito de superar esta limitação, foi desenvolvido *Shuffled Complex Evolution – University of Arizona (SCE-UA)*, o algoritmo de otimização global adotado nesta dissertação.

A integração computacional da calibração usando este algoritmo assentou na utilização de uma biblioteca Python, *spotpy (Statistical Parameter Optimization Tool for Python)*, que disponibiliza, sob uma interface comum, um conjunto de algoritmos de otimização, entre os quais o SCE-UA bem como uma biblioteca de funções objetivo também usadas neste estudo.

O SCE-UA combina quatro conceitos:

1. Pesquisa aleatória controlada: Ao invés de partir de um único ponto (vetor de parâmetros), o método inicia-se com uma população de pontos distribuída de forma aleatória por todo o espaço definido pelos intervalos de parâmetros, assegurando desde o início uma cobertura global do domínio.
2. Evolução por *simplex*: A cada subconjunto de pontos, são aplicados os movimentos de reflexão e contração do método de *Nelder-Mead*, conferindo à procura uma direção eficiente para as regiões de melhor desempenho.

3. Evolução competitiva: Os pontos de pior desempenho são substituídos com maior probabilidade, mas forma aleatória e ponderada, mantendo a diversidade da população de pontos.
4. Mistura de complexos (*shuffling*): Todos os pontos são reunidos numa única população, misturados e redistribuídos por novos complexos, o que permite a partilha de informação descoberta por cada complexo e impede a convergência precoce para ótimos locais.

Cada ponto constitui um vetor, com um número de parâmetros denominado de *n* que, no caso desta dissertação e do modelo RTK, constitui n = 9 parâmetros. O procedimento de cálculo inicia-se por organizar a população em conjunto de pontos designados por complexos – *p*, cada um com uma quantidade – $m = 2n + 1$ pontos (*m* refere-se à quantidade de pontos por complexo), num espaço total de amostragem – *s*, de $s = p \times m$. Nas próximas etapas o algoritmo desenrola-se da seguinte forma:

1. Amostra inicial: Geram-se pontos aleatórios nos intervalos, ou domínio, definido pelos limites dos intervalos de cada *n* parâmetro e avalia-se a função objetivo em cada um sendo que é feita uma simulação por ponto;
2. Ordenação: Os *s* pontos são ordenados por desempenho crescente;
3. Divisão em complexos: Os pontos são distribuídos pelos *p* complexos de forma intercalada, ou seja, o primeiro ponto é inserido no complexo 1, o segundo para o 2, e assim sucessivamente, garantindo que cada complexo contém igualmente pontos bons e maus;
4. Evolução dos complexos: Cada complexo evolui de forma independente, selecionam-se aleatoriamente, com viés para os melhores, n + 1 pontos que formam um *simplex*. De seguida, identifica-se o pior e faz-se uma reflexão através do centróide dos pontos restantes. No caso de a reflexão não melhorar o desempenho ou sair do domínio, é feita uma contração, ainda assim, se ambas falharem, é gerado um novo ponto aleatório, o que assegura que conseguimos fugir a fundos/ótimos locais.
5. Baralhamento: São reunidos e reordenados todos os pontos e, de seguida, retoma-se a etapa 3.
6. Critério de paragem: O processo termina ao ser atingido um número máximo de avaliações da função objetivo ou quando se verifica uma estabilização de F, a função objetivo.

De seguida apresenta-se o procedimento e a mecânica do processo em causa, num exemplo numérico reduzido, acompanhado passo a passo. Considerou-se uma configuração com apenas s = 6 pontos (p = 2; complexos de m = 3 pontos) e mantiveram-se os nove parâmetros RTK cujo espaço de intervalo foi definido com base em valores estabelecidos por (Vallabhaneni, C. Chan e H. Burgess 2007) na Tabela 5-2 para os valores de R e K. Os valores de R, dado serem específicos a cada evento e a cada bacia, foram atribuídos com um rácio baixo, correspondendo a uma baixa percentagem de precipitação. Os valores considerados estão indicados na Tabela 2.

Tabela 2: Intervalos de procura dos nove parâmetros RTK (valores de T e K segundo Vallabhaneni, Chan e Burgess, 2007, Tabela 5-2).

| Parâmetro | Limite inferior | Limite superior |
|---|---|---|
| **R1** | 0,00 | 0,10 |
| **R2** | 0,00 | 0,10 |
| **R3** | 0,00 | 0,15 |
| **T1 (h)** | 0,50 | 2,00 |
| **K1** | 1,00 | 2,00 |
| **T2 (h)** | 3,00 | 5,00 |
| **K2** | 2,00 | 3,00 |
| **T3 (h)** | 5,00 | 10,00 |
| **K3** | 3,00 | 7,00 |

Dentro deste intervalo são gerados s = 6 pontos aleatórios, dentro dos intervalos da Tabela 1 e calcula-se o valor da função objetivo F (por ex. NSE) para cada um deles. Na Tabela 2 são apresentados valores indicativos, a título de exemplo:

Tabela 3: População inicial do exemplo reduzido e desempenho associado.

| Ponto | R1 | R2 | R3 | T1 | K1 | T2 | K2 | T3 | K3 | F |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| P0 | 0,051 | 0,095 | 0,022 | 1,923 | 1,312 | 3,847 | 2,828 | 7,046 | 5,198 | −0,3074 |
| P1 | 0,003 | 0,075 | 0,081 | 0,995 | 1,788 | 3,606 | 2,453 | 5,670 | 4,612 | +0,3176 |
| P2 | 0,020 | 0,026 | 0,113 | 0,921 | 1,485 | 4,961 | 2,962 | 8,624 | 5,165 | +0,2389 |
| P3 | 0,028 | 0,016 | 0,145 | 1,274 | 1,116 | 4,247 | 2,777 | 8,065 | 6,669 | −0,0018 |
| P4 | 0,004 | 0,053 | 0,069 | 0,594 | 1,641 | 4,705 | 2,593 | 6,300 | 6,360 | +0,3359 |
| P5 | 0,051 | 0,051 | 0,113 | 0,722 | 1,820 | 4,367 | 2,787 | 5,958 | 6,209 | +0,2104 |

Os valores de NSE são depois ordenados de forma decrescente, resultando na seguinte ordem: P4(+0,3359), P1(+0,3176), P2(+0,2389), P5 (+0,2104), P3(−0,0018) e P0(−0,3074). Realizando novamente o passo 3, acima descrito, os pontos são divididos de forma intercalada, misturando pontos bons e maus e criando dois complexos, que se designarão por A e B. Na Tabela 3 é apenas apresentado o complexo A:

Tabela 4: Complexo A antes do passo da evolução.

| Ponto | R1 | R2 | R3 | T1 | K1 | T2 | K2 | T3 | K3 | F |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A0 | 0,004 | 0,053 | 0,069 | 0,594 | 1,641 | 4,705 | 2,593 | 6,300 | 6,360 | +0,3359 |
| A1 | 0,020 | 0,026 | 0,113 | 0,921 | 1,485 | 4,961 | 2,962 | 8,624 | 5,165 | +0,2389 |
| A2 | 0,028 | 0,016 | 0,145 | 1,274 | 1,116 | 4,247 | 2,777 | 8,065 | 6,669 | −0,0018 |

Com base no descrito no passo 4, o primeiro passo consiste em identificar o pior ponto, neste caso, o ponto A2, que o algoritmo irá tentar melhorar. Os restantes A0 e A1, formam a base do *simplex*. Calcula-se o centróide dos melhores, isto é, a média, parâmetro a parâmetro, de A0 e A1. Segue-se a reflexão do pior ponto através do centróide, na expectativa de alcançar uma região com melhor desempenho, segunda a expressão *reflexão = centróide + (centróide – pior)*, aplicada parâmetro a parâmetro.

Na Tabela 4, é calculado o centróide de A0 e A1 e a reflexão do pior ponto através do centroide bem como a sua inserção dentro dos limites já definidos para cada parâmetro na Tabela 1.

Tabela 5: Centróide de A0 e A1, ponto refletido e confirmação de limites dos intervalos definidos.

| Parâmetro | Centróide | Reflexão | Dentro dos limites? |
|---|---|---|---|
| R1 | 0,012 | −0,003 | não (< 0,00) |
| R2 | 0,040 | 0,063 | sim |
| R3 | 0,091 | 0,036 | sim |
| T1 | 0,757 | 0,240 | não (< 0,50) |
| K1 | 1,563 | 2,011 | não (> 2,00) |
| T2 | 4,833 | 5,420 | não (> 5,00) |
| K2 | 2,777 | 2,778 | sim |
| T3 | 7,462 | 6,859 | sim |
| K3 | 5,762 | 4,855 | sim |

Verificamos que para os parâmetros R1, T1, K1 e T2 a reflexão sai fora dos intervalos admissíveis pelo que o algoritmo prevê que seja feita uma contração, procurando um passo mais curto que posicione um novo ponto a meio caminho entre o centróide e o pior. Desta forma é obtido um ponto com os seguintes parâmetros:

Tabela 6: Parâmetros referentes ao novo ponto entre o centróide e o pior ponto de A1 e A0

| **R1** | **R2** | **R3** | **T1** | **K1** | **T2** | **K2** | **T3** | **K3** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **0,020** | 0,028 | 0,118 | 1,016 | 1,340 | 4,540 | 2,777 | 7,764 | 6,216 |

Usando estes parâmetros é novamente calculado o desempenho e, no caso de ainda assim o desempenho ser inferior ao ponto A2, é gerado um novo ponto aleatório.

Efetuando este procedimento para os complexos A e B, os mesmos são depois reunidos numa única população e novamente reordenados. Este processo permite que a informação que cada complexo adquiriu sobre o intervalo ótimo passe a estar disponível para a iteração seguinte. A repetição deste ciclo, centenas ou milhares de vezes, substitui sistematicamente os piores pontos por melhores conduzindo toda a população a conjunto de parâmetros (ponto) ótimo. Tendo em conta que cada avaliação feita, corresponde a uma simulação completa no SWMM com um ponto ou conjunto de parâmetros, o processo pode estender-se por várias horas de cálculo. As métricas de desempenho ($R^2$, RMSE, PBIAS) apesar de não intervirem na otimização, são também calculadas neste processo como forma de comparação e avaliação da adequação das soluções obtidas para cada função objetivo.

# 4
# CASO DE ESTUDO

## 4.1 INTRODUÇÃO

O presente capítulo é focado na modelação hidráulica de um sistema de drenagem de águas residuais existente e em exploração numa área geográfica da União de Freguesias de São Lourenço de Selho e Gominhães (parte integrante concelho de Guimarães) e na correspondente calibração parametrizada do SWMM de forma a ser possível a realização de simulações de funcionamento hidráulico do sistema de drenagem em causa.

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO DE ÁREA DE ESTUDO

### 4.2.1 Enquadramento Geográfico

O concelho de Guimarães localiza-se no Distrito de Braga, integrando a Região Norte e sub-região do Ave. São concelhos limítrofes, os Municípios de Póvoa de Lanhoso a norte, Fafe a nascente, Felgueiras, Vizela e Santo Tirso a sul, Vila Nova de Famalicão a poente e Braga a noroeste. Ao nível hidrológico, insere-se na Região Hidrográfica do Cávado, Ave e Leça e, dentro desta, na Bacia Hidrográfica do Ave (designada como RH2 pelo Sistema Nacional de Informação de Ambiente).

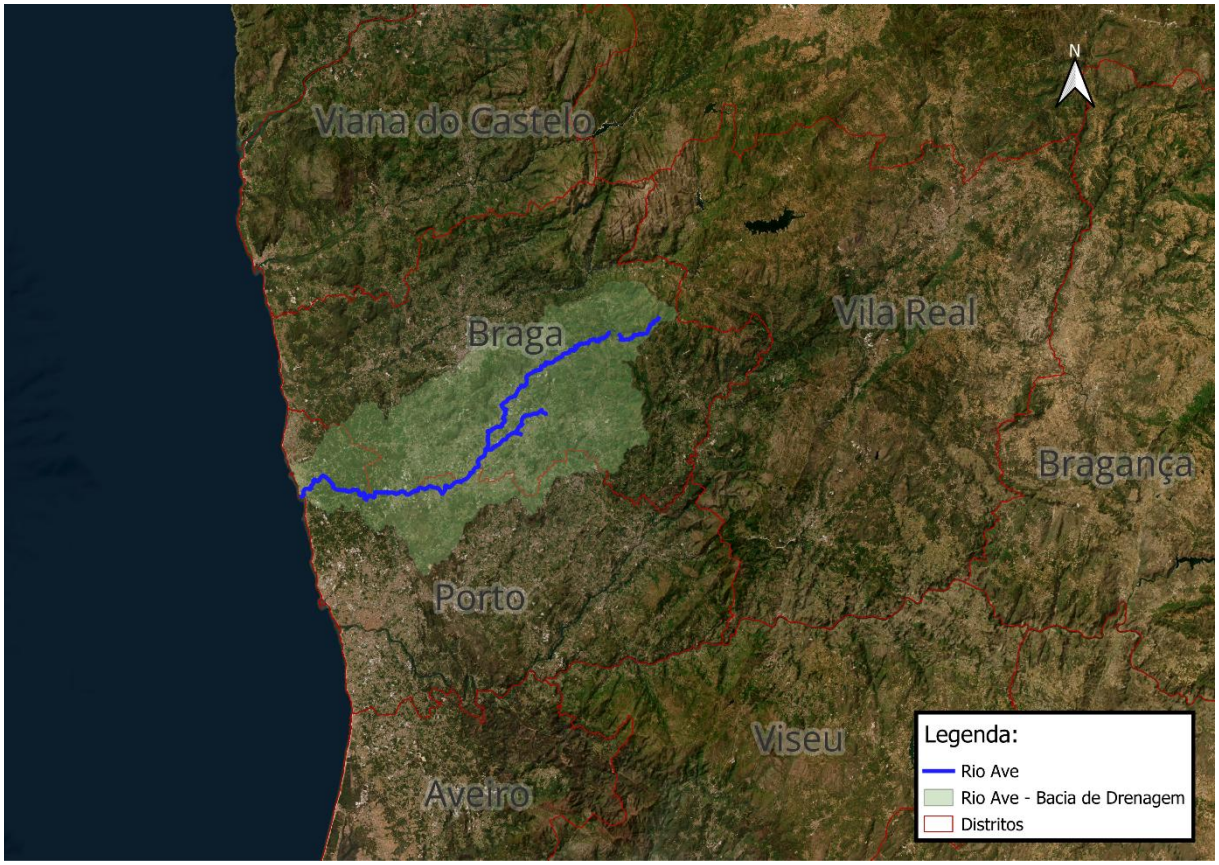



Figura 6: Rio Ave – Bacia Hidrográfica

Como se referiu, o presente caso de estudo centra-se na freguesia de São Lourenço de Selho e Gominhães atravessada pelo Rio Selho, afluente de margem esquerda do Rio Ave, cuja bacia hidrográfica é de 67,652 km$^2$, nascendo em Santa Marinha a 580 metros de altitude (Carvalho Ribeiro, Madureira Correia e da Silva Costa 2004).

A União de Freguesias de São Lourenço de Selho e Gominhães tem uma população de 2293 habitantes distribuídos por uma área de 4,15 km$^2$ e com uma tipologia de área urbana definida como "rural com industrialização". O presente caso de estudo, consiste numa área parcelar da freguesia, abarcando uma bacia de drenagem, com uma área estimada de 0,53 km$^2$, denominada de 5SELP3, de acordo com a denominação indicada pelas Águas do Norte que é a entidade gestora em "alta" para esta zona (CM Guimarães 2026).

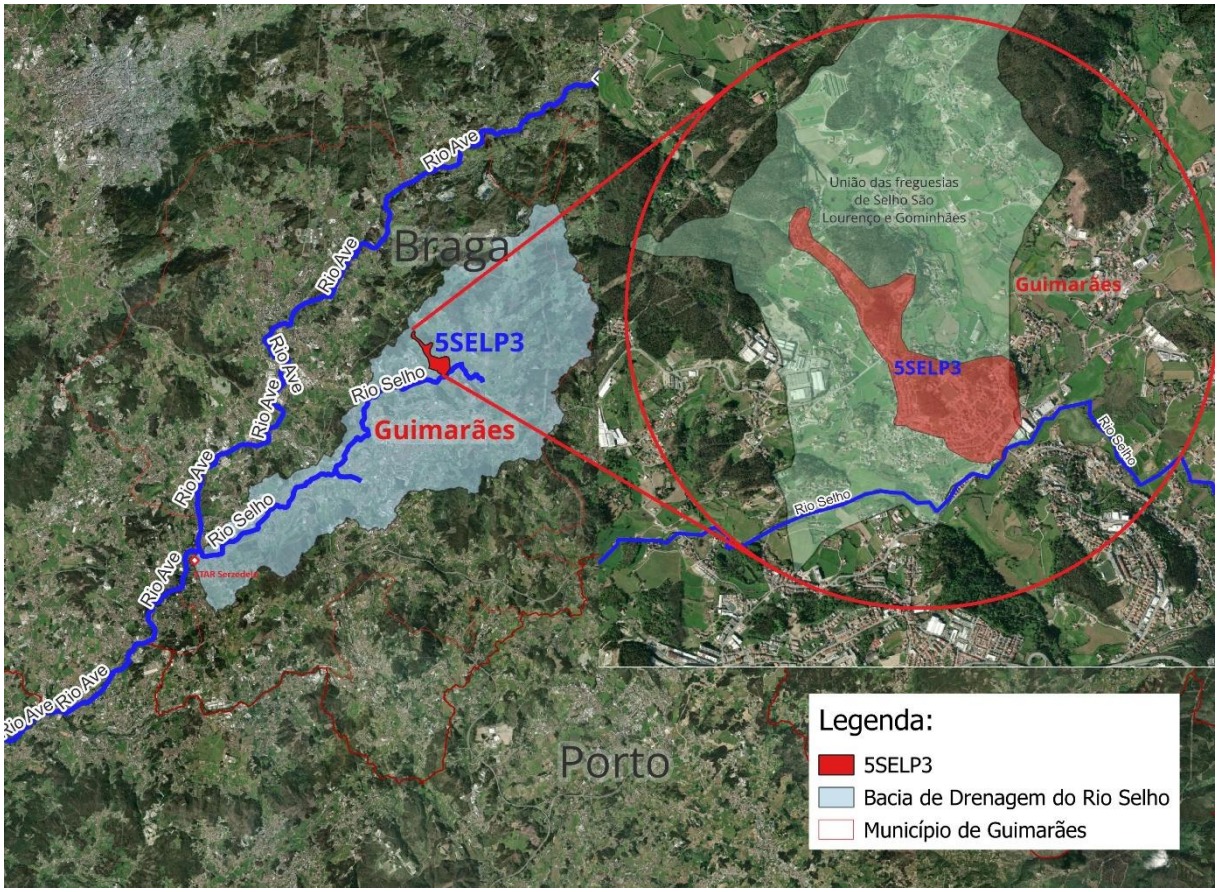



Figura 7: Enquadramento geográfico entre a área de drenagem em estudo (5SELP3) e a Bacia de Drenagem do Selho.

### 4.2.2 Caracterização Hipsométrica

A caracterização hipsométrica da bacia hidrográfica do Rio Selho foi efetuada com base no Modelo Digital de Elevação Copernicus GLO-30 e processado em ambiente QGIS. Deste cruzamento pode verificar-se que bacia do Selho tem uma forte amplitude altimétrica, oscilando entre cotas superiores a 570 metros e inferiores a 86 metros de altitude, neste caso, junto à sua confluência com o Rio Ave.

O perfil longitudinal do Rio Selho, no seu troço principal (Figura 6), foi também obtido por amostragem do Modelo Digital de Elevação Copernicus GLO-30, com pontos espaçadas de 50 metros ao longo da linha de água. O troço principal, com 15 km de extensão, apresenta uma amplitude altimétrica estimada de 108,2 m, desde o seu início com 193,6 m na Freguesia de São Torcato, até aos 85,4 m, na confluência com o Rio Ave entre as Freguesias de Serzedelo e Gondar. A inclinação média do percurso é 0,72%.

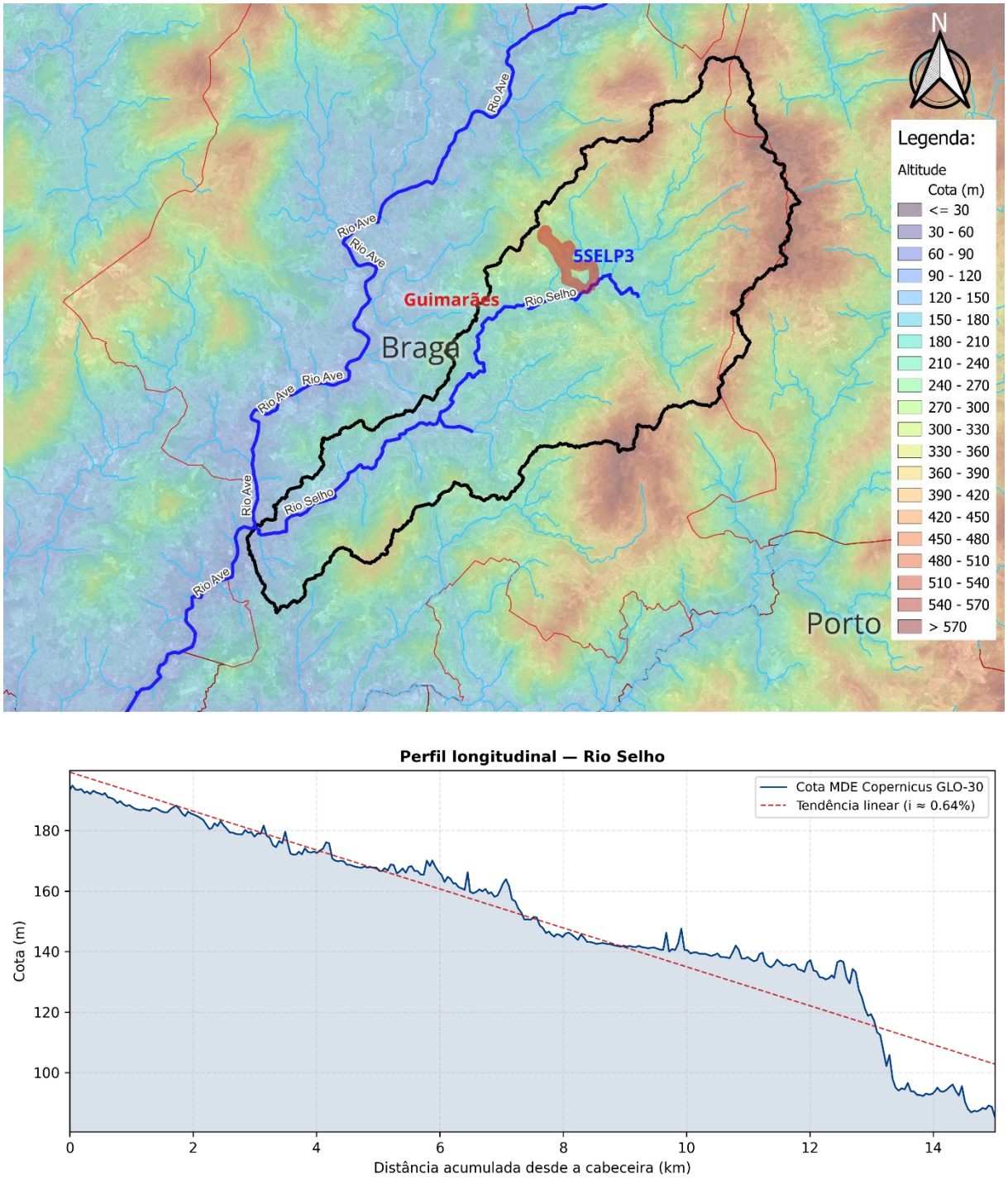



Figura 8: Hipsometria e Perfil Longitudinal do Rio Selho.

### 4.2.3 Pluviosidade

A definição do regime de pluviosidade foi realizada aproveitando as ferramentas disponíveis no QGIS, neste caso, as estatísticas zonais sobre os dados mensais fornecidos no site *WorldClim* filtrados sobre a zona do Município de Guimarães. Pela análise da sobreposição dos Mapas é possível verificar que precipitação anual na Bacia de Drenagem do Selho é entre os 1200 a 1400 mm distribuída de forma desigual ao longo do ano (Figura 7). O período húmido decorre de outubro a março concentra cerca de 72% de toda a precipitação anual, com máximos em dezembro (207 mm) e janeiro (190 mm). O período mais seco engloba os meses de julho e agosto, com valores de 21 mm e 26 mm respetivamente. De notar que os valores apresentados no *WorldClim* são referentes às médias totais de precipitação ocorridas em cada mês, associados a um período de referência entre 1970 a 2000 (worldclim.org 2020).

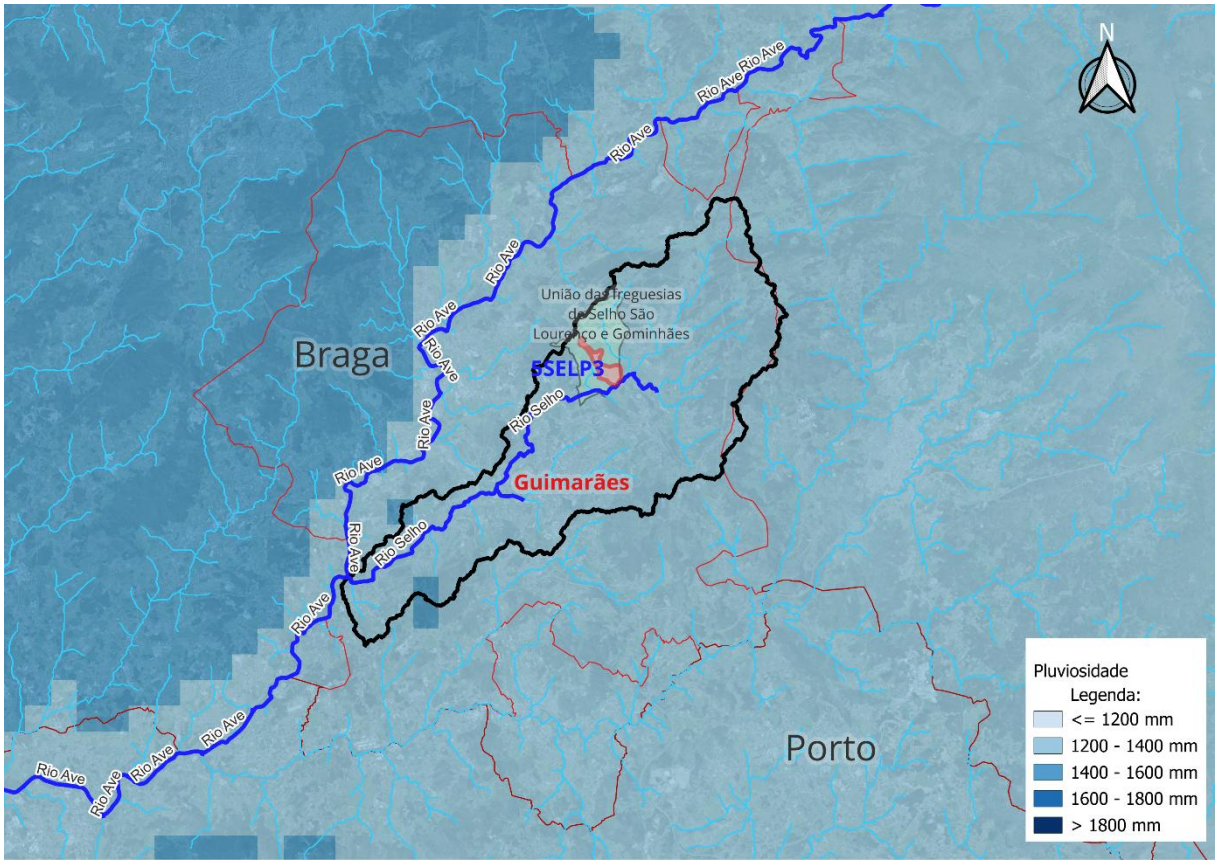



Figura 9: Pluviosidade média anual no Município de Guimarães (worldclim.org 2020)

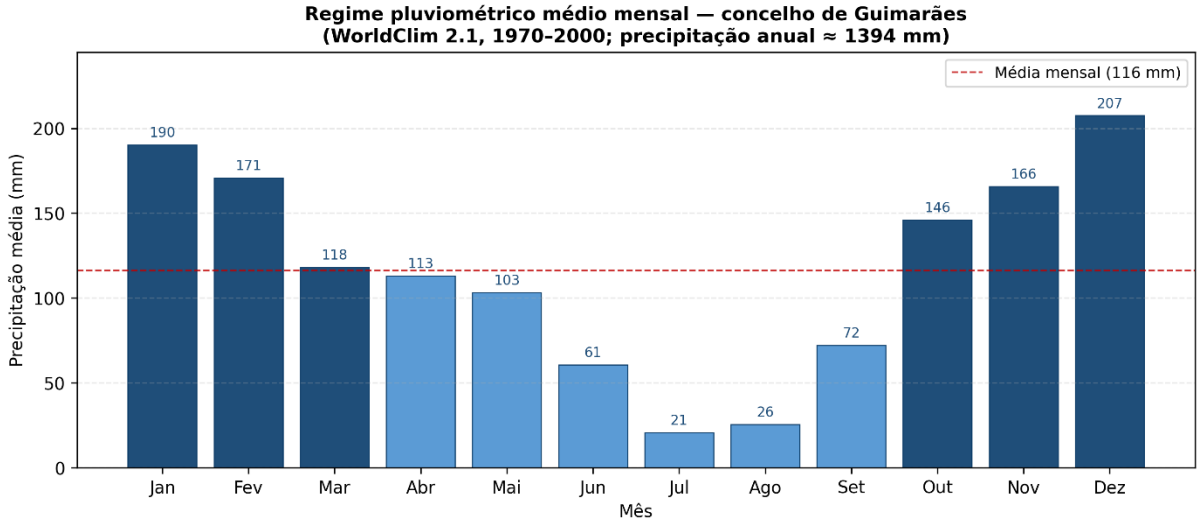



Figura 10: Precipitação média mensal no Município de Guimarães.

