



# Estudo da Concentração e do Transporte de Sedimentos em Suspensão em Cursos de Água de Montanha

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Raquel José Ladeira Lobo**

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL



UNIVERSIDADE da MADEIRA  
*A Nossa Universidade*  
[www.uma.pt](http://www.uma.pt)

Setembro | 2012

la

st

# **Estudo da Concentração e do Transporte de Sedimentos em Suspensão em Cursos de Água de Montanha**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Raquel José Ladeira Lobo**

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

ORIENTAÇÃO

Luiz Carlos Guerreiro Lopes



**ESTUDO DA CONCENTRAÇÃO E DO TRANSPORTE  
DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO EM CURSOS DE  
ÁGUA DE MONTANHA**

**Raquel José Ladeira Lobo**  
(Licenciada em Engenharia Civil)

Orientador:  
Prof. Doutor Luiz Carlos Guerreiro Lopes

Dissertação apresentada à Universidade da Madeira para cumprimento  
dos requisitos necessários à obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Civil**

Funchal, Setembro de 2012

*Climb the mountains and get their good tidings. Nature's peace will flow into you as sunshine flows into trees. The winds will blow their own freshness into you, and the storms their energy, while cares will drop off like autumn leaves.*

— John Muir (1838-1914), in *Our National Parks*, p. 56,  
Houghton Mifflin, Boston, 1901.

Aos meus pais, Elias e Celeste,  
às minhas irmãs, Rubina e Elisa,  
e ao meu namorado, Pedro.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao longo deste período da minha vida, tive a oportunidade de contar com o apoio de diversas pessoas que, directa ou indirectamente, contribuíram para o desenvolvimento desta dissertação de mestrado em Engenharia Civil.

Em primeiro lugar, agradeço ao Prof. Doutor Luiz Carlos Guerreiro Lopes pela oportunidade de realizar o mestrado em Engenharia Civil aqui na Ilha da Madeira e por me orientar de forma exemplar durante este período de estudo profundo, explicando o que precisava fazer, esclarecendo todas as minhas dúvidas e ajudando-me nesta fase fundamental para a conclusão do meu mestrado.

Agradeço ao Centro de Estudos da Macaronésia (CEM/UMa), nomeadamente à Prof. Doutora Nereida Maria Abano Cordeiro, pela possibilidade de utilização dos equipamentos do laboratório de Bioanálises e Biomateriais, bem como pela disponibilização de equipamentos para o trabalho de campo, que foram indispensáveis para a minha investigação.

Agradeço também ao Observatório Meteorológico do Funchal / Delegação Regional da Madeira do Instituto de Meteorologia (recentemente integrado no Instituto Português do Mar e da Atmosfera, IPMA), na pessoa do Doutor Vítor Manuel Martins Soares Prior, pela disponibilização dos dados de precipitação das estações meteorológicas mantidas na Ilha da Madeira por aquele Instituto, necessários para este trabalho.

Agradeço igualmente ao Doutor José Carlos Magro Esteves, Director do Departamento de Hidráulica e Tecnologias Energéticas do Laboratório Regional de

Engenharia Civil (LREC), pela disponibilização dos dados de precipitação dos postos udométricos de interesse mantidos pelo LREC.

Um agradecimento especial à empresa Elias M. S. Lobo, Construção Civil, Lda., pelo apoio logístico e pelo empréstimo de equipamentos utilizados no trabalho de campo, pois sem tal apoio não teria sido possível a sua execução.

Os meus agradecimentos também ao Dr. Uriel Arcanjo Vieira Abreu, pelo auxílio prestado relativamente à elaboração da cartografia digital.

Deixo ainda um agradecimento sincero ao Doutor Raimundo Quintal e ao Prof. Doutor Elias Rodrigues, que ajudaram de forma muito atenciosa na indicação de possíveis locais a serem estudados, com base no seu conhecimento de campo.

Aos meus pais, Elias Lobo e M<sup>a</sup> Celeste Ladeira, ao meu namorado, Pedro Rodrigues, e ao Prof. Luiz Lopes, que se disponibilizaram para me auxiliar na execução dos trabalhos de campo e que contribuíram com a sua mão-de-obra para a sua adequada realização, o meu sincero obrigado.

À Eng.<sup>a</sup> Narcisa Silvina Rodrigues Teixeira, que sempre se mostrou disponível, de forma muito simpática, para auxiliar no que fosse preciso, bem como para ajudar na execução dos procedimentos experimentais em laboratório.

Mais uma vez agradeço ao meu namorado, Pedro André Rosado Rodrigues, que sempre me acompanhou e ajudou durante esse período, mesmo sem ser esta a sua área de estudo.

Um novo agradecimento muito sentido aos meus pais e às minhas irmãs, pois sem eles nada seria possível, desde sempre até à realização desta dissertação, não esquecendo os desafios futuros, nos quais, sem dúvida, continuarão a ter um papel relevante.

Finalmente, agradeço a todas as outras pessoas que, com o seu saber, a sua colaboração e o seu apoio nos momentos críticos, dispuseram do seu tempo para, de alguma forma, auxiliar-me no decorrer do processo de desenvolvimento desta dissertação.

# ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	4
RESUMO.....	13
ABSTRACT .....	14
1 INTRODUÇÃO.....	15
2 REVISÃO DO ESTADO DA ARTE .....	19
2.1 Caracterização dos cursos de água de montanha.....	19
2.2 Monitorização da concentração de sedimentos em suspensão .....	23
2.3 Método da diluição de sal para a estimação do caudal .....	23
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	36
3.1 Caracterização da área de estudo.....	36
3.2 Estimação da concentração de sedimentos em suspensão .....	39
3.2.1 Equipamento utilizado .....	39
3.2.2 Trabalho de campo .....	42
3.2.3 Trabalho em laboratório.....	45
3.3 Estimação do caudal .....	47
3.3.1 Equipamento utilizado .....	47
3.3.2 Trabalho de campo .....	49
3.3.3 Trabalho em laboratório.....	54
3.4 Estimação do transporte de sedimentos em suspensão.....	55

4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	58
4.1	Medições da condutividade eléctrica da água <i>in situ</i> e em laboratório .....	58
4.2	Medições da turbidez da água em laboratório .....	68
4.3	Medições <i>in situ</i> da turbidez da água .....	81
4.4	Estimação da concentração e do transporte de sedimentos em suspensão .....	85
5	CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO .....	89
5.1	Principais conclusões do trabalho realizado .....	89
5.2	Sugestões de trabalho futuro .....	91
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	93
	ANEXO 1 .....	105
	ANEXO 2 .....	111
	ANEXO 3 .....	117
	ANEXO 4 .....	122
	ANEXO 5 .....	127

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1– Relação entre a concentração de sal e a condutividade eléctrica da água em amostras sintéticas preparadas com água proveniente da Ribeira Seca.....	59
Tabela 4.2 – Medidas da condutividade eléctrica da água na primeira medição <i>in situ</i> para cálculo do caudal (massa de sal injectada = 250 g).....	60
Tabela 4.3 – Medidas da condutividade eléctrica da água na segunda medição <i>in situ</i> para cálculo do caudal (massa de sal injectada = 500 g).....	62
Tabela 4.4 – Medidas da condutividade eléctrica da água na terceira medição <i>in situ</i> para cálculo do caudal (massa de sal injectada = 500 g). ....	64
Tabela 4.5 – Medidas da condutividade eléctrica da água na quarta medição <i>in situ</i> para cálculo do caudal (massa de sal injectada = 250 g).....	65
Tabela 4.6 – Medidas da condutividade eléctrica da água na quinta medição <i>in situ</i> para cálculo do caudal (massa de sal injectada = 250 g).....	67
Tabela 4.7 – Turbidez média vs. concentração dos sedimentos em suspensão. ....	69
Tabela 4.8 – Turbidez mínima, média e máxima das suspensões com diferentes concentrações preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira Seca do Faial....	71
Tabela 4.9 – Relação entre a turbidez média medida na Ribeira Seca e a concentração estimada de sedimentos em suspensão.....	86
Tabela 4.10 – Caudais e concentrações de sedimentos em suspensão estimados a partir das medições de condutividade eléctrica e de turbidez efectuadas .....	87
Tabela 4.11– Carga sedimentar transportada durante a campanha de medições ...	88

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Material necessário à construção de um frasco de Mariotte. ....	32
Figura 2.2 – Dispersão da solução salina ao longo do canal fluvial. ....	34
Figura 2.3 – Variação da condutividade eléctrica e da correspondente concentração de sal, Russel Creek, Outubro de 2003. ....	35
Figura 3.1 – Principais bacias hidrográficas da Ilha da Madeira. ....	37
Figura 3.2 – Local de medição na bacia hidrográfica da Ribeira do Faial. ....	37
Figura 3.3 – Turbidímetro utilizado. ....	40
Figura 3.4 – Balança analítica. ....	41
Figura 3.5 – Agitador magnético. ....	41
Figura 3.6 – Imagem do satélite Meteosat-9 na banda do infravermelho às 08:00 UTC do dia 05/10/2010. ....	43
Figura 3.7 – Localização das estações meteorológicas e dos postos udométricos situados no entorno do local de medição. ....	44
Figura 3.8 – Condutivímetro utilizado. ....	47
Figura 3.9 – Balança electrónica portátil utilizada no trabalho de campo. ....	48
Figura 3.10 – Principais equipamentos utilizados no trabalho de campo. ....	49
Figura 3.11 – a) Localização do condutivímetro junto à linha de água; b) Detalhe do sensor mergulhado na água. ....	51
Figura 3.12 – Despejo da solução salina no curso de água. ....	52

Figura 4.1 – Relação entre a condutividade eléctrica e a concentração de sal na água em amostras sintéticas preparadas com água proveniente da Ribeira Seca. ....	60
Figura 4.2 – Medidas da condutividade eléctrica da água referentes à injeção de 250 g de sal na primeira medição <i>in situ</i> para cálculo do caudal. ....	61
Figura 4.3 – Medidas da condutividade eléctrica da água referentes à injeção de 500 g de sal na segunda medição <i>in situ</i> para cálculo do caudal. ....	63
Figura 4.4 – Medidas da condutividade eléctrica da água referentes à injeção de 500 g de sal na terceira medição <i>in situ</i> para cálculo do caudal. ....	65
Figura 4.5 – Medidas da condutividade eléctrica da água referentes à injeção de 250 g de sal na quarta medição <i>in situ</i> para cálculo do caudal. ....	66
Figura 4.6 – Medidas da condutividade eléctrica da água referentes à injeção de 250 g de sal na quinta medição <i>in situ</i> para cálculo do caudal. ....	68
Figura 4.7 – Relação entre a turbidez e a concentração de sedimentos em suspensão em amostras sintéticas preparadas com sedimentos extraídos da Ribeira Seca. ....	70
Figura 4.8 – Diagrama de dispersão com barras de erro referente às medições de turbidez das suspensões preparadas com sedimentos extraídos da Ribeira Seca. ....	72
Figura 4.9 – Medidas de turbidez de suspensões com concentração de 250 mg/l preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira Seca do Faial. ....	72
Figura 4.10 – Medidas de turbidez de suspensões com concentração de 500 mg/l preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira Seca do Faial. ....	73
Figura 4.11 – Medidas de turbidez de suspensões com concentração de 750 mg/l preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira Seca do Faial. ....	73
Figura 4.12 – Medidas de turbidez de suspensões com concentração de 1000 mg/l preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira Seca do Faial. ....	74
Figura 4.13 – Medidas de turbidez de suspensões com concentração de 1250 mg/l preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira Seca do Faial. ....	74
Figura 4.14 – Medidas de turbidez de suspensões com concentração de 1500 mg/l preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira Seca do Faial. ....	75

Figura 4.15 – Medidas de turbidez de suspensões com concentração de 1750 mg/l preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira Seca do Faial.....	75
Figura 4.16 – Medidas de turbidez de suspensões com concentração de 2000 mg/l preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira Seca do Faial.....	76
Figura 4.17 – Medidas de turbidez de suspensões com concentração de 2250 mg/l preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira Seca do Faial.....	76
Figura 4.18 – Medidas de turbidez de suspensões com concentração de 2500 mg/l preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira Seca do Faial.....	77
Figura 4.19 – Medidas de turbidez de suspensões com concentração de 2750 mg/l preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira Seca do Faial.....	77
Figura 4.20 – Medidas de turbidez de suspensões com concentração de 3000 mg/l preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira Seca do Faial.....	78
Figura 4.21 – Medidas de turbidez de suspensões com concentração de 3500 mg/l preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira Seca do Faial.....	78
Figura 4.22 – Medidas de turbidez de suspensões com concentração de 4000 mg/l preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira Seca do Faial.....	79
Figura 4.23 – Medidas de turbidez de suspensões com concentração de 4500 mg/l preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira Seca do Faial.....	79
Figura 4.24 – Medidas de turbidez de suspensões com concentração de 5000 mg/l preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira Seca do Faial.....	80
Figura 4.25 – Medidas de turbidez referentes à primeira medição na Ribeira Seca do Faial realizada às 13h25 do dia 6 de Outubro de 2010. ....	81
Figura 4.26 – Medidas de turbidez referentes à segunda medição na Ribeira Seca do Faial realizada às 17h46 do dia 6 de Outubro de 2010. ....	82
Figura 4.27 – Medidas de turbidez referentes à terceira medição na Ribeira Seca do Faial realizada às 18h29 do dia 6 de Outubro de 2010.....	82
Figura 4.28 – Medidas de turbidez referentes à quarta medição na Ribeira Seca do Faial realizada às 19h12 do dia 6 de Outubro de 2010.....	83

Figura 4.29 – Medidas de turbidez referentes à quinta medição na Ribeira Seca do Faial realizada às 19h40 do dia 6 de Outubro de 2010.....	83
Figura 4.30 – Medidas de turbidez referentes à sexta medição na Ribeira Seca do Faial realizada às 11h37 do dia 7 de Outubro de 2010.....	84
Figura 4.31 – Medidas de turbidez referentes à sétima medição na Ribeira Seca do Faial realizada às 12h00 do dia 7 de Outubro de 2010.....	84
Figura 4.32 – Medidas de turbidez referentes à oitava medição na Ribeira Seca do Faial realizada às 15h44 do dia 7 de Outubro de 2010.....	85
Figura 4.33 – Relação entre a turbidez da água na Ribeira Seca e a correspondente concentração de sedimentos em suspensão. ....	86

## RESUMO

O principal objectivo deste estudo foi o de verificar a aplicabilidade, às ribeiras da Ilha da Madeira, de técnicas indirectas de estimação do caudal e da concentração de sedimentos em suspensão e do seu emprego no cálculo do transporte sólido em suspensão nessas pequenas bacias de montanha.

Particular ênfase é dada ao uso de traçadores químicos na determinação indirecta do caudal em cursos de água turbulentos com acentuados declives e à estimação da concentração de sedimentos em suspensão a partir de dados de turbidez da água, sendo tais técnicas aqui detalhadamente descritas.

A campanha de medições da condutividade eléctrica e da turbidez da água realizada na Ribeira Seca do Faial, complementada pelos trabalhos realizados na Ribeira do Lajeado e na Ribeira de Santa Luzia, devido às suas grandes limitações em termos temporais e espaciais, não permitiu chegar a conclusões mais representativas sobre o transporte de sedimentos em suspensão na bacia hidrográfica em estudo.

Ainda assim, os trabalhos de campo e em laboratório realizados possibilitaram confirmar a aplicabilidade das técnicas indirectas adoptadas na estimação de caudais e no estudo da concentração e do transporte de sedimentos em suspensão nesses cursos de água de montanha.

**Palavras-chave:** Rios de montanha, Concentração de sedimentos em suspensão, Transporte de sedimentos, Turbidez, Condutividade eléctrica.

## **ABSTRACT**

The main purpose of this study was to verify the applicability of indirect techniques for the estimation of water flow rate and suspended sediment concentration in streams of Madeira Island, and its use for the calculation of the suspended-sediment transport rate.

Particular emphasis is given to the use of chemical tracers for the indirect determination of discharge into turbulent rivers with steep slopes and to the estimation of suspended-sediment concentration from turbidity data, being such techniques described here in detail.

The field campaign for the measurement of electrical conductivity and turbidity of water held in Ribeira Seca do Faial stream, complimented by the work accomplished in Lajeado and Santa Luzia streams, did not allow to draw conclusions most representative on the suspended-sediment transport in the river basin under study, due to its severe limitations in terms of space and time.

However, the field and laboratory works made it possible to confirm the applicability of the indirect techniques adopted for the estimation of flow and the study of concentration and sediment transport in these mountain streams.

**Key-words:** Mountain streams, Suspended-sediment concentration, Sediment transport, Turbidity, Electrical conductivity.

# 1 INTRODUÇÃO

Em regiões de montanha, como é o caso de parte significativa da Ilha da Madeira, a ocorrência de eventos hidrometeorológicos extremos, nomeadamente precipitações intensas e cheias rápidas, além de relativamente frequente, pode ter um impacto significativo sobre o meio ambiente e a paisagem (Beniston, 2000), com eventuais consequências catastróficas sobre as comunidades e populações afectadas (Bacchi e Villi, 2005; Woo e Jones, 2002).

A ocorrência de precipitação conduz, directa ou indirectamente, a um aumento do aporte de sedimentos aos cursos de água e do seu transporte, tanto em suspensão quanto por saltação, deslizamento ou rolamento, em especial nas bacias de montanha, com fortes declives longitudinais e acentuada verticalidade das vertentes.

Os processos de erosão superficial laminar e em sulcos originados pelo escoamento de águas pluviais, muitas vezes intensificado pelo mau uso do solo, nomeadamente em regiões montanhosas (Beniston, 2000), bem como a desagregação dos solos e os eventuais deslizamentos de terras provocados pela acção de precipitações mais intensas sobre essas vertentes, são directamente responsáveis pelo aumento da carga sólida nas linhas de água principais e secundárias.

Além da acção directa reflectida na erosão pluvial, a ocorrência de precipitação manifesta-se indirectamente pela erosão fluvial, uma vez que leva a um aumento dos caudais, sendo a acção mecânica da água sobre as margens e o

leito, mais notável nas situações de cheia, igualmente responsável pelo aumento da carga sólida transportada por esses cursos de água.

Como destacado por Lenzi (2000), as variações temporais e espaciais da concentração de sedimentos em suspensão nos rios e cursos de água de montanha são tipicamente muito acentuadas, sendo as alterações da concentração ao longo do tempo fortemente dependentes das variações de caudal.

Em muitas regiões, como no caso da Ilha da Madeira, a escassez ou mesmo falta de medições directas de caudal leva à utilização de dados de precipitação para a sua estimação (Beven, 2001).

No entanto, em zonas de montanha, a distribuição da precipitação é altamente influenciada pela direcção e intensidade do vento e pela acidentada topografia, o que tem fortes implicações na estimação da precipitação sobre as bacias hidrográficas em estudo (Johansson e Chen, 2005), ainda mais tendo em conta a usual inexistência de radares meteorológicos e a baixa densidade espacial das estações e postos udométricos frequentemente observada nessas regiões (Wohl, 2000).

Este é claramente o caso da Ilha da Madeira, cuja complexa topografia, caracterizada por vales profundos e altas montanhas, com vertentes muito íngremes — com 90% da superfície da ilha localizada acima dos 500 m e um terço da mesma acima dos 1.000 m (Sziemer, 2000) —, induz distintos padrões de distribuição espacial da precipitação em função dos ventos locais dominantes, estando os ventos mais intensos frequentemente associados aos eventos de precipitação, o que torna ainda mais incerta a estimação das condições hidrometeorológicas.

Além disso, os cursos de água de montanha da ilha têm um regime sazonal, de carácter torrencial, com caudais mais elevados durante os meses de Outubro a Março/Abril (Shahin, 2002) e baixos caudais durante o resto do ano, em especial no período de Junho a Agosto.

Sendo assim, é conveniente recorrer a outra técnica indirecta de estimação do caudal nesses cursos de água com acentuados declives, passível de ser utilizada

mesmo sob condições hidrometeorológicas desfavoráveis, o que leva a ponderar o emprego de traçadores para tal estimação.

Na escolha do traçador a ser utilizado, é natural a opção pelo usual sal de cozinha, cloreto de sódio, devido ao seu baixo preço, facilidade de obtenção, não nocividade ao ambiente e custo relativamente baixo do equipamento necessário para a aplicação da técnica da diluição de sal para a estimação do caudal (Bolognesi *et al.*, 2006; Moore, 2004b).

Por outro lado, o aumento da carga sólida em suspensão num curso de água, em decorrência da conjugação da erosão fluvial e pluvial, provoca um aumento correspondente da turbidez (Bakar *et al.*, 2007; Fenton, 2006), propriedade física que se traduz na redução da transparência devido à interferência na passagem da luz através da água resultante da presença de materiais em suspensão.

Tal constatação leva naturalmente à consideração do uso de medições de turbidez da água na estimação da concentração dos sedimentos em suspensão em cursos de água de montanha (Minella *et al.*, 2008a), onde é impraticável a sua medição directa, nomeadamente sob condições hidrometeorológicas adversas.

Assim, o principal objectivo deste estudo consiste em verificar e confirmar a aplicabilidade, às ribeiras da ilha da Madeira, das técnicas indirectas de estimação do caudal e da concentração dos sedimentos em suspensão antes referidas e do seu emprego no cálculo do transporte de sedimentos em suspensão nesses cursos de água de montanha.

O Capítulo 2 contém uma revisão do estado da arte no que concerne ao transporte de sedimentos em suspensão em cursos de água de montanha, sendo nele referidas sucintamente as principais características dessas linhas de água e as formulações empíricas mais usuais para a estimação do referido transporte. Nesse capítulo, especial ênfase é dada à estimação da concentração de sedimentos em suspensão a partir de dados de turbidez da água e ao uso de traçadores na determinação indirecta dos caudais em cursos de água turbulentos com acentuados declives, uma vez que, conhecidos esses valores, a carga sedimentar transportada em suspensão pode ser facilmente calculada como o produto do caudal líquido instantâneo pela concentração instantânea de sedimentos em suspensão, multiplicado, se necessário, por um factor de conversão de unidades.

O material e os métodos empregues nesta investigação são abordados no Capítulo 3, no qual é feita a caracterização da área de estudo, na bacia hidrográfica da Ribeira Seca do Faial, na parte setentrional da Ilha da Madeira. No mesmo capítulo, são ainda descritos os equipamentos utilizados e os trabalhos de campo e de laboratório efectuados objectivando a estimação do caudal e a determinação da concentração dos sedimentos em suspensão, necessários para o cálculo do seu transporte naquele curso de água.

No Capítulo 4, são apresentados e discutidos os resultados deste estudo, obtidos tanto no trabalho laboratorial desenvolvido quanto no trabalho de campo realizado em Outubro de 2010.

O Capítulo 5 contém as principais conclusões do estudo realizado, bem como algumas sugestões de trabalho futuro.

No Anexo 1, são apresentados os valores de precipitação horária registados nos postos udográficos da Fajã da Nogueira e do Lombo dos Palheiros e nas estações meteorológicas do Caniçal/Ponta de São Lourenço, Santo da Serra, Santana e São Jorge durante o período de execução do trabalho de campo.

Por fim, os Anexos 2 a 5 contêm os resultados das medições complementares de turbidez da água realizadas em laboratório a partir de suspensões com diferentes concentrações preparadas com sedimentos extraídos da Ribeira do Lajeado e da Ribeira de Santa Luzia.

## **2 REVISÃO DO ESTADO DA ARTE**

### **2.1 Caracterização dos cursos de água de montanha**

A actividade de investigação na área da hidráulica fluvial tem estado mais direccionada para o estudo dos rios de planície, sistemas de drenagem caracterizados pelos baixos declives longitudinais, correntes não muito intensas e substratos do tipo arenoso, com sedimentos baixa granulometria (Bridge, 2003; Martín Vide, 2007; Robert, 2003).

No entanto, estima-se que a percentagem da população mundial que depende dos recursos oriundos de bacias hidrográficas de montanha para a satisfação das suas necessidades, que incluem água para consumo humano e doméstico, uso agrícola e industrial, geração de energia e navegação comercial e recreativa, supere os 50% (López Alonso, 2005*a,b*), sendo que aproximadamente 27% da superfície da Terra correspondem a terras com altitudes superiores a 1000 m.

A importância das águas provenientes de áreas montanhosas para os recursos hídricos a nível mundial é ressaltada pelos resultados do estudo desenvolvido por Viviroli *et al.* (2003) em 19 bacias hidrográficas situadas em quatro continentes, que indicam que cerca de 63% das águas anualmente escoadas por essas bacias tem origem em regiões de montanha. Como apenas 32% da área das bacias estudadas por esses autores correspondem a zonas de montanha, deduz-se que o caudal específico nas áreas de montanha, ou seja, o caudal por

unidade de área da bacia de drenagem, é mais de três vezes e meia superior ao caudal específico característico das regiões de planície.

A influência das zonas de montanha é também destacada por Milliman e Syvitski (1992), que estudaram o aporte de sedimentos em 280 bacias hidrográficas de diversos continentes, tendo constatado que aproximadamente 80% da carga anual de sedimentos provêm das zonas montanhosas das bacias hidrográficas estudadas, que correspondem a menos de 20% da sua área total.

Os rios e cursos de água de montanha são caracterizados por declives longitudinais acentuados, com gradientes iguais ou superiores a 2% ou 0,002 m/m na maior parte da sua extensão (Jarrett, 1990). Além disto, distinguem-se pela acentuada rugosidade e resistência do seu substrato, formado por rochas e cascalho com elevada granulometria, bem como pela baixa variabilidade temporal e grande variabilidade espacial da morfologia do seu leito, tipicamente com uma configuração em degraus na direcção do escoamento, apresentando alternadamente quedas de água em degrau e piscinas naturais (*step-pool*) (Tinkler e Wohl, 1998; Wohl, 2000).

O material rochoso e sedimentar que constitui o substrato dos rios e cursos de água de montanha pode impor uma significativa resistência ao escoamento (Bathurst *et al.*, 1983; Lee e Fergusson, 2002; Romero Suárez, 2000), caracterizando-se este escoamento por ser marcadamente turbulento.

Os rios de montanha caracterizam-se também pelo seu regime hidrológico acentuadamente estacional, distinguindo-se igualmente por receber periodicamente elevadas cargas de sedimentos, produzidas em decorrência de tormentas e chuvas torrenciais, sendo o aporte de sedimentos a esses cursos de água, à exceção desses eventos extremos, usualmente bastante limitado (Ancey, 2005; Costa, 1984; Meunier, 1991, 1999).

O confinamento das linhas de água de montanha pelas vertentes contíguas, além de levar a que sejam receptoras de todos os sedimentos e detritos lenhosos oriundos destas encostas (Grant *et al.*, 1990; Wohl, 2000), limita fortemente o ajuste do declive por meio de meandramento lateral, como acontece com os rios de planície, forçando assim a ajustes na dimensão vertical (Chin, 2002).

O aumento da descarga nos rios e cursos de água de montanha leva a um aumento da profundidade do escoamento, reflectindo-se num acréscimo da sua energia, ao contrário do que sucede nos rios de planície, onde o aumento significativo da descarga pode levar ao transbordamento do leito principal e à inundação dos leitos de cheia. Isto faz com que a morfologia dos cursos de água de montanha seja em parte delineada por eventos infrequentes de grande magnitude.

O desprendimento e arraste de material rochoso em decorrência desses eventos extremos pode levar à obstrução das secções de medição e provocar danos aos equipamentos e estruturas nelas existentes (Prada *et al.*, 2005), fazendo com que a probabilidade dos equipamentos de monitorização resistirem a tais eventos de alta magnitude seja em geral muito reduzida.

Assim, não causa surpresa a relativa escassez de dados e de trabalhos sobre o transporte de sedimentos nesses cursos de água, podendo-se referir, de entre as excepções, os estudos desenvolvidos por Arattano e Franzini (2004), Barry *et al.* (2004), Batalla *et al.* (1999), Ryan *et al.* (2002), Thompson (2006) e Warburton (1992).

Assim, objectivando tentar compensar as dificuldades logísticas apontadas, parte do conhecimento existente sobre a dinâmica sedimentar em rios e cursos de água de montanha resulta do emprego de equações padrão de transporte de sedimentos (Jaeggi, 1995; López Alonso, 2003), porém a utilização de tais equações tem produzido resultados muitas vezes inconsistentes, com erros que chegam a atingir várias ordens de grandeza (Blizard e Wohl, 1998; Gomez e Church, 1989), o que realça o facto dos rios de montanha serem fundamentalmente distintos dos rios de planície, sendo frequentemente inapropriada a aplicação a cursos de água de montanha das teorias e resultados obtidos para canais aluviais (Schmidt e Ergenzinger, 1994).

Este fraco desempenho deve-se a distintos factores, de entre os quais se destaca a incapacidade de contemplar os efeitos das forças de arrasto sobre o perfil de velocidades nas equações de predição da velocidade e da tensão de arrastamento (Lee e Ferguson, 2002; Millar, 1999), o que tem como consequência a sobrestimação das forças hidráulicas responsáveis pelo transporte de sedimentos (Zimmermann e Church, 2001).

Em vista disso, Young *et al.* (2002) destacam o facto da escassez de dados para a validação dos modelos de transporte de sedimentos poder estar a levar ao emprego, em muitos estudos, de valores inadequados para os parâmetros das equações de transporte de sedimentos.

Na Ilha da Madeira, região de natural interesse, a quantidade de pontos de medição e a extensão das séries de dados disponíveis são claramente insuficientes para permitir uma melhor compreensão da dinâmica dos seus cursos de água e possibilitar uma correcta avaliação dos recursos hídricos superficiais (Gaspar, 2001; Gaspar e Portela, 2002). Tal situação verifica-se igualmente em Portugal continental e na Península Ibérica, ainda que em menor grau, em vista de alguns estudos sobre rios de montanha efectuados em Espanha, em particular na bacia hidrográfica do rio Ebro (López Alonso, 2005b; Verdú Arnal, 2003).

A Ilha da Madeira possui um relevo deveras acentuado e aproximadamente 65% da sua superfície apresenta declives superiores a 25%, estando cerca de ¼ dessa superfície localizada acima dos 1000 m de altitude (Prada *et al.*, 2003), o que faz com que a eventual ocorrência de precipitações intensas possa provocar cheias súbitas, deslizamento de terras e fluxos de detritos (Rodrigues, 2006; Rodrigues e Ayala-Caicedo, 2003).

De acordo com López Alonso (2005a), os fluxos sedimentares em áreas de montanha podem ser subdivididos em três categorias:

- (i) *fluxos de baixa concentração*, considerados neste trabalho, quando o escoamento transporta quantidades relativamente pequenas de sedimentos, apresentando concentrações da ordem de 5% (Meunier, 1991) até menos de 25% em volume, com densidade inferior a 1,3 g/cm<sup>3</sup> (Costa, 1984), comportando-se como um fluido newtoniano e apresentando um comportamento bifásico, uma vez que se pode assumir que o caudal sólido não condiciona hidraulicamente o caudal líquido;
- (ii) *fluxos hiperconcentrados*, quando transportam uma quantidade elevada de sedimentos, tanto em suspensão quanto de fundo, apresentando concentrações da ordem de 25% a 100%, com densidades na faixa de 1,3 a 1,8 g/cm<sup>3</sup> (Costa, 1984), o que não permite ignorar a fase sólida no cálculo da fase líquida, podendo comportar-se como um fluido

newtoniano ou não-newtoniano, conforme predomine o transporte de fundo de material granular ou o transporte em suspensão de material coesivo, respectivamente;

(iii) *fluxos de detritos*, constituídos por uma mistura de água e sedimentos com escalas de granulometria variando desde argilas a grandes pedregulhos, com concentração superior a 60% em volume ou 80% em peso (Lavigne e Suwa, 2004) e densidade maior que  $1,8 \text{ g/m}^3$  (Costa, 1984), podendo a concentração de sedimentos atingir 230% (Meunier, 1991), mistura esta que se comporta como um fluido não-newtoniano viscoelástico, não sendo possível tratar de forma independente a fase sólida e fase líquida para efeitos de cálculo.

## **2.2 Monitorização da concentração de sedimentos em suspensão**

Para a estimacão do transporte de sedimentos em suspensão é necessário determinar, simultaneamente, a concentraçao dos sedimentos em suspensao e o caudal responsavel pelo seu transporte.

Embora existam diferentes equipamentos e procedimentos para a amostragem manual ou automatica de sedimentos, que podem ser utilizados em estudos sobre o transporte sedimentar em suspensao em rios de planicie, descritos em detalhe em Boiten (2008), Carvalho (2008) e Carvalho *et al.* (2000), os mesmos, em regra, nao sao adequados para trabalhos em rios e cursos de agua de montanha turbulentos, com declives longitudinais acentuados e substrato formado por cascalho com elevada granulometria, seixos e blocos de rocha, nomeadamente sob condicoes hidrometeorologicas adversas, que aumentam o risco de ocorrencia de cheias subitas e fluxos de detritos e tornam impraticavel a medicao directa da concentraçao de sedimentos em suspensao.

No entanto, como o aumento da carga sólida em suspensão num rio ou curso de água, resultante da conjugação dos processos de erosão fluvial e pluvial, provoca um aumento correspondente da turbidez (Bakar *et al.*, 2007; Fenton, 2006), propriedade física que exprime a redução da transparência decorrente da interferência na passagem da luz através da água devido à presença de materiais em suspensão (Tomazoni *et al.*, 2005), é natural que, num contexto onde não estejam asseguradas as condições adequadas para a correcta amostragem de sedimentos pelos meios tradicionais, seja considerada a possibilidade de emprego de medições de turbidez da água na estimação da concentração dos sedimentos em suspensão (Minella *et al.*, 2008a,b).

Esta foi a opção adoptada neste estudo, tendo sido empregue um turbidímetro portátil para a medição da turbidez da água e posterior quantificação indirecta da concentração dos sedimentos em suspensão.

Segundo Bakar *et al.* (2007), embora o método mais comum para a estimação da carga sedimentar em suspensão envolva a relação entre a concentração de sedimentos em suspensão e o caudal, tal relação é fraca quando os aportes significativos de sedimentos ao curso de água acontecem de forma episódica, como é comum nas bacias de montanha, sendo possível, através da turbidez, obter previsões distintas e muito mais correctas da carga sedimentar em suspensão do que aquelas feitas com base no caudal fluvial (Christensen *et al.*, 2002; Lewis, 1996; Uhrich e Bragg, 2003).

Os turbidímetros propiciam uma redução significativa de tempo e de custos quando comparados com sistemas automáticos de amostragem de sedimentos em suspensão (WRTC, 2008) e, além disto, para a determinação da carga sólida e a compreensão dos processos erosivos em bacias hidrográficas, é sempre preferível o registo contínuo, passível de ser feito com recurso à turbidimetria, do que a amostragem discreta (Gippel, 1989).

No entanto, é importante ressaltar que as medições de turbidez são influenciadas pela granulometria dos sedimentos em suspensão (Bicalho, 2006; Christensen *et al.*, 2002), uma vez que um aumento na concentração de sedimentos com granulometria mais elevada não provoca um aumento na turbidez igual àquele que seria causado pela mesma concentração de sedimentos mais finos em

suspensão, que demoram mais tempo a assentar e apresentam mais superfícies reflectoras por unidade de massa (Schoellhamer e Wright, 2003).

Assim, para uma dada concentração de sedimentos em suspensão, o valor de turbidez medido será tanto maior quanto mais finos forem os sedimentos. Em outras palavras, há uma tendência para a subestimação da concentração total de sedimentos quando estão presentes frações com maior granulometria (Holliday *et al.*, 2003). Além disto, as medições contínuas de turbidez efectuadas com elevadas cargas sedimentares em suspensão tendem a apresentar grande variabilidade, pelo facto dos sedimentos não se manterem tão facilmente em suspensão.

O procedimento para a determinação indirecta da concentração de sedimentos em suspensão por meio da medição da turbidez da água consiste, basicamente, em converter para concentração de sedimentos em suspensão os valores de turbidez medidos durante o trabalho de campo, usando uma relação previamente estabelecida por regressão estatística a partir dos valores de turbidez obtidos em laboratório com amostras sintéticas constituídas por suspensões com concentrações conhecidas preparadas com sedimentos finos extraídos do curso de água em estudo (Carvalho *et al.*, 2000; Minella *et al.*, 2008a).

De forma a assegurar melhores resultados, é recomendável que, durante o trabalho experimental realizado em laboratório, sejam preparadas três ou mais suspensões distintas para cada concentração previamente definida e para cada tipo de sedimento proveniente dos cursos de água em estudo (Minella *et al.*, 2008b), devendo ser adoptados os valores médios de turbidez obtidos a partir dessas amostras sintéticas aquando da determinação estatística da relação entre a turbidez e a concentração de sedimentos em suspensão.

A correspondência experimentalmente estabelecida entre a concentração de sedimentos e a turbidez média das suspensões preparadas com sedimentos finos provenientes do curso de água em estudo será aproximadamente linear se as propriedades físicas e químicas dos sedimentos não variarem (Carvalho *et al.*, 2004) e as amplitudes das variações de turbidez das suspensões preparadas com cada uma das concentrações estabelecidas forem relativamente pequenas.

A relação linear assim obtida é necessária para a estimação da concentração de sedimentos em suspensão no curso de água em estudo a partir dos valores médios de turbidez medidos *in situ*.

No entanto, a relação entre a concentração de sedimentos em suspensão e a turbidez pode ser alterada em decorrência de variações sazonais e de alterações súbitas nas propriedades dos sedimentos e na cor e turbulência da água em resposta a eventos de precipitação intensa (Gippel, 1989).

A instalação do turbidímetro no local escolhido para a realização das medições deve ser feita de forma a posicionar o sensor de turbidez o mais próximo possível do centro do escoamento, porém relativamente abrigado contra possíveis danos provocados por blocos de rocha ou detritos lenhosos no caso de um aumento súbito do caudal, bem como protegido da incidência directa da luz solar, dada a sensibilidade dos turbidímetros ao espalhamento da luz visível pelos sedimentos em suspensão (Calhoun, 2000; Calhoun e Rasmussen, 1999), que poderia provocar erros nas leituras de turbidez efectuadas. Em cursos de água fortemente turbulentos, a presença de bolhas de ar na água contribui para a dispersão da luz incidente, podendo levar igualmente a medições de turbidez incorrectas (Gippel, 1989).

De forma a garantir a exactidão dos resultados fornecidos pelos turbidímetros, é necessário fazer-se previamente a sua calibração com o emprego de soluções padrão (Barron, 2005; Papacosta, 2002), utilizando um padrão distinto para cada gama do instrumento (Bicalho, 2006; Carvalho *et al.*, 2004), bem como a limpeza e a secagem do sensor de turbidez após cada medição, de forma a assegurar a correcção dos posteriores registos de turbidez. Esta acção deve ser rotineira e ser realizada sempre que existam mudanças nas características da água ou nas condições de medição (Benischke e Harum, 1990).

Embora a determinação do factor de conversão da turbidez medida para concentração de sedimentos em suspensão seja uma contribuição importante para a monitorização e a gestão de bacias hidrográficas (Tomazoni *et al.*, 2005), a monitorização contínua da concentração dos sedimentos em suspensão por meio da medição da turbidez da água esbarra no elevado preço dos turbidímetros comerciais, bem como na sua baixa autonomia e pequena capacidade de

armazenamento de dados, além do elevado risco de danos ou perda do equipamento nos cursos de água de montanha, caracterizados por grandes declives longitudinais, em condições hidrológicas adversas (Prada *et al.*, 2005).

Assim, uma possibilidade interessante é o emprego, para esse fim, de um conjunto de turbidímetros de baixo custo, instalados ao longo de diversas linhas de água da bacia hidrográfica em estudo, capazes de operar e de registar os dados de turbidez durante longos períodos de tempo, idealmente superiores a um mês, como o turbidímetro experimental desenvolvido com tal objectivo na Universidade da Madeira por Gonçalves *et al.* (2009).

Antes disso, diversos autores referiram turbidímetros experimentais passíveis de serem empregues na medição indirecta da concentração de sedimentos em suspensão em rios e cursos de água. O primeiro desses equipamentos foi, possivelmente, o turbidímetro relativamente simples descrito por James (1969), ao qual se seguiram diversos outros instrumentos mais aperfeiçoados, incluindo aqueles descritos por Lawler e Brown (1992) e por Papadopoulou *et al.* (1998), bem como, em meados da década passada, o projecto de turbidímetro de baixo custo de Adland e Huang (2005) e o turbidímetro desenvolvido por Orwin e Smart (2005). No entanto, mesmo com os enormes progressos conseguidos no campo da electrónica, ainda não existe um turbidímetro de baixo custo comercialmente disponível para tal fim.

