

**Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática da
Área Ambiental I – Porção Capixaba do Rio Doce e Região
Marinha e Costeira Adjacente**

RELATÓRIO ANUAL:

Anexo 8 – Sedimentação em Abrolhos

RT-26 RRDM/NOV19

Coordenação Geral

Adalto Bianchini

Alex Cardoso Bastos

Edmilson Costa Teixeira

Eustáquio Vinícius de Castro

Jorge Abdala Dergam dos Santos

Vitória,

Novembro de 2019

COORDENAÇÕES

Anexo 1

Adalto Bianchini (FURG)

Anexo 3

Edmilson Costa Teixeira (UFES)

Fabian Sá (UFES)

Jorge Dergam (UFV)

Subprojetos

Alessandra Delazari Barroso (FAESA)

Alex Cardoso Bastos (UFES)

Ana Cristina Teixeira Bonecker (UFRJ)

Anderson Geyson Alves de Araújo (UFES)

Björn Gücker (UFSJ)

Camilo Dias Júnior (UFES)

Daniel Rigo (UFES)

Eneida Maria Eskinazi Sant'Anna (UFOP)

Gilberto Amado Filho (IPJB) *in memorian*

Gilberto Fonseca Barroso (UFES)

Iola Gonçalves Boechat (UFSJ)

Leila Lourdes Longo (UFRB)

Leonardo Tavares Salgado (IPJB)

Luís Fernando Loureiro (UFES)

Marco Aurélio Caiado (UFES)

Renato David Ghisolfi (UFES)

Renato Rodrigues Neto (UFES)

Rodrigo Leão de Moura (UFRJ)

Valéria da Silva Quaresma (UFES)

Valéria de Oliveira Fernandes (UFES)

Vanya Marcia Duarte Pasa (UFMG)

Anexo 4

Jacqueline Albino (UFES)

Subprojetos

Karla Costa (UFES)

Maria Tereza Carneiro (UFES)

Anexo 5

Diolina Moura Silva (UFES)

Mônica Tognella (UFES)

Anexo 6

Agnaldo Silva Martins (UFES)

Subprojetos

Ana Paula Cazerta Farro (UFES)

Leandro Bugoni (FURG)

Sarah Vargas (UFES)

Anexo 7

Maurício Hostim (UFES)

Jorge Dergam (UFV)

Subprojetos

Carlos W. Hackradt (UFSB)

Fabiana Felix Hackradt (UFSB)

Jean-Christophe Joyeux (UFES)

Luis Fernando Duboc (UFV)

Anexo 8

Heitor Evangelista (UERJ)

Coordenação Técnica (CTEC)

Alex Cardoso Bastos

Lara Gabriela Magioni Santos

Laura Silveira Vieira Salles

Tarcila Franco Menandro

Coordenação Escritório de Projetos

Eustáquio Vinicius Ribeiro de Castro

Patrícia Bourguignon Soares

Paulo Roberto Filgueiras

Valdemar Lacerda Junior

Walter Luiz Alda Junior

Coordenação Núcleo de Atuação Integrada em Rede (NAIR)

Edmilson Costa Teixeira

Karla Libardi Gallina

Andressa Christiane Pereira

Anna Paula Lage Ribeiro

Caroline De Marchi Pignaton

Paulo Eduardo Marques

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	METODOLOGIA	12
2.1	PONTOS FIXOS DE COLETA SEDIMENTAR	12
2.2	MONITORAMENTO SEDIMENTOLÓGICO	14
2.3	CALIBRAÇÃO DE IMAGENS DE SATÉLITE PARA MPS NO PARNA DE ABROLHOS	16
2.3.1	Amostragem e filtragem de águas superficiais e medições de profundidade Secchi ...	17
2.3.2	Medições da concentração de Material Particulado em Suspensão (MPS)	21
2.3.3	Material particulado em suspensão (MPS)	21
2.3.4	Imagens de satélite	22
2.3.5	MPS e k_d 490	22
2.3.6	Coeficiente de atenuação difuso (k_d, m^{-1})	22
2.3.7	Precipitação, velocidade do vento e vazão dos Rios.	23
2.4	ANÁLISES DE ISÓTOPOS RADIOGÊNICOS.....	24
2.4.1	Base de dados isotópicos	25
2.4.2	Preparo físico das amostras sedimentares	26
2.4.3	Procedimentos Químicos	29
2.4.4	Análises Espectrométricas	31
2.5	ANÁLISE MINERALÓGICA (MICROANÁLISE POR DRX E MEV+EDS).....	34
2.5.1	Difração de Raios-X (DRX)	34
2.5.2	Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	36
2.6	CAMPANHAS DE COLETA DE AMOSTRAS.....	36
2.6.1	Campanha terrestre	38
2.6.2	Campanhas de manutenção da rede de amostragem oceânica/sedimentar	42
3	RESULTADOS	43
3.1	VARIABILIDADE ESPACIAL DAS CONCENTRAÇÕES DE MPS E SUA RELAÇÃO COM A TRANSPARÊNCIA NO AMBIENTE MARINHO	43

3.2	VARIABILIDADE DOS INDICADORES DA DISPONIBILIDADE DE LUZ NA COLUNA D'ÁGUA (MPS E K_D490).....	44
3.2.1	Análise espaço-temporal dos perfis latitudinais e longitudinais dos indicadores da disponibilidade de luz na coluna d'água (MPS e k_d490).	45
3.3	LUMINOSIDADE E TEMPERATURA (DADOS DOS SENSORES ACOPLADOS NAS ARAMDILHAS).....	51
3.4	ANÁLISE ISOTÓPICA.....	61
3.5	MINERALOGIA.....	63
4	DISCUSSÃO INTEGRADA.....	80
4.1	VARIABILIDADE ESPACIAL DAS CONCENTRAÇÕES DE MPS E SUA RELAÇÃO COM A DISPONIBILIDADE DE LUZ NO AMBIENTE MARINHO	80
4.2	ELABORAÇÃO E AVALIAÇÃO DE ALGORITMOS PARA ESTIMATIVAS DE MPS POR SENSORIAMENTO REMOTO ORBITAL NA REGIÃO DE ABROLHOS.	80
4.3	VARIABILIDADE DOS INDICADORES DA DISPONIBILIDADE DE LUZ NA COLUNA D'ÁGUA (MPS E K_D490).....	83
4.4	ANÁLISE ISOTÓPICA.....	84
4.4.1	Variação temporal.....	86
4.4.2	Modelagem de misturas isotópicas.....	87
4.5	MINERALOGIA.....	92
5	RESUMO DO ANEXO	97
6	REFERÊNCIAS	98
7	APÊNDICE.....	102
7.1	IMAGENS E ESPECTROS MEV-EDS E DRX	102

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Região de atuação do ANEXO 8, indicando a localização das armadilhas de sedimento para o monitoramento na região de Abrolhos e suas adjacências.	13
Figura 2a. Detalhes de partes do protótipo de armadilha de sedimento (<i>sediment traps</i>) instaladas em Abrolhos.	15
Figura 3b. Amostrador McLane instalado no Arquipélago dos Abrolhos.	16
Figura 4. Procedimento de coleta de água superficial com Garrafa de Van Dorn e observação da profundidade de atenuação de luz utilizando Disco de <i>Secchi</i> , a aferição do pH e temperatura da água.	18
Figura 5. Aferição do pH e utilização da sonda.	19
Figura 6. Sistema de filtragem com Manifold.	20
Figura 7. Filtros após amostragem e sistema de filtragem.	21
Figura 8. Definição das áreas utilizadas para os cálculos das médias mensais da concentração do MPS e do kd490 e a localização das bacias hidrográficas analisadas.	23
Figura 9. Moinho SPEX com cadinho acoplado. O motor movimenta o braço do moinho produzindo vibração do cadinho.	27
Figura 10. Cadinho e bolas de carbetto de tungstênio utilizados na pulverização do material particulado.	28
Figura 11. Almofariz de porcelana e pistilo utilizados na cominação do material.	29
Figura 12. Separação dos elementos químicos.	31
Figura 13. Deposição de amostras em filamentos.	32
Figura 14. Espectrômetro de massa portêrmo-ionização (TIMS) multicoletor, modelo TRITON da Thermo Scientific.	33
Figura 15. Moinho vibratório micronizador modelo McCrone.	35
Figura 16. Difrátômetro de raios X modelo Brucker-D4 Endeavor.	35
Figura 17. Vinte e oito (28) pontos de amostragem de sedimentos superficiais realizados para a Campanha 5, entre os dias 18/02/2019 e 26/02/2019.	38
Figura 18. Pontos de amostragem da Campanha 6, entre os dias 26/03/2019 ao dia 29/03/2019, sendo que 12 coletas foram realizadas ao longo da bacia do Rio Doce.	39
Figura 19. Coleta de sedimento da região terrestre.	39