De forma a conhecer a frequência de ocorrência de eventos de pluviosidade foi, também, avaliada, utilizando os dados disponibilizados pelo IPMA na estação mais próxima, em Merelim, Braga, com dados correspondentes a uma série temporal mais longa. Pela análise da Figura 9, constata-se a marcada sazonalidade no número de dias com chuva e na sua correspondente intensidade. Segundo as Normais Climatológicas do IPMA, regista-se uma média de 113 dias por ano com uma precipitação superior a 1 mm. Considerando limiares cumulativos, 47 desses dias com uma precipitação superior a 10 mm, 21 apresentam precipitação superior a 20 mm e 10 correspondem a eventuais torrenciais, superiores a 30 mm (Instituto Português do mar e da Atmosfera 2026).

A concentração temporal dos eventos e, em particular, dos eventos de maior intensidade é relevante nos efeitos das afluências indevidas diretas nos sistemas de drenagem locais, e em estudo.

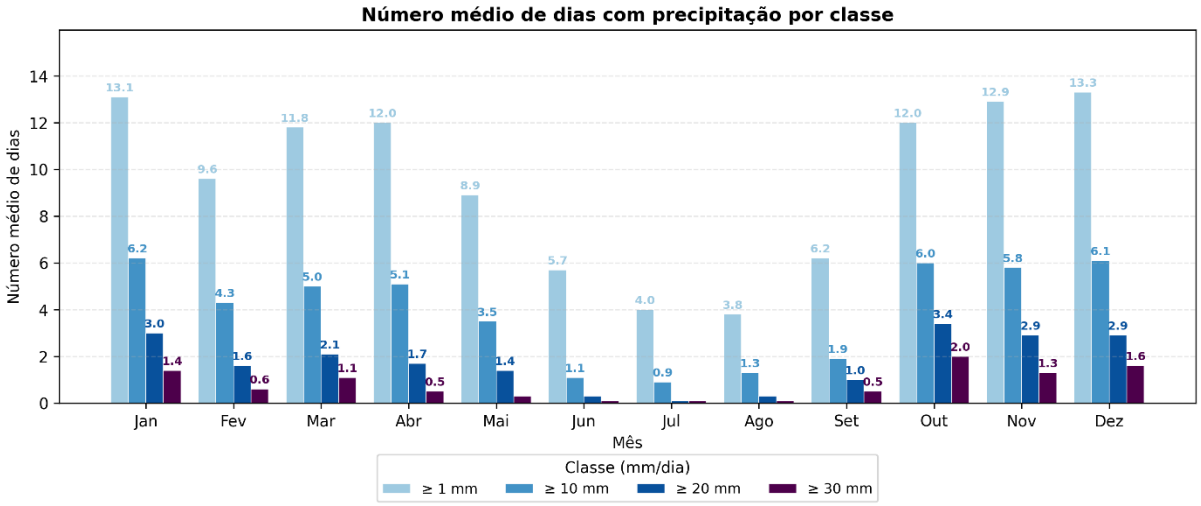



Figura 11: Normais Climatológicas - Estação Merelim Braga (2001-2020) (Instituto Português do mar e da Atmosfera 2026).

### 4.2.4 Uso e Ocupação do Solo

O Uso e Ocupação do Solo foram caracterizados com base na Carta de Uso e Ocupação do Solo de Portugal Continental para 2018, publicada pela Direção Geral do Território. A análise cartográfica revela ao nível da freguesia uma matriz territorial mista onde se pode verificar três padrões dominantes: (i) núcleo urbano consolidado a Sul, alinhado com o Rio Selho; (ii) zonas florestais nas zonas mais elevadas a Norte; (iii) parcelas agrícolas heterogéneas de transição entre a zona urbana e a zona florestal (Figura 10).

Ao nível da bacia de drenagem em estudo 5SELP3, e recorrendo à ferramenta de estatística zonal do QGIS, é possível determinar qual a distribuição da ocupação do solo. Os resultados demonstram que 62,5% da bacia 5SELP3 corresponde a tecido edificado residencial, proporção dominante e preponderante para a modelação hidráulica, dado que estas zonas concentram a maior fração impermeável resultando num maior escoamento superficial e de caudal a drenar pela rede.

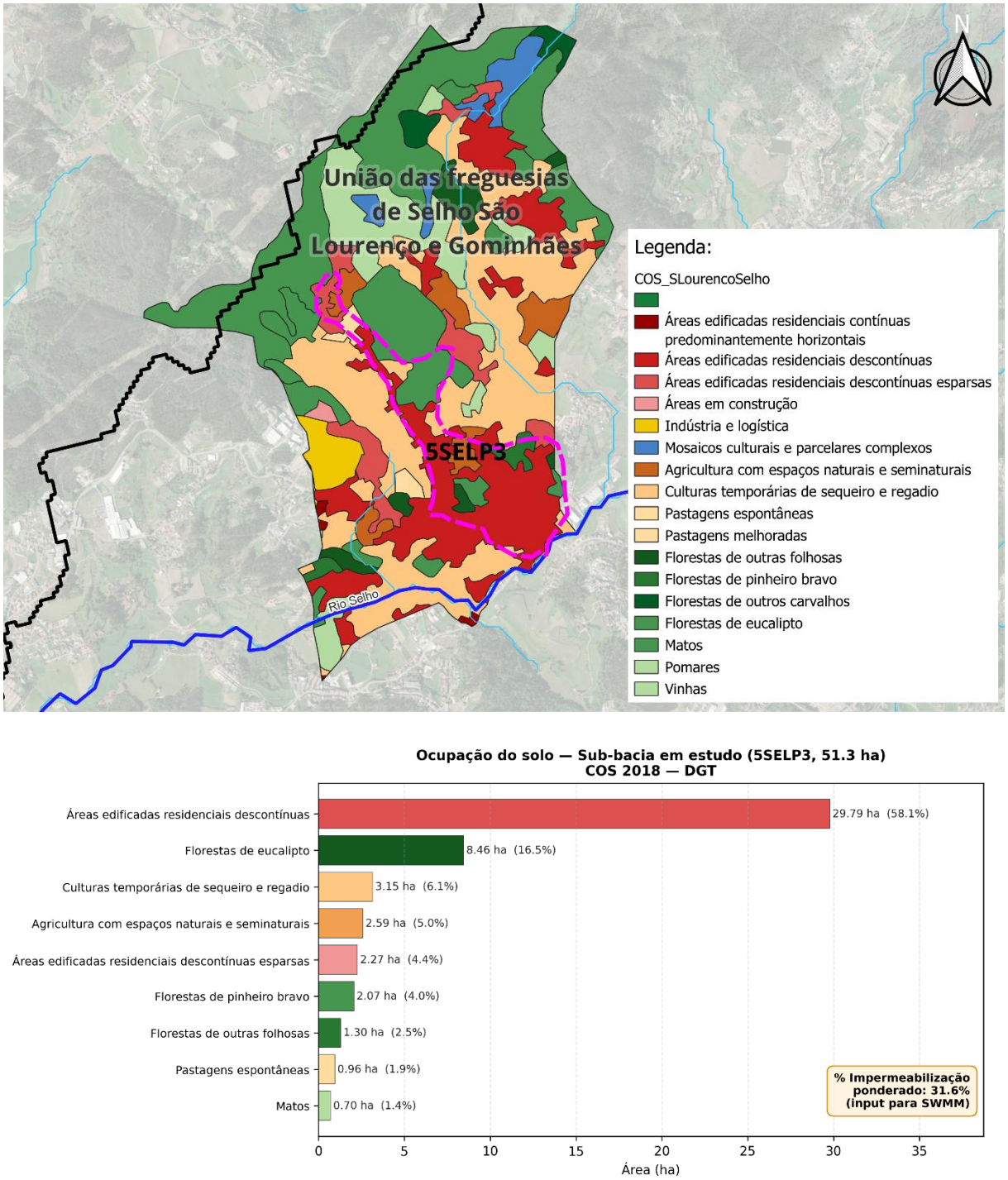






Figura 12: Ocupação do Solo, Bacia de Drenagem 5SELP3 (Direção-Geral do Território 2019).

A estimativa da fração impermeável, foi feita usando os dados disponibilizados pelo *Copernicus Land Monitoring Service* relativos à *Imperviousness Density*, que mede diretamente a densidade de impermeabilização derivada de imagens satélite *Sentinel-2*. Usando as ferramentas de estatística zonal do QGIS foi possível determinar uma área impermeável média de 31,9% (European Environment Agency. 2022).

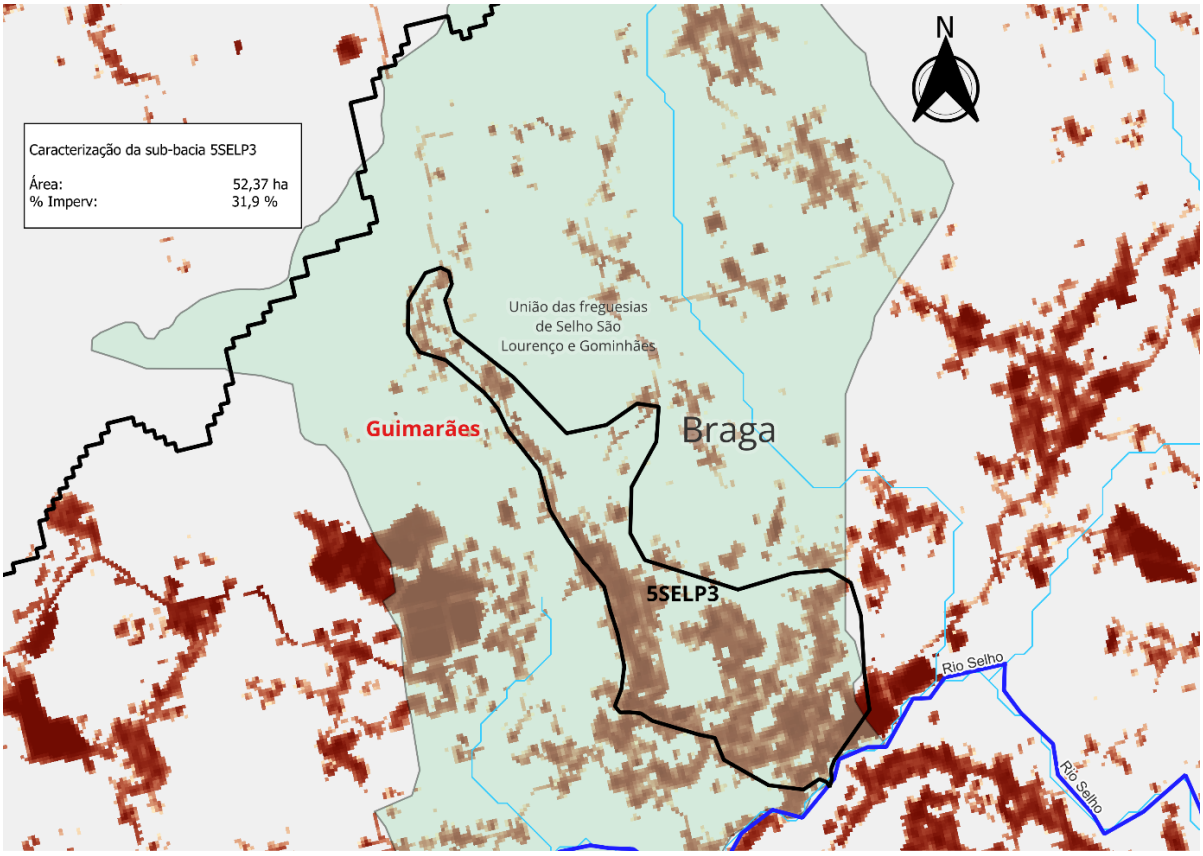



Figura 13: Áreas Impermeáveis dentro da Bacia de Drenagem 5SELP (European Environment Agency. 2022).

### 4.2.5 Contexto Histórico de Degradação Ambiental e de Inundações no Rio Selho

O estudo desenvolvido por (Carvalho Ribeiro, Madureira Correia e da Silva Costa 2004) refere já a existência de várias infraestruturas físicas que moldam e condicionam o traçado do rio Selho e a ocorrência de descargas clandestinas de efluentes sem tratamento prévio. A par disto, a bacia hidrográfica foi sendo objeto de sucessivas alterações antrópicas que modificaram o seu regime hidrológico natural, alterações que, aliadas a eventos de pluviosidade extrema, conduzem à ocorrência recorrente de episódios de cheias.

Estas alterações antrópicas introduziram vários problemas ao longo do curso do rio Selho: (i) baixa qualidade da vegetação ribeirinha; (ii) ocupação intensiva, sobretudo agrícola, com perda de vegetação ribeirinha; (iii) acumulação de lixos, resíduos sólidos e entulho nas margens; (iv) sinais de poluição associados a descargas de efluentes não tratados; (v) acumulação de sedimentos, com formação de curvaturas e redução do declive longitudinal; (vi) estrangulamento do curso por estruturas e infraestruturas no leito e nas margens; (vii) margens muradas, que comprometem a vegetação ribeirinha e a capacidade de infiltração; (viii) ocupação urbana dos corredores fluviais, com impermeabilização do solo, aumento do caudal afluente e potenciação dos picos de cheia (Ribeiro, Correia e Costa, 2004).

Os problemas relativos às infraestruturas de drenagem existentes são documentados em Baptista (2021), indicando-se que no intercetor do Selho-Prolongamento, coletor para o qual descarrega a sub-bacia em estudo, são identificados novamente um conjunto de ocorrências: (i) extravasamentos múltiplos ao longo do traçado, mesmo em eventos de baixa precipitação; (ii) obstruções frequentes em vários locais; (iii) elevado grau de sujidade e depósitos de material sólido em grande parte do trajeto, com a consequente deficiente circulação de caudais; (iv) câmaras de visita com necessidade de reabilitação, em particular num trecho implantado no seio da linha de água; (v) episódios de poluição resultantes de descargas industriais.

De modo a mitigar estes e outros problemas foram também propostas diversas medidas, sendo as mesmas divididas em quatro grupos (Carvalho Ribeiro, Madureira Correia e da Silva Costa 2004):

- Valorização ecológica e estética da paisagem: estabilização e proteção das margens (revestimento natural, seminatural ou artificial; muros de suporte; revegetação, plantações e sementeiras); recuperação e restauro do sistema ribeirinho (limpeza e desobstrução do leito; correção do traçado nos locais com curvaturas; alargamento e aprofundamento do leito em troços de baixo declive ou com pouca capacidade de drenagem; repovoamento piscícola com espécies autóctones); regulamentação do uso do solo em domínio público hídrico (modificação ou alargamento das estruturas condicionantes);
- Promoção da qualidade de água: redução das fontes poluidoras, com alargamento do SIDVA (Sistema Integrado de Despoluição do Vale do Ave) a toda a bacia hidrográfica a médio prazo, complementado por operações de fiscalização;

- Redução dos picos de cheia: limpeza e manutenção das estruturas de drenagem e dos canais; implantação de um sistema de drenagem pluvial eficaz nas áreas fortemente impermeabilizadas; desvio da Ribeira de Couros para local com maior capacidade de drenagem, em caso de ineficácia das medidas previstas na Veiga de Creixomil (alargamento e aprofundamento do leito);
- Sensibilização e educação ambiental: Promoção de ações de sensibilização, educação para a cidadania e animalão ambiental.

Em sequência e durante duas décadas depois da apresentação deste diagnóstico, foram, progressivamente, aplicadas várias destas medidas, a saber:

Eixo (i) – Valorização Ecológica: O Projeto de Reabilitação do Rio Selho (PRIOS) executado em 2012, levou à beneficiação do Rio Selho e das margens na área da Fábrica de Curtumes de Roldes (Da Silva Costa 2013). A iniciativa REACTivar Guimarães: Renaturalização dos corredores verdes dos rios Ave, Selho e Vizela, em execução desde 2021 realizou intervenções nas zonas ribeirinhas do Rio Selho, num investimento total de 1,5 milhões de euros e com a criação da Ecovia do Selho, com 22 quilómetros e um total de 61 quilómetros com a ligação às Ecovias do Ave e Vizela (Laboratório da Paisagem 2021).

Eixo (ii) – Redução dos picos de cheia: Construção de bacias de retenção na Veiga de Creixomil, com capacidade 10.000 $m^3$ para a rede pluvial e uma bacia adicional para a Ribeira de Costa/Couros, no âmbito de uma intervenção com financiamento de 2,48 milhões de euros (Guimarães Visível 2014). As implementações de outras duas bacias de drenagem também ajudaram a mitigar o problema de inundações no centro da cidade provocadas pela Ribeira de Couros/Costa um dos afluentes do Rio Selho (Guimarães Visível 2016).

Eixo (iii) – Sensibilização: Implementação do projeto-piloto 'O Ave para Todos' desenvolvido pela Câmara de Guimarães que abrange 24 escolas, 14 juntas de freguesia e 7 brigadas verdes, numa tentativa de estabelecer uma ligação sentimental entre o cidadão e o rio através da capacitação de todos os envolvidos (Laboratório da Paisagem 2019).

A persistência dos problemas, apesar das intervenções já efetuadas, reflete o carácter sistémico dos problemas em toda a bacia de drenagem do Selho justificando a quantificação das afluências indevidas tanto nos sistemas em alta como em baixa.

## 4.3 INFRAESTRUTURA DE DRENAGEM

A rede de drenagem em estudo tem duas componentes principais. Uma que constitui propriamente a rede de drenagem que recolhe as águas residuais provenientes dos utilizadores, a designada "rede em baixa" de propriedade da Câmara Municipal de Guimarães e de exploração da Vimagua, EM (designada por 5SELP3), e, outra, o intercetor do Selho que – para além da recolha de águas residuais provenientes de outras redes de drenagem, constitui uma componente do "Sistema em Alta", propriedade e responsabilidade de exploração da empresa concessionária )por parte do Estado), a Águas do Norte, S.A..

Os dados relativos às infraestruturas de drenagem a analisar foram disponibilizados pelas Águas do Norte S.A., e relativamente aos coletores através da indicação de informações relativas ao material, ao diâmetro e ao comprimento do coletor, entre câmaras de visita, para as quais foram indicadas, para além da sua identificação, as cotas de tampa e cota de fundo. A posição de cada câmara de visita foi inserida manualmente no QGIS de forma a ser possível haver uma referência geográfica e posicional que tornasse possível integrar globalmente num processo de automação via Python.

Foram consideradas 174 câmaras de visita e 172 trechos de coletores, num comprimento total de rede de 5865,22 metros sendo que o ponto de entrega da rede é a câmara de visita nº 725955, de ligação ao intercetor do Selho, que se já se referiu, integra o "Sistema em Alta" gerido pela Águas do Norte e onde descarregam diversas outras bacias de drenagem vizinhas da bacia em estudo (Baptista 2021). Trata-se de uma rede de diâmetro reduzido e homogéneo, sendo 95% da sua extensão em DN 200 e apenas os trechos de jusante em DN 250. Os coletores são maioritariamente em PVC e polipropileno. A bacia desenvolve-se entre as cotas 305,5 e 186,8 metros, o que se traduz numa rede de inclinações elevadas, com uma inclinação mediana de 4,8% e cerca de metade dos trechos acima de 5%. A caracterização completa de câmaras de visita e coletores encontra-se no Anexo A.1.

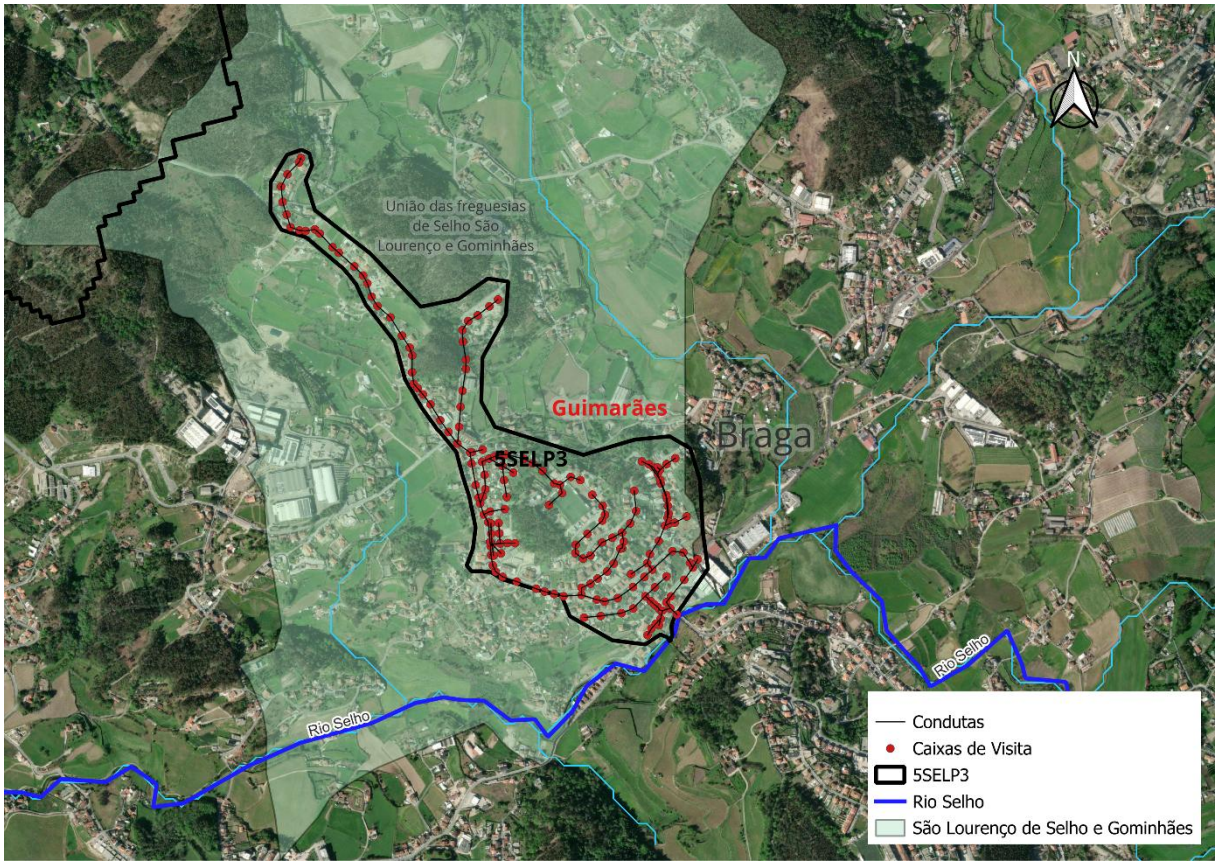



Figura 14 : Infraestrutura de drenagem da Bacia de Drenagem 5SELP3.

## 4.4 Monitorização e Obtenção de Dados

### 4.4.1 Dados de Caudal e Precipitação

Os dados de caudal foram fornecidos pelas Águas do Norte, obtidos através de um medidor de nível ultrassónico, devidamente calibrado para quantificação de caudal instalado na câmara de visita imediatamente a montante do ponto de entrega da bacia de drenagem 5SELP3 no intercetor do Selho-Prolongamento (Figura 12) designada por "Caixa da Frutaria". A medições realizaram-se entre 2 de dezembro de 2019 e 13 de dezembro, tendo sido efetuados 1541 registos de caudal com uma cadência de 10 minutos.

A campanha de medição revelou um caudal médio de 2,75 L/s e um caudal máximo de 33,0 L/s. A precipitação concentrou-se em dois eventos pluviométricos significativos, dos quais o de 12 de dezembro causou inundação temporária do sensor entre as 16:50 e as 20:20, pelo que, nesse período não houve possibilidade de registo de dados de medição.

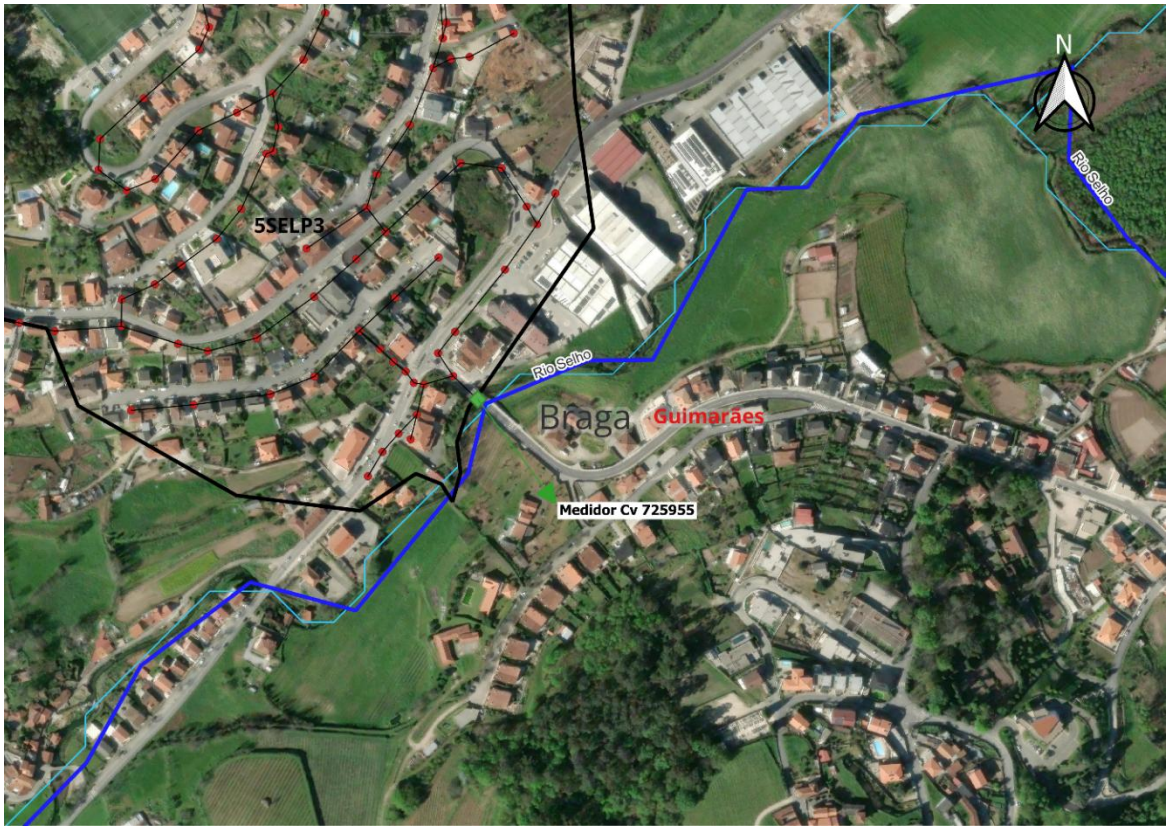



Figura 15: Localização do medidor instalado no Ponto de Entrega da Bacia de Drenagem

Os valores de precipitação foram igualmente fornecidos pelas Águas do Norte no mesmo espaço temporal entre 2 de dezembro e 13 de dezembro e com os mesmos 1541 registo e cadência de 10 minutos. Apenas 191 dos 1541 registos apresentaram precipitação não nula, distribuídos por três eventos distintos:

i. Evento 1: 8 de dezembro, entre as 11:00h e as 16:00h com intensidade máxima de 0,7 mm/h;
ii. Evento 2: 11 de dezembro, entre as 00:00h e as 05:40h, com pico de 0,77 mm/h às 02:10h;
iii. Evento 3: 12 de dezembro, entre as 08:00h e as 21:50h, que se pode considerar como o evento principal do período monitorizado, com intensidade máxima de 2,87 mm/h às 16:10h e duração efetiva de cerca de 14 horas.

Na Figura 14 apresenta-se a representação temporal do hidrograma e do hietograma correspondente aos caudais e precipitação medidos.

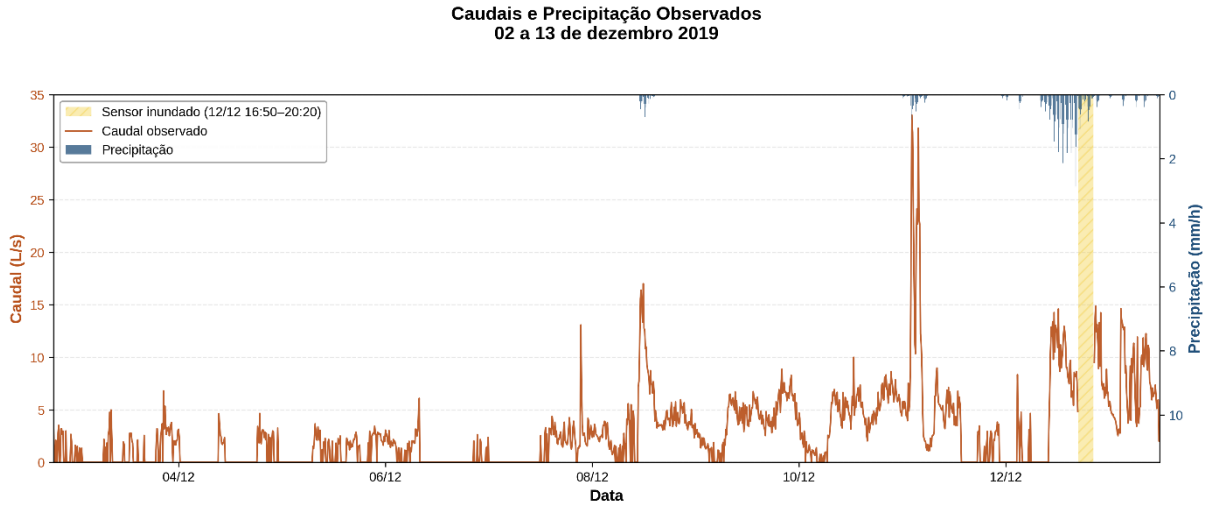



Figura 16: Hidrograma e Hietograma observados - Caixa Frutaria, jusante ponte (Este) 02 a 13 de dezembro de 2019.

