



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Bruno Daniel Ferreira Matos

APLICAÇÃO DE TRAÇADORES PARA A
MONITORIZAÇÃO DE ESCOAMENTOS COM
SUPERFÍCIE LIVRE EM MEIOS RURAIS E URBANOS

Dissertação de Mestrado em Engenharia do Ambiente na área de
Especialização em Território e Cidades Sustentáveis, orientada pelo Professor
Doutor João L. M. Pedroso de Lima e pelo Professor Doutor Jorge Manuel G.
P. Isidoro apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de
Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Junho de 2022

Faculdade de Ciências e Tecnologia
da Universidade de Coimbra

**APLICAÇÃO DE TRAÇADORES PARA A
MONITORIZAÇÃO DE ESCOAMENTOS COM
SUPERFÍCIE LIVRE EM MEIOS RURAIS E URBANOS**

Bruno Daniel Ferreira Matos

Dissertação de Mestrado em Engenharia do Ambiente na área de
Especialização em Território e Cidades Sustentáveis, orientada pelo Professor
Doutor João L. M. Pedroso de Lima e pelo Professor Doutor Jorge Manuel G.
P. Isidoro apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de
Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Junho de 2022

1 2 9 0



**UNIVERSIDADE DE
COIMBRA**

AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores, Professor Doutor João L. M. Pedroso de Lima e Professor Doutor Jorge Manuel G. P. Isidoro, pela disponibilidade e ajuda prestada durante o desenvolvimento da presente dissertação.

A todos os meus professores, docentes das unidades curriculares do Mestrado de Engenharia do Ambiente, pelo conhecimento que me foi transmitido e que me enriqueceu tanto na área pessoal como profissional.

Ao Soheil pela ajuda, amizade, paciência e pelos ensinamentos transmitidos ao longo deste último ano.

Aos meus colegas de turma, que tive o prazer de conhecer e com quem partilhei momentos que levarei para a vida.

Aos meus pais por todo o sacrifício, apoio e motivação ao longo do meu percurso académico, por me encorajarem e acreditarem sempre em mim.

À minha irmã Leonor por todo o carinho, motivação e apoio.

À minha namorada Elodie pela paciência, carinho e alegria que me transmite todos os dias e me ajudam a tornar numa pessoa melhor.

A todos os meus familiares que sempre me apoiaram e sempre estiveram do meu lado. Um obrigado não chega.

RESUMO

A água é um recurso essencial para a vida na Terra. Para melhor a gerir, preservando a sua disponibilidade e qualidade, é fundamental conhecer melhor os seus fluxos. A monitorização e quantificação do movimento da água pode basear-se em várias técnicas hidrométricas. Entre estas, a aplicação de traçadores que podem ser usados com grande flexibilidade em escoamentos com superfície livre, sejam estes profundos (*e.g.*, rios) ou pouco profundos (*e.g.*, escoamentos superficiais em lâmina de água). Esta técnica pode ser aplicada em meios rurais ou urbanos, para o estudo de fenómenos hidrológicos e hidráulicos, e para deteção da presença e do movimento da água. Os trabalhos conducentes a esta dissertação visaram explorar a importância e utilidade de alguns traçadores de velocidade de escoamento no estudo de condições particulares de escoamento superficial em meios rurais e urbanos. Os objetivos gerais do estudo conduzido experimentalmente em laboratório e no campo envolveram: identificação de caminhos preferenciais; medição da velocidade local; obtenção de campos de velocidade. O procedimento experimental implicou a preparação de equipamentos e instalações, a seleção de metodologias e a preparação de protocolos de ensaio, utilizando-se técnicas de medição baseadas em deteção remota, fazendo uso de aeronaves não tripuladas (UAS/drones) para medição em campo, bem como o uso de vários tipos de traçadores (*e.g.*, coloridos, fluorescentes, térmicos, flutuantes). Os trabalhos experimentais realizados confirmaram que o uso de traçadores constitui uma técnica viável para determinação de velocidades de escoamento em diversos tipos de cenários (*e.g.*, solo nu, cobertura morta, pavimentos impermeabilizados, cursos de água). Todos os traçadores aplicados apresentaram as suas vantagens e limitações, dependendo do local de aplicação e das condições atmosféricas. Os traçadores fluorescentes e coloridos são úteis para estudar escoamentos em superfícies onde a cobertura morta se apresenta pouco densa (*e.g.*, presença inferior a 1.0 ton/ha, nas condições estudadas de aplicação de restolho). Os térmicos, apesar de serem detetados em diversas condições, requerem equipamentos de deteção mais dispendiosos. Os flutuantes são facilmente obtidos e usados; contudo, demonstraram ser suscetíveis às condições atmosféricas (*e.g.*, vento).

Palavras-chave: Hidrometria; Traçadores; Escoamentos com superfície livre; Trabalhos laboratoriais; Ensaio de campo.

ABSTRACT

Water is an essential resource for life on Earth. To better manage it, preserving its availability and quality, it is essential to better understand its flows. Monitoring and quantifying water movement can be based on various hydrometric techniques. Among these, the application of tracers, which can be used with great flexibility in deep (*e.g.*, rivers) or shallow (*e.g.*, overland flow) free surface flows. This technique can be applied in rural or urban environments, to study of hydrological and hydraulic phenomena, and to detect the presence and movement of water. The work leading to this dissertation aimed to explore the importance and usefulness of some flow velocity tracers in the study of particular overland flow conditions in rural and urban environments. The general objectives of the study carried out experimentally in the laboratory and in the field involved: identification of preferential flow paths; local velocity measurement; generation of velocity fields. The experimental procedure implied the preparation of equipment and facilities, the selection of methodologies and the preparation of test protocols, using measurement techniques based on remote sensing, making use of unmanned aircraft (UAS/drones) for measurement in the field, as well as the use of various types of tracers (*e.g.*, coloured, fluorescent, thermal, floating). The experimental work carried out has confirmed that the use of tracers constitutes a viable technique for determining flow velocities in different scenarios (*e.g.*, bare soil, mulch cover, impermeable pavement, watercourses). All applied tracers presented their advantages and limitations, depending on the location where they were applied and atmospheric conditions. The fluorescent and coloured tracers are useful for studying flows on surfaces where the mulch is not very dense (*e.g.*, less than 1.0 ton/ha, in the studied conditions of the mulch application). The thermal technique, despite being easily detected in different conditions, require more expensive detection equipment. The floating tracers are easily obtained and used; however, they showed to be susceptible to atmospheric conditions (*e.g.*, wind).

Keywords: Hydrometry; Tracers; Free surface flows; Laboratory work; Field trials.

ÍNDICE

Agradecimentos	i
Resumo	ii
Abstract.....	iii
Índice	iv
Índice de Figuras	vi
Índice de Quadros	x
Abreviaturas.....	xi
Simbologia.....	xii
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento e motivação.....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Estrutura da dissertação	3
2. Revisão Bibliográfica.....	5
3. Materiais e equipamentos.....	11
3.1. Traçadores.....	11
3.1.1. Coloridos	11
3.1.2. Fluorescentes	12
3.1.3. Térmicos	12
3.1.4. Flutuantes	13
3.2. Equipamentos.....	13
4. Técnicas e Medições	17
4.1. Medições em laboratório	17
4.1.1. Enquadramento.....	17
4.1.2. Instalações laboratoriais	17
4.1.3. Procedimentos laboratoriais	20
4.2. Medições em meio urbano	21

4.2.1. Enquadramento	21
4.2.2. Instalações em meio urbano	22
4.2.3. Procedimentos	23
4.3. Medições em meio rural	24
4.3.1. Enquadramento	24
4.3.2. Instalações em meio rural	25
4.3.3. Procedimentos	26
4.4. Medições em rios	27
4.4.1. Enquadramento	27
4.4.2. Procedimentos	31
4.5. Procedimento experimental	34
5. Estudos de caso - aplicações	35
5.1. Laboratório – Resultados obtidos e discussão	35
5.2. Meio urbano – Resultados obtidos e discussão	39
5.3. Meio rural – Resultados obtidos e discussão	43
5.4. Rios – Resultados obtidos e discussão	47
6. Conclusões	60
6.1. Comentários finais	60
6.2. Trabalhos futuros	62
Referências Bibliográficas	63
Anexo A – Caraterísticas do troço 1, rio Beça	A-1
Anexo B – Caraterísticas do troço 2, rio Beça	B-1
Anexo C – Caraterísticas do troço 3, rio Beça	C-1

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 - Câmara ótica (modelo: Samsung S8), utilizada nas atividades experimentais em laboratório e no campo, para determinar as velocidades dos traçadores coloridos e fluorescentes.	14
Figura 3.2 - Câmara de infravermelhos (modelo: FLIR Duo Pro R), utilizada nas atividades experimentais em laboratório e no campo, para determinar as velocidades do traçador térmico.	14
Figura 3.3 - Aeronave não tripulada (UAS/drone) (modelo: 3DR Drone Solo) (à esquerda) e câmara (modelo: GoPro – Hero 5 Black) (à direita), utilizados nas atividades experimentais no rio Beça, para determinar as velocidades dos traçadores flutuantes biodegradáveis.	15
Figura 4.1 - Representação esquemática da instalação configurada no laboratório para medições das velocidades de escoamento superficial, usando traçadores térmicos, fluorescentes e coloridos. A área de medição tem 0.55 m de comprimento e 0.30 m de largura (de Lima <i>et al.</i> 2021).	18
Figura 4.2 - Posicionamento da câmara ótica (Samsung S8) (figura à esquerda) e da câmara de infravermelhos (FLIR Duo Pro R) (figura à direita), situadas a 0.65 m e 1.5 respetivamente, acima da superfície do solo do canal.	19
Figura 4.3 – Local onde foram realizados os ensaios no parque de estacionamento do DEC, visando a aplicação de traçadores térmicos, fluorescentes e coloridos.	21
Figura 4.4 - Instalação utilizada para a aplicação dos traçadores, situada no parque de estacionamento do DEC.	22
Figura 4.5 - Aplicação do traçador colorido durante o dia (à esquerda), do fluorescente durante o anoitecer (ao meio) e do colorido durante a noite (à direita) numa superfície pavimentada. As dimensões da área de medição são 0.55 m × 0.30 m.	24
Figura 4.6 - Local onde foram realizados os ensaios, visando a aplicação de traçadores térmicos, fluorescentes e coloridos em superfícies com diferentes densidades de vegetação.	25
Figura 4.7 - Instalação utilizada para a aplicação dos traçadores no Pólo 2, em solos cuja superfície é constituída por vegetação.	26
Figura 4.8 – Estrutura constituída por um plástico preto utilizada para facilitar a deteção do traçador fluorescente durante o dia, em solos cuja superfície é constituída por vegetação.	26
Figura 4.9 - Vegetação utilizada para aplicação dos traçadores (à esquerda) e área de medição da instalação utilizada no Pólo 2 (à direita). As dimensões da área de medição são 0.3 m × 0.55 m.	26
Figura 4.10 - Vista satélite do rio Beça, onde foram aplicados os traçadores flutuantes biodegradáveis (Google Earth Pro).	28

Figura 4.11 - Vista satélite dos três troços (troço 1, 2 e 3) no rio Beça, onde foram aplicados os traçadores flutuantes biodegradáveis (Google Earth Pro).....	28
Figura 4.12 - Troço 1 situado no rio Beça, onde foram aplicados traçadores flutuantes biodegradáveis.....	29
Figura 4.13 - Troço 2 situado no rio Beça, onde foram aplicados traçadores flutuantes biodegradáveis.....	30
Figura 4.14 - Troço 3 situado no rio Beça, onde foram aplicados traçadores flutuantes biodegradáveis.....	30
Figura 4.15 – Vista satélite do troço 1, no rio Beça. Este troço, com 45 m de comprimento, foi dividido em 18 subsecções. O 1º voo de UAS/drone captou desde a subsecção 1 até à 9, enquanto o 2º voo captou desde a 10 até à 18 (Google Earth Pro).....	31
Figura 4.16 - Vista aérea do troço 1, no rio Beça, captada pelo UAS/drone, onde foram aplicados os traçadores flutuantes biodegradáveis. Os marcadores brancos de referência nas margens distam 5 m entre si.	32
Figura 4.17 - Vista satélite do troço 2, no rio Beça, dividido em 6 secções, distando 5 m entre si (Google Earth Pro).....	33
Figura 4.18 - Vista satélite do troço 3, no rio Beça, dividido em 8 secções, distando 5 m entre si. (Google Earth Pro).....	33
Figura 4.19 - Esboço do método utilizado para estimar a velocidade de escoamento superficial (V_{tr}), através do movimento da extremidade da pluma do traçador, para um determinado intervalo de tempo (Zehsaz <i>et al.</i> 2022).	34
Figura 5.1 - Comparação entre as diferentes imagens do traçador colorido (esquerda), fluorescente (centro) e térmico (direita). Os traçadores foram aplicados sobre o solo nu (primeira linha), cobertura morta de 0.5 ton/ha (segunda linha), cobertura morta de 1 ton/ha (terceira linha) e cobertura morta de 2 ton/ha (quarta linha). A direção do escoamento ocorre da esquerda para a direita. A dimensão longitudinal de cada imagem é de 0.55 m (Zehsaz <i>et al.</i> 2022).....	35
Figura 5.2 - Sequências cronológicas de imagem para várias densidades de cobertura morta, com um intervalo de tempo de 1 segundo, onde é aplicado: traçador colorido (esquerda), traçador fluorescente (meio) e traçador térmico (direita). A dimensão longitudinal de cada imagem é 0.55 m (Zehsaz <i>et al.</i> 2022).	36
Figura 5.3 - Comparação das velocidades de escoamento superficial medidas para os três traçadores, em solo nu e para densidades de cobertura morta de 0.5, 1 e 2 ton/ha, obtidas em laboratório (Zehsaz <i>et al.</i> 2022).....	38
Figura 5.4 - Percentagem de área ocupada por cada traçador (colorido, fluorescente e térmico) ao longo da área de medição, para $\Delta t = 1$ s (Zehsaz <i>et al.</i> 2022).....	39
Figura 5.5 - Comparação entre as diferentes imagens na área de medição, obtidas em superfícies pavimentadas, onde é aplicado: traçador colorido (topo), traçador fluorescente	

(meio) e traçador térmico (abaixo). A direção do escoamento ocorre da esquerda para a direita. A dimensão longitudinal de cada imagem é 0.6 m (Zehsaz <i>et al.</i> 2022).....	40
Figura 5.6 - Comparação das velocidades de escoamento superficial medidas para os três traçadores, aplicados numa superfície pavimentada, durante o dia, anoitecer e noite (Zehsaz <i>et al.</i> 2022).....	42
Figura 5.7 - Percentagem de área ocupada por cada traçador (colorido, fluorescente e térmico) ao longo da área de medição, para $\Delta t = 1$ s (Zehsaz <i>et al.</i> 2022).....	43
Figura 5.8 - Comparação entre as diferentes imagens na área de medição, obtidas em superfícies com diferentes alturas de vegetação, onde é aplicado: traçador colorido (topo), traçador fluorescente (meio) e traçador térmico (abaixo). A dimensão longitudinal de cada imagem é 0.6 m (Zehsaz <i>et al.</i> 2022).	44
Figura 5.9 - Comparação das velocidades de escoamento superficial medidas para os três traçadores numa superfície com uma altura de vegetação de 0.05 m. As velocidades foram comparadas em três fases do dia (dia, anoitecer e noite) (Zehsaz <i>et al.</i> 2022).....	46
Figura 5.10 - Percentagem de área ocupada por cada traçador (colorido, fluorescente e térmico) ao longo da área de medição para uma altura de vegetação de 0.05 m, para $\Delta t = 1$ s (Zehsaz <i>et al.</i> 2022).	47
Figura 5.11 - Metodologia de determinação da velocidade de escoamento superficial através da análise de imagens, com um comprimento conhecido ($L = 2.5$ m) para um determinado intervalo de tempo. Nas imagens (a e b) é determinado o vetor velocidade (V_1) e nas imagens (c e d) é determinado V_2 . A direção do escoamento ocorre da direita para a esquerda.....	48
Figura 5.12 - Campo de velocidades correspondente às velocidades médias de escoamento do troço 1, obtidas em profundidade. Os vetores de velocidade apontam para a direção do escoamento.	51
Figura 5.13 - Mapa 2D colorido de velocidades do troço 1, referente às velocidades médias de escoamento obtidas em profundidade.....	52
Figura 5.14 - Campo de velocidades correspondente às velocidades médias de escoamento do troço 2, obtidas em profundidade. Os vetores de velocidade apontam para a direção do escoamento.	52
Figura 5.15 - Mapa 2D colorido de velocidades do troço 2, referente às velocidades médias de escoamento obtidas em profundidade.....	53
Figura 5.16 - Campo de velocidades correspondente às velocidades médias de escoamento do troço 3, obtidas em profundidade. Os vetores de velocidade apontam para a direção do escoamento.	53
Figura 5.17 – Mapa 2D colorido de velocidades do troço 3, referente às velocidades médias de escoamento obtidas em profundidade.....	54
Figura 5.18 – Locais onde foram efetuadas as medições pontuais da velocidade recorrendo ao molinete (troço 2).	55

Figura 5.19 - Comparação entre as velocidades médias de escoamento estimadas a partir dos dados obtidos com o molinete e as velocidades médias estimadas usando os traçadores flutuantes (troço 2).....	56
Figura 5.20 – Gráficos correspondentes às projeções 3D dos mapas 2D de velocidades coloridos, referentes aos 3 troços do rio. Os gráficos a), b) e c) correspondem ao troço 1, 2 e 3, respetivamente.	57
Figura 5.21 – Média das velocidades médias de escoamento obtidas em profundidade e número de mexilhões detetados no perfil transversal ao longo de todo o comprimento e largura do troço 1.....	58
Figura 5.22 – Média das velocidades médias de escoamento obtidas em profundidade e número de mexilhões detetados no perfil transversal ao longo de todo o comprimento e largura do troço 2.....	58
Figura 5.23 - Média das velocidades médias de escoamento obtidas em profundidade e número de mexilhões detetados no perfil transversal ao longo de todo o comprimento e largura do troço 3.....	58

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1 – Principais características do corante alimentar utilizado.	11
Quadro 3.2 - Principais características físicas e químicas da água usada nas atividades experimentais (Águas de Coimbra, 2020).	12
Quadro 3.3 - Especificações básicas da lâmpada UVA utilizada nas atividades experimentais.	13
Quadro 3.4 - Especificações básicas da câmara ótica do Samsung S8 e da câmara de vídeo de IV FLIR Duo Pro R.	15
Quadro 3.5 - Especificações básicas do UAS/Drone e da câmara GoPro utilizados no rio Beça.	16
Quadro 4.1 - Principais características do solo utilizado nas atividades experimentais em laboratório (de Lima <i>et al.</i> 2003).	18
Quadro 4.2 - Percentagem de ocupação da cobertura morta sobre a superfície do solo para diferentes densidades da mesma.	21
Quadro 4.3 - Informações relativas ao escoamento, densidade da vegetação, meteorologia e morfologia para cada dia e superfície (Zehsaz <i>et al.</i> 2022).	27
Quadro 5.1 – Velocidades de escoamento superficial (V_{tr}) obtidas em laboratório, aplicando traçadores coloridos, fluorescentes e térmicos, testados em: solo nu, cobertura morta de 0.5 ton/ha, 1 ton/ha e 2 ton/ha. No quadro, o hífen significa que não foi possível determinar a velocidade.	37
Quadro 5.2 - Velocidades de escoamento superficial (V_{tr}) obtidas para uma superfície pavimentada, onde foram aplicados traçadores coloridos, fluorescentes e térmicos. As experiências decorreram durante o dia, anoitecer e noite.	41
Quadro 5.3 – Velocidades de escoamento superficial (V_{tr}) obtidas para uma superfície com uma altura de vegetação de 0.05 m, aplicando traçadores coloridos, fluorescentes e térmicos. As experiências decorreram durante o dia, anoitecer e noite.	45
Quadro 5.4 – Velocidades médias de escoamento obtidas através da aplicação de traçadores flutuantes no troço 1, no rio Beça.	49
Quadro 5.5 - Velocidades médias de escoamento obtidas através da aplicação de traçadores flutuantes no troço 2, no rio Beça.	50
Quadro 5.6 - Velocidades médias de escoamento obtidas através da aplicação de traçadores flutuantes no troço 3, no rio Beça.	50

ABREVIATURAS

UVA – Ultravioleta A

IV – Infravermelho

UAS/Drone – Aeronave não tripulada

LHRHA – Laboratório de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente

DEC – Departamento de Engenharia Civil

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

SIMBOLOGIA

n.d – Não determinado

V_{tr} – Velocidade de escoamento superficial (m/s)

U – Velocidade média de escoamento (m/s)

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento e motivação

A água é sinónimo de vida e, por essa razão, é um recurso de extrema importância para o planeta. É fundamental preservar a sua disponibilidade e qualidade e, para isso, deve-se geri-la de maneira sustentável, evitando ao máximo o seu desperdício. Posto isto, é de extrema importância no mundo atual instaurar políticas sustentáveis referentes à gestão dos recursos hídricos. Um dos aspetos mais importantes para garantir um controlo eficaz desses recursos é através da monitorização dos cursos de água. A monitorização é a principal fonte de *feedback* de dados no sistema de gestão de recursos hídricos.

O conhecimento dos fluxos e a quantificação do movimento da água são fulcrais para garantir uma resposta assertiva e adequada face às necessidades hídricas das populações. Este tipo de metodologias de controlo e quantificação dos recursos podem ser baseadas em diversas técnicas hidrométricas (*e.g.*, molinete, sensores acústicos) (*e.g.*, Abrantes *et al.* 2018).

O trabalho realizado na presente dissertação aborda a aplicação de traçadores (*e.g.*, fluorescentes, coloridos, térmicos, flutuantes), e insere-se tematicamente em vários projetos de investigação em curso no Laboratório de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente (LHRHA) do Departamento de Engenharia Civil (DEC), e no Centro de I&D MARE – Centro de Ciências do Mar e do Ambiente (*e.g.*, projetos ASHMOB, MUSSEFLOW, HARMONIOUS).

No âmbito do projeto ASHMOB, coordenado na Universidade de Coimbra pelo Professor Doutor João L.M. Pedroso de Lima, e dos trabalhos de investigação do aluno Soheil Zehsaz, do Doutoramento em Engenharia Civil do DEC, foram efetuadas várias experiências laboratoriais e de campo com traçadores, usados para estimar velocidades de escoamento. O objetivo foi comparar a aplicação de diferentes tipos de traçadores, em escoamentos superficiais em diferentes superfícies encontradas em ambientes urbanos e rurais. O autor desta dissertação participou em todo o processo da realização prática dos trabalhos experimentais que decorreram entre fevereiro e agosto de 2021, coordenados pelo aluno Soheil Zehsaz. A descrição do trabalho experimental, as metodologias e os procedimentos utilizados, bem como os resultados obtidos estão apresentados ao longo da presente dissertação seguindo o artigo Zehsaz *et al.* (2022).

No âmbito do projeto MUSSEFLOW, igualmente coordenado na Universidade de Coimbra pelo Professor Doutor João L.M. Pedroso de Lima, projeto no qual o autor desta dissertação é atualmente bolseiro, foram usados traçadores em vários troços do rio Beça, com o objetivo de monitorizar as condições hidráulicas do escoamento e estudar a sua relação com a localização de populações de mexilhões-de-rio presentes neste rio. O trabalho de campo foi coordenado pelo Doutor Joaquim Reis e contou com a contribuição da aluna Maria G. Gil, ambos da Universidade de Lisboa, e de outros elementos do grupo de trabalho. Os ensaios decorreram a 26 e 27 de junho de 2021 e a descrição dos mesmos, as metodologias e os procedimentos utilizados, bem como os resultados obtidos estão apresentados ao longo da presente dissertação. O posicionamento dos mexilhões-de-rio foram obtidos por biólogos, da equipa de trabalho de campo, do projeto.