## **2.3 Método da diluição de sal para a estimação do caudal**

A estimação do caudal, necessária para o cálculo do transporte de sedimentos em suspensão, pode ser efectuada de várias maneiras. No entanto, embora existam diferentes métodos e equipamentos que podem ser empregues na avaliação do escoamento superficial (Boiten, 2008), em especial em rios de planície, parte deles não são adequados para rios e cursos de água de montanha, com declives longitudinais acentuados e substrato formado por rochas e cascalho com elevada granulometria, nomeadamente sob condições hidrológicas adversas.

O método de medição do escoamento mais simples é o método volumétrico (Bortoluzzi e Fernandez, 2008), passível de ser empregue em linhas de água com baixos caudais, inferiores a 1,5 l/s (Back, 2006), que consiste basicamente em contabilizar o tempo de enchimento pela água de um recipiente de volume conhecido, embora não seja um método adequado para os propósitos deste estudo.

O mais tradicional método para a medição do escoamento em canais fluviais é o método da área/velocidade (Back, 2006; Boiten, 2008), com o emprego de um molinete hidráulico ou, em seu lugar, de um ADV (*Acoustic Doppler Velocimeter*).

O método da área/volume é aplicável a rios que possuam secções transversais regulares, o que, por regra, não acontece com os cursos de água de montanha, e que, além disso, possam ser atravessados com segurança. Além das questões da conformação do canal fluvial e da segurança de quem está a efectuar as medições, o custo do equipamento necessário para a medição da velocidade do escoamento pode constituir também um impeditivo para o emprego do método.

A utilização de perfiladores acústicos (*Acoustic Doppler Profiler / Acoustic Doppler Current Profiler*, ADP/ADCP) (Boiten, 2008), tipo de equipamento inicialmente utilizado apenas em trabalhos hidrográficos, embora pese seu elevado preço, tem ultimamente ganho terreno na medição do escoamento em canais fluviais, tendo a vantagem fornecer o campo de velocidades numa secção transversal do curso de água e não apenas a velocidade num único ponto dessa secção (Hartmann *et al.*, 2010).

No entanto, a existência de substrato rochoso na secção considerada, usual nos rios de montanha, pode levar ao aparecimento, no perfil de velocidades fornecido pelo ADCP, de células com valores de velocidade incorrectos (Silva e Bernardes, 2009), o que torna a utilização desse tipo de equipamento pouco adequada para os cursos de água de montanha, que, além disso, usualmente apresentam uma lâmina de água um pouco mais expressiva apenas durante o período de chuvas, sendo em regra necessária uma profundidade mínima de 0,5 m para o emprego dos métodos acústicos (Back, 2006).

A medição do escoamento numa determinada secção de um curso de água pode ser também efectuada por meio da construção ou instalação de um

descarregador ou de uma caleira (Back, 2006; Boiten, 2008), estruturas hidráulicas cuja relação entre o caudal e a altura de água é conhecida teoricamente.

A inexistência de tais estruturas de medição nas secções de interesse de rios de montanha, explicável pelo elevado risco da sua danificação ou mesmo destruição durante eventos hidrológicos extremos, como cheias súbitas e fluxos de detritos, conduz à consideração de métodos alternativos para a estimação do caudal, mais adequados a cursos de água de montanha, sendo natural a opção pelo emprego de traçadores (Silva *et al.*, 2009), nomeadamente químicos, utilizando métodos de diluição, com base em medições da condutividade eléctrica da água.

Embora traçadores fluorescentes, como a rodamina e a uranina, possam também ser empregues na estimação de caudais e seja possível a sua detecção mesmo em concentrações muito baixas, o que permite o seu emprego com caudais muito elevados, o equipamento necessário para a medição da concentração deste tipo de traçador tem um custo elevado, além dos próprios traçadores fluorescentes serem sensivelmente mais caros e mais difíceis de obter do que os sais usualmente utilizados como traçadores químicos (Moore, 2004b).

Na escolha do traçador químico a ser utilizado nos métodos de diluição, embora diferentes sais não tóxicos e solúveis mesmo em água fria tenham sido já testados e empregues, principalmente cloretos e brometos, nomeadamente de sódio e de potássio (Benischke e Harum, 1990), é normal a opção pelo cloreto de sódio (NaCl), o usual sal de cozinha, devido ao seu baixo preço, facilidade de obtenção, elevada solubilidade na água, não nocividade ao ambiente nas concentrações normalmente empregues e custo relativamente baixo do equipamento necessário para a medição da condutividade eléctrica da água (Bolognesi *et al.*, 2006; Moore, 2004b; Rescan, 2006).

Os métodos de diluição baseiam-se no princípio da continuidade (Boiten, 2008), assumindo que as quantidades do traçador e de água que passam por uma dada secção do curso de água são as mesmas que irão também fluir por outras secções mais a jusante e considerando que o caudal mantém-se constante durante a medição.

Os métodos de diluição são adequados para a medição do escoamento em canais fluviais cujos perfis das secções transversais, pela falta de regularidade,

resultante da presença de seixos e blocos de rocha, são difíceis de determinar, como é o caso dos cursos de água turbulentos, com acentuados declives longitudinais, típicos das regiões de montanha, bem como nos casos em que a velocidade de escoamento é demasiadamente elevada para poder ser medida com os tradicionais molinetes hidráulicos (Moore, 2004b).

Esses métodos indirectos de medição, além de muito convenientes para a avaliação do escoamento nas zonas de montanha, são igualmente adequados para a estimação de caudais em outras situações nas quais as condições de medição são particularmente difíceis (Gees, 1990), nomeadamente em regiões de mais altas latitudes, como na região da tundra, onde os cursos de água são tipicamente rasos e de leito rochoso (Spence e McPhie, 1997), bem como em outras regiões com cursos de água afectados pela presença de gelo (Capesius *et al.*, 2005; Fleming, 2008).

Os métodos de diluição têm sido também utilizados em outras situações onde os métodos tradicionais de estimação de caudais, como o método da área/volume, não podem ser empregues, incluindo a determinação do escoamento das águas de nascentes (Leite *et al.*, 2002; Radulović *et al.*, 2008) e de cavernas subterrâneas de formação calcária (Atkinson *et al.*, 1973), bem como a calibração de estruturas hidráulicas para medição de caudais e a avaliação da descarga de águas pluviais durante períodos de precipitação intensa (Gilman, 1977).

Tais métodos indirectos de medição são conhecidos pelo menos desde 1863 (Boiten, 2008), tendo passado a ser mais referidos na literatura a partir da segunda metade do século XX (Aastad e Sjøgen, 1954), sendo também há muito conhecida a sua potencialidade na medição indirecta do escoamento em pequenos cursos de água de montanha (Keller, 1973).

No entanto, até ao final da década de 1980, os métodos de diluição foram muito pouco utilizados, quando comparados com o tradicional método da área/volume, com o emprego de molinetes hidráulicos, devendo-se tal situação possivelmente à necessidade de equipamento específico ou, mais provavelmente, ao demorado e um tanto tedioso procedimento analítico subsequente necessário para a correcta aplicação desses métodos indirectos de medição (Benischke e Harum, 1990), envolvendo trabalho em laboratório e o posterior tratamento dos

dados obtidos, tendo por objectivo determinar a relação entre a concentração de sal e a condutividade eléctrica da água, relação esta praticamente linear para baixas concentrações (Moore, 2004b).

Os factores que governam a variabilidade temporal e espacial da condutividade eléctrica da água e o seu emprego como indicador da química da água e dos processos hidrológicos foram abordadas por Moore *et al.* (2008), que discutiram a relação entre a condutividade eléctrica e a temperatura da água, enfatizando a necessidade das medições de condutividade eléctrica serem ajustadas para uma temperatura de referência, de forma a ter em conta o efeito da temperatura da água, devendo ser aplicada uma correcção, linear ou não linear, às medições de condutividade eléctrica, sendo usualmente similares os resultados da aplicação dessas correcções, excepto para medições feitas a temperaturas mais baixas, situação na qual a aplicação de uma compensação não linear propicia resultados mais correctos.

A medição do escoamento por meio dos métodos de diluição exige que, no ponto de medição, a jusante do local de injeção, pelo menos 98% do traçador encontre-se já perfeitamente misturado com a água, sendo toleráveis percentagens de mistura levemente menores, mas idealmente não inferiores a 95%, apenas quando as condições físicas não são propícias à adequada mistura ou quando o caudal está a variar muito rapidamente (Duerk, 1983).

Sob condições adequadas, os métodos de diluição fornecem resultados com erros não superiores a 5% (Day, 1977; Moore, 2004b), exactidão equivalente àquela proporcionada pelos métodos convencionais de medição.

A injeção do sal utilizado como traçador no curso de água pode ser feita de maneira contínua ou de forma súbita, praticamente instantânea (Boiten, 2008; Moore, 2004b), dando assim origem a diferentes métodos de diluição.

O processo de injeção de uma solução salina de concentração conhecida a uma taxa constante, descrito detalhadamente por Boiten (2008) e por Moore (2004b), é mais adequado para a medição indirecta de baixos caudais, inferiores a 100 l/s, por poder propiciar resultados mais exactos do que os métodos de injeção instantânea nessas condições de escoamento.

Para a sua aplicação, o método de injeção contínua exige o emprego de um recipiente adequado, conhecido como frasco de Mariotte, ou dispositivo semelhante. Moore (2004a) descreve a construção de um frasco de Mariotte bastante simples e de baixo custo, mostrado na Figura 2.1, apropriado para a injeção do traçador a uma taxa constante em pequenos cursos de água.



Figura 2.1 – Material necessário à construção de um frasco de Mariotte (extraído de Moore, 2004a).

Para a estimação de caudais mais elevados, é conveniente a injeção súbita do traçador, podendo a injeção do sal utilizado como traçador ser neste caso feita a seco ou com este previamente dissolvido em água do próprio canal fluvial.

A abordagem tradicional é a da injeção praticamente instantânea de sal já dissolvido na água, método este baseado no balanço volumétrico, sendo conhecido como *slug injection* (Moore, 2004b, 2005).

No entanto, para caudais superiores a cerca de 15 m<sup>3</sup>/s, o volume necessário de solução salina pode tornar impraticável o emprego deste método de medição (Moore, 2004b).

Para superar esse problema, a injeção do sal pode ser feita a seco, baseando-se este método na conservação da massa do traçador (*mass balance method*) e não no balanço volumétrico (Elder e Kattelman, 1990; Hudson e Fraser, 2002, 2005).

No entanto, o método da conservação da massa pode ser aplicado tanto com o traçador na forma seca quanto em solução. Como é mais usual trabalhar com o sal seco, o método de balanço de massas é, neste caso, também conhecido como método de injeção a seco (*dry injection method*) (Hudson e Fraser, 2005).

Embora o método de injeção a seco do sal usado como traçador possibilite a medição indirecta de caudais mais elevados, o mesmo apresenta a desvantagem de exigir um maior afastamento entre os pontos de injeção e de medição, de forma a assegurar a completa dissolução do sal na água (Moore, 2004b).

O método de diluição baseado no balanço de massas consiste basicamente na injeção praticamente instantânea, no curso de água, de uma massa conhecida do traçador químico escolhido, sendo a quantificação da sua dispersão feita por meio da medição da variação da condutividade eléctrica da água durante a passagem da nuvem salina, num ponto a jusante do local onde o traçador foi injectado, e pela posterior integração numérica da área sob a curva da concentração de sal, construída a partir dos valores de condutividade medidos (Hudson e Fraser, 2005).

Neste trabalho, foi adoptado o método de balanço de massas, porém com o traçador em solução, procedimento que consiste basicamente em dissolver uma massa conhecida do traçador, neste caso sal de cozinha (NaCl) refinado, num recipiente adequado, em água extraída da própria ribeira em estudo, sendo a solução salina assim preparada injectada de forma súbita no curso de água, num ponto a montante do local de medição e situado a uma certa distância deste, idealmente numa zona de estreitamento do canal fluvial, com maior turbulência, de forma a garantir a sua completa mistura.

A distância de mistura (*mixing length*) deve idealmente ser da ordem de 20 a 25 vezes a largura do canal (Day, 1977), embora muitas vezes um afastamento de

apenas dez vezes seja considerado suficiente para que ocorra uma completa mistura (Hudson e Fraser, 2005), nomeadamente em cursos de água de montanha, em vista da sua típica turbulência.

Após a injeção do traçador, o mesmo mistura-se rapidamente na coluna de água na direcção da profundidade e menos rapidamente na direcção transversal ao escoamento. Como a velocidade de escoamento tende a ser maior no centro do curso de água do que nas suas margens, a nuvem salina estende-se para jusante (Figura 2.2), num processo conhecido como dispersão longitudinal (Hudson e Fraser, 2005). Esta forma de dispersão faz com que a nuvem salina apresente concentrações bastante baixas na sua zona frontal, uma zona central com concentrações elevadas, seguida de uma zona posterior com concentrações decrescentes.



Figura 2.2 – Dispersão da solução salina ao longo do canal fluvial.

Sendo a medição da condutividade eléctrica da água feita num ponto a jusante do local de injeção do traçador, onde esteja assegurada a sua completa mistura, a passagem da nuvem salina irá provocar um progressivo aumento da condutividade eléctrica do seu valor de base até um valor de pico, correspondente à passagem do núcleo da nuvem salina, seguindo-se uma diminuição gradual da condutividade eléctrica, até que seja novamente atingido o seu valor de base, tendo como resultado uma curva característica (Moore, 2005), como ilustra a Figura 2.3,

que apresenta a variação da condutividade eléctrica e a correspondente variação da concentração de sal na água durante uma medição indirecta de caudal pelo método do balanço de massas realizada em Russel Creek, Canadá, em Outubro de 2003 (Hudson e Fraser, 2005).

O processo de dispersão longitudinal é responsável pela redução progressiva do pico de condutividade eléctrica à medida que a nuvem salina desloca-se para jusante. O tempo de passagem do núcleo da nuvem salina é inversamente proporcional à velocidade média de escoamento, sendo a extensão dessa nuvem dependente da dinâmica do processo de dispersão longitudinal.

O tempo típico de passagem da nuvem salina pelo ponto de medição varia tipicamente de alguns minutos, como no exemplo da Figura 2.3, até cerca de 20 minutos ou mesmo mais (Hudson e Fraser, 2005), nomeadamente no caso de pequenos caudais e baixas velocidades de escoamento.

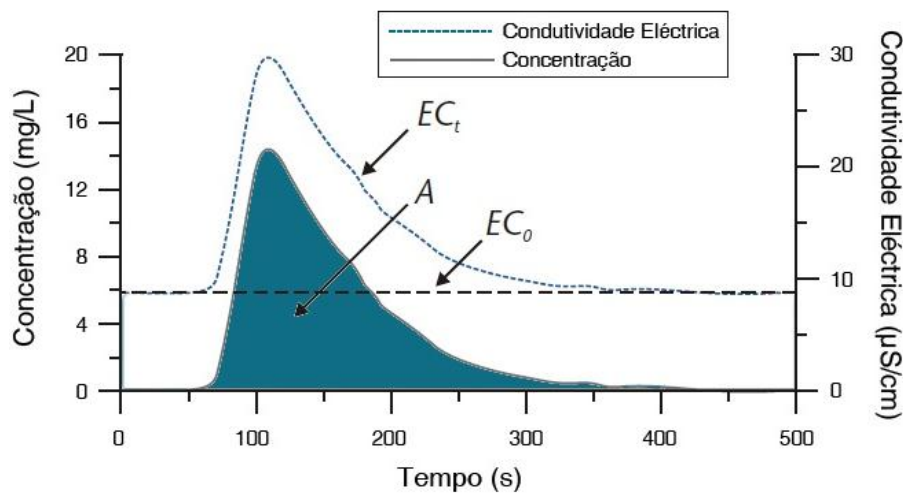


Figura 2.3 – Variação da condutividade eléctrica e da correspondente concentração de sal, Russel Creek, Outubro de 2003 (adaptado de Hudson e Fraser, 2005).

## **3 MATERIAL E MÉTODOS**

### **3.1 Caracterização da área de estudo**

A bacia hidrográfica em estudo localiza-se na Ilha da Madeira, região de origem vulcânica situada no Oceano Atlântico Nordeste, com complexa topografia, caracterizada por altas montanhas e vales profundos, com vertentes muito íngremes, sendo constituída principalmente por rochas basálticas e formações sedimentares (Carvalho e Brandão, 1991).

A ilha é caracterizada por bacias hidrográficas com áreas relativamente pequenas, como se pode deduzir da Figura 3.1, com linhas de água principais com uma extensão média de aproximadamente 10 km e desníveis acentuados, superiores a 1.400 m de montante a jusante (Valente, 2010), o que dá origem a escoamentos fluviais de regime turbulento e de carácter torrencial, típicos de zonas de montanha.

O local exacto onde foram realizadas as medições da turbidez e da condutividade eléctrica da água situa-se na Ribeira Seca do Faial, num ponto com coordenadas geográficas aproximadas de 32°45'44,9" de latitude N e 16°52'38,7" de longitude W, indicado na Figura 3.2, localizado na bacia hidrográfica da Ribeira do Faial, na região norte da Ilha da Madeira, no concelho de Santana, numa zona conhecida como Sítio das Cruzinhas.



No entanto, praticamente todas as ribeiras estão com as suas características naturais alteradas em consequência da intempérie de 20 de Fevereiro de 2010 (Fragoso *et al.*, 2012) e dos subsequentes trabalhos de limpeza e de remoção de entulhos e materiais lenhosos realizados principalmente mais a montante das mesmas e, em alguns casos, da execução de obras de regularização e canalização, com o revestimento do fundo e a construção de muralhas em betão ciclópico, dificultando com isto, de forma considerável, o correcto estudo da concentração e do transporte de sedimentos em suspensão nesses cursos de água.

Aquando do processo de escolha do local ideal para a realização do trabalho de campo, fez-se inicialmente uma selecção prévia das áreas e ribeiras de potencial interesse, com base numa análise cartográfica e no conhecimento de campo da região. Contudo, em função das alterações das características naturais antes referidas, foi necessário posteriormente efectuar uma inspecção cuidadosa das ribeiras seleccionadas, de modo a verificar as condições actuais dos troços potencialmente mais adequados para a realização deste estudo.

As ribeiras seleccionadas e vistoriadas foram várias, nomeadamente a Ribeira de Santa Luzia, a Ribeira do Lajeado, a Ribeira do Alecrim, a Ribeira da Madalena, a Ribeira da Ponta do Sol, a Ribeira da Ribeira Brava, a Ribeira dos Socorridos, a Ribeira de São Vicente, a Ribeira dos Moinhos, a Ribeira do Porco, o Ribeiro Frio, a Ribeira da Metade e a Ribeira Seca do Faial, tendo sido esta última a escolhida para a realização deste estudo, embora também tenham sido recolhidos sedimentos nas duas primeiras para a realização de parte do trabalho laboratorial aqui descrito.

Os principais factores considerados na escolha do local de estudo foram a facilidade de acesso ao leito da ribeira, as condições de segurança para a permanência junto ao ponto de medição, especialmente sob condições hidrometeorológicas adversas, a inexistência de vegetação e de detritos lenhosos na zona de escoamento, bem como a preservação das características naturais do curso de água e a sua morfologia, tendo em conta ser necessário um canal com largura não muito acentuada e com a presença de zonas de estreitamento para a correcta aplicação da metodologia empregue nomeadamente na estimação do caudal.

## 3.2 Estimação da concentração de sedimentos em suspensão

### 3.2.1 Equipamento utilizado

Embora existam diferentes equipamentos para a amostragem de sedimentos (Boiten, 2008; Carvalho *et al.*, 2000; Carvalho, 2008), que podem ser utilizados em estudos sobre o transporte de sedimentos em suspensão em rios de planície, os mesmos, em regra, não são adequados para trabalhos realizados em rios e cursos de água de montanha.

Assim, neste estudo, optou-se pela utilização de um turbidímetro portátil para a medição da turbidez da água e posterior quantificação indirecta da concentração dos sedimentos em suspensão.

O turbidímetro empregue, tanto nos trabalhos realizados *in situ* quanto em laboratório, foi o modelo Analite NEP 160, com um sensor NEP 260, da marca McVan Instruments, mostrado na Figura 3.3, capaz de medir a quantidade de material sólido em suspensão a partir da luz dispersa num ângulo de 90° em relação a um feixe de luz incidente, em conformidade com a norma ISO 7027.

O equipamento utilizado permite realizar medições de turbidez na faixa de 0 a 3000 NTU (*Nephelometric Turbidity Units*), suficiente para a determinação da turbidez da água nas ribeiras da Ilha da Madeira, excepto no caso de eventos hidrológicos extremos, uma vez que medições de turbidez acima dos 3000 NTU correspondem a cargas de sedimentos tão elevadas que tornam impraticável a quantificação indirecta da sua concentração pelo método de estimação adoptado, que tem sido utilizado com sucesso em muitos outros estudos, como, por exemplo, Christensen *et al.* (2002), Fenton (2006) e Minella *et al.* (2008a).

Como o turbidímetro Analite NEP 160 é capaz de armazenar somente 100 leituras, incluindo, além da turbidez, a data e o horário das medições, tornou-se necessário, tanto em laboratório quanto no trabalho de campo, efectuar o descarregamento periódico dos dados para um equipamento externo, no caso um computador portátil, capaz de guardar um volume muito maior de dados.



Figura 3.3 – Turbidímetro utilizado.

No laboratório, uma estufa com ventilação forçada foi utilizada na secagem das amostras de sedimentos recolhidas nas ribeiras em estudo. Para a sua recolha, foram empregues, no campo, um martelo de geólogo, uma pá e um peneiro manual.

A peneiração mecânica das amostras de sedimentos, após a sua secagem, foi efectuada com o auxílio de um agitador de peneiros electromagnético modelo AS 200 Digit, da marca Retsch, utilizando um conjunto de peneiros de laboratório da série ASTM (*American Society for Testing and Materials*).

Uma balança analítica electrónica Mettler Toledo, modelo AG245, mostrada na Figura 3.4, foi empregue na obtenção, por meio de pesagem, das quantidades da fracção mais fina de sedimentos de cada uma das amostras necessárias para a obtenção das suspensões com as diferentes concentrações desejadas. A referida balança analítica possui uma capacidade máxima de 41 g com precisão de 0,01 mg ou de 210 g com precisão de 0,1 mg, sendo esta última a escala adoptada.

Para a medição da turbidez das suspensões com distintas concentrações, transferidas dos balões volumétricos para gobelés de 500 ml, os sedimentos finos foram mantidos em suspensão com a ajuda de um agitador magnético J. P. Selecta Agimatic-N, com velocidade regulável de 60 a 1600 rpm, mostrado na Figura 3.5.



Figura 3.4 – Balança analítica.



Figura 3.5 – Agitador magnético.

Finalmente, na preparação das suspensões com concentrações de sedimento conhecidas, foram utilizados balões volumétricos de 1000 ml, com tampa de plástico, sendo toda a água destilada utilizada produzida pelo destilador de água do Centro de Estudos da Macaronésia – CEM/UMA.

### 3.2.2 Trabalho de campo

Como referido na Secção 3.1, os principais critérios tidos em conta na escolha do local de estudo, situado na bacia hidrográfica da Ribeira Seca do Faial, na zona das Cruzinhas, foram a morfologia do curso de água, visto ser necessário um canal com largura relativamente reduzida e com zonas de estreitamento para a aplicação da técnica da diluição de sal na estimação do caudal, a inexistência de vegetação submersa e de detritos lenhosos na zona de escoamento, por poderem alterar a passagem da nuvem salina e reter sedimentos, a preservação das características naturais do curso de água, sobretudo após as alterações da paisagem provocadas pelo evento extremo de Fevereiro de 2010, bem como a facilidade de acesso e de permanência junto ao leito da ribeira em segurança, nomeadamente sob condições hidrometeorológicas desfavoráveis.

O acompanhamento das previsões do tempo e das imagens de satélites meteorológicos levou à escolha dos dias 5 a 7 de Outubro de 2010 para a realização do trabalho de campo, tendo em conta a aproximação de uma frente com características que faziam prever a ocorrência de precipitações com alguma intensidade e duração não muito longa, concentrada principalmente no dia 6 daquele mês.

A Figura 3.6 apresenta uma dessas imagens, na região do infravermelho térmico (centrado no comprimento de onda de 10,8  $\mu\text{m}$ ), adquirida pelo satélite meteorológico geoestacionário Meteosat-9 (MSG-2) no dia 5 de Outubro de 2010, mostrando a aproximação da banda de precipitação relativamente estreita associada àquela frente, que levou à escolha do período antes mencionado como o mais promissor para a realização do trabalho de campo aqui descrito.

A precipitação efectiva registada indica ter, entretanto, ocorrido um significativo enfraquecimento e dissipação da referida banda de precipitação, como mostram os dados colhidos nos dias 6 e 7 de Outubro de 2010 — apresentados no Anexo 1 — nas estações meteorológicas do Instituto de Meteorologia e nos postos udométricos mantidos pelo Laboratório Regional de Engenharia Civil, indicados na Figura 3.7, situados na envolvência do local de estudo.

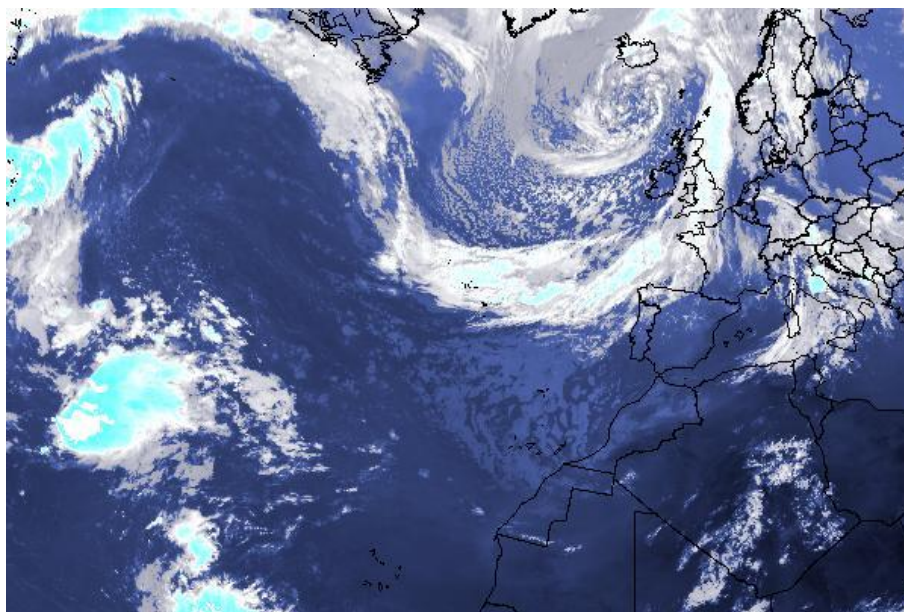


Figura 3.6 – Imagem do satélite Meteosat-9 na banda do infravermelho às 08:00 UTC do dia 05/10/2010.

A instalação do equipamento no local de medição escolhido com base nos critérios antes referidos, realizada no primeiro dia do trabalho de campo, foi feita de modo a posicionar e fixar os sensores o mais próximo possível do centro da zona de escoamento, num local relativamente protegido de eventuais danos provocados por rochas ou detritos lenhosos, no caso de um rápido aumento de caudal, e sem a incidência directa da luz solar sobre o sensor de turbidez, o que poderia acarretar erros nas medições.

Após a instalação e teste do equipamento, ainda no primeiro dia de trabalho de campo, foram efectuadas medições da turbidez e da condutividade eléctrica da água, objectivando estimar a concentração de sedimentos em suspensão e o caudal antes da ocorrência da precipitação esperada.

Durante o período de estudo, as medições de turbidez e de condutividade eléctrica foram realizadas de forma alternada, de modo a que a presença da nuvem de sal decorrente do emprego da técnica utilizada para a medição de caudal não provocasse a alteração da turbidez da água, tendo sido efectuadas oito medições de turbidez, cinco delas no dia 6 de Outubro e três no dia 7, apresentadas na Secção 4.3, além de uma medição preliminar, aqui não apresentada, feita no dia 5 do mesmo mês.

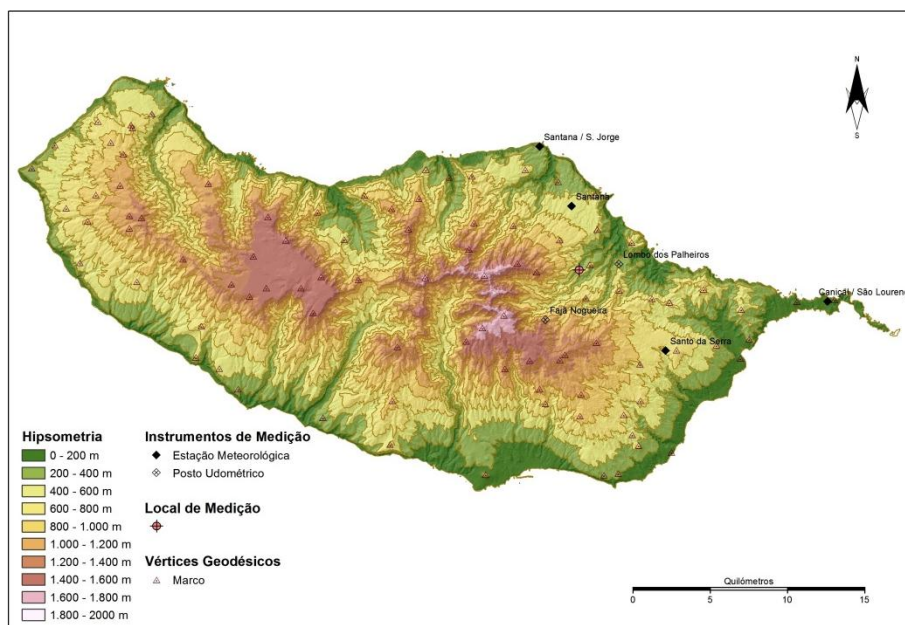


Figura 3.7 – Localização das estações meteorológicas e dos postos udométricos situados no entorno do local de medição.

O número bastante reduzido de medições de turbidez deveu-se à falta de equipamento de suporte eléctrico, capaz de garantir a recarga das baterias e a alimentação dos equipamentos, bem como à ausência dos meios necessários para assegurar a correcta protecção dos materiais e equipamentos utilizados e permitir a continuidade dos trabalhos durante o período nocturno sob condições ambientais adversas.

Após cada medição da turbidez da água, o sensor foi adequadamente limpo e seco, de modo a garantir a correcção dos registos posteriores, sendo os dados obtidos imediatamente transferidos para o computador portátil, para posterior processamento, em função do *data logger* incorporado no turbidímetro só ser capaz de guardar 100 registos.

Como já referido, durante o trabalho de campo, foram também recolhidas amostras de sedimentos, provenientes do fundo e das margens do curso de água em estudo, com recurso a um martelo de geólogo e a uma pá, sendo o material de maior granulometria separado da fracção mais fina com ajuda de um peneiro manual antes de ser embalado e etiquetado para posterior análise em laboratório.

Cabe aqui referir que tal recolha de amostras de sedimentos foi também realizada em dois outros cursos de água, nomeadamente na Ribeira do Lajeado, em dois pontos distintos, e na Ribeira de Santa Luzia.

### **3.2.3 Trabalho em laboratório**

No laboratório, as amostras previamente sujeitas à peneiração manual durante o trabalho de campo, devidamente etiquetadas e lacradas em sacos de plástico e transportadas até ao laboratório de Bioanálises e Biomateriais, pertencente ao Centro de Estudos da Macaronésia (CEM/UMa), foram submetidas a secagem em estufa com ventilação forçada, à temperatura de 60°C, durante pelo menos 24 horas.

Após a secagem, os sedimentos foram novamente peneirados mecanicamente, utilizando um agitador de peneiros electromagnético modelo AS 200 Digit, da marca Retsch, e um conjunto de peneiros de laboratório, objectivando separar a fracção mais fina, constituída basicamente por silte e argila, por meio de um peneiro nº 200 ASTM, de malha quadrada com abertura de 0,075 mm.

As amostras dos sedimentos mais finos colhidos nas ribeiras foram divididas em diversas porções menores, por meio de pesagem, com recurso a uma balança analítica de precisão, para a preparação de suspensões com concentrações de sedimento conhecidas — nomeadamente 250 mg/l, 500 mg/l, 750 mg/l, 1000 mg/l, 1250 mg/l, 1500 mg/l, 1750 mg/l, 2000 mg/l, 2250 mg/l, 2500 mg/l, 2750 mg/l, 3000 mg/l, 3500 mg/l, 4000 mg/l, 4500 mg/l e 5000 mg/l — acondicionadas em balões volumétricos com capacidade de 1 litro, tendo sido preparadas pelo menos três suspensões de cada concentração (identificadas, nas figuras da Secção 4.2 e dos Anexos 3 a 5, com as cores verde, azul e vermelho).

Estas suspensões de concentração conhecida foram despejadas em gobelés, com cerca de 500 ml de volume, para a medição da turbidez da água, sendo os sedimentos mantidos em suspensão por um agitador magnético à velocidade de 1000 rotações/min e à temperatura ambiente, tendo sido guardados pelo equipamento, para cada suspensão, 100 leituras de turbidez, sendo os dados de

turbidez imediatamente transferidos para um computador portátil devido à limitada capacidade do *data logger* do turbidímetro.

Durante o trabalho em laboratório, entre cada medição de turbidez das suspensões com concentrações conhecidas, o sensor do turbidímetro, previamente calibrado, foi limpo e seco com ar comprimido, de modo a assegurar a correcta leitura dos dados.

Objectivando verificar o efeito do tipo de sedimentos na turbidez de suspensões com igual concentração, foram também preparadas suspensões com sedimentos provenientes de outros cursos de água, nomeadamente da Ribeira do Lajeado e da Ribeira de Santa Luzia.

Na Ribeira do Lajeado, os sedimentos foram recolhidos em dois pontos distintos, aqui identificados como ponto nº 1 e ponto nº 2, situados respectivamente a 1405 m e a 1380 m de altitude, tendo as suspensões com eles preparadas concentrações de 500 mg/l, 1000 mg/l, 1500 mg/l, 2000 mg/l, 2500 mg/l, 3000 mg/l, 3500 mg/l e 4000 mg/l para cada ponto de recolha.

Já na Ribeira de Santa Luzia os sedimentos foram colhidos em apenas um ponto, situado a 1625 m de altitude, tendo sido com eles preparadas suspensões com concentrações de 250 mg/l, 500 mg/l, 750 mg/l, 1000 mg/l, 1250 mg/l, 1500 mg/l, 1750 mg/l, 2000 mg/l, 2250 mg/l, 2500 mg/l, 2750 mg/l, 3000 mg/l, 3250 mg/l, 3500 mg/l, 3750 mg/l e 4000 mg/l.

Os valores de turbidez das suspensões preparadas com os sedimentos provenientes dessas duas ribeiras são apresentados sob a forma tabular e gráfica nos Anexos 2 a 5.

## 3.3 Estimação do caudal

### 3.3.1 Equipamento utilizado

A estimação do caudal, necessária para o cálculo do transporte de sedimentos em suspensão, foi efectuada pelo método da diluição de sal (Hudson e Fraser, 2005; Moore, 2004b, 2005), com base em medições da condutividade eléctrica da água.

Para tal, foi empregue um condutivímetro portátil WTW Cond 3310, previamente calibrado, com um sensor de condutividade TetraCon 325, mostrado na Figura 3.8. Este instrumento possui uma tripla escala (0,00 a 1000 mS/cm, 0,000 a 1,999  $\mu$ S/cm e 0,00 a 19,99  $\mu$ S/cm) e compensação não linear de temperatura, sendo o intervalo de amostragem variável de 1 s a 60 min.



Figura 3.8 – Condutivímetro utilizado.

O referido condutivímetro é capaz de armazenar 5000 registos, cada um deles contendo, além da condutividade eléctrica, a data, o tempo e a temperatura medida pelo equipamento, obedecendo assim às exigências das boas práticas de laboratório (*Good Laboratory Practices, GLP*).

Uma balança electrónica portátil ProScale XC 2000 (Figura 3.9), com capacidade máxima de 2000 g e precisão de 0,1 g, foi utilizada durante o trabalho de campo para a pesagem do sal de cozinha (cloreto de sódio, NaCl), escolhido como traçador.



Figura 3.9 – Balança electrónica portátil utilizada no trabalho de campo.

Um balde plástico com capacidade para 12 litros foi empregue, após a pesagem, para a dissolução da quantidade de sal necessária em água extraída da ribeira em estudo.

A medição da distância entre o local de despejo das soluções assim preparadas e o ponto de registo da condutividade eléctrica da água foi efectuada com recurso a um distanciómetro laser portátil Leica Geosystems Disto D5, com alcance normal de 100 m ou até 200 m com o emprego de uma placa alvo e precisão de 1,0 mm.

Garrafas de plástico de 1,5 litros, devidamente etiquetadas, foram utilizadas na colheita de amostras de água da Ribeira Seca para posterior análise em laboratório.

No laboratório, as pesagens necessárias para a determinação da relação entre a condutividade eléctrica e a concentração de sal, usando amostras de água da ribeira em estudo, foram efectuadas com a balança analítica de precisão descrita

na Sub-secção 3.2.1, sendo a vidraria utilizada com as soluções salinas a mesma referida anteriormente.

Finalmente, foi utilizado um computador portátil, mostrado na Figura 3.10, para o armazenamento e posterior tratamento dos dados de condutividade eléctrica da água adquiridos tanto no trabalho de campo quanto em laboratório.



Figura 3.10 – Principais equipamentos utilizados no trabalho de campo.

### 3.3.2 Trabalho de campo

O trabalho de campo para a realização das medições de condutividade eléctrica da água objectivando a estimação do caudal com a utilização da técnica da diluição de sal (Hudson e Fraser, 2005; Moore, 2004b; 2005) teve início na tarde do dia 5 de Outubro de 2010, antes do início da precipitação esperada em função da aproximação de uma frente com características propícias à ocorrência de precipitações com alguma intensidade durante um período de tempo não muito longo, tendo por base as previsões do tempo e imagens de satélites meteorológicos.

Além da consideração dos factores para a escolha do local para instalação do equipamento de medição referidos na Secção 3.1, foram ainda tidos em conta outros requisitos necessários à correcta aplicação da técnica adoptada.

Dentre tais requisitos, pode-se referir como mais importantes o posicionamento do sensor do condutivímetro no centro do curso de água, a jusante de um troço — delimitado pelo local de despejo da solução salina e o ponto de medição da condutividade — sem a existência de “piscinas” naturais ou de desvios no curso de água, que levariam à alteração do escoamento da solução salina, escolhendo-se o ponto de medição de modo a coincidir com uma zona de estreitamento do canal.

Como a turbulência provocada pelo estreitamento do canal pode influenciar nas medições de condutividade eléctrica, teve-se ainda o cuidado de posicionar e fixar o sensor no interior da água, num local onde fosse mínima a formação de bolhas de ar e onde estivesse relativamente protegido de eventuais danos provocados pela acção de rochas e detritos lenhosos, nomeadamente em condições hidrometeorológicas adversas, como mostra a Figura 3.11.

O despejo da solução salina foi feito a montante do troço seleccionado, numa zona relativamente estreita do canal, livre de vegetação e de detritos lenhosos que pudessem reter ou retardar a passagem da nuvem salina.

Como traçador foi escolhido o sal de cozinha (cloreto de sódio, NaCl) refinado, devido à sua menor granulometria e conseqüente maior facilidade de diluição na água, sal este que, além do baixo custo e facilidade de obtenção, tem a vantagem de não ser nocivo ao ambiente nem aos seres vivos nas concentrações utilizadas.

A existência de piscinas naturais a montante e a jusante do troço escolhido impediu um maior distanciamento entre o local de despejo e o ponto de medição. No entanto, embora a distância ideal entre esses pontos seja da ordem de 20 a 25 vezes a largura do canal (Day, 1977; Elder e Kattelman, 1990), em muitos casos um afastamento de aproximadamente dez vezes é suficiente para a obtenção de resultados confiáveis com o emprego da técnica da diluição de sal (Hudson e Fraser, 2005).