### 4.4.2 Tratamento de Edição de Dados

Analisando a Figura 16, consegue-se verificar a existência de um período seco alargado, entre os dias 2 de dezembro e 8 de dezembro permitindo o cálculo do consumo horário da rede em tempo seco (DWF *Dry Weather Flow*). A janela temporal considerada para este estudo foi entre os dias 2 de dezembro e 6 de dezembro. Neste espaço temporal foram feitos 463 registos brutos em que grande parte dos valores com caudal nulo. Tendo em conta que o medidor instalado não consegue medir alturas abaixo de 10 mm, os caudais nulos podem significar uma lâmina de água com altura insuficiente para ser medida.

Para tratamento destas leituras foram estudadas três abordagens de forma a conseguir avaliar qual produzia fatores horários mais próximos da realidade, sendo as mesmas:

i. Manter as leituras nulas (Manter);
ii. Excluir as leituras nulas (Filtrar);
iii. Atribuir um valor residual de caudal, correspondente a metade do caudal referente à altura de 10 mm do nó de saída, sendo que o valor considerado foi de 0,25 L/s (Imputar).

Na primeira abordagem (i), o caudal médio foi de 0,83 L/s, na segunda (ii) de 2,51 L/s e na terceira (iii) de 1,00 L/s.

## 4.5 IMPLEMENTAÇÃO DA CALIBRAÇÃO DO SWMM

### 4.5.1 Calibração de parâmetros em tempo seco (DWF – Dry Weather Flow)

Foi desenvolvido um conjunto de *scripts* em Python, que permitem automatizar o processo de cálculo e calibração do DWF partindo de uma estimativa inicial do mesmo. Esta é calculada agrupando todas as medições do conjunto filtrado pela hora do dia, independentemente do dia em que ocorreram. Depois, é realizada uma média de todos os valores medidos dos vários dias para cada hora.

Os scripts desenvolvidos incorporam duas estratégias paralelas para análise comparativa:

(i) distribuir o caudal doméstico total proporcionalmente ao comprimento de cada coletor;

(ii) concentrar todo o caudal doméstico num só nó da rede, imediatamente a montante do nó de saída.

A primeira estratégia aproxima-se da realidade física da rede, ao refletir a distribuição espacial das habitações ligadas a cada coletor, e permite analisar o escoamento nos coletores internos. A segunda simplifica o modelo ao focar-se apenas no balanço de massa global no ponto de medição, sendo utilizada como termo de comparação metodológica. Em ambos as situações, a função objetivo a minimizar é o erro quadrático médio (RMSE) entre o caudal simulado no exutório e o observado nos instantes com medição válida. A simulação SWMM é antecedida por um período de aquecimento de seis horas para estabilização do regime hidráulico, os caudais simulados são extraídos do ficheiro de output, contendo as médias temporais calculadas internamente pelo solver no intervalo de 10 minutos. Os parâmetros calibrados são depois automaticamente adicionados ao ficheiro INP principal, ficando este preparado para as fases subsequentes de modelação. De relembrar que, em simultâneo com este procedimento é ainda acrescentado o tratamento de dados referido em 4.4.2, produzindo um total de seis cenários diferentes entre distribuir o caudal doméstico e o concentrar no nó imediatamente a montante do nó de saída.

Em cada ponto da rede, o caudal simulado é composto por três componentes:

$$Q_{simulado}(t) = Q_{DWF}(t) + Q_{RDII}(t) + Q_{base}(t)$$

Em período seco, as componentes R, T, K que definem a parcela $Q_{RDII}(t)$ e os parâmetros da sub bacia (Width, Slope, %Imperv, etc) são nulas tornando-se irrelevantes tornando o caudal simulado igual ao caudal em tempo seco.

Cabe, contudo, referir que o DWF medido não corresponde exclusivamente à contribuição doméstica, incorpora também uma componente de infiltração base resultante da entrada de possível água subterrânea através de patologias estruturais nos coletores e nas câmaras de visita e não separável a partir dos dados de monitorização disponíveis. Em consequência, o fator de escala aqui calibrado absorve, de forma indistinta, ambas as contribuições (Bonito, Piqueiro e Valente 2014).

Na tabela abaixo é feito um Mapa Comparativo entre o conjunto dos seis cenários produzidos.

Tabela 7: Mapa Comparativo dos indicadores para os seis cenários testados, com 3 abordagens para o tratamento dos caudais nulos.

| **Indicador** | **Caudal Doméstico Distribuído** | | | **Caudal Doméstico Concentrado** | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Filtrar | Imputar | Manter | Filtrar | Imputar | Manter |
| **Fator de escala** | 1,0000 | 0,4707 | 0,8313 | 0,9795 | 1,7845 | 1,0448 |
| **NSE** | +0,245 | +0,080 | +0,053 | −0,457 | −0,111 | +0,071 |
| **RMSE (l/s)** | 0,72 | 1,12 | 1,24 | 0,99 | 1,23 | 1,23 |
| **PBIAS (%)** | +0,11 | +6,96 | +4,26 | −8,10 | −47,76 | +4,64 |
| **Caudal médio observado (l/s)** | 2,506 | 1,000 | 0,834 | 2,506 | 1,000 | 0,834 |
| **Caudal médio simulado (l/s)** | 2,509 | 1,070 | 0,869 | 2,303 | 0,523 | 0,872 |

Analisando os vários indicadores calculados, vemos que usando um caudal doméstico distribuído e não considerando as leituras nulas foi possível produzir uma calibração mais próxima da realidade. Este cenário produziu um volume praticamente igual ao real, com um PBIAS de 0,11% e o NSE mais alto, de 0,245. Estes dois indicadores permitem cimentar este cenário como o mais correto para adotar para a parametrização do modelo em tempo seco.

Na figura 17 e possível ver o comparativo entre os caudais simulados e os caudais observados, produzidos no cenário escolhido bem como os fatores horários medidos e simulados sendo visível a proximidade da calibração alcançada.

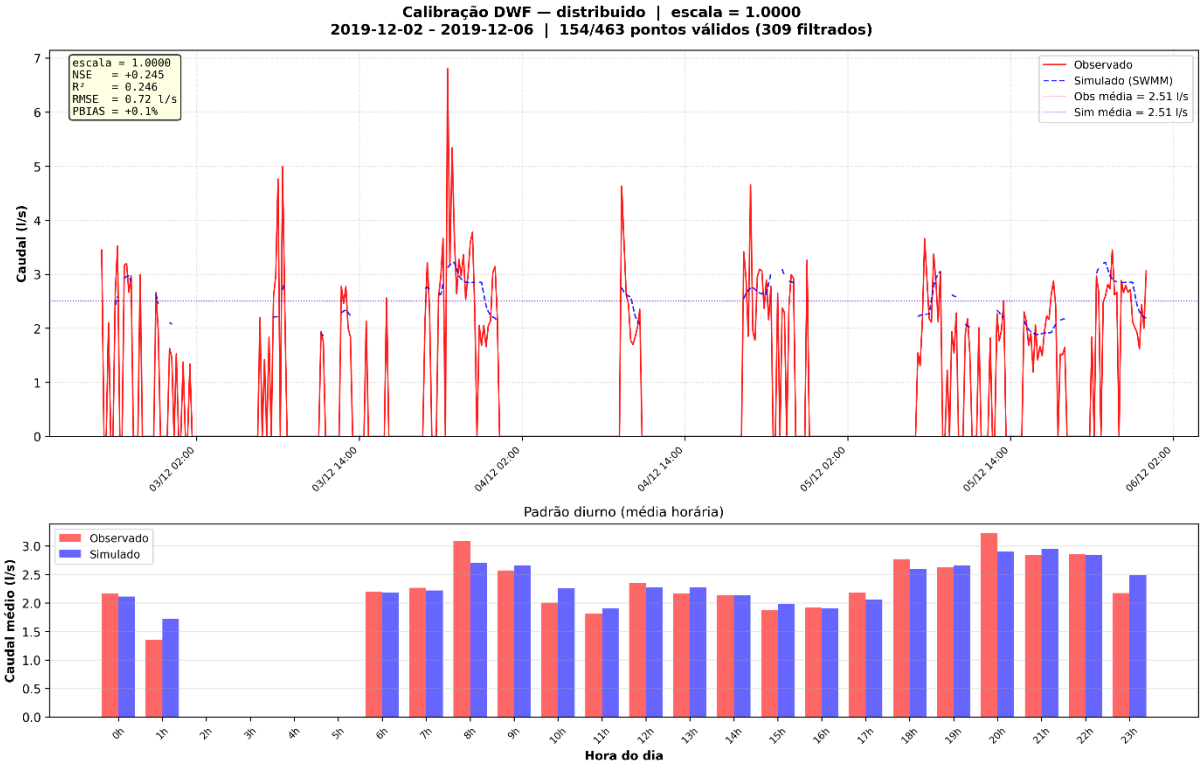



Figura 17: Calibração de caudal em tempo seco (DWF), no período de 02/12/2019 a 06/12/2019, excluindo as leituras nulas de caudal. Séries de caudal observado e simulador e padrão diurno médio horário (em baixo).

### 4.5.2 Parâmetros da sub-bacia e do RDII

Antes de proceder ao processo de calibração, é importante notar que existe uma falha estrutural grave nos dados recolhidos, já assinalado na Figura 16. Durante o evento principal de 12 de dezembro, o sensor de caudal instalado ficou inundado no período entre as 16:50h e as 20:20h, não produzindo qualquer tipo de leitura. A ausência destes valores é particularmente penosa para o processo de calibração, dado que o intervalo afetado poderá conter valores consideráveis do evento.

De forma a colmatar esta lacuna sem recorrer a uma imputação arbitrária, o modelo foi calibrado desconsiderando esta janela temporal sem valores, sendo que estes não são considerados para o cálculo dos parâmetros da calibração.

Tendo em conta a natureza separativa do sistema de drenagem em estudo, a precipitação é encaminhada para a sua rede própria pelo que, calibrar parâmetros associados à definição da sub-bacia iria simular um cenário fisicamente inadequado. É considerado que a água que entra neste sistema de drenagem é apenas por afluências indevidas associadas à precipitação (RDII) e por caudal doméstico pelo que os parâmetros suscetíveis a calibração são apenas os 9 parâmetros do modelo RTK: $R_1$, $R_2$, $R_3$, $T_1$, $T_2$, $T_3$, $K_1$, $K_2$ e $K_3$.

#### *4.5.2.1 Intervalos de calibração*

Os intervalos de calibração adotados para os nove parâmetros estão sintetizados na Tabela 4. Adicionalmente, tem de ser cumprida a condição imposta pelo SWMM de $R_1 + R_2 + R_3 \leq 1{,}0$, associada à estrutura do modelo RTK e implementada explicitamente na função objetivo do algoritmo de calibração.

O único dado referente à bacia que é inserido nesta calibração é a sua área de 0,53 km$^2$, convertida em hectares (53 ha) que é fixado nas definições de RDII com a *SewerArea* a 53,00 ha.

Tabela 8: Intervalos definidos para o arranque dos parâmetros candidatos a calibração

| Parâmetro | Símbolo | Unidade | Mínimo | Máximo |
|---|---|---|---|---|
| **Sewer Area** | - | ha | 53.00 | 53.00 |
| **Fração rápida** | $R_1$ | — | 0,30 | 0,70 |
| **Fração média** | $R_2$ | — | 0,00 | 0,10 |
| **Fração lenta** | $R_3$ | — | 0,00 | 0,20 |
| **Tempo ao pico rápido** | $T_1$ | h | 0,10 | 1,00 |
| **Razão de recessão rápida** | $K_1$ | — | 1,00 | 2,00 |
| **Tempo ao pico médio** | $T_2$ | h | 3,00 | 5,00 |
| **Razão de recessão média** | $K_2$ | — | 2,00 | 3,00 |
| **Tempo ao pico lento** | $T_3$ | h | 5,00 | 15,00 |
| **Razão de recessão lenta** | $K_3$ | — | 3,00 | 7,00 |

Cada um dos intervalos definidos na Tabela 6 para o segundo conjunto de variáveis, associadas ao RDII foram definidos com base no estabelecido em Vallabhaneni, C. Chan e H. Burgess (2007), mais concretamente na Tabela 5-2, onde encontramos os valores típicos para os parâmetros T e K. Já os parâmetros R foram ajustados em função do balanço hídrico observado no evento de 11 de dezembro e tendo em conta a restrição física de $R_1 + R_2 + R_3 \leq 1{,}0$.

#### *4.5.2.2 Algoritmo de otimização e funções objetivo*

Na presente dissertação foi utilizado o algoritmo SCE-UA (S*huffled Complex Evolution – University of Arizona*), implementado através das ferramentas disponíveis da biblioteca *SPOTPY*, para a calibração automática das 9 variáveis indicadas na Tabela 4. A escolha deste algoritmo justifica-se pela sua robusta capacidade de explorar funções objetivo multimodais, carácter presente nos problemas de calibração de modelos hidrológicos urbanos.

A calibração foi realizada de forma sistemática para as funções objetivo e métricas de desempenho, procurando o conjunto de 9 parâmetros que melhor reproduzisse o caudal observado. Esta análise de adequabilidade foi feita com base em métricas calculadas em paralelo que foram comparadas com os seus valores objetivo.

As funções objetivo utilizadas foram: (i) NSE; (ii) KGE; (iii) logNSE. Cada calibração foi executada com um máximo de dez ciclos completos de SCE-UA, que corresponde sensivelmente entre 2500 a 3500 avaliações, partindo sempre dos intervalos indicados na Tabela 6, sendo que os intervalos foram sendo progressivamente modificados entre calibrações. Para cada uma das funções objetivo foram feitas 3 calibrações de forma a perceber o intervalo de convergência de cada parâmetro bem como o seu grau de convergência para esse intervalo. As métricas calculadas em cada calibração foram o NSE, KGE, logNSE, $R^2$, RMSE e PBIAS e os valores objetivo considerados para cada uma são:

Tabela 9: Critérios de classificação das métricas de desempenho utilizadas

| Métrica | Intervalo | Ótimo | Muito bom | Bom | Satisfatório | Não satisfatório |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **NSE** | (–∞; 1] | 1 | NSE > 0,80 [1] | 0,70 < NSE ≤ 0,80 [1] | 0,50 < NSE ≤ 0,70 [1] | NSE ≤ 0,50 [1] |
| **KGE** | (–∞; 1] | 1 | KGE > 0,75 [2] | 0,50 < KGE ≤ 0,75 [2] | –0,41 < KGE ≤ 0,50 [2] | KGE ≤ –0,41 [2] |
| **logNSE** | (–∞; 1] | 1 | logNSE > 0,80 [3] | 0,70 < logNSE ≤ 0,80 [3] | 0,50 < logNSE ≤ 0,70 [3] | logNSE ≤ 0,50 [3] |
| **$R^2$** | [0; 1] | 1 | $R^2$ > 0,85 [1] | 0,75 < $R^2$ ≤ 0,85 [1] | 0,60 < $R^2$ ≤ 0,75 [1] | $R^2$ ≤ 0,60 [1] |
| **RMSE (L/s)** | [0; +∞) | 0 | — | — | — | — |
| **PBIAS (%)** | (–∞; +∞) | 0 | \|PBIAS\| < ±5 [1] | ±5 ≤ \|PBIAS\| < ±10 [1] | ±10 ≤ \|PBIAS\| < ±15 [1] | \|PBIAS\| ≥ ±15 [1] |

Outra consideração importante para a avaliação do modelo foi a exclusão de registos com caudais inferiores ou iguais a 1 L/s para o cálculo das métricas de desempenho, o que correspondeu à exclusão de 134 registos da janela de calibração. Estes valores referem-se predominantemente a períodos noturnos de baixo caudal, dominados pelo caudal doméstico e com afluências indevidas praticamente inexistente.

A sua inclusão seria prejudicial visto que, tratando-se de registos numerosos e de baixa magnitude, dominariam o cálculo das métricas, deslocando a avaliação para a linha base que já é reproduzida pelo DWF, em detrimento do ajuste aos eventos de precipitação. Em segundo lugar, a proximidade do limiar de deteção do medidor provocado 'ruído' nessas leituras, que o algoritmo tenderia a interpretar como erro do modelo, conduzindo a soluções artificialmente prejudicadas que sacrificavam a reprodução essencial dos picos.

[1] Valores referência (Moriasi et al. 1983).
[2] (Gupta et al. 2009) apresentou o KGE, contudo, sem valores referência formais. (Knoben, Freer e Woods 2019) demonstrou que KGE = -0,41 corresponde ao NSE = 0. Os valores 0,50 e 0,75 foram definidos com base em (Towner et al. 2019).
[3] Não foram encontrados limites definidos para o logNSE. Foram aplicados os mesmos limiares que NSE.

### 4.5.3 Resultados da calibração e comparação entre as funções objetivo

A calibração dos nove parâmetros RTK seguiu uma lógica de restrição progressiva dos intervalos de variação, partindo dos valores descritos na Tabela 2 (Vallabhaneni, C. Chan e H. Burgess 2007), cada iteração foi analisada em gráficos de dispersão de onde foi possível visualizar para que intervalo cada parâmetro tende a convergir. Cada um destes gráficos juntamente com o respetivo hidrograma resultante de cada umas das iterações encontram-se representados no Anexo A.3.

Deste processo sobressaiu, de forma transversal a todas as funções-objetivo, que o limite inferior definido na Tabela 8 para a componente rápida, $R_1$, não é suficiente, sendo que todos os valores convergiram abaixo do limite inferior dos 0,3. Verificou-se também que todas as funções objetivo reportaram um intervalo para $R_2$ muito próximo de zero, pelo que o modelo convergiu para um componente média negligenciável. Os parâmetros $T_2$, $K_2$, $K_3$ convergiram de forma robusta para os intervalos definidos inicialmente ($3{,}52 \leq T_2 \leq 4{,}14$ h; $2{,}44 \leq K_2 \leq 3{,}03$ h; $5{,}48 \leq K_3 \leq 6{,}79$ h) sendo seguro assumir que os valores reais estarão dentro destes intervalos.

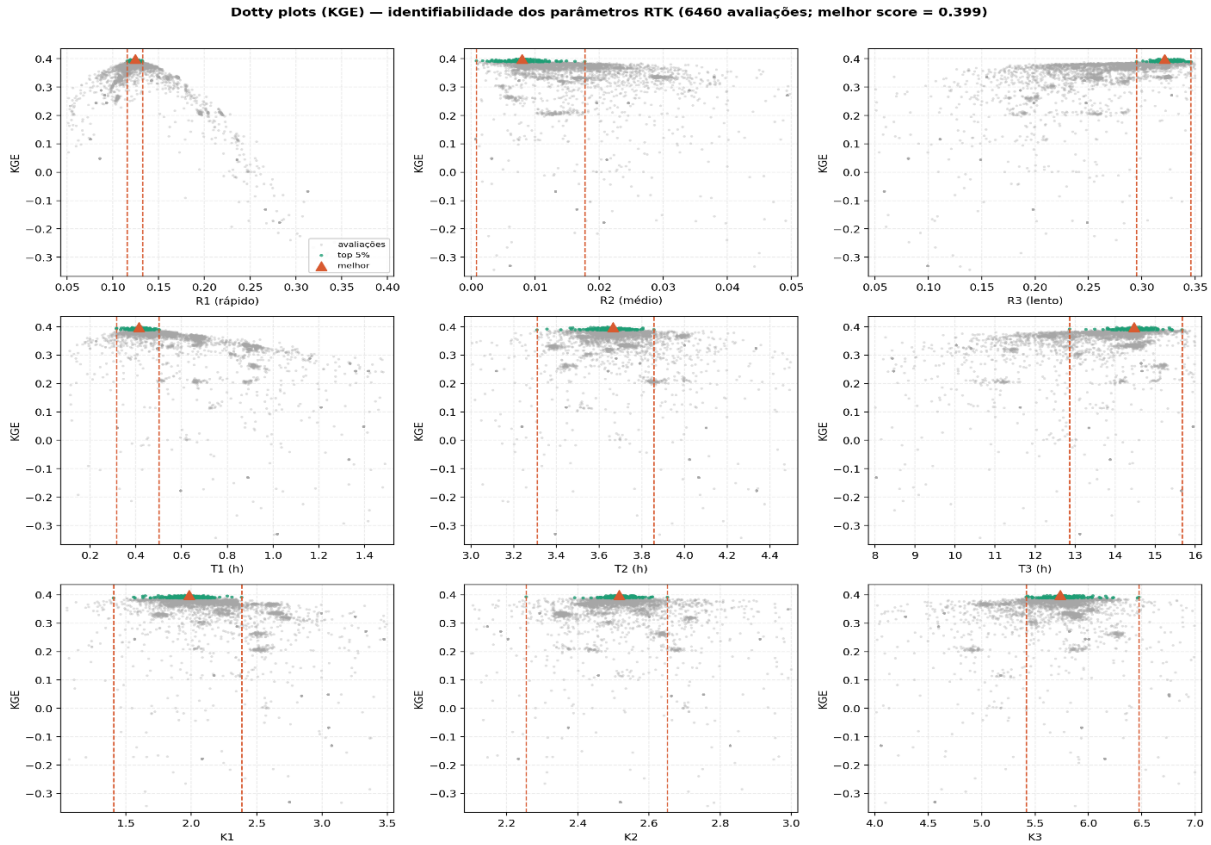



Figura 18: Gráfico de dispersão da calibração feita para KGE para cada um dos parâmetros R, T, K. A verde, o conjunto de 5% referente às melhores soluções. A laranja, o melhor intervalo.

Na Tabela 10, são apresentados os intervalos finais obtidos após todas as calibrações:

Tabela 10: Intervalos finais dos parâmetros candidatos a calibração

| Parâmetro | Símbolo | Unidade | Mínimo | Máximo |
|---|---|---|---|---|
| **Sewer Area** | – | ha | 53,00 | 53,00 |
| **Fração rápida** | $R_1$ | — | 0,07 | 0,21 |
| **Fração média** | $R_2$ | — | 0,01 | 0,05 |
| **Fração lenta** | $R_3$ | — | 0,16 | 0,44 |
| **Tempo ao pico rápido** | $T_1$ | h | 0,25 | 0,65 |
| **Razão de recessão rápida** | $K_1$ | — | 1,41 | 3,98 |
| **Tempo ao pico médio** | $T_2$ | h | 3,52 | 4,14 |
| **Razão de recessão média** | $K_2$ | — | 2,52 | 2,81 |
| **Tempo ao pico lento** | $T_3$ | h | 14,2 | 23,9 |
| **Razão de recessão lenta** | $K_3$ | — | 5,48 | 6,79 |

Usando os intervalos finais e comparando com os intervalos iniciais, obtemos os gráficos abaixo que permitiram melhorar compreender a convergência da calibração feita.

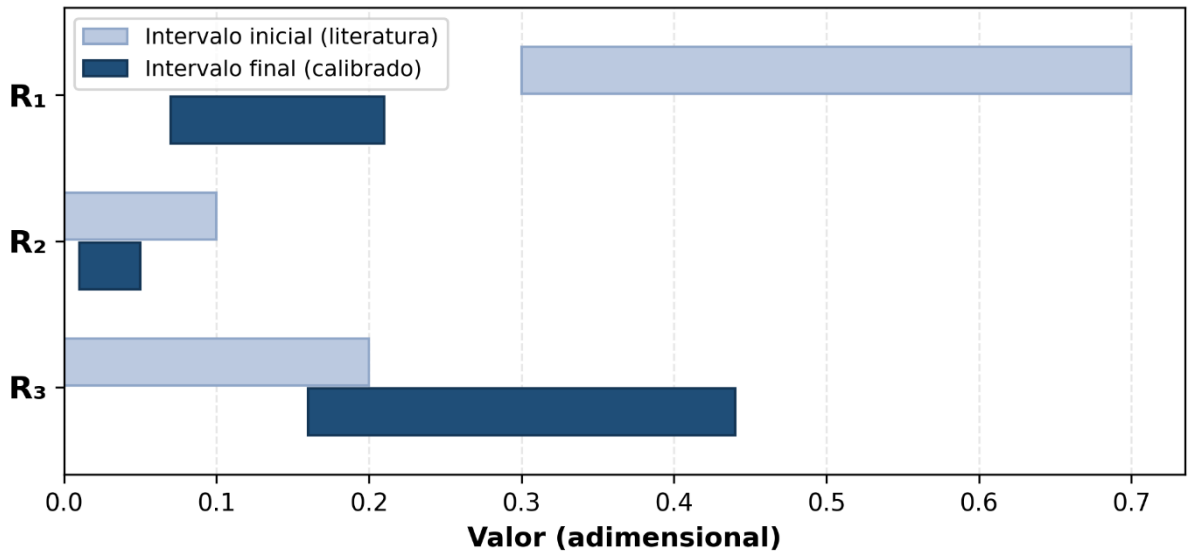



Figura 19: Comparação entre os intervalos dos parâmetros R

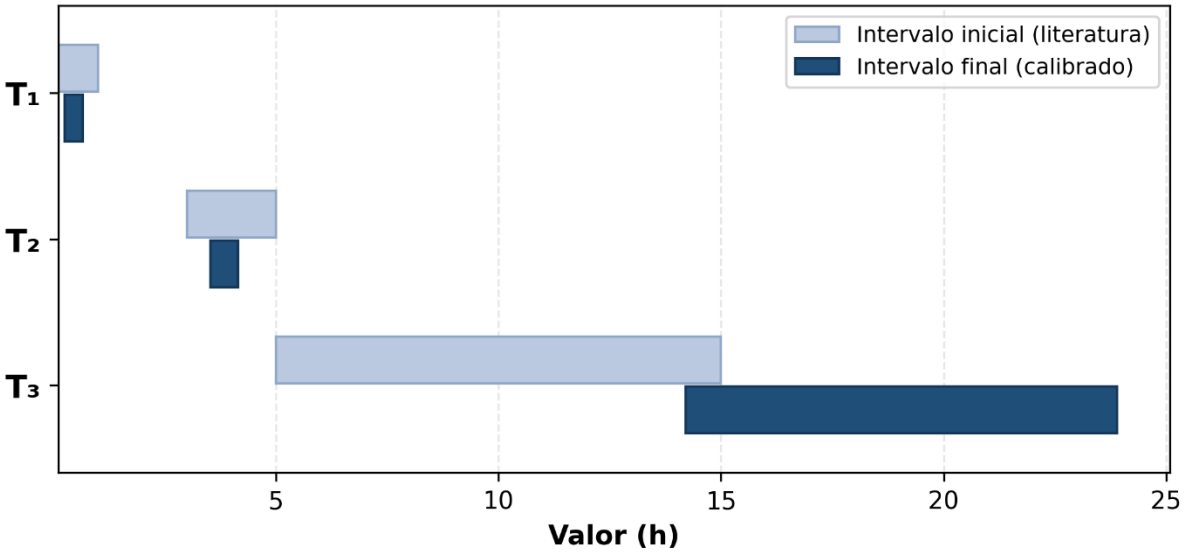



Figura 20: Comparação entre os intervalos dos parâmetros T

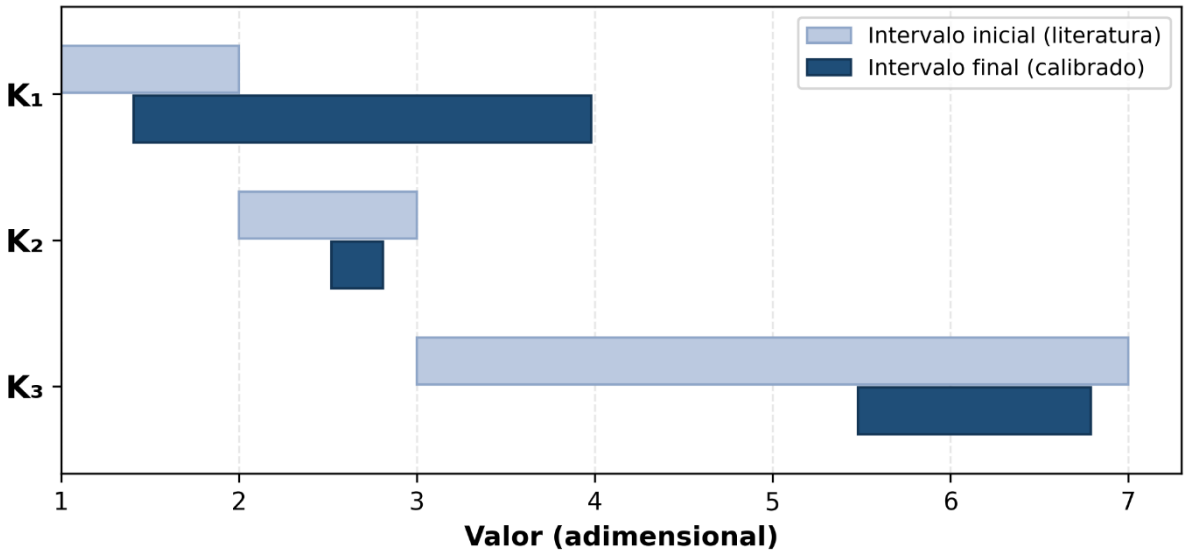



Figura 21: Comparação entre os intervalos dos parâmetros K

Nas figuras 19, 20 e 21 é percetível que os intervalos definidos inicialmente não são adequados para esta bacia sendo que $R_1$, $R_3$, $T_3$ e $K_1$ fecham foram do intervalo inicial. Existiu também um estreitamento bastante diferente entre os intervalos, sendo que os intervalos de $R_2$, $T_1$, $T_2$, $K_2$ e K3 apertam de forma bem clara, revelando uma boa definição e baixo incerteza, ao invés dos parâmetros $R_3$, $T_3$ e $K_1$ que permanecem com intervalos largos e revelando um grau de incerteza maior. Na figura 18 é visível e inadequabilidade total do intervalo inicialmente definido para $R_1$, deslocando-se consideravelmente para baixo (0,07 – 0,21) revelando uma baixa componente rápida e indicando que a calibração prevê que a origem das afluências indevidas é a infiltração lenta e não a afluência rápida, isto é também confirmado pelo intervalo de fecho superior de $R_3$ e $T_3$. Este resultado deve interpretado com cautela,

Estas conclusões foram transversais a todas as funções-objetivo testadas, o que se traduz num comportamento robusto dos intervalos selecionados e do modelo independentemente do critério de calibração. A escolha do critério a adotar, contudo, não é apenas função dos intervalos para os quais converge, mas do compromisso alcançado com o hidrograma final produzido, nomeadamente o seu ajuste em forma e em volume. Neste sentido, é importante também avaliar o NSE e o PBIAS de cada gráfico de forma a selecionar o modelo que produz os valores com melhor compromisso.