Os traçadores, segundo Leibundgut e Seibert (2011), são substâncias que podem ser detetadas na água em pequenas concentrações e permitem seguir, ou rastrear, o movimento de água. Esta capacidade de rastreio é fulcral para a compreensão dos processos complexos dos sistemas hidrológicos. Esta metodologia é importante em várias vertentes, nomeadamente na previsão da qualidade da água, que muitas vezes é controlada por diferentes origens. Também auxilia na resposta a várias questões, tais como: identificar os caminhos preferenciais do fluxo de água; quantificar o tempo de permanência da água numa bacia hidrográfica; localizar a origem do escoamento ou ainda rastrear o escoamento da água proveniente de uma fonte poluente. Os traçadores são também de extrema importância para sistemas de água subterrânea, devido à disponibilidade limitada de outros métodos de observação. O objetivo da aplicação dos traçadores é a investigação da água, em todas as suas fases, comportamentos e características, dentro dos diferentes meios e substratos representados no ciclo hidrológico. Assim sendo, o uso de traçadores em hidrologia define o campo científico que pretende um melhor entendimento do sistema hidrológico, através do uso de traçadores artificiais e naturais. O rastreio da água providencia métodos únicos para uma visão direta sobre a dinâmica da superfície e subsuperfície de corpos de água.

1.2 Objetivos

Este estudo tem por objetivo principal estudar em termos práticos, a aplicação de diferentes tipos de traçadores, considerados como um método de rastreio simples e eficaz no controlo de escoamentos em superfície livre.

Os ensaios realizados em laboratório e no campo, no âmbito do projeto ASHMOB, têm também por objetivo: comparar diferentes tipos de traçadores (*e.g.*, coloridos, fluorescentes, térmicos)

quanto às vantagens e desvantagens de cada um deles; comparar a eficácia dos vários tipos de traçadores aplicados quanto à sua capacidade de deteção sob diferentes cenários, nomeadamente com a variação da fase do dia e do tipo de superfície utilizada; gerar dados capazes de estimar a velocidade de escoamento superficial; verificar o comportamento dos traçadores ao longo da área de medição.

Os ensaios realizados no âmbito do projeto MUSSELFLOW, no rio Beça, têm por objetivo definir campos de velocidades através da aplicação de traçadores flutuantes biodegradáveis em diferentes troços do rio; estimar e comparar as velocidades médias de escoamento em cada um dos troços identificados; relacionar os valores de velocidades médias de escoamento obtidos com a localização das populações de mexilhões em cada um dos troços.

O procedimento experimental é parte integrante desta dissertação e, portanto, um dos objetivos será também prezar e garantir a credibilidade dos resultados obtidos, através da seleção adequada das metodologias utilizadas, bem como da preparação dos protocolos de ensaio. Deste modo, a aplicação dos traçadores será suportada por equipamentos e instalações, prevendo-se a utilização de técnicas inovadoras baseadas em deteção remota, fazendo uso de aeronaves não tripuladas (UAS/drone) para medição em campo.

Os dados resultantes das várias experiências serão analisados usando *software* específico para o efeito (*e.g.*, *software* de processamento de imagem, métodos geoestatísticos, modelos matemáticos).

1.3 Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em seis capítulos principais, cujo objetivo é transmitir de forma sucinta e assertiva os conceitos a serem abordados na dissertação.

O presente capítulo serve para fazer um enquadramento do tema, expondo a temática subjacente a esta dissertação, definir os objetivos que se pretendem atingir, bem como a motivação que levou ao seu desenvolvimento. É descrita sucintamente a estrutura da dissertação.

No segundo capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica sobre estudos relacionados com o tema em análise, sendo iniciado o capítulo por uma breve introdução seguida do estado da arte.

O terceiro capítulo refere quais os diferentes tipos de traçadores utilizados no trabalho experimental, assim como os equipamentos necessários para a deteção dos mesmos.

O quarto capítulo apresenta o trabalho experimental desenvolvido em laboratório, no campo e no rio Beça.

No quinto capítulo são analisados e discutidos os dados obtidos nas atividades experimentais desenvolvidas no capítulo anterior. São comparadas as diferentes técnicas de traçadores tendo em conta a morfologia e condições do meio envolvente.

No sexto e último capítulo são redigidas as considerações finais acerca desta dissertação, bem como definidos alguns desenvolvimentos futuros que se poderão desenvolver nesta vertente.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As medições de escoamentos superficiais são uma questão importante nos estudos hidráulicos e hidrológicos (*e.g.*, Singh, 2017). Estes escoamentos ocorrem com frequência em bacias urbanas e rurais. Uma caracterização e monitorização rigorosa desses fluxos poderá ajudar na melhoria e no entendimento de diversos processos, nomeadamente: qualidade da água (transporte de poluentes), armazenamento de água e modelação da dinâmica dos sedimentos (*e.g.*, Singh, 2017; Chow *et al.* 1988).

Atualmente, vários rios apresentam estações hidrométricas e sistemas de monitorização (*e.g.*, medidores de caudal). Contudo, por vezes podem ocorrer algumas adversidades que afetam a medição direta das velocidades de escoamento, tais como a limitação de acesso, a existência de escoamentos pouco profundos, ou ainda de sedimentos suspensos (Calkins e Dunne, 1970; Comiti *et al.* 2007; Jodeau *et al.* 2008; Tazioli, 2011; Tauro *et al.* 2012).

A velocidade de escoamento superficial, pode também ser determinada de forma mais simples, através da utilização de traçadores. Os traçadores têm sido utilizados ao longo dos anos como instrumentos de rastreio pela comunidade científica, e podem ser coloridos (*e.g.*, de Lima e Abrantes, 2014b; Abrantes *et al.* 2018), fluorescentes (*e.g.*, Leibundgut *et al.* 2009), flutuantes (*e.g.*, Tauro *et al.* 2012), térmicos (*e.g.*, Mujtaba e de Lima, 2018), de sais e eletrólitos (*e.g.*, Lei *et al.* 2010; Schuetz *et al.* 2012; Abrantes *et al.* 2018), ou isótopos radioativos (*e.g.*, Zhou *et al.* 2021). A técnica baseia-se na medição do tempo que o traçador necessita para percorrer determinada distância conhecida. A aplicação de traçadores pode ocorrer em laboratório (*e.g.*, Abrahams e Atkinson, 1993; Giménez e Govers, 2002) ou no campo (*e.g.*, Horton *et al.* 1934; Wirtz *et al.* 2012), contudo os resultados obtidos serão menos precisos, quando comparados com aqueles obtidos através de técnicas mais avançadas (*e.g.*, radares, satélites, sensores micro-ondas) (*e.g.*, Abrantes *et al.* 2018).

Segundo Leibundgut *et al.* (2009), os primeiros ensaios com traçadores ocorreram há cerca de 150 anos atrás. O seu desenvolvimento foi demorado, mas a partir dos anos 60 verificou-se uma rápida evolução na área, devido ao surgimento da digitalização do processamento de dados. O progresso informático permitiu o desenvolvimento das ciências naturais, nomeadamente da hidrologia e das respetivas experiências através de traçadores.

Na opinião de da Silva *et al.* (2009), os traçadores podem ser classificados quanto à sua origem ou quanto à sua utilização. No que diz respeito à origem, estes podem ser considerados naturais

(*e.g.*, flora e fauna, isótopos ambientais, temperatura e condutância específica) ou artificiais (*e.g.*, compostos orgânicos e inorgânicos, tais como sais, pigmentos). No que diz respeito à utilização, estes podem ser divididos em dois grupos, os internos e os externos. Os traçadores internos são definidos como sendo elementos estáveis ou radioativos que ocorrem naturalmente no local de estudo, como é o exemplado do Radónio, utilizado em estudos de águas subterrâneas. Por outro lado, os traçadores externos não existem naturalmente no local de estudo e são aplicados diretamente no sistema que se pretende estudar, podendo ser classificados como fluorescentes, químicos, biológicos, radioativos e ativáveis.

No ponto de vista de de Leibundgut e Seibert (2011), uma das características que define os traçadores naturais é o facto de estes se encontrarem no local de estudo. Segundo os autores, esta característica pode ser considerada simultaneamente uma vantagem e uma desvantagem. É vantajoso o facto do traçador permitir uma análise a diferentes escalas (*e.g.*, a nível local, regional ou até global). Por exemplo, em estudos realizados em bacias hidrográficas, verificou-se a possibilidade da aplicação do traçador ao longo de toda a bacia. É também vantajoso o longo período de tempo que os traçadores permanecem no meio, o que permite realizar estudos com maior duração e caracterizar de uma forma mais eficaz os sistemas hídricos. Por outro lado, é importante referir que este tipo de traçador não consegue rastrear locais específicos.

Elliot (2014) descreve um exemplo de aplicação de isótopos naturais, através de estudos de aquíferos com isótopos de hidrogénio, oxigénio, carbono e enxofre. A aplicação destes traçadores permitiu datar os tempos de residência da água subterrânea armazenada, bem como identificar a recarga de inverno. A partir destes estudos verificou-se que a diminuição da chuva, durante o inverno, afeta diretamente a recarga do aquífero. De modo análogo, Baskaran *et al.* (2009) utilizaram os seguintes traçadores naturais: iões principais (*e.g.*, sódio e magnésio são os catiões dominantes; bicarbonato é o anião dominante) isótopos estáveis (*e.g.*, deutério e oxigénio-18) e um isótopo radioativo (radónio-222) e considerou-os como ferramenta preliminar e eficiente no estudo das interações existentes entre a água subterrânea e a água superficial, proveniente de um rio.

Tauro *et al.* (2012) utilizaram partículas flutuantes insolúveis e verificaram que a sua utilização permite reduzir a quantidade de traçador necessário para as medições experimentais. Quando aplicado em escoamentos, este tipo de traçador flui com a água e, por conseguinte, providencia de forma direta o tempo de percurso. Os autores referem que podem ser aplicados traçadores coloridos, tais como a rodanina e a uranina; contudo, indicam que estas técnicas apresentam limitações devido à adsorção provocada por substratos naturais. Quando são aplicados traçadores flutuantes fluorescentes, a fluorescência das partículas permite caracterizar o fluxo com rigor sem necessidade de implantar sondas e amostradores na água. Estes autores também desenvolveram e implementaram um novo traçador flutuante fluorescente, cuja abordagem

aproveita as vantagens oferecidas por outras técnicas de traçadores tradicionais (*e.g.*, corantes, químicos), aliado a um sistema de medição de baixo custo. Os testes foram realizados num rio e o sistema de deteção do traçador englobava uma lâmpada UV para deteção do mesmo. Esta metodologia revelou-se muito eficaz segundo os autores, visto que os traçadores foram visíveis em fluxos complexos e demonstraram capacidade de estimar as velocidades de escoamento e os tempos de percurso.

O conceito de traçador flutuante foi também aplicado por Tsubaki *et al.* (2011), num estudo onde foi utilizado um sistema de vídeovigilância e efetuadas medições da velocidade de escoamento durante uma cheia. As imagens dos vídeos obtidos foram analisadas através de técnicas de análise de imagem, nomeadamente velocímetria por imagem de partículas (PIV) de larga-escala e velocímetria por imagem espaço-temporal (STIV). As ferramentas de análise foram comparadas às técnicas de medição de flutuação convencional, apresentando um erro de medição da velocidade igual ou menor às técnicas convencionais. De modo análogo, Pentari *et al.* (2014) desenvolveram estudos envolvendo traçadores flutuantes em rios, nomeadamente através do rastreio e estimativa do movimento de sedimentos flutuantes. Através de um método de análise de imagens, obtidas a partir dos vídeos do escoamento do rio, foi possível isolar a informação associada à distribuição dos traçadores, de modo a determinar os respetivos campos de velocidade.

Recentemente, Koshel *et al.* (2019), desenvolveram um estudo sobre a dispersão de traçadores flutuantes na superfície do oceano. Para este estudo os autores consideraram um modelo de fluxo cinemático aleatório e estudaram o processo de agrupamento, ou seja, a agregação do traçador flutuante sob a forma de manchas localizadas. Os autores chegaram à conclusão que em situações onde existem diferentes combinações de componentes da velocidade superficial rotacional e potencial, o agrupamento de traçadores flutuantes persiste, mesmo em fluxos pouco divergentes.

Na opinião de Pizarro *et al.* (2020) as técnicas de deteção ótica para determinar velocidades superficiais de corrente são fortemente influenciadas pelas características do traçador (*e.g.*, densidade e distribuição espacial). Portanto, os autores através de simulações numéricas desenvolveram vários cenários tendo em conta a dispersão dos traçadores, cor das partículas, densidade e presença de outros interferentes. Foram adotados dois algoritmos de determinação da velocidade a partir de imagens: velocímetria por rastreio de partículas (PVT), e velocímetria por imagem de partículas (PIV). Os autores obtiveram melhores resultados com o aumento da densidade e diminuição da distribuição espacial dos traçadores.

Quanto aos traçadores fluorescentes, Silva *et al.* (2017) consideraram estes como uma ferramenta muito útil para auxiliar estudos e modelos hidrodinâmicos em rios com geometria

complexa, onde as técnicas de medidas convencionais não teriam uma fácil aplicação. Segundo os autores, as experiências possibilitaram a obtenção de tempos de trânsito, caudais, velocidade média e coeficiente de dispersão longitudinal. Tendo em conta a geometria irregular e o aumento do caudal ao longo da área em estudo, os métodos clássicos utilizados para determinar a velocidade média da secção transversal podem não ser representativos da área em questão. Posto isto, os traçadores fluorescentes são uma alternativa viável, que possibilita a obtenção de parâmetros necessários para a modelação hidrodinâmica.

Os traçadores fluorescentes também são muito utilizados para a identificação de ligações entre pontos de abastecimento de água subterrânea (*e.g.*, sumidouros), bem como pontos de descarga (*e.g.*, nascentes, poços) (Buzády *et al.* 2006; Leibundgut *et al.* 2009).

Recentemente, de Lima *et al.* (2021), desenvolveram uma prova de conceito onde foi usado quinino como traçador fluorescente, comparando-o com traçadores coloridos e térmicos. Os testes foram desenvolvidos em laboratório, e os traçadores foram aplicados em solo nu visando estimar as velocidades de escoamento superficial. Na opinião dos autores, a grande vantagem do uso de quinino é o facto de quando injetado na superfície em estudo, possuir uma grande visibilidade na presença de uma lâmpada UV, em condições de pouca luminosidade.

No que diz respeito aos traçadores térmicos, têm sido desenvolvidos estudos utilizando a termografia de infravermelho, que visa a obtenção das velocidades de escoamento superficial em testes realizados em laboratório e no campo (*e.g.*, Schuetz *et al.* 2012; de Lima e Abrantes, 2014a; de Lima *et al.* 2015; Abrantes *et al.* 2018; Abrantes *et al.* 2019; Mujtaba e de Lima, 2018).

Na opinião de de Lima e Abrantes (2014a), o microrrelevo influencia diretamente diversos processos hidrológicos (*e.g.*, infiltração, escoamento superficial, transporte de sedimentos, evaporação). Visto que a modelação destes processos requer informação detalhada acerca da superfície do solo, os autores sugerem técnicas atuais sem contacto e muito precisas, que permitem a geração digital de modelos, com uma resolução capaz de analisar eficazmente o microrrelevo. A técnica utilizada pelos autores é baseada na termografia de infravermelhos que permite estimar o microrrelevo da superfície do solo. Contudo, os autores após os testes realizados em laboratório concluem que apesar deste ser um método eficaz e fácil de manusear, apresenta limitações para superfícies de elevada densidade de vegetação. Noutro estudo de Lima e Abrantes (2014b), foram aplicadas técnicas baseadas na termografia de infravermelhos de modo a ser possível visualizar escoamentos pouco profundos, e quantificar a medição das velocidades de escoamentos superficiais. Estes testes foram desenvolvidos em laboratório, visando comparar a aplicação do tradicional traçador colorido (*e.g.*, corante) com uma nova técnica de traçador térmico, através da injeção de um traçador combinado (*e.g.*, corante

aquecido) em águas superficiais pouco profundas. Para estas experiências, os autores estimaram as velocidades de ponta do traçador através de vídeos provenientes de uma câmara de infravermelhos assim como através de vídeos de imagens reais. Os autores chegaram à conclusão de que os traçadores térmicos podem ser usados para estimar as velocidades de escoamento superficial, bem como as velocidades de escoamento em rios, visto que as medições são semelhantes às provenientes do uso de traçadores coloridos. Segundo os autores, a principal vantagem do uso da termografia é a melhoria da visualização da extremidade do traçador injetado, tendo em conta a qualidade da imagem, quando comparada com a imagem dos vídeos de imagens reais.

De modo análogo, de Lima *et al.* (2014) desenvolveram estudos aplicando a termografia de infravermelhos, com o objetivo de mapear a permeabilidade da superfície do solo e identificar caminhos de fluxo preferenciais. As experiências decorreram em laboratório, onde foi usado um canal com solo que permitiu testar diferentes cenários. Foi utilizada água aquecida como traçador térmico, o que permitiu gerar um gradiente de temperatura na superfície do solo e, por conseguinte, obter imagens térmicas de alta resolução da sua superfície, provenientes de uma câmara de infravermelhos.

Para utilização como traçadores coloridos, existe uma grande variedade de corantes não-tóxicos e não cancerígenos (*e.g.*, uranina, rodamina WT, eosina, C.I Direto Amarelo 96), sendo estes facilmente acessíveis (*e.g.*, Aley e Fletcher, 1976; Buzády *et al.* 2006; Leibundgut *et al.* 2009).

Conforme Fontoura e Niencheski (2003), uma grande variedade de traçadores coloridos fluorescentes tem sido testada e aplicada, como é o exemplo da Rodamina B, Fluoresceína, Pontacyl Brilliant Pink B, Rodamina WT, Sulforodamina B e Amidorodamina G extra. De acordo com os autores, o traçador mais utilizado é a “Rodamina B”, que possui uma baixa capacidade de adsorção e, por essa razão, é aconselhada em zonas de maior turvação onde existem grandes quantidades de matéria orgânica em suspensão (*e.g.*, lagos, estuários e rios). De modo análogo, Feuerstein e Selleck (1963) elaboraram testes em laboratório comparando o comportamento dos corantes fluorescentes Rodamina B, Pontacyl Brilliant Pink B e Fluoresceína, em águas superficiais de qualidade variável. Das experiências realizadas em campo concluiu-se que com o Pontacyl Brilliant Pink B e a Fluoresceína não ocorre adsorção física em sólidos suspensos, mas em contrapartida com a Rodamina B existe uma adsorção assinalável. A taxa de decaimento fotoquímico é também uma característica importante, pois permite-nos avaliar o tempo de utilização de cada corante. Posto isto, a taxa de decaimento fotoquímico do Pontacyl Brilliant Pink B equivale a metade da taxa da Rodamina B e 1/25 da Fluoresceína. Na opinião dos autores, o uso de fluoresceína deve ser restrito a estudos com tempo de atividade reduzido, apenas em águas de alta qualidade, tendo em conta a elevada taxa de degradação fotoquímica. Assim, de acordo com o estudo realizado, o Pontacyl Brilliant Pink

B é o traçador quantitativo mais adequado, apesar do custo ser substancialmente mais alto quando comparado com a Rodamina B, mas a sua aplicação e versatilidade em diversos estudos justifica o investimento acrescido.

Na opinião de Divine e McDonnel (2005), os testes envolvendo traçadores são ferramentas de investigação poderosas e têm um longo historial de aplicação em hidrologia. Os autores ressaltam que, embora existam limitações associadas aos testes envolvendo traçadores, existe uma grande quantidade de aplicações onde a técnica de rastreio fornece claramente informações credíveis. Em suma, há uma grande variabilidade de traçadores que podem ser aplicados atualmente (*e.g.*, ambientais, flutuantes, fluorescentes, coloridos, térmicos). Os traçadores ambientais (*e.g.*, isótopos ambientais), apesar de limitados à sua área de permanência são ferramentas eficientes no estudo das interações entre as águas subterrâneas e superficiais. Os traçadores flutuantes insolúveis e coloridos, quando aplicados em escoamentos, fluem com a água e providenciam de forma direta o tempo de percurso. Contudo, apresentam limitações devido à adsorção causada por substratos naturais. Por outro lado, os traçadores fluorescentes devido à fluorescência das partículas, permitem caracterizar o fluxo com rigor sem necessidade de implantar sondas e amostradores na água. A única desvantagem é a necessidade de utilizar uma lâmpada de UV para a deteção do mesmo. Relativamente aos traçadores térmicos, estes demonstraram ser eficazes em estimar o microrrelevo do solo. No entanto, apresentam limitações para superfícies de elevada cobertura vegetal.

3 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Neste capítulo serão descritas as técnicas e os equipamentos utilizados nas atividades laboratoriais e de campo, as principais características dos traçadores, bem como os protocolos de aplicação.

3.1 Traçadores

Os principais materiais necessários ao trabalho realizado no âmbito desta dissertação são os traçadores hidrológicos. Estes vão permitir estimar as velocidades de escoamento e serão utilizados nas mesmas condições de aplicação, tanto em laboratório como no campo.

Foram utilizados traçadores fluorescentes, coloridos e térmicos, durante as atividades desenvolvidas em laboratório e no campo, para medições em escoamentos superficiais. Na atividade realizada no rio Beça, devido à dificuldade em aplicar os traçadores acima referidos (*e.g.*, disponibilidade em obter um traçador térmico; falta de visibilidade do traçador fluorescente durante o dia) ou devido à possibilidade de os mesmos contaminarem o ambiente (*e.g.*, o uso de traçador colorido em grandes quantidades), foram utilizados flutuadores biodegradáveis.

3.1.1 Coloridos

O traçador colorido utilizado foi um corante vermelho (corante culinário não alcoólico), tendo sido diluído em água, para atingir uma concentração de 20 ml/l. As principais características do corante encontram-se descritas no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 – Principais características do corante alimentar utilizado.

Nome	Corante Vermelho
Fabricante	Globo
Composição	Corante carmosina (E122), corante sintético vermelho 4R (E124), corante amarelo (E104) e ácido acético (E260).

3.1.2 Fluorescentes

O traçador fluorescente utilizado foi uma solução contendo quinino. O quinino é um alcaloide vegetal amargo, extraído da árvore de género *Cinchona*, e é frequentemente usado para fins medicinais (e.g., Diener *et al.* 2002; Geto *et al.* 2012). Este, pode também ser usado como aromatizante amargo em alguns tipos de bebidas, tais como a água tónica. A água tónica contém aproximadamente 80 mg/l de quinino (e.g., Donovan *et al.* 2003; Awasthi *et al.* 2011). Nos ensaios realizados, foi usado o quinino com as seguintes características: monoclóridato dihidratado 99% (ACROS Organics™). O quinino utilizado não tem efeitos ecotoxicológicos no meio ambiente e apresenta poucas possibilidades de ser móvel no solo, devido à sua baixa solubilidade na água (Thermo Fisher Scientific, 2021). Sendo um traçador fluorescente, a substância utilizada como traçador emitirá luz quando exposta a radiações do tipo UV (e.g., lâmpada de luz UV). Este fenómeno denominado fluorescência permitirá detetar o traçador. As soluções contendo a substância fluorescente são fortemente dependentes do pH, pelo que pequenas variações do mesmo alteram significativamente o brilho da solução. Considerou-se para este estudo que a concentração de 80 mg/l de quinino em água destilada, com um pH de 3.7, apresenta uma fluorescência adequada para ser aplicada como traçador, conforme sugerido por de Lima *et al.* 2021.

3.1.3 Térmicos

O traçador térmico utilizado foi água proveniente da rede pública (Quadro 3.2) e aquecida até uma temperatura de aproximadamente 80°C, com o recurso de uma chaleira elétrica. Quanto maior a temperatura da água mais fácil se torna a deteção do traçador pelo dispositivo de captura de vídeo e imagem (câmara de infravermelhos). Assim, foi definida a temperatura de 80°C tendo em conta que a partir deste valor o seu manuseamento torna-se mais perigoso.

Quadro 3.2 - Principais características físicas e químicas da água usada nas atividades experimentais (Águas de Coimbra, 2020).