Figura 3.11 – a) Localização do condutivímetro junto à linha de água; b) Detalhe do sensor mergulhado na água.

Este requisito foi plenamente satisfeito no presente estudo, ainda mais em função da prévia dissolução do sal antes da sua injeção no curso de água, sendo a distância medida, neste caso, de cerca de 20 m.

O despejo da solução salina (Figura 3.12), preparada num recipiente apropriado à adequada diluição do sal antes da sua injeção, foi feito de forma instantânea, no centro da linha de água, como exige o método do balanço de massa para a estimação do caudal (Elder e Kattelman, 1990; Hudson e Fraser, 2005), utilizado neste estudo.



Figura 3.12 – Despejo da solução salina no curso de água.

A primeira medição da condutividade eléctrica da água foi realizada no próprio dia 5 de Outubro, objectivando estimar o caudal de base no troço da Ribeira Seca escolhido para este estudo após vários dias seguidos sem a ocorrência de precipitação. Para tal, foram empregues 250 g de sal, adoptando-se na aquisição dos dados de condutividade um intervalo de amostragem de 1 s.

Após a retoma dos trabalhos, na manhã do dia 6, durante a preparação do equipamento, constatou-se ser impossível efectuar a transferência para o computador dos dados adquiridos no dia anterior, problema este só resolvido vários dias após o término da campanha de medições.

As leituras de condutividade eléctrica ficaram, portanto, limitadas pela capacidade de memória do *data logger* do equipamento utilizado, capaz de armazenar somente 5000 registos GLP, o que obrigou a uma cuidada gestão do

tempo de recolha de dados nas medições seguintes, tendo em conta as variações de caudal observadas e as quantidades de sal empregues.

Assim, durante o período de execução do trabalho de campo — devido às limitações de memória e aos problemas na transferência de dados do equipamento utilizado, antes referidos — foi possível efectuar apenas mais quatro medições de condutividade eléctrica, alternadas com as medidas de turbidez da água.

No dia 6 de Outubro, já durante a ocorrência de precipitação, foram feitas duas medições de condutividade eléctrica, utilizando-se neste caso 500 g de sal em cada uma delas, quantidade esta escolhida em função do visível aumento do caudal, mantendo-se na aquisição dos dados de condutividade o mesmo intervalo de amostragem de 1 s.

No dia 7, foram realizadas as duas restantes medições de condutividade eléctrica da água possíveis de serem registadas na memória do equipamento, a última delas efectuada algumas horas após o término da precipitação, já na fase de recessão do escoamento.

Em cada uma dessas medições foram empregues 250 g de sal, adoptando-se na primeira delas um intervalo de amostragem de 1 s, intervalo que foi alargado para 5 s na última medição, em função da já referida limitação de memória do equipamento utilizado.

Nas cinco medições, o tempo de passagem da nuvem salina, necessário para a estimação do caudal, foi extraído dos registos GLP armazenados no próprio condutivímetro, registos estes efectuados desde o momento da injeção da solução salina no curso de água até ao retorno da condutividade eléctrica ao valor estável inicialmente observado, após a passagem da nuvem salina.

Antes e depois de cada uma das medições, foi feita a limpeza e a secagem do sensor do condutivímetro, de modo a eliminar ao máximo os vestígios de sal e de impurezas presentes na água que pudessem alterar as leituras efectuadas pelo equipamento.

Imediatamente após cada uma das medições, foram colhidas amostras de água na ribeira em estudo, em garrafas de plástico de 1,5 litros, para a posterior

determinação, em laboratório, da relação entre a concentração de sal na água e a sua condutividade eléctrica.

### **3.3.3 Trabalho em laboratório**

O trabalho em laboratório e o posterior tratamento dos dados obtidos, feitos com o objectivo de determinar a relação entre a concentração de sal e a condutividade eléctrica da água de forma a permitir a estimação do caudal com o emprego da técnica da diluição de sal, consistiram basicamente na preparação de soluções salinas com concentrações conhecidas, na medição da sua condutividade eléctrica e no emprego do modelo de regressão linear para o ajuste dos dados experimentais assim obtidos.

Inicialmente, as diversas amostras de água recolhidas durante o trabalho de campo realizado na Ribeira Seca, transportadas para o laboratório em garrafas de plástico com capacidade de 1,5 litros, foram misturadas em volumes iguais, visando a sua homogeneização antes da sua transferência para balões volumétricos de 1 litro, onde foi feita a preparação das soluções salinas.

A pesagem das quantidades de sal necessárias para o preparo das soluções com diferentes concentrações de sal foi feita com a utilização da balança analítica de precisão descrita na Sub-secção 3.2.1.

As soluções salinas assim preparadas — com concentrações de 0,0025 g/l, 0,0065 g/l, 0,0125 g/l, 0,025 g/l, 0,05 g/l, 0,1 g/l, 0,5 g/l, 1 g/l, 1,5 g/l, 2 g/l e 2,5 g/l — foram transferidas dos balões volumétricos para gobelés de 500 ml, onde foi determinada a sua condutividade eléctrica, sendo a homogeneidade das soluções durante as medições assegurada pelo emprego do agitador magnético anteriormente descrito.

Antes e após cada uma dessas medições de condutividade eléctrica da água, o sensor do condutivímetro foi lavado com água destilada e seco e limpo com ar comprimido.

A relação obtida entre a condutividade eléctrica e a concentração das soluções salinas preparadas com as amostras de água extraídas da Ribeira Seca será apresentada, em forma tabular e gráfica, na Secção 4.1.

### **3.4 Estimação do transporte de sedimentos em suspensão**

Para a estimação do transporte de sedimentos em suspensão é necessário determinar, simultaneamente, a concentração dos sedimentos em suspensão (CSS) e o caudal responsável pelo seu transporte.

A concentração de sedimentos em suspensão foi determinada indirectamente, por meio da medição da turbidez da água e pela conversão dos valores de turbidez medidos, em NTU, para concentração de sedimentos em suspensão, em mg/l, usando a relação estabelecida por regressão estatística a partir dos valores de turbidez obtidos em laboratório com amostras sintéticas constituídas por suspensões com concentrações conhecidas preparadas com sedimentos finos extraídos do curso de água em estudo (Minella *et al.*, 2008a), sendo os resultados assim obtidos apresentados no Capítulo 4.

A estimação do caudal foi feita com o emprego do método da diluição de sal (Elder e Kattelman, 1990; Hudson e Fraser, 2005), que consiste basicamente na injeção instantânea, no curso de água, de uma dada massa do traçador químico escolhido, neste caso sal de cozinha (NaCl) refinado, sendo a quantificação da sua dispersão feita por meio da medição da variação da condutividade eléctrica da água durante a passagem da nuvem salina e pela posterior integração numérica dos valores de condutividade medidos.

A técnica empregue consiste em dissolver uma massa conhecida do traçador, num recipiente adequado, em água extraída da própria ribeira em estudo, sendo a solução salina assim preparada injectada de forma instantânea no curso de água, num ponto a montante do local de medição e situado a uma certa distância deste,

distância esta idealmente da ordem de 20 a 25 vezes a largura do canal (Day, 1977), embora muitas vezes um afastamento de apenas dez vezes seja considerado suficiente para a completa mistura (Hudson e Fraser, 2005), em vista da típica turbulência dos cursos de água de montanha.

A condutividade eléctrica de base da água deve ser medida antes do lançamento da solução salina, devendo a condutividade, após a injeção do traçador, ser registada em intervalos regulares de tempo, usualmente na faixa de 1 s a 5 s, até que a condutividade eléctrica da água retorne ao valor de base inicialmente medido.

O caudal é calculado como o quociente entre a massa de sal injectada no curso de água e a área sob a curva que representa a variação da condutividade eléctrica da água com o tempo (Hudson e Fraser, 2005),

$$Q = \frac{M}{A} \quad (3.1)$$

onde  $M$  representa a massa de sal, em gramas, injectada na linha de água e  $A$  é a área sob o gráfico da variação da concentração de sal com o tempo (ver Figura 2.3), tendo  $A$  como unidade mg.s/l, correspondente a g.s/m<sup>3</sup>.

O valor da área  $A$  pode ser calculado por (Hudson e Fraser, 2005):

$$A = \sum c_t t_i \quad (3.2)$$

onde  $c_t$  é a concentração do sal injectado no tempo  $t$  e  $t_i$  é o intervalo de tempo entre as sucessivas medições efectuadas, sendo a concentração de sal determinada indirectamente pela medição da condutividade eléctrica da água, podendo ser calculada por meio da seguinte equação:

$$c_t = CF(EC_t - EC_0) \quad (3.3)$$

onde  $EC_t$  é a condutividade eléctrica no tempo  $t$ ,  $EC_0$  é a condutividade de base e  $CF$  é o factor de concentração, isto é, o coeficiente da relação praticamente linear entre a condutividade eléctrica e a concentração de sal, determinado experimentalmente.

Como  $CF$  não é constante e depende não só da química da água, mas também da sua temperatura, foi adoptada neste trabalho uma compensação não linear da temperatura, de forma a corrigir automaticamente as medições de

condutividade com base nas temperaturas registadas pelo próprio condutímetro utilizado.

Assim, sendo constante o intervalo de tempo entre as medições, o caudal pode ser calculado por meio da seguinte equação (Bortoluzzi e Fernandez, 2008):

$$Q = \frac{M}{CF [\sum EC_t - n EC_0] \Delta t} \quad (3.4)$$

onde  $Q$  é o caudal líquido em l/s,  $M$  é massa de sal, em gramas, injectada no curso de água,  $CF$  é declividade da recta ajustada aos dados experimentais de condutividade vs. concentração de sal,  $\Delta t$  é o intervalo de tempo, em s, entre as diversas leituras de condutividade,  $\sum EC_t$  é a somatória dos valores de condutividade, em  $\mu\text{S/cm}$ , registados desde a injeção do sal no curso de água até a completa passagem da nuvem salina,  $n$  é o número de leituras realizadas durante esse intervalo de tempo e  $EC_0$  é a condutividade de base, em  $\mu\text{S/cm}$ .

O caudal sólido em suspensão numa dada secção do curso de água pode ser calculado como o produto do caudal líquido pela concentração de sedimentos em suspensão, usando a seguinte equação (Mano *et al.*, 2009):

$$F_i = 3,6 Q_i CSS_i \quad (3.5)$$

onde  $F_i$  é a carga sedimentar transportada em suspensão, em ton/h,  $Q_i$  é o caudal líquido instantâneo, em  $\text{m}^3/\text{s}$ ,  $CSS_i$  é a concentração instantânea de sedimentos em suspensão, em g/l, sendo 3,6 o factor de conversão de unidades.

Os resultados obtidos neste estudo com o emprego dos métodos aqui descritos são apresentados no Capítulo 4.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Medições da condutividade eléctrica da água *in situ* e em laboratório

Os dados que mostram a relação existente entre a concentração de sal e a condutividade eléctrica da água, relação esta estabelecida em laboratório a partir de amostras sintéticas, preparadas com sal de cozinha refinado e água extraída da Ribeira Seca do Faial durante o trabalho de campo, são apresentados na Tabela 4.1.

Esta relação é mostrada graficamente na Figura 4.1, na qual é possível observar a existência de uma relação quase perfeitamente linear entre a concentração de sal em amostras sintéticas preparadas com água da ribeira em estudo e a sua condutividade eléctrica.

A equação da recta de regressão obtida a partir dos dados da Tabela 4.1 é dada por:

$$c = 0,0005 EC - 0,1144 \quad (4.1)$$

onde  $c$  é a concentração de sal na água, em g/l, e  $EC$  é a condutividade eléctrica medida, em  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , sendo esta regressão estatisticamente significativa, com coeficiente de determinação  $R^2 = 0,9998$ .

Tabela 4.1– Relação entre a concentração de sal e a condutividade eléctrica da água em amostras sintéticas preparadas com água proveniente da Ribeira Seca.

Concentração de sal (g/l)	Condutividade eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )
0,0000	202
0,0025	208
0,0065	218
0,0125	234
0,0250	262
0,0500	314
0,1000	400
0,5000	1191
1,0000	2150
1,5000	3090
2,0000	4010
2,5000	4920

O factor de concentração  $CF$ , que corresponde à declividade da recta de regressão e é necessário para o cálculo do caudal, é, portanto, igual a 0,0005.

Como o número de registos de condutividade eléctrica da água efectuados na campanha de medições *in situ* é demasiadamente grande, optou-se por apresentar na forma tabular apenas alguns desses registos, sendo os mesmos aqui também apresentados na forma gráfica, de modo a possibilitar a observação da variação da condutividade eléctrica durante as cinco medições realizadas na Ribeira Seca do Faial para a estimação do caudal.

A Tabela 4.2 apresenta parte do primeiro conjunto de registos de condutividade eléctrica e temperatura da água efectuados no dia 5 de Outubro de 2012, com início aproximadamente às 19h12.

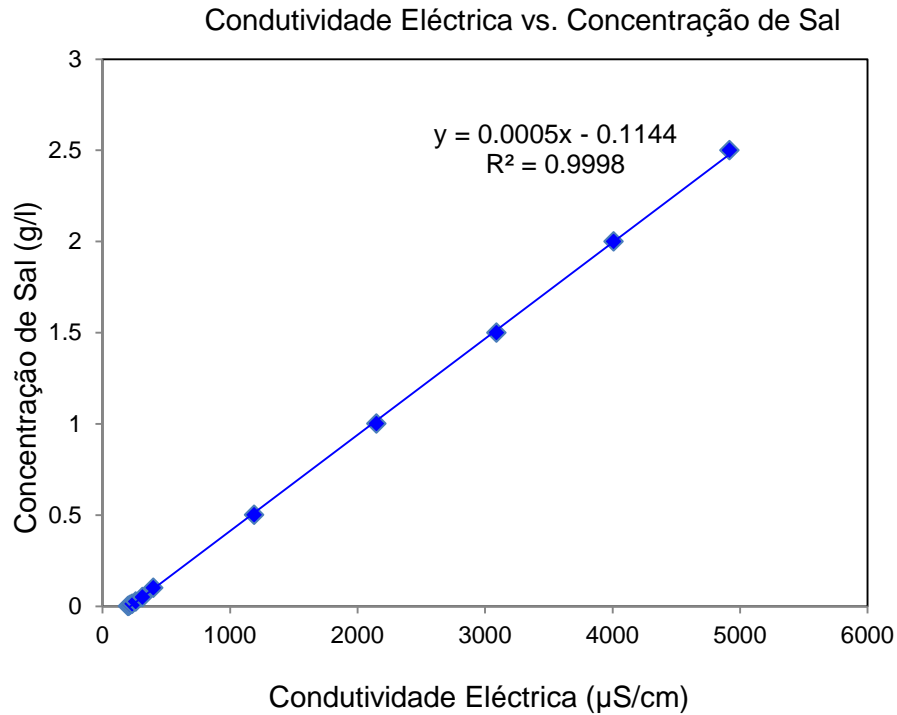


Figura 4.1 – Relação entre a condutividade eléctrica e a concentração de sal na água em amostras sintéticas preparadas com água proveniente da Ribeira Seca.

Tabela 4.2 – Medidas da condutividade eléctrica da água na primeira medição *in situ* para cálculo do caudal (massa de sal injectada = 250 g).

Data/Tempo (dia/hora)	Condutividade eléctrica (µS/cm)	Temperatura (°C)
05.10.2010/19:12:13	213	17,7
⋮	⋮	⋮
05.10.2010/19:16:26	268	17,7
05.10.2010/19:16:27	269	17,7
⋮	⋮	⋮
05.10.2010/19:16:39	269	17,7
05.10.2010/19:16:40	268	17,7
⋮	⋮	⋮
05.10.2010/19:42:13	213	17,7

A condutividade eléctrica de base medida antes da injeção do sal foi de  $213 \mu\text{S}/\text{cm}$ . Durante a passagem da nuvem salina, após cerca de 4 min da injeção de uma massa de 250 g de sal, a condutividade atingiu um valor máximo de  $269 \mu\text{S}/\text{cm}$ , tendo esta a seguir voltado gradualmente a diminuir, até estabilizar no valor de base ao fim de aproximadamente 26 min.

A temperatura medida pelo condutímetro, utilizada para a correcção dos valores de condutividade, não variou durante o processo de medição, mantendo-se constante e igual a  $17,7^\circ\text{C}$ .

Sendo a massa  $M$  de sal injectada no curso de água igual a 250 g, o intervalo de tempo  $\Delta t$  entre as medições de 1 s e o factor de concentração  $CF$  igual 0,0005, chega-se, de acordo com a formulação apresentada na Secção 3.4 (Equação 3.4), a um caudal líquido  $Q$  de 13,3 l/s.

A Figura 4.2 mostra a correspondente curva da variação da condutividade com o tempo durante a passagem da nuvem salina.

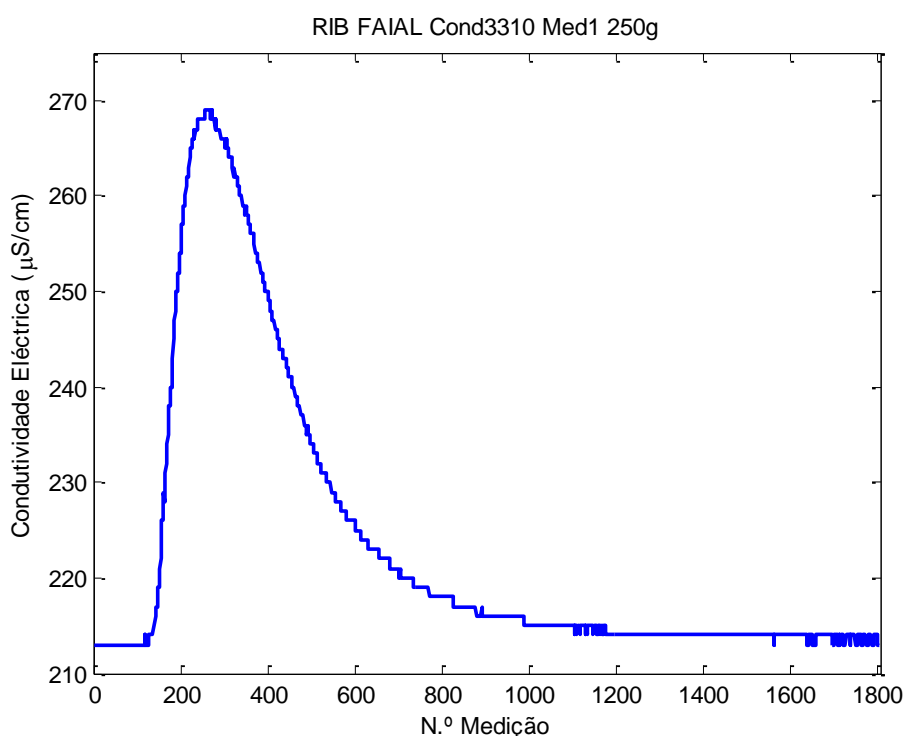


Figura 4.2 – Medidas da condutividade eléctrica da água referentes à injeção de 250 g de sal na primeira medição *in situ* para cálculo do caudal.

Alguns valores extraídos do segundo conjunto de registos de condutividade eléctrica e de temperatura da água, efectuados já no dia 6 de Outubro de 2010, com início em torno das 18h44min, são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Medidas da condutividade eléctrica da água na segunda medição *in situ* para cálculo do caudal (massa de sal injectada = 500 g).

Data/Tempo (dia/hora)	Condutividade eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )
06.10.2010/18:43:55	202	17,8
⋮	⋮	⋮
06.10.2010/18:45:25	303	17,8
06.10.2010/18:45:26	303	17,8
06.10.2010/18:45:27	303	17,8
06.10.2010/18:45:28	303	17,8
⋮	⋮	⋮
06.10.2010/18:54:53	202	17,8

A condutividade eléctrica de base, na ocasião, foi de 202  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , atingindo um máximo de 303  $\mu\text{S}/\text{cm}$  após cerca de 2 min e voltando a estabilizar no valor de base decorridos cerca de 10 min.

A correspondente variação da condutividade eléctrica da água durante a passagem da nuvem salina é mostrada graficamente na Figura 4.3.

Sabendo que a quantidade de sal injectada foi de 500 g, o intervalo de tempo entre os registos de condutividade eléctrica foi de 1 s e a declividade da recta de regressão entre a condutividade e a concentração de sal é igual a 0,0005, obtém-se, para esta segunda medição, um caudal estimado de 50,1 l/s.

Na Tabela 4.4 são apresentados alguns dos registos de condutividade eléctrica e de temperatura da água obtidos na terceira medição, efectada no dia 6 de Outubro, cerca de 25 min após o término da segunda medição.

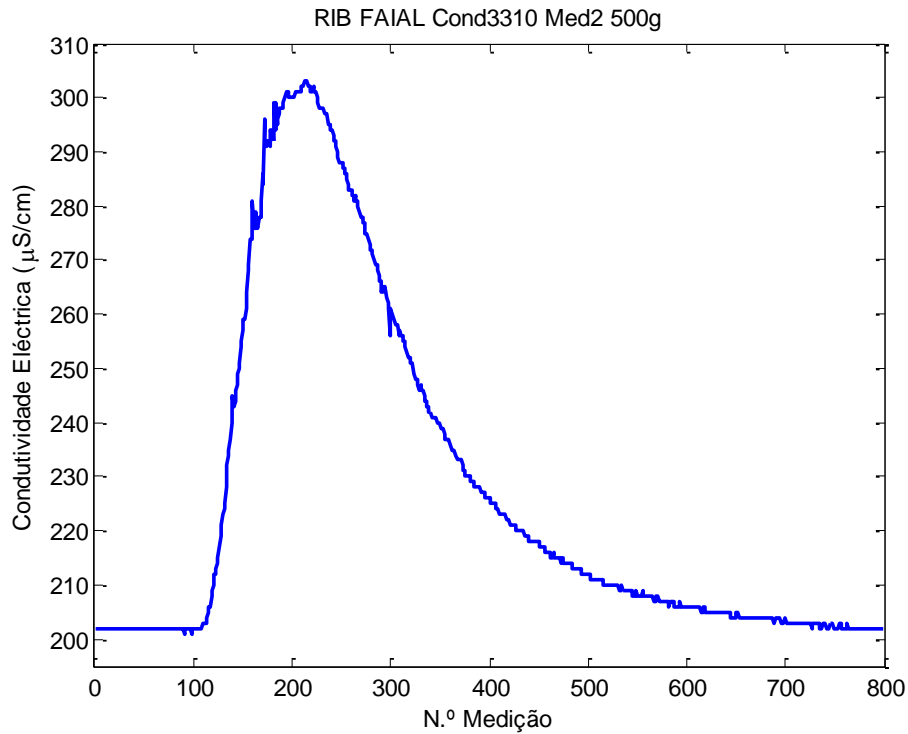


Figura 4.3 – Medidas da condutividade eléctrica da água referentes à injeção de 500 g de sal na segunda medição *in situ* para cálculo do caudal.

A condutividade eléctrica de base, antes da injeção do sal e da passagem da nuvem salina, era de 193  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , atingindo a condutividade um máximo de 312  $\mu\text{S}/\text{cm}$  decorridos cerca de 2 min e voltando esta a estabilizar no valor de base depois de transcorridos aproximadamente 10 min desde o início da medição. A temperatura medida durante a passagem da nuvem salina manteve-se nos 17,8 °C.

Na Figura 4.4 é mostrada graficamente a correspondente variação da condutividade eléctrica da água durante a passagem da nuvem salina pelo ponto de medição.

Considerando que a massa de sal injectada no curso de água foi de 500 g, que o factor de concentração é de 0,0005 e que o intervalo de tempo entre os registos de condutividade foi constante e igual a 1 s, obteve-se, a partir desses dados de condutividade, um caudal líquido de 53,1 l/s.

Tabela 4.4 – Medidas da condutividade eléctrica da água na terceira medição *in situ* para cálculo do caudal (massa de sal injectada = 500 g).

Data/Tempo (dia/hora)	Condutividade eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )
06.10.2010/19:18:02	193	17,8
⋮	⋮	⋮
06.10.2010/19:20:14	309	17,8
06.10.2010/19:20:15	312	17,8
06.10.2010/19:20:16	309	17,8
⋮	⋮	⋮
06.10.2010/19:28:43	193	17,8

No dia 7 de Outubro de 2010 pela manhã, por volta das 11h40min, foi efectuada a quarta injeccção de sal no curso de água em estudo, estando indicados na Tabela 4.5 alguns dos registos de condutividade eléctrica e de temperatura da água obtidos.

A condutividade eléctrica de base, antes da passagem da nuvem salina, era de  $205 \mu\text{S}/\text{cm}$ , tendo atingindo o valor máximo de  $262 \mu\text{S}/\text{cm}$  após cerca de 2,5 min e voltado a estabilizar no valor de base decorridos aproximadamente 12 minutos desde o início da medição.

A temperatura medida durante a passagem da nuvem salina foi inferior àquelas registadas no dia anterior, fixando-se nos  $17,1^{\circ}\text{C}$ .

Tendo sido injectados no curso de água 250 g de sal para esta quarta medição e continuando a ser de 1 s o intervalo de tempo entre cada registo, bem como estando fixado em 0,0005 o factor de concentraçção, o caudal líquido calculado foi de 51,6 l/s.

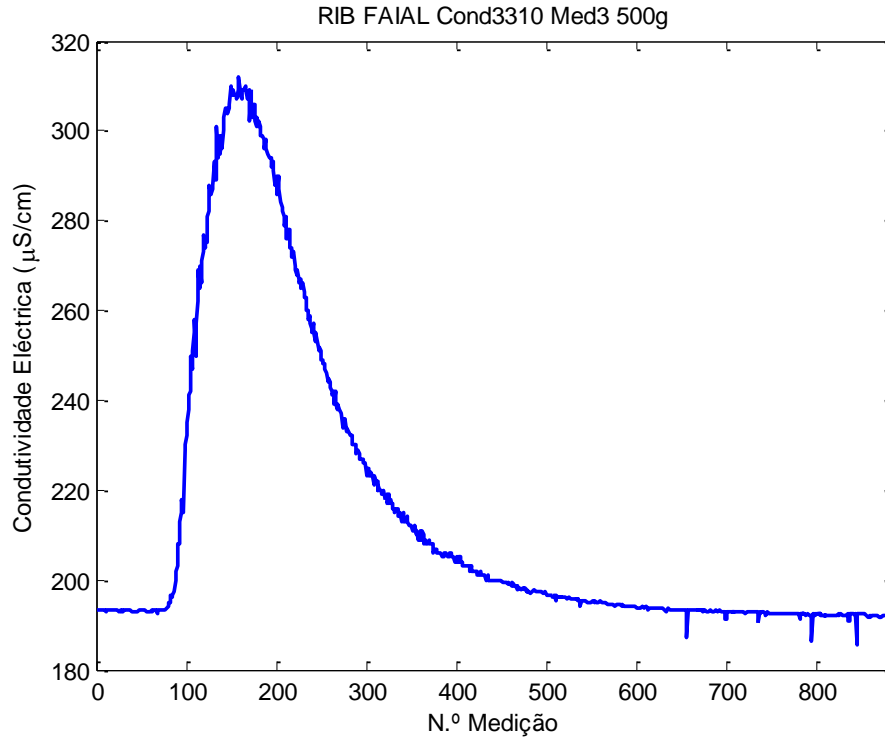


Figura 4.4 – Medidas da condutividade eléctrica da água referentes à injeção de 500 g de sal na terceira medição *in situ* para cálculo do caudal.

Tabela 4.5 – Medidas da condutividade eléctrica da água na quarta medição *in situ* para cálculo do caudal (massa de sal injectada = 250 g).

Data/Tempo (dia/hora)	Condutividade eléctrica (µS/cm)	Temperatura (°C)
07.10.2010/11:41:16	205	17,1
⋮	⋮	⋮
07.10.2010/11:43:56	261	17,1
07.10.2010/11:43:57	262	17,1
07.10.2010/11:43:58	259	17,1
⋮	⋮	⋮
07.10.2010/11:56:55	205	17,1

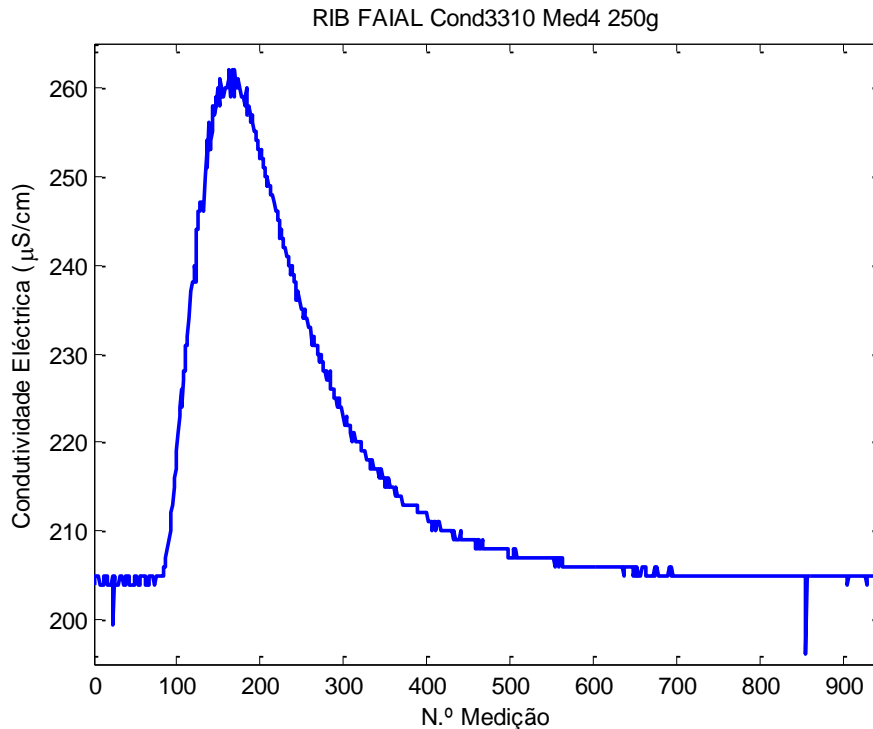


Figura 4.5 – Medidas da condutividade eléctrica da água referentes à injeção de 250 g de sal na quarta medição *in situ* para cálculo do caudal.

A segunda medição do dia 7 de Outubro de 2010 deu-se por volta das 16h10min, quando foi efectuada a quinta e última injeção de sal na ribeira em estudo, não tendo sido possível efectuar mais medições de condutividade eléctrica da água para estimação do caudal, devido às limitações de memória e aos problemas na transferência de dados do condutivímetro para o computador detectados durante o trabalho de campo.

Tal limitação obrigou a um aumento do intervalo de tempo entre registos sucessivos de 1s para 5s.

Alguns dos registos de condutividade eléctrica e de temperatura da água obtidos nesta última medição são apresentados na Tabela 4.6.

A condutividade eléctrica de base, antes passagem da nuvem salina, foi de 202  $\mu\text{S/cm}$ , elevando-se gradativamente até atingir 262  $\mu\text{S/cm}$  após cerca de 3 min, vindo a estabilizar-se novamente no valor de base decorridos aproximadamente 11 minutos.

A temperatura da água voltou a subir levemente, fixando-se em 18°C aquando desta última medição.

Tabela 4.6 – Medidas da condutividade eléctrica da água na quinta medição *in situ* para cálculo do caudal (massa de sal injectada = 250 g).

Data/Tempo (dia/hora)	Condutividade eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Temperatura (°C)
07.10.2010/16:07:57	202	18
⋮	⋮	⋮
07.10.2010/16:10:27	260	18
07.10.2010/16:10:32	261	18
07.10.2010/16:10:37	262	18
07.10.2010/16:10:42	261	18
07.10.2010/16:10:47	260	18
⋮	⋮	⋮
07.10.2010/16:21:17	202	18

Considerando o aumento do intervalo de tempo entre medições para 5 s e tendo sido injectados no curso de água 250 g de sal, estando o factor de concentração fixado em 0,0005, o caudal líquido calculado foi de 43,1 l/s.

A curva de variação da condutividade eléctrica da água durante a passagem da nuvem salina nesta última etapa de medição é mostrada na Figura 4.6.

A análise da variação dos caudais estimados, tendo por base os dados de precipitação registados nos dias 6 e 7 de Outubro de 2010 nas estações meteorológicas e nos postos udométricos de interesse apresentados no Anexo 1, mostram claramente o acentuado aumento do escoamento em resposta à ocorrência de precipitação, nomeadamente no período compreendido entre as 16h00 e as 20h00 do dia 6 de Outubro, como mostram as Tabelas A1.1 e A1.3, bem como a gradual diminuição do caudal após o fim da precipitação na manhã seguinte.

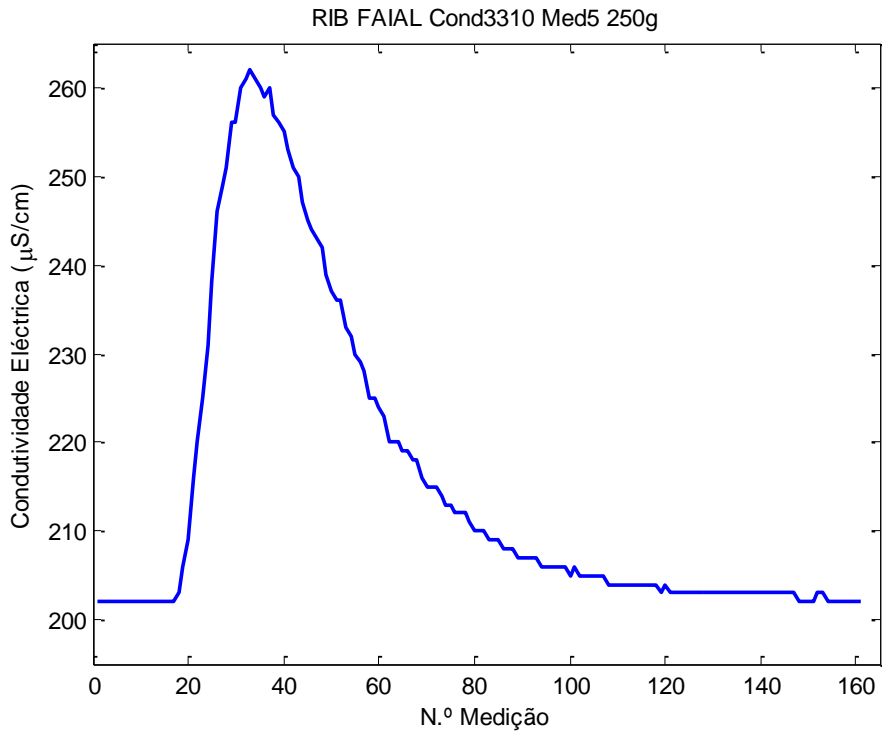


Figura 4.6 – Medidas da condutividade eléctrica da água referentes à injeção de 250 g de sal na quinta medição *in situ* para cálculo do caudal.

## 4.2 Medições da turbidez da água em laboratório

O trabalho experimental realizado em laboratório consistiu na determinação da turbidez de suspensões com concentrações conhecidas preparadas com sedimentos finos provenientes das ribeiras em causa e no posterior estudo de regressão para a determinação estatística da relação entre a turbidez e a concentração de sedimentos em suspensão.

Para cada concentração previamente definida e para cada tipo de sedimento proveniente dos cursos de água em estudo, foram preparadas pelo menos três suspensões distintas.

Embora durante a aquisição dos dados os sedimentos finos tenham sido mantidos em suspensão com recurso a um agitador magnético a uma velocidade de 1000 rpm, a turbidez obviamente não se manteve estável. Assim, determinou-se

a turbidez de cada uma das suspensões preparadas, objectivando estimar a sua faixa de variação, bem como o valor médio correspondente a uma determinada concentração de sedimentos em suspensão.

A correspondência aproximadamente linear experimentalmente estabelecida entre a concentração de sedimentos e a turbidez média das suspensões preparadas com sedimentos finos oriundos da Ribeira Seca do Faial é indicada pelos valores apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Turbidez média vs. concentração dos sedimentos em suspensão.

Turbidez média (NTU)	CSS (g/l)
44,8	0,25
120,3	0,50
164,7	0,75
185,6	1,00
269,0	1,25
350,7	1,50
431,5	1,75
564,8	2,00
650,1	2,25
761,2	2,50
858,4	2,75
969,9	3,00
1157,8	3,50
1348,4	4,00
1559,5	4,50
1752,0	5,00

A relação estabelecida é mostrada graficamente na Figura 4.7, na qual também pode ser vista a equação da recta de regressão linear obtida,

$$CSS = 0,0027 TM + 0,4146 \quad (4.2)$$

onde  $CSS$  é a concentração, em g/l, dos sedimentos em suspensão e  $TM$  é a turbidez média em NTU, sendo o correspondente coeficiente de determinação,  $R^2$ , igual a 0,9916.

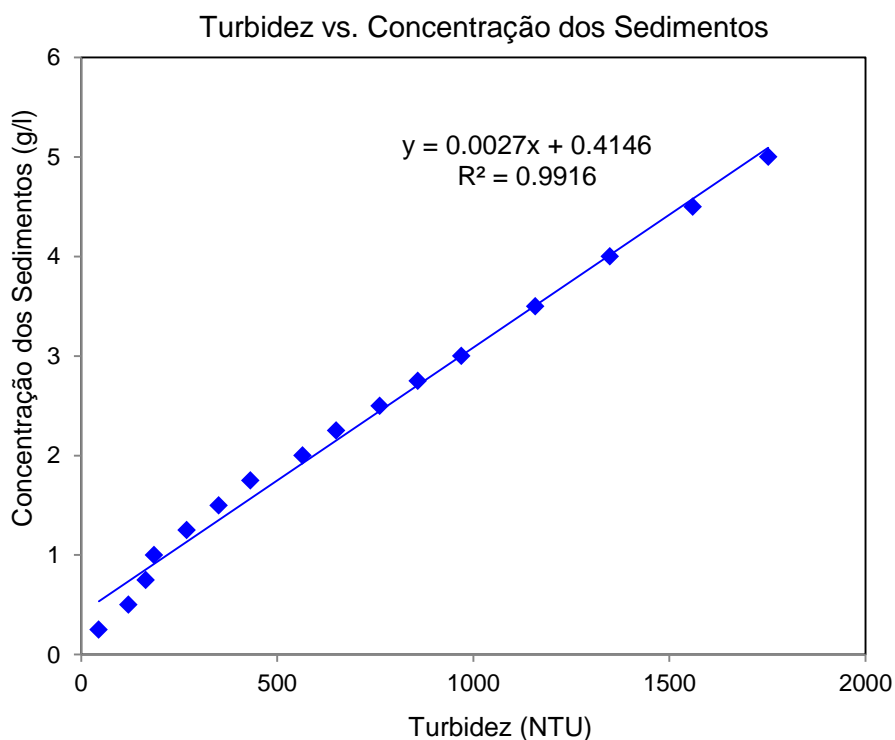


Figura 4.7 – Relação entre a turbidez e a concentração de sedimentos em suspensão em amostras sintéticas preparadas com sedimentos extraídos da Ribeira Seca.

Esta relação linear será usada para a estimativa da concentração de sedimentos em suspensão na Ribeira Seca a partir dos valores de turbidez medidos durante o trabalho de campo.

Como para cada concentração foram preparadas pelo menos três amostras distintas, a Tabela 4.8 apresenta os valores mínimos, médios e máximos de turbidez obtidos para as suspensões com igual concentração.

A variabilidade dos valores de turbidez obtidos experimentalmente é mostrada graficamente na Figura 4.8.

Tabela 4.8 – Turbidez mínima, média e máxima das suspensões com diferentes concentrações preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira Seca do Faial.

Concentração (mg/l)	Turbidez (NTU)		
	Mínima	Média	Máxima
250	24	45	60
500	101	120	144
750	139	165	196
1000	167	186	200
1250	226	269	299
1500	300	351	396
1750	332	431	492
2000	507	565	599
2250	598	650	699
2500	700	761	799
2750	801	858	901
3000	918	970	999
3500	1102	1158	1199
4000	1300	1348	1398
4500	1500	1560	1599
5000	1701	1752	1799

Os gráficos correspondentes aos valores de turbidez das suspensões com igual concentração — na faixa de 250 mg/l a 5000 mg/l — preparadas com sedimentos finos extraídos da Ribeira Seca do Faial, no ponto de recolha situado na zona das Cruzinhas, são apresentadas nas Figuras 4.9 a 4.24.