Na figura 22, é feita a comparação entre as 3 calibrações de intervalos feitas para cada uma das funções objetivo e qual o comportamento do seu hidrograma final.

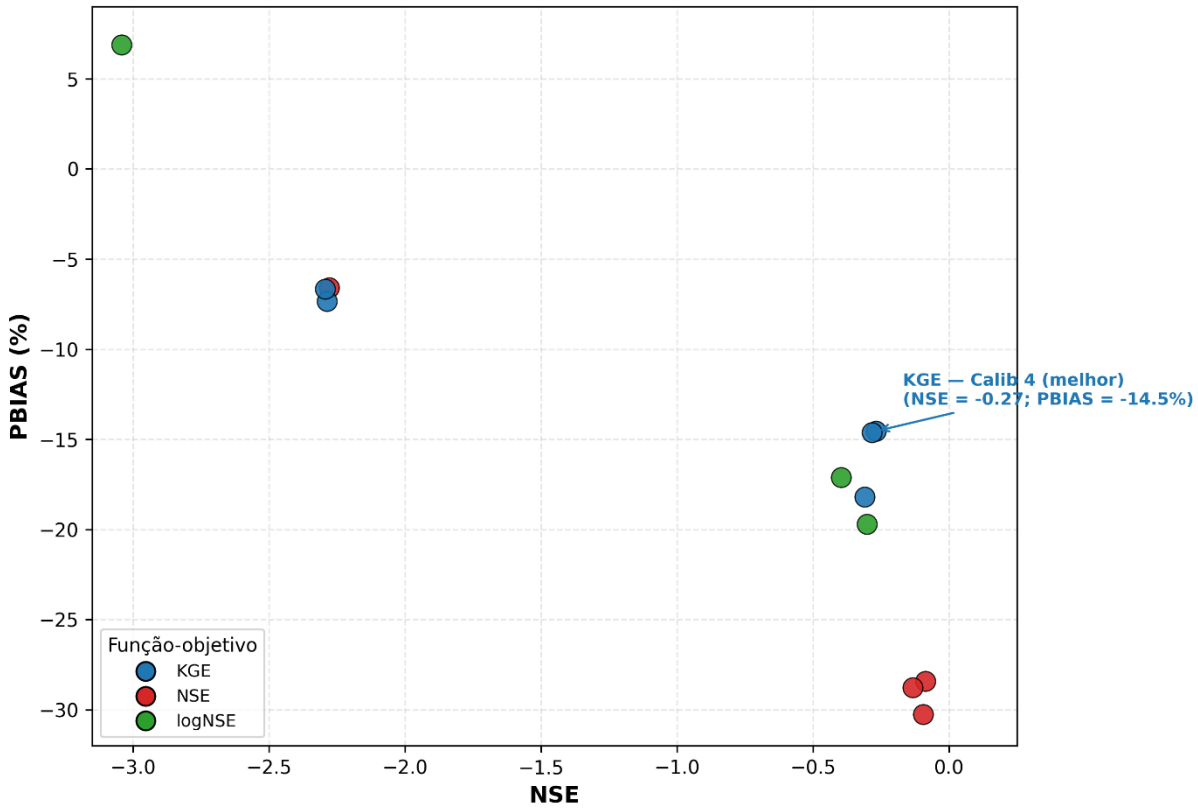



Figura 22: Comparação das funções objetivo - NSE vs PBIAS

Numa primeira leitura a primeira análise a fazer, destaca-se que a região correspondente ao desempenho ideal, não é ocupada por nenhuma solução. Nenhuma das funções objetivo consegue, portanto, reproduzir simultaneamente a forma do hidrograma e o volume. Acresce que todos as soluções apresentam valores de NSE negativos, o que indica que o modelo reproduz a variação temporal do caudal com menor rigor do que a simples utilização da média dos valores observados. Esta leitura reflete que, com os dados disponíveis, existe um compromisso que não é possível desassociar, entre a forma e o volume e que a escolha da função objetivo a usar na calibração terá de ser, inevitavelmente, uma escolha da qual pretendemos privilegiar. É possível também verificar que o progresso das calibrações está representado da esquerda para a direita e que o refinamento dos intervalos provocou uma melhoria de NSE.

A posição de cada função objetivo, no espaço NSE-PBIAS depende diretamente da sua formulação matemática e da forma como esta pondera a sua forma.

A funções objetivo NSE procura um melhor ajuste de forma, sacrificando o volume. O NSE, é governado pela soma dos quadrados dos desvios, o que atribui uma magnitude desproporcionada aos erros de maior magnitude, que se verificam nos picos de caudal. Assim sendo, o algoritmo de otimização vai procurar um hidrograma com amplitudes menores que resulta num melhor ajuste de NSE, mas obtido à custa de um hidrograma que subestima o volume afluente (valores de PBIAS na ordem dos -30%).

O KGE, decompõe explicitamente o desempenho de três componentes: (i) a correlação, $r$; (ii) a razão de variabilidade, $\alpha$; (iii) a razão de enviesamento, $\beta$. A presença desta razão enviesamento na formulação que penaliza diretamente o desvio entre as médias simulada e observada, faz com que o KGE não permita ao algoritmo de otimização que sacrifique o volume para melhorar a forma. Daqui resulta um compromisso mais equilibrado entre NSE e PBIAS, com um NSE ligeiramente menor (NSE=-0,27) e um PBIAS maior na ordem dos -15%.

Por fim, o logNSE, calculado sobre os logaritmos dos caudais, atribui maior peso aos caudais baixos, atenuando a influência dos picos. Isto provoca uma aproximação à função KGE no espaço NSE-PBIAS, contudo, esta função apresenta uma limitação estrutural associada exatamente à sua ponderação dos caudais mais baixos. Visto que nos caudais mais baixos o valor das afluências indevidas é baixo, o logNSE não é capaz de identificar a maioria dos parâmetros, resultado em diagramas de dispersão de topo plano. Importa salientar que este comportamento foi observado nas condições específicas deste estudo, em que foram excluídos do cálculo das métricas, caudais baixos que esta função objetivo privilegia. Desta forma, é uma função objetivo desadequada à calibração de um modelo de afluências indevidas em que é necessário estimar tanto o volume como o pico de caudal.

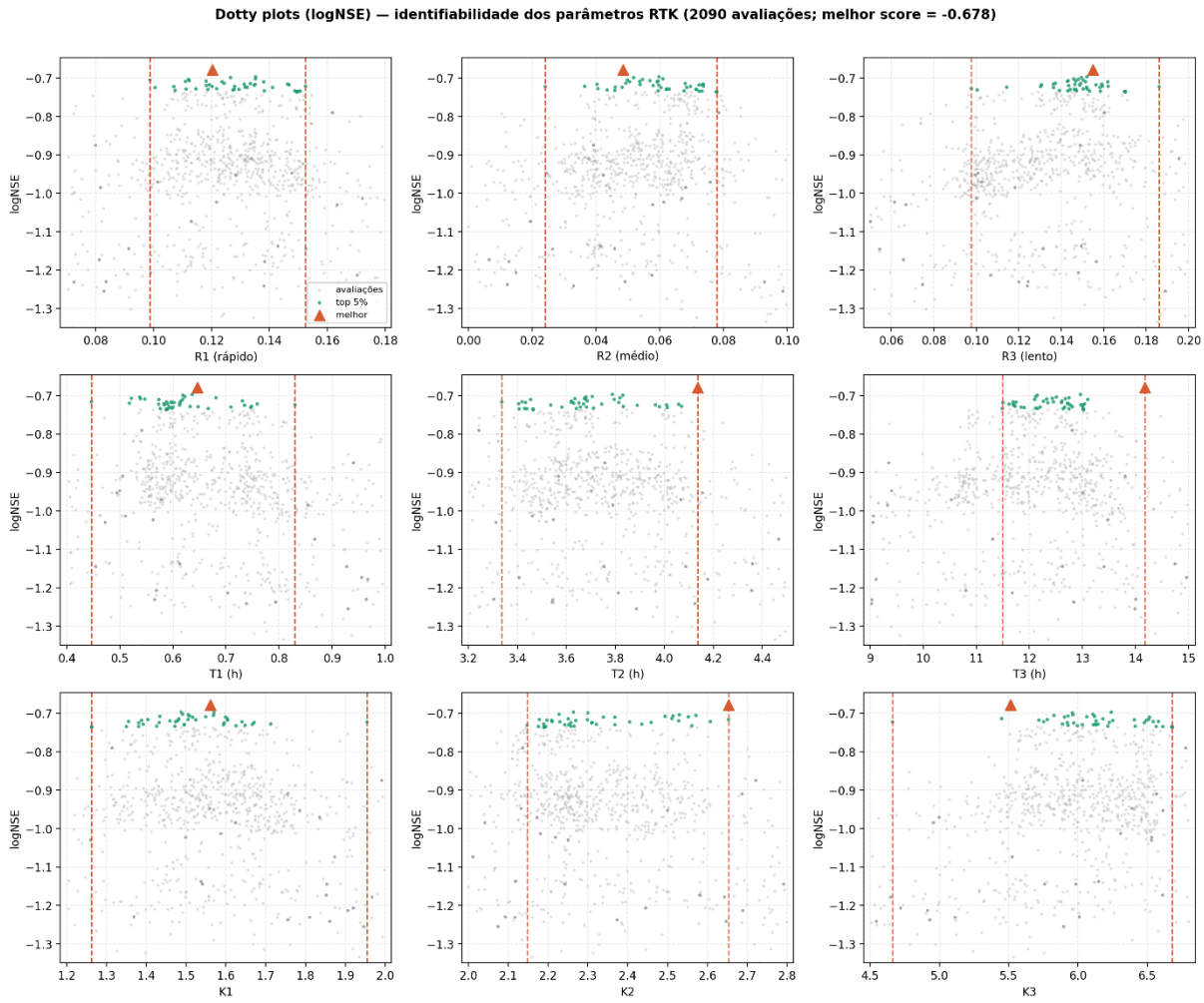



Figura 23: Diagramas de dispersão da calibração com a função-objetivo logNSE, para os nove parâmetros RTK.

Na Tabela 9, são apresentados os valores finais para cada métrica, para a três funções-objetivo refletindo o já indicado, NSE atinge a melhor forma sacrificando volume, KGE consegue uma melhor reprodução do volume com um ajuste apenas ligeiramente inferior e o logNSE assume uma posição intermédia em termos volume, contudo, prejudicando ligeiramente a forma do hidrograma.

Tabela 11: Desempenho da calibração RTK por função-objetivo otimizada

| Função-objetivo | NSE | KGE | logNSE | $R^2$ | RMSE (l/s) | PBIAS (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **KGE** | −0,27 | 0,399 | −1,11 | 0,176 | 4,53 | −14,6 |
| **NSE** | −0,13 | 0,321 | −1,21 | 0,181 | 4,29 | −28,8 |
| **logNSE** | −0,30 | 0,364 | −0,678 | 0,156 | 4,60 | −19,7 |

Sendo que a presente dissertação é associada à quantificação de afluências indevidas, existe um interesse em estimar tanto o volume como o caudal de ponta, dois temas extremamente relevantes no dimensionamento e exploração dos sistemas de drenagem de águas residuais. Tendo isto em conta, a função objetivo referência é o KGE visto produzir um PBIAS mais baixo que os restantes, sem comprometer a forma do hidrograma e, consequentemente, os picos observados. Nas figuras 24 e 25 são apresentados os gráficos de dispersão associados ao intervalo usado na calibração ótima e o hidrograma resultante usando os parâmetros RTK ótimos deste processo de calibração.

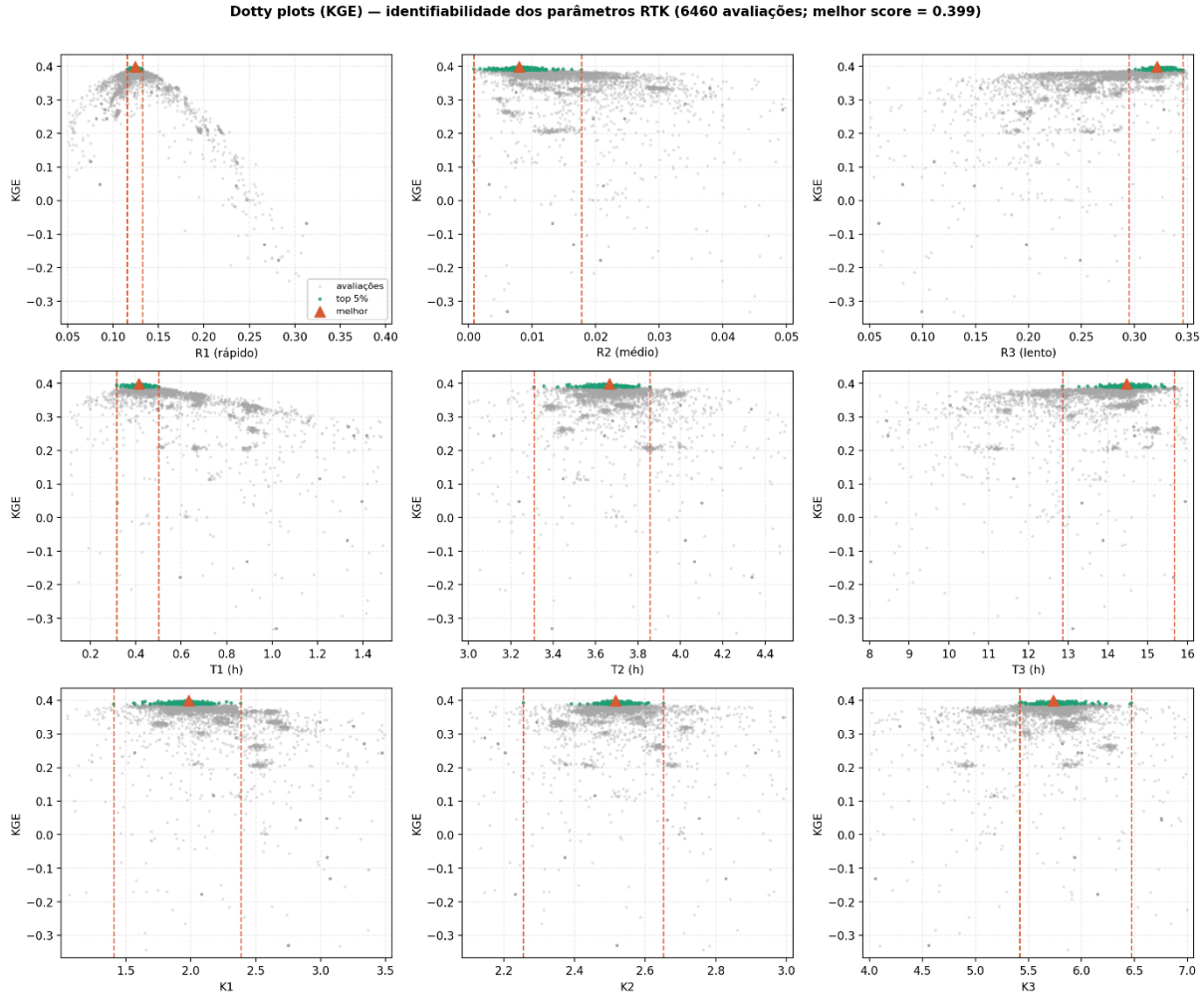



Figura 24: Gráficos de dispersão associados ao intervalo de parâmetros ótimo

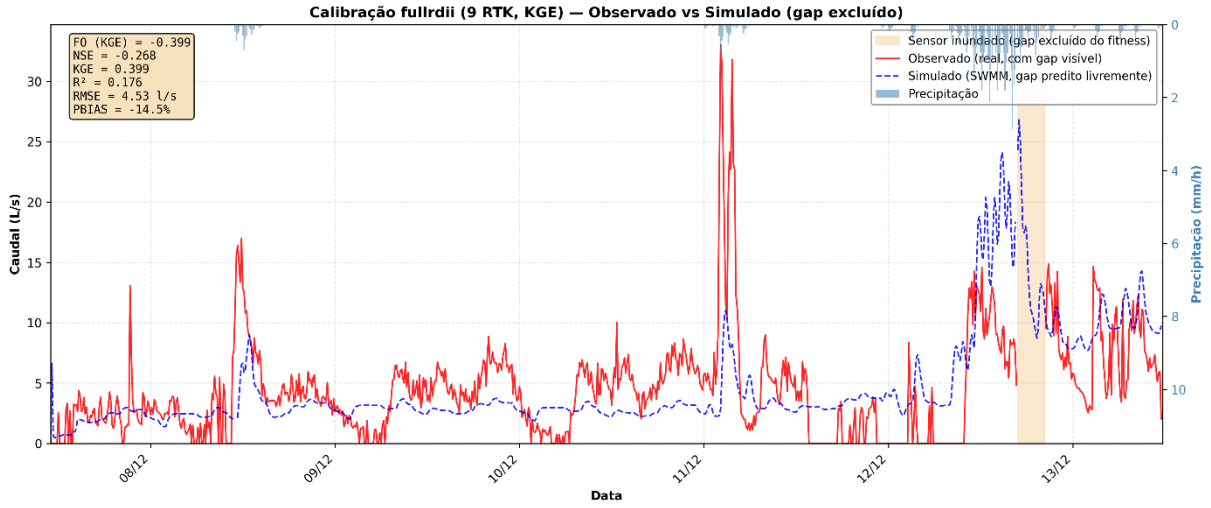



Figura 25: Hidrograma produzido usando os parâmetros ótimos produzidos.

Por fim, na Tabela 10, são apresentados os parâmetros RTK finais e que deram origem ao hidrograma da figura 25.

Tabela 12: Parâmetros RTK finais.

| Parâmetro | Valor |
|---|---|
| **R1 (rápido)** | 0,124 |
| **R2 (médio)** | 0,008 |
| **R3 (lento)** | 0,321 |
| **T1 (h)** | 0,414 |
| **K1** | 1,983 |
| **T2 (h)** | 3,665 |
| **K2** | 2,516 |
| **T3 (h)** | 14,474 |
| **K3** | 5,735 |

# 5
# ANÁLISE E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A leitura isolada das métricas de desempenho consideradas não permite, por si só, a classificação do modelo numa perspetiva de conclusão em relação ao seu desempenho e aplicação futura noutras situações. Para esse efeito recorreu-se à Tabela 9 do subcapítulo 4.5.2.2, onde foi estabelecido, para cada métrica a sua gama de desempenho com classificação de "Ótimo" a "Não Satisfatório" com valores intermédios de "Muito bom", "Bom" e "Satisfatório". Conforme referido em 4.5.3, tendo em conta o interesse tanto em estimar o volume como o caudal de ponta, a calibração de referência selecionada é associada à função objetivo KGE e as suas métricas estão indicadas na Tabela 12. **Na Tabela 13 é realizado o cruzamento entre os intervalos definidos na Tabela 3 e as métricas finais calculadas:**

Tabela 13: Tabela de classificação das métricas obtidas

| Função-objetivo | NSE (-) | | KGE (-) | | logNSE (-) | | $R^2$ (-) | | RMSE (l/s) | PBIAS (%) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **KGE** | −0,27 | Não satisf. | 0,399 | Satisf. | −1,11 | Não satisf. | 0,176 | Não satisf. | 4,53 | −14,6 | Satisf. |

De tal análise com a calibração de referência (KGE), sobressai a presença de várias métricas de desempenho classificadas como 'Não Satisfatório', apresentando valores de NSE e logNSE bem abaixo dos limites mínimos de 0,5. De igual modo o $R^2$ também se apresenta longe dos 0,60 requeridos para uma classificação satisfatória. No entanto, o enviesamento de volume (PBIAS) e o KGE atingem valores que se encaixam dentro dos intervalos de classificação de "Satisfatório".

Os resultados acima referidos revelam que o modelo reproduz de forma aceitável o volume total afluente, mas, no entanto, falha consideravelmente na sua distribuição temporal, conforme se pode concluir da análise do desenvolvimento dos dois hidrogramas constantes na Figura 25.

Esta conclusão leva a questionar o porquê de não ter sido possível atingir as métricas necessárias para conseguir um ajuste satisfatório do modelo com o hidrograma real e o simulado. Tal motivo reside nas condições em que o modelo foi estabelecido. Os dados fornecidos apenas possuem um evento principal de precipitação, no dia 12/12/2019 o qual restringe a informação temporal sobre a resposta da bacia de drenagem. A análise detalhada da série de monitorização revelou, adicionalmente, um conjunto de limitações que condicionam a calibração. Durante o evento principal, entre as 16:50h e as 20:20h, o sensor ficou inundado e não produziu qualquer leitura, imediatamente após o pico de precipitação, ocultando informação importante associado a um intervalo que se prevê como o pico de caudal no medidor. A esta falha acrescem 120 leituras nulas em tempo húmido, muitas das quais surgem por transição instantânea a partir de caudais superiores a 3 L/s. Este comportamento é incompatível com o escoamento gravítico, pelo que estas leituras se interpretam como falhas do sensor e não como ausência de escoamento.

Também se identificam três eventos no período monitorizado, totalizando 9,4 mm. Apenas o evento de 12 de dezembro apresenta expressão relevante (7,9 mm), sendo os restantes inferiores a 1 mm. Este valor corresponde a cerca de 13% da precipitação média esperada para um período equivalente do mês de dezembro (207 mm mensais), e nenhum dos eventos atinge o limiar de 10 mm diários, excedido em média 47 dias por ano na estação de Merelim. A calibração assenta em três eventos que é insuficiente para uma calibração robusta, uma vez que todos os eventos disponíveis foram usados para calibração, não foi possível validar o modelo com outros eventos de precipitação consideráveis.

As métricas de volume atingem a classe satisfatória porque a grandeza que quantificam (volume total afluente), é uma informação disponível que é possível restituir, ao contrário das métricas associadas à forma do hidrograma, que permanecem como não satisfatórias, dado que a grandeza que medem exige uma riqueza de informação temporal que a janela temporal considerada não tem. O desempenho alcançado pelo modelo constitui assim, o melhor possível com a informação e os dados disponíveis, sendo, mesmo assim, passível de ser utilizado para a quantificação do volume de afluências indevidas. Para uma reprodução mais fiel dos caudais reais, os dados recolhidos teriam de ter uma janela temporal muito superior comportando vários eventos de dimensão assinalável.

Esta limitação de dados constitui, por isso, a principal recomendação para calibrações futuras, ou seja, a monitorização de dados de forma que seja possível capturar múltiplos eventos de magnitude considerável. Com vários eventos será possível dividir os eventos em períodos de calibração e de validação, permitindo atestar a capacidade de previsão do modelo. A infraestrutura de automatização desenvolvida com o PySWMM e o SPOTPY permitem repetir todo o processo de calibração sobre novos dados de uma forma simples, sem alterações metodológicas e praticamente eliminam o erro gerando um esforço de recalibração reduzido e reforçando a ideia que o caminho futuro passa por investir na monitorização e na qualidade dos dados recolhidos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almeida, Solange S, e Paulo S Monteiro. 2004. "INCIDÊNCIA DE CAUDAIS DE ÁGUAS PLUVIAIS EM REDES DE DRENAGEM DE ÁGUAS RESIDUAIS". *7º Congresso da Água*.

Baptista, Diogo José Fernandes. 2021. "AFLUÊNCIAS INDEVIDAS NAS REDES DE DRENAGEM PÚBLICAS. EFEITOS DAS BACIAS DE RETENÇÃO". Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Coelho, Inês, Francisco Piqueiro e José Tentúgal-Valente. 2013. "VARIABILIDADE DE AFLUÊNCIAS ÀS REDES DE DRENAGEM DE ÁGUAS RESIDUAIS. CAUSAS E EFEITOS VERSUS SUSTENTABILIDADE ECONÓMICA. UM CASO DE ESTUDO". In *8.as Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. ISBN 978-989-95557-9-2.

Barnhart, Katy. 2020. "PySWMM: The Python Interface do Stormwater Management Model (SWMM)". *The Journal of Open Source Software*.

Bonito, António, Francisco Piqueiro, e José Tentúgal Valente. 2014. "INFILTRAÇÕES EM REDES DE DRENAGEM DE ÁGUAS RESIDUAIS CASO DE ESTUDO DA BACIA DE DRENAGEM DE LANHESES". *9.as Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente*.

Cardoso, Maria Adriana. 2008. "Avaliação do Desempenho de Sistemas de Drenagem Urbana". Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Carvalho Ribeiro, Andrea C, António J Madureira Correia, e Francisco da Silva Costa. 2004. "O RIO SELHO-CONTRIBUTO PARA UMA PROPOSTA DE REQUALIFICAÇÃO AMBIENTAL". Guimarães.

CM Guimarães. 2026. "CM Guimarães". União das freguesias de Selho S.Lourenço e Gominhães - População. 20 de abril de 2026.

Direção-Geral do Território. 2019. "DGT (2019). Carta de Uso e Ocupação do Solo de Portugal Continental para 2018". Lisboa.

DR 23/95. 1995. *DR 23/95. Diário da República nº 194 - 23/08/1995*. Lisboa: MINISTÉRIO DAS OBRAS PÚBLICAS, TRANSPORTES E COMUNICAÇÕES. Regulamento Geral dos Sistemas Públicos e Prediais de Distribuição de Água e de Drenagem de Águas Residuais

Duarte, João Carlos Mendonça. 2020. "AFLUÊNCIAS INDEVIDAS NAS ETAR". Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

EPA. s.d. "Urban Wet Weather Flows".

European Environment Agency. 2022. "High Resolution Layer — Imperviousness Density (IMD) 2021, 10 m. Copernicus Land Monitoring Service.".

Guimarães Visível. 2014. "Câmara de Guimarães constrói solução para evitar cheias no centro da cidade". https://www.guimaraesvisivel.pt/sociedade/noticia/camara-de-guimaraes-constroi-solucao-para-evitar-cheias-no-centro-da-cidade. 14 de janeiro de 2014.

———. 2016. "Bacias de retenção em Guimarães são exemplo nacional na prevenção de cheias em meio urbano". https://www.guimaraesvisivel.pt/noticia-56/bacias-de-retencao-em-guimaraes-sao-exemplo-nacional-na-prevencao-de-cheias-em-meio-urbano. 19 de fevereiro de 2016.

Instituto Português do mar e da Atmosfera. 2026. "Normais Climatológicas - 1991-2020". Precipitação, Normais Climatológicas 1991-2020, Braga/Merelim. 2026.

Kesik, Ted. 2015. *Best practices guide: Management of inflow and infiltration in new urban developments*. Institute for Catastrophic Loss Reduction.

Laboratório da Paisagem. 2019. "O Ave para Todos". https://labpaisagem.pt/projetos/o-ave-para-todos/. 2019.

———. 2021. "REACTivar Guimarães - Renaturalização dos corredores verdes dos Rios Ave, Selho e Vizela". https://labpaisagem.pt/projetos/reactivar-guimaraes/. 2021.

Monte, Helena Marecos do, Maria Teresa dos Santos, Ana Maria Barreiros, e António Albuquerque. 2016. *Tratamento de Águas Residuais - Operações e Processos de Tratamento Físico e Químico*. Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos.

Piqueiro, Francisco Manuel. 2020. "A aplicação do SWMM - Storm Water Management Model, Textos pedagógicos, no âmbito da unidade curricular de Sistemas de Drenagem Urbana. Porto: FEUP".

Schilperoot, Rémy. 2004. "Natural water isotopes for the quantification of infiltration and inflow in sewer systems". Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences.

Silva Costa, Francisco Da. 2013. "PRIOS-Projecto de Reabilitação do Rio Selho: um exemplo de intervenção na zona urbana de Guimarães".

wateranalytics.org. s.d. "Open Water Analytics".

worldclim.org. 2020. "WorldClim". precipitation (mm) 1970-2000. 2020.