Parâmetros	Unidades	Mínimo	Máximo
Condutividade	µS/cm at 20 °C	75.9	150
pH	-	6.5	7.3
Turbidez	NTU	< 1.0	1.1
O ₂	mg/l	< 1.0	3.7
Dureza total	mg CaCO ₃ /l	21.4	33.3

3.1.4 Flutuantes

No rio Beça foram utilizados traçadores flutuantes biodegradáveis. Estes traçadores podem ser sedimentos suspensos que fluem naturalmente com a corrente, ou partículas distribuídas intencionalmente de modo a poderem ser monitorizadas (Dal Sasso *et al.* 2018). Os traçadores usados foram: milho expandido (pipocas), flores (espécie: *Leucanthemum vulgare*, mais conhecida por bem-me-quer), folhas de papel e folhas de árvore (espécie: *Alnus glutinosa*).

3.2 Equipamentos

Para a aplicação dos traçadores ser bem-sucedida foi necessário recorrer a um conjunto de equipamentos. O traçador fluorescente tem a particularidade de brilhar sob a luz ultravioleta (UVA) com um azul vívido, devido à fluorescência do quinino. Assim, para as atividades experimentais, no laboratório e no campo foi usada uma lâmpada UVA com as especificações referidas abaixo (Quadro 3.3).

Quadro 3.3 - Especificações básicas da lâmpada UVA utilizada nas atividades experimentais.

Informações da lâmpada		Dados técnicos	
Nome do produto	F36 T8 BLB	Potência nominal da lâmpada	36 W
Fabricante	Euromarks	Pico de emissão do comprimento de onda	354 nm
Tecnologia	Fluorescente	Irradiância UVA @ 20 cm, 315-400 nm	350 mW/cm ²
Forma da lâmpada	Tubular	Fluxo nominal UVA, 315-400 nm	8.8 W
Tipo	Luz ultravioleta		
Acabamentos da lâmpada	Fosco/revestido		

Para ser possível determinar as velocidades de escoamento superficial nas atividades experimentais, recorreu-se a sistemas de gravação de vídeo, de modo a captar imagens e vídeos do trajeto percorrido pelos traçadores. Foram usados vídeos de imagens reais e também de infravermelho. Os vídeos de imagens reais foram captados por uma câmara ótica de um telemóvel (modelo: Samsung S8), permitindo determinar as velocidades dos traçadores coloridos e fluorescentes (Figura 3.1). Os vídeos de infravermelhos foram gravados através da

câmara de vídeo (modelo: FLIR Duo Pro R), captando vídeos térmicos e reais da área em estudo, permitindo determinar as velocidades dos traçadores térmicos (Figura 3.2).



Figura 3.1 - Câmara ótica (modelo: Samsung S8), utilizada nas atividades experimentais em laboratório e no campo, para determinar as velocidades dos traçadores coloridos e fluorescentes.



Figura 3.2 - Câmara de infravermelhos (modelo: FLIR Duo Pro R), utilizada nas atividades experimentais em laboratório e no campo, para determinar as velocidades do traçador térmico.

A câmara de infravermelhos deteta a energia invisível ao olho humano, emitida na banda do infravermelho pela superfície do solo húmido e pela água, apresentando-a como uma imagem a duas dimensões (2D). A escala de imagem da câmara de infravermelhos é baseada nos coeficientes de emissividade da temperatura superficial dos materiais. Como os coeficientes de emissividade da água e do solo húmido são muito idênticos, para a faixa espectral que se está a operar na câmara em questão (7.5-13.0 μm), os erros associados podem ser ignorados. As especificações de ambos os equipamentos estão descritas no Quadro 3.4.

Quadro 3.4 - Especificações básicas da câmara ótica do Samsung S8 e da câmara de vídeo de IV FLIR Duo Pro R.

Especificações Samsung S8	Unidade	Valor
Resolução	Pixel	4290 × 2800 fotografias; 1920 × 1080 (1920 pixéis de largura por 1080 pixéis de comprimento de tela)
Tamanho de abertura	-	F1.7
Comprimento do foco	mm	26
Tamanho do sensor	in	½.55
Tamanho do pixel	µm	1.4
Especificações FLIR Duo Pro R	Unidade	Valor
Resolução do sensor térmico	Pixel	336 × 256
Campo de visão (FOV)	Graus	56 × 45
Comprimento do foco	mm	19
Taxa de atualização térmica	Hz	30
Sensibilidade térmica	mK	50
Precisão	-	+/- 5°C ou 5% das leituras na faixa de -25°C a +135°C de alcance +/- 20°C ou 20% das leituras na faixa de -40°C a +550°C de alcance
Faixa spectral	µm	7.5-13.5

Na atividade experimental desenvolvida no rio Beça, devido às dimensões do mesmo, nomeadamente no que concerne à sua secção transversal, não foi possível usar os mesmos equipamentos de captação de imagem e de vídeo. Para contornar esta situação, a solução encontrada foi a utilização de um UAS/Drone (modelo: 3DR Drone Solo), com uma câmara acoplada à sua base (modelo: GoPro – Hero 5 Black) (Figura 3.3), permitindo assim captar imagens e vídeos de toda a área do rio. As especificações de ambos os equipamentos encontram-se descritas no Quadro 3.5.



Figura 3.3 - Aeronave não tripulada (UAS/drone) (modelo: 3DR Drone Solo) (à esquerda) e câmara (modelo: GoPro – Hero 5 Black) (à direita), utilizados nas atividades experimentais no rio Beça, para determinar as velocidades dos traçadores flutuantes biodegradáveis.

Quadro 3.5 - Especificações básicas do UAS/Drone e da câmara GoPro utilizados no rio Beça.

Informações do UAS/Drone		Dados técnicos	
Nome do produto	3DR Drone Solo	Velocidade máxima	24.58 m/s
Tipo de drone	Aéreo	Alcance	800 m
Nº de hélices	4	Altitude máxima	122 m
GPS	Sim	Bateria	Li-Ion 5200 mAh
Controlo Remoto	Sim	Dimensões Diagonal Hélice	46 cm
Estabilizador de imagem	Sim	Peso do drone	1500 g
Informações da GoPro		Dados técnicos	
Nome do produto	Hero 5 Black	Dimensões	62 × 44 × 24 mm
Visor	LCD de 2 polegadas	Peso	118 g
À prova de água	Sim	Vídeo	4K(2160p) @30fps
Wireless	Sim	Bateria	1220 mAh

4 TÉCNICAS E MEDIÇÕES

Neste capítulo serão abordados todos os procedimentos e metodologias usados durante as medições experimentais, efetuadas em laboratório e no campo, no âmbito dos projetos ASHMOB e MUSSEFLOW.

4.1 Medições em laboratório

4.1.1 Enquadramento

De modo a comparar o desempenho dos diferentes tipos de traçadores, procedeu-se à realização de atividades experimentais em laboratório. Para este efeito, preparou-se uma instalação no LHRHA.

A configuração da instalação laboratorial teve por objetivo simular solos rurais cobertos de cobertura morta, avaliando assim a capacidade dos diferentes tipos de traçadores para estimar a velocidade de escoamento superficial com diferentes densidades dessa cobertura. A configuração da instalação a utilizar depende do tipo de traçador utilizado, visto que são necessários diferentes equipamentos para cada traçador.

4.1.2 Instalações laboratoriais

Na instalação laboratorial foi utilizado um canal de terra retangular com 3.0 m de comprimento e 0.3 m de largura, ajustado para um declive constante de 5%, que é alimentado por um sistema de abastecimento de água, a partir de montante do canal (Figura 4.1). Este sistema de abastecimento é constituído por um tanque de carga constante e uma caixa de alimentação, permitindo assim a aplicação de um caudal constante, conhecido, sobre a superfície do solo.

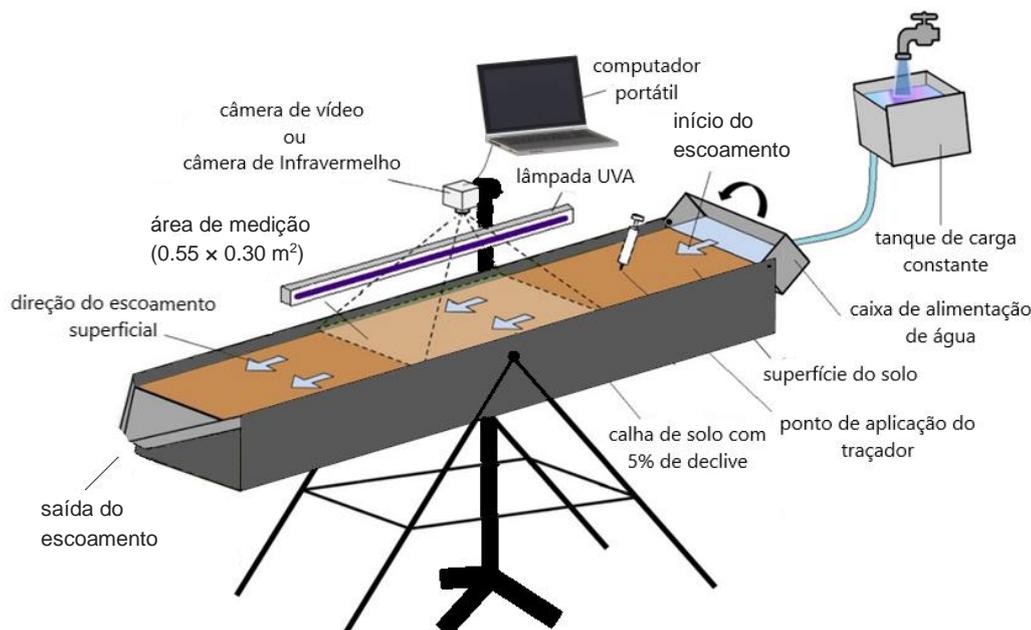


Figura 4.1 - Representação esquemática da instalação configurada no laboratório para medições das velocidades de escoamento superficial, usando traçadores térmicos, fluorescentes e coloridos. A área de medição tem 0.55 m de comprimento e 0.30 m de largura (de Lima *et al.* 2021).

O solo usado no canal de terra onde foram realizados os testes é um solo franco-arenoso, retirado das proximidades das margens do rio Mondego (Quadro 4.1). Acima da superfície do solo, no canal, foi adicionada uma fina camada de cimento, o que tornou o solo mais homogêneo e menos propenso a fenómenos de erosão.

Quadro 4.1 - Principais características do solo utilizado nas atividades experimentais em laboratório (de Lima *et al.* 2003).

Parâmetros	Unidades	Valores
Teor de areia	%	79
Teor de silte	%	10
Teor de argila	%	11
Massa volúmica	kg/m ³	1100
Profundidade do solo no canal	mm	62
Cor	-	acastanhado

Foram instalados os equipamentos de captação de imagem e vídeo, um computador e também uma lâmpada ultravioleta. As imagens e vídeos foram captados numa área do canal de 0.30 m × 0.55 m.

As câmaras permaneceram fixas para todas as etapas da atividade experimental, ficando posicionadas paralelamente ao canal. A câmara ótica e a de infravermelhos ficaram fixas a dois tripés metálicos, a 0.65 m e 1.50 m respetivamente acima da superfície do canal, de modo a captarem a mesma área de medição (Figura 4.2).



Figura 4.2 - Posicionamento da câmara ótica (Samsung S8) (figura à esquerda) e da câmara de infravermelhos (FLIR Duo Pro R) (figura à direita), situadas a 0.65 m e 1.50 m respetivamente, acima da superfície do solo do canal.

Para melhorar a observação do traçador fluorescente nos vídeos com imagens reais, cobriu-se toda a instalação com um plástico preto, evitando assim a interferência da luz exterior. Os três traçadores, coloridos, térmicos e fluorescentes, foram testados nas mesmas condições experimentais. Assim, foi mantido o caudal bem como a morfologia da superfície do solo.

4.1.3 Procedimentos laboratoriais

Os testes experimentais foram efetuados com a presença e a ausência de uma cobertura morta (*e.g.*, palha), com variação da sua densidade. As densidades testadas corresponderam a 0.5 ton/ha, 1.0 ton/ha e 2.0 ton/ha.

Iniciou-se o escoamento sobre a superfície do solo com um caudal constante, e procedeu-se à sua medição. Para isso, recorreu-se ao método volumétrico obtendo-se um caudal correspondente a 0.139 l/s, resultante da média de um conjunto de três leituras. Após conclusão deste procedimento, ligaram-se as câmaras e iniciou-se a aplicação dos traçadores. Estes foram introduzidos manualmente, num ponto específico do canal com o auxílio de uma seringa. De modo a minimizar a interferência da injeção do volume de traçador na medição das velocidades, esta foi aplicada 0.2 m a montante da área de medição, com um volume conhecido de 10 ml.

Na primeira parte da experiência não existiu adição de cobertura morta. Cada traçador foi aplicado três vezes e o processo ficou registado em vídeo. Esta etapa decorreu nos mesmos moldes para os restantes traçadores. Assim, obtiveram-se três registos de vídeo diferentes, cada um deles correspondente a um traçador. De seguida, foram aplicadas quantidades conhecidas de cobertura morta sobre a superfície do solo, e repetiram-se os procedimentos descritos acima. Primeiramente foi aplicada a cobertura de menor densidade (0.5 ton/ha), de seguida aplicou-se a cobertura de densidade intermédia e por último a de maior densidade.

A caracterização da cobertura morta sobre a superfície do solo foi possível através da análise de imagens da superfície do canal. Cada imagem foi convertida numa escala de preto e branco, onde o preto corresponde à superfície do solo e o branco à cobertura. Assim, foi possível determinar a percentagem de área coberta por cada cor (preto/branco), e obter uma estimativa da percentagem de área coberta por solo e por cobertura morta (Quadro 4.2). Este método de análise foi efetuado através de uma ferramenta *online* de processamento de imagens (The Image Colour Extract PHP).

Quadro 4.2 - Percentagem de ocupação da cobertura morta sobre a superfície do solo para diferentes densidades da mesma.

Densidade de cobertura morta (ton/ha)	Área coberta de solo (%)	Área com cobertura morta (%)
0.5	90	10
1.0	75	25
2.0	52	48

4.2 Medições em meio urbano

4.2.1 Enquadramento

A superfície do parque de estacionamento do DEC é constituída por blocos de cimento, que conferem uma elevada impermeabilidade ao terreno, similar à que se verifica nas áreas urbanas, razão pela qual foi escolhido este local (Figura 4.3). A proximidade ao laboratório foi também um dos critérios que contribuiu para esta escolha, uma vez que facilitou o transporte de todo o material necessário.



Figura 4.3 – Local onde foram realizados os ensaios no parque de estacionamento do DEC, visando a aplicação de traçadores térmicos, fluorescentes e coloridos.

4.2.2 Instalações em meio urbano

Foi instalado um sistema de abastecimento de água a montante da área de medição, que recebe água da rede pública, proveniente do sistema de abastecimento do laboratório, permitindo assim a aplicação de um caudal constante e conhecido sobre a área de medição. A superfície pavimentada onde foram aplicados os traçadores possui um declive de 25 %.

Os equipamentos utilizados (tripés, câmaras e lâmpada) foram posicionados de forma idêntica à observada nas atividades laboratoriais e mantiveram-se as dimensões da área de medição.

Durante os testes realizados de dia, cobriu-se toda a instalação com um plástico preto no momento de aplicação do traçador fluorescente (Figura 4.4).



Figura 4.4 - Instalação utilizada para a aplicação dos traçadores, situada no parque de estacionamento do DEC.

4.2.3 Procedimentos

Todas as experiências foram realizadas na mesma superfície, com o mesmo caudal e volume de traçador. Os testes foram iniciados durante o dia, para um caudal constante conhecido (0.206 l/s), determinado a partir do método usado nas instalações laboratoriais.

Após o início do escoamento, ligaram-se as câmaras e procedeu-se à aplicação dos traçadores com um volume conhecido (10 ml). Foram efetuadas três réplicas para cada traçador, sendo produzidos vídeos independentes para cada um dos traçadores. Tal como na atividade laboratorial, os traçadores foram aplicados 0.2 m a montante da área de medição. Depois de realizados todos estes testes, reaplicou-se o traçador fluorescente com a utilização da cobertura de plástico por cima de toda a instalação.

Após finalizadas as experiências durante o período diurno, procedeu-se à realização dos testes durante o anoitecer, nos mesmos moldes descritos anteriormente.

Nesta fase do dia não foi utilizada a cobertura de plástico para o traçador fluorescente, pois a interferência da luz solar era mínima. Por outro lado, a diminuição da luz solar tornou difícil a deteção do traçador colorido, pelo que foi necessário utilizar uma fonte luminosa (*e.g.*, candeeiro) para iluminação da área de medição.

Após a finalização de todas as medições durante o anoitecer, repetiram-se os mesmos procedimentos durante a noite. Nesta fase, a interferência da luz solar é inexistente, pelo que, mais uma vez, não foi necessário colocar cobertura sobre a instalação e voltou a recorrer-se à fonte luminosa (Figura 4.5).

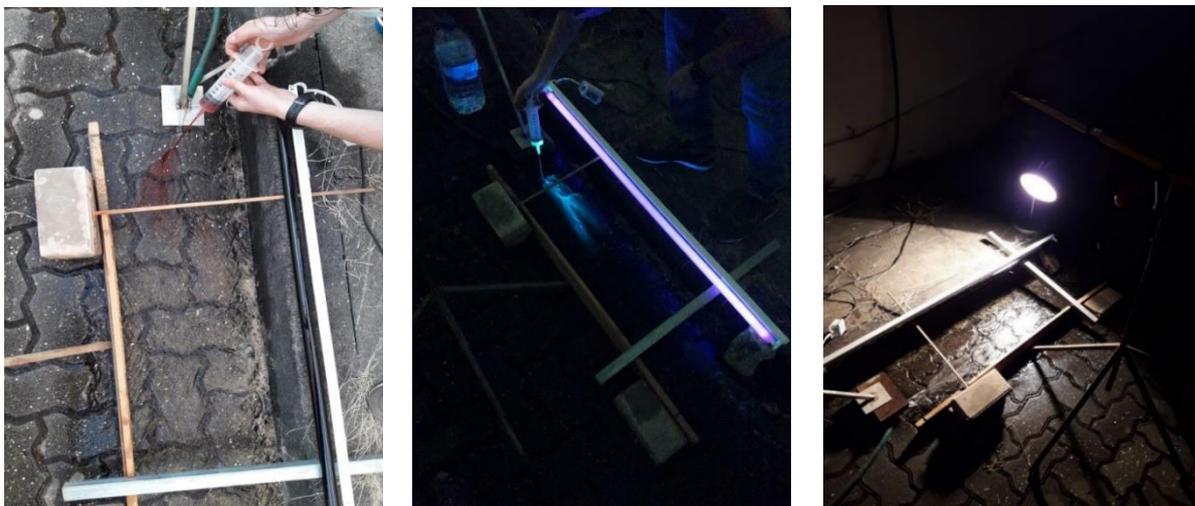


Figura 4.5 - Aplicação do traçador colorido durante o dia (à esquerda), do fluorescente durante o anoitecer (ao meio) e do colorido durante a noite (à direita) numa superfície pavimentada. As dimensões da área de medição são $0.55 \text{ m} \times 0.30 \text{ m}$.

4.3 Medições em meio rural

4.3.1 Enquadramento

Os escoamentos superficiais em solo coberto por vegetação, foram realizados no Pólo 2 da Universidade de Coimbra, numa área cuja cobertura vegetal é constituída maioritariamente por eucaliptos e pinheiros.

As atividades experimentais levadas a cabo nesta localização (Figura 4.6), para além de terem permitido estimar a velocidade de escoamento superficial em diferentes períodos do dia, permitiram essencialmente comparar a aplicação dos vários traçadores em solos com diferentes densidades de vegetação.



Figura 4.6 - Local onde foram realizados os ensaios, visando a aplicação de traçadores térmicos, fluorescentes e coloridos em superfícies com diferentes densidades de vegetação.

4.3.2 Instalações em meio rural

A instalação continha um sistema de abastecimento de água, situado aproximadamente 0.5 m a montante da secção de medição. Este sistema provinha do sistema de abastecimento do LHRHA, o que permitiu manter um caudal constante conhecido. A área de medição manteve as dimensões usadas anteriormente. A instalação utilizada encontra-se representada na Figura 4.7.

Foi construída uma estrutura de suporte que permitiu cobrir toda a configuração com um plástico preto, limitando a passagem de luz solar para o interior da área de medição (Figura 4.8). A estrutura leve e idêntica a uma tenda apenas foi utilizada no momento de aplicação do traçador fluorescente, durante o dia.



Figura 4.7 - Instalação utilizada para a aplicação dos traçadores no Pólo 2, em solos cuja superfície é constituída por vegetação.



Figura 4.8 – Estrutura constituída por um plástico preto utilizada para facilitar a deteção do traçador fluorescente durante o dia, em solos cuja superfície é constituída por vegetação.

4.3.3 Procedimentos

Os traçadores foram aplicados em superfícies com diferentes densidades de cobertura vegetal, correspondendo a uma altura média de 0.15 m, 0.1 m e 0.05 m (Zehsaz *et al.* 2022). Todos os testes foram realizados no mesmo solo, com o mesmo tipo de vegetação (Figura 4.9).



Figura 4.9 - Vegetação utilizada para aplicação dos traçadores (á esquerda) e área de medição da instalação utilizada no Pólo 2 (á direita). As dimensões da área de medição são 0.3 m × 0.55 m.

Os ensaios foram conduzidos em dias distintos, durante o dia, anoitecer e noite. As medições durante o anoitecer aconteceram trinta minutos após o pôr do sol, enquanto, que as medições diurnas e noturnas foram concluídas, respetivamente, uma hora antes e uma hora após o pôr do sol. As principais informações relativas aos ensaios encontram-se expostas no Quadro 4.3.

Quadro 4.3 - Informações relativas ao escoamento, densidade da vegetação, meteorologia e morfologia para cada dia e superfície (Zehsaz *et al.* 2022).

Dia	Altura da vegetação (m)	Volume de traçador (ml)	Caudal (l/s)	Declive (%)	Temperatura do ar (°C)	Temperatura da água (°C)	Hora do pôr do Sol
1	0.15	10	0.403	25	23	20	20:51
2	0.10	10	0.393	25	23	21	20:52
3	0.05	10	0.400	25	22	21	20:53

4.4 Medições em rios

4.4.1 Enquadramento

O rio Beça é um rio português que nasce na Serra do Barroso, município de Montalegre, e tem um comprimento de aproximadamente 46 quilómetros, indo desaguar ao rio Tâmega, perto da vila de Ribeira de Pena (Figura 4.10).

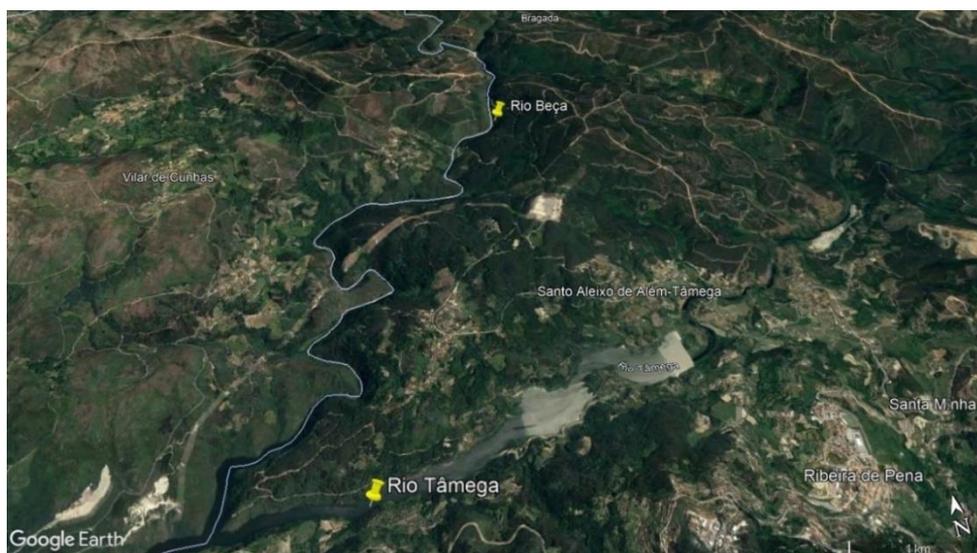


Figura 4.10 - Vista satélite do rio Beça, onde foram aplicados os traçadores flutuantes biodegradáveis (Google Earth Pro).