Figura 20. Atividade de mergulho para coleta das garrafas instaladas nas armadilhas de sedimento.	43
Figura 21. Relação entre a concentração de MPS e a profundidade <i>Secchi</i> para a região do PARNA de Abrolhos.	44
Figura 22. Séries temporais de MPS, kd490, precipitação, vazão e velocidade do vento para o período de janeiro de 2014 a dezembro de 2018.	45
Figura 23. (a) Definição do transecto latitudinal utilizado. (b) Análise dos perfis latitudinais de MPS para os anos de 2015, 2016, 2017 e 2018.	47
Figura 24. (a) Definição do transecto latitudinal utilizado. (b) Análise dos perfis latitudinais de kd490 para os anos de 2015, 2016, 2017 e 2018.	48
Figura 25.(a) Definição do transecto longitudinal utilizado. (b) Análise dos perfis longitudinais de MPS para os anos de 2015, 2016, 2017 e 2018.	49
Figura 26. (a) Definição do transecto longitudinal utilizado. (b) Análise dos perfis longitudinais de kd490 para os anos de 2015, 2016, 2017 e 2018.	50
Figura 27. Dados de temperatura da água do mar para o sensor instalado na armadilha AB_01. A indicação em azul mostra o momento de troca da armadilha de sedimentos e reinício do sensor no dia 4 de julho de 2019.	51
Figura 28. Dados de luminosidade (lux) para a armadilha AB_01. A indicação em azul mostra quando houve a primeira coleta de sedimento da armadilha, a qual ocorreu no dia 4 de julho de 2019.	52
Figura 29. Dados de temperatura para a armadilha AB_02. As indicações mostram quando houve coleta de material e manutenção nas armadilhas.	53
Figura 30. Dados de luminosidade para a armadilha AB_02. As indicações mostram quando houve coleta de material e manutenção nas armadilhas.	53
Figura 31. Dados de temperatura para a armadilha AB_03. As indicações mostram quando houve coleta de material e manutenção nas armadilhas.	54
Figura 32. Dados de luminosidade para a armadilha AB_03. As indicações mostram quando houve coleta de material e manutenção nas armadilhas.	55
Figura 33. Dados de temperatura para a armadilha AB_04. As indicações mostram quando houve coleta de material e manutenção nas armadilhas.	56
Figura 34. Dados de luminosidade para a armadilha AB_04. As indicações mostram quando houve coleta de material e manutenção nas armadilhas.	57
Figura 35. Dados de temperatura para a armadilha AB_05. As indicações mostram quando houve coleta de material e manutenção nas armadilhas.	58

Figura 36. Dados de luminosidade para a armadilha AB_05. As indicações mostram quando houve coleta de material e manutenção nas armadilhas.	59
Figura 37. Dados de temperatura para a armadilha AB_06. As indicações mostram quando houve coleta de material e manutenção nas armadilhas.....	60
Figura 38. Dados de luminosidade para a armadilha AB_06. As indicações mostram quando houve coleta de material e manutenção nas armadilhas.	61
Figura 39. Gráfico para os resultados da caracterização elementar da amostra AB03_ATV4.....	64
Figura 40. Gráfico para os resultados da caracterização elementar da amostra AB06_ATV6.....	65
Figura 41. Gráfico para os resultados da caracterização elementar da amostra AB03_ATV6.....	66
Figura 42. Gráfico para os resultados da caracterização elementar da amostra AB06_ATV4.....	67
Figura 43. Resultados médios do MEV-EDS para comparação entre as Atividades 4 e 6 referentes aos pontos de coleta AB03 e AB06.....	68
Figura 44.Difratogramas interpretados da amostra Ab01 (Recife de Fora) coletada nos meses de maio (ATV 4) e julho (ATV 5).	71
Figura 45.Difratogramas interpretados da amostra Ab02 (Sebastião Gomes) coletada nos meses de julho (ATV 5) e agosto (ATV 6).	72
Figura 46.Difratogramas interpretados da amostra Ab03 (Polpa Verde) coletada nos meses de maio (ATV 4), julho (ATV 5) e agosto (ATV 6).	73
Figura 47.Difratogramas interpretados da amostra Ab04 (Chapeirão do Pierre) coletada nos meses de maio (ATV 4), julho (ATV 5) e agosto (ATV 6).	74
Figura 48.Difratogramas interpretados da amostra Ab05 (Chapeirão de Sueste) coletada nos meses de maio (ATV 4) e julho (ATV 5).	75
Figura 49.Difratogramas interpretados da amostra Ab06 (Chapeirão da Mancha) coletada nos meses de maio (ATV 4), julho (ATV 5) e agosto (ATV 6).	76
Figura 50. Bioclastos aragoníticos (fragmentos de corais) e bioclastos silicosos.	77
Figura 51.Bioclastos aragoníticos e grãos detríticos com hábitos micáceos. Os minerais detríticos identificados para essa amostra no DRX são caulinita e quartzo.....	78
Figura 52.Fase de ferro em MEV identificada como lepidocrocita pelo método do DRX.	79
Figura 53.Variabilidade espacial das concentrações de MPS.....	80
Figura 54.Assinatura espectral da água na região de Abrolhos.....	81

Figura 55. Comparação entre a concentração de MPS medida no campo e o algoritmo empírico regional e o algoritmo global C2RCC (Case 2 Regional Coast Colour).	82
Figura 56. Mapas de estimativa da concentração de MPS para o dia 18/11/2018 (a) Algoritmo regional para Abrolhos. (b) Algoritmo global C2RCC (Case 2 Regional Coast Colour).	83
Figura 57. Dados coletados pelo Anexo 8 em Abrolhos em comparação com campos de composição isotópica típicos de diferentes fontes sedimentares.	85
Figura 58. Variação das razões $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ medidas dentro dos meses de coleta e relação das condições atuais com 2016 e com o range natural para Abrolhos (testemunho sedimentar).	86
Figura 59. Variação da razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ das amostras de sedimentos nos diferentes meses de coletas e relação com os sedimentos coletados em 2016 e do testemunho sedimentar.	87
Figura 60. Curvas hipotéticas de mistura a partir de um componente juvenil (basaltos de Abrolhos) e dois possíveis componentes continentais, a lama da barragem em Santarém e os sedimentos da foz do rio Doce pós-rompimento da barragem.	89
Figura 61. Curvas de mistura calculadas com relação à uma componente juvenil (basaltos de Abrolhos) e duas possíveis componentes continentais indicadas pelos rios Jequitinhonha e Mucuri.	90
Figura 62. Modelo de mistura entre material particulado em suspensão coletado em fevereiro de 2019 e a lama da barragem coletada em Barra Longa. O melhor ajuste da curva para todos os dados de sedimentos ocorre para uma curvatura de 0,008.	91
Figura 63. Mapa geológico norte do Espírito Santo e sul da Bahia, mostrando os principais rios na costa próxima à região de Abrolhos.	92
Figura 64. Síntese da variação mineralógica e relações com os valores de razões isotópicas para os pontos amostrados em Recife de Fora e Abrolhos nos diferentes meses de campanha. Legenda: kao= caulinita; gib= gibbsita; e qtz= quartzo.	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Resultados isotópicos.....	62
Tabela 2. Caracterização elementar da Amostra AB03_ATV04 para os campos de análise.....	63
Tabela 3. Caracterização elementar da Amostra AB06_ATV06 para os campos de análise.....	64
Tabela 4. Caracterização elementar da Amostra AB03_ATV06 para os campos de análise.....	65
Tabela 5. Caracterização elementar da Amostra AB06_ATV04 para os campos de análise.....	66
Tabela 6. Comparação entre os resultados do MEV-EDS das atividades 4 e 6.....	67
Tabela 7. Fases mineralógicas detectadas e quantificadas por DRX, pelo método de Rietveld, nas amostras de <i>traps</i> sedimentares de Abrolhos e Recife de Fora. Legenda: (-) fases minerais ausentes.	69
Tabela 8. Valores de razão isotópica e concentração utilizados para o cálculo da curva de mistura para duas hipóteses de componentes continentais distintas.....	88
Tabela 9. Razões isotópicas e concentrações elementares para duas componentes continentais hipotéticas.....	90
Tabela 10. Síntese dos parâmetros mineralógicos usados como comparação para a variação de razões isotópicas. O parâmetro Mg em calcita se refere à substituição estequiométrica de magnésio neste mineral, quantificada a partir de rotina em DRX. Legenda: kao= caulinita; gib= gibbsita; e qtz= quartzo.	94

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Localização das estações de monitoramento na região de Abrolhos e em Porto Seguro (Ponto de Controle), indicando suas coordenadas geográficas e localidade.	14
Quadro 2. Cronograma das atividades realizadas pelo ANEXO 8.	37
Quadro 3. Amostras da Campanha Continental escolhidas para análise.	40
Quadro 4. Amostras da Campanha Costeira escolhidas para análise.	42

ANEXO 8 – SEDIMENTAÇÃO EM ABROLHOS

1 INTRODUÇÃO

O programa de trabalho desenvolvido pelo Anexo 8 trata do monitoramento oceânico na região do Parque Nacional (PARNA) dos Abrolhos-BA e Porto Seguro-BA, em vista a sua importância ecológica e ao risco de dano ambiental associado aos rejeitos provenientes do rompimento da Barragem de Fundão-MG. A análise sedimentológica e o sensoriamento remoto constituem-se na base deste monitoramento.

A metodologia básica adotada neste trabalho é centrada na assinatura geoquímica dos sedimentos coletados da coluna d'água. Empregamos aqui a técnica de isótopos radiogênicos, largamente empregada com sucesso quando objetiva-se identificar proveniência mineral. Esta técnica visa identificar padrões de mistura entre o material sedimentar amostrado em Abrolhos e os sedimentos derivados dos rejeitos de minério da Samarco, estes coletados tanto na foz do Rio Doce como no entorno da área impactada pelo rompimento da Barragem de Fundão. Havendo padrões de mistura mensuráveis entre tais fontes sedimentares postuladas, e considerando todo o contexto hidrogeoquímico regional, fica evidenciada a chegada dos rejeitos de minério da Samarco na região recifal de Abrolhos.