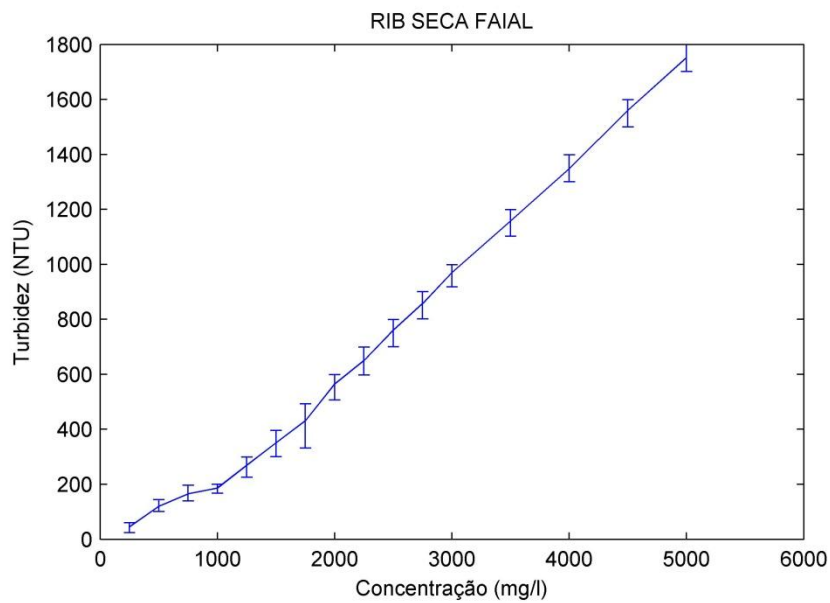


Figura 4.8 – Diagrama de dispersão com barras de erro referente às medições de turbidez das suspensões preparadas com sedimentos extraídos da Ribeira Seca.

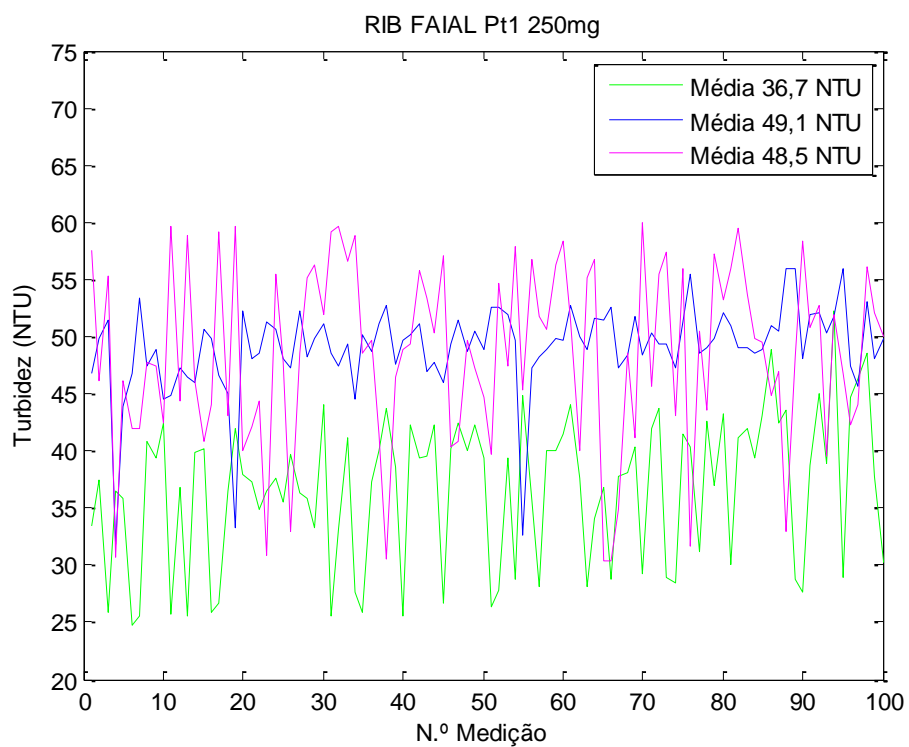


Figura 4.9 – Medidas de turbidez de suspensões com concentração de 250 mg/l preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira Seca do Faial.

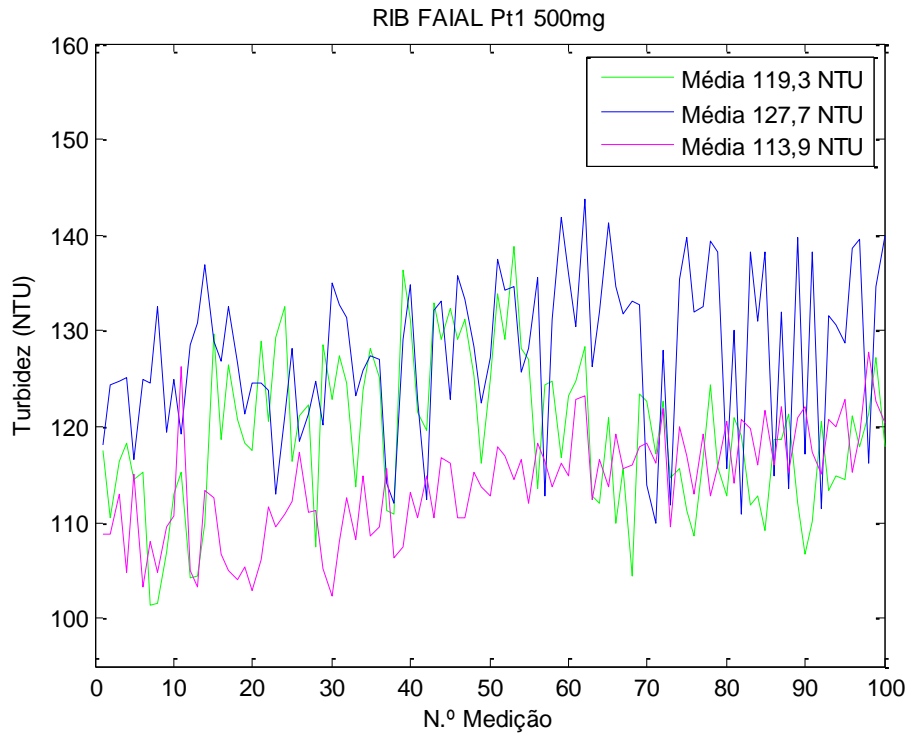


Figura 4.10 – Medidas de turbidez de suspensões com concentração de 500 mg/l preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira Seca do Faial.

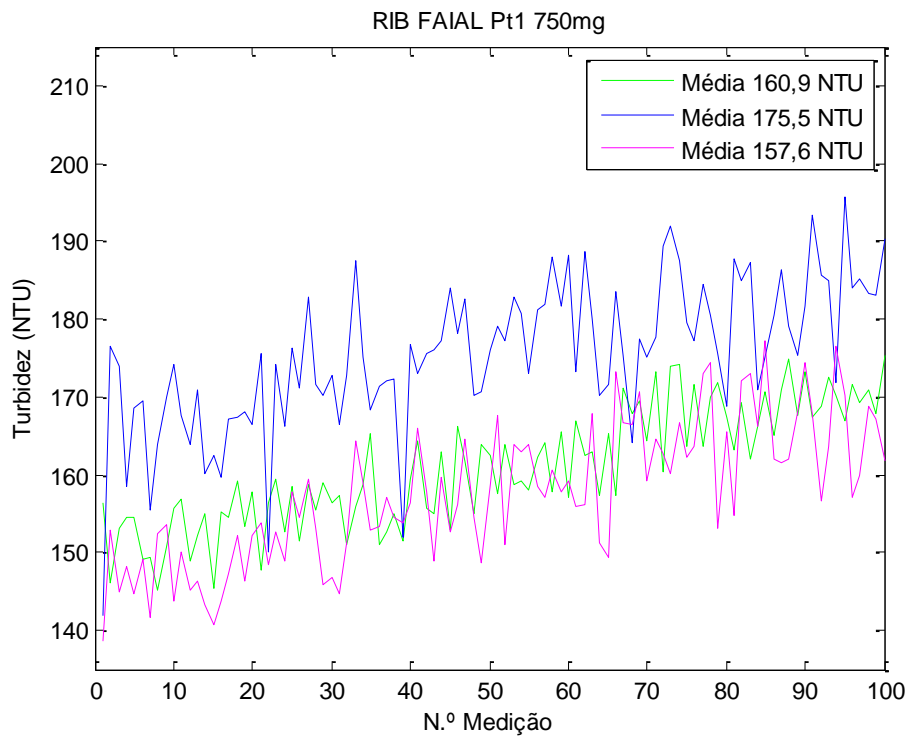


Figura 4.11 – Medidas de turbidez de suspensões com concentração de 750 mg/l preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira Seca do Faial.

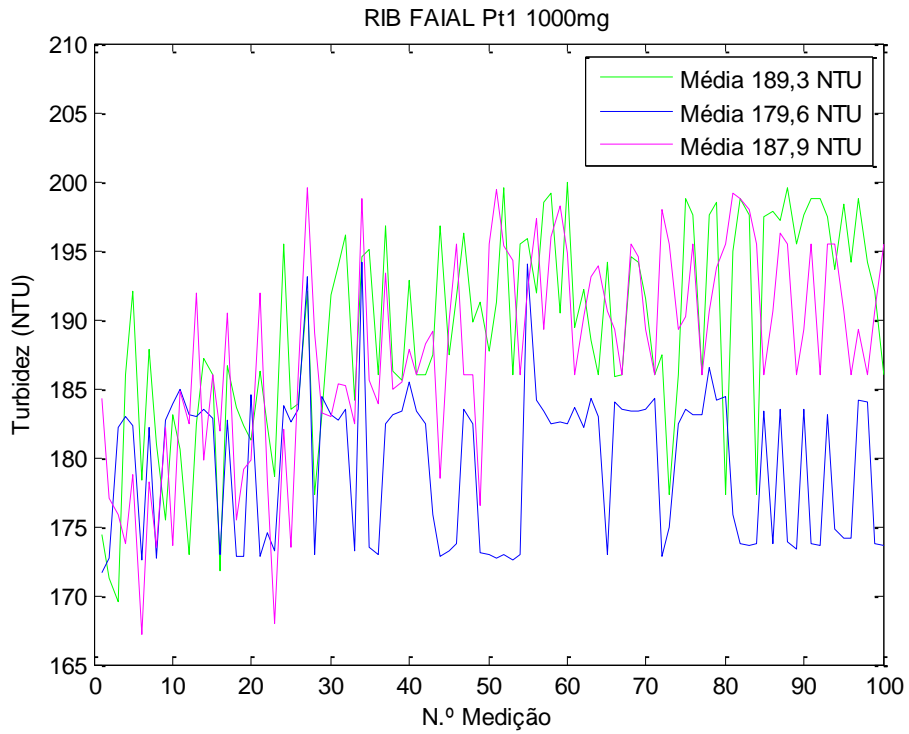


Figura 4.12 – Medidas de turbidez de suspensões com concentração de 1000 mg/l preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira Seca do Faial.

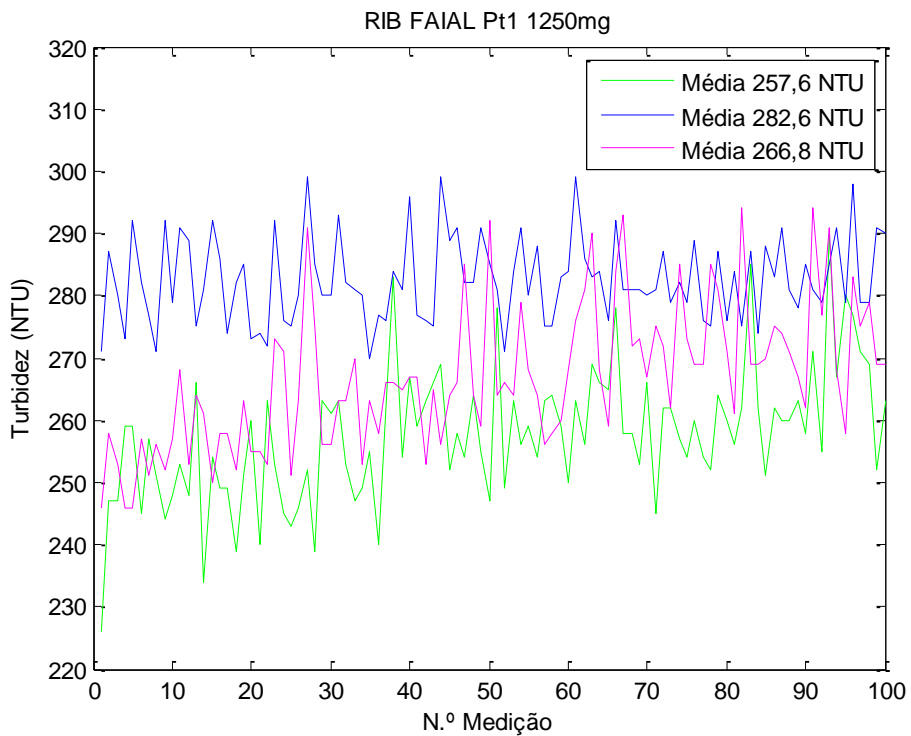


Figura 4.13 – Medidas de turbidez de suspensões com concentração de 1250 mg/l preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira Seca do Faial.

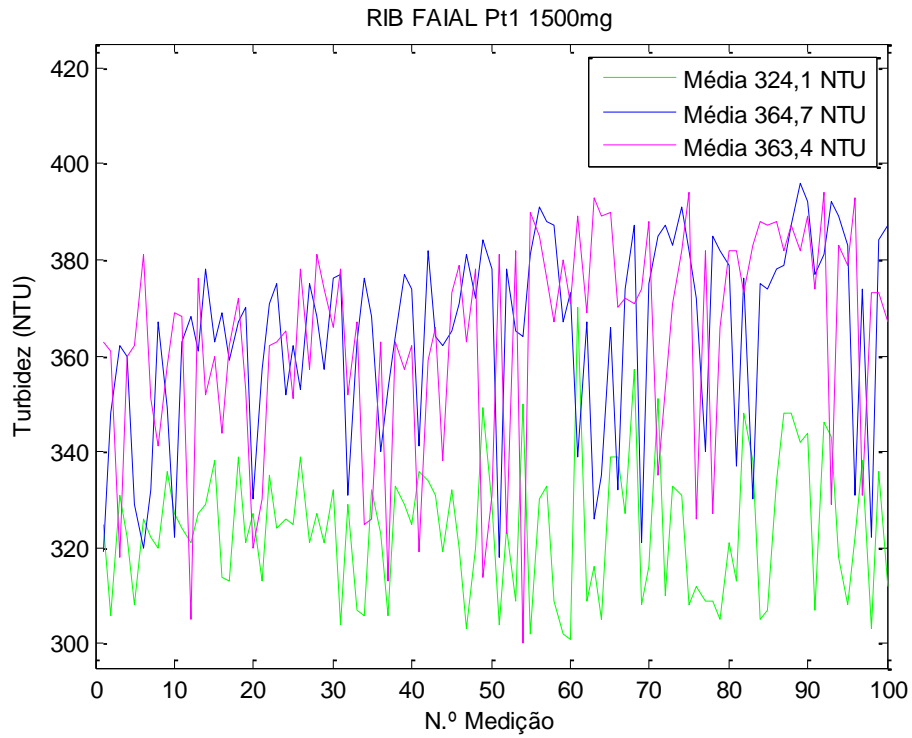


Figura 4.14 – Medidas de turbidez de suspensões com concentração de 1500 mg/l preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira Seca do Faial.

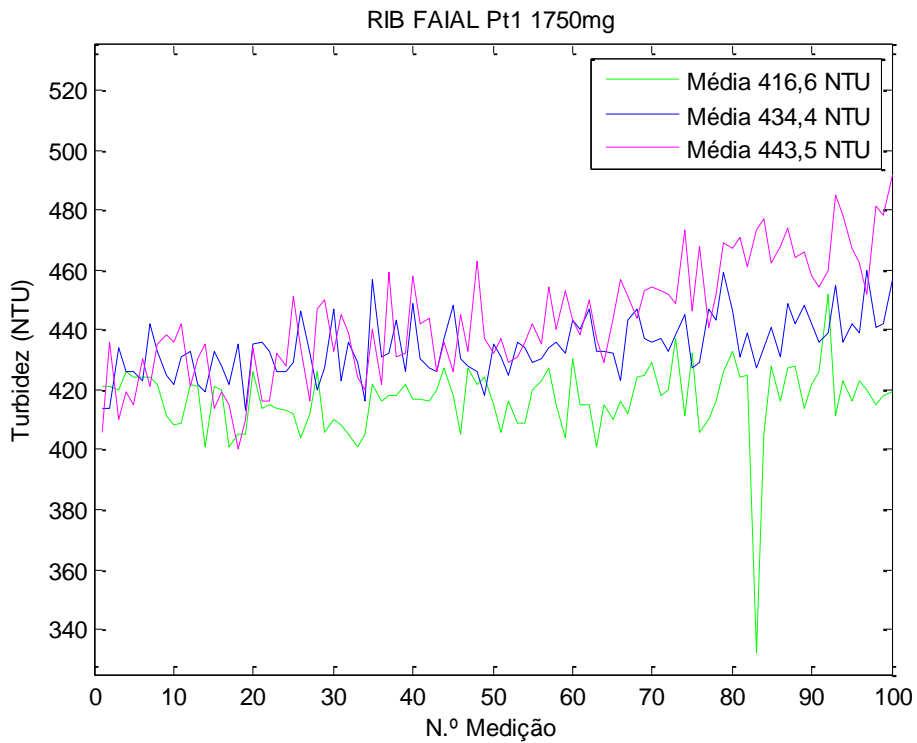


Figura 4.15 – Medidas de turbidez de suspensões com concentração de 1750 mg/l preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira Seca do Faial.

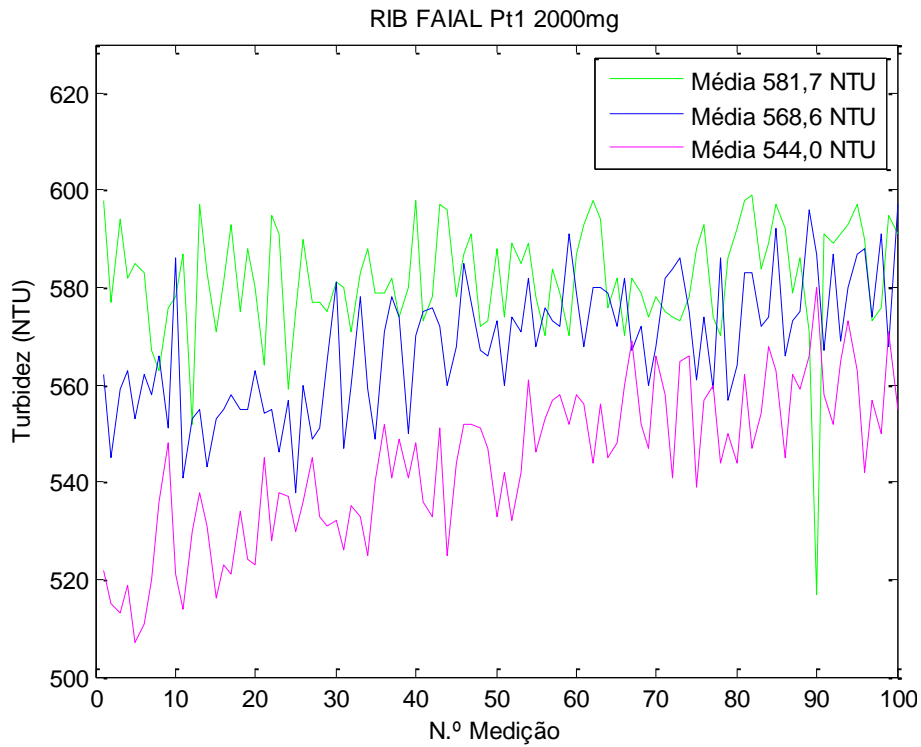


Figura 4.16 – Medidas de turbidez de suspensões com concentração de 2000 mg/l preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira Seca do Faial.

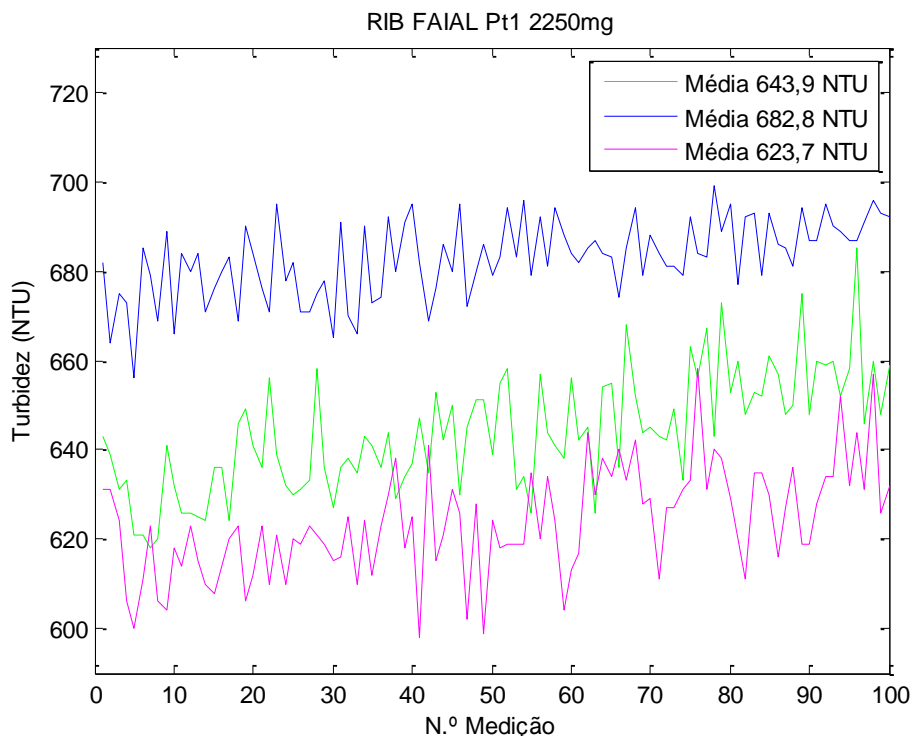


Figura 4.17 – Medidas de turbidez de suspensões com concentração de 2250 mg/l preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira Seca do Faial.

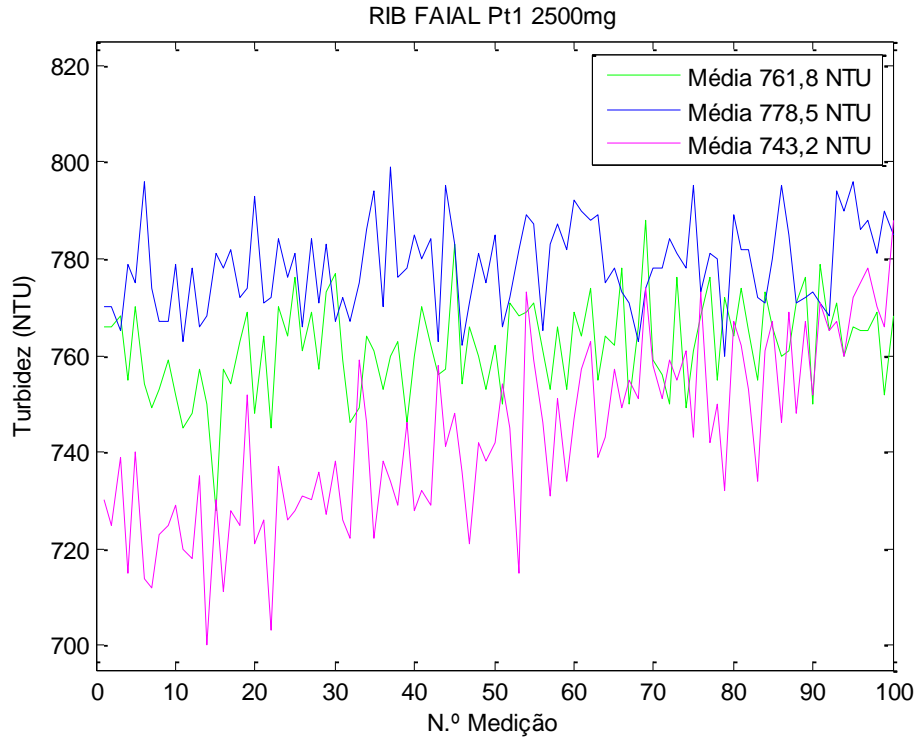


Figura 4.18 – Medidas de turbidez de suspensões com concentração de 2500 mg/l preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira Seca do Faial.

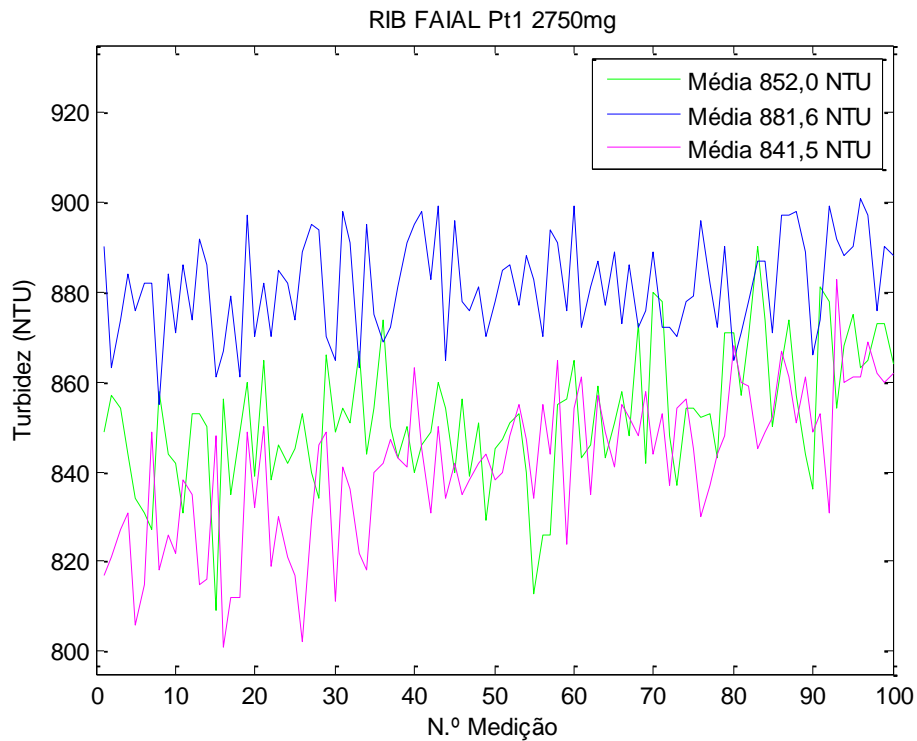


Figura 4.19 – Medidas de turbidez de suspensões com concentração de 2750 mg/l preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira Seca do Faial.

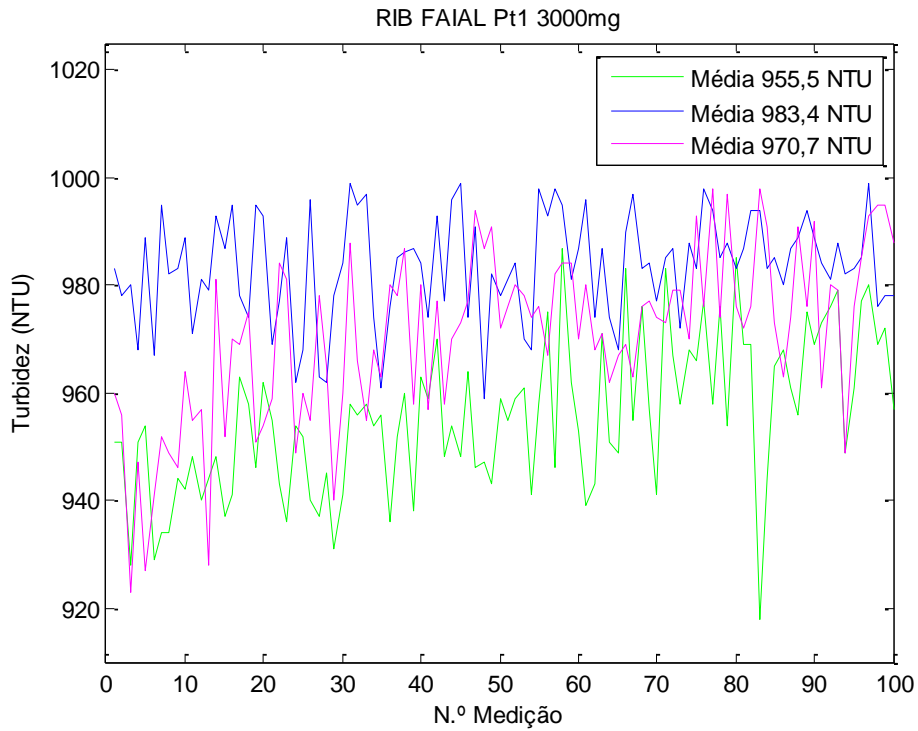


Figura 4.20 – Medidas de turbidez de suspensões com concentração de 3000 mg/l preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira Seca do Faial.

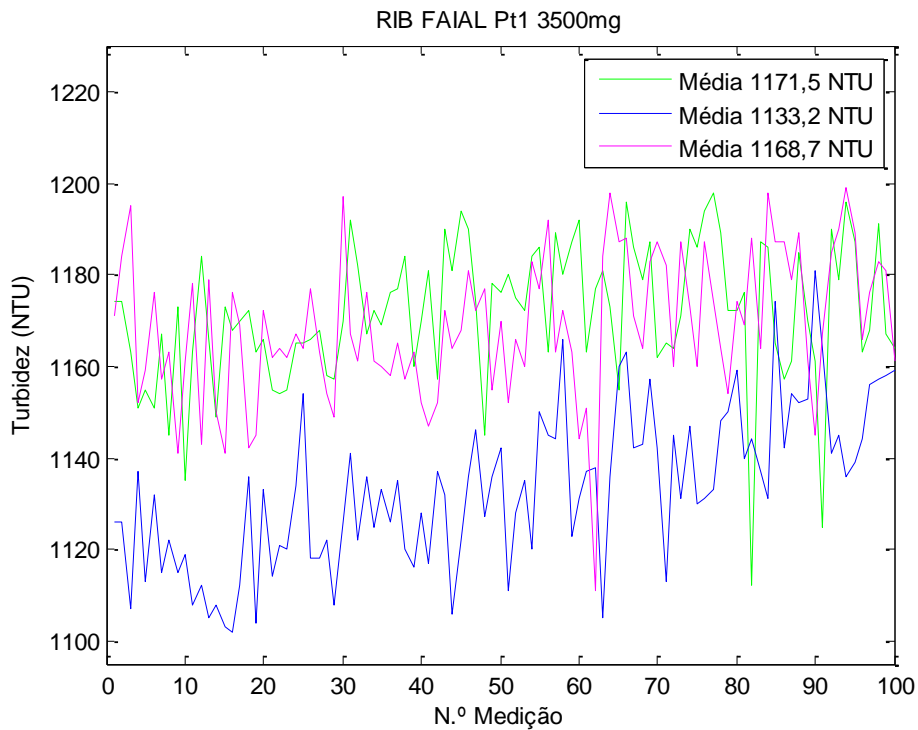


Figura 4.21 – Medidas de turbidez de suspensões com concentração de 3500 mg/l preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira Seca do Faial.

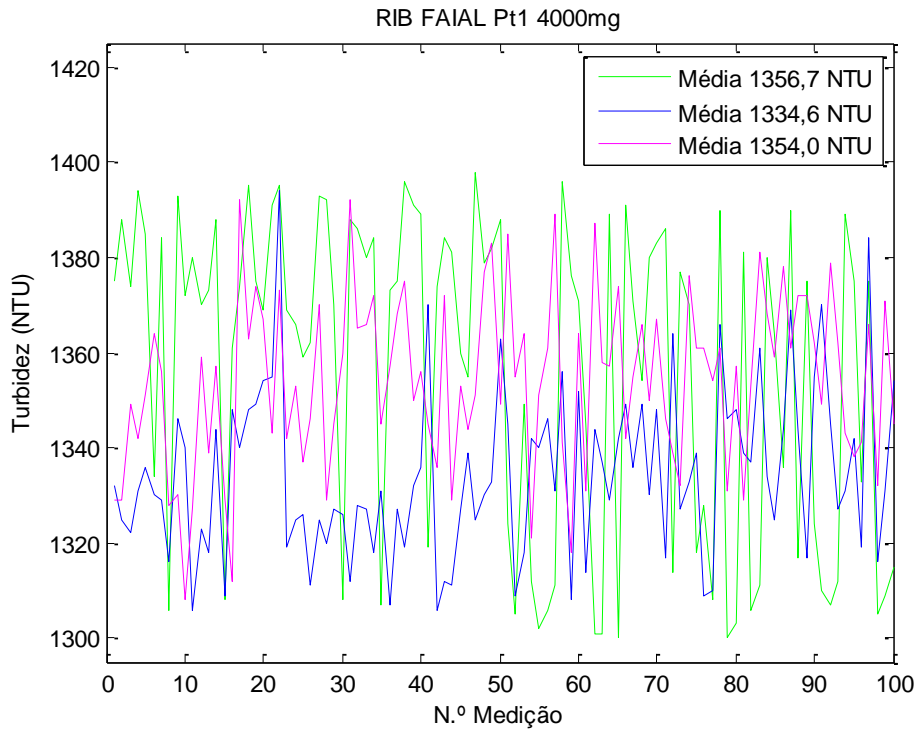


Figura 4.22 – Medidas de turbidez de suspensões com concentração de 4000 mg/l preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira Seca do Faial.

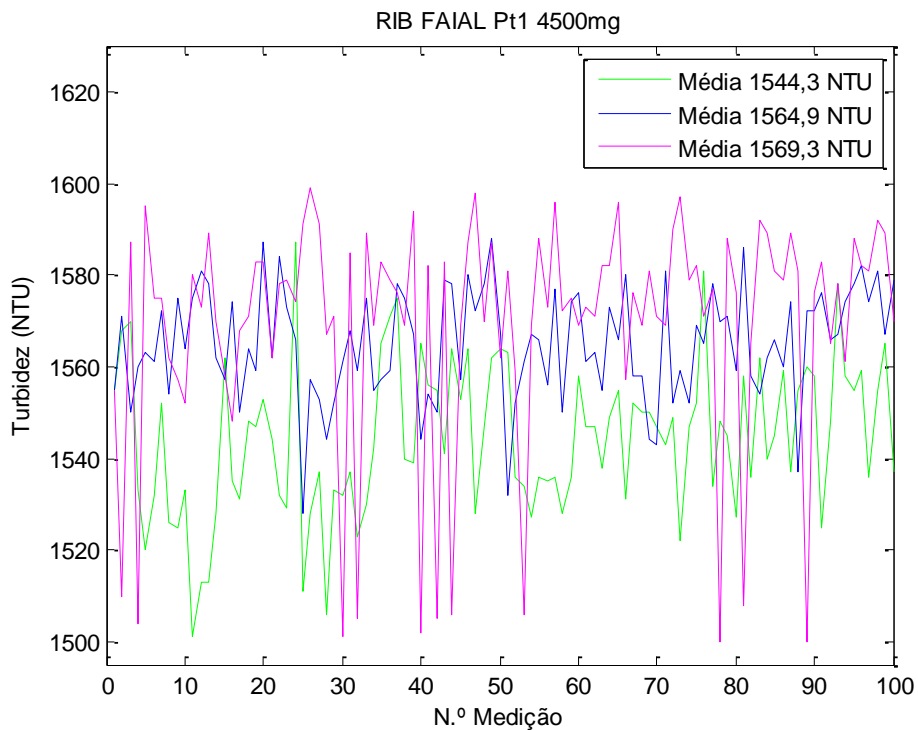


Figura 4.23 – Medidas de turbidez de suspensões com concentração de 4500 mg/l preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira Seca do Faial.

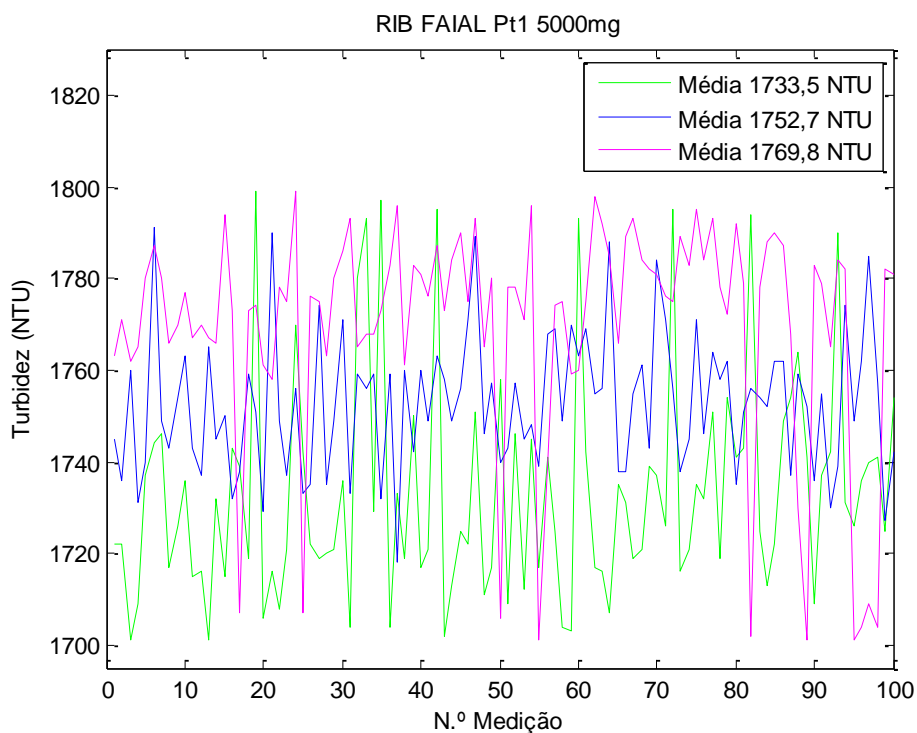


Figura 4.24 – Medidas de turbidez de suspensões com concentração de 5000 mg/l preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira Seca do Faial.

Os gráficos correspondentes aos valores de turbidez de amostras distintas de suspensões com igual concentração preparadas com sedimentos finos provenientes da Ribeira do Lajeado e da Ribeira de Santa Luzia são mostrados nos Anexos 3, 4 e 5.

Os valores mínimos, médios e máximos de turbidez das suspensões preparadas com sedimentos recolhidos em dois pontos distintos da Ribeira do Lajeado e na Ribeira de Santa Luzia são apresentados no Anexo 2, no qual são ainda apresentadas as relações lineares entre a turbidez média e a concentração de sedimentos em suspensão estabelecidas experimentalmente a partir de amostras sintéticas preparadas com sedimentos finos oriundos dessas duas ribeiras.

### 4.3 Medições *in situ* da turbidez da água

Durante o evento hidrometeorológico considerado, foram efectuadas oito medições distintas da turbidez da água na Ribeira Seca do Faial, correspondendo cada medição a 100 registos, totalizando assim 800 leituras de turbidez realizadas no período de 5 a 7 de Outubro de 2010.

Os resultados dessas medições de turbidez, realizadas alternadamente com as medições de condutividade eléctrica para a estimacão do caudal, são apresentados graficamente nas Figuras 4.25 a 4.32.