O estudo foi efetuado em pleno mês de junho de 2021, durante o verão, em diferentes localizações do rio, que foi dividido em três troços. Cada um desses troços apresentava diferentes morfologias e características, tendo sido atribuído um número para facilitar a sua identificação (troço 1, 2 e 3) (Figura 4.11). A deslocação ao local em 2021 teve unicamente por objetivo realizar as experiências de aplicação de traçadores. As características detalhadas de cada troço, foram previamente recolhidas, em julho de 2020 (*e.g.*, morfologia, parâmetros físico-químicos, hidrografia e meteorologia) e encontram-se descritas nos anexos. Estas informações foram recolhidas pelo Professor Joaquim Reis com o contributo de outros alunos integrantes do projeto MUSSEFLOW.

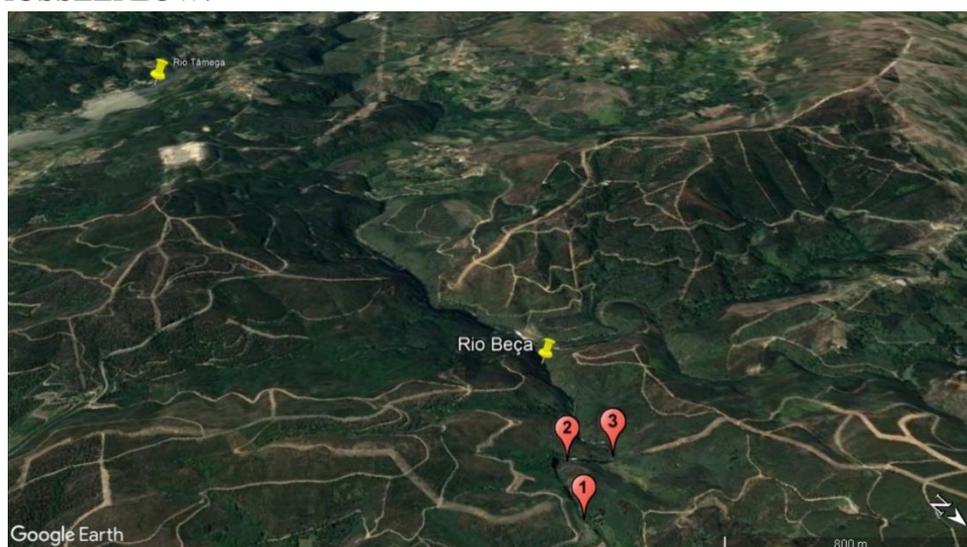


Figura 4.11 - Vista satélite dos três troços (troço 1, 2 e 3) no rio Beça, onde foram aplicados os traçadores flutuantes biodegradáveis (Google Earth Pro).

O troço 1 (Figura 4.12) é um troço em linha reta com uma extensão de 45 m, uma largura aproximada de 15 m e uma profundidade máxima de 0.50 m. O local possui bons acessos, com um terreno amplo e aberto, incluindo uma pequena praia, numa das margens. As suas margens são caracterizadas sobretudo pela presença de vegetação ripária. Na água, existem algumas plantas aquáticas e também pequenas ilhas com vegetação abundante. As águas são correntes e rasas, e o leito do rio é composto sobretudo por areia, cascalho e rochas de maiores dimensões, que podem atingir o nível da água. Não há indícios de perturbação humana no local.

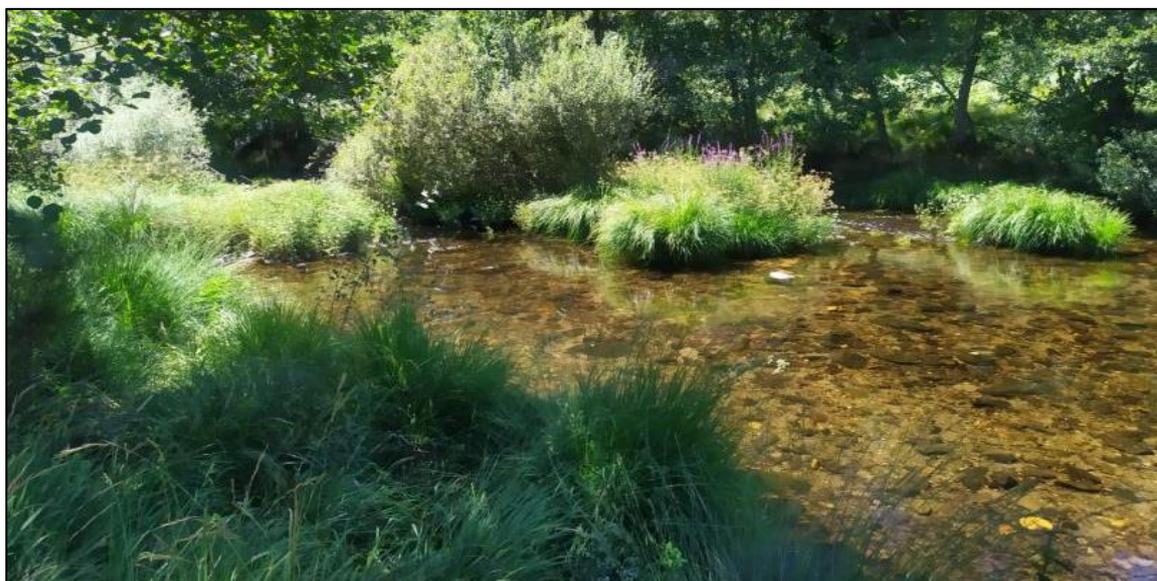


Figura 4.12 - Troço 1 situado no rio Beça, onde foram aplicados traçadores flutuantes biodegradáveis.

O troço 2 (Figura 4.13) é um troço em linha reta tal como o troço 1, possui uma extensão de 30 m e uma largura aproximada de 8 m. Este local caracteriza-se por ser uma área ampla e aberta, com água estagnada e uma profundidade máxima de 0.70 m, maioritariamente coberta por rochas. As margens são cobertas de vegetação ripária, que se encontram em contacto com a água. Apesar de ser frequentado ocasionalmente por pescadores, não existem indícios de perturbação humana.



Figura 4.13 - Troço 2 situado no rio Beça, onde foram aplicados traçadores flutuantes biodegradáveis.

O troço 3 (Figura 4.14) ao contrário dos outros troços, tem uma trajetória curvilínea, possuindo uma extensão de 40 m e uma largura aproximada de 13 m. É caracterizado por ser amplo, com águas rasas (profundidade máxima de 0.81 m) e correntes. Nas margens, a vegetação é ripária, e ao longo do rio existem ilhas com vegetação ribeirinha. Nesta zona, o leito do rio caracteriza-se pelo seu substrato heterogêneo, incluindo rochas, calhaus e elementos menores (*e.g.*, seixos). Não há indícios de perturbações humanas que afetem as características hidrológicas e morfológicas do local.

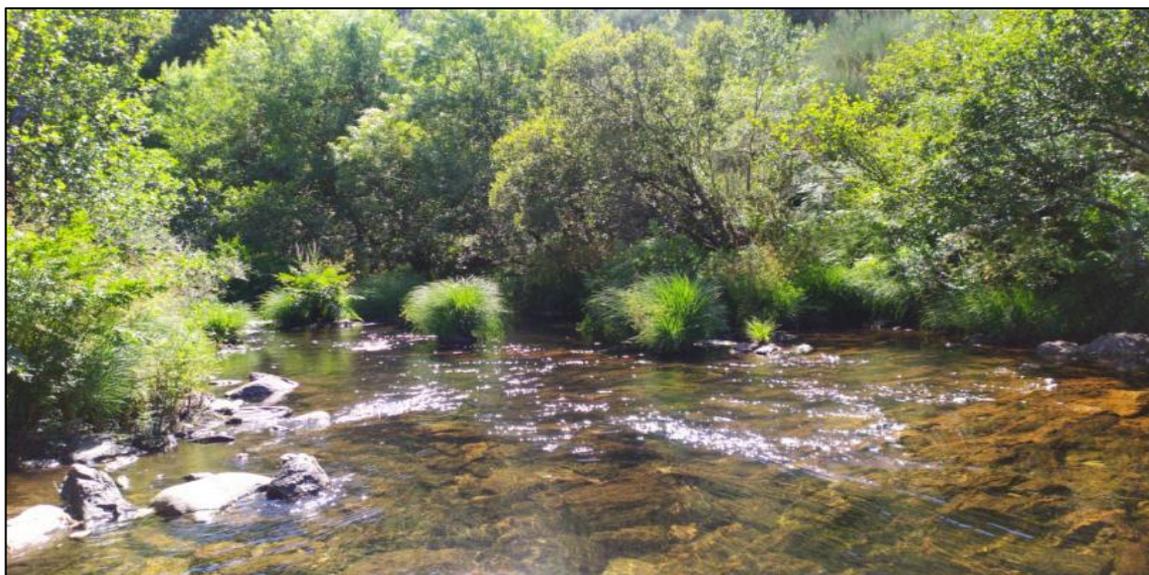


Figura 4.14 - Troço 3 situado no rio Beça, onde foram aplicados traçadores flutuantes biodegradáveis.

4.4.2 Procedimentos

Durante os testes realizados utilizou-se um UAS/drone para captar toda a extensão do rio em estudo. O UAS/drone usado possuía uma câmara “GoPro” acoplada à sua base, que permitiu obter vídeos de imagens reais de todos os troços do rio.

Aplicaram-se traçadores flutuantes biodegradáveis, tais como pipocas de milho, flores, folhas de árvores e pedaços de papel. De forma a possibilitar a deteção dos traçadores pela câmara anexada ao UAS/drone, era importante que os mesmos flutuassem. Como referência, foram colocados em cada margem marcadores brancos, distando 5 m entre si.

Os testes foram iniciados no troço 1, que possui um comprimento total de 45 m. Cada margem possuía um total de dez marcadores e cada conjunto de marcadores correspondia a uma secção (9 secções \times 5 m = 45 m). Os traçadores foram aplicados no início de cada secção e o UAS/drone filmava cada secção separadamente, facilitando posteriormente o tratamento de dados. Devido às dimensões acrescidas deste troço, e de forma a ser possível detetar os traçadores em cada uma das secções, o UAS/drone teve de realizar dois voos. Se o UAS/drone atingisse uma altura demasiado elevada, capaz de captar toda a secção, os traçadores poderiam não ser detetados pela câmara. Por conseguinte, para garantir uma maior visibilidade, as 9 secções definidas previamente foram divididas em 18 subsecções. O primeiro voo captou desde a subsecção 1 até à 9, enquanto o segundo voo captou desde a 10 até à 18 (Figura 4.15).



Figura 4.15 – Vista satélite do troço 1, no rio Beça. Este troço, com 45 m de comprimento, foi dividido em 18 subsecções. O 1º voo de UAS/drone captou desde a subsecção 1 até à 9, enquanto o 2º voo captou desde a 10 até à 18 (Google Earth Pro).

De modo a ser possível obter campos de velocidades mais completo, era importante que os traçadores percorressem a maior distância de rio possível. Por vezes, tal não ocorria, visto que os traçadores ficavam retidos na vegetação, ou não eram detetados pelo UAS/drone. Em cada secção detetaram-se em média seis traçadores. Foram também realizadas medições com recurso a um molinete em alguns pontos do troço 1, de modo a comparar as velocidades obtidas.

Os traçadores foram aplicados diretamente dentro do rio, pois junto às margens existia vegetação muito densa, o que tornaria difícil a aplicação dos mesmos a partir desses locais, nalgumas secções. Além do mais, o troço apresentava a profundidade máxima de 0.5 m, o que tornou perfeitamente possível a aplicação acima descrita, e permitiu aumentar a precisão desta tarefa (Figura 4.16).



Figura 4.16 - Vista aérea do troço 1, no rio Beça, captada pelo UAS/drone, onde foram aplicados os traçadores flutuantes biodegradáveis. Os marcadores brancos de referência nas margens distam 5 m entre si.

O troço 2 apresenta menores dimensões do que o troço 1, possuindo um comprimento de 30 m. A metodologia aplicada foi igual à utilizada anteriormente. Como as margens são mais estreitas, o UAS/drone conseguiu captar toda a largura do rio e assim não houve necessidade de dividir as secções tal como ocorreu no troço 1. Foram utilizados sete marcadores, em cada margem, correspondendo a um total de seis secções, o que equivale a 30 m de extensão (Figura 4.17). Neste troço foi utilizado novamente o molinete para posterior comparação das velocidades, tendo sido efetuadas medições em todas as secções deste troço.



Figura 4.17 - Vista satélite do troço 2, no rio Beça, dividido em 6 secções, distando 5 m entre si (Google Earth Pro).

O troço 3 possui um comprimento de 40 m. Durante a aplicação dos traçadores nesta localização surgiram algumas dificuldades, pois este troço apresenta um percurso curvilíneo, o que influencia a trajetória dos traçadores e a consequente medição. É também importante realçar que nesta zona do rio o substrato é maioritariamente constituído por seixos, calhaus e rochas. Tal cenário, dificultava não só a aplicação correta dos traçadores bem como a locomoção dentro do próprio rio. Posto isto, não foi possível utilizar o molinete neste troço. O UAS/drone realizou apenas um voo, onde foi possível captar todas as secções do troço. Foram utilizados nove marcadores em cada margem, correspondendo a um total de oito secções, o que equivale a 40 m de extensão (Figura 4.18).

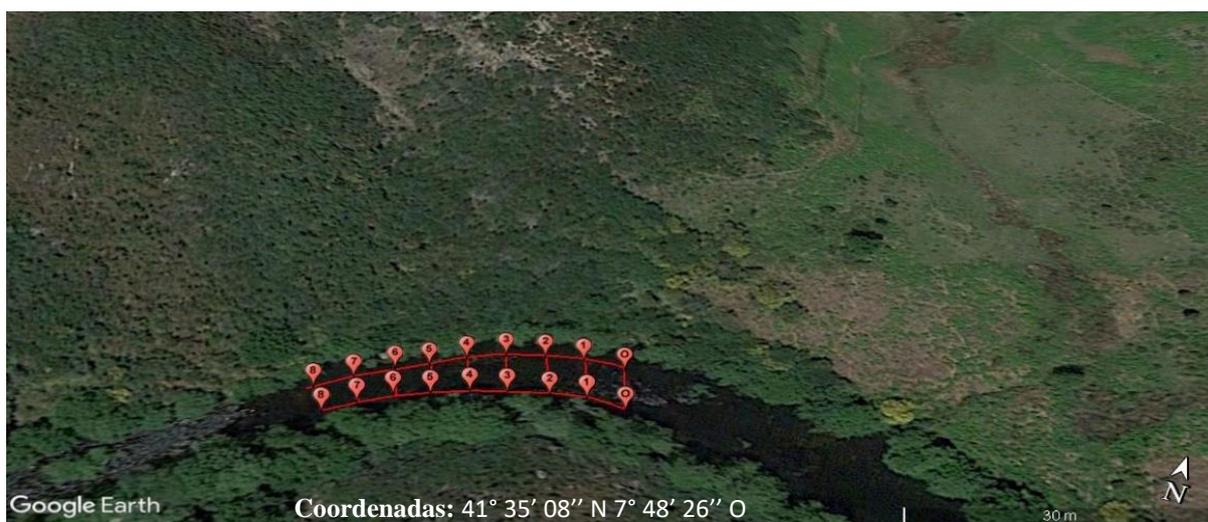


Figura 4.18 - Vista satélite do troço 3, no rio Beça, dividido em 8 secções, distando 5 m entre si. (Google Earth Pro)

4.5 Procedimento experimental

A partir dos vídeos obtidos nas atividades experimentais, foi possível determinar a velocidade de escoamento superficial. As velocidades foram obtidas dentro da área de medição, através da análise das imagens provenientes dos vídeos. O método consistiu na sobreposição de duas imagens, onde a primeira correspondia ao momento de entrada da pluma do traçador na área de medição, e a segunda era referente ao momento de saída da mesma. Ao rastrear a extremidade da pluma do traçador (determinando a sua velocidade) para uma dada distância é possível obter a velocidade superficial de escoamento (Figura 4.19). Deste modo, a velocidade de escoamento superficial (V_{tr}) foi determinada através da seguinte equação:

$$V_{tr} = \frac{L}{t_1 - t_0} \quad (1)$$

onde, V_{tr} é a velocidade de escoamento superficial (m/s), L corresponde à distância percorrida pela pluma do traçador (m), e t_0 e t_1 correspondem, respetivamente, ao tempo de entrada e saída da pluma do traçador sobre a área de medição (s).

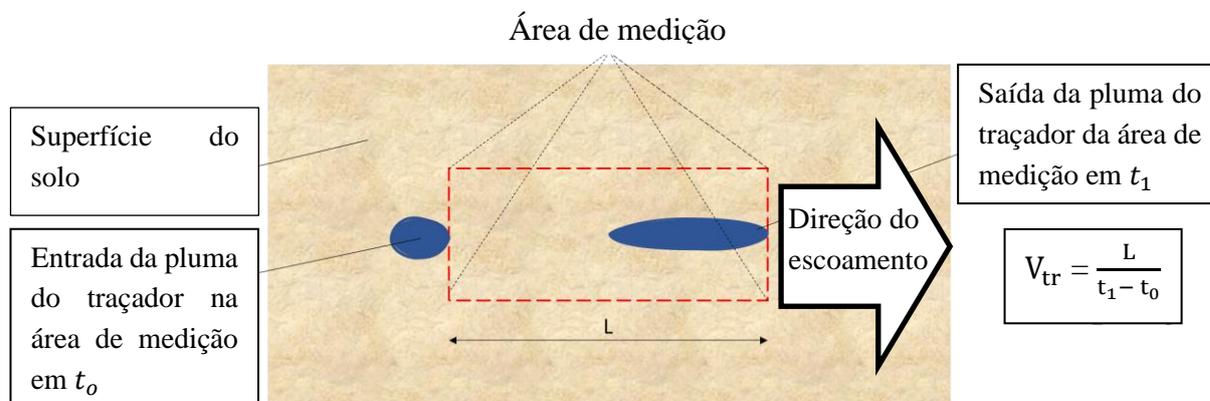


Figura 4.19 - Esboço do método utilizado para estimar a velocidade de escoamento superficial (V_{tr}), através do movimento da extremidade da pluma do traçador, para um determinado intervalo de tempo (Zehsaz *et al.* 2022).

As imagens retiradas dos vídeos foram editadas e analisadas através da ferramenta do *Windows - Microsoft Photos software*. Quanto aos vídeos térmicos provenientes da câmara IV, foi usado o *software FLIR Tools®*, que permite a importação, edição e análise das imagens térmicas obtidas.

5 ESTUDOS DE CASO - APLICAÇÕES

No presente capítulo, serão analisados e discutidos todos os resultados obtidos provenientes das atividades experimentais, descritas no capítulo 4.

5.1 Laboratório – Resultados obtidos e discussão

Foram analisados os vídeos provenientes dos quatro testes realizados em laboratório. As imagens analisadas são o resultado de diferentes densidades de cobertura morta no escoamento superficial, e ilustram as diferenças entre a aplicação de traçadores fluorescentes, coloridos e térmicos (Figura 5.1).

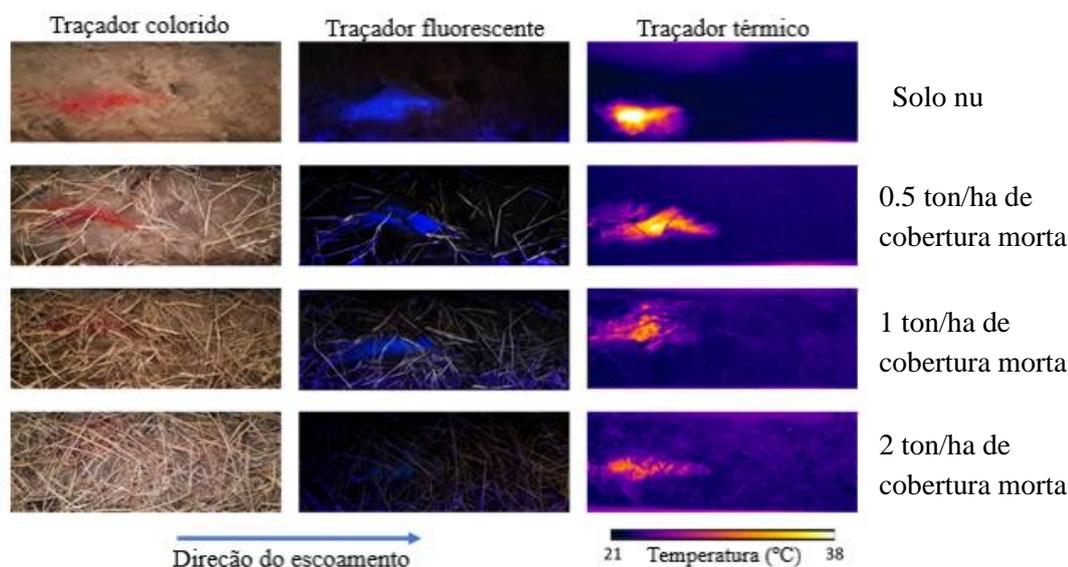


Figura 5.1 - Comparação entre as diferentes imagens do traçador colorido (esquerda), fluorescente (centro) e térmico (direita). Os traçadores foram aplicados sobre o solo nu (primeira linha), cobertura morta de 0.5 ton/ha (segunda linha), cobertura morta de 1 ton/ha (terceira linha) e cobertura morta de 2 ton/ha (quarta linha). A direção do escoamento ocorre da esquerda para a direita. A dimensão longitudinal de cada imagem é de 0.55 m (Zehsaz *et al.* 2022).

Constatou-se que todos os traçadores são visíveis para os escoamentos superficiais em solo nu e para os escoamentos debaixo de cobertura morta com uma densidade de 0.5 ton/ha, durante o seu movimento descendente sob a área de medição. Contudo, para as restantes densidades de cobertura morta (1 e 2 ton/ha), apenas o traçador térmico apresentou resultados satisfatórios. Na Figura 5.2 é apresentada uma sequência cronológica de imagens da área de medição, onde são ilustradas as três densidades aplicadas em laboratório, bem como o movimento dos traçadores ao longo do tempo (com um intervalo de tempo de 1 segundo entre cada imagem).