De um modo geral, os minerais e as rochas tendem a ter razões distintas dos isótopos radiogênicos $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ e $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$, de acordo com a derivação geológica. Estas razões isotópicas estão menos sujeitas a ação dos intemperismos físico e químico ao longo do tempo do que os elementos químicos tipicamente terrígenos tais como o Fe, Ti, Ca, Rb, Al entre outros. No estudo hidrológico, as diferenças na composição isotópica do Sr e Nd do material particulado em suspensão, carregados pelos rios que alimentam os oceanos, revelam uma sobreposição de assinaturas, refletindo a heterogeneidade das rochas fontes na escala de cada bacia de drenagem (Walter *et al.*, 2000; Goldstein, Jacobsen, 1988). As assinaturas dos isótopos radiogênicos $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ e $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ é uma técnica muito qualificada para se identificar a proveniência continental de sedimentos, uma vez que podem apresentar valores típicos para domínios geológicos específicos (Lee *et al.*, 2010), por exemplo, a composição dos isótopos radiogênicos de Sr e Nd da litosfera são significativamente diferentes do manto, o que permite a distinção entre as suas origens litológicas das zonas vulcânicas jovens e dos velhos escudos continentais (Grouset, Biscaye, 2005).

A motivação em empregar uma técnica de assinatura geoquímica para os sedimentos coletados em Abrolhos, visando a questão da proveniência mineral, está no fato de que as técnicas de sensoriamento remoto para a região têm limitações quanto as interpretações sobre a dispersão das plumas sedimentares entre a foz do Rio Doce e o Sul da Bahia. Esta região apresenta alta turbidez natural principalmente durante o inverno quando as frentes frias promovem elevado grau de ressuspensão na área costeira de interesse do projeto. Este fato torna inconclusivas as interpretações das imagens de satélite (banda do visível), como também as fotografias aéreas que evidenciam a presença de

sedimentos na superfície do oceano. Outro fator considerado é a possibilidade do deslocamento das plumas contendo sedimentos da Samarco ocorrerem em sub-superfície não sendo detectadas pelo sensoriamento remoto. As atividades do ANEXO 8 abrangeram análises dos seguintes parâmetros:

(1) Análise de águas superficiais, visando: a) buscar uma calibração para imagens de satélite (Landsat, Sentinel e MODIS Terra 220 m) para o parâmetro MPS (Material Particulado em Suspensão), com a finalidade de gerar mapas que mostrem a evolução temporal do MPS em Abrolhos. Isto permite monitorar, em caráter sazonal, a variabilidade do MPS na região de interesse; e b) análise dos isótopos radiogênicos $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ e $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ sobre o MPS. De forma complementar, durante cada coleta, foram realizadas análises de temperatura superficial da água do mar, pH, padrão espectral da reflectância da superficial da água do mar e profundidade de *Secchi*;

(2) Análise de sedimentos da coluna d'água : visa investigar a dispersão dos sedimentos advindo dos rejeitos de mineração e, conseqüentemente, seus efeitos na região costeira e estuarina. Neste contexto foram analisados os isótopos radiogênicos $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ e $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ em sedimentos capturados por armadilhas construídas para essa finalidade. Além deste parâmetro, as amostras de sedimento foram analisadas quanto a mineralogia e MEV+EDS;

(3) Análise de sedimentos de área costeira : para fins de comparação com os resultados de Abrolhos e da foz do Rio Doce, analisou-se, de forma complementar, os principais rios que potencialmente podem contribuir com aporte sedimentar para as zonas costeiras e estuarinas em torno do Arquipélago dos Abrolhos. Para tal, foram realizadas observações aloestratigráficas e morfoestratigráficas nos depósitos fluviais e aluviais na Bacia do Rio Doce e sua relação com a paisagem, além de coletas de sedimentos superficiais para isótopos radiogênicos $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ e $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$. Para tal, foram realizadas amostras próximas a calha do Rio Doce entre os estados de Minas Gerais e Espírito Santo. Além desta coleta, foram amostrados sedimentos de foz de rios entre o Rio Paraíba do Sul no Estado do Rio de Janeiro e o Rio Jaguaribe no Estado da Bahia, totalizando 36 rios. Até esta etapa do projeto, análises de isótopos radiogênicos $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ e $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ foram realizadas para os rios Jequitinhonha, Paraíba do Sul, São Matheus, Mucuri e Caravelas;

(4) A análise por Sensoriamento remoto foi acrescentada ao projeto no sentido de se observar aumentos abruptos na dispersão sedimentar. Obtivemos aqui uma calibração para o Modis e Sentinel e dados de MPS, empregando em campo um espectrorradiômetro.

2 METODOLOGIA

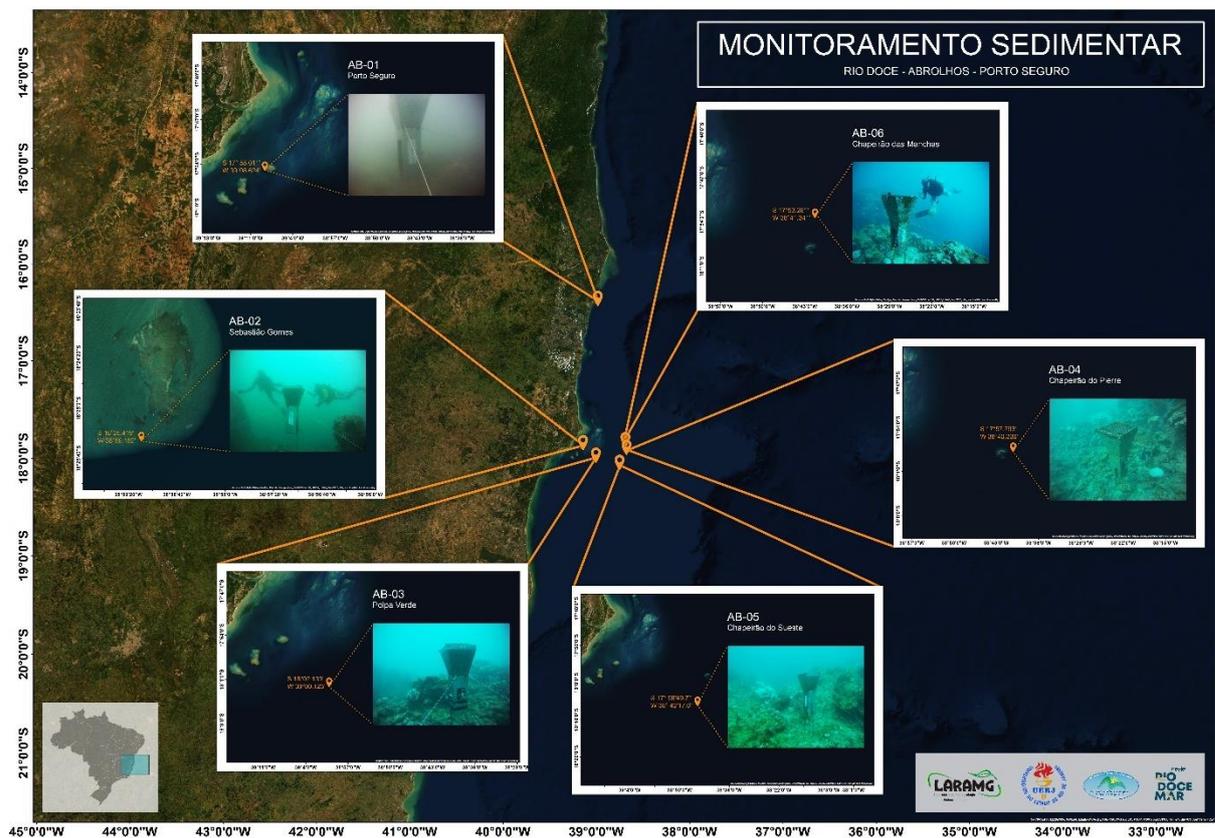
2.1 PONTOS FIXOS DE COLETA SEDIMENTAR

No contexto da metodologia empregada aqui, para se averiguar as fontes geológicas/sedimentares mais prováveis que aportam no PARNA dos Abrolhos, torna-se necessário uma comparação direta entre os sedimentos coletados no Parque (área recifal) com aqueles definidos como potenciais termos-

fonte. No projeto, foram desenvolvidas armadilhas de sedimentos para a amostragem em Abrolhos, tendo Porto Seguro/Recifes de Fora como área controle. Uma vez que o ICMBIO mantém um programa de monitoramento visando avaliar a saúde dos recifes de coral em algumas Unidades de Conservação marinhas, entre elas o PARNA de Abrolhos (protocolo *Reef Check*). Desta forma, nós definimos os sítios de amostragem nas proximidades dos mesmos pontos de monitoramento de *Reef Check* de forma a possibilitar futuras comparações.

O conjunto de armadilhas foi instalado em 5 pontos do arquipélago dos Abrolhos e 1 em Porto Seguro (Quadro 1), das quais foram retiradas amostras para análises mineralógicas e de isótopos radiogênicos. A Figura 1 e o Quadro 1 mostram os pontos definidos para a instalação das armadilhas de sedimentos.

Figura 1.Região de atuação do ANEXO 8, indicando a localização das armadilhas de sedimento para o monitoramento na região de Abrolhos e suas adjacências.