# ANEXOS

# A.1 DADOS DA INFRAESTRUTURA DE DRENAGEM DE ÁGUAS RESIDUAIS EXISTENTE

Tabela 14: Câmaras de visita existentes na bacia de drenagem BAC5SELP3 e consideradas na definição da rede

| # | Cota tampa | Cota fundo | Profundidade | X | Y |
|---|---|---|---|---|---|
| 2 | 189,23 | 187,22 | 2,01 | 7 703,94 | 1 219,80 |
| 718136 | 307,18 | 305,53 | 1,65 | 1 252,46 | 9 518,33 |
| 718137 | 306,68 | 305,08 | 1,60 | 1 217,30 | 9 437,98 |
| 718138 | 303,91 | 302,26 | 1,65 | 1 006,38 | 9 224,54 |
| 718139 | 301,76 | 300,11 | 1,65 | 893,38 | 9 006,08 |
| 718140 | 299,67 | 298,12 | 1,55 | 918,49 | 8 729,87 |
| 718141 | 298,49 | 296,76 | 1,73 | 991,31 | 8 498,86 |
| 718142 | 297,00 | 295,52 | 1,48 | 1 061,62 | 8 272,87 |
| 718143 | 295,29 | 293,69 | 1,60 | 1 219,82 | 8 215,11 |
| 718144 | 293,88 | 292,28 | 1,60 | 1 330,30 | 8 205,07 |
| 718145 | 292,71 | 292,11 | 0,60 | 1 498,54 | 8 232,69 |
| 718146 | 291,87 | 291,11 | 0,76 | 1 586,42 | 8 157,36 |
| 718147 | 289,97 | 288,37 | 1,60 | 1 814,92 | 7 911,28 |
| 718200 | 289,80 | 287,41 | 2,39 | 1 927,92 | 7 810,84 |
| 718201 | 287,80 | 286,00 | 1,80 | 2 204,13 | 7 564,76 |
| 718202 | 286,93 | 285,23 | 1,70 | 2 364,84 | 7 401,55 |
| 718203 | 284,37 | 282,67 | 1,70 | 2 440,17 | 7 258,42 |
| 718204 | 280,54 | 278,94 | 1,60 | 2 518,01 | 7 019,87 |
| 718205 | 277,52 | 275,92 | 1,60 | 2 620,96 | 6 851,63 |

| # | Cota tampa | Cota fundo | Profundidade | X | Y |
|---|---|---|---|---|---|
| 718206 | 274,28 | 272,68 | 1,60 | 2 854,48 | 6 648,24 |
| 718207 | 273,30 | 271,70 | 1,60 | 3 060,39 | 6 319,30 |
| 718208 | 272,84 | 271,14 | 1,70 | 3 198,49 | 6 103,35 |
| 718209 | 272,63 | 270,93 | 1,70 | 3 243,69 | 5 962,74 |
| 718210 | 270,12 | 268,32 | 1,80 | 3 241,18 | 5 658,90 |
| 718211 | 266,67 | 264,57 | 2,10 | 3 271,31 | 5 450,49 |
| 718212 | 264,09 | 261,74 | 2,35 | 3 341,62 | 5 372,65 |
| 718213 | 261,58 | 259,93 | 1,65 | 3 437,04 | 5 259,65 |
| 718214 | 258,06 | 256,36 | 1,70 | 3 572,63 | 5 083,88 |
| 720473 | 256,30 | 254,60 | 1,70 | 3 745,89 | 4 795,12 |
| 720472 | 255,27 | 253,57 | 1,70 | 3 894,04 | 4 584,19 |
| 725782 | 253,57 | 251,96 | 1,61 | 4 054,75 | 4 375,78 |
| 718135 | 257,22 | 255,97 | 1,25 | 4 084,88 | 4 677,10 |
| 718134 | 259,04 | 257,44 | 1,60 | 4 112,50 | 5 036,17 |
| 718133 | 259,80 | 258,20 | 1,60 | 4 147,65 | 5 324,94 |
| 719652 | 260,81 | 259,11 | 1,70 | 4 207,92 | 5 716,66 |
| 719651 | 261,35 | 259,67 | 1,68 | 4 210,43 | 5 884,89 |
| 719596 | 262,41 | 260,79 | 1,62 | 4 157,70 | 6 206,30 |
| 719595 | 263,29 | 261,48 | 1,81 | 4 150,17 | 6 414,72 |
| 719594 | 264,38 | 262,58 | 1,80 | 4 253,12 | 6 577,93 |
| 719593 | 265,51 | 263,47 | 2,04 | 4 423,87 | 6 680,89 |

| # | Cota tampa | Cota fundo | Profundidade | X | Y |
|---|---|---|---|---|---|
| 719592 | 266,23 | 264,06 | 2,17 | 4 634,79 | 6 841,59 |
| 719591 | 266,07 | 264,52 | 1,55 | 4 790,47 | 6 964,63 |
| 725780 | 254,67 | 252,96 | 1,71 | 4 308,36 | 4 016,70 |
| 718132 | 257,15 | 256,05 | 1,10 | 4 313,38 | 4 221,35 |
| 718131 | 257,08 | 256,08 | 1,00 | 4 506,73 | 4 264,04 |
| 725779 | 254,54 | 252,33 | 2,21 | 4 280,74 | 4 215,07 |
| 725743 | 254,60 | 251,56 | 3,04 | 4 381,18 | 3 630,01 |
| 725741 | 256,07 | 251,78 | 4,29 | 4 461,53 | 3 298,55 |
| 725740 | 255,90 | 250,85 | 5,05 | 4 433,74 | 3 404,15 |
| 725742 | 256,35 | 253,70 | 2,65 | 4 509,24 | 3 422,85 |
| 725777 | 256,68 | 254,46 | 2,22 | 4 554,44 | 3 553,42 |
| 725778 | 257,17 | 254,95 | 2,22 | 4 544,39 | 3 812,05 |
| 725781 | 257,30 | 255,85 | 1,45 | 4 496,69 | 4 048,09 |
| 725386 | 259,26 | 257,60 | 1,66 | 4 624,75 | 4 103,33 |
| 718076 | 266,38 | 264,68 | 1,70 | 4 863,29 | 3 972,76 |
| 718075 | 270,18 | 268,49 | 1,69 | 5 056,64 | 3 852,23 |
| 718074 | 266,41 | 264,71 | 1,70 | 4 890,91 | 3 716,64 |
| 718073 | 266,45 | 264,75 | 1,70 | 4 938,62 | 3 412,80 |
| 725387 | 259,29 | 257,71 | 1,58 | 4 725,19 | 4 143,51 |
| 725388 | 259,40 | 258,13 | 1,27 | 4 843,21 | 4 176,15 |
| 725389 | 260,93 | 259,51 | 1,42 | 4 926,07 | 4 178,66 |

| # | Cota tampa | Cota fundo | Profundidade | X | Y |
|---|---|---|---|---|---|
| 725390 | 263,21 | 261,63 | 1,58 | 5 255,01 | 4 095,80 |
| 725431 | 219,70 | 217,61 | 2,09 | 7 961,88 | 2 943,24 |
| 718072 | 265,94 | 264,34 | 1,60 | 5 408,18 | 4 015,45 |
| 718071 | 267,66 | 266,06 | 1,60 | 5 583,95 | 3 879,85 |
| 718070 | 271,15 | 269,55 | 1,60 | 5 794,88 | 3 653,86 |
| 718067 | 272,41 | 270,81 | 1,60 | 5 897,83 | 3 628,75 |
| 718066 | 276,97 | 275,37 | 1,60 | 5 935,50 | 3 483,11 |
| 718065 | 282,41 | 280,81 | 1,60 | 5 699,46 | 3 267,16 |
| 718069 | 272,79 | 271,17 | 1,62 | 6 091,18 | 3 771,88 |
| 718068 | 273,02 | 272,02 | 1,00 | 6 264,44 | 3 714,12 |
| 725739 | 256,09 | 250,44 | 5,65 | 4 524,31 | 3 100,18 |
| 725350 | 258,41 | 256,86 | 1,55 | 4 637,30 | 3 152,91 |
| 725385 | 267,15 | 263,89 | 3,26 | 4 905,98 | 3 195,60 |
| 725348 | 256,31 | 250,39 | 5,92 | 4 604,66 | 2 959,57 |
| 725870 | 252,17 | 249,60 | 2,57 | 4 637,30 | 2 608,02 |
| 725865 | 250,88 | 249,05 | 1,83 | 4 644,84 | 2 530,18 |
| 725866 | 251,71 | 247,51 | 4,20 | 4 672,46 | 2 565,34 |
| 725867 | 252,27 | 251,07 | 1,20 | 4 833,16 | 2 399,61 |
| 725868 | 255,51 | 253,87 | 1,64 | 4 820,61 | 2 577,89 |
| 725871 | 254,47 | 252,93 | 1,54 | 4 659,90 | 2 751,15 |
| 725872 | 257,55 | 256,07 | 1,48 | 4 803,42 | 2 762,04 |

| # | Cota tampa | Cota fundo | Profundidade | X | Y |
|---|---|---|---|---|---|
| 725349 | 257,02 | 255,63 | 1,39 | 4 652,37 | 2 939,48 |
| 725347 | 261,03 | 259,57 | 1,46 | 4 792,72 | 2 946,03 |
| 725869 | 256,65 | 254,99 | 1,66 | 4 951,18 | 2 585,42 |
| 725873 | 257,00 | 255,40 | 1,60 | 5 086,77 | 2 582,91 |
| 725830 | 249,19 | 248,13 | 1,06 | 4 700,08 | 2 359,43 |
| 725829 | 247,92 | 246,30 | 1,62 | 4 654,20 | 2 367,66 |
| 725827 | 246,20 | 244,60 | 1,60 | 4 685,01 | 2 186,17 |
| 725825 | 244,06 | 242,46 | 1,60 | 4 737,74 | 2 070,67 |
| 725826 | 241,60 | 240,01 | 1,59 | 4 863,29 | 1 977,76 |
| 725828 | 238,19 | 236,63 | 1,56 | 5 114,39 | 1 892,39 |
| 725783 | 233,30 | 231,77 | 1,53 | 5 465,94 | 1 761,81 |
| 725786 | 232,02 | 230,52 | 1,50 | 5 619,11 | 1 709,08 |
| 725821 | 229,90 | 228,26 | 1,64 | 5 787,35 | 1 666,39 |
| 725785 | 228,03 | 226,38 | 1,65 | 5 958,09 | 1 626,22 |
| 725822 | 224,91 | 223,39 | 1,52 | 6 279,50 | 1 648,82 |
| 725823 | 228,92 | 227,43 | 1,49 | 6 282,02 | 1 778,13 |
| 725824 | 229,00 | 227,02 | 1,98 | 6 442,72 | 1 850,95 |
| 725996 | 230,13 | 227,91 | 2,22 | 6 570,78 | 1 943,86 |
| 725997 | 231,17 | 228,26 | 2,91 | 6 741,53 | 2 069,41 |
| 725998 | 231,07 | 229,48 | 1,59 | 6 859,55 | 2 212,54 |
| 726000 | 230,53 | 229,30 | 1,23 | 6 980,91 | 2 478,68 |

| # | Cota tampa | Cota fundo | Profundidade | X | Y |
|---|---|---|---|---|---|
| 719474 | 230,53 | 229,30 | 1,23 | 7 012,72 | 2 491,26 |
| 717999 | 233,76 | 232,06 | 1,70 | 7 040,34 | 2 606,77 |
| 717998 | 236,56 | 233,76 | 2,80 | 7 012,72 | 2 769,98 |
| 718064 | 240,94 | 239,24 | 1,70 | 6 839,46 | 2 677,08 |
| 718063 | 245,25 | 242,25 | 3,00 | 6 653,64 | 2 591,70 |
| 718062 | 251,75 | 250,05 | 1,70 | 6 445,23 | 2 358,18 |
| 718061 | 253,98 | 252,28 | 1,70 | 6 307,13 | 2 302,94 |
| 718060 | 257,58 | 255,98 | 1,60 | 6 171,53 | 2 403,38 |
| 718005 | 260,59 | 257,89 | 2,70 | 6 179,06 | 2 551,53 |
| 718004 | 263,32 | 259,42 | 3,90 | 6 389,99 | 2 747,39 |
| 718003 | 261,08 | 259,58 | 1,50 | 6 658,67 | 2 983,42 |
| 718002 | 261,60 | 260,30 | 1,30 | 6 706,38 | 3 088,88 |
| 718001 | 262,42 | 261,12 | 1,30 | 6 663,69 | 3 249,59 |
| 718000 | 267,66 | 266,06 | 1,60 | 6 477,87 | 3 450,47 |
| 717997 | 240,73 | 239,13 | 1,60 | 7 160,87 | 2 930,69 |
| 717996 | 242,07 | 240,67 | 1,40 | 7 266,33 | 3 156,68 |
| 717995 | 268,00 | 266,68 | 1,32 | 7 233,69 | 3 518,27 |
| 725910 | 222,08 | 220,62 | 1,46 | 6 553,20 | 1 563,44 |
| 725911 | 221,77 | 220,08 | 1,69 | 6 696,33 | 1 528,29 |
| 725912 | 218,41 | 216,85 | 1,56 | 6 932,37 | 1 591,06 |
| 725913 | 213,92 | 212,46 | 1,46 | 7 208,58 | 1 789,43 |

| # | Cota tampa | Cota fundo | Profundidade | X | Y |
|---|---|---|---|---|---|
| 726001 | 209,38 | 207,84 | 1,54 | 7 411,97 | 1 970,23 |
| 726002 | 209,30 | 207,55 | 1,75 | 7 555,10 | 2 100,80 |
| 726004 | 212,40 | 210,40 | 2,00 | 7 464,70 | 2 217,56 |
| 725999 | 217,19 | 215,84 | 1,35 | 7 173,42 | 2 021,70 |
| 725343 | 213,96 | 212,41 | 1,55 | 7 512,41 | 2 378,27 |
| 725344 | 216,09 | 214,57 | 1,52 | 7 673,12 | 2 616,81 |
| 725391 | 219,77 | 217,32 | 2,45 | 7 786,11 | 2 890,51 |
| 725392 | 220,16 | 217,65 | 2,51 | 7 871,49 | 2 933,20 |
| 725432 | 219,74 | 218,61 | 1,13 | 8 175,32 | 3 056,24 |
| 725393 | 223,04 | 220,10 | 2,94 | 7 833,82 | 3 033,64 |
| 725394 | 224,83 | 223,23 | 1,60 | 7 851,40 | 3 106,46 |
| 725430 | 228,96 | 227,31 | 1,65 | 7 838,84 | 3 247,08 |
| 725433 | 233,33 | 231,43 | 1,90 | 7 823,78 | 3 372,63 |
| 725434 | 233,84 | 232,15 | 1,69 | 7 808,71 | 3 440,42 |
| 725435 | 240,96 | 239,34 | 1,62 | 7 713,29 | 3 648,84 |
| 725436 | 243,48 | 241,82 | 1,66 | 7 703,25 | 3 714,12 |
| 725438 | 243,74 | 240,84 | 2,90 | 7 658,05 | 3 824,61 |
| 725439 | 242,70 | 239,83 | 2,87 | 7 698,23 | 3 897,43 |
| 725477 | 242,40 | 239,93 | 2,47 | 7 653,03 | 3 937,60 |
| 725478 | 242,19 | 239,98 | 2,21 | 7 816,24 | 4 000,38 |
| 725479 | 242,87 | 241,53 | 1,34 | 7 974,44 | 4 103,33 |

| # | Cota tampa | Cota fundo | Profundidade | X | Y |
|---|---|---|---|---|---|
| 725476 | 243,42 | 241,86 | 1,56 | 7 577,70 | 3 945,14 |
| 725475 | 243,07 | 241,51 | 1,56 | 7 499,86 | 3 997,87 |
| 725437 | 244,91 | 243,45 | 1,46 | 7 371,79 | 4 048,09 |
| 725345 | 202,97 | 201,40 | 1,57 | 7 916,68 | 2 432,25 |
| 725346 | 199,07 | 197,53 | 1,54 | 8 115,05 | 2 407,14 |
| 725342 | 195,16 | 193,74 | 1,42 | 8 235,58 | 2 221,33 |
| 725341 | 193,95 | 192,60 | 1,35 | 8 285,80 | 2 135,95 |
| 725693 | 193,41 | 192,67 | 0,74 | 8 373,69 | 2 284,10 |
| 726005 | 194,44 | 192,79 | 1,65 | 8 130,12 | 1 917,50 |
| 725960 | 193,38 | 191,25 | 2,13 | 7 889,06 | 1 618,69 |
| 725959 | 192,47 | 190,21 | 2,26 | 7 806,20 | 1 515,73 |
| 725954 | 189,92 | 186,83 | 3,09 | 7 879,02 | 1 405,25 |
| 725955 | 186,02 | 184,53 | 1,49 | 7 998,18 | 1 290,42 |
| 725953 | 191,08 | 187,97 | 3,11 | 7 738,40 | 1 365,07 |
| 725917 | 193,11 | 192,13 | 0,98 | 7 689,44 | 1 372,92 |
| 725952 | 194,70 | 191,87 | 2,83 | 7 650,52 | 1 428,16 |
| 725957 | 197,48 | 194,51 | 2,97 | 7 590,25 | 1 474,62 |
| 725956 | 200,42 | 197,58 | 2,84 | 7 527,48 | 1 536,14 |
| 725958 | 205,91 | 202,63 | 3,28 | 7 428,29 | 1 624,02 |
| 725909 | 207,88 | 206,18 | 1,70 | 7 209,83 | 1 404,31 |
| 725908 | 208,97 | 207,23 | 1,74 | 6 998,91 | 1 320,19 |

| # | Cota tampa | Cota fundo | Profundidade | X | Y |
|---|---|---|---|---|---|
| 725874 | 211,19 | 209,68 | 1,51 | 6 627,28 | 1 269,97 |
| 725784 | 212,51 | 211,00 | 1,51 | 6 325,96 | 1 243,60 |
| 725961 | 203,79 | 201,95 | 1,84 | 7 601,12 | 1 784,20 |
| 726003 | 203,03 | 202,16 | 0,87 | 7 809,79 | 1 976,93 |
| 725480 | 188,96 | 188,44 | 0,52 | 7 467,21 | 923,13 |
| 725914 | 189,20 | 188,27 | 0,93 | 7 537,52 | 1 041,15 |
| 725916 | 188,80 | 187,36 | 1,44 | 7 615,36 | 1 129,04 |
| 725915 | 188,36 | 186,89 | 1,47 | 7 673,12 | 1 101,42 |

Tabela 15: Condutas existentes na bacia de drenagem 5SELP3 e consideradas para a definição da infraestrutura de drenagem

| # | Material | Diâmetro | Cx Montante | Cota Montante | Cx Jusante | Cota Jusante | Rugosidade | Comprimento |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **739220** | PVC | 200,00 | 725477 | 239,93 | 725439 | 239,83 | 0,011 | 6,14 |
| **736493** | PP | 200,00 | 718136 | 305,53 | 718137 | 305,08 | 0,025 | 10,00 |
| **749985** | PP | 200,00 | 725915 | 186,89 | 2 | 187,22 | 0,025 | 16,30 |
| **740459** | PVC | 200,00 | 725480 | 188,44 | 725914 | 188,27 | 0,011 | 16,60 |
| **740457** | PP | 200,00 | 725873 | 255,40 | 725869 | 254,99 | 0,025 | 19,10 |
| **750056** | PVC | 200,00 | 725693 | 192,67 | 725341 | 192,60 | 0,011 | 23,10 |
| **740451** | PVC | 200,00 | 725867 | 251,07 | 725866 | 247,51 | 0,011 | 23,70 |
| **740384** | PVC | 200,00 | 725830 | 248,13 | 725866 | 247,51 | 0,011 | 26,70 |

| # | Material | Diâmetro | Cx Montante | Cota Montante | Cx Jusante | Cota Jusante | Rugosidade | Comprimento |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **740455** | PVC | 200,00 | 725347 | 259,57 | 725872 | 256,07 | 0,011 | 30,70 |
| **736936** | PP | 200,00 | 718068 | 272,02 | 718069 | 271,17 | 0,025 | 31,30 |
| **740453** | PVC | 200,00 | 725349 | 255,63 | 725871 | 252,93 | 0,011 | 34,50 |
| **750267** | PVC | 200,00 | 725479 | 241,53 | 725478 | 239,98 | 0,011 | 35,40 |
| **736582** | PP | 200,00 | 718131 | 256,08 | 718132 | 256,05 | 0,025 | 36,20 |
| **740460** | PVC | 200,00 | 725914 | 188,27 | 725916 | 187,36 | 0,011 | 20,10 |
| **750270** | PP | 200,00 | 718075 | 268,49 | 718076 | 264,68 | 0,025 | 36,90 |
| **736583** | PP | 200,00 | 718132 | 256,05 | 725779 | 252,33 | 0,025 | 1,92 |
| **748336** | PVC | 200,00 | 725437 | 243,45 | 725476 | 241,86 | 0,011 | 40,10 |
| **740452** | PP | 200,00 | 725869 | 254,99 | 725868 | 253,87 | 0,025 | 22,10 |
| **737345** | PP | 250,00 | 719591 | 264,52 | 719592 | 264,06 | 0,025 | 42,60 |
| **740462** | PVC | 200,00 | 726003 | 202,16 | 725961 | 201,95 | 0,011 | 42,60 |
| **736584** | PP | 200,00 | 718073 | 264,75 | 718074 | 264,71 | 0,025 | 46,10 |
| **739215** | PVC | 200,00 | 725385 | 263,89 | 725350 | 256,86 | 0,011 | 47,90 |
| **750139** | PP | 200,00 | 718065 | 280,81 | 718066 | 275,37 | 0,025 | 49,10 |
| **739217** | PVC | 200,00 | 725432 | 218,61 | 725431 | 217,61 | 0,011 | 49,20 |
| **740458** | PVC | 200,00 | 725784 | 211,00 | 725874 | 209,68 | 0,011 | 52,20 |
| **740461** | PVC | 200,00 | 725916 | 187,36 | 2 | 187,22 | 0,011 | 17,00 |

| # | Material | Diâmetro | Cx Montante | Cota Montante | Cx Jusante | Cota Jusante | Rugosidade | Comprimento |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **749680** | PP | 200,00 | 718000 | 266,06 | 718001 | 261,12 | 0,025 | 55,30 |
| **739214** | PVC | 200,00 | 725999 | 215,84 | 726004 | 210,40 | 0,011 | 58,50 |
| **750268** | PVC | 200,00 | 725478 | 239,98 | 725439 | 239,83 | 0,011 | 24,50 |
| **736494** | PP | 200,00 | 718137 | 305,08 | 718138 | 302,26 | 0,025 | 50,00 |
| **736647** | PP | 200,00 | 717995 | 266,68 | 717996 | 240,67 | 0,025 | 60,50 |
| **748338** | PVC | 200,00 | 725476 | 241,86 | 725438 | 240,84 | 0,011 | 22,80 |
| **739218** | PVC | 200,00 | 725431 | 217,61 | 725392 | 217,65 | 0,011 | 13,70 |
| **740456** | PVC | 200,00 | 725872 | 256,07 | 725868 | 253,87 | 0,011 | 32,80 |
| **739216** | PVC | 200,00 | 725350 | 256,86 | 725739 | 250,44 | 0,011 | 16,90 |
| **740454** | PVC | 200,00 | 725871 | 252,93 | 725866 | 247,51 | 0,011 | 33,90 |
| **750140** | PP | 200,00 | 718066 | 275,37 | 718067 | 270,81 | 0,025 | 21,90 |
| **736937** | PP | 200,00 | 718069 | 271,17 | 718067 | 270,81 | 0,025 | 40,90 |
| **739219** | PVC | 200,00 | 725392 | 217,65 | 725391 | 217,32 | 0,011 | 11,90 |
| **749681** | PP | 200,00 | 718001 | 261,12 | 718002 | 260,30 | 0,025 | 23,60 |
| **750269** | PVC | 200,00 | 725439 | 239,83 | 725438 | 240,84 | 0,011 | 14,30 |
| **740463** | PVC | 200,00 | 725961 | 201,95 | 725958 | 202,63 | 0,011 | 38,80 |
| **737346** | PP | 250,00 | 719592 | 264,06 | 719593 | 263,47 | 0,025 | 42,60 |
| **736585** | PP | 200,00 | 718074 | 264,71 | 718076 | 264,68 | 0,025 | 44,70 |

| # | Material | Diâmetro | Cx Montante | Cota Montante | Cx Jusante | Cota Jusante | Rugosidade | Comprimento |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **736495** | PP | 200,00 | 718138 | 302,26 | 718139 | 300,11 | 0,025 | 41,00 |
| **749682** | PP | 200,00 | 718002 | 260,30 | 718003 | 259,58 | 0,025 | 22,40 |
| **736648** | PP | 200,00 | 717996 | 240,67 | 717997 | 239,13 | 0,025 | 42,80 |
| **749986** | PVC | 200,00 | 2 | 187,22 | 725953 | 187,97 | 0,011 | 37,70 |
| **749994** | PVC | 200,00 | 725874 | 209,68 | 725908 | 207,23 | 0,011 | 58,60 |
| **737400** | PP | 250,00 | 719593 | 263,47 | 719594 | 262,58 | 0,025 | 28,20 |
| **749086** | PVC | 200,00 | 725868 | 253,87 | 725866 | 247,51 | 0,011 | 26,40 |
| **736496** | PP | 200,00 | 718139 | 300,11 | 718140 | 298,12 | 0,025 | 38,00 |
| **737401** | PP | 250,00 | 719594 | 262,58 | 719595 | 261,48 | 0,025 | 30,20 |
| **736649** | PP | 200,00 | 717997 | 239,13 | 717998 | 233,76 | 0,025 | 41,80 |
| **749995** | PVC | 200,00 | 725908 | 207,23 | 725909 | 206,18 | 0,011 | 41,50 |
| **749683** | PP | 200,00 | 718003 | 259,58 | 718004 | 259,42 | 0,025 | 56,60 |
| **750141** | PP | 200,00 | 718067 | 270,81 | 718070 | 269,55 | 0,025 | 16,90 |
| **748283** | PVC | 200,00 | 725438 | 240,84 | 725435 | 239,34 | 0,011 | 27,40 |
| **750271** | PP | 200,00 | 718076 | 264,68 | 725386 | 257,60 | 0,025 | 43,20 |
| **737402** | PP | 250,00 | 719595 | 261,48 | 719596 | 260,79 | 0,025 | 31,50 |
| **736497** | PP | 200,00 | 718140 | 298,12 | 718141 | 296,76 | 0,025 | 51,00 |
| **749996** | PVC | 200,00 | 725909 | 206,18 | 725958 | 202,63 | 0,011 | 54,40 |

| # | Material | Diâmetro | Cx Montante | Cota Montante | Cx Jusante | Cota Jusante | Rugosidade | Comprimento |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **749684** | PP | 200,00 | 718004 | 259,42 | 718005 | 257,89 | 0,025 | 49,00 |
| **748334** | PVC | 200,00 | 725435 | 239,34 | 725433 | 231,43 | 0,011 | 48,90 |
| **750142** | PP | 200,00 | 718070 | 269,55 | 718071 | 266,06 | 0,025 | 60,00 |
| **736498** | PP | 200,00 | 718141 | 296,76 | 718142 | 295,52 | 0,025 | 37,70 |
| **749685** | PP | 200,00 | 718005 | 257,89 | 718060 | 255,98 | 0,025 | 26,40 |
| **737403** | PP | 250,00 | 719596 | 260,79 | 719651 | 259,67 | 0,025 | 60,50 |
| **748280** | PVC | 200,00 | 725433 | 231,43 | 725430 | 227,31 | 0,011 | 25,00 |
| **736499** | PP | 200,00 | 718142 | 295,52 | 718143 | 293,69 | 0,025 | 24,50 |
| **749087** | PVC | 200,00 | 725866 | 247,51 | 725865 | 249,05 | 0,011 | 4,98 |
| **750143** | PP | 200,00 | 718071 | 266,06 | 718072 | 264,34 | 0,025 | 36,50 |
| **749686** | PP | 200,00 | 718060 | 255,98 | 718061 | 252,28 | 0,025 | 29,40 |
| **737404** | PP | 250,00 | 719651 | 259,67 | 719652 | 259,11 | 0,025 | 28,80 |
| **748281** | PVC | 200,00 | 725430 | 227,31 | 725394 | 223,23 | 0,011 | 22,90 |
| **736500** | PP | 200,00 | 718143 | 293,69 | 718144 | 292,28 | 0,025 | 21,40 |
| **750144** | PP | 200,00 | 718072 | 264,34 | 725390 | 261,63 | 0,025 | 27,30 |
| **749687** | PP | 200,00 | 718061 | 252,28 | 718062 | 250,05 | 0,025 | 21,80 |
| **736501** | PP | 200,00 | 718144 | 292,28 | 718145 | 292,11 | 0,025 | 24,40 |
| **748278** | PVC | 200,00 | 725394 | 223,23 | 725391 | 217,32 | 0,011 | 41,50 |

| # | Material | Diâmetro | Cx Montante | Cota Montante | Cx Jusante | Cota Jusante | Rugosidade | Comprimento |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **750045** | PVC | 200,00 | 725958 | 202,63 | 725956 | 197,58 | 0,011 | 23,90 |
| **736502** | PP | 200,00 | 718145 | 292,11 | 718146 | 291,11 | 0,025 | 20,50 |
| **737405** | PP | 250,00 | 719652 | 259,11 | 718133 | 258,20 | 0,025 | 61,10 |
| **750046** | PVC | 200,00 | 725956 | 197,58 | 725957 | 194,51 | 0,011 | 14,20 |
| **750272** | PVC | 200,00 | 725390 | 261,63 | 725389 | 259,51 | 0,011 | 53,90 |
| **750047** | PVC | 200,00 | 725957 | 194,51 | 725952 | 191,87 | 0,011 | 13,60 |
| **749688** | PP | 200,00 | 718062 | 250,05 | 718063 | 242,25 | 0,025 | 57,00 |
| **750048** | PVC | 200,00 | 725952 | 191,87 | 725917 | 192,13 | 0,011 | 9,66 |
| **750273** | PVC | 200,00 | 725389 | 259,51 | 725388 | 258,13 | 0,011 | 15,90 |
| **750049** | PVC | 200,00 | 725917 | 192,13 | 725953 | 187,97 | 0,011 | 12,40 |
| **736503** | PP | 200,00 | 718146 | 291,11 | 718147 | 288,37 | 0,025 | 49,70 |
| **750274** | PVC | 200,00 | 725388 | 258,13 | 725387 | 257,71 | 0,011 | 16,50 |
| **749689** | PP | 200,00 | 718063 | 242,25 | 718064 | 239,24 | 0,025 | 29,60 |
| **736580** | PP | 200,00 | 718133 | 258,20 | 718134 | 257,44 | 0,025 | 55,20 |
| **750275** | PVC | 200,00 | 725387 | 257,71 | 725386 | 257,60 | 0,011 | 22,80 |
| **736504** | PP | 200,00 | 718147 | 288,37 | 718200 | 287,41 | 0,025 | 32,90 |
| **749739** | PP | 200,00 | 718064 | 239,24 | 717998 | 233,76 | 0,025 | 32,00 |
| **748527** | PVC | 200,00 | 725391 | 217,32 | 725344 | 214,57 | 0,011 | 50,30 |

| # | Material | Diâmetro | Cx Montante | Cota Montante | Cx Jusante | Cota Jusante | Rugosidade | Comprimento |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **736581** | PP | 200,00 | 718134 | 257,44 | 718135 | 255,97 | 0,025 | 59,60 |
| **736566** | PP | 200,00 | 718200 | 287,41 | 718201 | 286,00 | 0,025 | 59,70 |
| **748528** | PVC | 200,00 | 725344 | 214,57 | 725343 | 212,41 | 0,011 | 47,90 |
| **749249** | PVC | 200,00 | 718135 | 255,97 | 725782 | 251,96 | 0,011 | 45,90 |
| **736567** | PP | 200,00 | 718201 | 286,00 | 718202 | 285,23 | 0,025 | 37,10 |
| **748529** | PVC | 200,00 | 725343 | 212,41 | 726004 | 210,40 | 0,011 | 30,30 |
| **736568** | PP | 200,00 | 718202 | 285,23 | 718203 | 282,67 | 0,025 | 32,40 |
| **736569** | PP | 200,00 | 718203 | 282,67 | 718204 | 278,94 | 0,025 | 36,60 |
| **749740** | PP | 200,00 | 717998 | 233,76 | 717999 | 232,06 | 0,025 | 24,40 |
| **750276** | PVC | 200,00 | 725386 | 257,60 | 725781 | 255,85 | 0,011 | 22,90 |
| **749993** | PVC | 200,00 | 725953 | 187,97 | 725954 | 186,83 | 0,011 | 13,60 |
| **748526** | PVC | 200,00 | 726004 | 210,40 | 726002 | 207,55 | 0,011 | 23,90 |
| **736570** | PP | 200,00 | 718204 | 278,94 | 718205 | 275,92 | 0,025 | 28,30 |
| **749741** | PP | 200,00 | 717999 | 232,06 | 719474 | 229,30 | 0,025 | 22,70 |
| **719742** | PP | 200,00 | 719474 | 229,30 | 726000 | 229,30 | 0,025 | 4,82 |
| **750277** | PVC | 200,00 | 725781 | 255,85 | 725778 | 254,95 | 0,011 | 50,90 |
| **740464** | PVC | 200,00 | 726000 | 229,30 | 725998 | 229,48 | 0,011 | 49,00 |
| **736571** | PP | 200,00 | 718205 | 275,92 | 718206 | 272,68 | 0,025 | 59,20 |