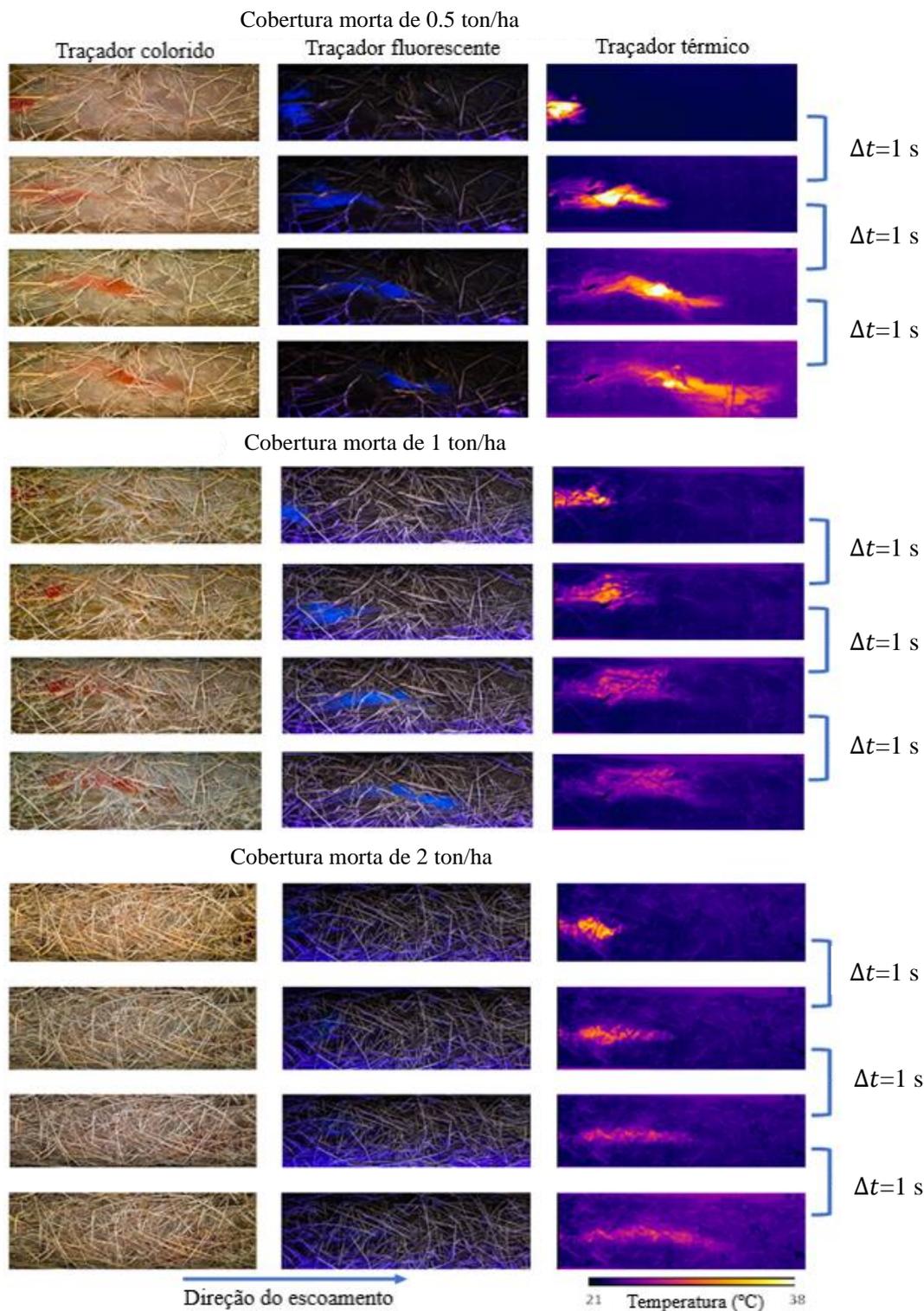


Figura 5.2 - Sequências cronológicas de imagem para várias densidades de cobertura morta, com um intervalo de tempo de 1 segundo, onde é aplicado: traçador colorido (esquerda), traçador fluorescente (meio) e traçador térmico (direita). A dimensão longitudinal de cada imagem é 0.55 m (Zehsaz *et al.* 2022).

Na Figura 5.2 é possível perceber que o comportamento do traçador térmico depende das densidades de cobertura morta utilizadas. Para uma densidade superior a 1 ton/ha, o traçador colorido e o fluorescente não apresentaram resultados satisfatórios; no entanto, a extremidade da pluma do traçador fluorescente tem um movimento mais bem definido, comparativamente ao traçador colorido, além de não deixar marcas ou resíduos ao longo da área de medição.

Através dos procedimentos descritos acima e aplicando a equação (1), obtiveram-se os resultados apresentados no Quadro 5.1 e na Figura 5.3, onde são sumarizados os valores obtidos das velocidades de escoamento superficial (V_{tr}). São também contabilizados e representados os valores da média e do desvio padrão para as três repetições.

Quadro 5.1 – Velocidades de escoamento superficial (V_{tr}) obtidas em laboratório, aplicando traçadores coloridos, fluorescentes e térmicos, testados em: solo nu, cobertura morta de 0.5 ton/ha, 1 ton/ha e 2 ton/ha. No quadro, o hífen significa que não foi possível determinar a velocidade.

Superfície	Nº de repetições	Vel. de escoamento superficial - V_{tr} (m/s)		
		Colorido	Fluorescente	Térmico
Solo nu	1	0.330	0.288	0.370
	2	0.311	0.294	0.378
	3	0.348	0.292	-
	Média de vel.	0.330	0.291	0.374
	Desvio padrão	0.015	0.002	0.003
0.5 ton/ha	1	0.189	0.215	0.283
	2	0.195	0.230	0.226
	3	0.174	0.131	0.207
	Média de vel.	0.186	0.192	0.239
	Desvio padrão	0.009	0.044	0.032
1 ton/ha	1	0.127	0.177	0.158
	2	0.183	0.201	0.166
	3	0.170	0.185	0.123
	Média de vel.	0.160	0.188	0.149
	Desvio padrão	0.024	0.010	0.019
2 ton/ha	1	-	-	0.115
	2	-	-	0.113
	3	-	-	0.115
	Média de vel.	-	-	0.114
	Desvio padrão	-	-	0.001

Para um caudal conhecido, e aplicando o mesmo volume de traçador, verificou-se que as velocidades de escoamento superficial (V_{tr}) apresentaram resultados semelhantes para os três traçadores aplicados. Conclui-se que as velocidades vão diminuindo à medida que aumenta a densidade da cobertura morta (desde o solo nu até à densidade de 2 ton/ha). Sendo a profundidade de escoamento baixa, o aumento da rugosidade através do aumento da densidade da cobertura morta provocou uma diminuição da velocidade de escoamento, devido às múltiplas barreiras através do seu micro relevo complexo. Não foi possível visualizar o traçador colorido e o fluorescente para densidades de 2 ton/ha, pelo que para estes casos os valores de velocidade não foram definidos (n.d.).

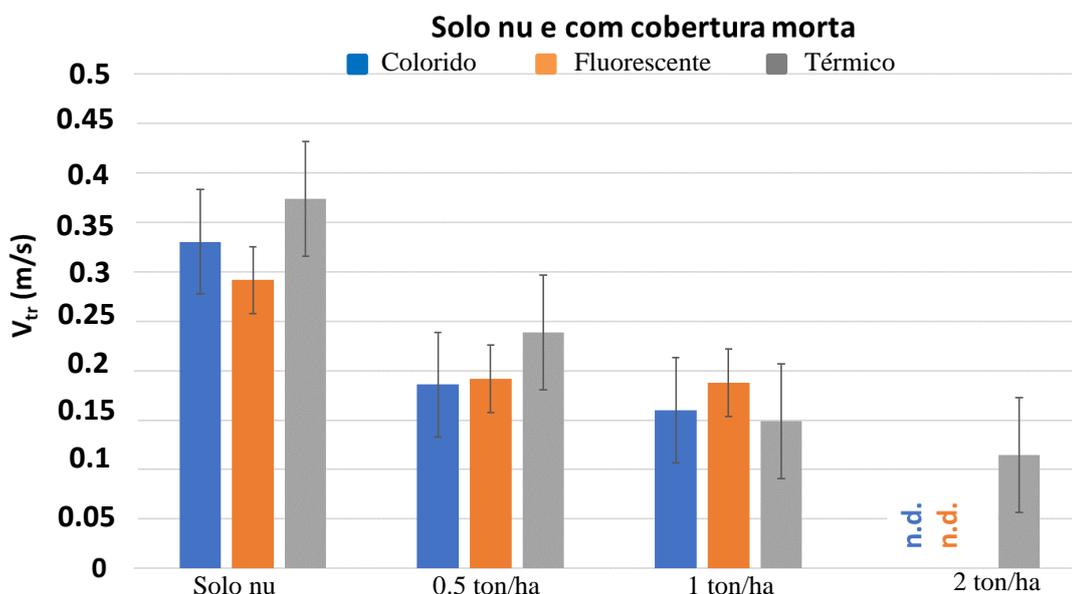


Figura 5.3 - Comparação das velocidades de escoamento superficial medidas para os três traçadores, em solo nu e para densidades de cobertura morta de 0.5, 1 e 2 ton/ha, obtidas em laboratório (Zehsaz *et al.* 2022).

A percentagem de área ocupada por cada traçador (*e.g.*, área visível) na área de medição foi registada ao longo do tempo na Figura 5.4. O instante t_0 representa o momento em que a extremidade da pluma do traçador entra na área de medição, enquanto que o instante t_4 representa o momento de saída da pluma do traçador da área de medição. Durante esse intervalo de tempo os traçadores aplicados difundem-se ao longo da área de medição (*e.g.*, área visível).

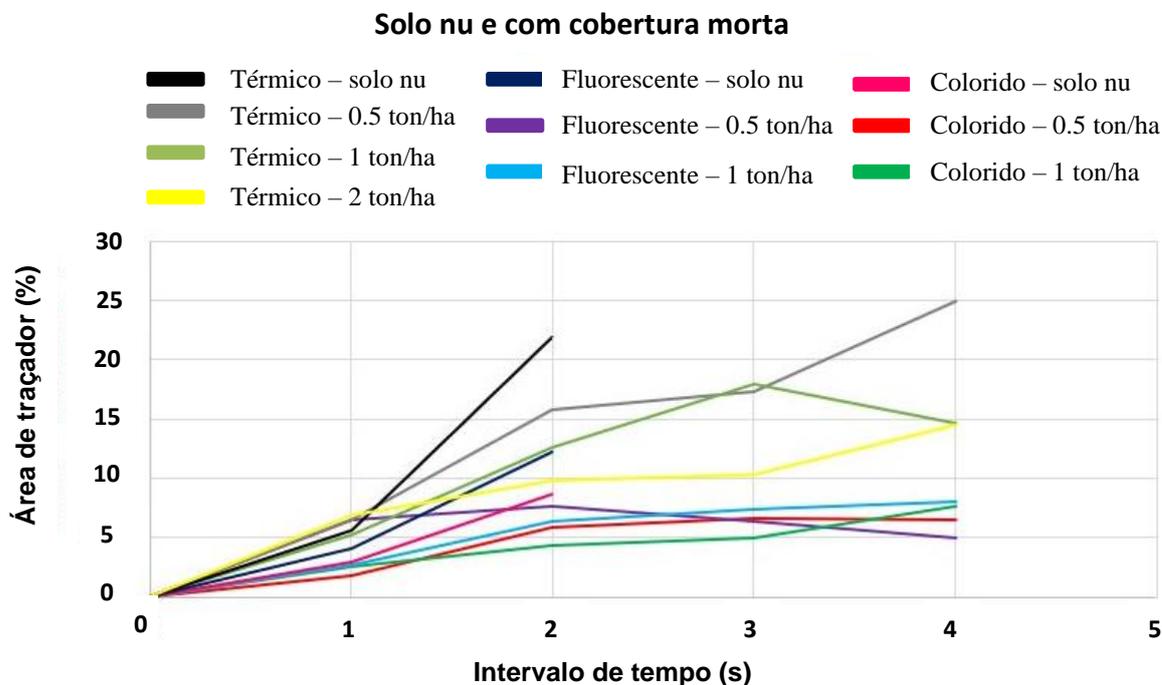


Figura 5.4 - Percentagem de área ocupada por cada traçador (colorido, fluorescente e térmico) ao longo da área de medição, para $\Delta t = 1$ s (Zehsaz *et al.* 2022).

Analisando a Figura 5.4 constatou-se que os traçadores aplicados em solo nu difundem-se mais rapidamente, ocupando uma maior percentagem da área de medição, num menor intervalo de tempo, quando comparado com o comportamento dos mesmos traçadores em superfícies com diferentes densidades de cobertura morta. Durante o intervalo de tempo ($t_4 - t_0$), constatou-se que o traçador fluorescente e o colorido apresentaram resultados semelhantes no que diz respeito ao avanço da pluma do traçador sobre a área de medição. Por outro lado, o traçador térmico ocupou uma maior percentagem da área de medição, quando comparado com a área ocupada pelos traçadores colorido e fluorescente, para o mesmo intervalo de tempo. Isto deve-se ao processo de convecção térmica, que ocorre durante o movimento do traçador térmico ao longo da área de medição, por transferência de calor para o fluido e para a superfície do solo.

5.2 Meio urbano – Resultados obtidos e discussão

Para a superfície pavimentada, foram analisados vídeos provenientes de ensaios realizados durante o dia, anoitecer e noite. Durante o dia utilizou-se uma tenda para possibilitar a deteção

do traçador fluorescente, e a partir do anoitecer utilizou-se uma lâmpada para a deteção do traçador colorido. Para comparar a qualidade de rastreamento e luminosidade dos traçadores, foram analisadas as imagens provenientes dos vídeos para as diferentes fases do dia (Figura 5.5).

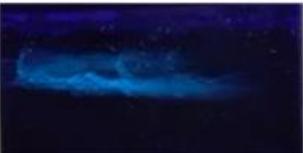
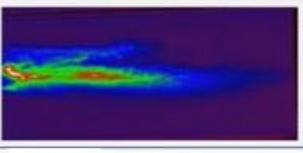
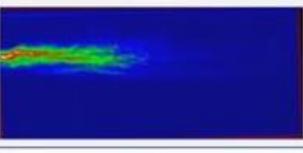
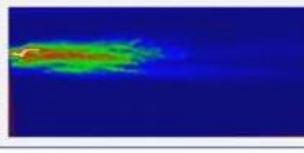
Traçador		 	 		
Colorido					
Fluorescente	 				
Térmico					
Legenda:	 Dia	 Anoitecer	 Noite	 Com lâmpada	 Sem lâmpada
	 Com tenda	 Sem tenda	 Direção do escoamento		

Figura 5.5 - Comparação entre as diferentes imagens na área de medição, obtidas em superfícies pavimentadas, onde é aplicado: traçador colorido (topo), traçador fluorescente (meio) e traçador térmico (abaixo). A direção do escoamento ocorre da esquerda para a direita. A dimensão longitudinal de cada imagem é 0.6 m (Zehsaz *et al.* 2022).

Depois de analisadas as imagens, constatou-se que todos os traçadores são visíveis nas diferentes fases do dia. Tal como sucedeu nas imagens obtidas em laboratório, o traçador térmico apresentou os resultados mais favoráveis em termos de visibilidade do avanço da frente, pois não apresentou limitações quanto à fase do dia em que foi aplicado. Por outro lado, é possível afirmar que o traçador fluorescente, durante o dia, apenas foi observado com recurso a uma tenda. Durante o dia o traçador colorido não apresentou limitações, contudo, a partir do anoitecer este apenas foi visível recorrendo a uma fonte luminosa.

No Quadro 5.2 são sumarizados os valores das velocidades de escoamento superficial (V_{tr}) obtidos, bem como os valores da média e do desvio padrão para as três repetições efetuadas.

Quadro 5.2 - Velocidades de escoamento superficial (V_{tr}) obtidas para uma superfície pavimentada, onde foram aplicados traçadores coloridos, fluorescentes e térmicos. As experiências decorreram durante o dia, anoitecer e noite.

Período de tempo	Nº de repetições	Vel. de escoamento superficial - V_{tr} (m/s)		
		Colorido	Fluorescente	Térmico
Dia (1 hora antes do pôr-do-sol)	1	0.450	0.450	0.346
	2	0.447	0.460	0.360
	3	0.450	0.400	-
	Média de vel.	0.449	0.437	0.353
	Desvio padrão	0.002	0.026	0.007
Anoitecer (durante a meia hora após o pôr-do-sol)	1	0.367	0.446	0.390
	2	0.398	0.451	0.414
	3	0.394	0.465	
	Média de vel.	0.386	0.454	0.402
	Desvio padrão	0.014	0.008	0.012
Noite (1 hora após o pôr-do-sol)	1	0.409	0.359	0.330
	2	0.433	0.401	0.330
	3	0.432	0.410	0.380
	Média de vel.	0.425	0.390	0.347
	Desvio padrão	0.011	0.022	0.024

A partir do Quadro 5.2, constatou-se que para um caudal conhecido, e aplicando o mesmo volume de traçador, verificou-se que as velocidades de escoamento superficial (V_{tr}) apresentaram resultados semelhantes para os três traçadores aplicados nas três fases do dia.

Os valores das velocidades obtidos para os três traçadores e expostos no Quadro 5.2, após serem analisados, foram traçados graficamente (Figura 5.6), onde se compararam quantitativamente as velocidades de escoamento superficial (V_{tr}), estimadas pelo traçador fluorescente, térmico e colorido, para as três fases do dia.

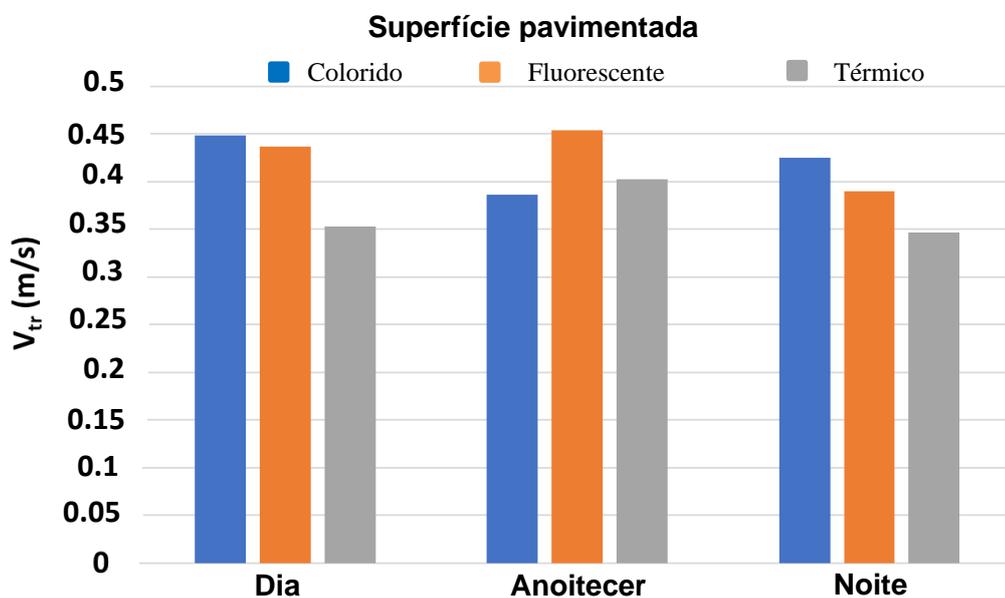


Figura 5.6 - Comparação das velocidades de escoamento superficial medidas para os três traçadores, aplicados numa superfície pavimentada, durante o dia, anoitecer e noite (Zehsaz *et al.* 2022).

De acordo com a Figura 5.6, as velocidades de escoamento superficial obtidas a partir do traçador colorido e fluorescente foram superiores às obtidas através do traçador térmico durante o dia e noite.

Na Figura 5.7 apresenta-se graficamente a percentagem de área ocupada por cada traçador (mancha visível) na área de medição ao longo do tempo, onde t_0 corresponde ao momento de entrada da pluma do traçador na área de medição e t_4 o momento de saída da pluma da área de medição.

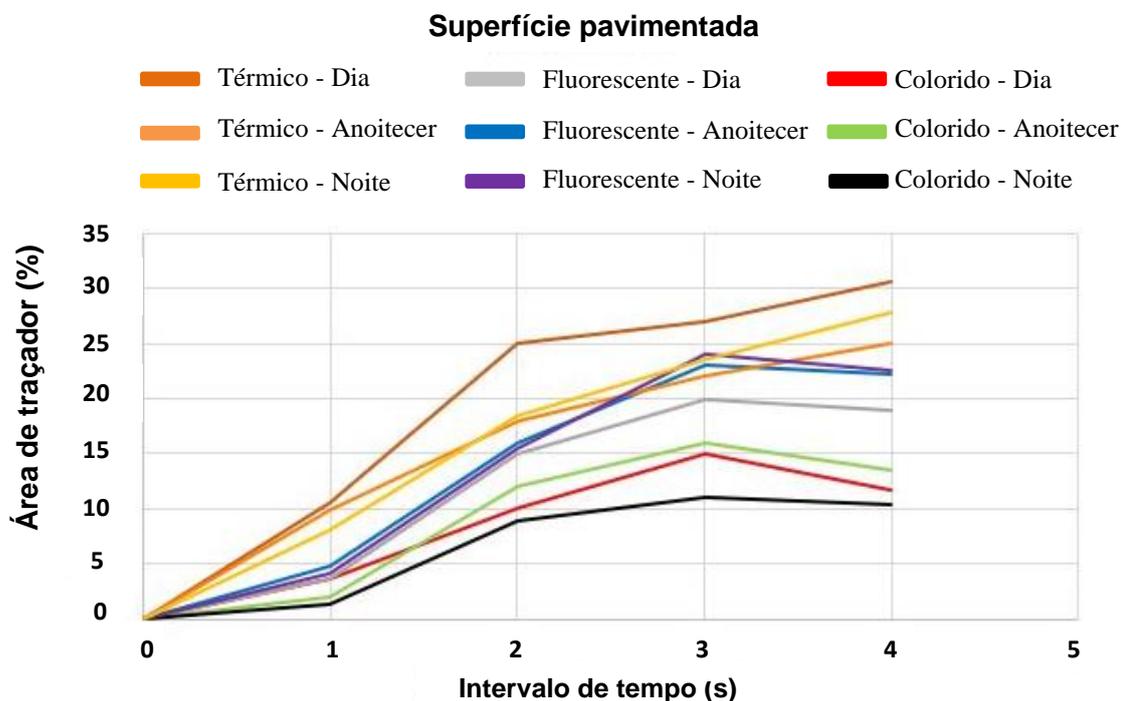


Figura 5.7 - Percentagem de área ocupada por cada traçador (colorido, fluorescente e térmico) ao longo da área de medição, para $\Delta t = 1$ s (Zehsaz *et al.* 2022).

De acordo com a Figura 5.7 constatou-se que o traçador colorido ocupa uma menor percentagem da área de medição, para as três fases do dia, quando comparado com a percentagem de ocupação dos traçadores fluorescente e térmico. Durante a aplicação dos três traçadores, o volume utilizado foi o mesmo. Assim, podemos verificar que o traçador colorido é aquele que apresenta uma menor capacidade de difusão. Por outro lado, o traçador térmico ocupou uma maior percentagem da área de medição, devido ao processo de convecção térmica que ocorre para o fluido e para a superfície pavimentada.

5.3 Meio rural – Resultados obtidos e discussão

Para a superfície com vegetação, tal como sucedeu na superfície pavimentada, foram captados vídeos provenientes de ensaios realizados durante as diferentes fases do dia (dia, anoitecer e noite). De modo a ser possível comparar o comportamento dos traçadores, analisaram-se imagens, que permitiram ilustrar diferenças na aplicabilidade dos traçadores, para as diferentes alturas de vegetação utilizadas e a fase do dia em questão (Figura 5.8).

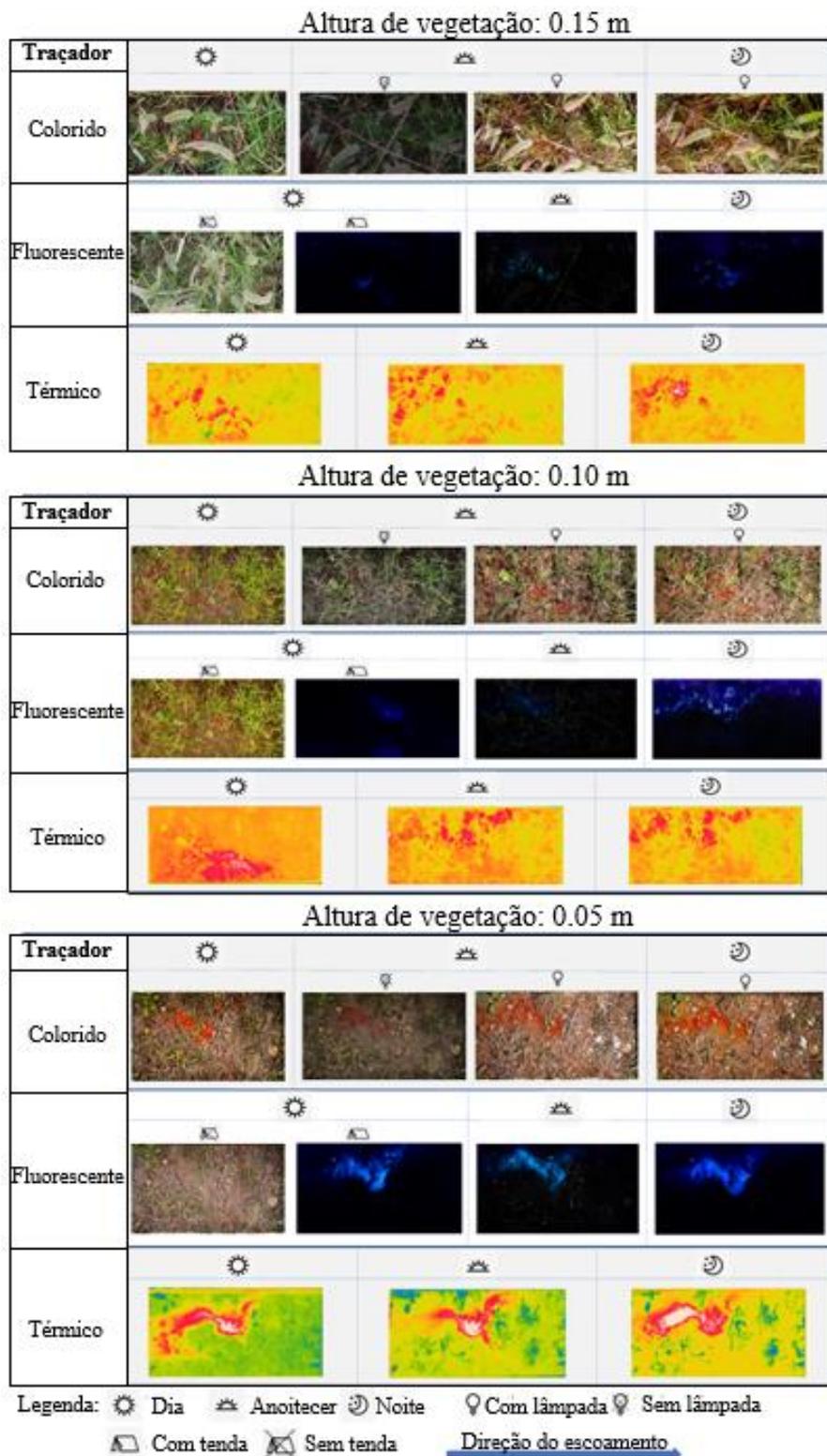


Figura 5.8 - Comparação entre as diferentes imagens na área de medição, obtidas em superfícies com diferentes alturas de vegetação, onde é aplicado: traçador colorido (topo), traçador fluorescente (meio) e traçador térmico (abaixo). A dimensão longitudinal de cada imagem é 0.6 m (Zehsaz *et al.* 2022).