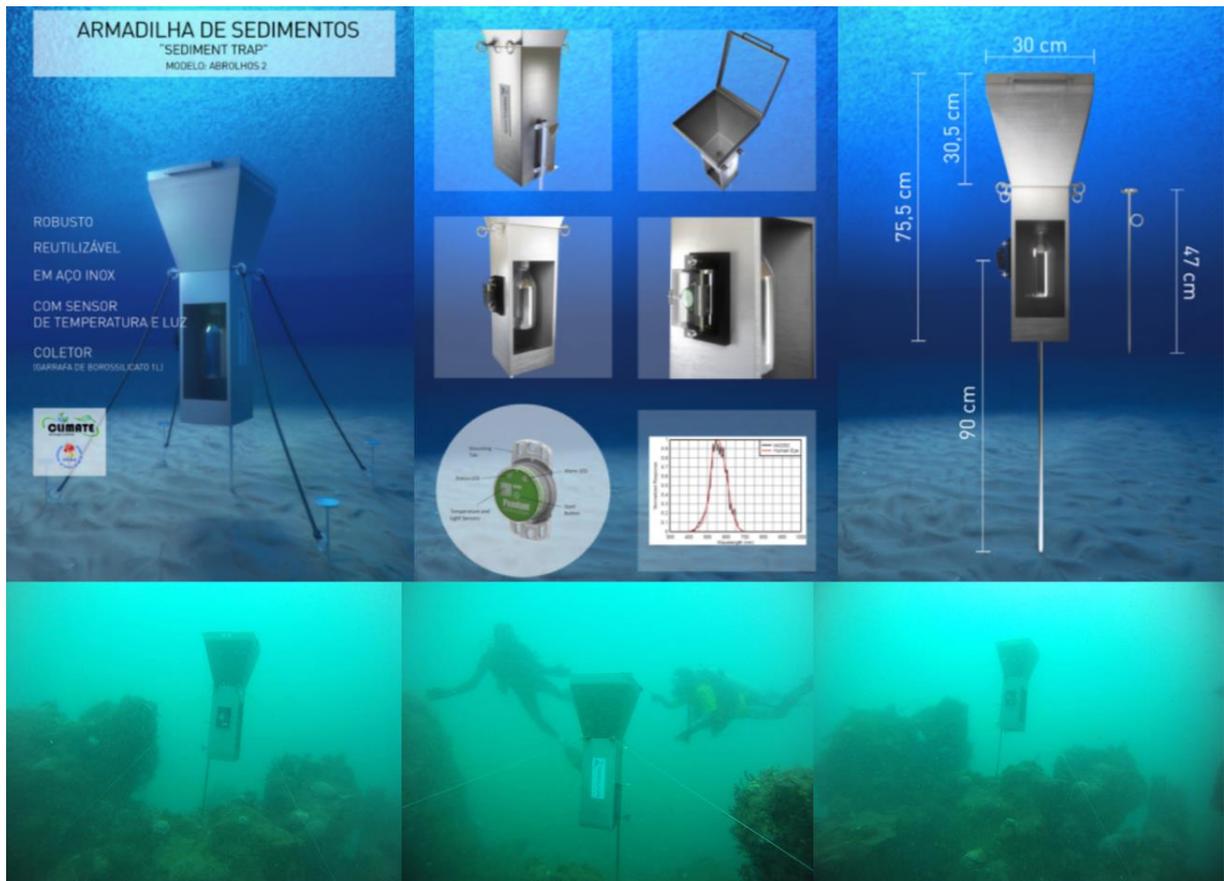
Quadro 1. Localização das estações de monitoramento na região de Abrolhos e em Porto Seguro (Ponto de Controle), indicando suas coordenadas geográficas e localidade.

Código da estação (Armadilha de Sedimento)	Lat.	Long.	Localidade
AB_01	16° 25' 25.0"	38° 59' 09.4"	Porto Seguro - Ponto de Controle
AB_02	17°55'00.0"	39°08'37.5"	Sebastião Gomes
AB_03	18°02'09.6"	39°00'06.6"	Polpa Verde
AB_04	17°57'48.4"	38°40' 11.4"	Chapeirão do Pierre
AB_05	17°58' 49.7"	38°42' 17.6"	Chapeirão das Sueste
AB_06	17°53'19.3"	38°41'20.8"	Chapeirão das Manchas

2.2 MONITORAMENTO SEDIMENTOLÓGICO

O monitoramento sedimentológico ocorre em tempo real visto que as armadilhas estão continuamente expostas em Abrolhos. Basicamente, o sistema funciona com o aprisionamento do sedimento que se deposita livremente da coluna d'água no sentido do fundo do mar. O conteúdo sedimentar adentra um cone de captura através de uma grade instalada na "boca" do coletor. O material é diretamente introduzido numa garrafa amostradora de borossilicato, que é trocada a cada campanha. O período médio de integração foi de 45 dias. É importante ressaltar que em cada armadilha foi instalado um sensor de luminosidade e outro de temperatura, o qual fornece medidas *in situ*, a cada minuto destes parâmetros, o que irá contribuir para o melhor entendimento das fases quando observamos maior ou menor fluxo sedimentar. As variações temporais nos dados desses sensores serão apresentadas na seção de resultados. O sistema de coleta desenvolvido pelo grupo de trabalho está descrito a Figura 2a.

Figura 2a. Detalhes de partes do protótipo de armadilha de sedimento (*sediment traps*) instaladas em Abrolhos.



Além das armadilhas, que permitem troca manual, o Anexo 8 instalou uma roseta de coletores programada para troca automática. Trata-se do amostrador McLane para 13 garrafas. Considerando-se as sedimentações típicas de Abrolhos apresentadas na literatura corrente, este sistema foi programado para realizar coletas automáticas a cada 15 dias de forma a não sobrecarregar as garrafas amostradoras. A Figura 3b mostra o sistema automático e sua instalação no Parque Nacional dos Abrolhos. Cada frasco deste sistema contém formol e uma solução hipersalina, o que minimiza a perda de material capturado pela armadilha e permitirá estudar a biota associada ao sedimento coletado. Outro dado que será obtido a partir do uso deste sistema será a determinação do fluxo total sedimentar a cada 15 dias, permitindo comparações com as imagens calibradas de MPS.

Figura 3b. Amostrador McLane instalado no Arquipélago dos Abrolhos.



2.3 CALIBRAÇÃO DE IMAGENS DE SATÉLITE PARA MPS NO PARNA DE ABROLHOS

A penetrabilidade de luz solar na coluna d'água é um parâmetro de relevância para as regiões de recifes de coral. Ela está relacionada com a produtividade primária e a turbidez da água, sendo afetada tanto pela carga de sólidos dissolvidos como pela carga de MPS. Suas variações temporais dependem tanto de processos naturais associados a ao sistema hidrológico continental e a turbulência oceânica como também devido a ação humana.

O monitoramento da dispersão das plumas de sedimento costeiro, assim como a quantificação e caracterização do MPS, são partes do entendimento da dinâmica costeira. Ambos processos possuem impacto negativo sobre os ecossistemas coralinos. Portanto, a distribuição e a abundância do MPS são de grande importância na avaliação da condição do ecossistema costeiro. Como a dispersão de plumas de sedimento no mar é um processo que ocorre em ampla escala espacial, torna-se um grande desafio monitorá-la *in situ*. Diante desta dificuldade, as tecnologias de sensoriamento remoto orbital são de grande valor, já que as imagens de satélite cobrem uma grande área da superfície terrestre, o que

reduz o trabalho de campo. Assim, as tecnologias de satélite podem ser amplamente utilizadas para quantificar e monitorar parâmetros de qualidade da água em águas costeiras, como é o caso do MPS.

Para estimar as concentrações de MPS através de imagens de satélite, deve-se desenvolver algoritmos empíricos que estabelecem uma relação entre os dados derivados do satélite e as medições de MPS *in situ*. Para o desenvolvimento de tais algoritmos, são necessárias medições *in situ* do MPS durante os dias de passagem dos satélites. Com isso, o uso de sensoriamento remoto no mapeamento da concentração de material em suspensão em estuários foi baseado na refletância medida na porção do infravermelho (600-700 nm). Essa abordagem é razoavelmente robusta em águas costeiras e águas interiores, visto que a contribuição dos materiais suspensos na coluna d'água dominam os espectros de refletância quando comparados, por exemplo, com a absorção pelo fitoplâncton. O MODIS 1 fornece cobertura no espectro infravermelho na banda 620–670 nm com sensibilidade suficiente para estudos de águas oceânicas, dentro de uma resolução espacial de 250 m. A metodologia usada aqui é baseada em Miller e McKee (2004).

2.3.1 Amostragem e filtragem de águas superficiais e medições de profundidade Secchi

Coletas de águas superficiais ocorreram na região do PARNA de Abrolhos e Recifes de Fora em Porto Seguro com o uso de uma garrafa de *Van Dorn*. Este amostrador permite a coleta de amostras em diferentes profundidades da coluna d'água. Ao ser lançado em uma profundidade desejada, suas tampas localizadas nas extremidades laterais, inicialmente abertas, são fechadas por meio de um mensageiro e a amostra de água sobe até a superfície sem contato com as demais camadas. Para as coletas em Abrolhos, foi definido um volume total de água de 20 L por estação de coleta. Galões de plásticos de polipropileno (PP), devidamente limpos com água miliQ, foram previamente lavados com água do local de amostragem em distância segura da embarcação. Após lavagem, as coletas foram feitas a cerca de 0,4 m de profundidade com a garrafa de *Van Dorn*. Em alguns casos, os galões foram colocados diretamente dentro na coluna d'água, na profundidade desejada.

Para a filtragem, foram empregados filtros de fibra de vidro 47 mm (GF/F) *Whatman*® de diâmetro, com porosidade de 0,4 µm. Ainda na Uerj, os filtros foram armazenados em placas de *petri* e colocados em estufa à 40° para secagem por 24 horas, sendo pesados em seguida e colocados em tubo *falcon* devidamente identificados e lacrados para que se evitar contaminações. Para a filtragem da água do mar, utilizou-se um kit de filtração composto por um *manifold* em aço inox com 3 entradas independentes, uma bomba de vácuo de 10 L/min, um frasco tipo *kitasato* e um copo acrílico de 250 mL fixo por uma garra lateral onde o filtro é fixado. A água coletada em cada ponto amostral foi filtrada, e os filtros contendo material particulado foram rinsados imediatamente após filtragem com 250 mL de água miliQ, afim de dessalinizar os mesmos e assim eliminar a influência do Sr marinho sobre a análise isotópica.