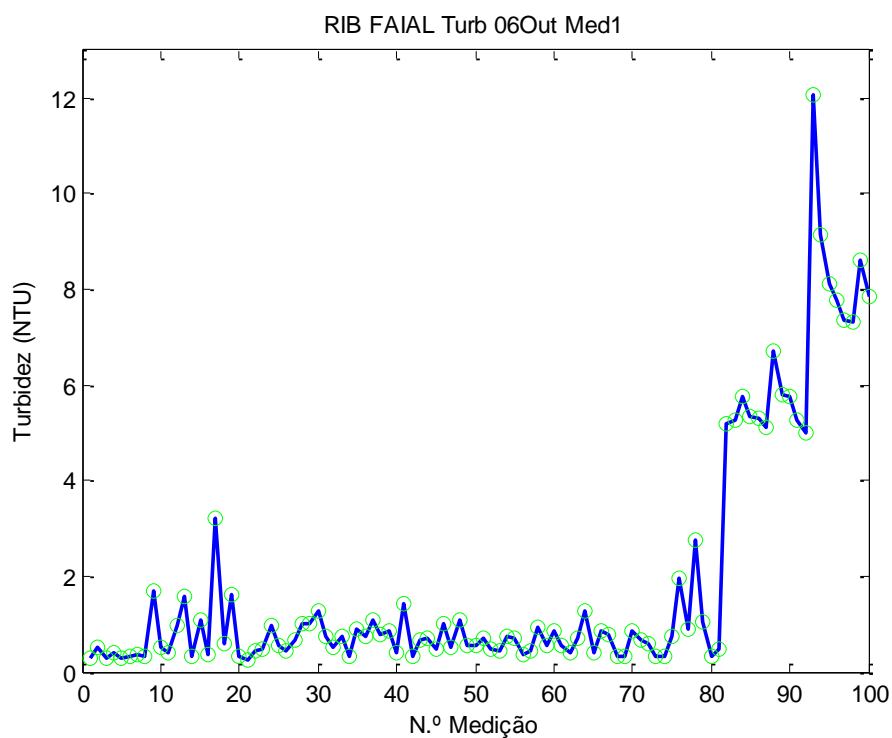


Figura 4.25 – Medidas de turbidez referentes à primeira medição na Ribeira Seca do Faial realizada às 13h25 do dia 6 de Outubro de 2010.

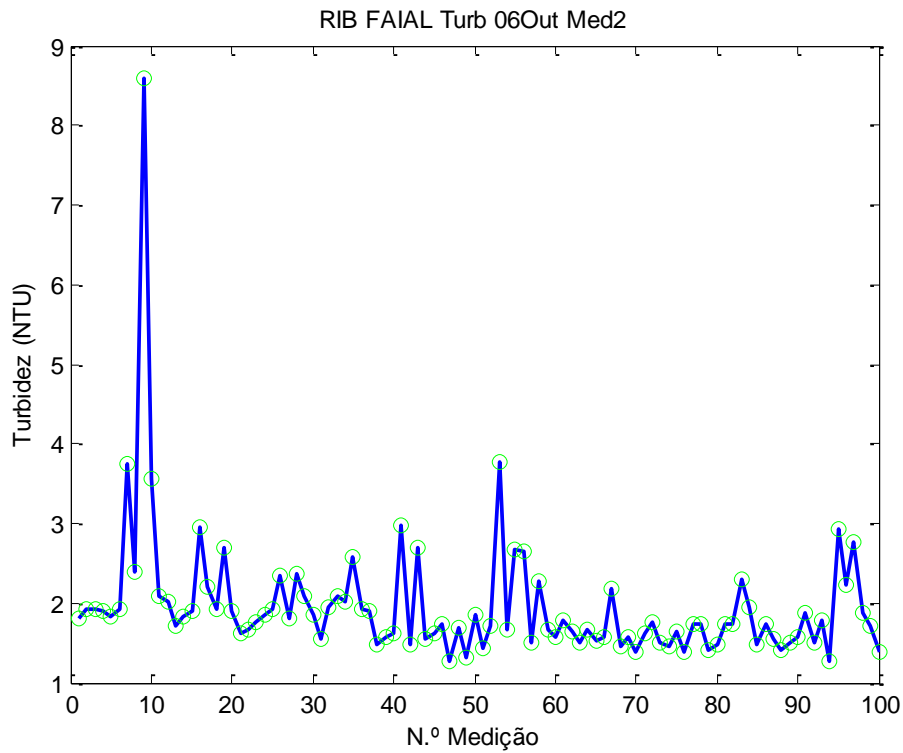


Figura 4.26 – Medidas de turbidez referentes à segunda medição na Ribeira Seca do Faial realizada às 17h46 do dia 6 de Outubro de 2010.

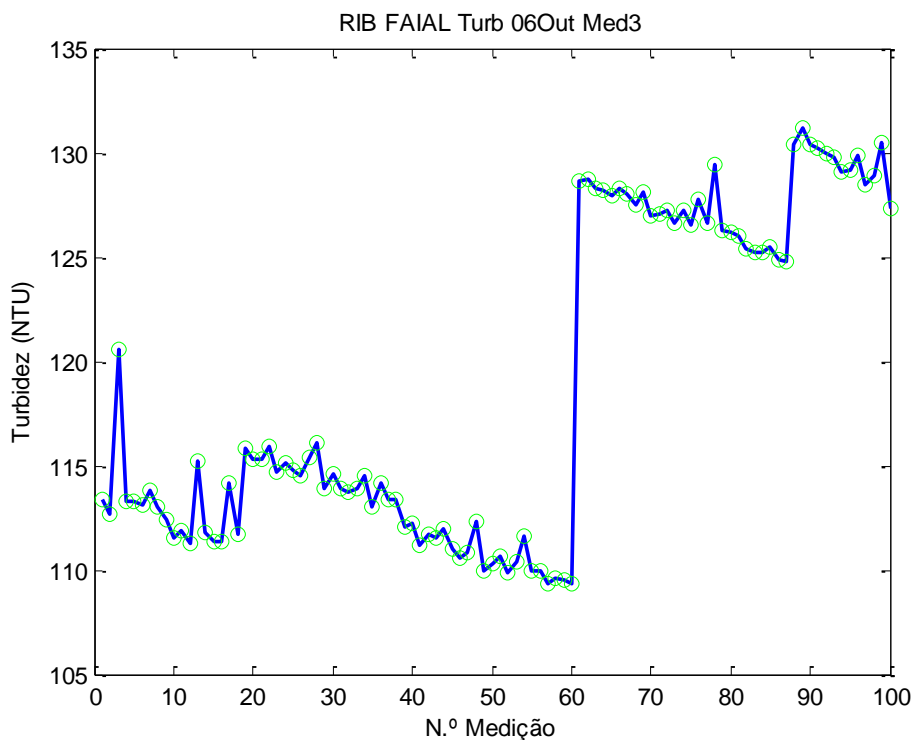


Figura 4.27 – Medidas de turbidez referentes à terceira medição na Ribeira Seca do Faial realizada às 18h29 do dia 6 de Outubro de 2010.

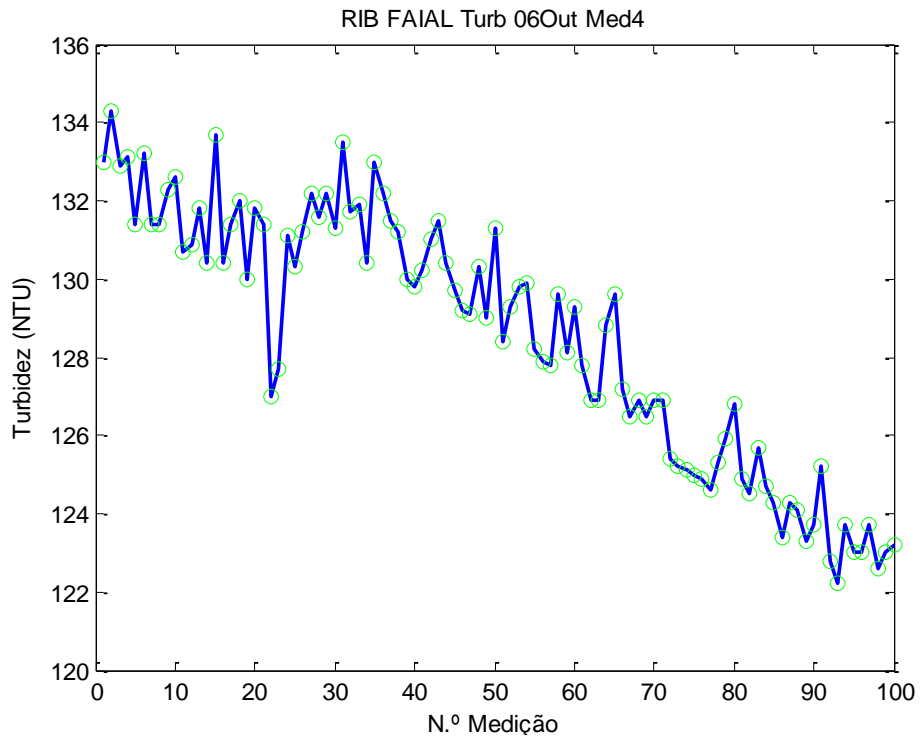


Figura 4.28 – Medidas de turbidez referentes à quarta medição na Ribeira Seca do Faial realizada às 19h12 do dia 6 de Outubro de 2010.

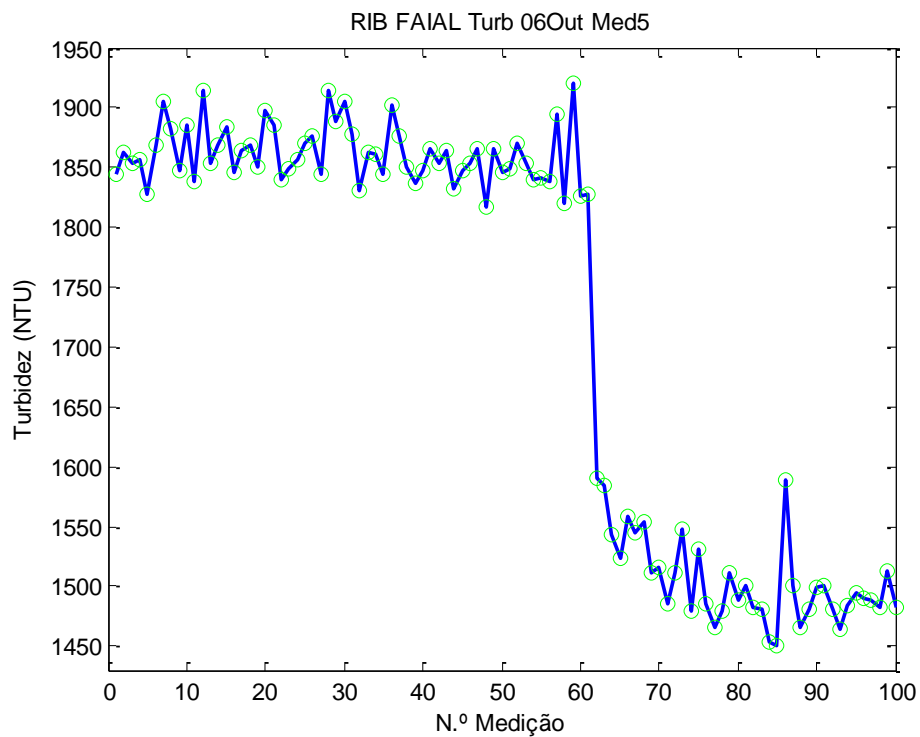


Figura 4.29 – Medidas de turbidez referentes à quinta medição na Ribeira Seca do Faial realizada às 19h40 do dia 6 de Outubro de 2010.

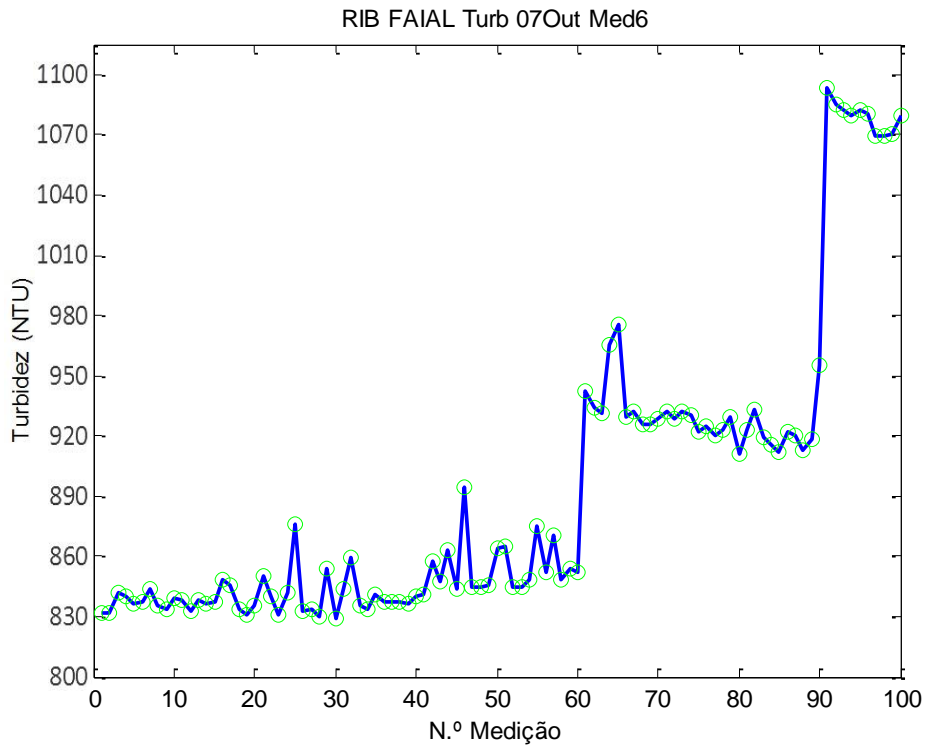


Figura 4.30 – Medidas de turbidez referentes à sexta medição na Ribeira Seca do Faial realizada às 11h37 do dia 7 de Outubro de 2010.

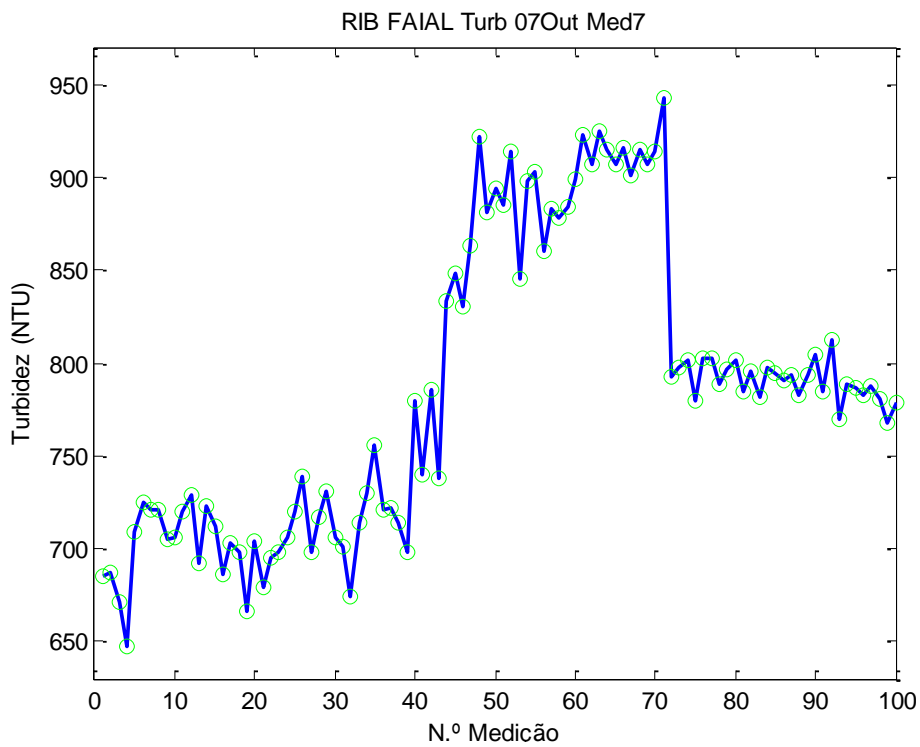


Figura 4.31 – Medidas de turbidez referentes à sétima medição na Ribeira Seca do Faial realizada às 12h00 do dia 7 de Outubro de 2010.

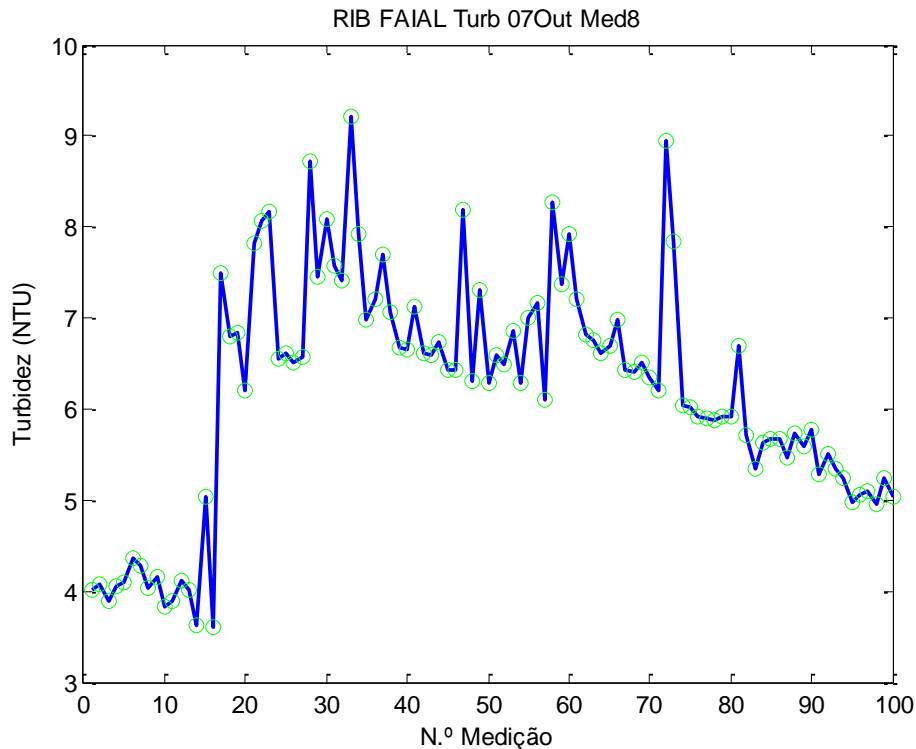


Figura 4.32 – Medidas de turbidez referentes à oitava medição na Ribeira Seca do Faial realizada às 15h44 do dia 7 de Outubro de 2010.

#### 4.4 Estimação da concentração e do transporte de sedimentos em suspensão

A Tabela 4.9 apresenta os valores médios de turbidez medidos na Ribeira Seca do Faial e as correspondentes concentrações de sedimentos em suspensão estimadas a partir da relação linear estabelecida experimentalmente, expressa pela Equação 4.2.

A relação entre a turbidez medida e a concentração de sedimentos em suspensão estimada é mostrada graficamente na Figura 4.33, sendo notório o aumento da concentração estimada de sedimentos em suspensão em decorrência da precipitação sobre a bacia em estudo. Tendo em conta o concomitante aumento do caudal, antes referido, conclui-se que houve um significativo aumento do transporte de sedimentos em suspensão durante o período considerado.

Tabela 4.9 – Relação entre a turbidez média medida na Ribeira Seca e a concentração estimada de sedimentos em suspensão.

Data / Hora / Medição	Turbidez (NTU)	CSS (g/l)
6-10-2010 / 13:25 / 1	1,9	0,41
6-10-2010 / 17:46 / 2	2,0	0,42
6-10-2010 / 18:29 / 3	118,8	0,73
6-10-2010 / 19:12 / 4	128,5	0,76
6-10-2010 / 19:40 / 5	1722,3	5,06
7-10-2010 / 11:37 / 6	896,2	2,83
7-10-2010 / 12:00 / 7	784,9	2,53
7-10-2010 / 15:44 / 8	6,2	0,43

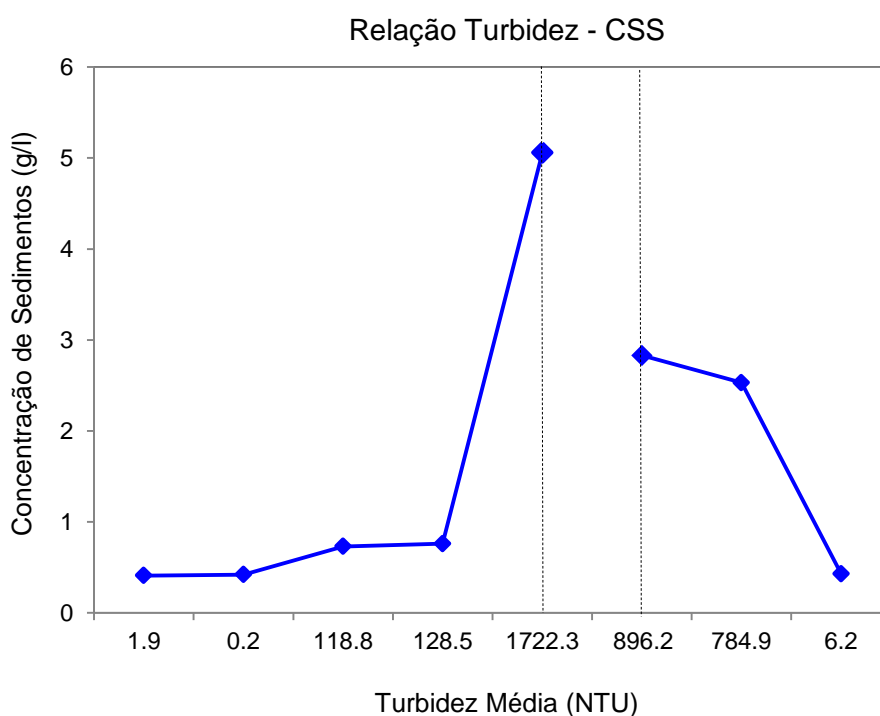


Figura 4.33 – Relação entre a turbidez da água na Ribeira Seca e a correspondente concentração de sedimentos em suspensão.

É interessante observar que, após o término da chuva, no final da manhã do terceiro dia de medições, a concentração estimada de sedimentos em suspensão

já havia retornado praticamente ao seu valor inicial, da ordem de 0,4 g/l, calculado a partir das medições de turbidez da água efectuadas antes da ocorrência de precipitação.

Embora as medições de condutividade eléctrica para a estimação do caudal e as medições da turbidez da água para a estimação da concentração de sedimentos em suspensão não tenham sido realizadas de forma simultânea, como seria desejável, devido a dificuldades operacionais e às limitações de memória do condutivímetro antes referidas, é possível, por meio da interpolação linear dos dados de caudal e de concentração de sedimentos em suspensão sumarizados na Tabela 4.10, obter uma ideia bastante razoável da ordem de grandeza do transporte de sedimentos em suspensão na Ribeira Seca do Faial durante o período de realização dos trabalhos de campo.

Tabela 4.10 – Caudais e concentrações de sedimentos em suspensão estimados a partir das medições de condutividade eléctrica e de turbidez efectuadas.

Data / Hora	Caudal (l/s)	Caudal (interpol.) (l/s)	CSS (g/l)
5-10-2010/19:12	13,3		–
6-10-2010/13:25	–		0,41
6-10-2010/17:46	–	(13,3)	0,42
6-10-2010/18:29	–		0,73
6-10-2010/18:53	50,1		–
6-10-2010/19:12	–	52,4	0,76
6-10-2010/19:18	53,1		–
6-10-2010/19:40	–		5,06
7-10-2010/11:37	–		2,83
7-10-2010/11:41	51,6		–
7-10-2010/12:00	–	51,0	2,53
7-10-2010/15:44	–	43,9	0,43
7-10-2010/16:07	43,1		–

Assumindo que o valor do caudal inicialmente medido não tenha diminuído significativamente, mantendo-se praticamente o mesmo até ao início da precipitação no dia 6 de Outubro, pode-se estimar, com o emprego da Equação 3.5, que a carga sedimentar transportada em suspensão até cerca das 16h45min desse dia era de aproximadamente de 0,02 ton/h ou 20 kg/h.

Por meio da interpolação linear dos valores de caudal estimados para as 18h53min e as 19h18min, chega-se a um valor de caudal de 52,4 l/s às 19h12min, o que permite estimar que a taxa de transporte de sedimentos em suspensão aquando da correspondente medição da turbidez da água havia aumentando para cerca de 0,143 ton/h ou 143,4 kg/h.

Da mesma forma, a partir dos valores de caudal estimados para as 11h41min e as 16h07min do dia 7 de Outubro, obtém-se por interpolação linear os valores de caudal de 51,0 l/s e 43,9 l/s às 12h00min e às 15h44min desse dia, respectivamente.

Utilizando a Equação 3.5 com tais valores de caudal obtidos por interpolação e com os correspondentes valores estimados de concentração de sedimentos em suspensão, obtém-se uma taxa de transporte de sedimentos de aproximadamente 0,465 ton/h ou 465 kg/h ao meio-dia, reduzindo-se esta, como esperado em função do fim da chuva, para cerca de 0,068 ton/h ou 68 kg/h às 15h44min desse mesmo dia.

Finalmente, tendo em conta que os maiores valores estimados de caudal e de concentração de sedimentos mostrados na Tabela 4.10, é razoável supor que carga sedimentar transportada em suspensão na Ribeira Seca do Faial possa ter atingido ou mesmo superado 1 ton/h durante a noite de 6 para 7 de Outubro de 2010.

Tabela 4.11- Carga sedimentar transportada durante a campanha de medições.

Data / Hora	Carga sedimentar transportada	
	(kg/h)	(ton/h)
6-10-2010 / 17:46	20,0	0,002
6-10-2010 / 19:12	143,4	0,143
7-10-2010 / 12:00	465,0	0,465
7-10-2010 / 15:44	68,0	0,068

## **5 CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO**

### **5.1 Principais conclusões do trabalho realizado**

A campanha de medições da concentração dos sedimentos em suspensão realizada na bacia da Ribeira Seca do Faial, devido às suas grandes limitações em termos temporais e espaciais, não permite chegar a uma conclusão mais representativa sobre o transporte de sedimentos em suspensão na bacia em estudo.

No entanto, embora seja muito difícil fazer uma avaliação do transporte de sedimentos em suspensão numa bacia hidrográfica com base no estudo de um único evento de precipitação, ainda mais com medições realizadas apenas num ponto, principalmente tratando-se de um curso de água de montanha, o trabalho realizado permitiu dominar e avaliar as metodologias e técnicas, tanto laboratoriais quanto de campo, empregues neste tipo de estudo.

A relação obtida entre a turbidez e a concentração dos sedimentos em suspensão nem sempre é perfeitamente linear, embora dela usualmente pouco se afaste. Neste estudo, observou-se uma boa correlação linear positiva entre essas grandezas, tanto nos dados resultantes dos estudos realizados em laboratório como nos dados obtidos no trabalho de campo desenvolvido.

Tais resultados permitem confirmar que o transporte de sedimentos em suspensão, nomeadamente em bacias de montanha, onde a medição directa da quantidade de sedimentos transportados é de elevado risco ou mesmo inviável durante eventos hidrológicos extremos, pode ser avaliado com razoável exactidão

a partir da concentração dos sedimentos em suspensão estimada por meio da medição da turbidez nesses cursos de água.

Sendo a quantificação do transporte de sedimentos em suspensão dependente não só da determinação da concentração destes, mas também da estimação do caudal, neste caso feita com base em medições da condutividade eléctrica da água, constatou-se no trabalho de campo ser esta estimação — obtida pela injeção de uma solução de sal, usado como traçador, e posterior registo da passagem da nuvem salina num ponto a jusante — fortemente dependente das características da linha de água, nomeadamente da rugosidade e sinuosidade do canal, da presença de plantas e detritos lenhosos, bem como da turbulência da água no local de medição.

Os resultados obtidos em laboratório indicam, por sua vez, que as medidas contínuas de turbidez da água efectuadas quando as cargas sedimentares são elevadas, nomeadamente com concentrações acima de 3.500 mg/l, apresentam grande variação, pelo facto dos sedimentos não se manterem tão facilmente em suspensão.

A extensão desses resultados para o caso do trabalho de campo leva a acreditar que os resultados da aplicação da metodologia adoptada neste estudo podem ficar comprometidos no caso da ocorrência de elevadas cargas sedimentares, muito superiores àquelas consideradas no trabalho em laboratório, tanto pelas limitações do equipamento quanto pela distribuição não homogénea dos sedimentos na água.

O transporte de sedimentos em suspensão, calculado como resultado do produto da descarga instantânea de água pela correspondente concentração instantânea de sedimentos em suspensão, multiplicado por um factor de conversão de unidades, não se manteve constante durante a campanha de medições efectuada na bacia da Ribeira Seca do Faial, comportamento este já esperado, tendo havido uma variação da ordem de 0,4 ton/h, explicada pelas variações do caudal e do poder erosivo e da capacidade de arrasto de sedimentos das águas superficiais, em decorrência das alterações da intensidade da precipitação observadas durante o evento monitorizado naquela pequena bacia de montanha.

Finalmente, cabe aqui referir que, em bacias de montanha com altos declives, sujeitas a um regime sazonal, de carácter torrencial, a monitorização contínua dos sedimentos em suspensão com a utilização de tal metodologia constitui um grande desafio, devido ao alto risco de perda ou de danos ao equipamento utilizado, além do perigo inerente à permanência do pessoal encarregue da operação e manutenção do equipamento na zona de medição, em especial durante eventos hidrológicos extremos, como cheias rápidas.

## 5.2 Sugestões de trabalho futuro

Como uma primeira sugestão para estudos futuros, seria conveniente a identificação de uma sub-bacia com características físicas mais representativas das bacias hidrográficas da região, adoptando-se a mesma como bacia piloto para o estudo do transporte de sedimentos em suspensão neste tipo de cursos de água de montanha, sujeitos a um regime de escoamento torrencial, com acentuadas variações no caudal em decorrência da elevada irregularidade sazonal no regime de precipitações.

Nessa bacia piloto de menores dimensões, seria recomendável a escolha de diversos pontos de medição da turbidez e da condutividade eléctrica ao longo do canal principal, nomeadamente a jusante da confluência das linhas de água tributárias mais importantes.

Além disso, seria desejável a existência de uma estação meteorológica automática ou de um posto pluviométrico nessa sub-bacia ou nas suas proximidades ou, ainda, a instalação de um udómetro portátil, com *data logger*, de modo a permitir o registo contínuo da precipitação.

Seria ainda aconselhável a monitorização contínua da concentração dos sedimentos em suspensão, por meio da medição da turbidez da água. Tendo em conta o elevado preço dos turbidímetros comerciais, bem como a sua baixa autonomia e pequena capacidade de armazenamento de dados, além do elevado risco de danos ou perda do equipamento nas bacias de montanha em condições

hidrológicas adversas, uma possibilidade interessante seria o emprego, para tal, de um conjunto de turbidímetros de baixo custo, instalados ao longo de diversas linhas de água, capazes de operar e de registar os dados de turbidez durante longos períodos de tempo, idealmente superiores a um mês, como o turbidímetro experimental desenvolvido na Universidade da Madeira, descrito por Gonçalves *et al.* (2009).

Seria ainda conveniente avaliar, na prática, as potenciais vantagens e desvantagens da adopção da técnica da injeção contínua (Moore, 2004a,c) na estimação de caudais nos cursos de água de montanha com menor escoamento, em substituição à técnica da injeção instantânea tendo por base o balanço de massa (Hudson e Frazer, 2002; 2005), utilizada neste trabalho.

A utilização conjunta de um segundo condutivímetro seria outra sugestão, por possibilitar a estimação não só do caudal, mas também da velocidade do escoamento.

Outra ideia a explorar seria o estudo integrado do transporte de sedimentos em suspensão e de fundo, de modo a permitir a estimação do transporte total de sedimentos em bacias hidrográficas de montanha.

Antes de concluir, cabe ainda referir que as enormes dificuldades operacionais encontradas durante o desenvolvimento do trabalho de campo aqui descrito impediram a desejada realização de um estudo mais abrangente e prolongado da concentração e do transporte de sedimentos em suspensão na bacia da Ribeira Seca do Faial, bem como a sua extensão a outras bacias de montanha da Ilha da Madeira.

Assim, para finalizar, seria conveniente dispor, na execução de estudos futuros, de condições logísticas adequadas à monitorização contínua da turbidez e à medição periódica da condutividade eléctrica da água nos cursos de água de montanha em estudo, sob condições meteorológicas e hidrológicas adversas e em locais remotos, de modo a garantir não só a integridade do equipamento utilizado, mas também as condições mínimas de segurança e de conforto do pessoal encarregue da sua operação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aastad, J. & R. Søgne (1954), Discharge measurements by means of a salt solution, “the relative dilution method”, In: *Assemblée Générale de Rome, Tome III: Comptes-Rendus et Rapports de la Commission des Eaux de Surface*, Publication n° 38 de l'Association Internationale d'Hydrologie, pp. 289-292, Association Internationale d'Hydrologie Scientifique, Louvain.
- Adland, J. & J. Huang (2005), *A microcontroller based turbidity meter*, ECE 476 Final Project, School of Electrical and Computer Engineering, Cornell University, Ithaca, NY. Acedido em 27/09/2011 em [https://instruct1.cit.cornell.edu/courses/ee476/FinalProjects/s2005/jsa25\\_jyh25/TurbidityMeter.htm](https://instruct1.cit.cornell.edu/courses/ee476/FinalProjects/s2005/jsa25_jyh25/TurbidityMeter.htm)
- Ancey, C. (2005), *Une introduction à la dynamique des avalanches et des écoulements torrentiaux*, Laboratoire d'Hydraulique Environnementale, École Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Arattano, M. & L. Franzi (2004), Analysis of different water-sediment flow processes in a mountain torrent, *Natural Hazards and Earth System Sciences* 4(5/6): 783-791.
- Atkinson, T. C., D. I. Smith, J. J. Lavis & R. J. Whitaker (1973), Experiments in tracing underground waters in limestones, *Journal of Hydrology* 19: 323-349.
- Bacchi, B. & V. Villi (2005), Runoff and floods in the Alps: an overview, In: C. de Jong, D. Collins & R. Ranzi, Eds., *Climate and hydrology in mountain areas*, pp. 217-220, Wiley, Chichester, UK.
- Back, A. J. (2006), *Hidráulica e hidrometria aplicada*, EPAGRI, Florianópolis, SC.

- Bakar, S., W. R. Ismail & Z. A. Rahaman (2007), Suspended sediment concentration and turbidity relationship in two small catchments in Perlis, Malaysia, *Malaysian Journal of Civil Engineering* 19(2): 156-169.
- Barron, J. J. (2005), *Turbidity standards and reference materials*, Technical Paper, Reagecon Diagnostics Ltd, Shannon, Ireland. Acedido em 08/11/2010 em <http://www.reagecon.com/techpapers/tsph-turbidity-paper-v2.pdf>
- Barry, J. J., J. M. Buffington & J. G. King (2004), A general power equation for predicting bedload transport rates in gravel bed rivers, *Water Resources Research* 40, W10401, doi:10.1029/2004WR003190.
- Batalla, R. J., C. de Jong, P. Ergenzinger & M. Sala (1999), Field observations on hyperconcentrated flows in mountain torrents, *Earth Surface Processes and Landforms* 24(3): 247-253.
- Bathurst, J. C., W. H. Graf & H. H. Cao (1983), Bedforms and flow resistance in steep gravel-bed channels, In: Summer, B. M. & A. Muller, Eds., *Mechanics of sediment transport*, pp. 215-221, Balkema, Rotterdam.
- Benischke, R. & T. Harum (1990), Determination of discharge rates in turbulent streams by salt tracer dilution applying a microcomputer system; Comparison with current meter measurements, In: H. Lang & A. Musy, Eds., *Hydrology in Mountainous Regions, I: Hydrological Measurements; the Water Cycle*, IAHS Publication No. 193, pp. 215-221, IAHS Press, Wallingford, UK.
- Beniston, M. (2000), *Environmental change in mountains and uplands*, Arnold, London.
- Beven, K. J. (2001), *Rainfall-runoff modelling: The primer*, Wiley, Chichester.
- Bicalho, C. C. (2006), *Estudo do transporte de sedimentos em suspensão na bacia do rio Descoberto*, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- Blizard, C. R. & E. E. Wohl (1998), Relationships between hydraulic variables and bedload transport in a subalpine channel, Colorado Rocky Mountains, U.S.A., *Geomorphology* 22(3): 359-371.
- Boiten, W. (2008), *Hydrometry*, 3rd ed., CRC Press/Balkema, Leiden.

- Bolognesi, A., G. Gottardi & M. Maglionico (2006), Discharge measurements in a small ungauged river: comparison between conventional current-meter and tracer dilution methods, In: R. M. L. Ferreira, E. C. T. L. Alves, João G. A. B. Leal and A. H. Cardoso, Eds., *River Flow 2006: Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics* (Lisbon, Portugal, 6-8 September 2006), vol. 2, pp. 1835-1842, Taylor & Francis, London.
- Bortoluzzi, L. N. & O. V. Q. Fernandez (2008), Medição da vazão líquida em pequenos cursos d'água de Marechal Cândido Rondon (PR), *Geografia Ensino e Pesquisa* 12(1): 4265-4275.
- Bridge, J. S. (2003), *Rivers and floodplains: forms, processes, and sedimentary record*, Wiley-Blackwell, Chichester.
- Calhoun, D. L. (2000), *In-situ monitoring of suspended sediments: development of a densimetric instrument*, M.Sc. Thesis, University of Georgia, Athens, GA.
- Calhoun, D. L. & T. C. Rasmussen (1999), In-situ monitoring of suspended sediments: development of a densimetric monitoring instrument, In: K. J. Hatcher, Ed., *Proceedings of the 1999 Georgia Water Resources Conference*, pp. 303-306, University of Georgia, Athens, GA.
- Capesius, J. P., J. R. Sullivan, G. B. O'Neill & C. A. Williams (2005), *Using the tracer-dilution discharge method to develop streamflow records for ice-affected streams in Colorado*, USGS Scientific Investigations Report 2004-5164, U.S. Geological Survey, Reston, VA.
- Carvalho, N. O. (2008), *Hidrossedimentologia prática*, 2<sup>a</sup> ed., Interciência, Rio de Janeiro.
- Carvalho, A. M. G. & J. M. Brandão (1991), *Geologia do arquipélago da Madeira*, Museu Nacional de História Natural, Lisboa.
- Carvalho, N. O., N. P. Filizola Jr., P. M. C. Santos & J. E. F. W. Lima (2000), *Guia de práticas sedimentométricas*, Agência Nacional de Energia Elétrica, Brasília, DF.
- Carvalho, K. S., R. M. Paranhos & J. B. D. Paiva (2004), Limitações ao uso da relação entre turbidez e concentração de sedimentos em suspensão em duas

- pequenas bacias em Santa Maria, RS, In: *XXI Congresso Latinoamericano de Hidráulica* (São Pedro, SP, Brasil, 18-22 de outubro de 2004), IAHR/AIPH.
- Chin, A. (2002), The periodic nature of step-pool mountain streams, *American Journal of Science* 302(2): 144-167.
- Christensen, V. G., P. P. Rasmussen & A. C. Ziegler (2002), Comparison of estimated sediment loads using continuous turbidity measurements and regression analysis, In: *Federal Interagency Workshop on Turbidity and Other Sediment Surrogates* (Reno, NV, April 30-May 2, 2002). Acedido em 23/11/2010 em <http://water.usgs.gov/osw/techniques/TSS/christensen.pdf>
- Costa, J. E. (1984), Physical geomorphology of debris flow, In: Costa, J. E. & P. J. Fisher, Eds., *Development and application of geomorphology*, pp. 268-317, Springer-Verlag, Berlin.
- Day, T. J. (1977), Observed mixing lengths in mountain streams, *Journal of Hydrology* 35: 125-136.
- Duerk, M. D. (1983), *Automatic dilution gauging of rapidly varying flow*, U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 83-4088, Madison, WI.
- Elder, K. & R. Kattelmann (1990), Refinements in dilution gauging for mountain streams, In: H. Lang & A. Musy, Eds., *Hydrology in Mountainous Regions, I: Hydrological Measurements; the Water Cycle*, IAHS Publication No. 193, pp. 247-254, IAHS Press, Wallingford, UK.
- Fenton, C. (2006), *Turbidity and suspended sediment yields*, Freshwater Creek and Elk River Operations Report, Hydrologic year 2005, prepared for the Redwood Community Action Agency, Humboldt Bay Water Quality Improvement Program, Contract SWRCB 03-212-551-0, Humboldt, CA.
- Fleming, A. C. (2008), *Measuring streamflow in ice-affected streams using an automated dye-dilution system*, M.Sc. Thesis, Colorado School of Mines, Golden, CO.
- Fragoso, M., R. M. Trigo, J. G. Pinto, S. Lopes, A. Lopes, S. Ulbrich & C. Magro (2012), The 20 February 2010 Madeira flash-floods: synoptic analysis and extreme

rainfall assessment, *Natural Hazards and Earth System Sciences* 12(3): 715-730.

Gaspar, M. A. M. (2001), *Contribuição para a caracterização dos recursos hídricos na ilha da Madeira*, Projecto Final de Curso, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.