Analisando as imagens na Figura 5.8, constatou-se que apenas o traçador térmico apresentou resultados satisfatórios para superfícies com alturas de vegetação de 0.15 e 0.10 m. Contudo, para alturas de vegetação de 0.05 m todos os traçadores são visíveis (Zehsaz *et al.* 2022).

No Quadro 5.3 são sumarizados os valores obtidos das velocidades de escoamento superficial (V_{tr}), bem como os valores da média e do desvio padrão para as três repetições efetuadas.

Quadro 5.3 – Velocidades de escoamento superficial (V_{tr}) obtidas para uma superfície com uma altura de vegetação de 0.05 m, aplicando traçadores coloridos, fluorescentes e térmicos. As experiências decorreram durante o dia, anoitecer e noite.

Período de tempo	Nº de repetições	Vel. de escoamento superficial - V_{tr} (m/s)		
		Colorido	Fluorescente	Térmico
Dia (1 hora antes do pôr-do-sol)	1	0.171	0.213	0.173
	2	0.180	0.220	0.168
	3	0.180	0.218	0.200
	Média de vel.	0.177	0.217	0.180
	Desvio padrão	0.004	0.003	0.014
Anoitecer (durante a meia hora após o pôr-do-sol)	1	0.192	0.199	0.162
	2	0.194	0.196	0.169
	3	0.198	0.196	0.183
	Média de vel.	0.195	0.197	0.171
	Desvio padrão	0.002	0.001	0.009
Noite (1 hora após o pôr-do-sol)	1	0.207	0.197	0.167
	2	0.200	0.197	0.174
	3	0.208	0.204	0.166
	Média de vel.	0.205	0.200	0.169
	Desvio padrão	0.004	0.003	0.003

Os dados exibidos no Quadro 5.3 fazem respeito às velocidades de escoamento superficial (V_{tr}), e foram obtidos para um caudal conhecido, através da aplicação do mesmo volume de traçador.

Foi possível verificar que as velocidades obtidas para os três traçadores aplicados, nas três fases do dia apresentaram resultados semelhantes. A análise das velocidades obtidas permitiu representar graficamente as velocidades de escoamento superficial (V_{tr}), estimadas pelos traçadores nas diferentes fases do dia (Figura 5.9).

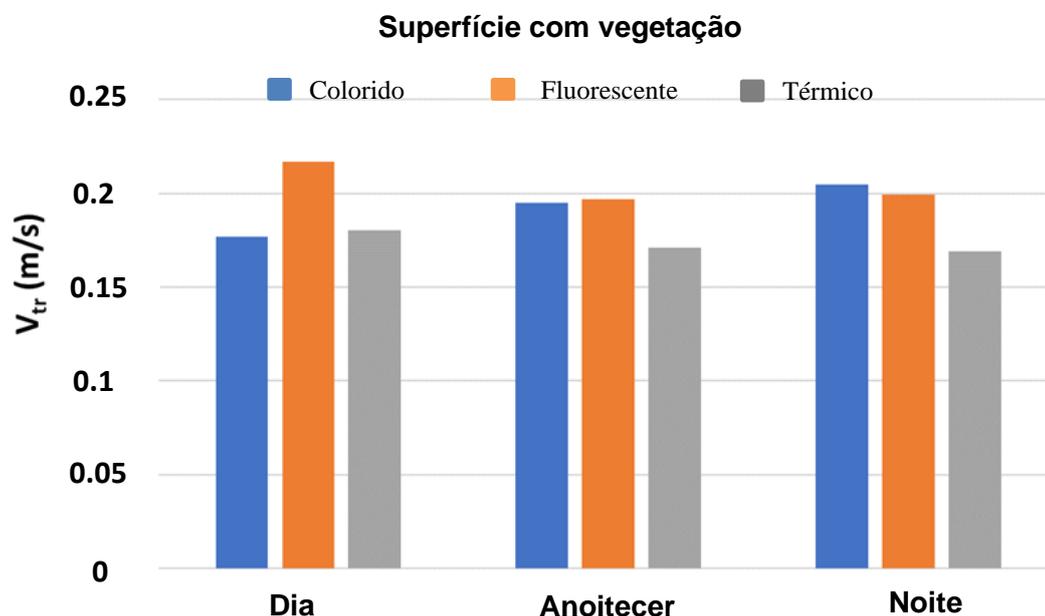


Figura 5.9 - Comparação das velocidades de escoamento superficial medidas para os três traçadores numa superfície com uma altura de vegetação de 0.05 m. As velocidades foram comparadas em três fases do dia (dia, anoitecer e noite) (Zehsaz *et al.* 2022).

Através da Figura 5.9 verificamos que durante o dia e o anoitecer, o traçador fluorescente obteve valores de velocidade de escoamento superficial superiores, quando comparado com as outras duas técnicas. Por outro lado, o traçador térmico obteve os menores valores de velocidade durante o anoitecer e a noite.

A Figura 5.10 expõe graficamente a percentagem de área ocupada por cada traçador na área de medição ao longo do tempo. O instante t_0 representa o momento de entrada do traçador na área de medição e t_4 o momento de saída do traçador da área de medição.

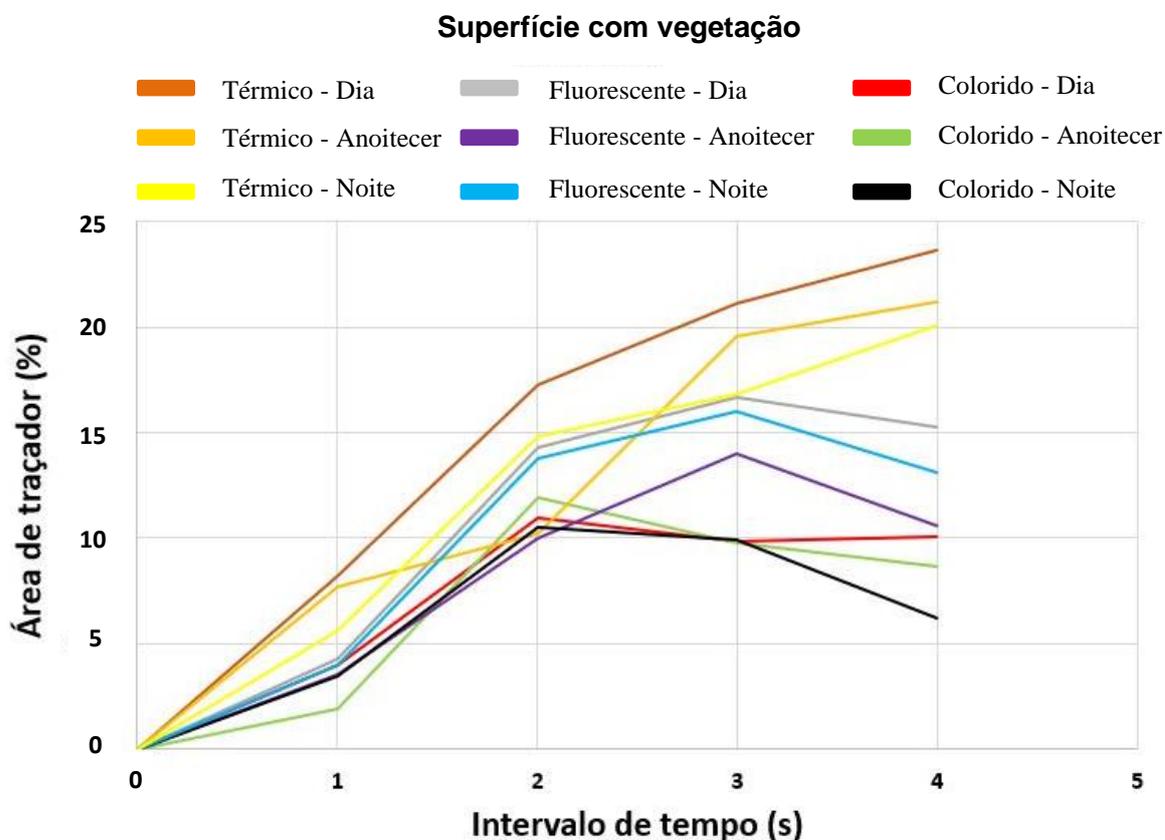


Figura 5.10 - Percentagem de área ocupada por cada traçador (colorido, fluorescente e térmico) ao longo da área de medição para uma altura de vegetação de 0.05 m, para $\Delta t = 1$ s (Zehsaz *et al.* 2022).

Analisando a Figura 5.10 constatou-se que o traçador térmico ocupa uma maior percentagem da área de medição para as três fases do dia. Tal como referido anteriormente, a partir do momento em que este traçador térmico entra na área de medição (t_0), irá ocorrer convecção térmica para o fluido e para a superfície do solo. Para além disso, como este traçador é um fluido, também está presente o processo de difusão. Nos restantes traçadores apenas ocorre difusão e, portanto, a expansão destes traçadores ao longo da área de medição é menor.

5.4 Rios – Resultados obtidos e discussão

Ao contrário dos outros meios (laboratorial, urbano e rural), cujo estudo teve por objetivo comparar a aplicabilidade dos diferentes traçadores, neste caso pretendeu-se obter campos de velocidades dos três troços (1, 2 e 3). Posto isto, apesar da metodologia de obtenção dos valores de velocidade ser semelhante, os dados obtidos foram tratados de forma diferente. De forma a ser possível criar campos de velocidade bem definidos em todos os troços, foi importante calcular um número significativo de vetores de velocidade. Para que tal acontecesse, cada

secção (5 m) foi dividida em dois segmentos de igual comprimento (2.5 m) e foram calculados vetores de velocidade para cada um desses segmentos (Figura 5.11). Portanto, o comprimento (L) percorrido pelo traçador é sempre o mesmo (2.5 m), que corresponde ao comprimento de metade de uma secção (5 m). Os vetores de velocidade foram determinados a partir da equação (1), exposta no subcapítulo 4.5. A velocidade obtida a partir do traçador flutuante corresponde à velocidade de escoamento superficial.



Figura 5.11 - Metodologia de determinação da velocidade de escoamento superficial através da análise de imagens, com um comprimento conhecido ($L = 2.5\text{m}$) para um determinado intervalo de tempo. Nas imagens (a e b) é determinado o vetor velocidade (V_1) e nas imagens (c e d) é determinado V_2 . A direção do escoamento ocorre da direita para a esquerda.

Aplicando a metodologia indicada na Figura 5.11, é possível gerar um conjunto de vetores correspondentes à velocidade de escoamento superficial para cada secção.

A velocidade da água em movimento varia ao longo do rio, desde a sua superfície até ao fundo do troço. Este efeito ocorre devido ao atrito e a irregularidades na secção transversal, que provocam um abrandamento da velocidade da água junto às margens e próximo ao fundo do troço. Por conseguinte, a água que apresenta maior velocidade é aquela que geralmente se encontra junto à superfície e próxima do centro. Assim sendo, a velocidade média de

escoamento num troço do rio corresponde a 80-95% da velocidade de escoamento superficial, sendo 85% a média de várias centenas de observações (Meals e Dressing, 2008).

Posto isto, aplicou-se um fator de correção ($\alpha = 85\%$) a cada um dos vetores de velocidade gerados (V_{tr}), dando origem à velocidade média de escoamento (U), tal como descreve a equação abaixo:

$$U = \alpha \times V_{tr} \quad (2)$$

No Quadro 5.4, 5.5 e 5.6 estão sumarizados todos os valores correspondentes aos vetores de velocidade obtidos para cada troço, depois de aplicado o fator de correção.

Quadro 5.4 – Velocidades médias de escoamento obtidas através da aplicação de traçadores flutuantes no troço 1, no rio Beça.

TROÇO 1 (margem esquerda)							TROÇO 1 (margem direita)								
SECÇÃO	DISTÂNCIA (m)	Velocidade (m/s)						SECÇÃO	DISTÂNCIA (m)	Velocidade (m/s)					
0_1	0_5	V1	V2	V3	V4	V5	V6	0_1	0_5	V53	V54	V55	V56	V57	V58
		0.52	0.53	0.54	0.53	0.53	0.43			0.20	0.32	0.34	0.34	0.72	0.59
1_2	5_10	V7	V8	V9	V10	V11	V12	1_2	5_10	V59	V60	V61	V62		
		0.35	0.43	0.71	0.43	0.35	0.43			0.45	0.37	0.46	0.46		
2_3	10_15	V13	V14	V15	V16	V17	V18	2_3	10_15	V63	V64	V65	V66	V67	V68
		0.27	0.35	0.19	0.30	0.35	0.43			0.16	0.17	0.40	0.34	0.81	0.42
3_4	15_20	V19	V20	V21	V22	V23	V24	3_4	15_20	V69	V70	V71	V72	V73	V74
		0.30	0.53	0.30	0.27	0.53	0.53			0.40	0.40	0.35	0.34	0.72	0.40
4_5	20_25	V25	V26	V27	V28	V29	V30	4_5	20_25	V75	V76	V77	V78	V79	V80
		0.35	0.27	0.53	0.53	0.71	0.53			0.40	0.40	0.34	0.34	0.39	0.40
5_6	25_30	V31	V32	V33	V34	V35	V36	5_6	25_30	V81	V82	V83	V84	V85	V86
		0.35	0.43	0.36	0.38	0.33	0.41			0.47	0.24	0.34	0.29	0.63	0.35
6_7	30_35	V37	V38	V39	V40			6_7	30_35	V87	V88	V89	V90	V91	V92
		0.23	0.29	0.31	0.66					0.27	0.35	0.28	0.47	0.35	0.21
7_8	35_40	V41	V42	V43	V44	V45	V46	7_8	35_40	V93	V94	V95	V96	V97	V98
		0.19	0.19	0.35	0.36	0.36	0.26			0.71	0.61	0.70	0.82	0.53	0.63
8_9	40_45	V47	V48	V49	V50	V51	V52	8_9	40_45	V99	V100				
		0.23	0.16	0.37	0.19	0.63	0.47			0.82	0.53				

Quadro 5.5 - Velocidades médias de escoamento obtidas através da aplicação de traçadores flutuantes no troço 2, no rio Beça.

TROÇO 2									
SECÇÃO	DISTÂNCIA (m)	Velocidade (m/s)							
0_1	0_5	V1	V2	V3	V4	V5	V6		
		0.76	1.11	0.75	0.75	0.94	1.13		
1_2	5_10	V7	V8	V9	V10	V11	V12		
		1.11	1.01	1.08	1.76	0.75	1.15		
2_3	10_15	V13	V14	V15					
		0.91	1.60	1.23					
3_4	15_20	V16	V17	V18	V19	V20	V21	V22	V23
		1.28	1.12	0.90	0.47	1.77	1.49	1.10	1.82
4_5	20_25	V24	V25	V26	V27	V28			
		0.91	1.03	0.60	1.14	1.12			
5_6	25_30	V29	V30	V31	V32	V33	V34		
		0.84	0.86	0.70	0.83	1.60	1.14		

Quadro 5.6 - Velocidades médias de escoamento obtidas através da aplicação de traçadores flutuantes no troço 3, no rio Beça.

TROÇO 3									
SECÇÃO	DISTÂNCIA (m)	Velocidade (m/s)							
0_1	0_5	V1	V2	V3	V4				
		0.30	0.35	0.75	0.73				
1_2	5_10	V5	V6	V7	V8	V9	V10	V11	V12
		0.30	0.27	0.38	0.29	0.54	0.53	0.57	0.58
2_3	10_15	V13	V14	V15	V16	V17	V18		
		0.42	0.35	0.37	0.34	0.33	0.38		
3_4	15_20	V19	V20	V21	V22	V23	V24		
		0.44	0.33	0.34	0.42	0.36	0.36		
4_5	20_25	V25	V26	V27	V28	V29	V30		
		0.44	0.47	0.58	0.53	0.56	0.63		
5_6	25_30	V31	V32	V33	V34	V35			
		0.34	0.38	0.47	0.49	0.30			
6_7	30_35	V36	V37	V38	V39	V40	V41		
		0.41	0.44	0.62	0.48	0.52	0.54		
7_8	35_40	V42	V43	V44	V45	V46			
		0.31	0.37	0.23	0.26	0.35			

Depois de obtidos os quadros referentes aos valores dos vetores de velocidade para cada troço, foram desenvolvidos os campos de velocidades médias de escoamento. Para isso, foi usado o *software* – *OriginPro* que permitiu a introdução dos vetores gerados, criando assim campos de velocidades para cada troço.

As margens do rio, bem como todos os obstáculos e vegetação presentes foram contabilizados para a criação dos campos de velocidades, o que permitiu representar com maior rigor a área de estudo. Essa análise foi desenvolvida por mim e para tal, recorri ao *software* - *Google Earth Pro* que, com recurso a imagens satélite, foi possível realizar um rastreio de toda a área do troço bem como da sua envolvente, através das suas coordenadas (latitude e longitude). Os mexilhões foram localizados e rastreados em cada troço através do Professor Joaquim Reis, Maria G. Gil e de outros elementos no âmbito do projeto MUSSELFLOW. Deste modo a sua localização também foi contabilizada nos campos de velocidade. Os campos estão expostos abaixo desde a Figura 5.12 até à 5.17.

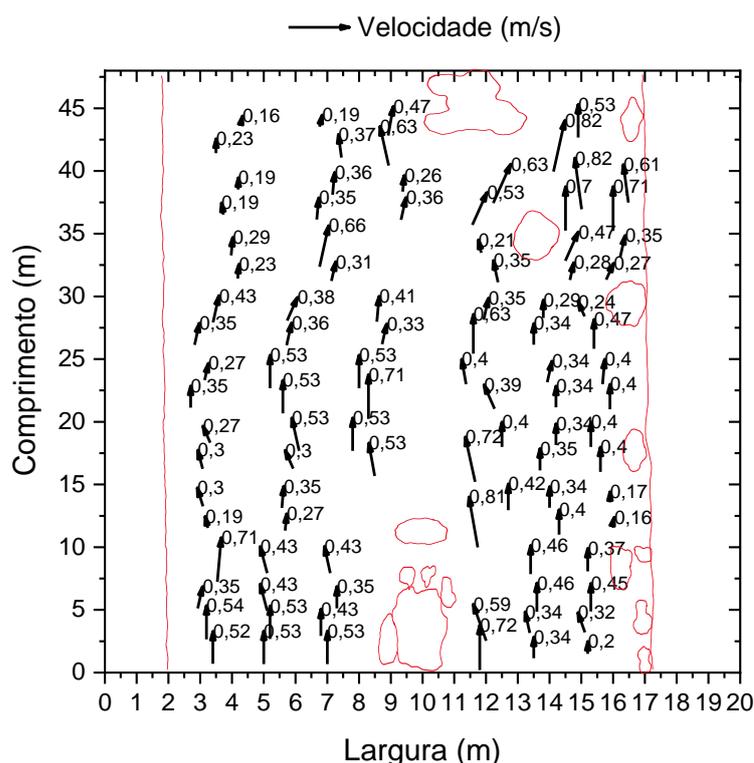


Figura 5.12 - Campo de velocidades correspondente às velocidades médias de escoamento do troço 1, obtidas em profundidade. Os vetores de velocidade apontam para a direção do escoamento.

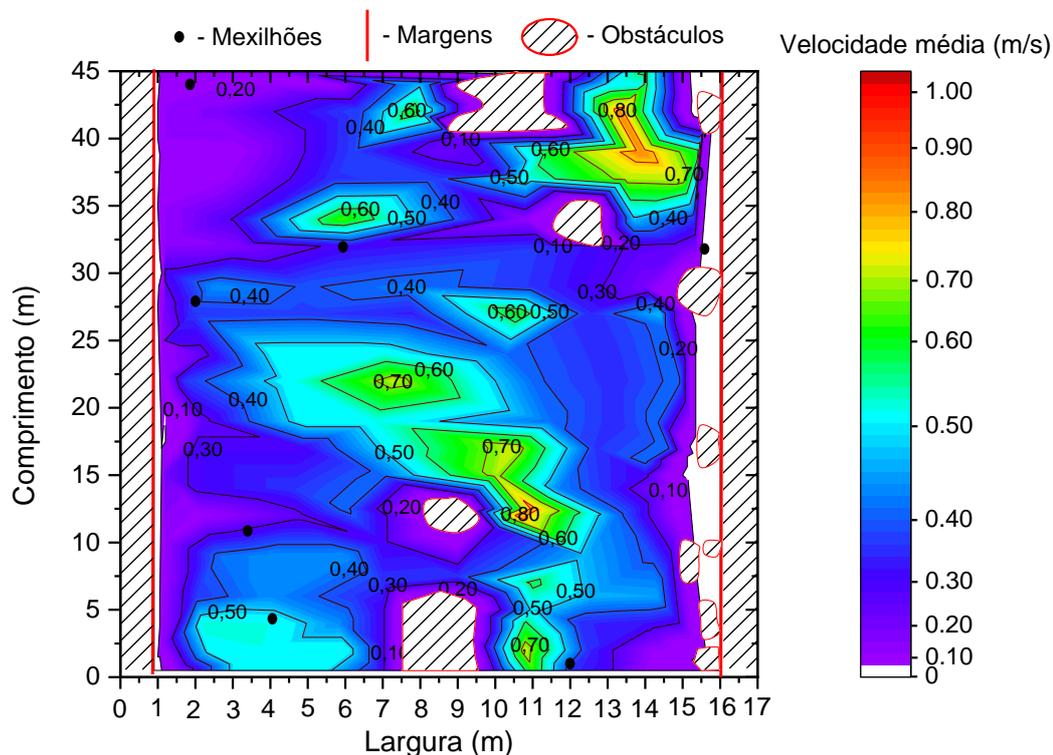


Figura 5.13 - Mapa 2D colorido de velocidades do trecho 1, referente às velocidades médias de escoamento obtidas em profundidade.