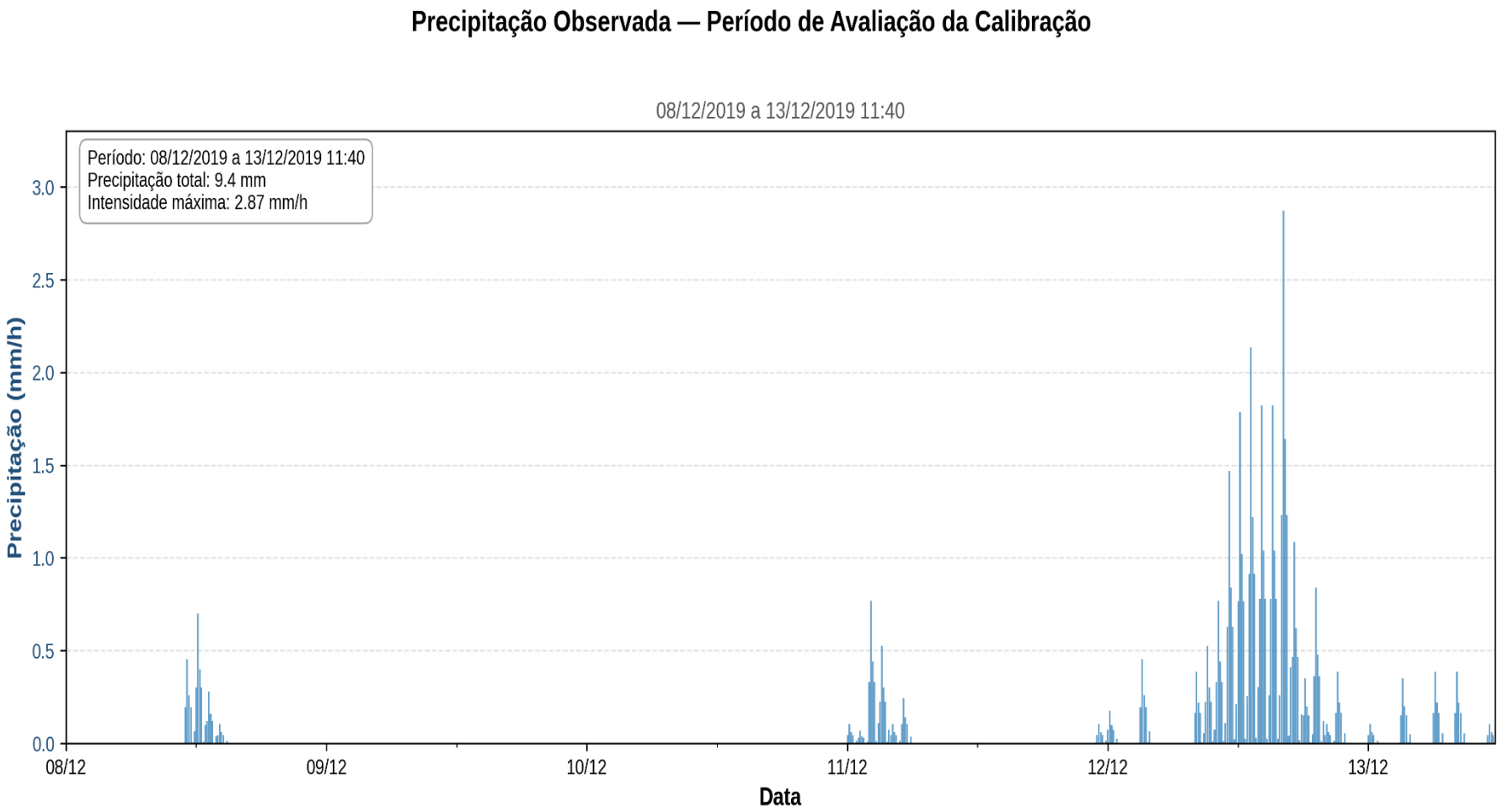
| # | Material | Diâmetro | Cx Montante | Cota Montante | Cx Jusante | Cota Jusante | Rugosidade | Comprimento |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **749239** | PVC | 200,00 | 725778 | 254,95 | 725777 | 254,46 | 0,011 | 29,80 |
| **740465** | PVC | 200,00 | 725998 | 229,48 | 725997 | 228,26 | 0,011 | 38,70 |
| **749240** | PVC | 200,00 | 725777 | 254,46 | 725742 | 253,70 | 0,011 | 26,40 |
| **736572** | PP | 200,00 | 718206 | 272,68 | 718207 | 271,70 | 0,025 | 59,80 |
| **740466** | PVC | 200,00 | 725997 | 228,26 | 725996 | 227,91 | 0,011 | 32,20 |
| **749241** | PVC | 200,00 | 725742 | 253,70 | 725741 | 251,78 | 0,011 | 27,90 |
| **740467** | PVC | 200,00 | 725996 | 227,91 | 725824 | 227,02 | 0,011 | 28,60 |
| **736573** | PP | 200,00 | 718207 | 271,70 | 718208 | 271,14 | 0,025 | 40,30 |
| **736574** | PP | 200,00 | 718208 | 271,14 | 718209 | 270,93 | 0,025 | 26,40 |
| **740468** | PVC | 200,00 | 725824 | 227,02 | 725823 | 227,43 | 0,011 | 33,50 |
| **739213** | PVC | 200,00 | 725823 | 227,43 | 725822 | 223,39 | 0,011 | 19,10 |
| **736575** | PP | 200,00 | 718209 | 270,93 | 718210 | 268,32 | 0,025 | 49,80 |
| **736576** | PP | 200,00 | 718210 | 268,32 | 718211 | 264,57 | 0,025 | 32,70 |
| **736577** | PP | 200,00 | 718211 | 264,57 | 718212 | 261,74 | 0,025 | 26,40 |
| **736578** | PP | 200,00 | 718212 | 261,74 | 718213 | 259,93 | 0,025 | 23,00 |
| **736579** | PP | 200,00 | 718213 | 259,93 | 718214 | 256,36 | 0,025 | 38,50 |
| **733042** | PP | 200,00 | 718214 | 256,36 | 720473 | 254,60 | 0,025 | 45,80 |
| **733043** | PP | 200,00 | 720473 | 254,60 | 720472 | 253,57 | 0,025 | 48,60 |

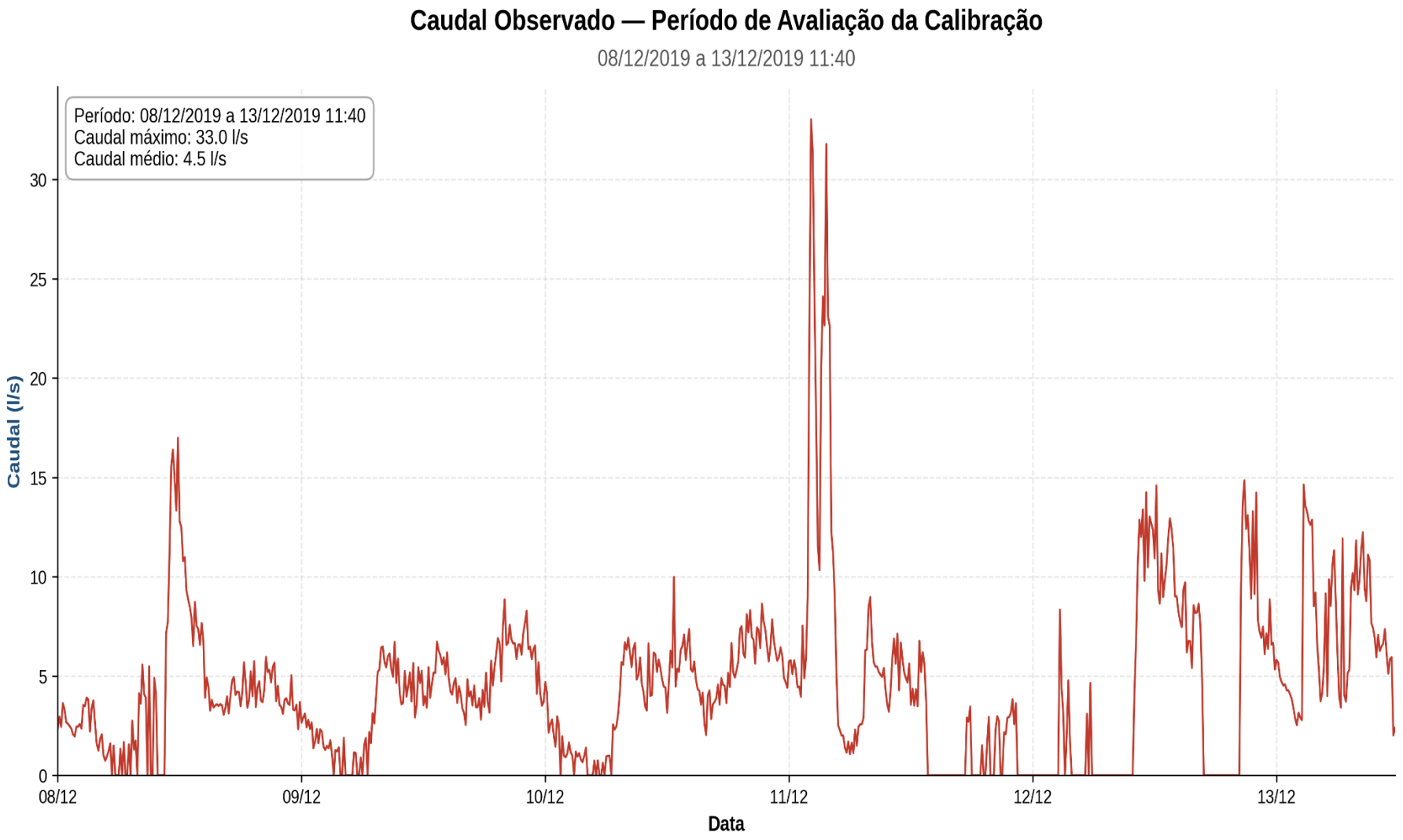
| # | Material | Diâmetro | Cx Montante | Cota Montante | Cx Jusante | Cota Jusante | Rugosidade | Comprimento |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **733044** | PP | 200,00 | 720472 | 253,57 | 725782 | 251,96 | 0,025 | 40,00 |
| **749295** | PVC | 200,00 | 725782 | 251,96 | 725779 | 252,33 | 0,011 | 49,90 |
| **749296** | PVC | 200,00 | 725779 | 252,33 | 725780 | 252,96 | 0,011 | 37,60 |
| **749297** | PVC | 200,00 | 725780 | 252,96 | 725743 | 251,56 | 0,011 | 59,50 |
| **749298** | PVC | 200,00 | 725743 | 251,56 | 725740 | 250,85 | 0,011 | 48,30 |
| **749299** | PVC | 200,00 | 725740 | 250,85 | 725741 | 251,78 | 0,011 | 20,60 |
| **749294** | PVC | 200,00 | 725741 | 251,78 | 725739 | 250,44 | 0,011 | 18,40 |
| **749291** | PVC | 200,00 | 725739 | 250,44 | 725348 | 250,39 | 0,011 | 33,50 |
| **749292** | PVC | 200,00 | 725348 | 250,39 | 725870 | 249,60 | 0,011 | 59,70 |
| **749293** | PVC | 200,00 | 725870 | 249,60 | 725865 | 249,05 | 0,011 | 13,10 |
| **750257** | PVC | 200,00 | 725865 | 249,05 | 725829 | 246,30 | 0,011 | 28,60 |
| **750258** | PVC | 200,00 | 725829 | 246,30 | 725827 | 244,60 | 0,011 | 29,30 |
| **750259** | PVC | 200,00 | 725827 | 244,60 | 725825 | 242,46 | 0,011 | 20,50 |
| **750260** | PVC | 200,00 | 725825 | 242,46 | 725826 | 240,01 | 0,011 | 25,30 |
| **750261** | PVC | 200,00 | 725826 | 240,01 | 725828 | 236,63 | 0,011 | 47,00 |
| **749286** | PVC | 200,00 | 725828 | 236,63 | 725783 | 231,77 | 0,011 | 56,50 |
| **749287** | PVC | 200,00 | 725783 | 231,77 | 725786 | 230,52 | 0,011 | 32,40 |
| **749288** | PVC | 200,00 | 725786 | 230,52 | 725821 | 228,26 | 0,011 | 35,30 |

| # | Material | Diâmetro | Cx Montante | Cota Montante | Cx Jusante | Cota Jusante | Rugosidade | Comprimento |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **749289** | PVC | 200,00 | 725821 | 228,26 | 725785 | 226,38 | 0,011 | 25,90 |
| **749290** | PVC | 200,00 | 725785 | 226,38 | 725822 | 223,39 | 0,011 | 57,30 |
| **750061** | PVC | 200,00 | 725822 | 223,39 | 725910 | 220,62 | 0,011 | 50,40 |
| **750062** | PVC | 200,00 | 725910 | 220,62 | 725911 | 220,08 | 0,011 | 28,30 |
| **750115** | PVC | 200,00 | 725911 | 220,08 | 725912 | 216,85 | 0,011 | 34,20 |
| **750116** | PVC | 200,00 | 725912 | 216,85 | 725913 | 212,46 | 0,011 | 58,00 |
| **750117** | PVC | 200,00 | 725913 | 212,46 | 726001 | 207,84 | 0,011 | 58,70 |
| **750118** | PVC | 200,00 | 726001 | 207,84 | 726002 | 207,55 | 0,011 | 19,40 |
| **750119** | PVC | 200,00 | 726002 | 207,55 | 725345 | 201,40 | 0,011 | 91,00 |
| **750120** | PVC | 200,00 | 725345 | 201,40 | 725346 | 197,53 | 0,011 | 31,20 |
| **750121** | PVC | 200,00 | 725346 | 197,53 | 725342 | 193,74 | 0,011 | 39,40 |
| **750256** | PVC | 200,00 | 725342 | 193,74 | 725341 | 192,60 | 0,011 | 14,30 |
| **750057** | PVC | 200,00 | 725341 | 192,60 | 726005 | 192,79 | 0,011 | 48,80 |
| **750058** | PVC | 200,00 | 726005 | 192,79 | 725960 | 191,25 | 0,011 | 68,20 |
| **750059** | PVC | 200,00 | 725960 | 191,25 | 725959 | 190,21 | 0,011 | 27,00 |
| **750060** | PVC | 200,00 | 725959 | 190,21 | 725954 | 186,83 | 0,011 | 15,20 |
| **748560** | PVC | 200,00 | 725954 | 186,83 | 725955 | 184,53 | 0,011 | 28,80 |
| **750245** | GRÉS-CERÂMICO | 200,00 | 725434 | 232,15 | 725393 | 220,10 | 0,011 | 71,00 |

| # | Material | Diâmetro | Cx Montante | Cota Montante | Cx Jusante | Cota Jusante | Rugosidade | Comprimento |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **750247** | GRÉS-CERÂMICO | 200,00 | 725436 | 241,82 | 725434 | 232,15 | 0,011 | 52,50 |
| **750250** | GRÉS-CERÂMICO | 200,00 | 725475 | 241,51 | 725436 | 241,82 | 0,011 | 54,50 |

# A.2 DADOS RELATIVOS À PRECIPITAÇÃO E CAUDAL OBSERVADO (02/12/2019 A 13/12/2019)


Precipitação Observada — Período de Avaliação da Calibração
08/12/2019 a 13/12/2019 11:40
Período: 08/12/2019 a 13/12/2019 11:40
Precipitação total: 9.4 mm
Intensidade máxima: 2.87 mm/h
Precipitação (mm/h)
3.0
2.5
2.0
1.5
1.0
0.5
0.0
08/12
09/12
10/12
11/12
12/12
13/12
Data


Caudal Observado — Período de Avaliação da Calibração
08/12/2019 a 13/12/2019 11:40
Período: 08/12/2019 a 13/12/2019 11:40
Caudal máximo: 33.0 l/s
Caudal médio: 4.5 l/s
Caudal (l/s)
0
5
10
15
20
25
30
08/12
09/12
10/12
11/12
12/12
13/12
Data

# A.3 RESULTADOS DAS DIVERSAS CALIBRAÇÕES

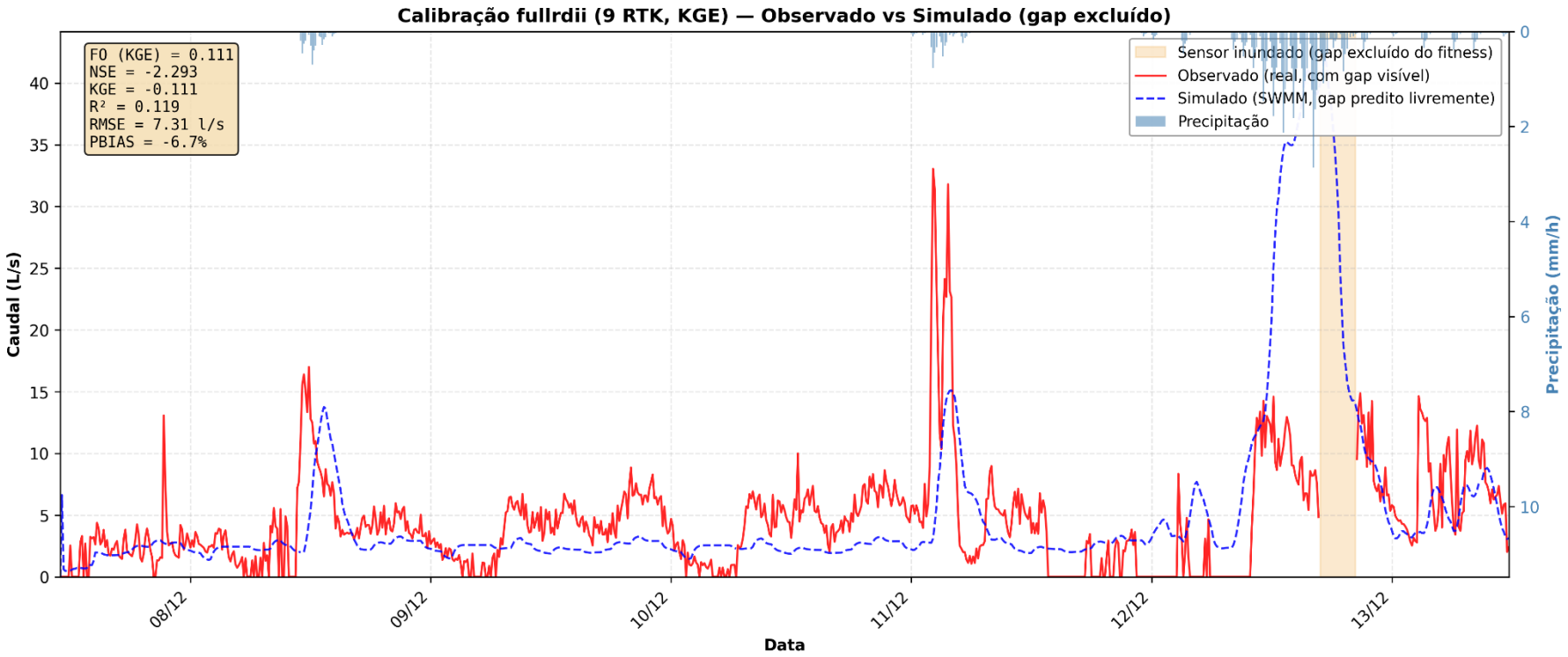
| Função | Calibração | Avaliações | Duração (s) | NSE | KGE | logNSE | $R^2$ | RMSE (l/s) | PBIAS (%) | R1 | R2 | R3 | T1 (h) | K1 | T2 (h) | K2 | T3 (h) | K3 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **KGE** | Calib 3 | 5700 | 30601 | -2,293 | -0,111 | -1,320 | 0,119 | 7,31 | -6,7 | 0,300 | 0,0002 | 0,037 | 1,00 | 1,97 | 3,51 | 2,63 | 12,30 | 6,28 |
| **KGE** | Calib 4 | 6460 | 44195 | -0,268 | 0,399 | -1,105 | 0,176 | 4,53 | -14,5 | 0,124 | 0,0079 | 0,321 | 0,41 | 1,98 | 3,67 | 2,52 | 14,47 | 5,74 |
| **KGE** | Calib 5 | 2850 | 17711 | -0,282 | 0,399 | -1,091 | 0,177 | 4,56 | -14,6 | 0,128 | 0,0208 | 0,377 | 0,44 | 2,00 | 3,79 | 2,44 | 17,54 | 6,51 |
| **NSE** | Calib 1 | 4560 | 13556 | -2,278 | -0,109 | -0,681 | 0,123 | 7,30 | -6,6 | 0,300 | 0,0003 | 0,028 | 0,98 | 1,96 | 3,40 | 2,71 | 11,95 | 5,98 |
| **NSE** | Calib 2 | 5130 | 15605 | -0,095 | 0,258 | -0,236 | 0,171 | 4,22 | -30,3 | 0,073 | 0,0117 | 0,194 | 0,35 | 2,60 | 3,55 | 2,62 | 13,03 | 5,83 |
| **NSE** | Calib 3 | 5890 | 23882 | -0,087 | 0,290 | -1,070 | 0,176 | 4,20 | -28,4 | 0,076 | 0,0142 | 0,319 | 0,31 | 2,88 | 4,05 | 2,43 | 17,11 | 7,10 |
| **NSE** | Calib 4 | 3800 | 12347 | -0,134 | 0,321 | -1,209 | 0,181 | 4,29 | -28,8 | 0,101 | 0,0050 | 0,186 | 0,38 | 2,91 | 3,68 | 3,03 | 14,33 | 5,64 |

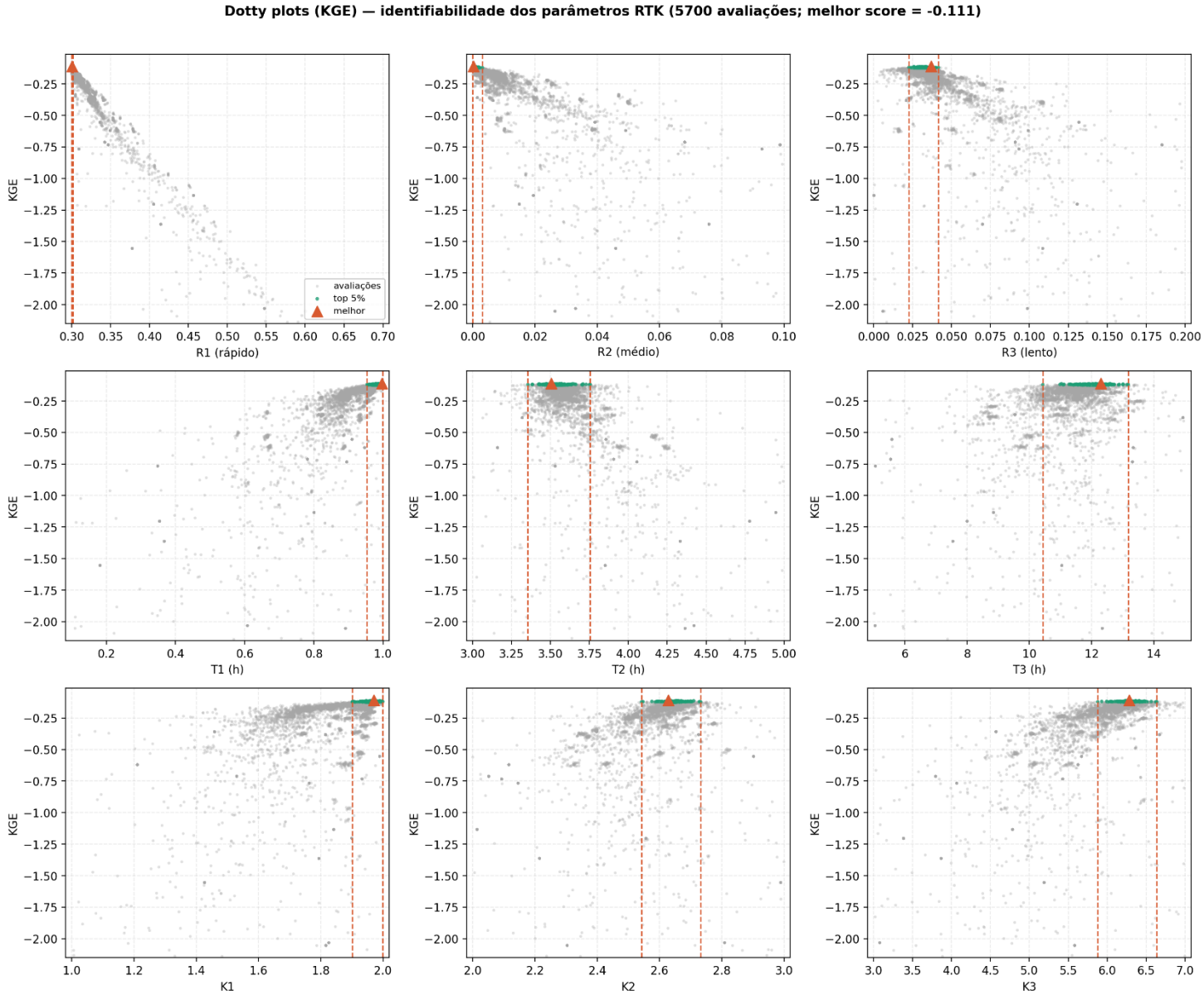
| Função | Calibração | Avaliações | Duração (s) | NSE | KGE | logNSE | $R^2$ | RMSE (l/s) | PBIAS (%) | R1 | R2 | R3 | T1 (h) | K1 | T2 (h) | K2 | T3 (h) | K3 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **logNSE** | Calib 1 | 3800 | 25668 | -3,041 | -0,322 | -0,975 | 0,149 | 8,10 | 6,9 | 0,308 | 0,0250 | 0,110 | 0,69 | 1,54 | 3,37 | 2,32 | 11,68 | 6,33 |
| **logNSE** | Calib 2 | 4180 | 26222 | -0,396 | 0,346 | -0,716 | 0,138 | 4,76 | -17,1 | 0,112 | 0,0748 | 0,142 | 0,80 | 1,72 | 3,86 | 2,23 | 12,78 | 5,46 |
| **logNSE** | Calib 3 | 2090 | 10586 | -0,302 | 0,364 | -0,678 | 0,156 | 4,60 | -19,7 | 0,120 | 0,0486 | 0,155 | 0,65 | 1,56 | 4,14 | 2,65 | 14,18 | 5,51 |

| Função-objetivo | Calibração | Avaliações | Duração (s) | Notas |
|---|---|---|---|---|
| **KGE** | Calib 3 | 5700 | 30601 | [Calib 3] fullrdii KGE — etapa 3, bounds de literatura/EPA + DWF distribuido filtrar (recomeço do amplo) para verificação se a modificação do DWF melhora o KGE \| janela fitness n=569 (gap=22, lowflow=134) \| NSE_full=-1.2655 \| sim em falta->0 |
| **KGE** | Calib 4 | 6460 | 44195 | [Calib 4] fullrdii KGE — etapa 4, DWF distribuido filtrar + bounds realinhados pela Calib 2 (R1 livre a descer ~0.13, R3 teto aberto p/ 0.35, T1 piso baixado p/ 0.10). Objetivo: juntar KGE alto do R1 baixo com o volume corrigido do novo DWF \| janela fitness n=569 (gap=22, lowflow=134) \| NSE_full=0.0330 \| sim em falta->0 |
| **KGE** | Calib 5 | 2850 | 17711 | [Calib 5] fullrdii KGE — etapa 5, R3 teto alargado p/ 0.55 (colou a 0.35 na C4) e T3 p/ 22 (aproximava-se de 16); restantes estreitados à volta do top5 pct da C4 (R1~0.12). Objetivo: desencravar o R3, obter ótimo com TODOS os parâmetros interiores e reduzir a subestimação de volume (PBIAS -14.6%) \| janela fitness n=569 (gap=22, lowflow=134) \| NSE_full=0.0207 \| sim em falta->0 |
| **NSE** | Calib 1 | 4560 | 13556 | [Calib 1] fullrdii NSE — etapa 1, bounds de literatura |
| **NSE** | Calib 2 | 5130 | 15605 | [Calib 2] fullrdii NSE — etapa 2, R1 → [0,01; 0,40], T1 → [0,1; 3] h, K1 → [1; 7] |
| **NSE** | Calib 3 | 5890 | 23882 | [Calib 3] RECUPERADA do terminal (outputs/ movida durante corrida; avaliações/dotty perdidos). R3=0.319 INTERIOR de [0.10,0.40] — bound resolvido. janela fitness n=569 \| sim em falta->0 |
| **NSE** | Calib 4 | 3800 | 12347 | [Calib 4] fullrdii NSE — bounds de literatura/EPA + DWF distribuido filtrar (recomeço do amplo) \| janela fitness n=569 (gap=22, lowflow=134) \| NSE_full=0.1543 \| sim em falta->0 |
| **logNSE** | Calib 1 | 3800 | 25668 | [Calib 1] fullrdii logNSE — etapa 1, bounds de literatura (iguais à Calib 1 do NSE) \| janela fitness n=569 (gap=22, lowflow=134) \| NSE_full=-1.8140 \| sim em falta->0 |