Para a medição de atenuação de luz na coluna d'água ou transparência foi utilizado um Disco de *Secchi* no mesmo ponto amostral. O Disco de *Secchi* é um disco circular nas cores preto e branco, de superfície lisa, tendo um peso em sua parte inferior, construído para estimar a transparência das águas em corpos

hídricos. Geralmente o disco tem 20 ou 30 cm de diâmetro, e a medida da transparência se dá quando o mesmo desaparece ao ser imerso na coluna d'água o que corresponde a um certo comprimento da corda fixada ao disco. Em todas os pontos de coleta foram medidos e anotados na planilha o parâmetro pH e a Temperatura da água do mar por meio de um medidor portátil. A Figura 4, Figura 5, Figura 6 e Figura 7 ilustram os procedimentos citados acima.

Figura 4. Procedimento de coleta de água superficial com Garrafa de Van Dorn e observação da profundidade de atenuação de luz utilizando Disco de Secchi, a aferição do pH e temperatura da água.



Figura 5. Aferição do pH e utilização da sonda.



Figura 6. Sistema de filtragem com Manifold.



Figura 7. Filtros após amostragem e sistema de filtragem.



2.3.2 Medições da concentração de Material Particulado em Suspensão (MPS)

As medições da concentração de MPS realizadas a partir das amostras coletadas em campo tiveram o seguinte propósito: (1) descrever a variabilidade espacial das concentrações de MPS na região; e (3) elaborar um algoritmo empírico para correlacionar os dados de MPS e os dados orbitais para os mesmos dias de coleta em condições de céu claro.

2.3.3 Material particulado em suspensão (MPS)

O MPS é composto por partículas orgânicas e inorgânicas tanto de origem marinha quanto terrestre que afetam a comunidade biológica bloqueando a penetração da luz na coluna d'água. A concentração de MPS nas regiões costeiras pode estar relacionada com o aumento ou diminuição da descarga de água dos rios e a quantidade de material particulado que eles carregam. Além disso, pode ser influenciada pelas correntes oceânicas superficiais, dirigidas pelo vento. Dessa forma, o MPS é um importante parâmetro indicador da qualidade da água, e sua concentração pode ter sido afetado pelo rompimento da barragem do fundão. As concentrações de MPS foram estimadas utilizando imagens mensais do sensor MODIS através do algoritmo proposto e validado por Nechad *et al.*, (2010) e testado em diferentes ambientes com relativo sucesso (Gangloff *et al.*, 2017; Cao *et al.*, 2017). O algoritmo é um modelo multisensor, ou seja, pode ser utilizado em imagens obtidas por diversos sensores. É definido pela seguinte equação:

$$SPM = \left(\frac{A^p \times pw}{1 - \frac{pw}{C^p}} \right) + B^p$$

Onde, pw corresponde a reflectância emergente da coluna d'água ($pw = R_{rs} \times \pi$) em um certo comprimento de onda. A^p , C^p , B^p são coeficientes dependentes do comprimento de onda escolhido para a imagem. Como aconselhado por Nechad et al. (2010), para aplicações em dados obtidos por satélite, B^p é igual a zero. Para a banda vermelha do sensor MODIS (667 nm), utilizada nesse trabalho, os valores dos coeficientes são: $A^p = 374.11$ e $C^p = 17.36$. O processamento das imagens foi realizado no software ArcGis (versão 10.5). Foram extraídas a partir das imagens, as concentrações mensais médias para 4 regiões de interesse: A foz do Rio doce, a região até 10km da costa a partir da foz do Rio Peruíbe (Caravelas/Abrolhos), a região localizada entre 10 km e 25 km da costa e uma raio de 10 km a partir do arquipélago dos Abrolhos (Figura 8).

2.3.4 Imagens de satélite

Foram utilizadas imagens mensais do sensor MODIS (satélite Aqua) para o período de 2014 a 2018. As imagens foram obtidas a partir do site do "Ocean Biology Processing Group – OBPG" (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>) e consistem em produtos gerados a nível de processamento 3, com resolução espacial de 4 km. Estas imagens correspondem a reflectância de sensoriamento remoto (R_{rs} , Sr^{-1}) mensal da superfície do mar, contruída a partir da composição de imagens diárias. A R_{rs} é a razão entre a radiância emergente da coluna d'água (L_w , $Wm^{-2} sr^{-1} nm^{-1}$) e a radiância incidente na coluna d'água (E_d , $Wm^{-2} sr^{-1} nm^{-1}$). A radiância emergente da coluna d'água é normalizada pra remover o efeito da orientação solar e da atenuação atmosférica sobre a radiação incidente, resultando na radiância emergente da coluna d'água normalizada (nL_w). A R_{rs} é então obtida dividindo L_w pela irradiância incidente.

2.3.5 MPS e k_d 490

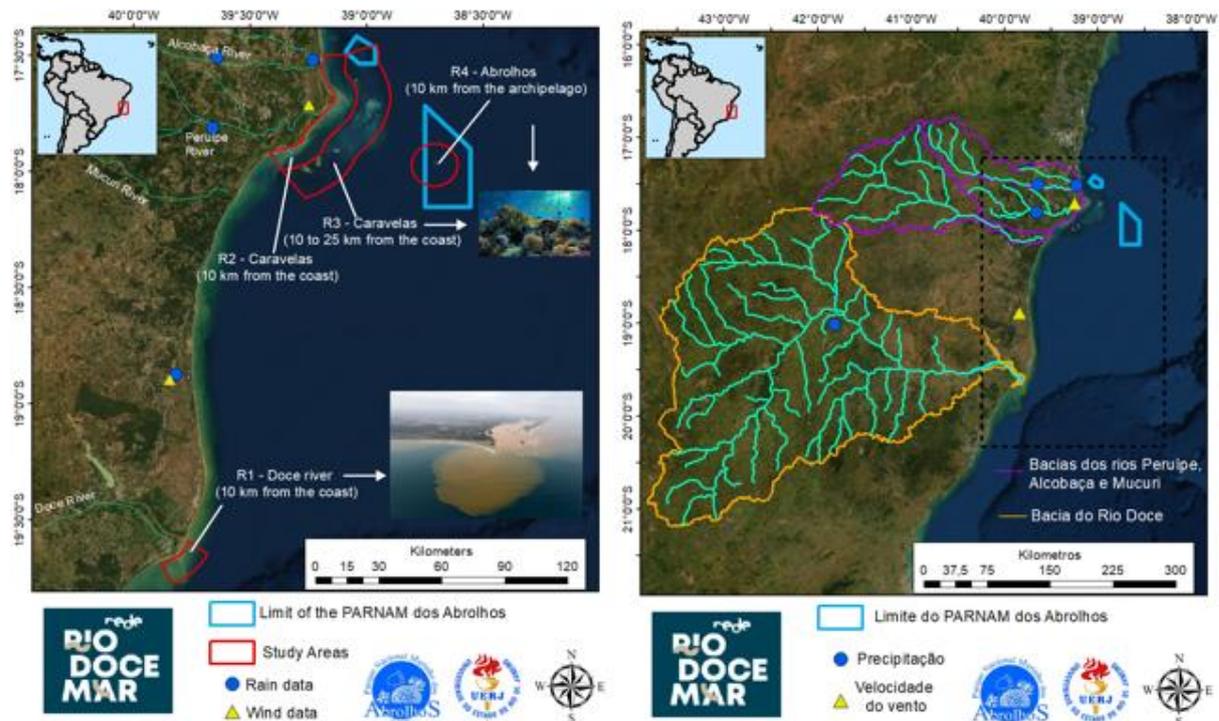
Foram utilizadas as médias mensais de MPS e k_d 490 para avaliar possíveis mudanças de disponibilidade de luz na coluna d'água na região da foz do Rio doce e na região de caravelas/Abrolhos, devido ao rompimento da barragem do fundão. Em conjunto foi analisada a variabilidade mensal da precipitação, vazão dos rios e velocidade do vento nas regiões do estudo, com o intuito de avaliar possíveis causas naturais das mudanças observadas.

2.3.6 Coeficiente de atenuação difuso (k_d , m^{-1})

A profundidade da zona eufótica está relacionada com a penetração e a disponibilidade de luz na coluna d'água e pode influenciar a dinâmica do fitoplâncton marinho. Uma forma de avaliar a disponibilidade de luz na coluna d'água é utilizando o coeficiente de atenuação difuso (k_d). O k_d é uma importante propriedade óptica da água. Pode ser definido como o decaimento exponencial da irradiância em uma dada profundidade z e num certo comprimento de onda λ . O coeficiente de atenuação difuso da irradiância em 490 nm (k_d490) está relacionado com a penetração e disponibilidade de luz, sendo

considerado um indicador de turbidez. Dessa forma, utilizamos o K_d490 para avaliar se o rompimento da barragem alterou a turbidez na regiões da foz do Rio Doce e de Caravelas/Abrolhos. Neste trabalho, utilizamos o k_d490 derivado da equação de lee (2005) a partir de imagens MODIS, disponível em: <https://www.oceancolour.org/portal/>. Assim como para o parâmetro MPS, foram extraídas a partir das imagens, as concentrações mensais médias para as 4 regiões de interesse definidas na Figura 8.

Figura 8. Definição das áreas utilizadas para os cálculos das médias mensais da concentração do MPS e do k_d490 e a localização das bacias hidrográficas analisadas.