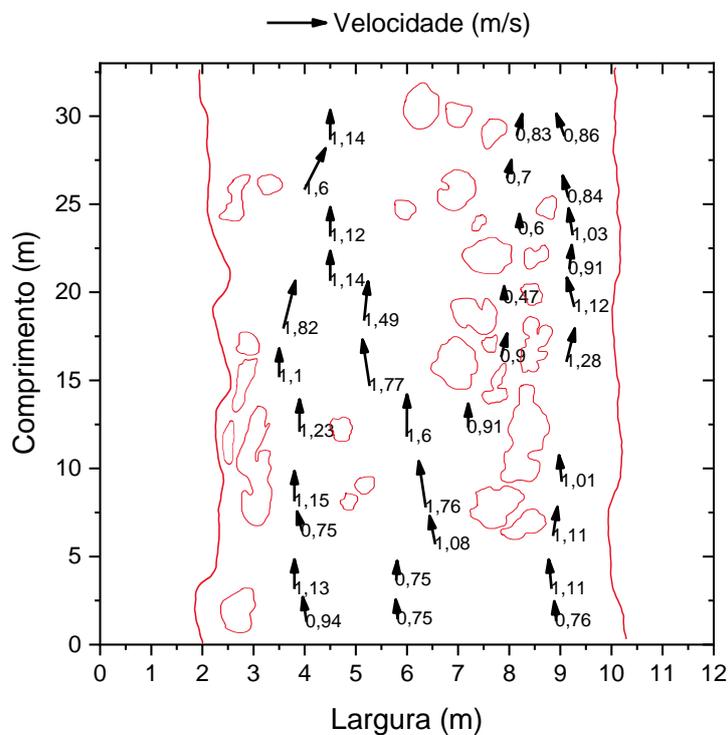


Figura 5.14 - Campo de velocidades correspondente às velocidades médias de escoamento do trecho 2, obtidas em profundidade. Os vetores de velocidade apontam para a direção do escoamento.

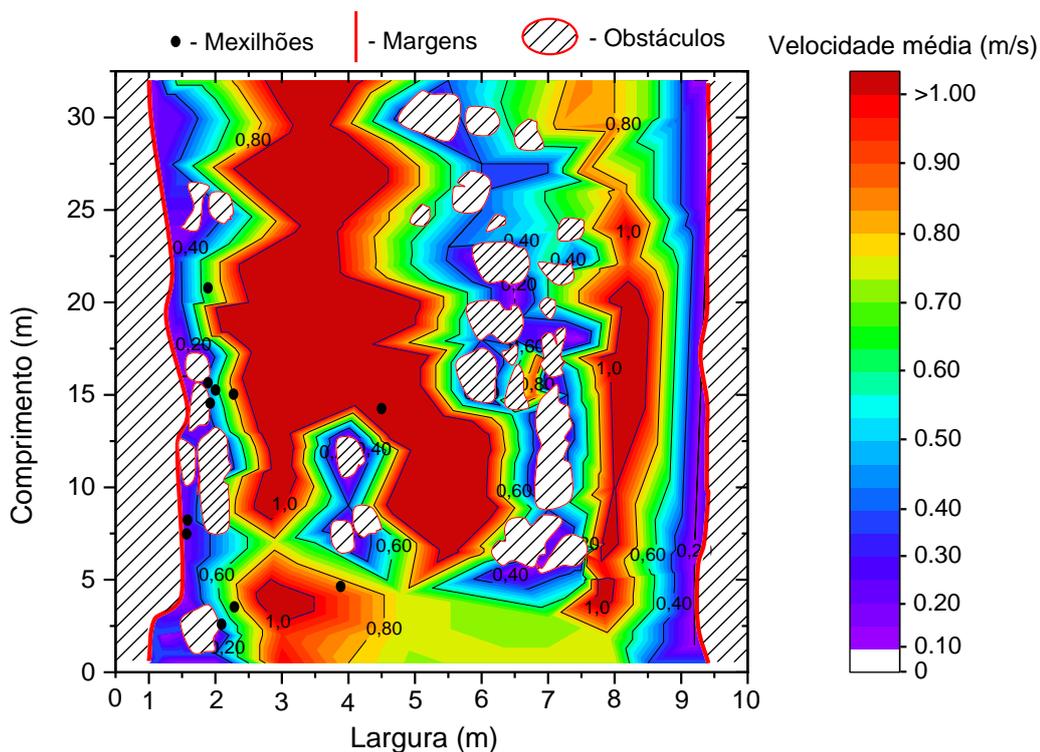


Figura 5.15 - Mapa 2D colorido de velocidades do trecho 2, referente às velocidades médias de escoamento obtidas em profundidade.

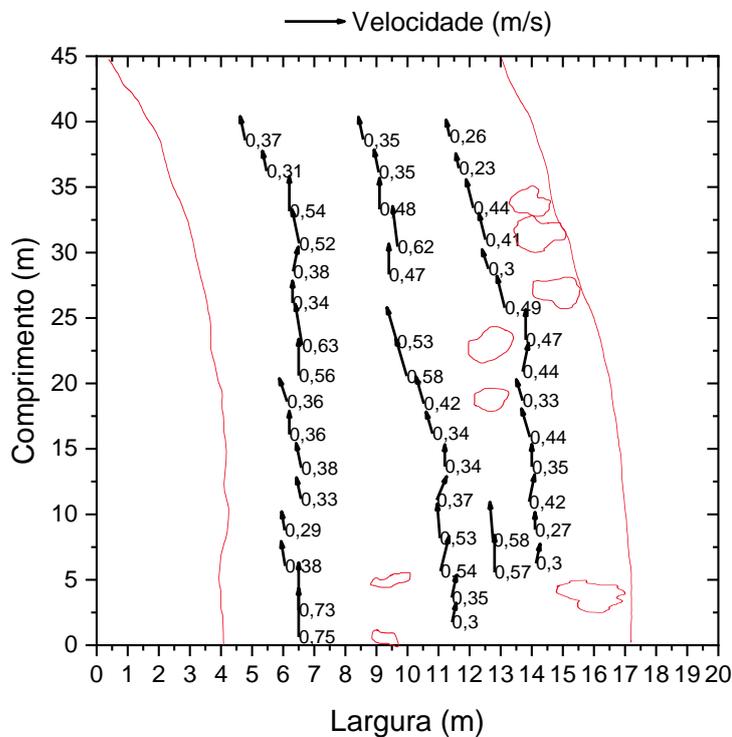


Figura 5.16 - Campo de velocidades correspondente às velocidades médias de escoamento do trecho 3, obtidas em profundidade. Os vetores de velocidade apontam para a direção do escoamento.

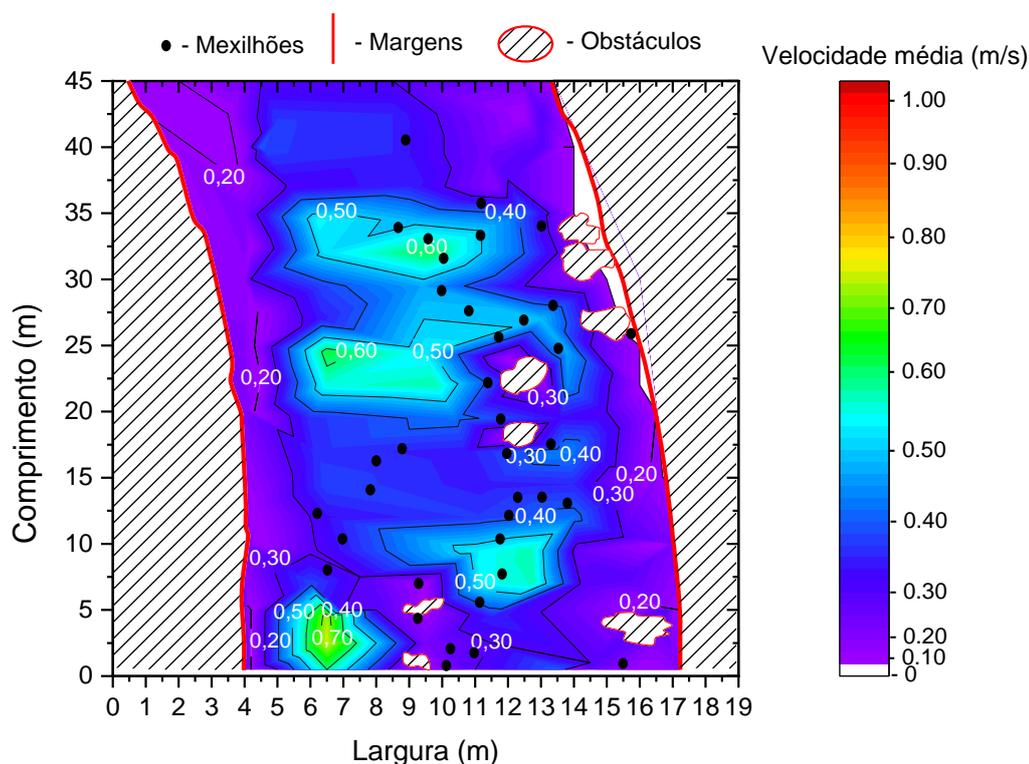


Figura 5.17 – Mapa 2D colorido de velocidades do troço 3, referente às velocidades médias de escoamento obtidas em profundidade.

O troço 1 apresenta um mapa de velocidades com um elevado número de vetores determinados. Isto deveu-se ao facto da área em estudo possibilitar uma aplicação facilitada dos traçadores e a sua consequente deteção.

O troço 2 devido à sua corrente e vegetação densa, impossibilitou o cálculo de um maior número de vetores e por esse motivo apresenta um mapa de velocidades menos completo. A morfologia complexa (margens estreitas e diversos obstáculos) deste troço deu origem a campos com gamas de velocidades muito variadas, onde existe uma grande discrepância de velocidades em certas secções.

No troço 3 há um padrão de velocidades bem definido, que é facilmente identificado através do mapa de velocidades. A largura deste troço bem como a fraca presença de obstáculos de relevo, provocam um escoamento com valores de velocidade mais uniformes comparativamente aos outros troços.

É importante frisar que os campos de velocidades obtidos dizem respeito às velocidades médias de escoamento. Tendo em conta que se aplicou um fator de correção, os valores de velocidade são menores, quando comparados com os valores de velocidade de escoamento superficial.

No rio Beça, os troços onde foram realizadas as experiências possuem uma profundidade média da água que varia entre 0.26 e 0.35 m. Posto isto, os valores das medições pontuais obtidas através do molinete correspondem à velocidade média de escoamento, que corresponde por sua vez à velocidade verificada a 60% da profundidade total, a partir da superfície. (Meals e Dressing, 2008).

Não foi possível medir as velocidades com o molinete ao longo da totalidade dos troços 1 e 3. Assim sendo, foram efetuadas medições pontuais da velocidade utilizando o molinete ao longo do troço 2 (Figura 5.18).

Os valores das velocidades médias de escoamento obtidas com os traçadores foram comparados com os valores de velocidade obtidos através do molinete. Assim, foram utilizados os valores de velocidade medidos com o molinete ao longo do troço 2, como termo comparativo. Os valores encontram-se representados graficamente na Figura 5.19.

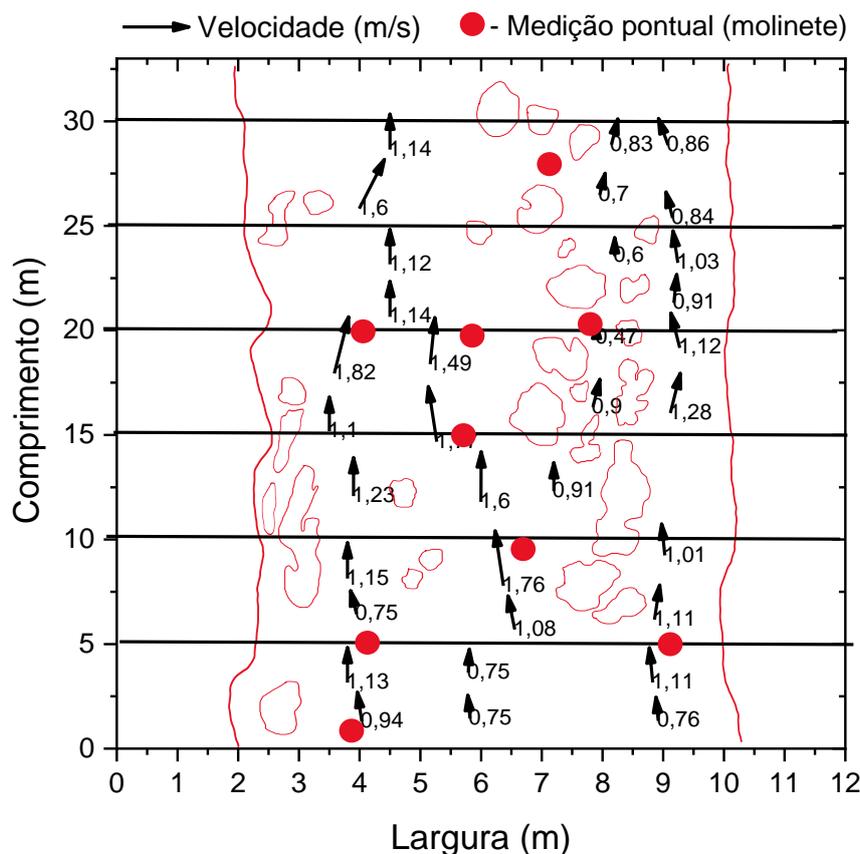


Figura 5.18 – Locais onde foram efetuadas as medições pontuais da velocidade recorrendo ao molinete (troço 2).

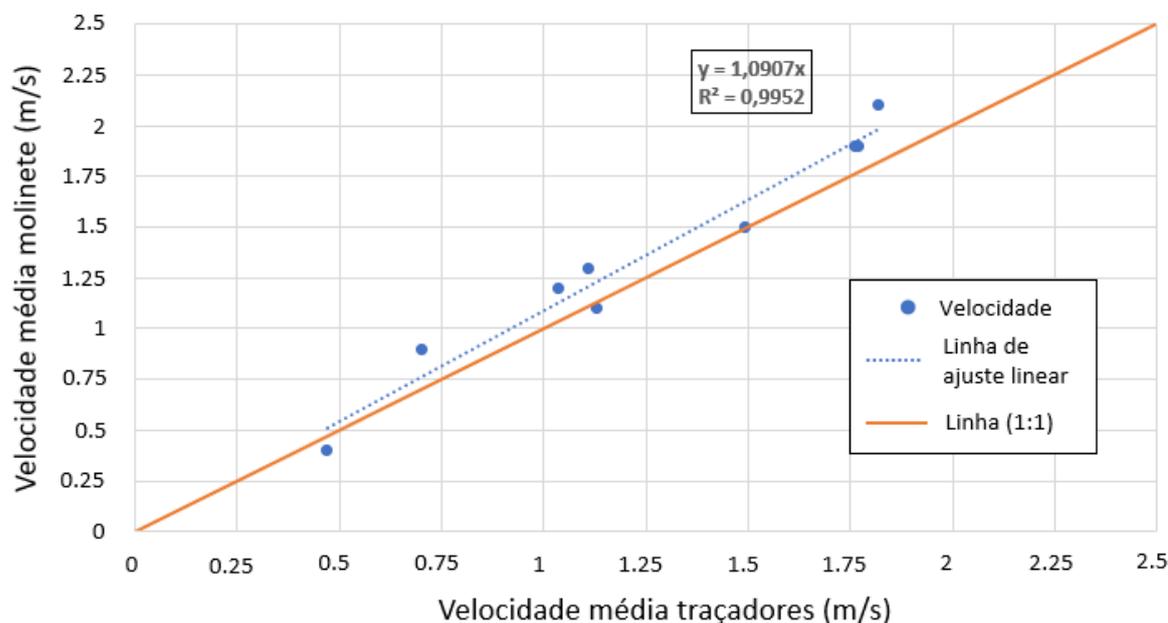


Figura 5.19 - Comparação entre as velocidades médias de escoamento estimadas a partir dos dados obtidos com o molinete e as velocidades médias estimadas usando os traçadores flutuantes (troço 2).

Através do gráfico da Figura 5.19 constatou-se que os valores de velocidades obtidos através das duas técnicas hidrométricas são semelhantes, existindo uma proximidade entre a linha de tendência e a linha 1:1. O coeficiente de determinação ($R^2 = 0.9952$) apresentou um valor muito próximo da unidade.

A partir dos mapas 2D coloridos de velocidades, recorreu-se novamente ao *software* – *OriginPro* de modo a serem obtidos gráficos correspondentes às projeções 3D dos mesmos. Os gráficos encontram-se representados na Figura 5.20 e permitem criar uma projeção dos três parâmetros (*e.g.* comprimento, largura e velocidade) relativamente a cada troço. Deste modo, são realçadas as diferenças entre os três troços em termos de velocidades médias de escoamento.

Através destes mapas também foi possível analisar a média das velocidades médias de escoamento obtidas em profundidade de acordo com o perfil transversal ao longo do comprimento e largura de cada um dos troços. Através da localização dos mexilhões em cada troço, foi possível criar gráficos que relacionam a médias das velocidades médias de escoamento e o número de mexilhões detetados no perfil transversal em relação ao comprimento e largura de cada troço (Figura 5.21, 5.22 e 5.23). Esta informação é útil na medida em que permite criar uma correlação entre as velocidades médias de escoamento e o local onde os mexilhões estão depositados.

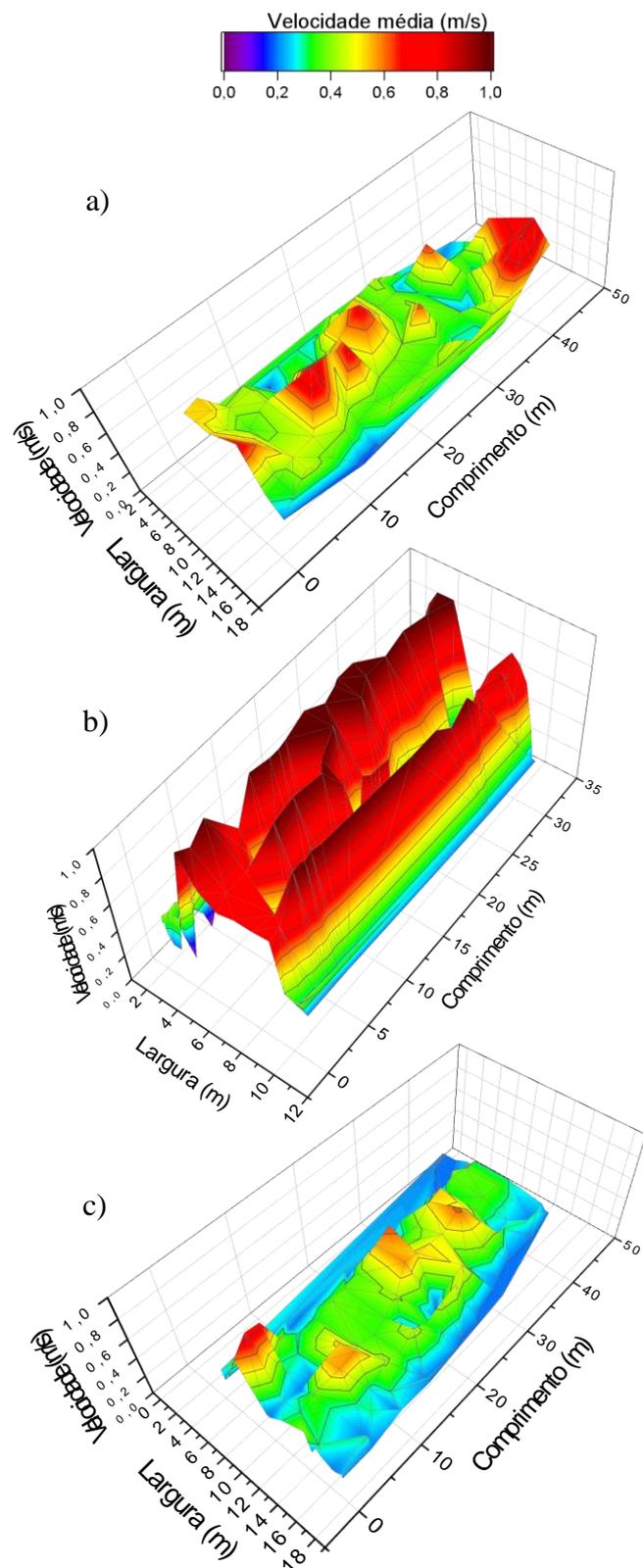


Figura 5.20 – Gráficos correspondentes às projeções 3D dos mapas 2D de velocidades coloridos, referentes aos 3 troços do rio. Os gráficos a), b) e c) correspondem ao troço 1, 2 e 3, respetivamente.

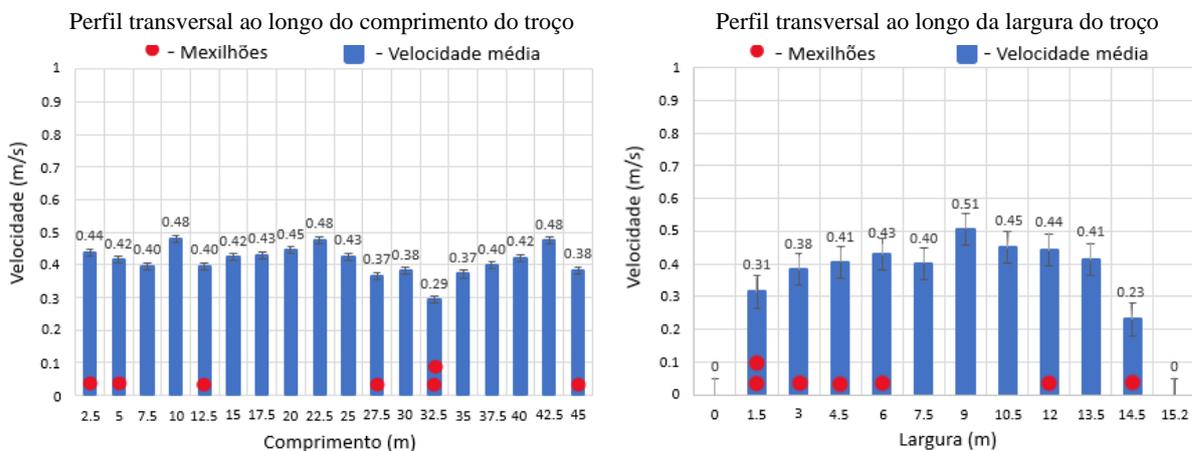


Figura 5.21 – Média das velocidades médias de escoamento obtidas em profundidade e número de mexilhões detetados no perfil transversal ao longo de todo o comprimento e largura do troço 1.

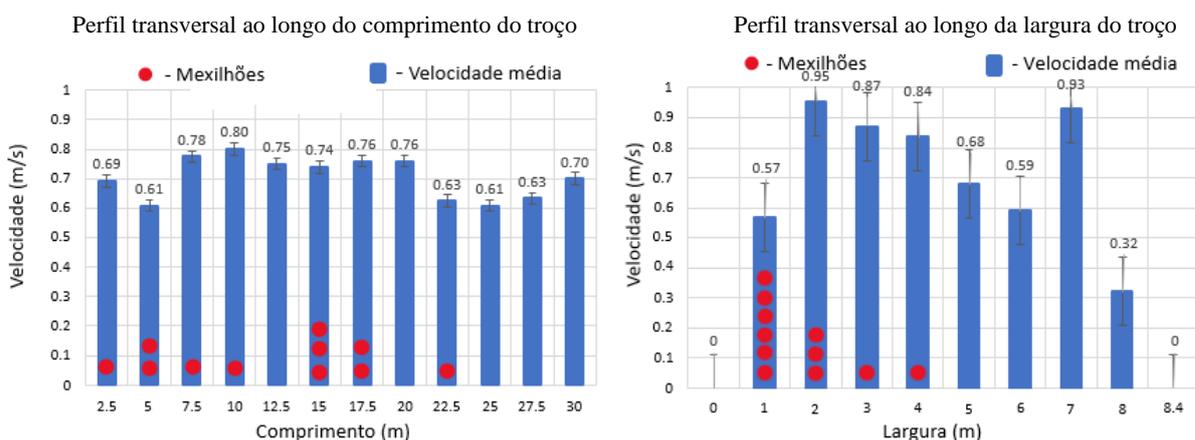


Figura 5.22 – Média das velocidades médias de escoamento obtidas em profundidade e número de mexilhões detetados no perfil transversal ao longo de todo o comprimento e largura do troço 2.