Gaspar, M. A. M. & M. M. Portela (2002), Contribuição para a caracterização dos recursos hídricos na ilha da Madeira: modelos para avaliação do escoamento superficial, In: *6º Congresso da Água* (Porto, 18-22 Mar. 2002), Associação Portuguesa de Recursos Hídricos.

Gees, A. (1990), Flow measurement under difficult measuring conditions: field experience with the salt dilution method, In: H. Lang & A. Musy, Eds., *Hydrology in Mountainous Regions, I: Hydrological Measurements; the Water Cycle*, IAHS Publication No. 193, pp. 255-262, IAHS Press, Wallingford, UK.

Gilman, K. (1977), Dilution gauging on the recession limb: 1. Constant rate injection method, *Hydrological Sciences Bulletin* 22(3): 353-369.

Gippel, C. J. (1989), The use of turbidimeters in suspended sediment research, *Hydrobiologia* 176/177(1): 465-480.

Gomez, B. & M. Church (1989), An assessment of bed load sediment transport formulae for gravel bed rivers, *Water Resources Research* 25(6): 1161-1186.

Gonçalves, C. C., L. A. Gomes & L. G. Lopes (2009), Low-cost continuous turbidity meter/recorder for suspended sediment monitoring in mountain streams, In: C. Andrade, Ed., *Book of Abstracts of the International Conference on Ecohydrology and Climate Change – EcoHCC'09* (Tomar, Portugal, 10-12 September 2009), pp. 82, IPT, Tomar.

Grant, G. E., F. J. Swanson & M. G. Wolman (1990), Pattern and origin of stepped-bed morphology in high-gradient streams, Western Cascades, Oregon, *Geological Society of America Bulletin* 102(3): 340-352.

Hartmann, C, L. A. S. Bulla & Fellini (2010), Uso do ADCP na avaliação do fluxo e no transporte de sedimentos no baixo rio Jacuí, Charqueadas, RS/Brasil, *Gravel* 8(1): 33-44.

- Holliday, C. P., T. C. Rasmussen & W. P. Miller (2003), Establishing the relationship between turbidity and total suspended sediment concentration, In: K. J. Hatcher (ed.), *Proceedings of the 2003 Georgia Water Resources Conference* (Athens, Georgia, April 23-24, 2003), Institute of Ecology, University of Georgia, Athens, GA.
- Hudson, R. & J. Fraser (2002), *Alternative methods of flow rating in small coastal streams*, Forest Research Extension Note EN-014 (Hydrology), Vancouver Forest Region, Nanaimo, BC, Canada.
- Hudson, R. & J. Fraser (2005), Introduction to salt dilution gauging for streamflow measurement, Part IV: the mass balance (or dry injection) method, *Streamline Watershed Management Bulletin* 9(1): 6-12.
- Jaeggi, M. N. R. (1995), Sediment transport in mountain rivers – A review, In: *Proceedings of the International Sabo Symposium* (Tokyo, Japan, Aug. 1995), Japan Society of Erosion Control Engineering.
- James, W. (1969), A new recording turbidity meter for rivers, *Bulletin of the International Association of Scientific Hydrology* 14(4): 71-76.
- Jarrett, R. D. (1990), Hydrologic and hydraulic research in mountain rivers, *Water Resources Research* 26(3): 419-429.
- Johansson, B. & D. Chen (2005), Estimation of areal precipitation for runoff modelling using wind data: a case study in Sweden, *Climate Research* 29(1): 53-61.
- Keller, H. M. (1973), Measurement and significance of electrical conductivity in small mountain streams, In: *Hydrometry: Proceedings of the Koblenz Symposium* (Koblenz, Germany, 13-19 September 1970), IAHS Publication No. 99, pp. 588-595, IAHS Press, Wallingford, UK.
- Lavigne, F. & H. Suwa (2004), Contrasts between debris flows, hyperconcentrated flows and stream flows at a channel of Mount Semeru, East Java, Indonesia, *Geomorphology* 61: 41-58.

- Lawler, D. M. & R. M. Brown (1992), A simple and inexpensive turbidity meter for the estimation of suspended sediment concentrations, *Hydrological Processes* 6(2): 159-168.
- Lee, A. J. & R. I. Ferguson (2002), Velocity and flow resistance in step-pool streams, *Geomorphology* 46(1-2): 59-71.
- Leite, A. L. S., C. N. Santos, F. A. S. Nobre & R. J. Sabiá (2002), Desenvolvimento de um software para cálculo da vazão de fontes naturais a partir da análise estatística de dados sobre a variação da condutividade elétrica, In: *Anais do XXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção* (Curitiba, PR, 23 a 25 de outubro de 2002), ABEPRO, Porto Alegre, RS.
- Lenzi, M. A. (2000), Variation in suspended sediment concentration during floods in the instrumented catchment of the Rio Cordon, In: M. A. Lenzi, Ed., *Dynamics of water and sediments in mountain basins*, Quaderni de Idronomia Montana n. 20, pp. 53-67, Editoriale Bios, Cozenza, Italy.
- Lewis, J. (1996), Turbidity-controlled suspended sediment sampling for runoff-event load estimation, *Water Resources Research* 32(7): 2299-2310.
- López Alonso, R. (2003), Fórmulas para el cálculo aproximado de la capacidad de transporte de sedimentos en ríos de montaña, *Cimbra: Revista del Colegio de Ingenieros Técnicos de Obras Públicas* 351: 32-37.
- López Alonso, R. (2005a), Características hidráulicas y geomorfológicas de ríos de montaña (I), *Cimbra: Revista del Colegio de Ingenieros Técnicos de Obras Públicas* 361: 36-39.
- López Alonso, R. (2005b), *Resistencia al flujo de ríos de montaña: Desarrollo de ecuaciones de predicción*, Tesis Doctoral, Universitat de Lleida, España.
- Mano V., J. Nemery, Ph. Belleudy & A. Poiriel (2009), Assessment of suspended sediment transport in four alpine watersheds (France): influence of the climatic regime, *Hydrological Processes* 23(5): 777-792.
- Martín Vide, J. L. (2007), *Ingeniería de ríos*, 2ª ed., Ediciones UPC, Barcelona.
- Meunier, M. (1991), *Eléments d'hydraulique torrentielle*, Cemagref Éditions, Antony.

- Meunier, M. (1999), *Les torrents du Nord-Ouest de la Martinique – Hydrologie des crues, érosion, hydraulique et dynamiques torrentielles*, Cemagref Éditions, Anthony.
- Millar, R. G. (1999), Grain and form resistance in gravel-bed rivers, *Journal of Hydraulic Research* 37(3): 303-312.
- Milliman, J. D. & J. P. M. Syvitski (1992), Geomorphic/tectonic control of sediment discharge to the ocean: The importance of small mountainous rivers, *Journal of Geology* 100(5): 525-544.
- Minella, J. P. G., G. H. Merten, J. M. Reichert & R. T. Clarke (2008a), Estimating suspended sediment concentrations from turbidity measurements and the calibration problem, *Hydrological Processes* 22(12): 1819-1830.
- Minella, J. P. G., G. H. Merten, J. M. Reichert, O. A. Roloff & A. S. Abreu (2008b), Aspectos da calibração de turbidímetros para a estimativa da concentração de sedimentos em suspensão, In: *Anais do VIII Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos* (Campo Grande, MS, 2 a 8 de novembro de 2008), Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, RS.
- Moore, R. D. (2004a), Construction of a mariotte bottle for constant-rate tracer injection into small streams, *Streamline Watershed Management Bulletin* 8(1): 15-16.
- Moore, R. D. (2004b), Introduction to salt dilution gauging for streamflow measurement: Part 1, *Streamline Watershed Management Bulletin* 7(4): 20-23.
- Moore, R. D. (2004c), Introduction to salt dilution gauging for streamflow measurement, Part 2: Constant-rate injection, *Streamline Watershed Management Bulletin* 8(1): 11-15.
- Moore, R. D. (2005), Slug injection using salt in solution, *Streamline Watershed Management Bulletin* 8(2): 1-6.
- Moore, R. D., G. Richards & A. Story (2008), Electrical conductivity as an indicator of water chemistry and hydrologic process, *Streamline Watershed Management Bulletin* 11(2): 25-29.

- Orwin, J. F. & C. C. Smart (2005), An inexpensive turbidimeter for monitoring suspended sediment, *Geomorphology* 68(1-2): 3-15.
- Papacosta, K. (2002), Turbidity calibration standards evaluated from a different perspective, In: *Federal Interagency Workshop on Turbidity and Other Sediment Surrogates* (Reno, NV, 30 April-2 May 2002). Acedido em 23/11/2010 em <http://water.usgs.gov/osw/techniques/TSS/kemon-test.pdf>
- Papadopoulou, A. A., A. A. Mouza, S. V. Paras & A. J. Karabelas (1998), A new turbidity meter for monitoring the quality of water, In: *International Conference on Protection and Restoration of the Environment IV* (Halkidiki, Greece, 1-4 July 1998). Acedido em 15/04/2011 em <http://philon.cheng.auth.gr/philon/site/sdocs/s19.pdf>
- Prada, S., M. A. Gaspar, M. O. Silva, J. V. Cruz, M. M. Portela & G. R. Hora (2003), Recursos hídricos da ilha da Madeira, *Comunicações do Instituto Geológico e Mineiro* 90: 125-142.
- Prada, S., A. Perestrelo, M. Siqueira, A. Nunes, C. Figueira & J. V. Cruz (2005), Disponibilidades hídricas da ilha da Madeira, In: *AQUAMAC – Técnicas y métodos para la gestion sostenible del agua en la Macaronesia*, pp. 261-294, Instituto Tecnológico de Canarias, Cabildo de Lanzarote y Consejo Insular de Aguas de Lanzarote.
- Radulović, M., D. Radojević, N. Dević & M. Blečić (2008), Discharge calculation of the spring using salt dilution method – Application site Bolje Sestre spring (Montenegro), In: *Proceedings of BALWOIS 2008 - 3rd Conference on Water, Climate and Environment* (Ohrid, Republic of Macedonia, 27-31 May 2008). Acedido em 28/09/2010 em [http://balwois.com/balwois/administration/full\\_paper/ffp-1257.pdf](http://balwois.com/balwois/administration/full_paper/ffp-1257.pdf)
- Rescan (2006), Salt dilution method of river flow monitoring, In: *Galore Creek Surface Hydrology Assessment Baseline Report*, Report No. 757-5, Appendix 3, Rescan Environment Services Ltd., Vancouver, BC, Canada. Acedido em 23/09/2010 em [http://a100.gov.bc.ca/appsdata/epic/documents/p239/d21947/1151513013410\\_21fd8d173c3e4d33a46f84e7ced558b5.pdf](http://a100.gov.bc.ca/appsdata/epic/documents/p239/d21947/1151513013410_21fd8d173c3e4d33a46f84e7ced558b5.pdf)

- Robert, A. (2003), *River processes: An introduction to fluvial dynamics*, Hodder Arnold, London.
- Rodrigues, D. (2006), Fluxos de detritos na ilha da Madeira, In: *Dinâmicas Geomorfológicas. Metodologias. Aplicação* (Volume de Resumos do 3º Congresso Nacional de Geomorfologia, Funchal, 12-14 Out. 2006), Associação Portuguesa de Geomorfólogos.
- Rodrigues, D. & F. J. Ayala-Caicedo (2003), Rain induced landslides and debris flows in Madeira Island, Portugal, *Landslide News* (Japan Landslide Society) 14-15: 43-45.
- Romero Suárez, Y. V. (2000), *Estudo da resistência ao escoamento em canais de fundo fixo*, Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo.
- Ryan, S. E., L. S. Porth & C. A. Troendle (2002), Defining phases of bedload transport using piecewise regression, *Earth Surface Processes and Landforms* 27(9): 971-990.
- Schmidt, K. & P. Ergenzinger (1994), Recent developments and perspectives in mountain river research, In: Ergenzinger, P. & K. Schmidt, Eds., *Dynamics and geomorphology of mountain rivers*, pp. 3-11, Springer-Verlag, Berlin.
- Schoellhamer, D. H. (2001), Continuous monitoring of suspended sediment in rivers by use of optical sensors, In: *Proceedings of the Seventh Federal Interagency Sedimentation Conference* (Reno, NV, March 25-29, 2001), Vol. 1, pp. III-160-167, U.S. Inter-Agency Committee on Water Resources, Subcommittee on Sedimentation.
- Schoellhamer, D. H. & S. A. Wright (2003), Continuous measurement of suspended-sediment discharge in rivers by use of optical backscatterance sensors, In: J. Bogen, T. Fergus & D. E. Walling, Eds., *Erosion and sediment transport measurement in rivers: technological and methodological advances*, IAHS Publication No. 283, pp. 28-36, IAHS Press, Wallingford, UK.
- Shahin, M. (2002), Hydrology and water resources of African islands, In: *Hydrology and water resources of Africa*, Chapt. 13, pp. 565-582, Kluwer, Dordrecht.

- Silva, L. F. & M. Bernardes (2009), Utilização de Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) em seção transversal do rio Sapucaí (MG): descrição e análise de medições e projeções de pesquisas na área, In: 4<sup>o</sup> Encontro Técnico-Científico em Suporte à Gestão das Águas da Bacia do Rio Doce (Ouro Preto, MG, 17-19 Jun. 2009). Acedido em 18/05/2012 em [http://www.redectidoce.com.br/sistema/arquivos/artigos/100/154512150409irn\\_unifei\\_rio\\_doce.pdf](http://www.redectidoce.com.br/sistema/arquivos/artigos/100/154512150409irn_unifei_rio_doce.pdf)
- Silva, L. L., C. L. Donnici, J. D. Ayala, C. H. Freitas, R. M. Moreira & A. M. F. Pinto (2009), Traçadores: o uso de agentes químicos para estudos hidrológicos, ambientais, petroquímicos e biológicos, *Quimica Nova* 32(6): 1576-1585.
- Spence, C. & M. McPhie (1997), Streamflow measurement using salt dilution in tundra streams, Northwest Territories, Canada, *Journal of American Water Resources Association* 33(2): 285-291.
- Sziemer, P. (2000), *Madeira's natural history in a nutshell*, Francisco Ribeiro e Filhos, Funchal.
- Thompson, C. J. (2006), *The geomorphology of southeast Australian mountain streams*, Ph.D. Thesis, School of Physical, Environmental and Mathematical Sciences, University of New South Wales.
- Tinkler, K. J. & E. E. Wohl, Eds. (1998), *Rivers over rock: Fluvial processes in bedrock channels*, American Geophysical Union, Washington, DC.
- Tomazoni, J. C., L. E. Mantovani, A. V. L. Bittencourt & E. F. Rosa Filho (2005), Utilização de medidas de turbidez na quantificação da movimentação de sólidos por veiculação hídrica nas bacias dos rios Anta Gorda, Brinco, Coxilha Rica e Jirau - Sudoeste do Estado do Paraná, *Boletim Paranaense de Geociências* 57: 49-56.
- Uhrich, M. A. & H. M. Bragg (2003), *Monitoring instream turbidity to estimate continuous suspended-sediment loads and yields and clay-water volumes in the Upper North Santiam River Basin, Oregon, 1998-2000*, USGS Water-Resources Investigations Report 03-4098, U.S. Geological Survey, Portland, OR.
- Valente, B. (2010), Temporal na ilha da Madeira – causas, consequências e formas mitigadoras dos danos, *Ingenium* 116: 44-48.

- Verdú Arnal, J. M. (2003), *Análisis y modelización de la respuesta hidrológica y fluvial de una extensa cuenca de montaña mediterránea (río Isábena, Pre-Pirineo)*, Tesis Doctoral, Universitat de Lleida, España.
- Viviroli, D., R. Weingartner & B. Messerli (2003), Assessing the hydrological significance of the world's mountains, *Mountain Research and Development* 23(1): 32-40.
- Warburton, J. (1992), Observations of bed load transport and channel bed changes in a proglacial mountain stream, *Arctic and Alpine Research* 24(3): 195-203.
- Wohl, E. (2000), *Mountain rivers*, American Geophysical Union, Washington, DC.
- Woo, M.-K. & J. A. A. Jones (2002), Coping with hydrological extremes, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 7(3): 201-202.
- WRTC (2008), *Big Creek watershed assessment report*, prepared for the North Coast Regional Water Quality Control Board, Watershed Research and Training Center, Hayfork, CA. Acedido em 21/09/2010 em [http://www.tcrd.net/pdf/BigCreekWatershedAssessmentReport\\_Final.pdf](http://www.tcrd.net/pdf/BigCreekWatershedAssessmentReport_Final.pdf)
- Young, W. L., J. M. Olley & I. P. Prosser (2002), Predicting channel type from catchment and hydrological variables, In: Dyer, F., M. Thoms & J. M. Olley, Eds., *The structure, function and management implications of fluvial sedimentary systems*, pp. 53-60, IAHS Press, Wallingford.
- Zimmermann, A. & M. Church (2001), Channel morphology, gradient profiles and bed stresses during flood in a step-pool channel, *Geomorphology* 40(3-4): 311-327.

## ANEXO 1

As Tabelas A1.1 e A1.2 apresentam os valores de precipitação registados nos dias 6 e 7 de Outubro de 2010 nas estações meteorológicas do Caniçal/Ponta de São Lourenço, Santo da Serra, Santana e São Jorge, disponibilizados pelo Instituto de Meteorologia.

Tabela A1.1 – Precipitação horária registada no dia 6 de Outubro de 2010 nas estações meteorológicas de interesse mantidas pelo Instituto de Meteorologia.

Hora	Precipitação horária (mm)			
	Caniçal	Sto. da Serra	Santana	São Jorge
00:00	0	0	0	0
∴	∴	∴	∴	∴
12:00	0	0	0	0
13:00	0	0	0	0,3
14:00	FALHA	0	0	0
15:00	0	0	0	0
16:00	0	0,7	6,0	1,3
17:00	0,9	0,3	2,9	0,9
18:00	0,8	5,5	4,1	3,1
19:00	2,5	0,8	4,4	4,1
20:00	0,2	0,2	0	0,1
21:00	0	0	0	0
22:00	0	0	0,1	0
23:00	0	0	0	0
Total	4,4	7,5	17,5	9,8

Tabela A1.2 – Precipitação horária registada no dia 7 de Outubro de 2010 nas estações meteorológicas de interesse mantidas pelo Instituto de Meteorologia.

Hora	Precipitação horária (mm)			
	Canical	Sto. da Serra	Santana	São Jorge
00:00	0	0	0	0
01:00	2,0	0	0	0
02:00	0,3	0	0,1	0
03:00	0	0	0	0
04:00	0	0	0	0
05:00	0	0	0	0
06:00	0	0,1	0	0
07:00	0	0	0,1	0
08:00	0	0	0	0
09:00	0	0	0	0
10:00	0	0	0	0
11:00	0	0	0	0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
23:00	0	0	0	0
Total	2,3	0,1	0,2	0

Os valores de precipitação registados nos postos udográficos da Fajã da Nogueira e do Lombo dos Palheiros nos mesmos dias, disponibilizados pelo Departamento de Hidráulica e Tecnologias Energéticas do Laboratório Regional de Engenharia Civil (LREC), são apresentados na Tabela A1.3.

Os dados de precipitação horária referentes às estações meteorológicas e aos postos udométricos de interesse são mostrados, de forma gráfica, nas Figuras A1.1 a A1.4 e nas Figuras A1.5 e A1.6, respectivamente.

Tabela A1.3 – Precipitação horária registada nos dias 6 e 7 de Outubro de 2010 nos postos udográficos de interesse mantidos pelo LREC.

Hora	Precipitação horária (mm)			
	06/08/2010		07/08/2010	
	Fajã da Nogueira	Lombo dos Palheiros	Fajã da Nogueira	Lombo dos Palheiros
01:00	0	0	0	0
02:00	0	0	0,2	0
03:00	0	0	0	0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
15:00	0	0	0	0
16:00	1,0	1,2	0	0
17:00	0	2,4	0	0
18:00	10,4	6,4	0	0
19:00	3,6	5,6	0	0
20:00	0	1,0	0	0
21:00	0	0	0	0
22:00	0	0	0	0
23:00	0	0,2	0	0
00:00	0	0	0	0
Total	15,0	16,8	0,2	0

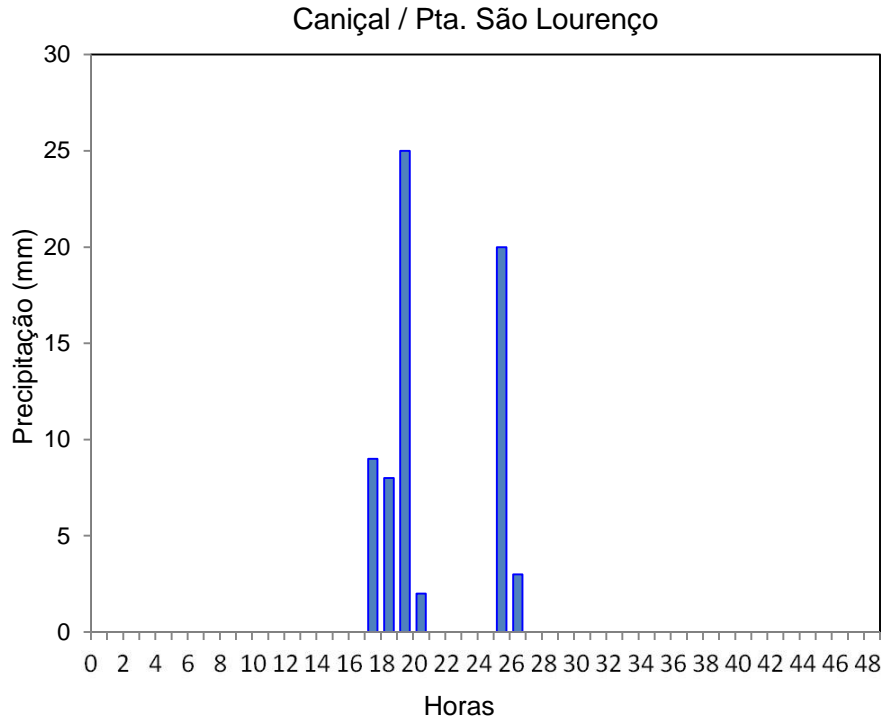


Figura A1.1 – Precipitação horária registada nos dias 6 e 7 de Outubro de 2010 na estação meteorológica do Caniçal/Ponta de São Lourenço.

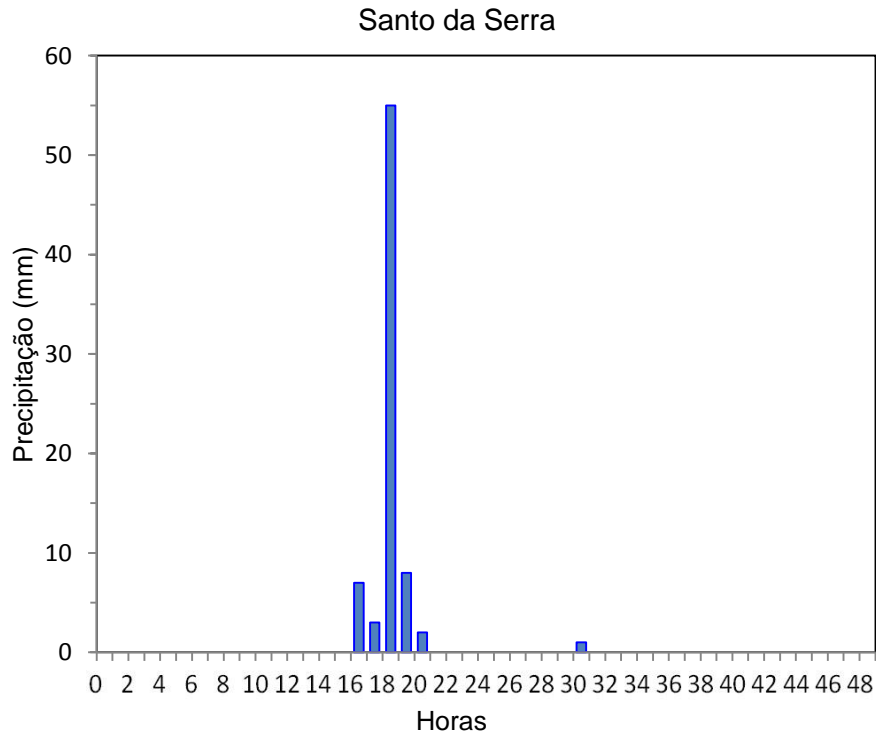


Figura A1.2 – Precipitação horária registada nos dias 6 e 7 de Outubro de 2012 na estação meteorológica do Santo da Serra.

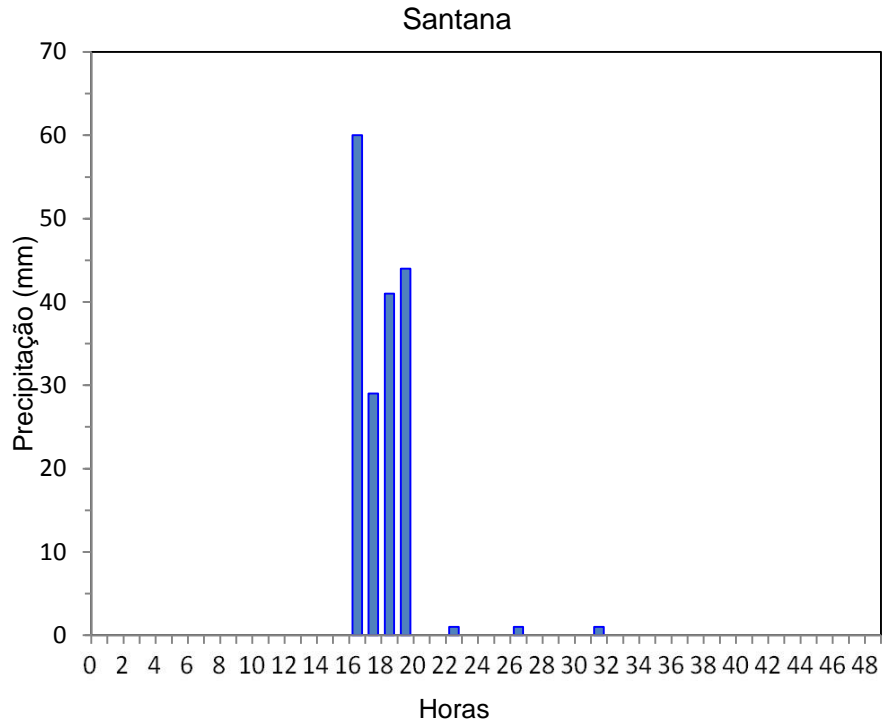


Figura A1.3 – Precipitação horária registada nos dias 6 e 7 de Outubro de 2010 na estação meteorológica de Santana.

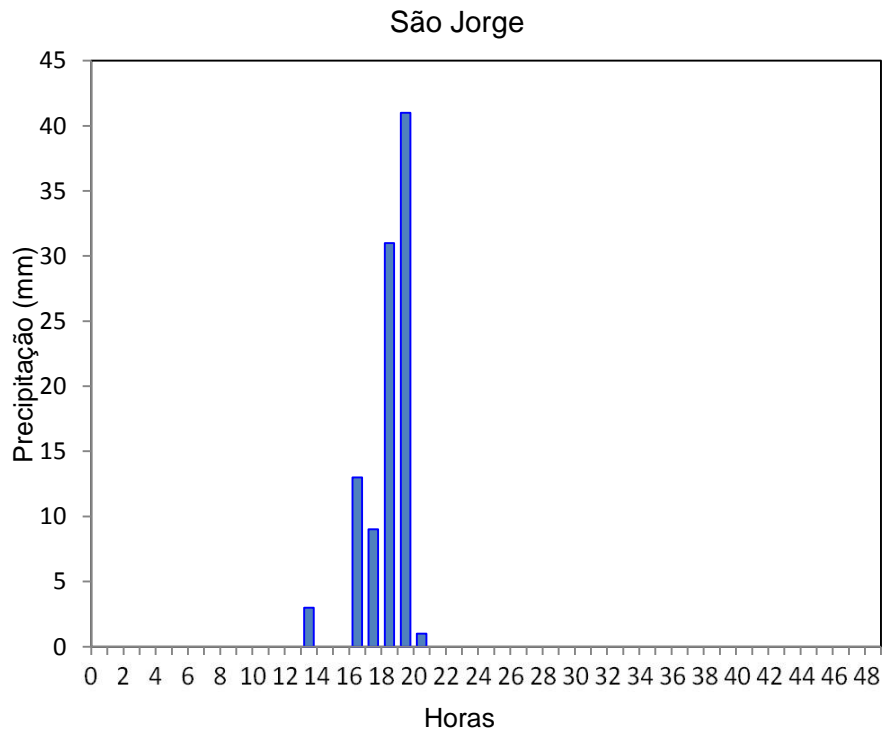


Figura A1.4 – Precipitação horária registada nos dias 6 e 7 de Outubro de 2012 na estação meteorológica de São Jorge.

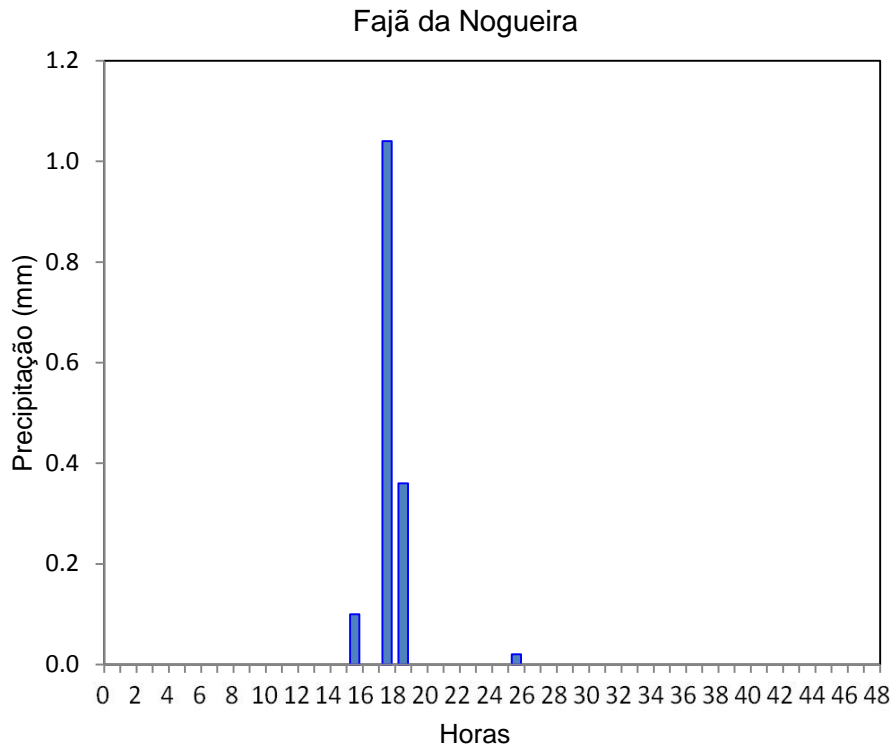


Figura A1.5 – Precipitação horária registada nos dias 6 e 7 de Outubro de 2010 no posto udométrico da Fajã da Nogueira.

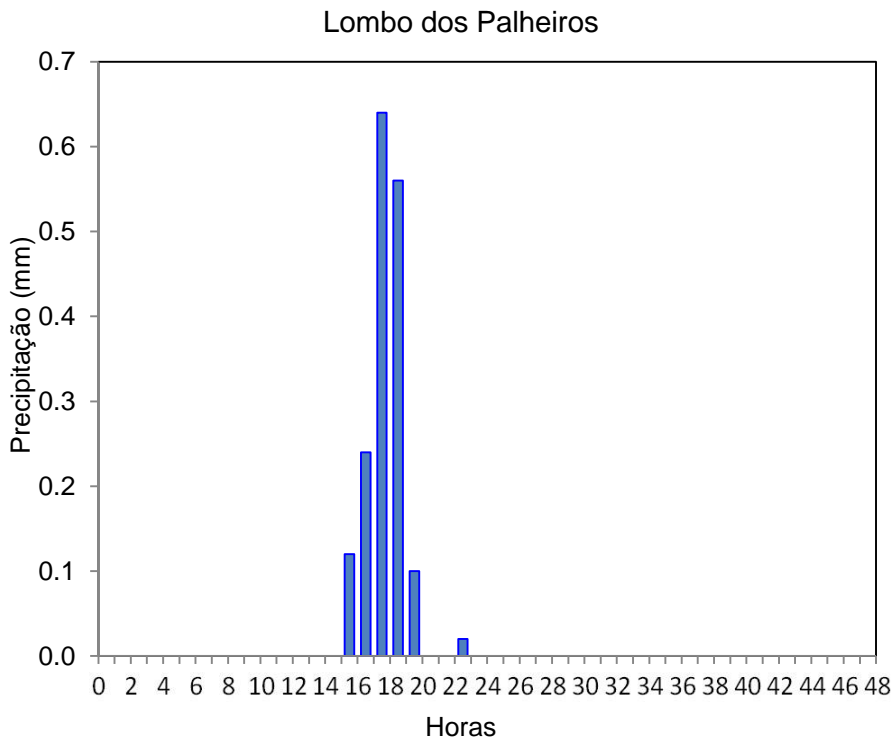


Figura A1.6 – Precipitação horária registada nos dias 6 e 7 de Outubro de 2010 no posto udométrico do Lombo dos Palheiros.

## ANEXO 2

A Tabela A2.1 apresenta os valores de turbidez mínima, média e máxima das suspensões preparadas com sedimentos provenientes do ponto de recolha nº 1 na Ribeira do Lajeado.

Tabela A2.1 – Turbidez das suspensões com diferentes concentrações preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira do Lajeado, ponto nº 1.

Concentração (mg/l)	Turbidez (NTU)		
	Mínima	Média	Máxima
500	290	315	341
1000	594	637	376
1500	906	943	978
2000	1214	1247	1278
2500	1477	1519	1561
3000	1727	1776	1816
3500	1997	2048	2096
4000	2185	2259	2310

A Figura A2.1 mostra a relação entre a turbidez média e a concentração de sedimentos nessas mesmas suspensões. A variabilidade dos valores de turbidez medidos é mostrada graficamente na Figura A2.2.

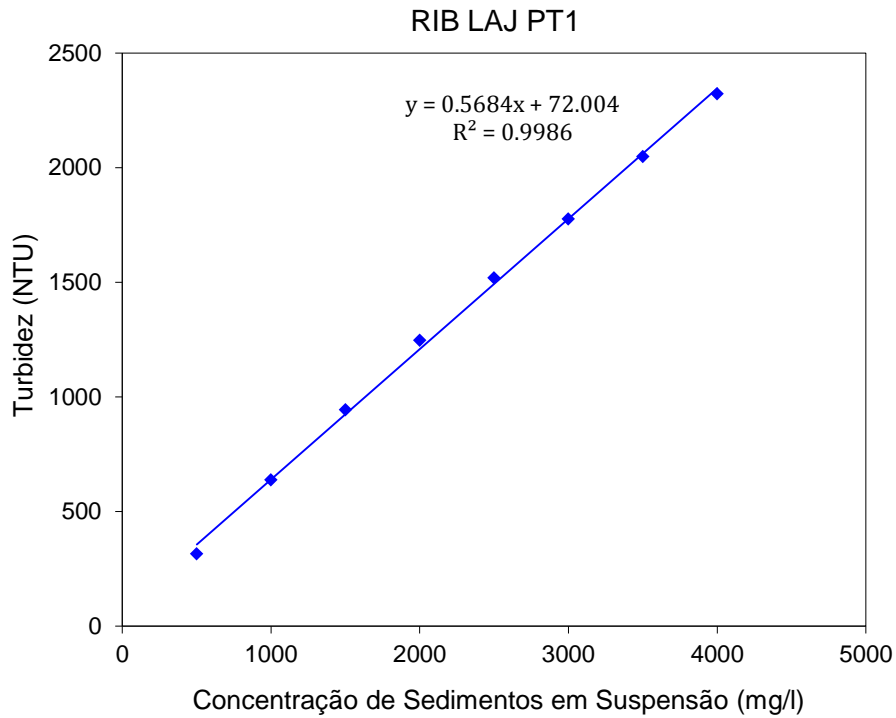


Figura A2.1 – Relação entre a turbidez média e a concentração de sedimentos em suspensões preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira do Lajeado, ponto nº 1.

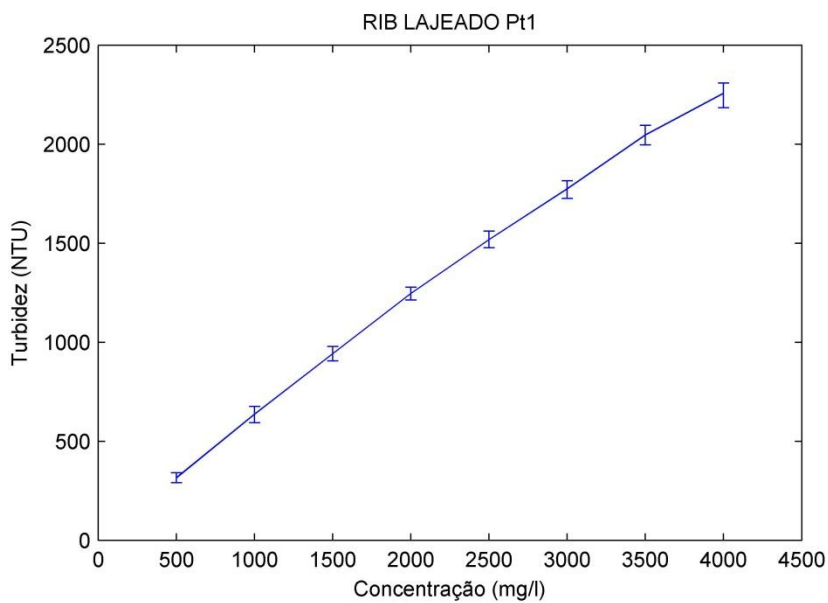


Figura A2.2 – Diagrama de dispersão com barras de erro referente às medições de turbidez das suspensões preparadas com sedimentos extraídos da Ribeira do Lajeado, ponto nº 1.

Os valores de turbidez mínima, média e máxima das suspensões preparadas com sedimentos provenientes do ponto de recolha nº 2 na Ribeira do Lajeado são apresentados na Tabela A2.2.

Tabela A2.2 – Turbidez das suspensões com diferentes concentrações preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira do Lajeado, ponto nº 2.

Concentração (mg/l)	Turbidez (NTU)		
	Mínima	Média	Máxima
500	331	365	392
1000	610	709	777
1500	1004	1077	1116
2000	1070	1413	1506
2500	1691	1740	1777
3000	1952	2074	2146
3500	2117	2362	2451
4000	2599	2656	2713

A relação entre a turbidez média e a concentração de sedimentos nessas mesmas suspensões é mostrada na Figura A2.3, sendo a variabilidade dos valores de turbidez medidos mostrada graficamente na Figura A2.4.

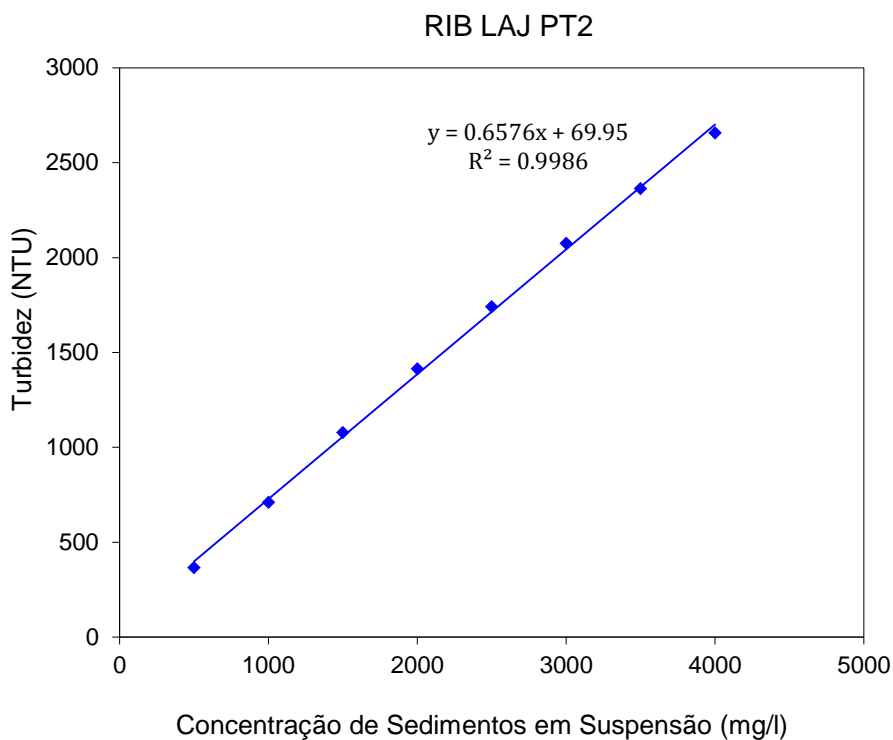


Figura A2.3 – Relação entre a turbidez média e a concentração de sedimentos em suspensões preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira do Lajeado, ponto nº 2.