2.3.7 Precipitação, velocidade do vento e vazão dos Rios.

Médias mensais da precipitação e da velocidade do vento foram obtidas através de estações automáticas, pertencentes ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) (<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>). Foram escolhidas estações localizadas dentro das bacias hidrográficas ou próximas a Região de Caravelas/Abrolhos e da Foz do Rio doce, Figura 8. No caso dos dados de precipitação utilizados para compor a série temporal da região de Caravelas/Abrolhos, foi utilizada a média das 3 estações mais próximas da foz, localizadas dentro das bacias hidrográficas dos rios que drenam para a região (Peruípe, Alcobaça e Mucuri) (Figura 8). Para a série de dados de precipitação para o Rio doce, foi utilizada uma única estação dentro da bacia. Ao mesmo tempo, para verificar a representatividade dos dados destas estações, foram compilados também os dados de precipitação produzidos pelo “*Global Precipitation Measurement*” (GPM), o qual é composto pela combinação de dados derivados por satélite e observações de estações meteorológicas com resolução espacial de 0.1° . Com o mesmo propósito, foram também usados os dados de velocidade do vento, produzidos pelo modelo MERRA 2, para a velocidade do vento nas regiões costeiras (sobre o oceano) das áreas de estudo. Já os dados de vazão

foram obtidos no site da Agência Nacional de Águas (ANA) através do sistema HIDROWEB (http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/mapa_hidroweb.jsf). A média mensal para a vazão na região de Caravelas/Abrolhos foi calculada a partir da média das vazões dos rios Peruíbe, Alcobaça e Mucuri (Figura 8). Já para a região da foz do Rio doce foram utilizados dados da vazão do Rio Doce. Infelizmente, os dados de vazão encontrados para o Rio Doce correspondem somente ao período de janeiro a dezembro de 2014. O período analisado foi de 2014 a 2018, compreendendo assim o ano anterior ao rompimento da barragem e os anos após o rompimento.

2.4 ANÁLISES DE ISÓTOPOS RADIOGÊNICOS

O Samário (Sm) e o Nd são ETR (Elementos terras raras) leves do grupo dos lantanídeos. Ocorrem como elementos-traço nos minerais formadores de rocha. A concentração de ambos em silicatos cresce na medida que a cristalização do magma evolui. Nas rochas ígneas, a concentração é proporcional com o grau de diferenciação magmática (FAURE, 1986). O elemento Sr está presente como traço (medido em ppm) na maioria das rochas ígneas, metamórficas e sedimentares, entretanto a concentração desse elemento raramente ultrapassa a 1%. O Sr participa na formação do carbonato estroncianita e do sulfato celestita, os quais são encontrados em alterações hidrotermais e rochas sedimentares como nos carbonatos (Geraldes, 2010). O elemento Sr pode formar diversos minerais próprios, dos quais somente a estroncianita (SrCO_3) e a celestita (SrSO_4) tem abundâncias significativas. O Sr apresenta quatro isótopos de ocorrência natural: ^{84}Sr , ^{86}Sr e ^{88}Sr (não radiogênicos) e ^{87}Sr (radiogênico).

Os sistemas isotópicos Sm-Nd e Rb-Sr possuem comportamentos complementares durante os diferentes processos geodinâmicos na crosta terrestre, devido a suas características geoquímicas contrastantes. Sm e Nd, uma vez incorporados à crosta terrestre por processos de fusão do manto, não sofrem fracionamento devido a processos de refusão. Por outro lado, Rubídio e Estrôncio, além de sofrerem fracionamento por processos de fusão do manto, também sofrem fracionamento em processos de refusão crustal. Os pares Sm-Nd e Rb-Sr também tem comportamentos contrastantes em processos superficiais de erosão, transporte e deposição de sedimentos. Por sua semelhança geoquímica e baixíssima solubilidade, Sm e Nd refletem de modo fiel as composições isotópicas das rochas de suas áreas fontes, ao passo que Rb e Sr sofre fracionamento durante estes processos superficiais.

Por conta desta paridade isótopos de Sm, Nd, Rb e de Sr são comumente utilizados como traçadores de proveniência sedimentar. Para o sistema Sm-Nd, é utilizada a razão isotópica $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$, sendo ^{143}Nd o isótopo radiogênico formado a partir do decaimento de ^{147}Sm . No sistema Rb-Sr, é utilizada a razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, na qual o isótopo ^{87}Sr é formado a partir do decaimento de ^{87}Rb .

As assinaturas geoquímicas se baseiam nas razões dos isótopos de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ e $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ e nas análises de micropartículas insolúveis para os elementos Si, Al, Fe, Ti, Ca, Cl, Zn, Cu, K, Mg e Na. As

razões isotópicas $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ versus $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ quando descritas num plano cartesiano são usadas como referência para estudos de proveniência sedimentar e para estudos de misturas isotópicas de dois componentes isotopicamente contrastantes. Estas técnicas, combinadamente, constituem-se em uma robusta metodologia para se demonstrar a existência (ou inexistência) de vestígios da pluma de sedimentos do Rio Doce sobre o PARNA. Outras substâncias minerais podem ter sido arrastadas do entorno dos leitos pela corrente formada, além do acréscimo de elementos ou substâncias as mais variadas, incluindo metais pesados, que já contaminavam o leito dos rios (e a água) - boa parte dos esgotos das cidades são despejados sem tratamento, além dos produtos químicos utilizados normalmente na agricultura (fertilizantes NPK). A caracterização química dos rejeitos do beneficiamento do minério na mina vizinha da Samarco (Alegria) mostra apenas traços de Zn, Cu e Pb. O metal predominante é Fe, com cerca de 50%, seguido de Mn (um associado do Ferro nas formações ferríferas) com aproximadamente 20%, presentes na forma de óxidos. A formação geológica das minas de Alegria (Vale) e da Samarco é a mesma, e os rejeitos do beneficiamento são similares.

Para a realização das análises isotópicas é necessário ter cuidados muito especiais nas diversas etapas do processo analítico. Por se tratar de ETR, os procedimentos foram conduzidos em sala limpa classe 100 e os ácidos e água utilizados são todos bidestilados em equipamento de purificação por destilação sub-boiling para obtenção de reagentes de alta pureza. As amostras foram submetidas a secagem em estufa por 3 dias a 60 °C. A seguir o material é quarteado e peneirado em malha de #200 (0,074mm). A fração fina é submetida a digestão ácida a partir da técnica já estabelecida por GIOIA (2010). Após esta etapa iniciou-se os procedimentos para separação de Sr e ETR em colunas com resinas de troca iônica, primárias para separação de Sr e ETR, e secundárias para a separação de Nd.

2.4.1 Base de dados isotópicos

Foram feitas compilações de dados da literatura e análises de sedimentos fluviais (Rio Doce) e litorâneos a fim de compará-los com as assinaturas isotópicas de sedimentos coletados em Abrolhos. Esta caracterização foi feita a partir dos seguintes conjuntos de dados:

Dados da literatura:

- Basaltos que compreendem o assoalho vulcânico da plataforma de Abrolhos (Fodor et al. 1989);
- Sedimentos lamosos avermelhados e ricos em ferro coletados desde a Barragem de Santarém até Barra Longa, ao longo dos rios Gualaxo do Norte e Carmo, afluentes do Rio Doce que primeiramente receberam os rejeitos de mineração provenientes da barragem de Fundão (Valeriano et al. 2019);
- Substrato rochoso da bacia hidrográfica do Rio Doce:
 - a) Complexos granito-gnáissicos arqueano-paleoproterozoicos do cráton do São Francisco (Teixeira et al., 1996), do Bloco Guanhões (Martins et al., 2004) e da suíte Borrachudos (Dussin, 1994);

b) Granitos (pré, sin e pós-colisionais) da Faixa Orogênica Araçuaí (Tedeschi et al., 2016; Gonçalves et al., 2016; Novo et al., 2010; Martins et al., 2004; Nalini et al., 2000; Martins et al., 2004; De Campos et al., 2016).

Dados gerados pelo projeto:

- Sedimentos de leito e margem coletados na foz do Rio Doce em 2014 e no final de 2015;
- Sedimentos obtidos a partir de estratificações de um testemunho de sondagem datado do médio Holoceno para Abrolhos (Ab05/1, Almeida 2009);
- MPS coletados em Abrolhos (próximos a Coroa Vermelha) antes de 2015;
- Sedimentos adquiridos a partir de armadilhas coletadas em missões pretéritas, ou seja, no inverno de 2016, para as localidades Guarita, Sueste e Chapeirão do Pierre no arquipélago dos Abrolhos.

2.4.2 Preparo físico das amostras sedimentares

2.4.2.1 Sedimentos coletados por armadilhas

No Laboratório Geológico de Preparação de Amostras (LGPA/FGEL-UERJ), os frascos contendo as amostras de sedimentos são retiradas do recipiente com auxílio de água deionizada. Seguem para o processo de secagem em estufa a 50°C por 1 dia e depois são pesadas. Após pesadas, estas são destorroadas, isto é, pequenas aglutinações causadas por material argiloso e umidade são desagregadas manualmente. As amostras são quarteadas até que alíquotas com cerca de 20g sejam obtidas.

Os sedimentos coletados nos *traps* sedimentares são preparados utilizando sua fração total, isto é, sem separação granulométrica. Por já se encontrarem em uma granulometria muito fina, estes são cominuídos com um cadinho de ágata até obterem uma textura de talco, sem aglutinações aparentes. As amostras então são novamente quarteadas gerando alíquotas para as análises de geoquímica isotópica (DRX e MEV-EDS, que serão explicadas posteriormente).