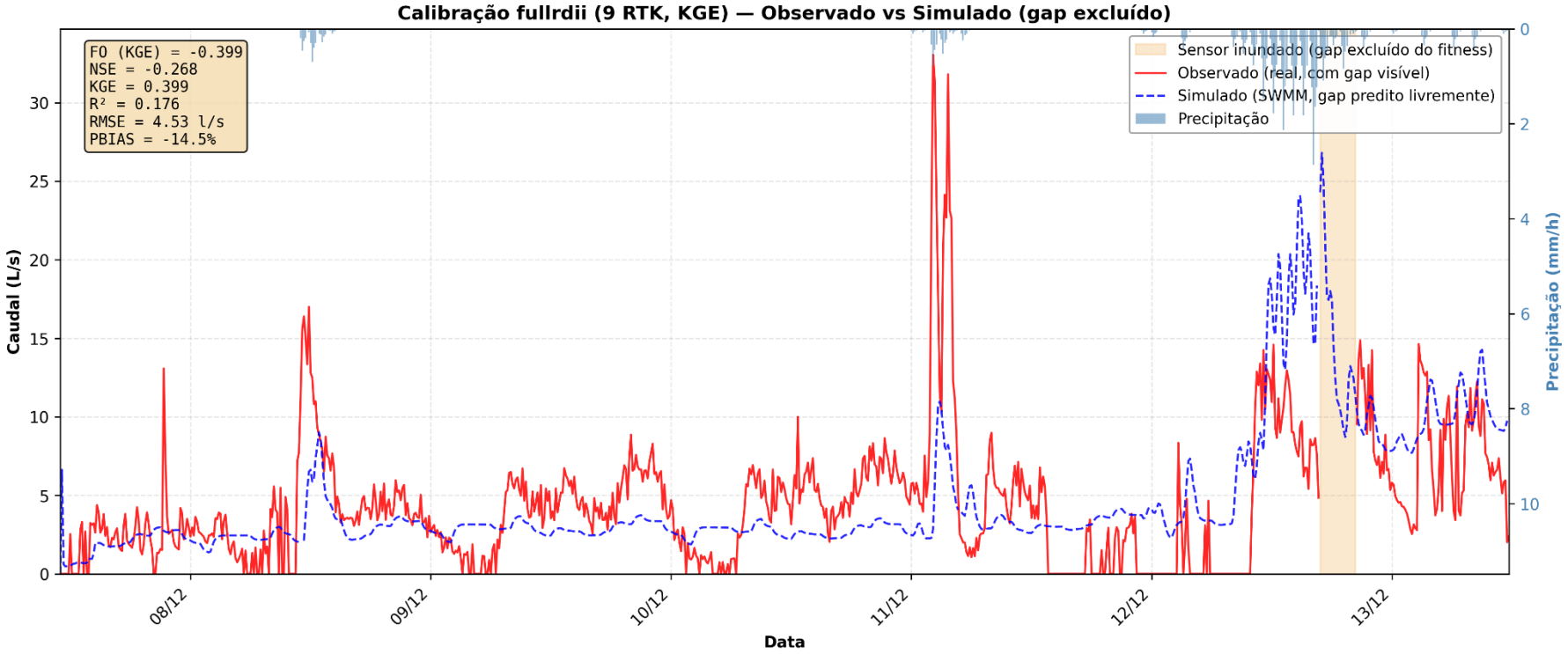
| Função-objetivo | Calibração | Avaliações | Duração (s) | Notas |
|---|---|---|---|---|
| **logNSE** | Calib 2 | 4180 | 26222 | [Calib 2] fullrdii logNSE — etapa 1, R1 colado a 0.30. Nota: só o R1 é identificável; restantes mantêm topo plano (limitação intrínseca do logNSE p/ RTK) \| janela fitness n=569 (gap=22, lowflow=134) \| NSE_full=-0.0220 \| sim em falta->0 |
| **logNSE** | Calib 3 | 2090 | 10586 | [Calib 3] fullrdii logNSE — etapa 3, R1 estreitado à volta de 0.11 (Calib 2 com R1 livre deu R1=0.112, logNSE -0.716, NSE -0.40). Só o R1 é identificável; restantes mantêm topo plano (não-identificáveis — limitação intrínseca do logNSE p/ RTK) \| janela fitness n=569 (gap=22, lowflow=134) \| NSE_full=0.0344 \| sim em falta->0 |

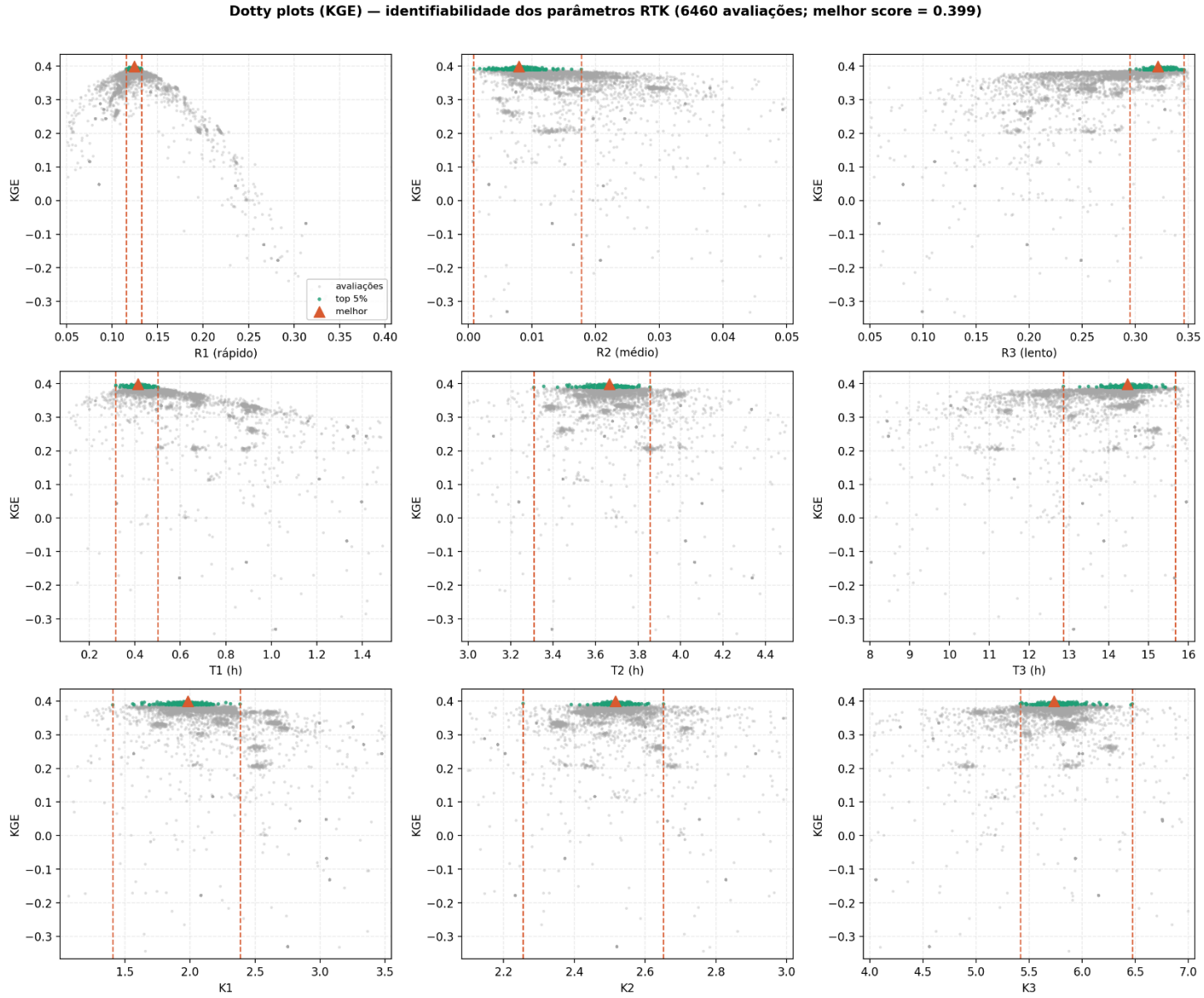
## KGE – Calibração 1



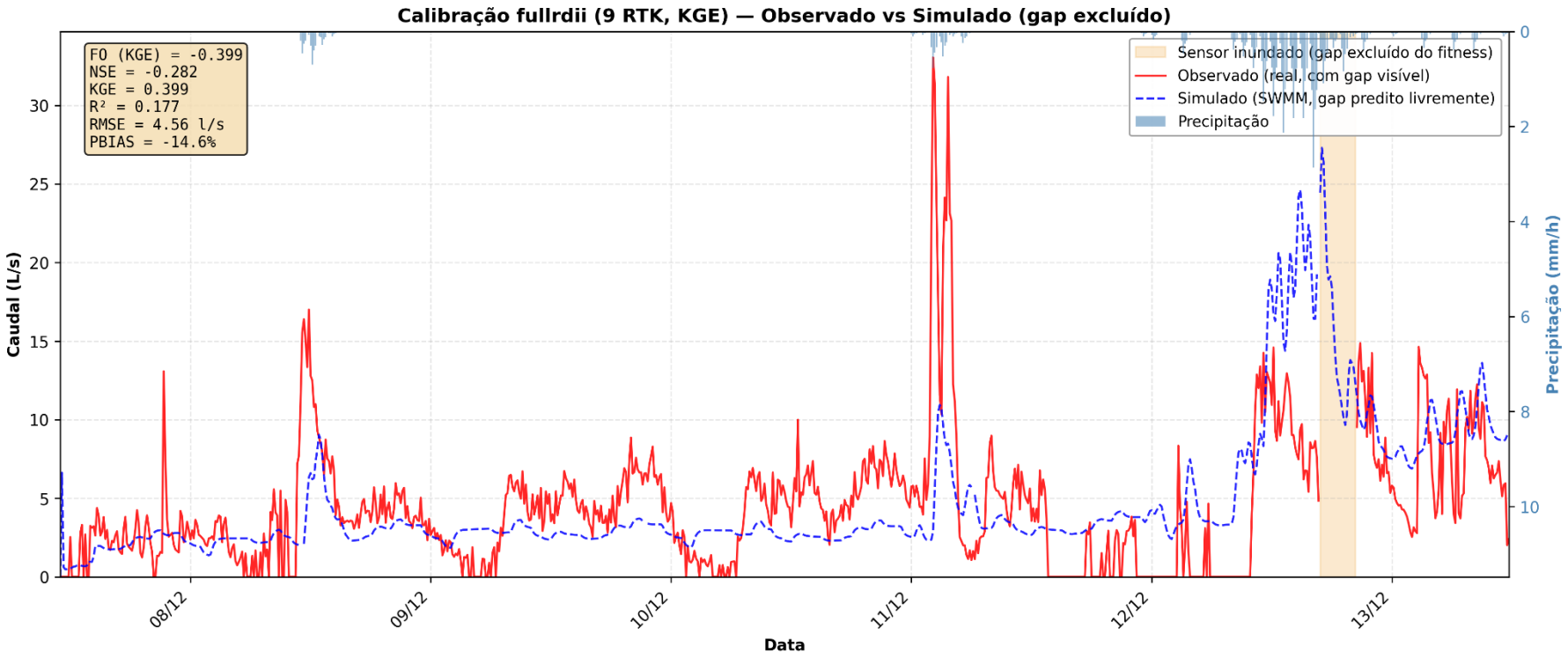

Dotty plots (KGE) — identifiabilidade dos parâmetros RTK (5700 avaliações; melhor score = -0.111)
KGE
R1 (rápido)
R2 (médio)
R3 (lento)
T1 (h)
T2 (h)
T3 (h)
K1
K2
K3
avaliações
top 5%
melhor

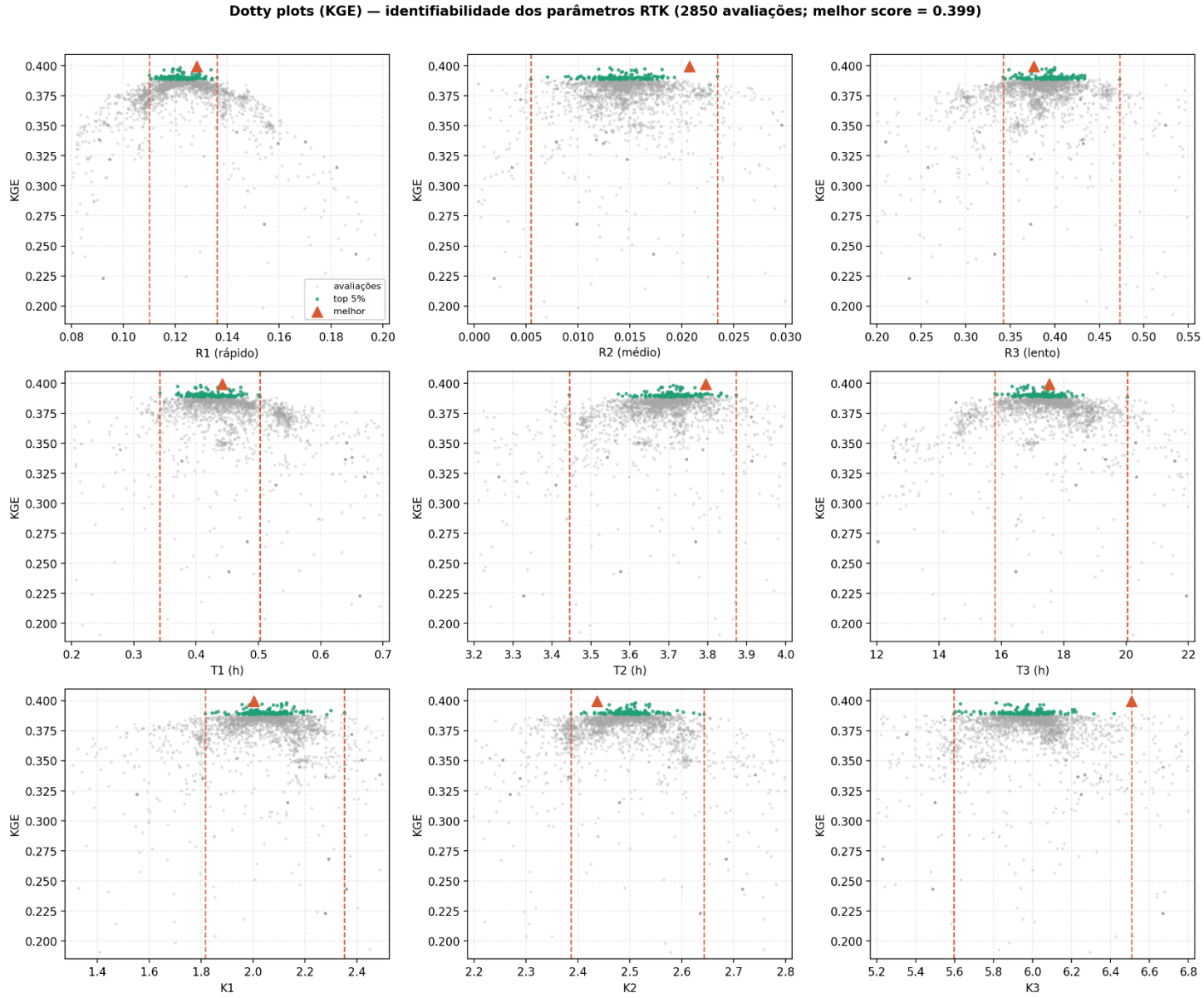
## KGE – Calibração 2



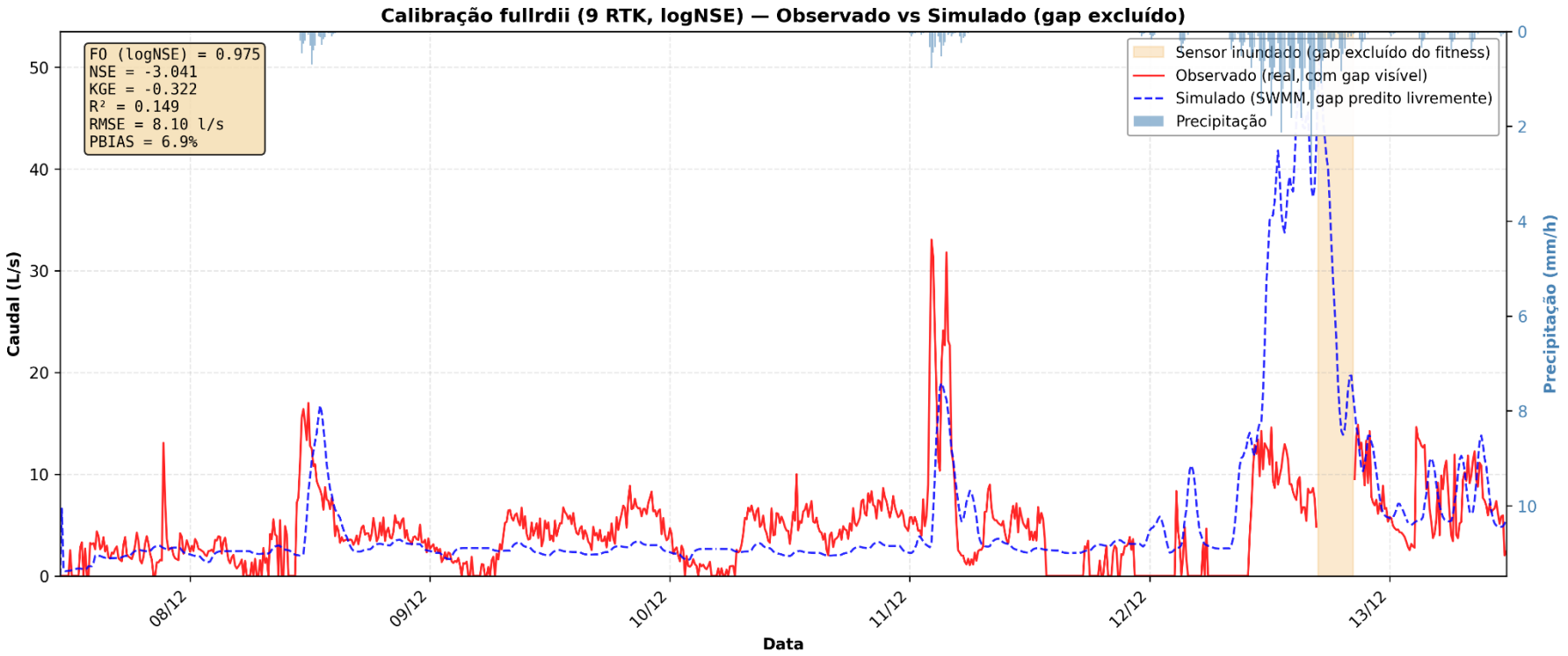

Dotty plots (KGE) — identifiabilidade dos parâmetros RTK (6460 avaliações; melhor score = 0.399)
KGE
R1 (rápido)
R2 (médio)
R3 (lento)
T1 (h)
T2 (h)
T3 (h)
K1
K2
K3
avaliações
top 5%
melhor

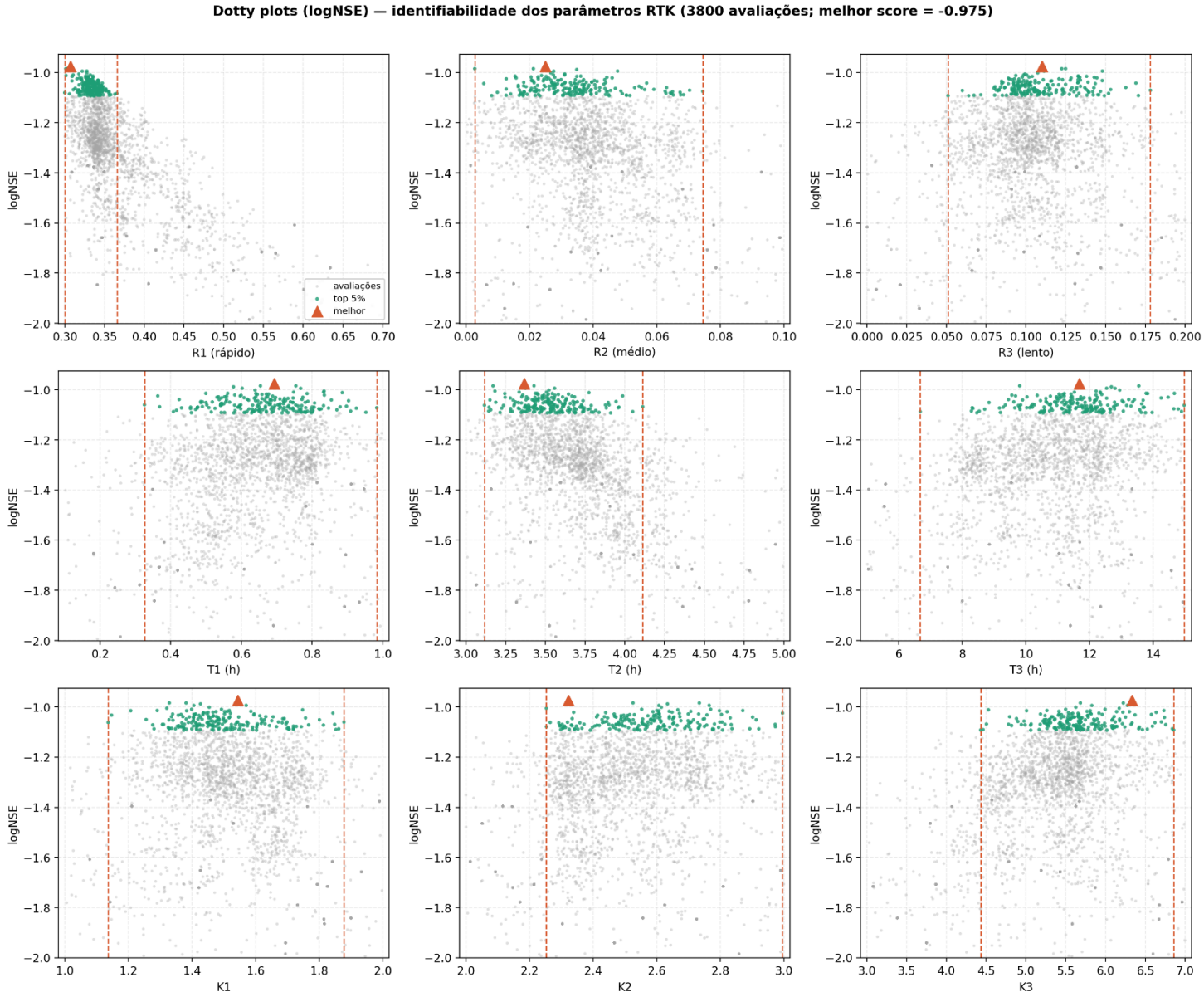
## KGE – Calibração 3



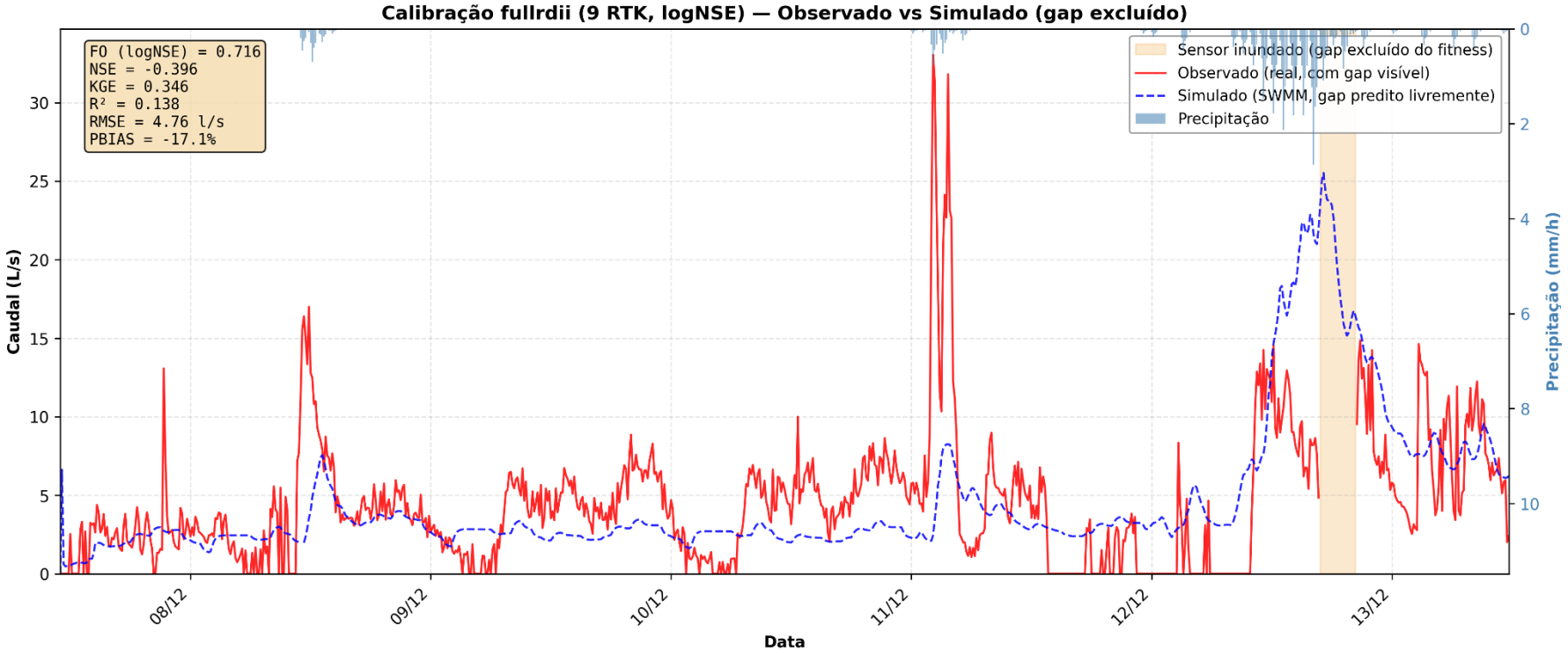

Dotty plots (KGE) — identifiabilidade dos parâmetros RTK (2850 avaliações; melhor score = 0.399)
KGE
R1 (rápido)
R2 (médio)
R3 (lento)
T1 (h)
T2 (h)
T3 (h)
K1
K2
K3
avaliações
top 5%
melhor