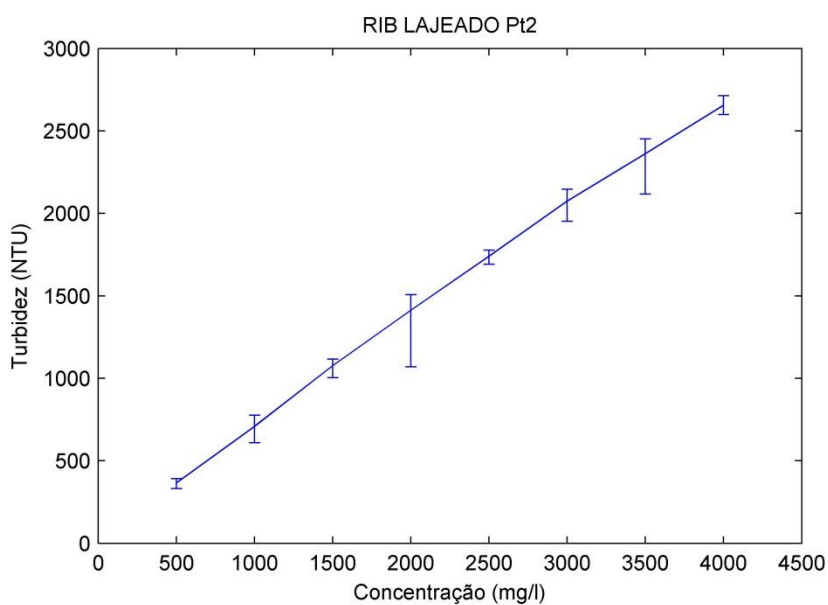


Figura A2.4 – Diagrama de dispersão com barras de erro referente às medições de turbidez das suspensões preparadas com sedimentos extraídos da Ribeira do Lajeado, ponto nº 2.

Na Tabela A2.3 são apresentados os valores de turbidez mínima, média e máxima das suspensões preparadas com sedimentos extraídos da Ribeira de Santa Luzia.

A Figura A2.5 apresenta a relação aproximadamente linear existente entre a turbidez média e a concentração de sedimentos nessas mesmas suspensões. A variabilidade dos valores de turbidez medidos é mostrada graficamente na Figura A2.6.

Tabela A2.3 – Turbidez das suspensões com diferentes concentrações preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira de Santa Luzia.

Concentração (mg/l)	Turbidez (NTU)		
	Mínima	Média	Máxima
250	162	180	192
500	319	343	371
750	500	520	544
1000	657	687	720
1250	812	849	891
1500	998	1028	1060
1750	1109	1153	1200
2000	1247	1341	1397
2250	1403	1439	1488
2500	1536	1573	1606
2750	1691	1739	1795
3000	1808	1854	1897
3250	2000	2054	2116
3500	2080	2146	2216
3750	2276	2328	2396
4000	2383	2452	2509

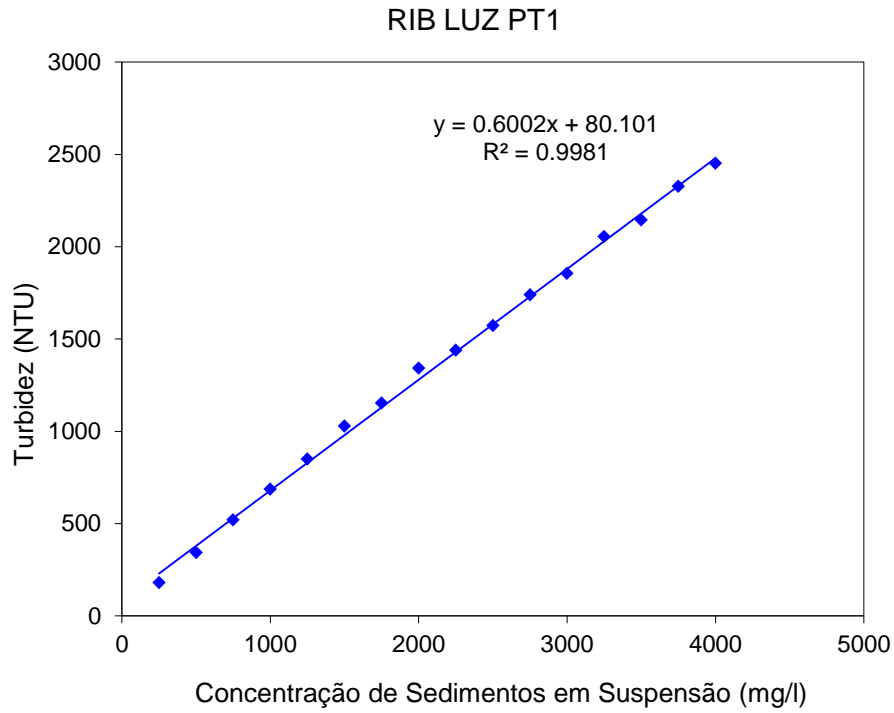


Figura A2.5 – Relação entre a turbidez média e a concentração de sedimentos em suspensões preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira de Santa Luzia.

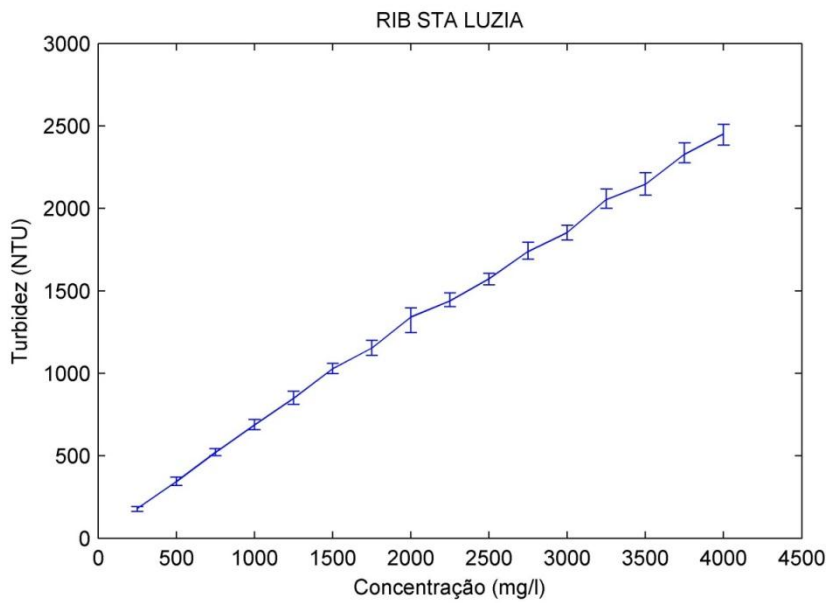


Figura A2.6 – Diagrama de dispersão com barras de erro referente às medições de turbidez das suspensões preparadas com sedimentos extraídos da Ribeira de Santa Luzia.

## ANEXO 3

Neste Anexo, nas Figuras A3.1 a A3.8, são apresentados os gráficos correspondentes aos valores de turbidez de suspensões com diferentes concentrações, na faixa de 500 mg/l a 4000 mg/l, preparadas com sedimentos extraídos no ponto de recolha nº 1 na Ribeira do Lajeado.

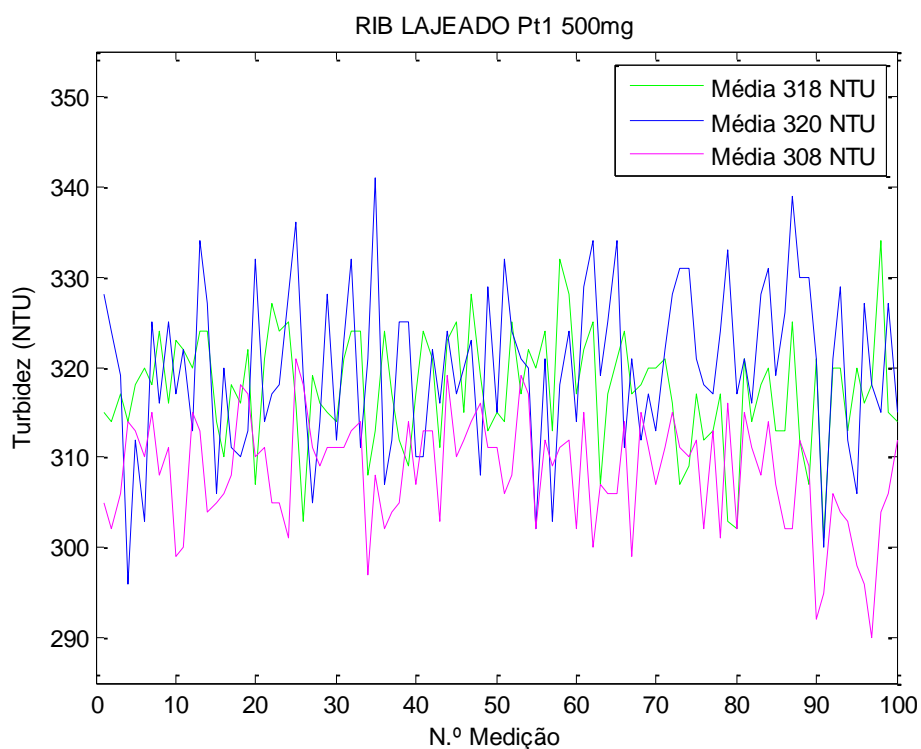


Figura A3.1 – Medidas de turbidez de suspensões com concentração de 500 mg/l preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira do Lajeado, ponto nº 1.

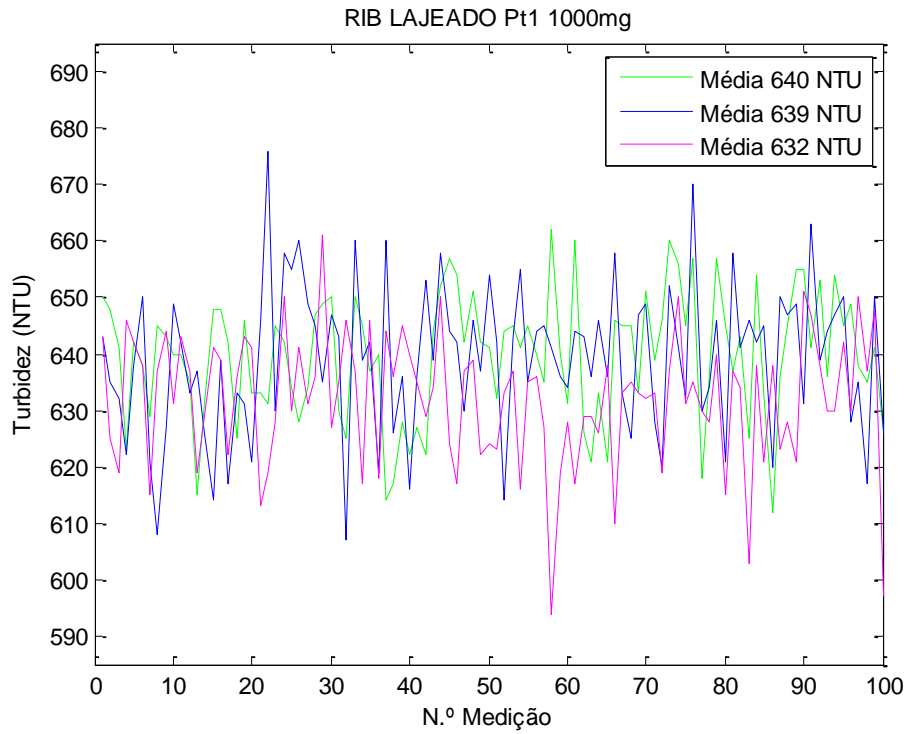


Figura A3.2 – Medidas de turbidez de suspensões com concentração de 1000 mg/l preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira do Lajeado, ponto n<sup>o</sup> 1.

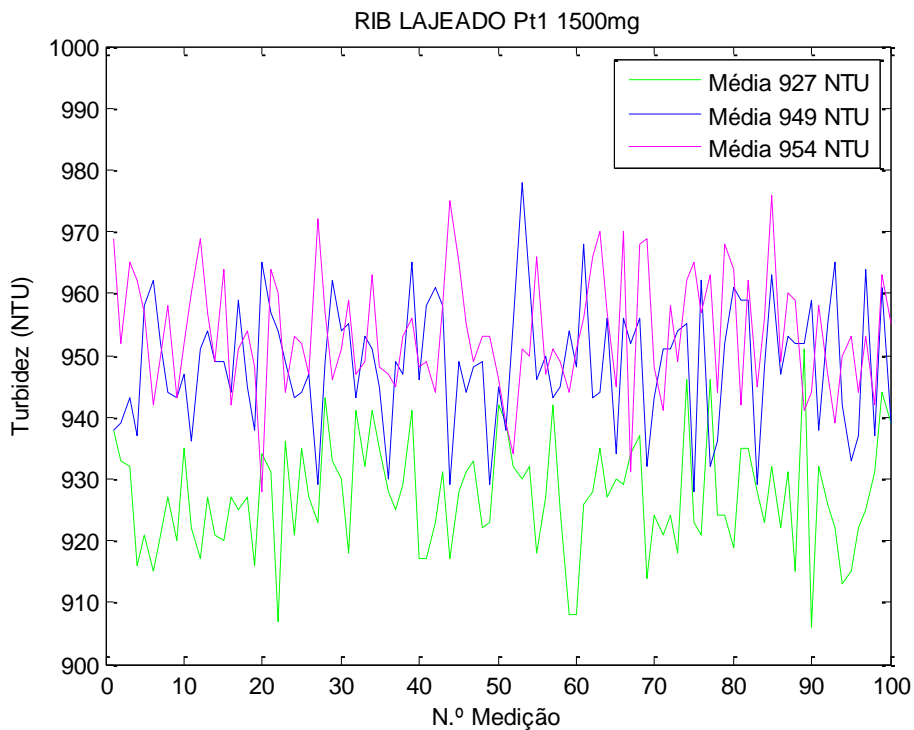


Figura A3.3 – Medidas de turbidez de suspensões com concentração de 1500 mg/l preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira do Lajeado, ponto n<sup>o</sup> 1.

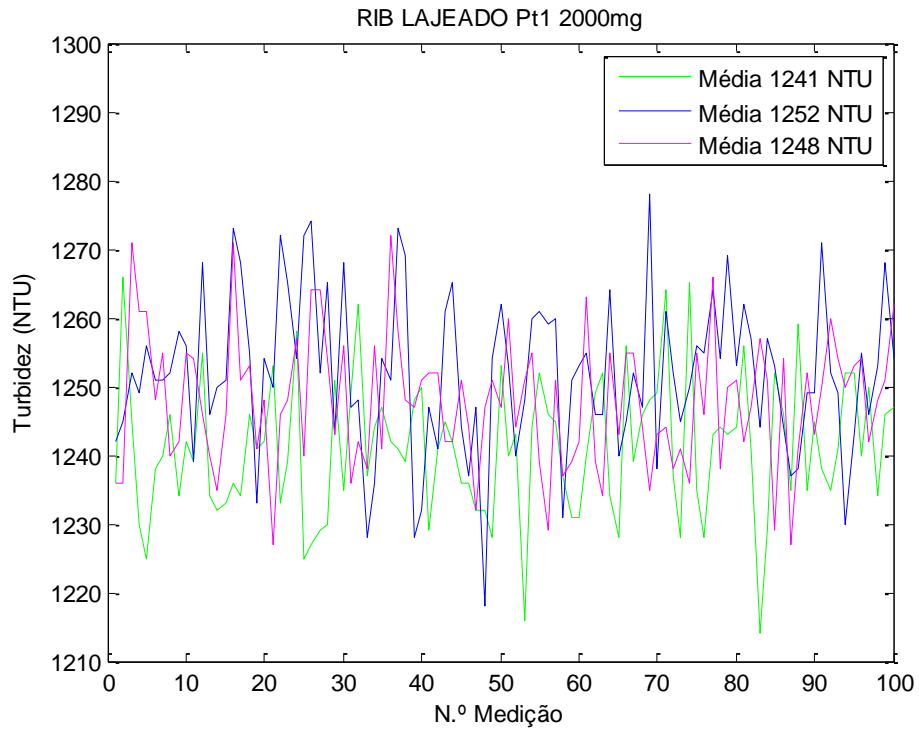


Figura A3.4 – Medidas de turbidez de suspensões com concentração de 2000 mg/l preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira do Lajeado, ponto nº 1.

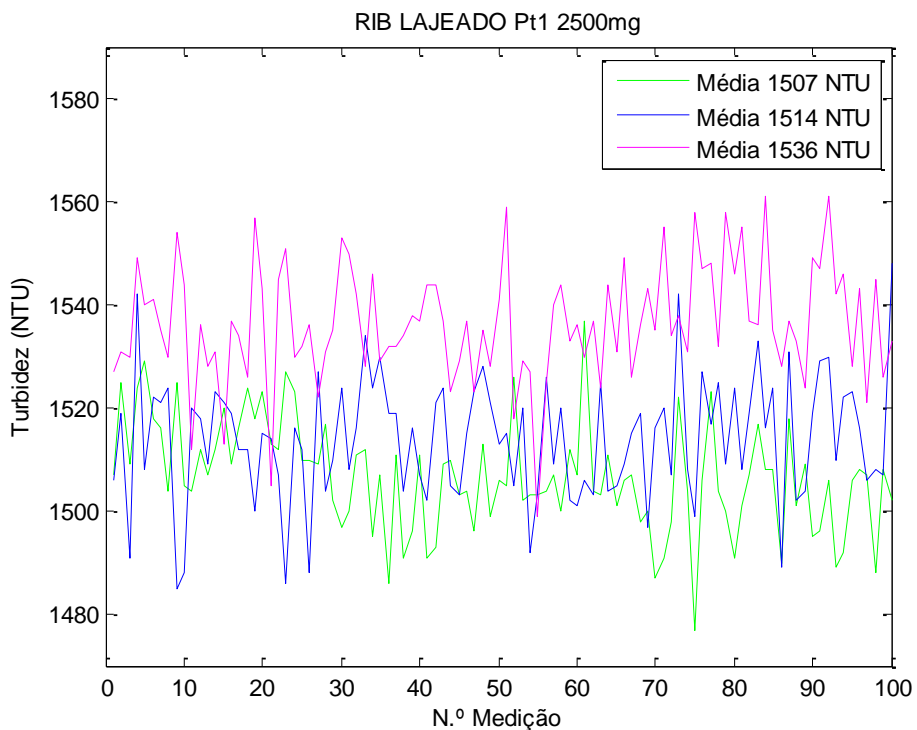


Figura A3.5 – Medidas de turbidez de suspensões com concentração de 2500 mg/l preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira do Lajeado, ponto nº 1.

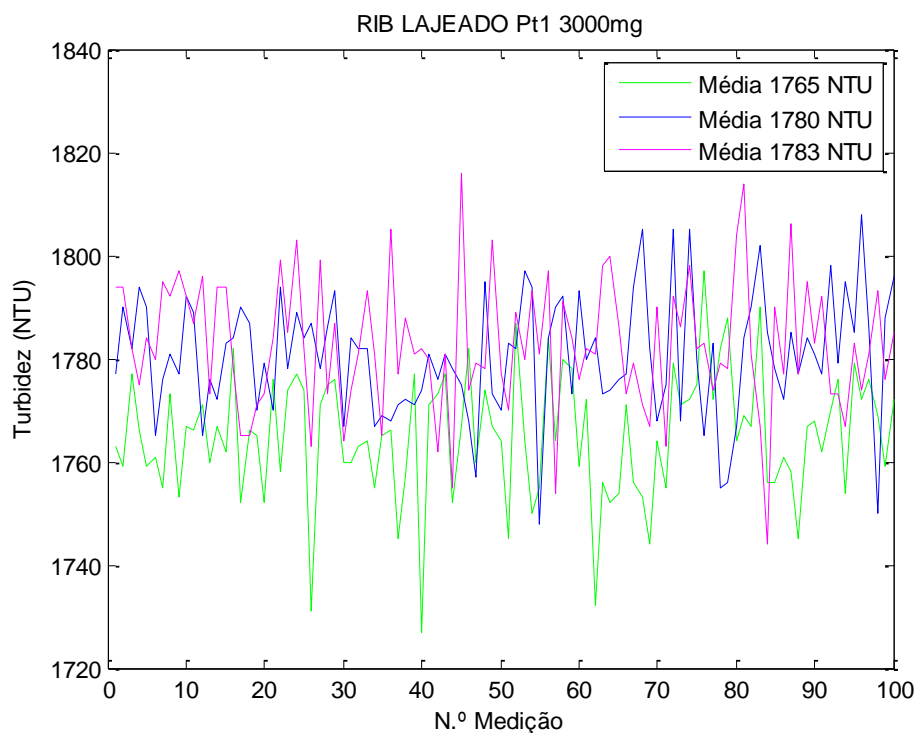


Figura A3.6 – Medidas de turbidez de suspensões com concentração de 3000 mg/l preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira do Lajeado, ponto nº 1.

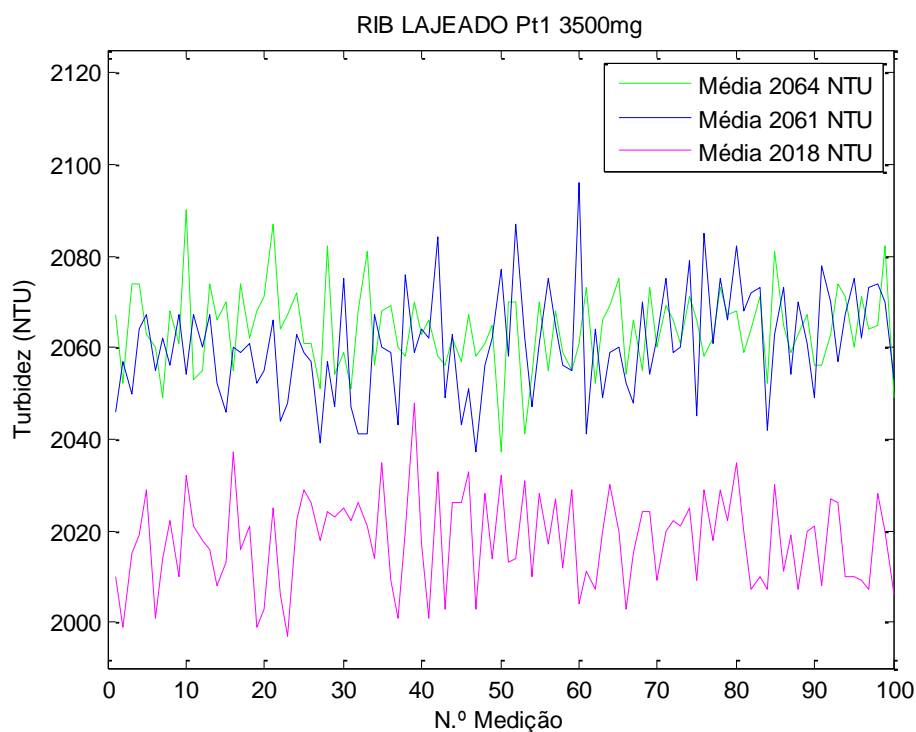


Figura A3.7 – Medidas de turbidez de suspensões com concentração de 3500 mg/l preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira do Lajeado, ponto nº 1.

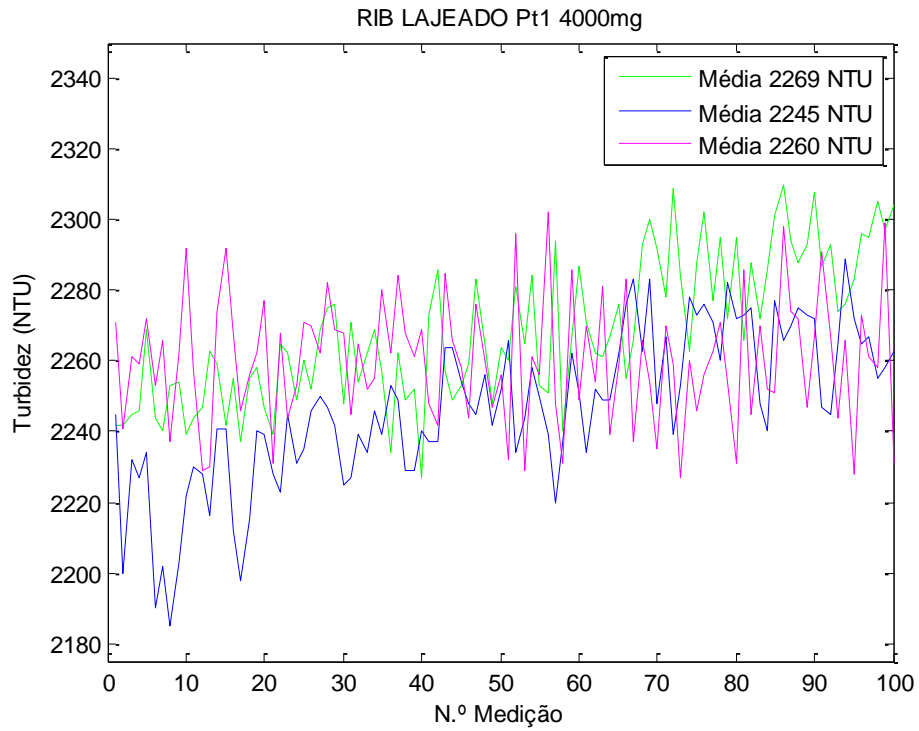


Figura A3.8 – Medidas de turbidez de suspensões com concentração de 4000 mg/l preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira do Lajeado, ponto n.º 1.

## ANEXO 4

Nas Figuras A4.1 a A4.8, são apresentados os gráficos correspondentes aos valores de turbidez de suspensões com concentrações na faixa de 500 mg/l a 4000 mg/l, preparadas com sedimentos extraídos no ponto de recolha nº 2 na Ribeira do Lajeado.

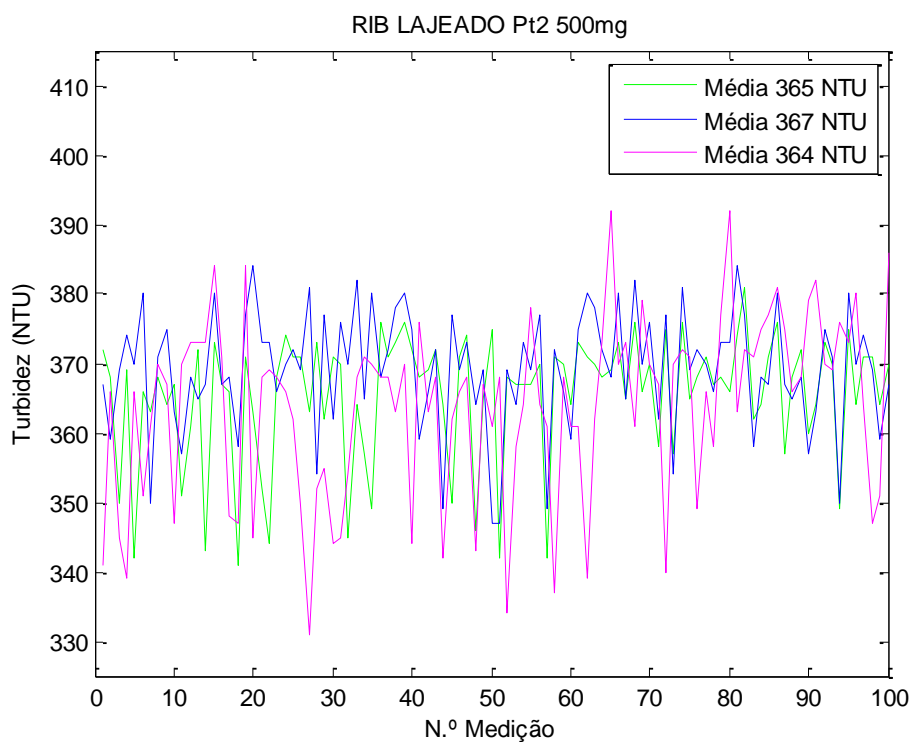


Figura A4.1 – Medidas de turbidez de suspensões com concentração de 500 mg/l preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira do Lajeado, ponto nº 2.

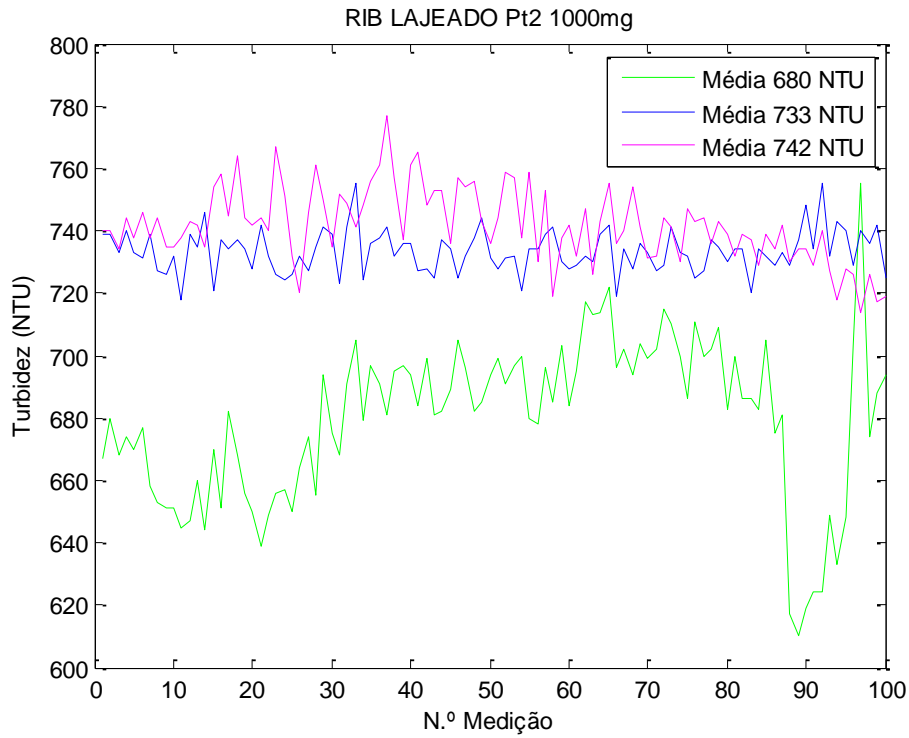


Figura A4.2 – Medidas de turbidez de suspensões com concentração de 1000 mg/l preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira do Lajeado, ponto nº 2.

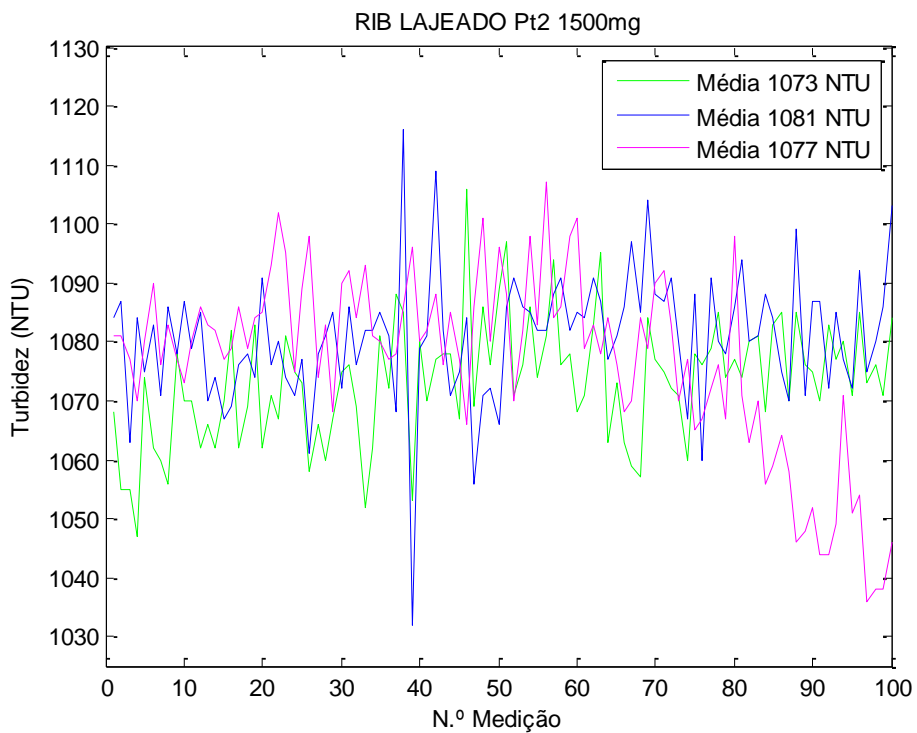


Figura A4.3 – Medidas de turbidez de suspensões com concentração de 1500 mg/l preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira do Lajeado, ponto nº 2.

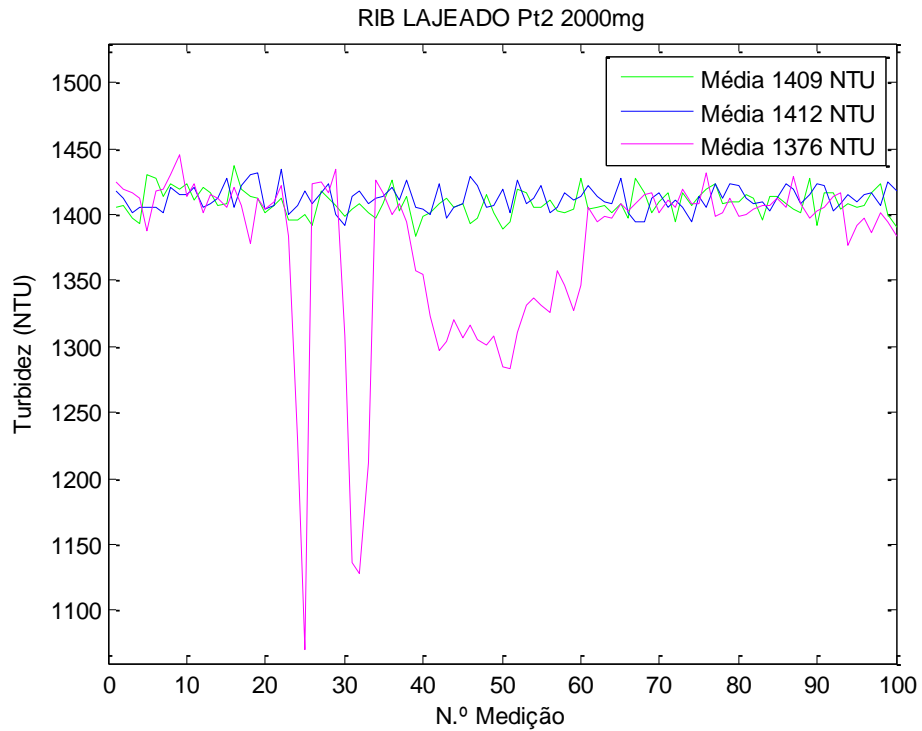


Figura A4.4 – Medidas de turbidez de suspensões com concentração de 2000 mg/l preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira do Lajeado, ponto n.º 2.

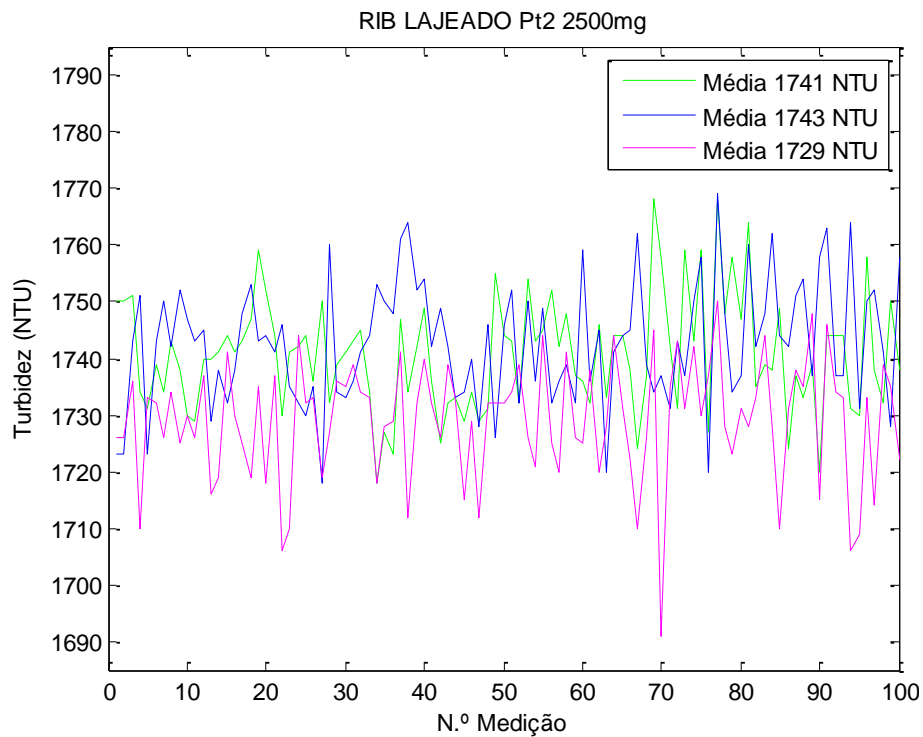


Figura A4.5 – Medidas de turbidez de suspensões com concentração de 2500 mg/l preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira do Lajeado, ponto n.º 2.

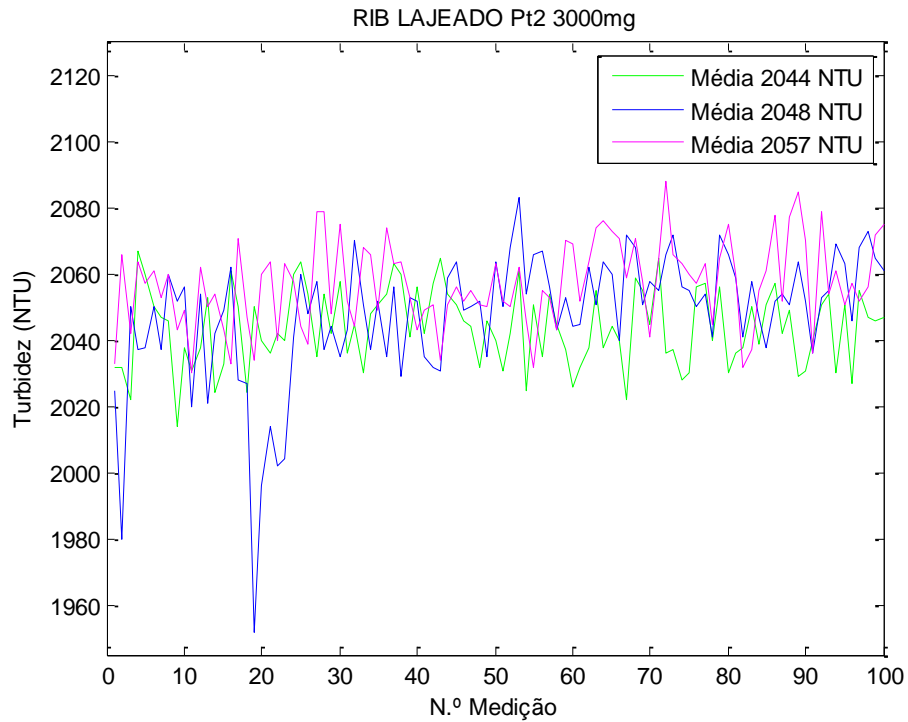


Figura A4.6 – Medidas de turbidez de suspensões com concentração de 3000 mg/l preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira do Lajeado, ponto nº 2.