2.4.2.2 Sedimentos fluviais

Para os sedimentos fluviais, a preparação para geoquímica é realizada em duas frações granulométricas: a) a fração total, sem fracionamento granulométrico; b) a fração mais fina que 74 µm. A fração de mais fina que 74 µm apresenta interesse geológico e ambiental por se tratar da granulometria usualmente utilizada em barragens de terra e também por apresentar um transporte tipicamente por suspensão em ambiente fluvial e marinho.

A preparação da fração total é realizada utilizando um moinho de bolas do tipo SPEX (Figura 9), composto por um cadinho e bolas de carbetto de tungstênio (Figura 10), visando uma pulverização da amostra até uma granulometria abaixo de aproximadamente 60 µm. A pulverização do material deve

ser bem trabalhada para que a digestão química da amostra para análises geoquímicas seja a mais efetiva possível. A rotina de preparação da amostra se dá com cerca de 5 g de amostra colocados no cadinho para vibração por cerca de 7 min. Assim, o material pulverizado é descartado. Essa etapa é importante, pois evita contaminação cruzada entre diferentes amostras.

Figura 9. Moinho SPEX com cadinho acoplado. O motor movimenta o braço do moinho produzindo vibração do cadinho.

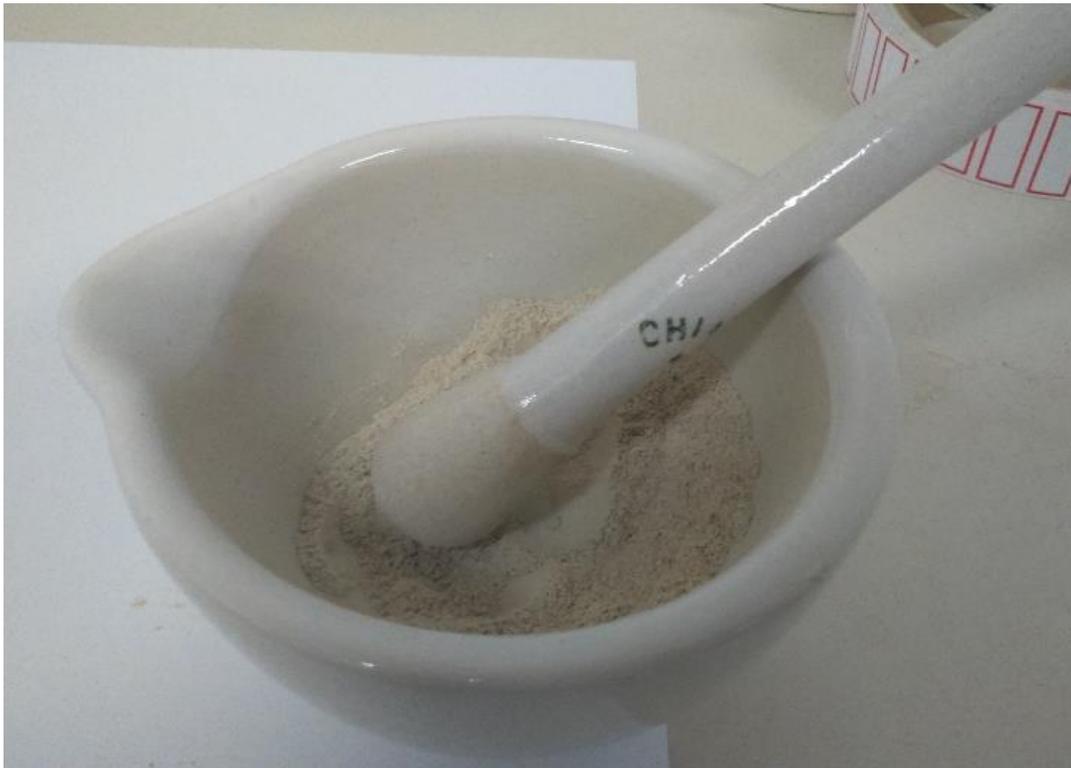


Figura 10. Cadinho e bolas de carbeto de tungstênio utilizados na pulverização do material particulado.



- Adicionam-se cerca de 15 g ao cadinho que vibra por 10-15 min. O resultado dessa etapa deve ser um pó de coloração homogênea e uma textura semelhante a talco.
- Caso a textura não esteja no ponto correto, é feita uma nova cominuição utilizando um almofariz de porcelana (Figura 11).

Figura 11. Almofariz de porcelana e pistilo utilizados na cominação do material.



A fração mais fina que $74\ \mu\text{m}$ é separada a partir de peneiramento em via úmida. Para evitar qualquer tipo de contaminação, o peneiramento é feito com uma tela de nylon descartável utilizando-se água deionizada. O material mais fino do que a abertura da peneira é levado à estufa a 50°C para secagem por 1 dia. O material seco é posteriormente pesado e quarteado produzindo alíquotas idênticas para as análises de geoquímica isotópica e mineralógica por DRX.

2.4.3 Procedimentos Químicos

Todo o processo químico analítico foi realizado em ambiente “*clean room*”, com uso de filtragem absoluta do ar (classe 100) à pressão positiva. Os ácidos utilizados foram bidestilados em regime de sub-ebulição em frascos de teflon. A água, previamente tri-filtrada, foi deionizada em um purificador NanoPure e em seguida purificada com uso do equipamento Milli-Q (18Ω).

2.4.3.1 Eliminação de Carbonatos

Foram pesados cerca de 600mg de amostra em balança analítica, em seguida, foram adicionados 10mL de solução de Ácido Clorídrico HCl 2,5mol/L. Esta adição é realizada em etapas de 1 em 1 mL, pois a reação libera uma grande quantidade de Dióxido de Carbono (CO_2), evitando perda de amostra. Após, reagir por 12 horas, em temperatura ambiente.

Todo o conteúdo foi transferido para um tubo de polipropileno e em seguida, centrifugado. O sobrenadante foi descartado e a amostra sólida (resíduo) lavado e centrifugado por três vezes com água Milli-Q, garantindo que todo o Estrôncio (Sr) solúvel no ácido foi eliminado da amostra. O resíduo

foi transferido para o recipiente Savillex® de origem e evaporado até securo para seguir com procedimento de eliminação de matéria orgânica.

2.4.3.2 Eliminação de matéria orgânica

Foram adicionados à amostra seca 5mL de ácido nítrico HNO_3 7mol/L, deixando reagir durante a noite em chapa quente a 90°C . Após, a amostra foi esfriada e evaporada até securo. Em seguida, foram adicionados 5mL de Peróxido de Hidrogênio H_2O_2 30%. Esta adição é realizada em etapas de 0,5 em 0,5mL, pois a reação libera uma grande quantidade de gases, evitando perda de amostra, deixando reagir durante a noite em temperatura ambiente. Posteriormente foi evaporada em temperatura branda (50°C), para que não haja decomposição do H_2O_2 . Para a verificação da reação completa foi adicionado 1mL de H_2O_2 30% (observação ou não de desprendimento gasoso). Caso não se observe modificação, evaporar e seguir para procedimento de abertura de amostra. Se observar formação gasosa, adicionar mais H_2O_2 30% até cessar a reação.

2.4.3.3 Digestão da amostra e separação química

Após a eliminação da matéria orgânica foram adicionados 3mL de Ácido Fluorídrico HF conc. 48% + 0,5mL de HNO_3 7mol/L. Em seguida, a amostra foi posta sobre chapa quente (90°C) por 30 minutos, para eliminação dos gases. Os frascos Savillex® foram retirados e fechados e deixados em chapa quente ($120 - 130^\circ\text{C}$) por três dias. Após, foram evaporados até securo, em seguida, foi adicionado 1mL de HNO_3 7mol/L e evaporado, garantindo que todo HF foi eliminado. Foram adicionados 3mL de HCl 6mol/L, colocados em chapa quente ($120 - 130^\circ\text{C}$) por dois dias. Posteriormente, as amostras foram evaporadas e condicionadas com 2mL de HCl 2,5mol/L. Da solução acima preparada, 1mL foi adicionado na coluna primária, com o objetivo de separar o Sr. O Sr foi eluído e coletado com HCl 2,5mol/L. Após coletado, foi evaporado e seguiu para deposição de amostras em filamentos e análise espectrométrica. A parte restante da solução foi diluída com adição de mais 2mL de HCl 2,5mol/L, resultando em um volume de solução de 3mL. Em seguida, foi tomado 1mL e adicionado na coluna primária, com o objetivo de separar os Elementos Terras Raras (ETR). Esta diluição garante que 100mg de amostra passe pela coluna secundária e a resina não sature. Em seguida, os ETR foram evaporados e dissolvidos em 0,2mL de HCl 0,18mol/L, adicionados na coluna secundária para separação do Nd e Sm dos demais ETR. O Nd foi eluído e coletado com HCl 0,18mol/L e o Sm eluído e coletado com HCl 0,5mol/L (Figura 12).

Figura 12. Separação dos elementos químicos.



Após a coleta, foram evaporados e seguiram para deposição de amostras em filamentos e análise espectrométrica.

2.4.4 Análises Espectrométricas

2.4.4.1 Deposição de amostras em filamento

A deposição das amostras foi realizada em filamentos de Rênio (Re), em arranjo duplo, juntamente com 3 μL do ativador iônico $\text{H}_3\text{PO}_4 1\text{N}$ utilizando um amperímetro para secagem total da amostra até a corrente 2,5 A (Figura 13). Esse procedimento foi realizado em filamentos previamente degasificados em ambiente *clean room* dentro de capela de fluxo laminar.

Figura 13. Deposição de amostras em filamentos.