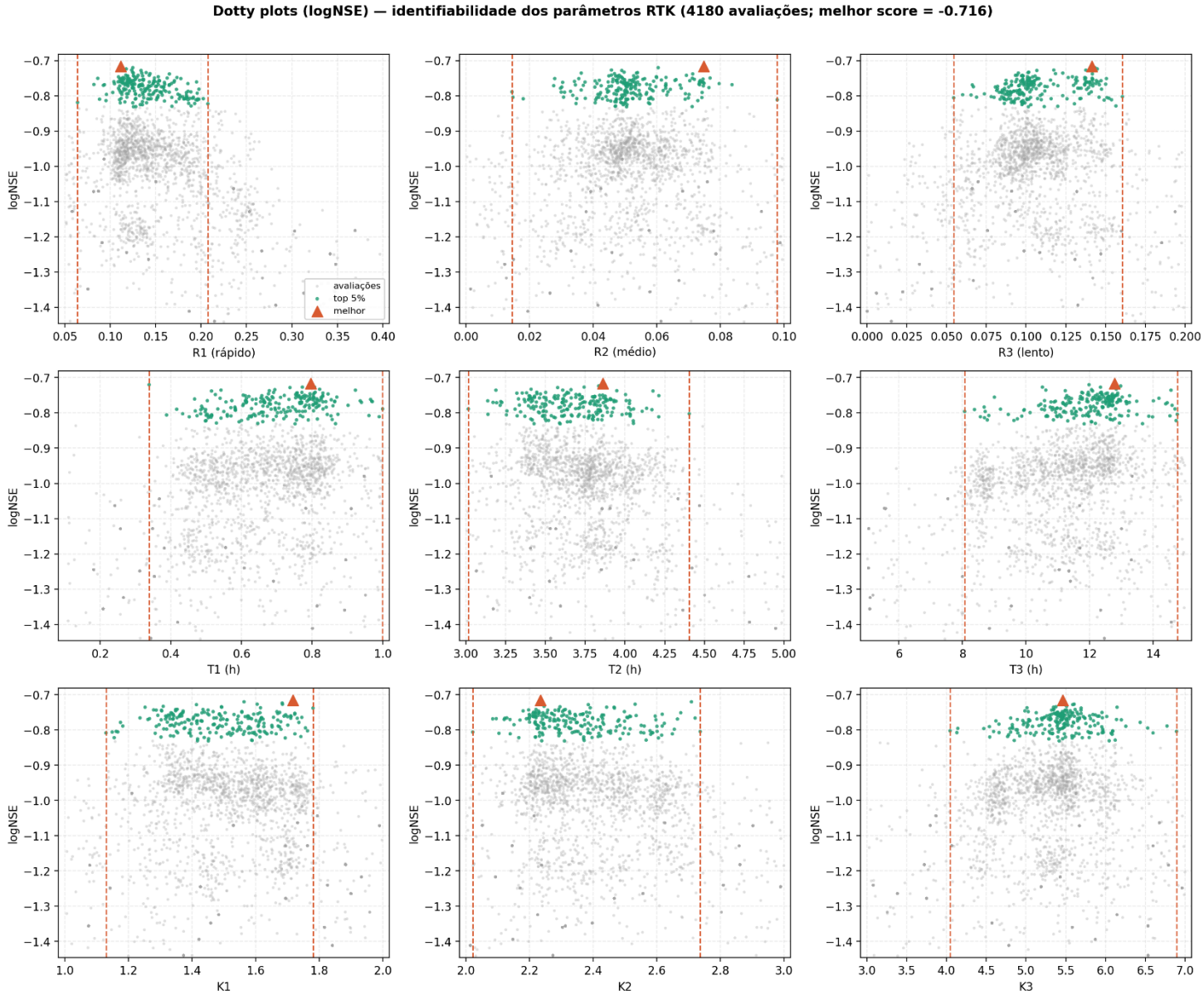
## LogNSE – Calibração 1



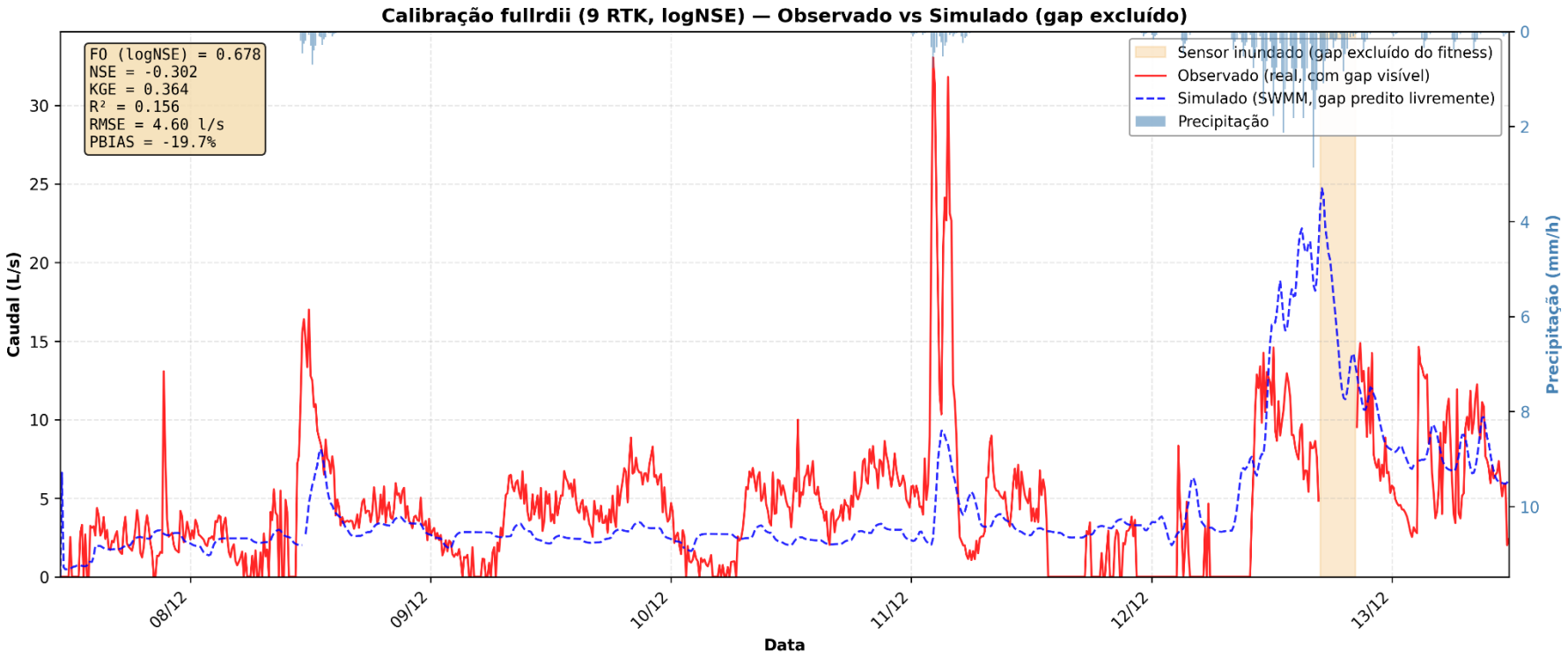

Dotty plots (logNSE) — identifiabilidade dos parâmetros RTK (3800 avaliações; melhor score = -0.975)
logNSE
R1 (rápido)
R2 (médio)
R3 (lento)
T1 (h)
T2 (h)
T3 (h)
K1
K2
K3
avaliações
top 5%
melhor

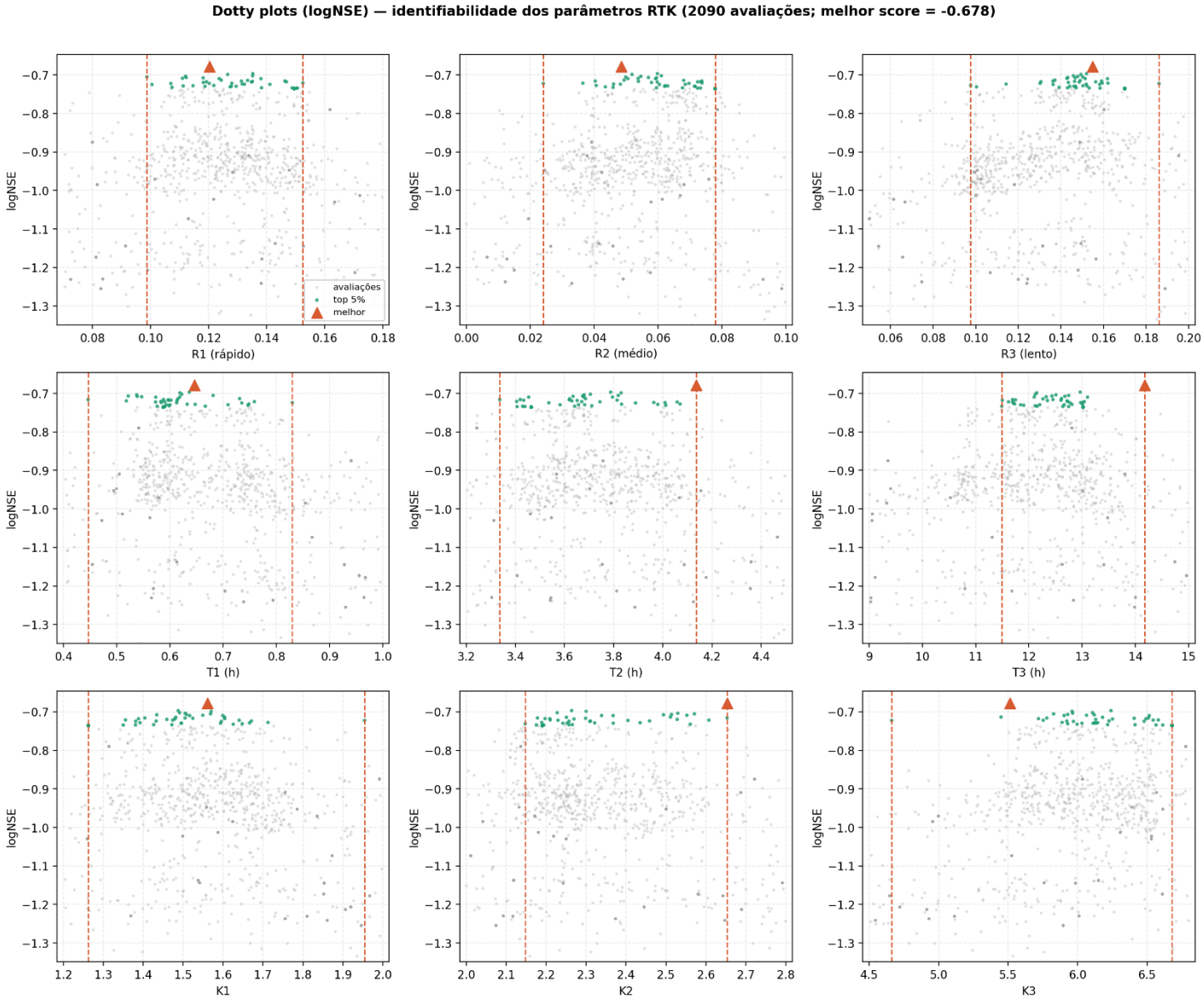
## LogNSE – Calibração 2



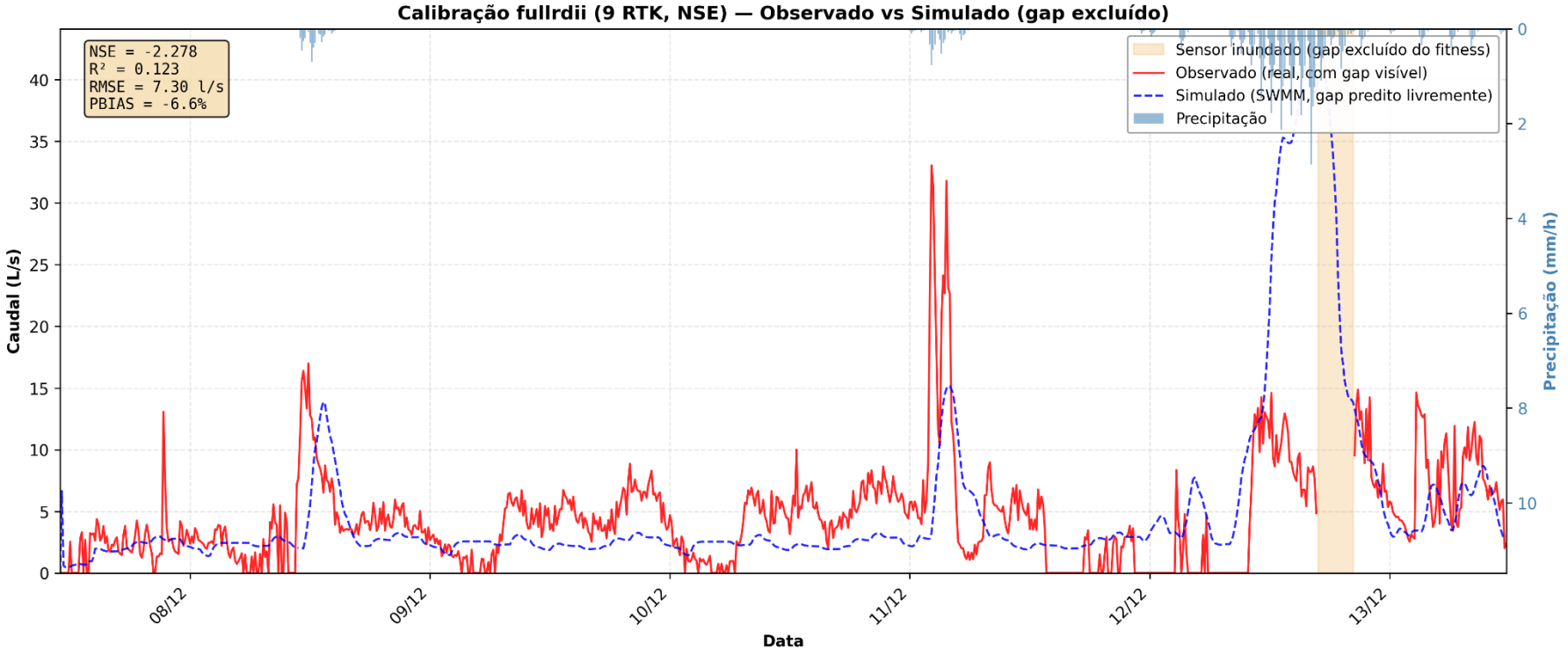

Dotty plots (logNSE) — identifiabilidade dos parâmetros RTK (4180 avaliações; melhor score = -0.716)
logNSE
avaliações
top 5%
melhor
R1 (rápido)
R2 (médio)
R3 (lento)
T1 (h)
T2 (h)
T3 (h)
K1
K2
K3

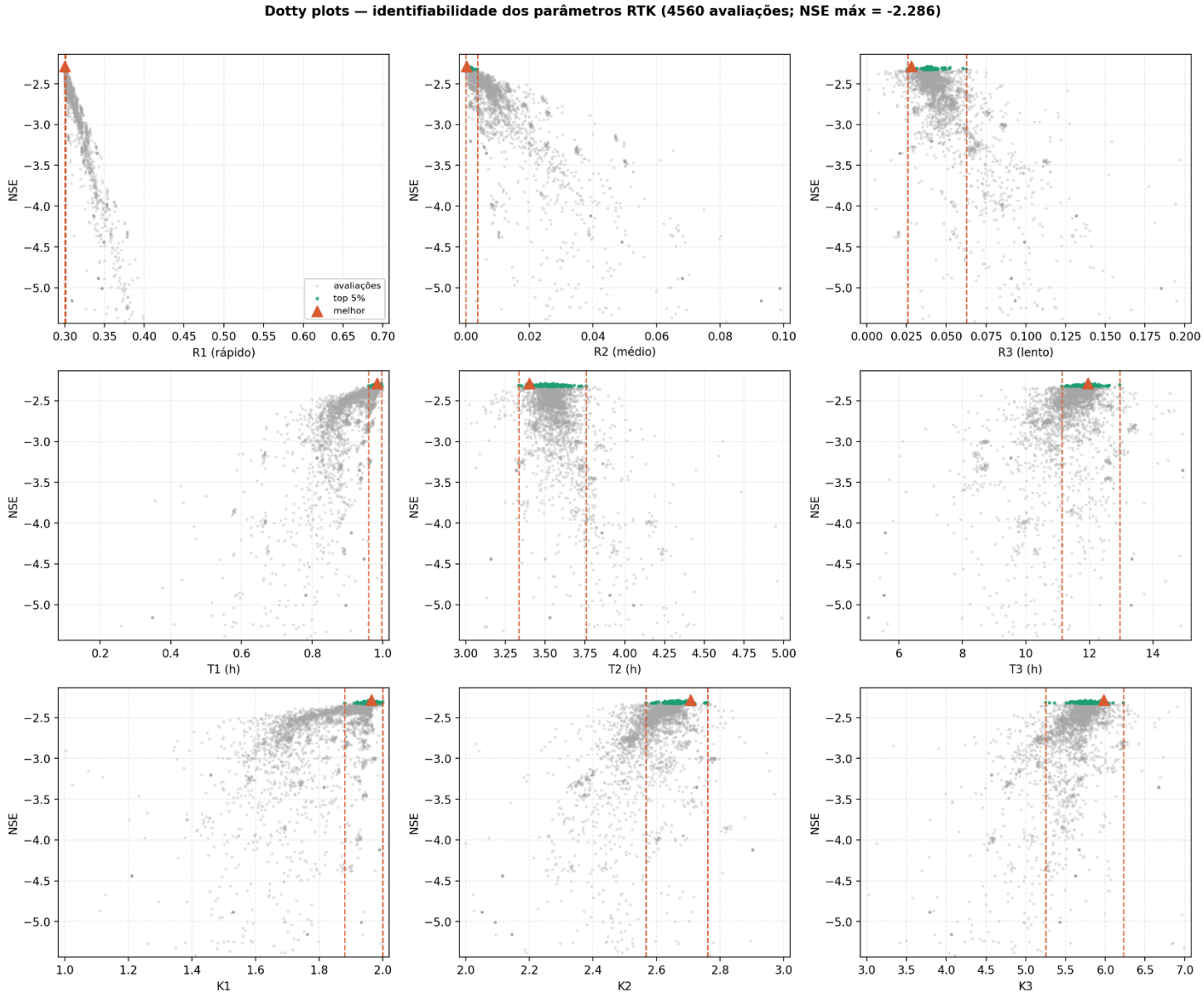
## LogNSE – Calibração 3



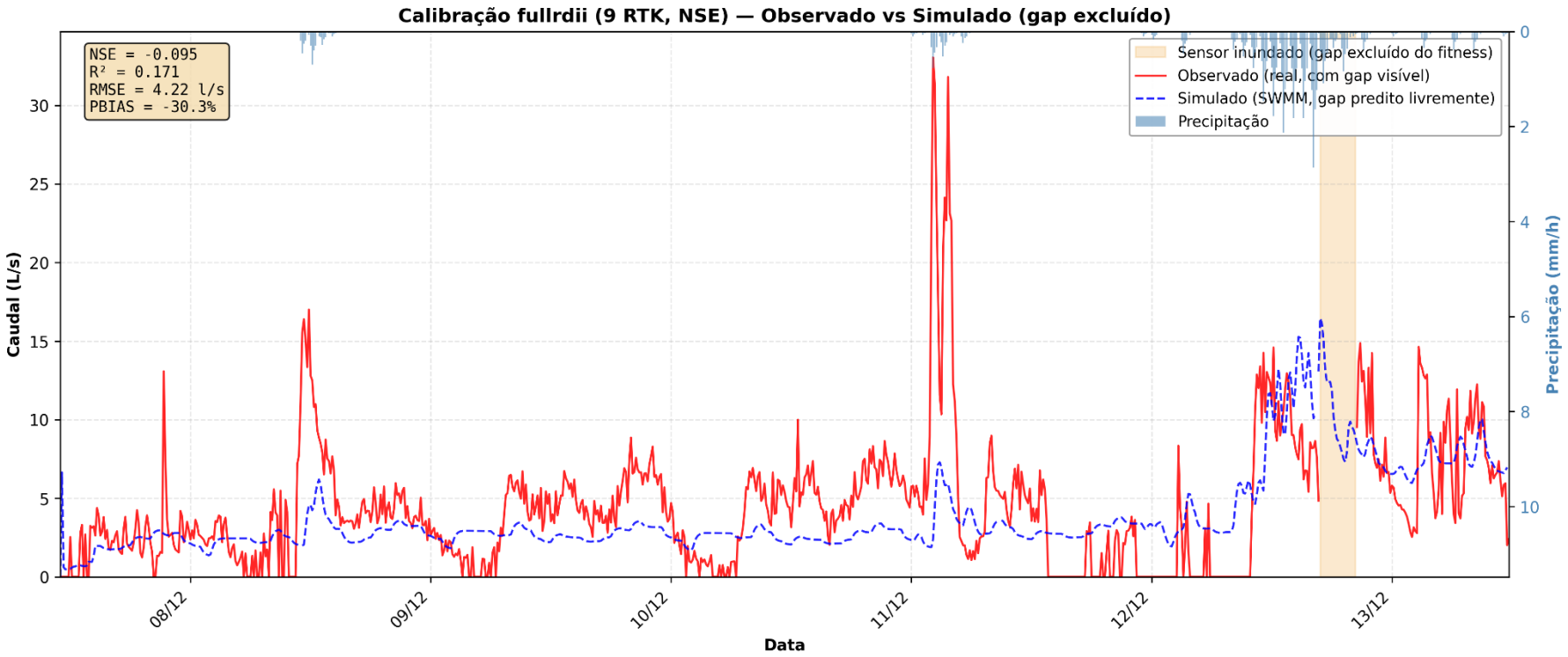

Dotty plots (logNSE) — identifiabilidade dos parâmetros RTK (2090 avaliações; melhor score = -0.678)
logNSE
R1 (rápido)
R2 (médio)
R3 (lento)
T1 (h)
T2 (h)
T3 (h)
K1
K2
K3
avaliações
top 5%
melhor

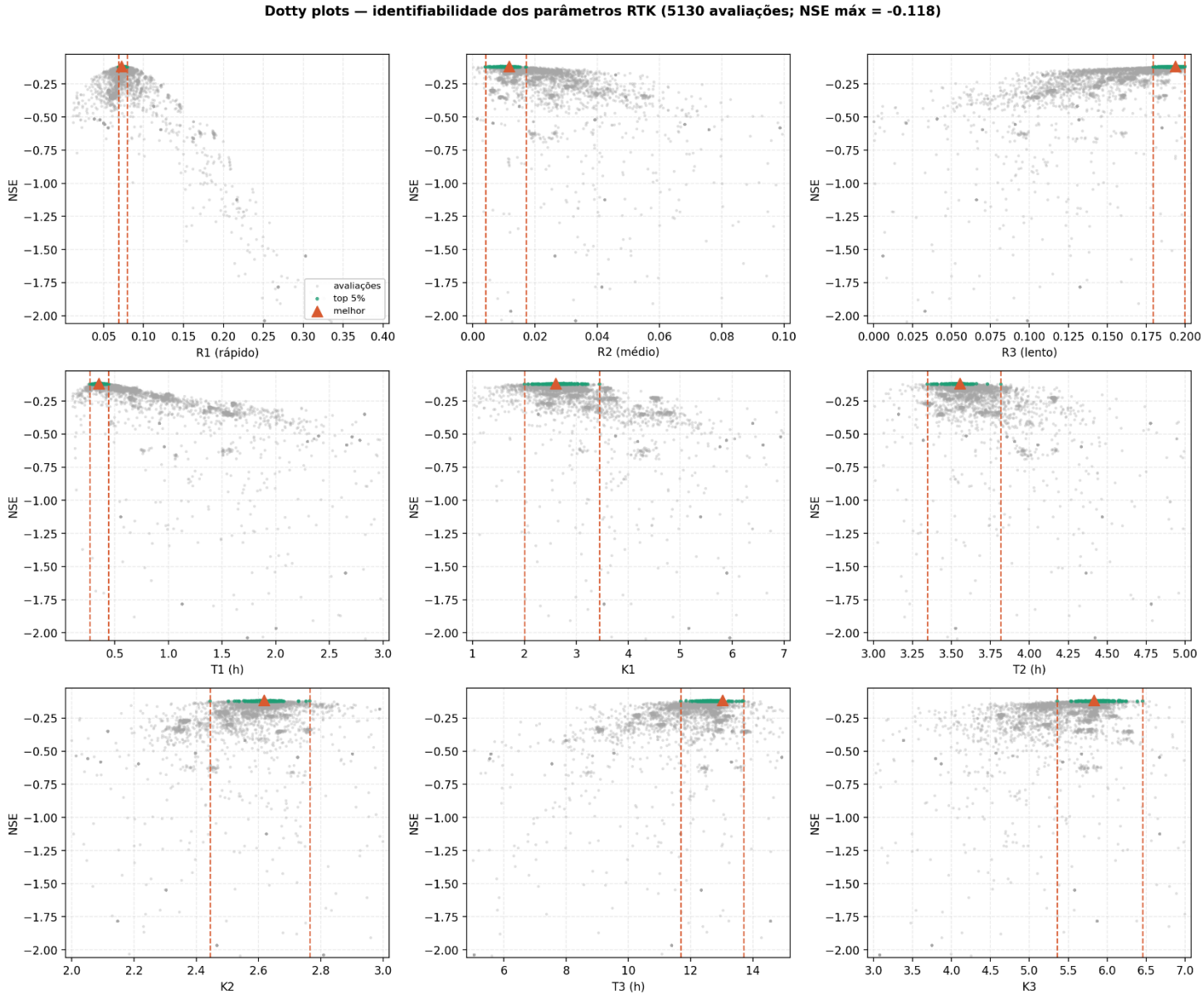
## NSE – Calibração 1



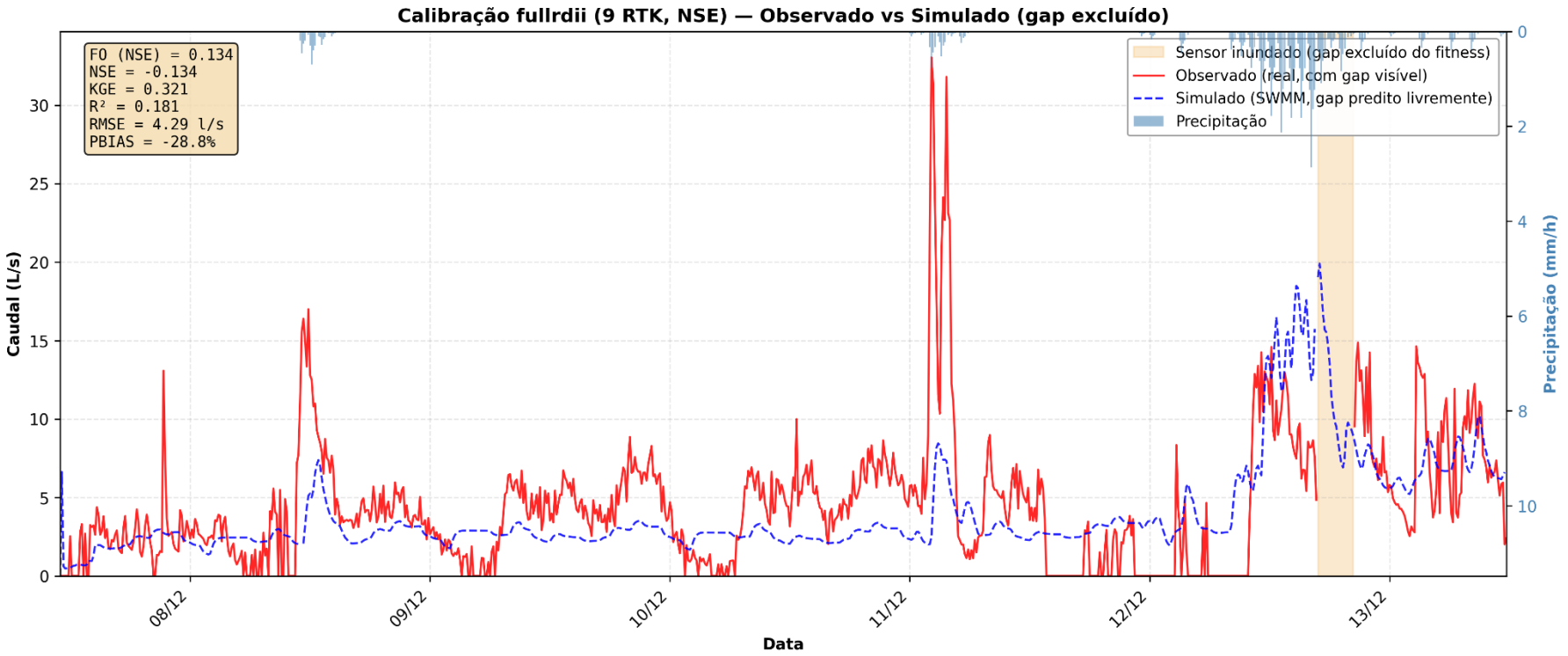

Dotty plots — identifiabilidade dos parâmetros RTK (4560 avaliações; NSE máx = -2.286)
NSE
R1 (rápido)
R2 (médio)
R3 (lento)
T1 (h)
T2 (h)
T3 (h)
K1
K2
K3
avaliações
top 5%
melhor

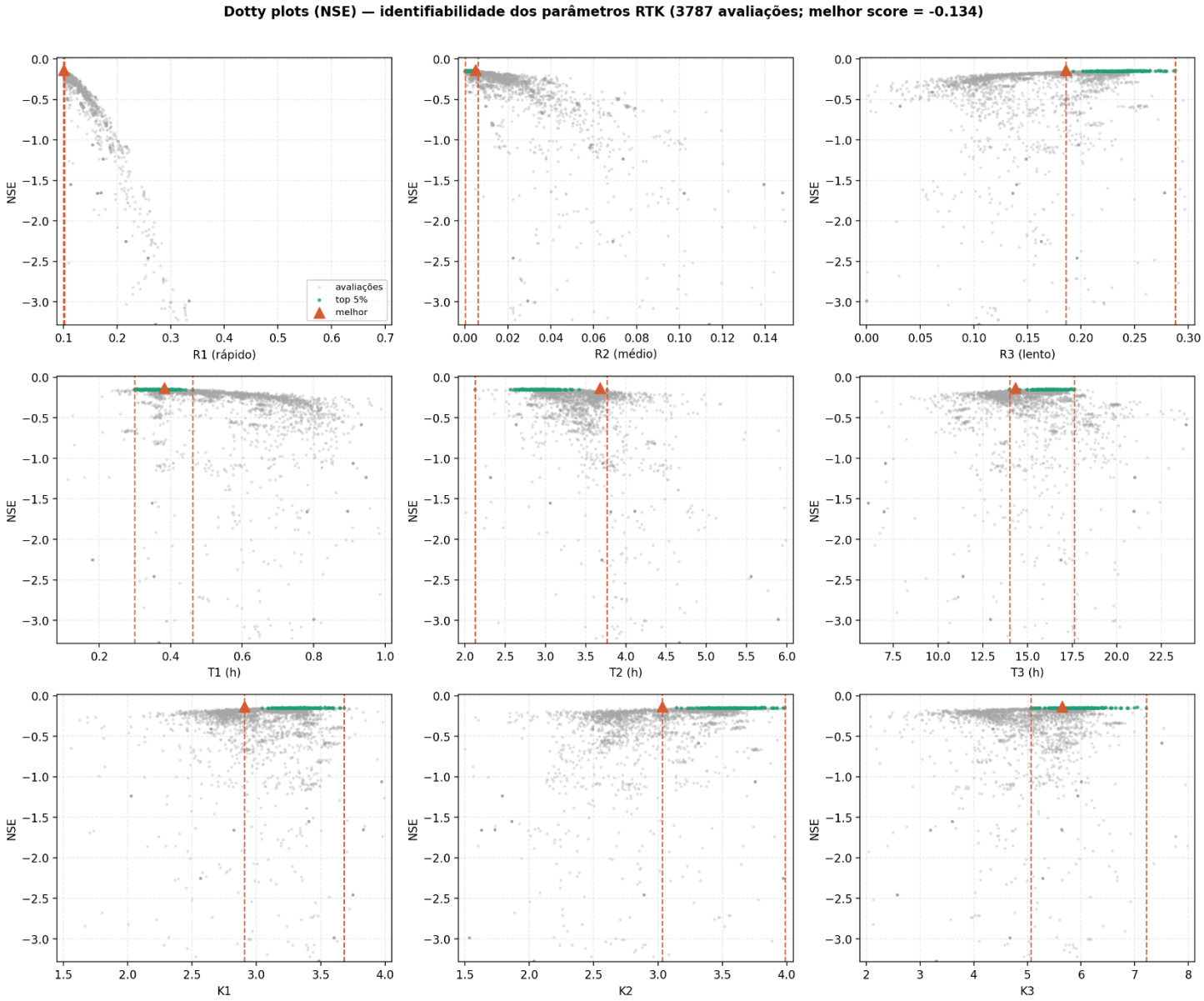
## NSE – Calibração 2




Dotty plots — identifiabilidade dos parâmetros RTK (5130 avaliações; NSE máx = -0.118)
NSE
R1 (rápido)
R2 (médio)
R3 (lento)
T1 (h)
K1
T2 (h)
K2
T3 (h)
K3
avaliações
top 5%
melhor

## NSE – Calibração 3




Dotty plots (NSE) — identifiabilidade dos parâmetros RTK (3787 avaliações; melhor score = -0.134)
NSE
R1 (rápido)
R2 (médio)
R3 (lento)
T1 (h)
T2 (h)
T3 (h)
K1
K2
K3
avaliações
top 5%
melhor