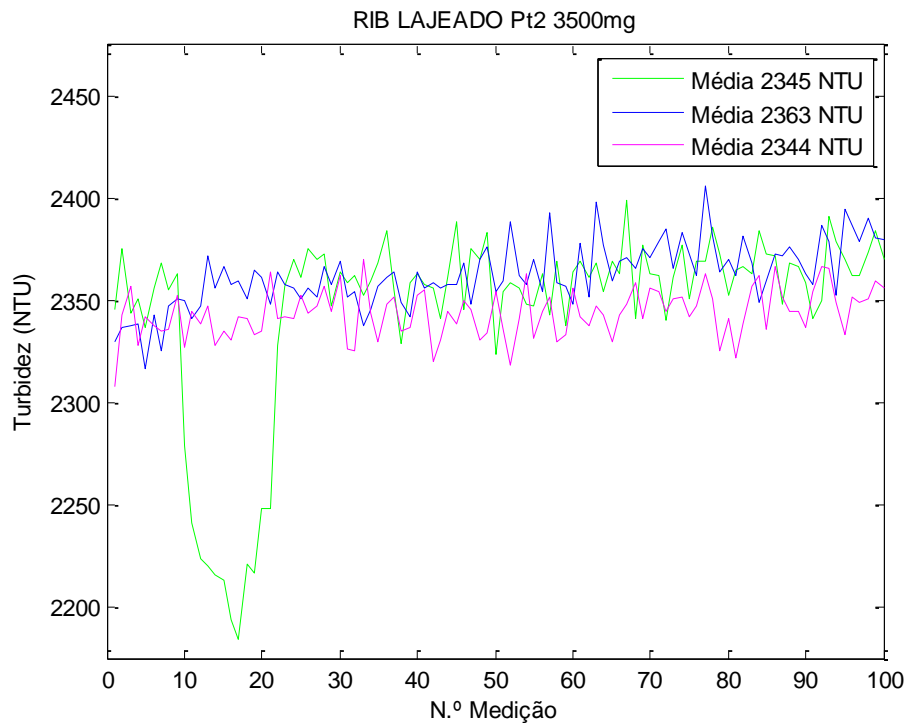


Figura A4.7 – Medidas de turbidez de suspensões com concentração de 3500 mg/l preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira do Lajeado, ponto nº 2.

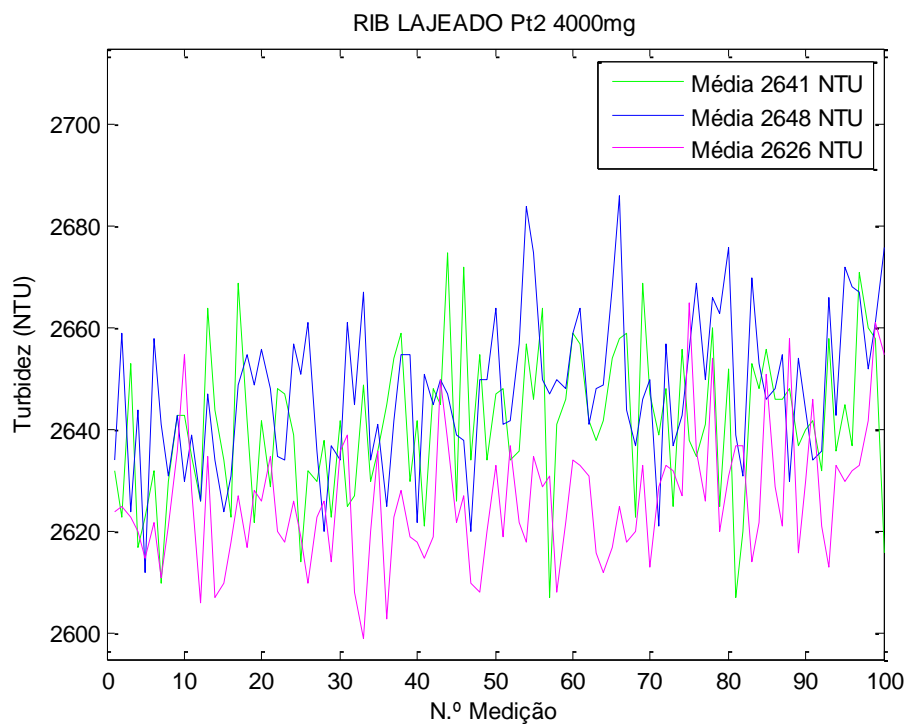


Figura A4.8 – Medidas de turbidez de suspensões com concentração de 4000 mg/l preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira do Lajeado, ponto nº 2.

## ANEXO 5

No presente Anexo, nas Figuras A5.1 a A5.16, são mostrados os gráficos correspondentes aos valores de turbidez de suspensões com diferentes concentrações, na faixa de 250 mg/l a 4000 mg/l, preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira de Santa Luzia.

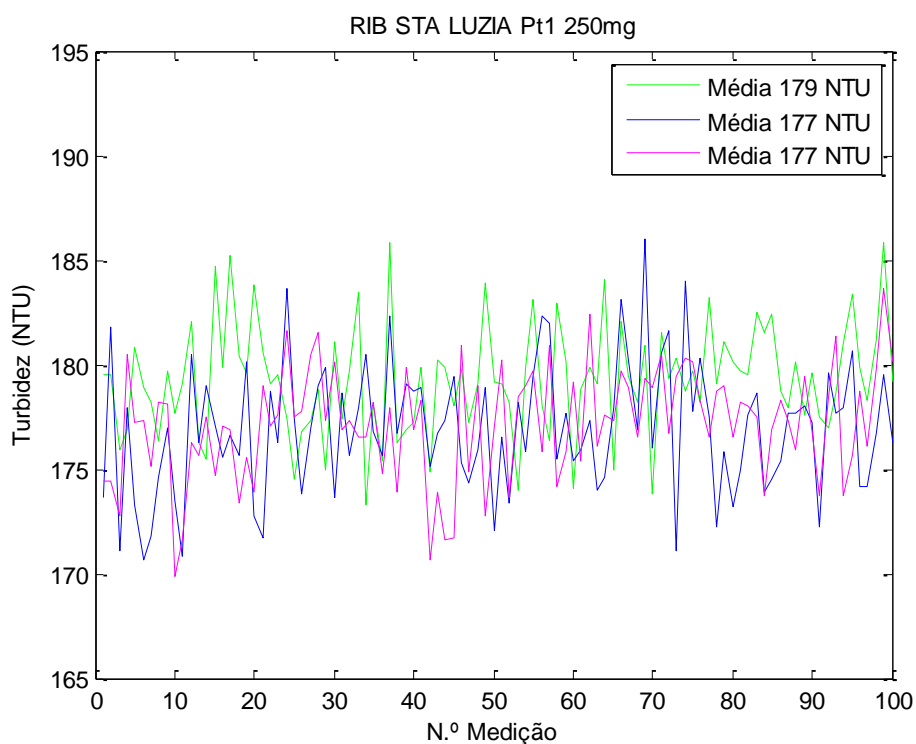


Figura A5.1 – Medidas de turbidez de suspensões com concentração de 250 mg/l preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira de Santa Luzia.

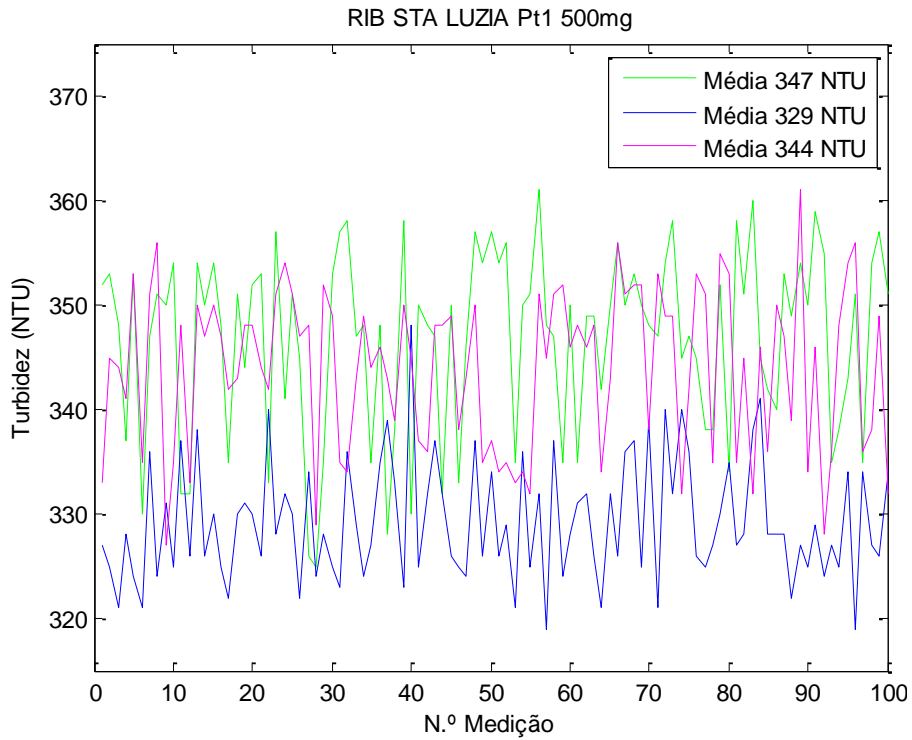


Figura A5.2 – Medidas de turbidez de suspensões com concentração de 500 mg/l preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira de Santa Luzia.

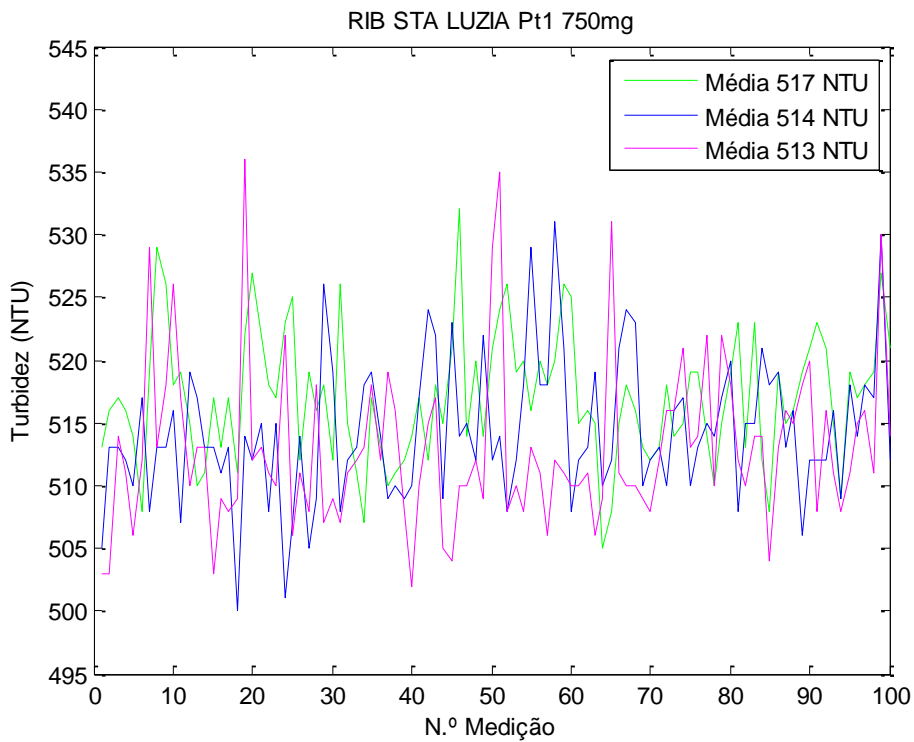


Figura A5.3 – Medidas de turbidez de suspensões com concentração de 750 mg/l preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira de Santa Luzia.

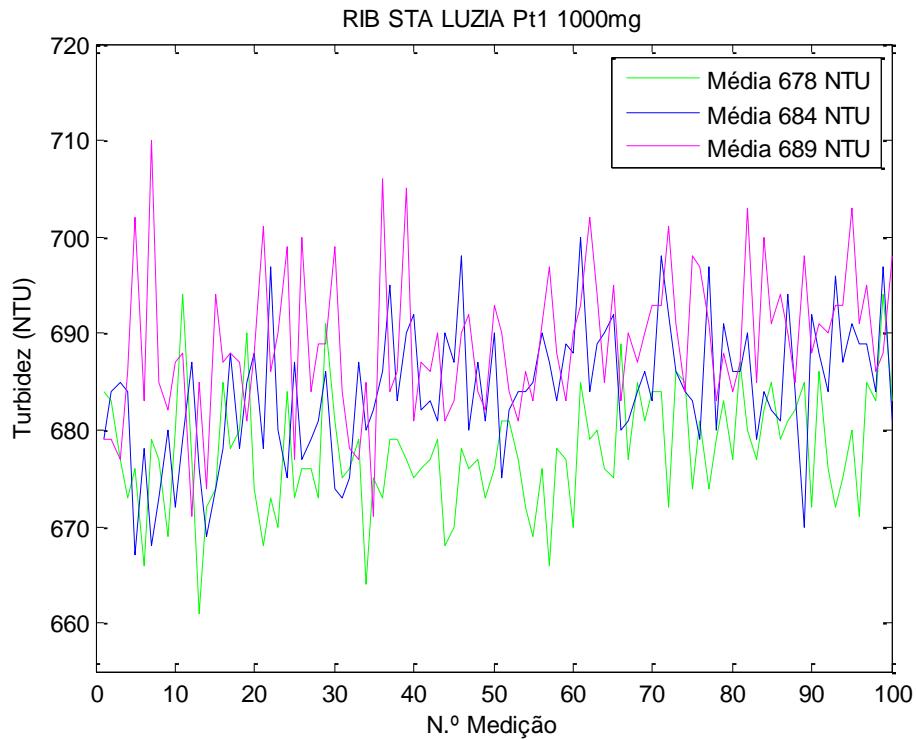


Figura A5.4 – Medidas de turbidez de suspensões com concentração de 1000 mg/l preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira de Santa Luzia.

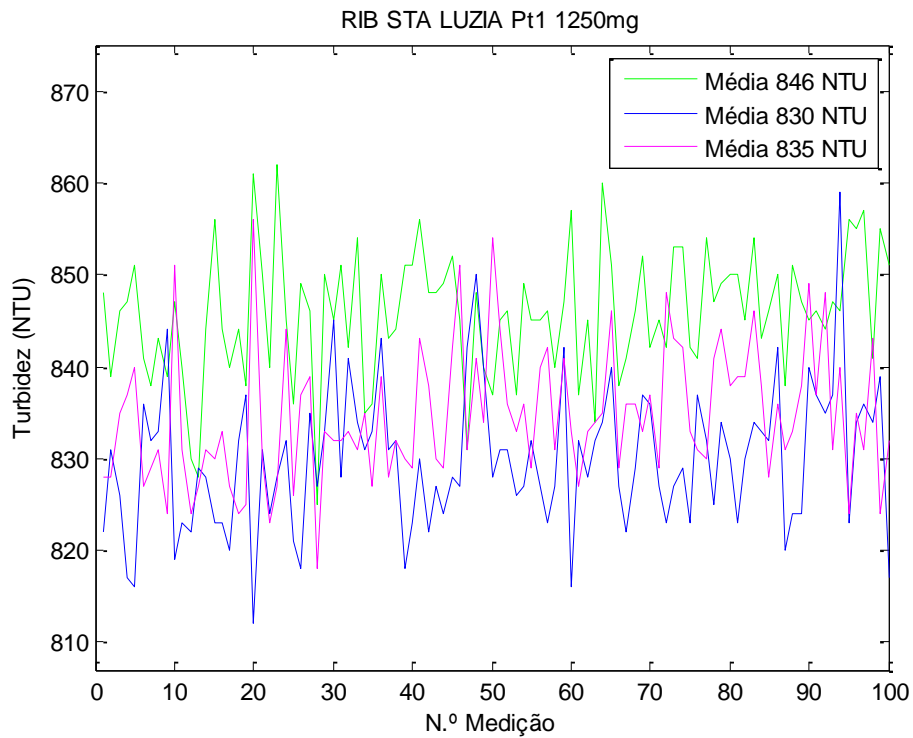


Figura A5.5 – Medidas de turbidez de suspensões com concentração de 1250 mg/l preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira de Santa Luzia.

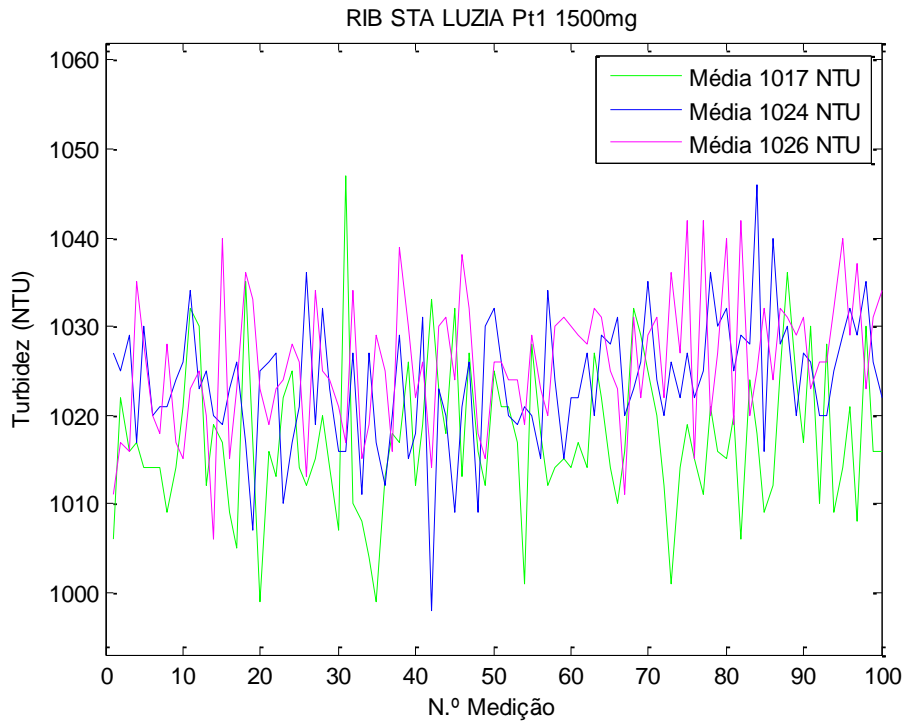


Figura A5.6 – Medidas de turbidez de suspensões com concentração de 1500 mg/l preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira de Santa Luzia.

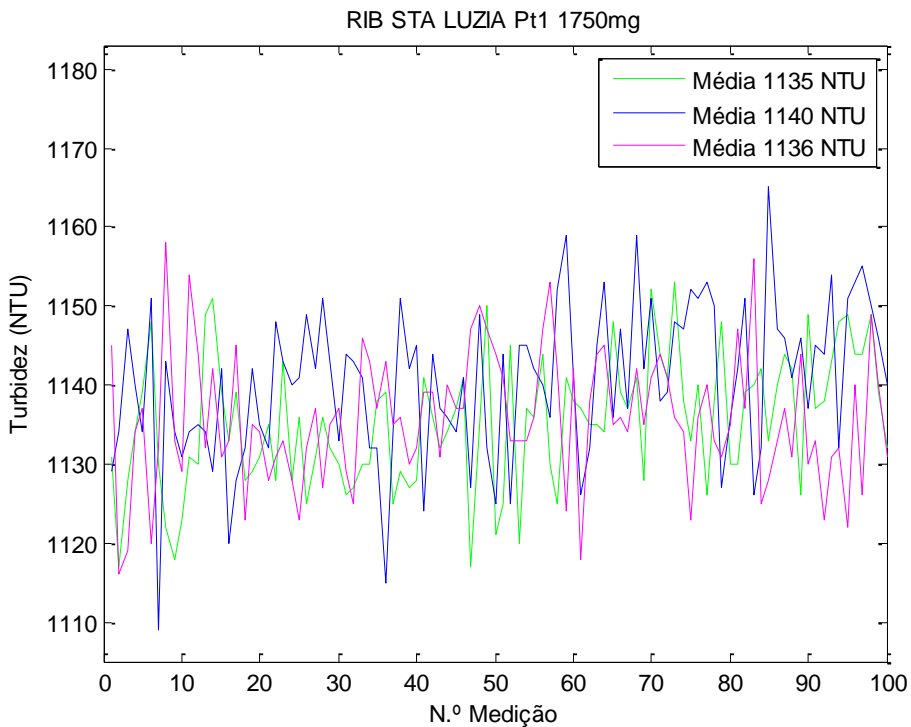


Figura A5.7 – Medidas de turbidez de suspensões com concentração de 1750 mg/l preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira de Santa Luzia.

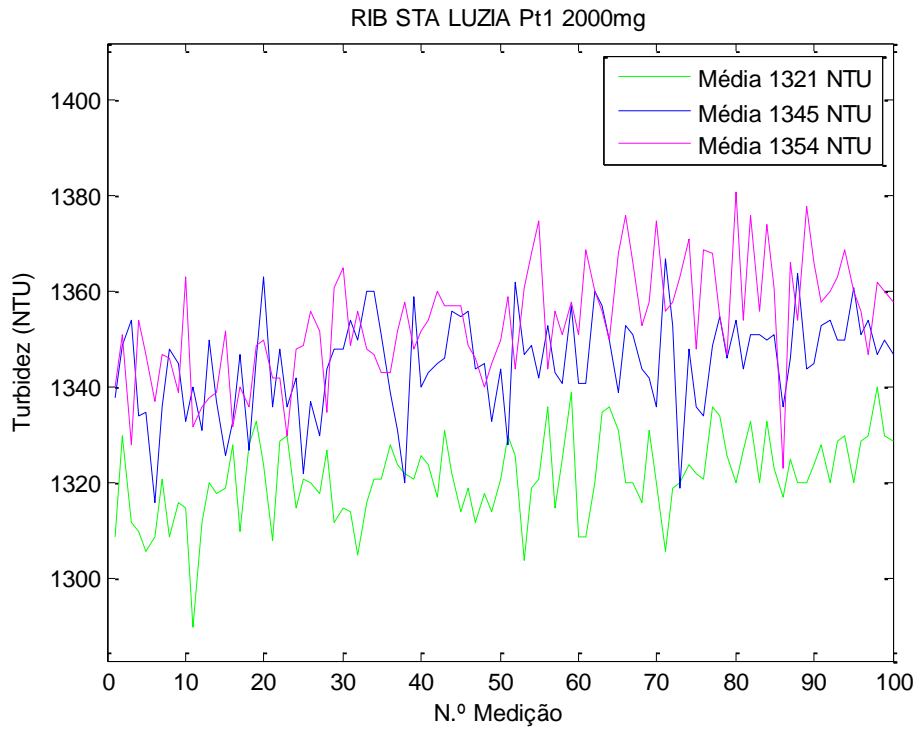


Figura A5.8 – Medidas de turbidez de suspensões com concentração de 2000 mg/l preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira de Santa Luzia.

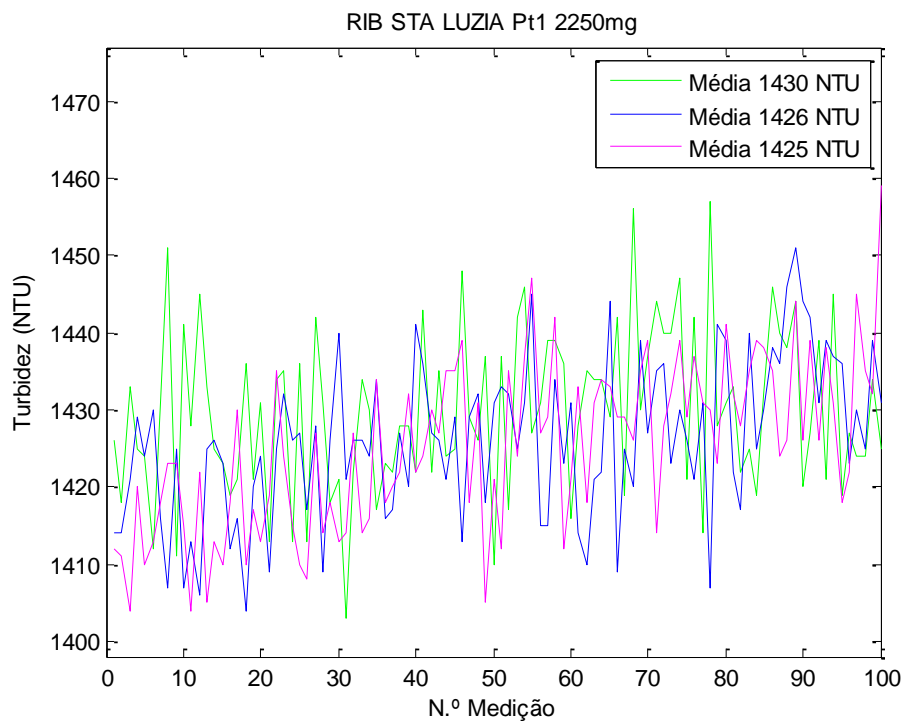


Figura A5.9 – Medidas de turbidez de suspensões com concentração de 2250 mg/l preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira de Santa Luzia.

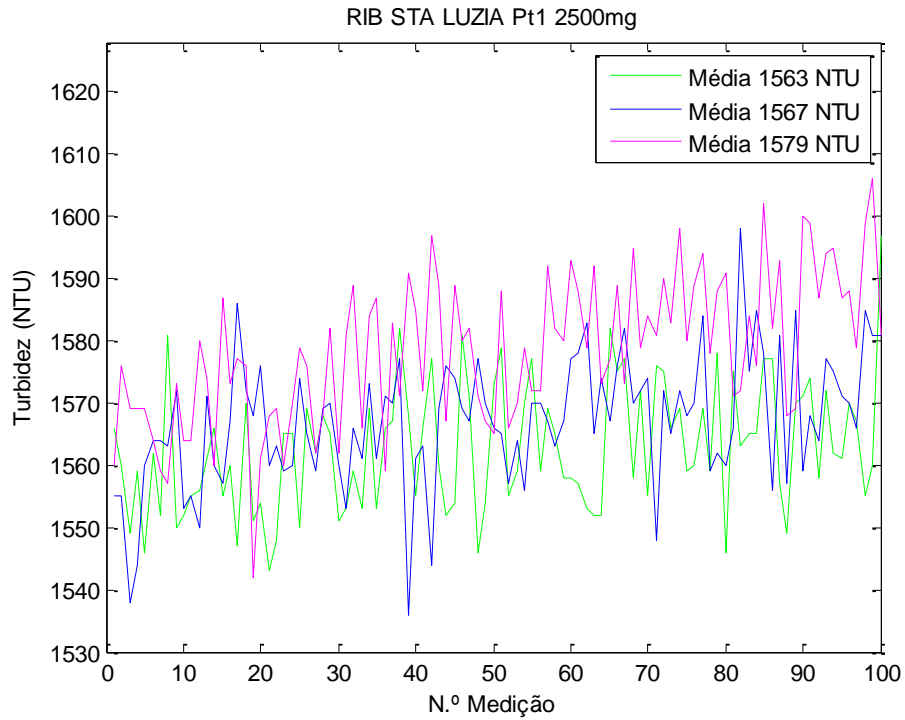


Figura A5.10 – Medidas de turbidez de suspensões com concentração de 2500 mg/l preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira de Santa Luzia.

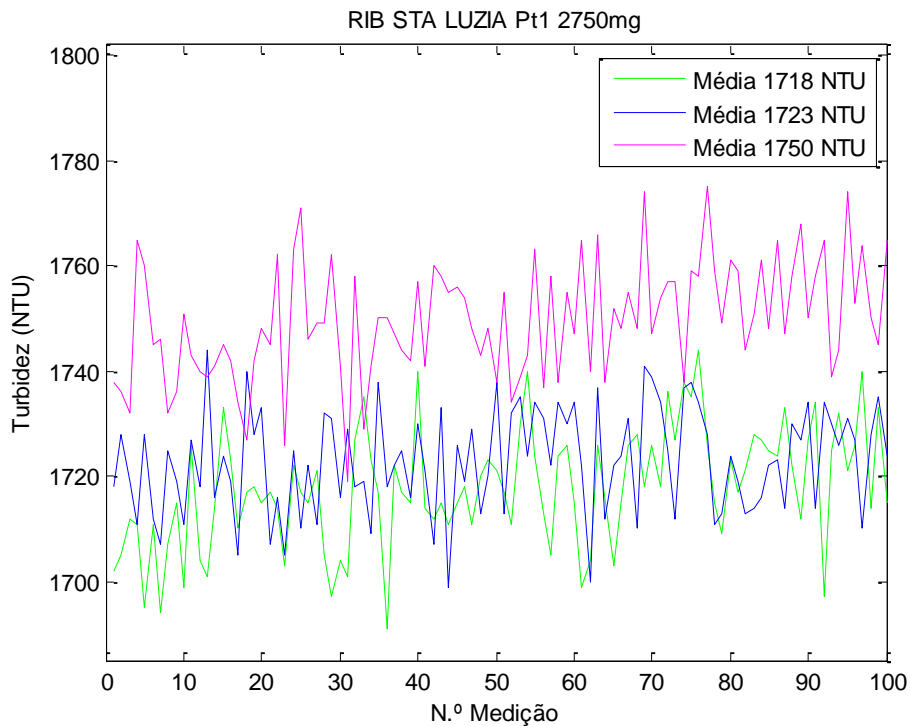


Figura A5.11 – Medidas de turbidez de suspensões com concentração de 2750 mg/l preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira de Santa Luzia.

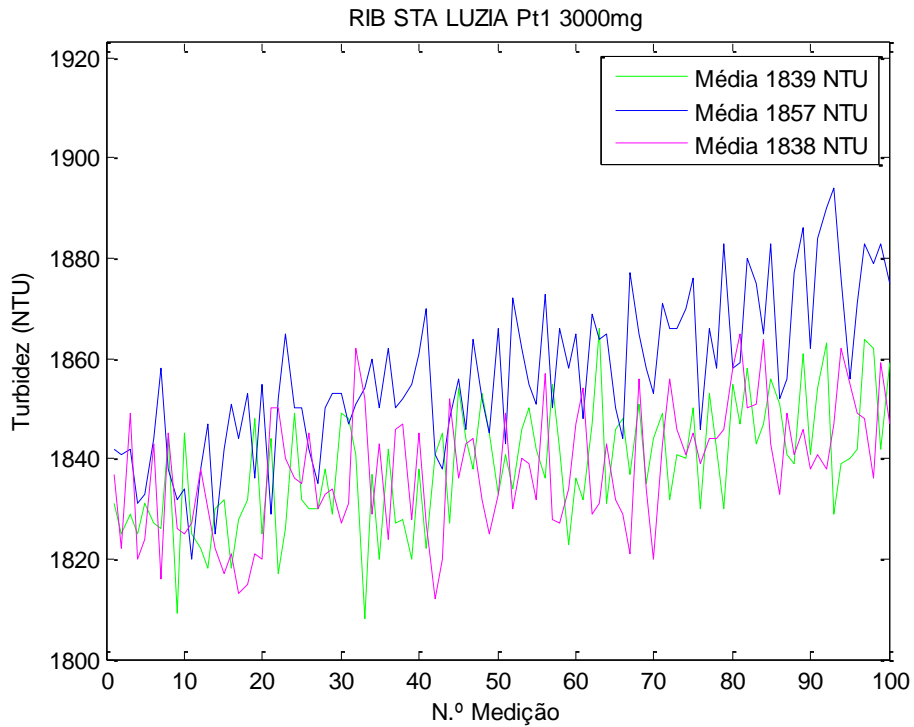


Figura A5.12 – Medidas de turbidez de suspensões com concentração de 3000 mg/l preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira de Santa Luzia.

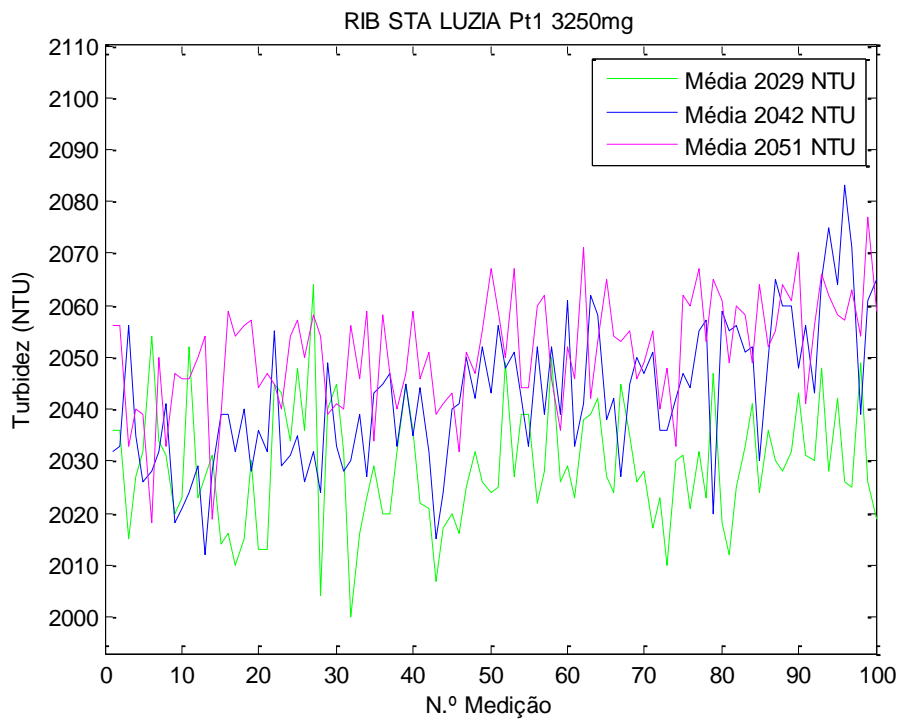


Figura A5.13 – Medidas de turbidez de suspensões com concentração de 3250 mg/l preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira de Santa Luzia.

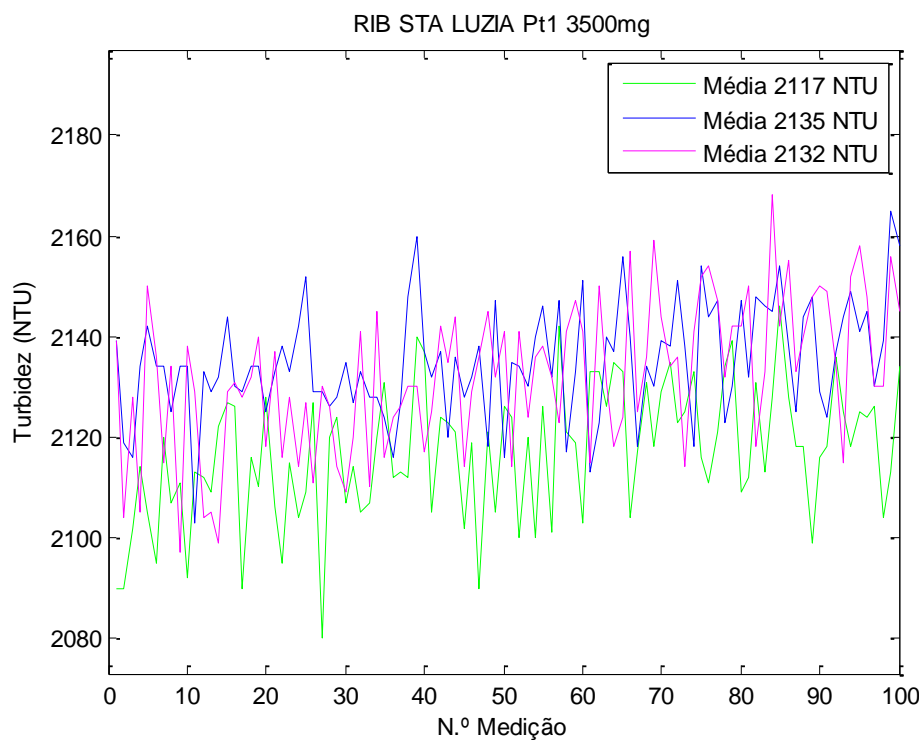


Figura A5.14 – Medidas de turbidez de suspensões com concentração de 3500 mg/l preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira de Santa Luzia.

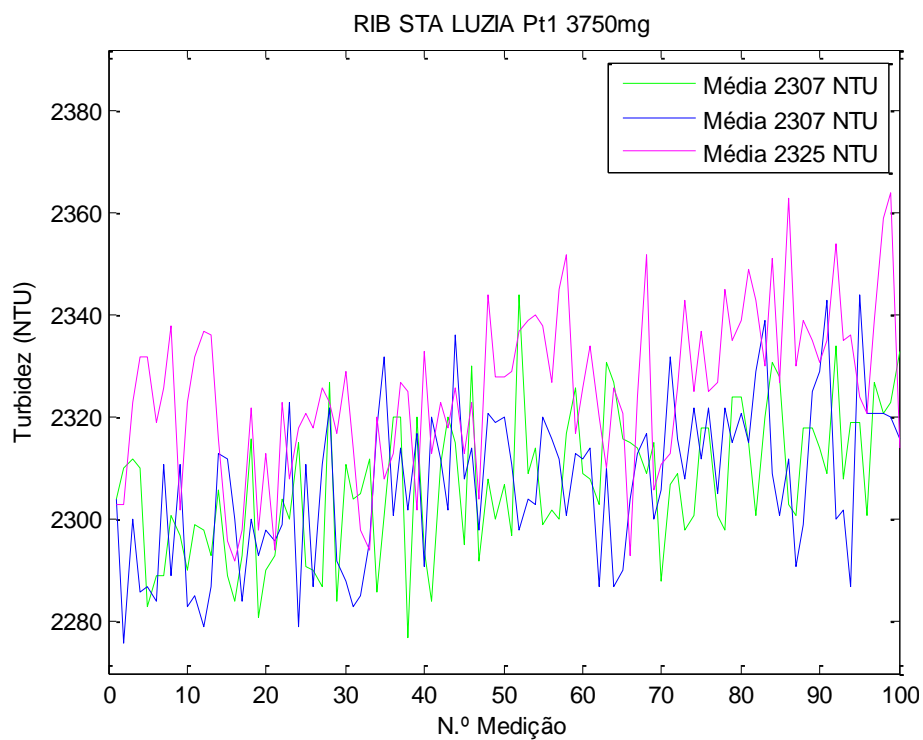


Figura A5.15 – Medidas de turbidez de suspensões com concentração de 3750 mg/l preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira de Santa Luzia.

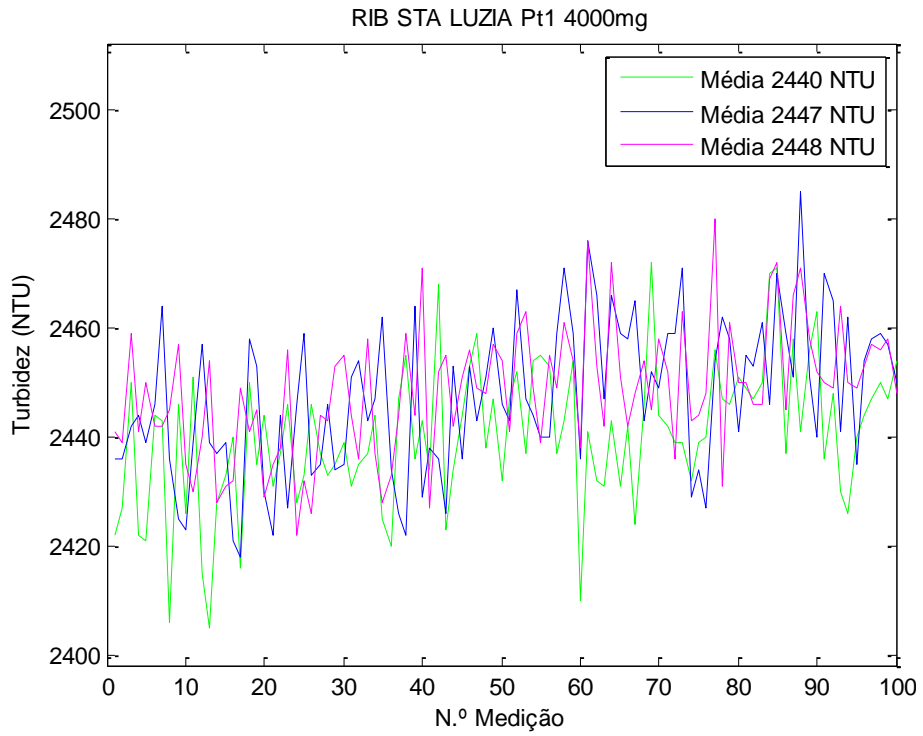


Figura A5.16 – Medidas de turbidez de suspensões com concentração de 4000 mg/l preparadas com sedimentos recolhidos na Ribeira de Santa Luzia.