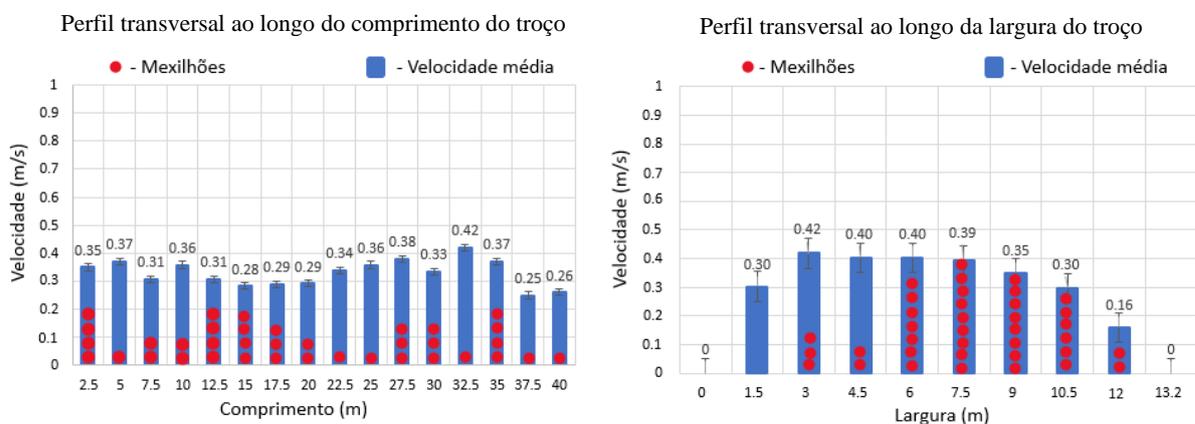


Figura 5.23 - Média das velocidades médias de escoamento obtidas em profundidade e número de mexilhões detetados no perfil transversal ao longo de todo o comprimento e largura do troço 3.

A partir da análise dos gráficos da Figura 5.23, constatou-se que existe uma relação entre a velocidade de escoamento e a localização dos mexilhões. De acordo com os perfis transversais em relação ao comprimento e largura dos três troços, o maior número de mexilhões depositados encontra-se no troço 3, onde as velocidades médias de escoamento são menores. O decréscimo da velocidade neste troço, cria condições ótimas para a deposição dos mexilhões. Outro fator importante é o facto de o leito do rio neste troço ser caracterizado pelo seu substrato heterogéneo, incluindo rochas, calhaus e elementos menores (*e.g.*, seixos), que possibilita e facilita a deposição dos mexilhões.

O troço 2, apesar de possuir velocidades de escoamento superiores ao troço 1, apresenta um maior número de mexilhões depositados. Um dos possíveis motivos é a presença abundante de vegetação ripária e de pequenas ilhas ao longo do troço, que facilita a deposição dos mexilhões.

O troço 1, devido à ausência de obstáculos e de ilhas de relevo, apresenta o menor número de mexilhões depositados. Apesar da velocidade de escoamento deste troço não ser muito superior ao troço 3, não é suficiente para provocar uma deposição significativa de mexilhões.

6 CONCLUSÕES

6.1 Comentários finais

A presente dissertação incidiu na aplicação e comparação de diferentes tipos de traçadores, bem como da sua utilidade para estimar as velocidades de escoamentos superficiais em diversos tipos de meios. Estudaram-se escoamentos pouco profundos (em ambiente rural e urbano) e em rios.

Os testes desenvolvidos em laboratório e no campo tiveram o intuito de testar e comparar a capacidade de diferentes traçadores (fluorescente, corante e térmico) que, sob diferentes condições (fase do dia e morfologia do terreno), suportam a medição da velocidade em escoamentos superficiais. Destas experiências foi possível retirar várias conclusões:

- Em superfícies cuja cobertura morta é superior a 1.0 ton/ha, os traçadores fluorescente e colorido não devem ser aplicados. A cobertura morta aplicada acima deste valor impediu a deteção dos traçadores na área de medição. Por outro lado, o traçador térmico foi visível para densidades até 2.0 ton/ha.
- Em superfícies com uma elevada densidade de vegetação nenhum dos traçadores foi detetado. A razão é semelhante ao sucedido com a cobertura morta, visto que neste caso, os traçadores fluorescente e colorido ficaram camuflados pela vegetação, o que impediu a deteção pelos dispositivos de captura de vídeo. No caso do traçador térmico, a elevada densidade de vegetação também se apresentou como uma desvantagem para a deteção do traçador pela câmara IV. A temperatura da vegetação foi também detetada pela câmara IV, e por isso apesar da água quente escoar sob toda a vegetação, tornou-se difícil diferenciar o traçador.
- O traçador fluorescente utilizado, não deve ser aplicado sem a utilização de uma estrutura que limita a passagem de luz solar durante o dia. No sentido inverso, o traçador colorido, em condições de pouca luz solar (anoitecer e noite) necessita de uma fonte de luz artificial para ser detetado. O traçador térmico pode ser aplicado em qualquer fase do dia (dia, anoitecer ou noite) pois, uma vez que se trata de uma fonte de calor, pode ser detetado por uma câmara IV.

- As principais vantagens na aplicação do traçador fluorescente são: a facilidade e rapidez na montagem da estrutura (*e.g.*, lâmpada UVA não é dispendiosa e é fácil de encontrar, câmara de telemóvel e uma solução de quinino); a facilidade de deteção do traçador para situações de baixa luminosidade (*e.g.*, anoitecer, noite, espaços fechados com pouca luminosidade) e o facto deste não ser prejudicial para o meio ambiente, tendo em conta que é necessária uma baixa concentração de quinino para a produção de uma elevada fluorescência (em torno de 80 mg/l, que também é usada, *e.g.*, para consumo humano na água tónica).
- O traçador colorido também apresenta as suas vantagens: a facilidade e rapidez na montagem da estrutura (*e.g.*, câmara de telemóvel e uma solução com corante); o facto de a deteção poder ocorrer durante o dia, enquanto a luz solar assim o permitir e também o facto deste não ser prejudicial para o meio ambiente (*e.g.*, é um corante alimentar e, portanto, é usado na alimentação).
- O traçador térmico apesar de ser detetado em diversas condições, apresenta algumas desvantagens: a câmara de IV utilizada é um equipamento muito dispendioso, o que pode inviabilizar a sua aplicação; é necessário *software* adicional para editar e analisar as imagens obtidas da área de medição.

As atividades realizadas no rio Beça tiveram como principal objetivo a obtenção de campos de velocidades para três locais de estudo anteriormente identificados. Devido à impossibilidade de aplicação dos três traçadores acima referidos, foram estudadas outras opções. Assim, foram aplicados traçadores flutuantes biodegradáveis (milho expandido, flores, pedaços de papel e folhas de árvore) e, a partir dos mesmos, obtiveram-se as velocidades de escoamento para os três locais de estudo (1, 2 e 3). Após a sua aplicação, tratamento de dados e análise dos mesmos, formaram-se algumas conclusões de relevo:

- Os pedaços de papel e folhas de árvore aplicados apresentam um peso bastante reduzido. Assim, estes traçadores flutuantes poderão ser mais suscetíveis às condições atmosféricas, como é o caso do vento, que pode alterar a velocidade de deslocamento destes traçadores.
- Em certas situações não foi possível detetar os traçadores flutuantes pela câmara instalada no UAS/drone. Isto verificou-se para os traçadores de menores dimensões (milho expandido e flores) e para os traçadores de cores claras (milho expandido e papel), devido ao reflexo da luz solar sobre a água.

- As principais vantagens dos traçadores flutuantes são: a facilidade de obtenção (todos os traçadores utilizados são facilmente adquiridos); facilidade de aplicação (estes traçadores não necessitam de materiais adicionais para serem aplicados e podem ser aplicados a partir das margens, caso a largura do rio assim o permita); baixo custo (a maior parte destes traçadores não tem qualquer custo associado); biodegradáveis (são facilmente decompostos por microrganismos); não apresentam perigo para o meio ambiente (*e.g.*, o milho expandido inclusive serve de alimento para os peixes no rio).
- Os traçadores flutuantes podem ser aplicados em situações onde não é possível utilizar outros equipamentos mais sofisticados (*e.g.*, molinete) e permitem obter valores de velocidade próximos dos valores reais de escoamento. Os valores de velocidade obtidos a partir destes traçadores, contribuíram para a monitorização das populações dos mexilhões-de-rio em cada um dos troços de interesse. Os mexilhões-de-rio depositam-se com maior facilidade em locais que apresentam menores velocidades de escoamento.

6.2 Trabalhos futuros

O trabalho futuro a efetuar, poderá concentrar-se em:

- Desenvolver e aplicar novos traçadores que, acima de tudo, sejam ecologicamente viáveis e que permitam de uma maneira simples e eficaz estimar a velocidade superficial da água em cursos de água em diferentes cenários de aplicação.
- Aprofundar a aplicabilidade dos traçadores fluorescentes, coloridos e térmicos em meios urbanos, visando a medição da velocidade de escoamentos superficiais pouco profundos.

Com esta dissertação, pretende-se transmitir a utilidade e importância dos traçadores para a monitorização de escoamentos superficiais pouco profundos, bem como a sua transversalidade para aplicação em cursos de água de maiores dimensões, visando a determinação das velocidades de escoamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abrahams, A.D., Atkinson, J.F., 1993. Relation between the grain velocity and and sediment concentration in overland flow. *Water Resources*, 29(9), pp.3021-3028. <https://doi.org/10.1029/93WR00771>
- Abrantes, J.R.C.B., Moruzzi, R.B., de Lima, J.L.M.P., Silveira, A., Montenegro, A.A.A., 2019. Combining a thermal tracer with a transport model to estimate shallow flow velocities. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 109, pp.59-69. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2018.12.005>
- Abrantes, J.R.C.B., Moruzzi, R.B., Silveira, A., de Lima, J.L.M.P., 2018. Comparison of thermal, salt and dye tracing to estimate shallow flow velocities: Novel triple-tracer approach. *Journal of Hydrology*, 557, pp.362-377. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.12.048>
- Águas de Coimbra, 2020. “Controlo de Qualidade da Água Destinada ao Consumo Humano - Município da Área de Abastecimento Coimbra-Boavista – 1º Semestre 2020”. Relatório Técnico. Águas de Coimbra, Coimbra, Portugal.
- Aley, T., Fletcher, M.W., 1976. The water tracer’s cookbook. *Missouri Speleology*, 16(3), pp.1-32.
- Awasthi, S., Srivastava, A., Singla, M.L., 2011. Voltammetric determination of citric acid and quinine hydrochloride using polypyrrole-pentacyanonitrosylferrate/platinum electrode. *Synthetic Metals*, 161(15-16), pp.1707-1712. <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2011.06.009>
- Baskaran, S., Ransley, T., Brodie, R.S., Baker, P., 2009. Investigating ground-water-river interactions using environmental tracers. *Australia Journal of Earth Sciences*, 56(1), pp.13-19. <https://doi.org/10.1080/08120090802541887>
- Buzády, A., Erostyák, J., Paál, G., 2006. Determination of uranine tracer dye from underground water of Mecsek Hill, Hungary. *Journal of Biochemical and Biophysical Methods*, 69(1-2), pp.207-214. <https://doi.org/10.1016/j.jbbm.2006.05.009>
- Calkins, D., Dunne, T., 1970. A salt tracing method for measuring channel velocities in small mountain streams. *Journal of Hydrology*, 11(4), pp.379-392.
-

- [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90003-X](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90003-X)
- Chow, V.T., Maidment, D.R., Mays, L.W., 1988. Applied Hydrology. McGraw-Hill: New York, NY, USA.
- Comiti, F., Mao, L., Wilcox, A., Wohl, E.E., Lenzi, M.A., 2007. Field-derived relationships for flow velocity and resistance in high-gradient streams. *Journal of Hydrology*, 340(1-2), pp.48-62. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.03.021>
- da Silva, L.L., Donnici, C.L., Ayala, J.D., de Freitas, C.H., Moreira, R.M., Pinto, A.M.F., 2009. Traçadores: o uso de agentes químicos para estudos hidrológicos, ambientais, petroquímicos e biológicos. *Química Nova*, 32(6), pp.1576-1585. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422009000600042>
- Dal Sasso, S.F., Pizarro, A., Samela, C., Mita, L., Manfreda, S., 2018. Exploring the optimal experimental setup for surface flow velocity measurements using PTV. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(8), 460. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6848-3>
- de Lima, J.L.M.P., Abrantes, J.R.C.B., Silva, V.P., Montenegro, A.A.A., 2014. Prediction of skin surface soil permeability by infrared thermography: a soil flume experiment. *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, 11(2), pp.161-169. <https://doi.org/10.1080/17686733.2014.945325>
- de Lima, J.L.M.P., Abrantes, J.R.C.B., 2014a. Can infrared thermography be used to estimate soil surface microrelief and rill morphology. *Catena*, 113, pp.314-322. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.08.011>
- de Lima, J.L.M.P., Abrantes, J.R.C.B., 2014b. Using a thermal tracer to estimate overland and rill flow velocities. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39(10), pp.1293-1300. <https://doi.org/10.1002/esp.3523>
- de Lima, J.L.M.P., Singh, V.P., de Lima, M.I.P., 2003. The influence of storm movement on water erosion: storm direction and velocity effects. *Catena*, 52(1), pp.39-56. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(02\)00149-2](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(02)00149-2)
- de Lima, J.L.M.P., Zehsaz, S., de Lima, M.I.P., Isidoro, J.M.G.P., Jorge, R.G., Martins, R., 2021. Using Quinine as a Fluorescent Tracer to Estimate Overland Flow Velocities on Bare Soil: Proof of Concept under Controlled Laboratory Conditions. *Agronomy*, 11(7), 1444. <https://doi.org/10.3390/agronomy11071444>
- de Lima, R.L.P., Abrantes, J.R.C.B., de Lima, J.L.M.P., de Lima, M.I.P., 2015. Using thermal

- tracers to estimate flow velocities of shallow flows: laboratory and field experiments. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 63(3), pp.255-262. <https://doi.org/10.1515/johh-2015-0028>
- Diener, H.C., Dethlefsen, U., Dethlefsen-Gruber, S., Verbeek, P., 2002. Effectiveness of quinine in treating muscle cramps: A double-blind, placebo-controlled, parallel-group, multicentre trial. *International Journal of Clinical Practice*, 56(4), pp.243-246. PMID: 12074203.
- Divine, C.E., McDonnell, J.J., 2005. The future of applied tracers in hydrogeology. *Hydrogeology Journal*, 13(1), pp.255-258. <https://doi.org/10.1007/s10040-004-0416-3>
- Donovan, J.L., DeVane, C.L., Boulton, D., Dodd, S., Markowitz, J.S., 2003. Dietary levels of quinine in tonic water do not inhibit CYP2D6 in vivo. *Food and Chemical Toxicology*, 41(8), pp.1199-1201. [https://doi.org/10.1016/S0278-6915\(03\)00112-1](https://doi.org/10.1016/S0278-6915(03)00112-1)
- Elliot, T., 2014. Environmental Tracers. *Water*, 6(11), pp.3264-3269. <https://doi.org/10.3390/w6113264>
- Fontoura, J.A.S., Niencheski, L.F.H., 2003. Metodologia para Utilização do Traçador Fluorescente ‘Rodamina B’ no Estudo da Dispersão Superficial, Adaptada para Aplicação no Estuário da Lagoa dos Patos. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 8(3), pp.105-116.
- Feuerstein, D.L., Selleck, R.E., 1963. Fluorescent Tracers for Dispersion Measurements. *Journal of the Sanitary Engineering Division*, 89(4), pp.1-21. <https://doi.org/10.1061/JSEDAI.0000447>
- Geto, A., Amare, M., Tessema, M., Admassie, S., 2012. Polymer-modified glassy carbon electrode for the electrochemical detection of quinine in human urine and pharmaceutical formulations. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 404(2), pp.525-530. <https://doi.org/10.1007/s00216-012-6171-8>
- Giménez, R., Govers, G., 2002. Flow detachment by concentrated flow on smooth and irregular beds. *Soil Science Society of America Journal*, 66(5), pp.1475–1483. <https://doi.org/10.2136/sssaj2002.1475>
- Horton, R.E., Leach, H.R., Vliet, R.V., 1934. Laminar sheet-flow. *Transactions, American Geophysical Union*, 15(2), pp.393–404. <https://doi.org/10.1029/TR015i002p00393>
- Jodeau, M., Hauet, A., Paquier, A., Le Coz, J., Dramais, G., 2008. Application and evaluation

- of LS-PIV technique for the monitoring of river surface velocities in high flow conditions. *Flow Measurement and Instrumentation*, 19(2), pp.117-127. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2007.11.004>
- Koshel, K.V., Stepanov, D.V., Ryzhov, E.A., Berloff, P., Klyatskin, V.I., 2019. Clustering of floating tracers in weakly divergent velocity fields. *Physical Review E*, 100(6). <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.100.063108>
- Lei, T., Chuo, R., Zhao, J., Shi, X., Liu, L., 2010. An improved method for shallow water flow velocity measurement with practical electrolyte inputs. *Journal of Hydrology*, 390(1-2), pp.45-56. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.06.029>
- Leibundgut, C., Seibert, J., 2011. Tracer Hydrology. In: Peter Wilderer (ed.), “*Treatise on Water Science*”, 2, pp.215-236. Oxford: Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53199-5.00036-1>
- Leibundgut, C., Maloszewski, P., Külls, C., 2009. “*Tracers in Hydrology*”. John Wiley & Sons Ltd, Chichester. <https://doi.org/10.1002/9780470747148>
- Meals, D.W., Dressing, S.A., 2008. Surface water flow measurement for water quality monitoring projects. U.S Environmental Protection Agency - Tech Notes 3.
- Mujtaba, B., de Lima, J.L.M.P., 2018. Laboratory testing of a new thermal tracer for infrared-based PTV technique for shallow overland flows. *Catena*, 169, pp.69-79. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.05.030>
- Pentari, A., Moirogiorgou, K., Livanos, G., Iliopoulou, D., Zervakis, M., 2014. Feature analysis on river flow video data for floating tracers detection. IST 2014 – IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques, Proceedings. <https://doi.org/10.1109/IST.2014.6958490>
- Pizarro, A., Dal Sasso, S. F., Perks, M. T., Manfreda, S., 2020. Identifying the optimal spatial distribution of tracers for optical sensing of stream surface flow. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(11), pp.5173-5185. <https://doi.org/10.5194/hess-24-5173-2020>
- Schuetz, T., Weiler, M., Lange, J., Stoelzle, M., 2012. Two-dimensional assessment of solute transport in shallow waters with thermal imaging and heated water. *Advances in Water Resources*, 43, pp.67-75. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.03.013>
- Silva, P.V.R.M. da., Pecly, J.O.G., Azevedo, J.P.S. de., 2017. Uso de traçadores fluorescentes para determinar características de transporte e dispersão no Rio Piabanha (RJ) para a

- modelagem quali-quantitativa pelo HEC-RAS. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 22(3), pp.463-472. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522017150187>
- Singh, V.P., 2012. *Handbook of Applied Hydrology*. McGraw-Hill Education: New York, NY, USA, 1440.
- Tauro, F., Grimaldi, S., Petroselli, A., Porfiri, M., 2012. Fluorescent particle tracers for surface flow measurements: a proof of concept in a natural stream. *Water Resources Research*, 48(6). <https://doi.org/10.1029/2011WR011610>
- Tazioli, A., 2011. Experimental methods for river discharge measurements: comparison among tracers and current meter. *Hydrological Sciences Journal*, 56(7), pp.1314-1324. <https://doi.org/10.1080/02626667.2011.607822>
- Thermo Fisher Scientific. Safety Data Sheet Quinine Monohydrochloride Dihydrate 99%. Disponível online: <https://www.alfa.com/en/msds/?language=EN&subformat=AGHS&sku=H33474> (acessado a 15 de julho de 2021).
- Tsubaki, R., Fujita, I., Tsutsumi, S., 2011. Measurement of the flood discharge of a small-sized river using an existing digital video recording system. *Journal of Hydro-environment Research*, 5(4), pp.313-321. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2010.12.004>
- Wirtz, S., Seeger, M., Ries, J.B., 2012. Field experiments for understanding and quantification of rill erosion process. *Catena*, 91, pp.21–34. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2010.12.002>
- Zehsaz, S., de Lima, J.L.M.P., de Lima, M.I.P., Isidoro, J.M.G.P., Martins, R., 2022. Estimating shallow overland flow velocities using fluorescent tracer quinine on vegetated, mulched and urban paved surfaces. (submetido em março de 2022 a revista indexada).
- Zhou, J., Liu, G., Meng, Y. et al., 2021. Using stable isotopes as tracer to investigate hydrological condition and estimate water residence time in a plain region. Chengdu, China. *Scientific Reports*, 11, 2812. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82349-3>

ANEXO A – CARATERÍSTICAS DO TROÇO 1, RIO BEÇA

Troço 1	Localização: Gardunho	Coordenadas: 41° 35' 13'' N 7° 48' 09'' O
Data da amostragem: 17/07/2020	Hora da amostragem: 10:00	Altitude (m): 384 m
Morfologia		
Profundidade média da água (m): 0.26 m	Profundidade máxima da água (m): 0.50 m	Largura média do rio (m): 14.57 m
Dinâmica da margem do rio: 1	Dinâmica do leito do rio: 1	Dinâmica do canal: 1
Composição do substrato: 1	Habitats fluviais: 1	Vegetação ripária: 1
Arredores: Floresta	Libertação de fonte pontual: Não	Medidas de proteção contra inundações: Não
Lago em rio contínuo: Não		
Parâmetros físico-químicos		
Temperatura da água (°C): 15.9 °C	pH: 6.73	O ₂ (mg/L): 9.51 mg/L
Saturação de O ₂ (%): 96.5%		
Meteorologia		
Tempo antes da amostragem: Ensolarado	Tempo durante amostragem: Ensolarado	Nebulosidade (%): 0%
Vento: Não		
Hidrografia		
Caudal: Baixo	Tendência do nível de água: Constante	Libertação de pulso: Não

ANEXO B – CARATERÍSTICAS DO TROÇO 2, RIO BEÇA

Troço 2	Localização: Meander	Coordenadas: 41° 35' 07" N 7° 48' 23" O
Data da amostragem: 18/07/2020	Hora da amostragem: 11:20	Altitude (m): 380 m
Morfologia		
Profundidade média da água (m): 0.28 m	Profundidade máxima da água (m): 0.87 m	Largura média do rio (m): 8 m
Dinâmica da margem do rio: 1	Dinâmica do leito do rio: 1	Dinâmica do canal: 1
Composição do substrato: 1	Habitats fluviais: 1	Vegetação ripária: 1
Arredores: Floresta	Libertação de fonte pontual: Não	Medidas de proteção contra inundações: Não
Lago em rio contínuo: Sim		
Parâmetros físico-químicos		
Temperatura da água (°C): 16.2 °C	pH: 6.73	O ₂ (mg/L): 9.66 mg/L
Saturação de O ₂ (%): 98%		
Meteorologia		
Tempo antes da amostragem: Ensolarado	Tempo durante amostragem: Ensolarado	Nebulosidade (%): 0%
Vento: Não		
Hidrografia		
Caudal: Baixo	Tendência do nível de água: Constante	Libertação de pulso: Não

ANEXO C – CARATERÍSTICAS DO TROÇO 3, RIO BEÇA

Troço 3	Localização: Meander	Coordenadas: 41° 35' 08" N 7° 48' 26" O
Data da amostragem: 25/07/2020	Hora da amostragem: 16:30	Altitude (m): 381 m
Morfologia		
Profundidade média da água (m): 0.35 m	Profundidade máxima da água (m): 0.81 m	Largura média do rio (m): 11.89 m
Dinâmica da margem do rio: 1	Dinâmica do leito do rio: 1	Dinâmica do canal: 1
Composição do substrato: 1	Habitats fluviais: 1	Vegetação ripária: 1
Arredores: Floresta	Libertação de fonte pontual: Não	Medidas de proteção contra inundações: Não
Lago em rio contínuo: Não		
Parâmetros físico-químicos		
Temperatura da água (°C): 18.5 °C	pH: 7.01	O ₂ (mg/L): 9.98 mg/L
Saturação de O ₂ (%): 107.8%		
Meteorologia		
Tempo antes da amostragem: Ensolarado	Tempo durante amostragem: Ensolarado	Nebulosidade (%): 0%
Vento: Não		
Hidrografia		
Caudal: Baixo	Tendência do nível de água: Constante	Libertação de pulso: Não