2.4.4.2 Medição das razões isotópicas

As análises espectrométricas são realizadas em um espectrômetro de massa por termo-ionização (TIMS) multicoletor, modelo TRITON da Thermo Scientific (Figura 14). Os filamentos com amostras foram inseridos em um carrossel na fonte de ionização no espectrômetro e analisados para obtenção das razões isotópicas. As análises de Nd, Sm e Sr foram realizadas em modo estático com até 8 coletores Faraday com erro padrão absoluto de 2σ .

Figura 14. Espectrômetro de massa portermo-ionização (TIMS) multicoletor, modelo TRITON da Thermo Scientific.



2.4.4.3 Análise das razões isotópicas de Sr

Para a análise do Sr, a corrente no filamento de ionização foi de 3200 mA e o filamento de evaporação, variando de acordo com a amostra, entre 1800-2200 mA obtendo-se 100 ciclos de medidas por análise. A razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ obtida é corrigida para o fracionamento isotópico utilizando a razão $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 8,3752$ e, para uma possível interferência isobárica causada pelo ^{87}Rb , corrige-se utilizando a razão $^{87}\text{Rb}/^{85}\text{Rb} = 0,3860$.

2.4.4.4 Análise das razões isotópicas de Sm e Nd

As análises de Nd e Sm foram realizadas com o valor da corrente do filamento de ionização fixo em 4500 mA e o filamento de evaporação, variando de acordo com a amostra, entre 1800-2200 mA, obtendo-se 160 ciclos de medidas por análise de Nd e 80 ciclos por análise de Sm. As razões isotópicas obtidas pelo método Nd são: $^{142}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$, $^{145}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$, $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$, $^{148}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ e $^{150}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ foram normalizadas (exceto $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$) para correção do fracionamento isotópico utilizando a razão $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0,7219$. As razões isotópicas obtidas pelo método Sm são: $^{147}\text{Sm}/^{152}\text{Sm}$ (não normalizada) e $^{149}\text{Sm}/^{152}\text{Sm}$ normalizada para correção do fracionamento isotópico utilizando a

razão $^{147}\text{Sm}/^{152}\text{Sm} = 0,5608$. Os valores do branco das análises de Nd e Sm são respectivamente abaixo de 200 pg e de 70 pg.

2.5 ANÁLISE MINERALÓGICA (MICROANÁLISE POR DRX E MEV+EDS)

2.5.1 Difração de Raios-X (DRX)

A identificação dos minerais por via de difratometria de raios X (DRX) é utilizada para casos em que a granulometria do material é muito fina e não é possível fazer o diagnóstico a partir de métodos de microscopia óptica comuns. O método se baseia na utilização de ondas na frequência de raio X e sua interação com os retículos cristalinos de diferentes minerais. Estes retículos são caracterizados por uma gama de distâncias interplanares específicas que são medidas através dos ângulos de reflexão das ondas incidentes através da Lei de Bragg. A Lei de Bragg é definida como:

$$\lambda = 2d \sin\theta$$

onde λ é o comprimento de onda utilizado, d é a distância interplanar e θ é o ângulo de reflexão. Por definição, o método da difração é apenas aplicável para materiais cristalinos e é um excelente diagnóstico para diferentes fases de argilominerais presentes nos sedimentos.

A preparação e análise de DRX foi realizada no Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), com o objetivo de quantificar pelo método de Rietveld as fases mineralógicas presentes nas amostras coletadas nas armadilhas sedimentares. Para tanto, cerca de 3 a 4 gramas de material, previamente quarteado, foi pulverizado até a granulometria de 10 micrômetros utilizando um moinho vibratório micronizador *McCrone* (Figura 15). O material microzinado é posteriormente lavado com água deionizada e colocado para secagem em estufa a 60°C por cerca de 1 dia. Depois de seca, a amostra foi homogeneizada em gral de ágata e, então, montada em suporte de aço sob uma superfície plana.

Figura 15. Moinho vibratório micronizador modelo McCrone.



Fonte: Carla Neto (em Aguiar Neto, 2018).

As análises de difração de raio X foram feitas pelo método do pó em um equipamento da Bruker-D4 Endeavor (radiação $\text{CuK}\alpha$ 40 kV) (Figura 16). Os parâmetros de análise utilizados foram variação do ângulo do goniômetro entre 4° e 105° , com passo de $0,010^\circ$ e 0,50 segundos para cada passo de contagem. Condições do gerador em 40Kw e 25mA. O detector utilizado é de modelo *Lynx EYE-XE* com filtro $\text{K}\beta$ de níquel. As interpretações foram feitas por comparação com padrões contidos no banco de dados PDF02 do *International Centre for Diffraction Data* (ICDD, 2006) a partir do software *BruckerDiffracPlus*.

Figura 16. Difratômetro de raios X modelo Bruker-D4 Endeavor.

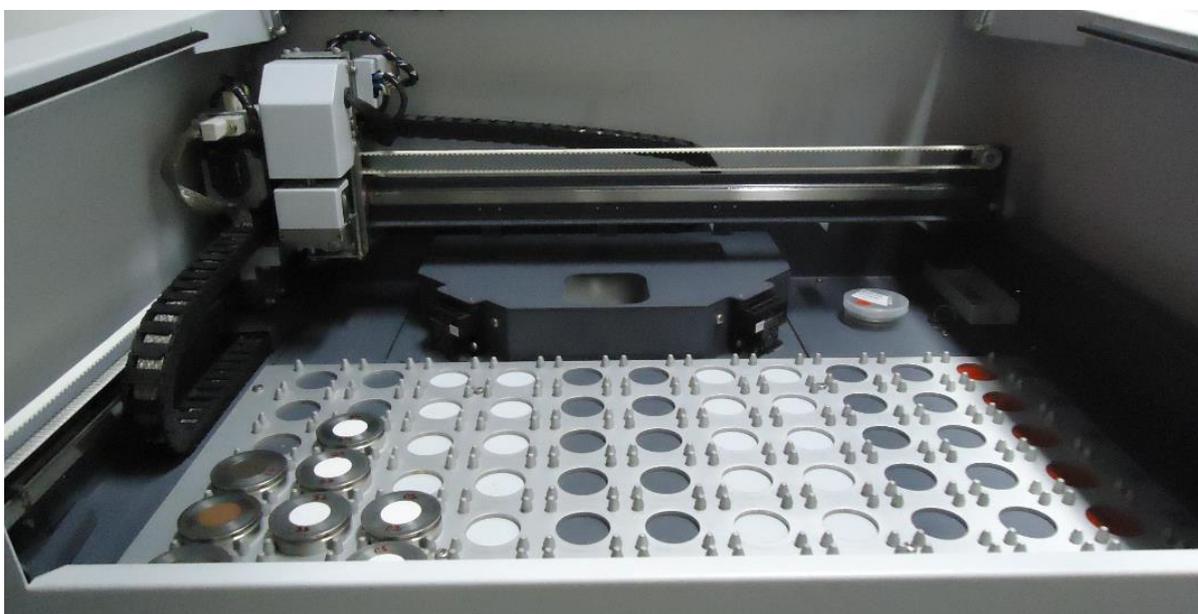


Foto: Carla Neto (em Aguiar Neto, 2018).

2.5.2 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Para a análise morfológica e elementar das micropartículas para sedimentos finos, foi empregado a análise por microscópio eletrônico de varredura (MEV) acoplado a um espectrômetro de energia dispersiva (EDS) instalado e operacional na Uerj. A imagem obtida pelo MEV é gerada por elétrons secundários gerados como resultado da interação de um feixe de elétrons incidentes com a superfície de uma micropartícula selecionada em seu campo de visão. A composição elementar das partículas foi obtida a partir da análise do espectro gerado pela detecção dos raios-X produzidos pela interação do feixe de elétrons incidentes sobre a superfície da partícula. Cada elemento produz raios-X em faixas de energia específicas, de tal maneira que a análise elementar se torna possível para a identificação de elementos com número atômico superior a 10 ($Z > 10$). Esta técnica permite que a análise elementar seja feita de forma pontual ou por uma área determinada, de acordo com a abertura utilizada para incidência do feixe de elétrons sobre a amostra. Neste método, alvos foram confeccionados com diâmetros de aproximadamente 1 cm contendo material particulado. Tais alvos foram previamente investigados ao MEV para se selecionar partículas com morfologias predominantes, sobre as quais foram realizadas as microanálises elementares. Para tal, nesta abordagem preliminar onde se determinou as abundâncias relativas de C, O, Si, Al, Fe, Ti, Ca, Cl, Zn, K, Ni, Nb, Mg e Na. Nesta técnica, se obtêm dados de abundâncias relativas para micro-partículas escolhidas nas amostras e o objetivo é a investigação de mais detalhe dos grãos presentes nos sedimentos, de acordo com sua morfologia, e análise química qualitativa mais pontual, afim de individualizar as fases mineralógicas.

As análises em microscopia eletrônica de varredura foram realizadas no sedimento quarteado e recoberto com película de carbono. Estas análises têm por objetivo a investigação de mais detalhe dos grãos presentes nos sedimentos de acordo com sua morfologia e análise química qualitativa mais pontual afim de individualizar as fases mineralógicas. O modelo de MEV utilizado foi *Jeol- JSM- 6510LV* acoplado a um EDS (traduzido para Espectrômetro de Dispersão de Energia), utilizando as seguintes especificações: potencial de aceleração= 20kV; número mínimo de contagens= 1500; *Spot Size*= 60 μ m.

2.6 CAMPANHAS DE COLETA DE AMOSTRAS

As campanhas do ANEXO 8 ocorrem em 7 atividades. Foram realizadas atividades no mar e terrestre. O cronograma indicado no Quadro 2 apresenta todas as atividades e as datas as quais foram realizadas.

Quadro 2. Cronograma das atividades realizadas pelo ANEXO 8.

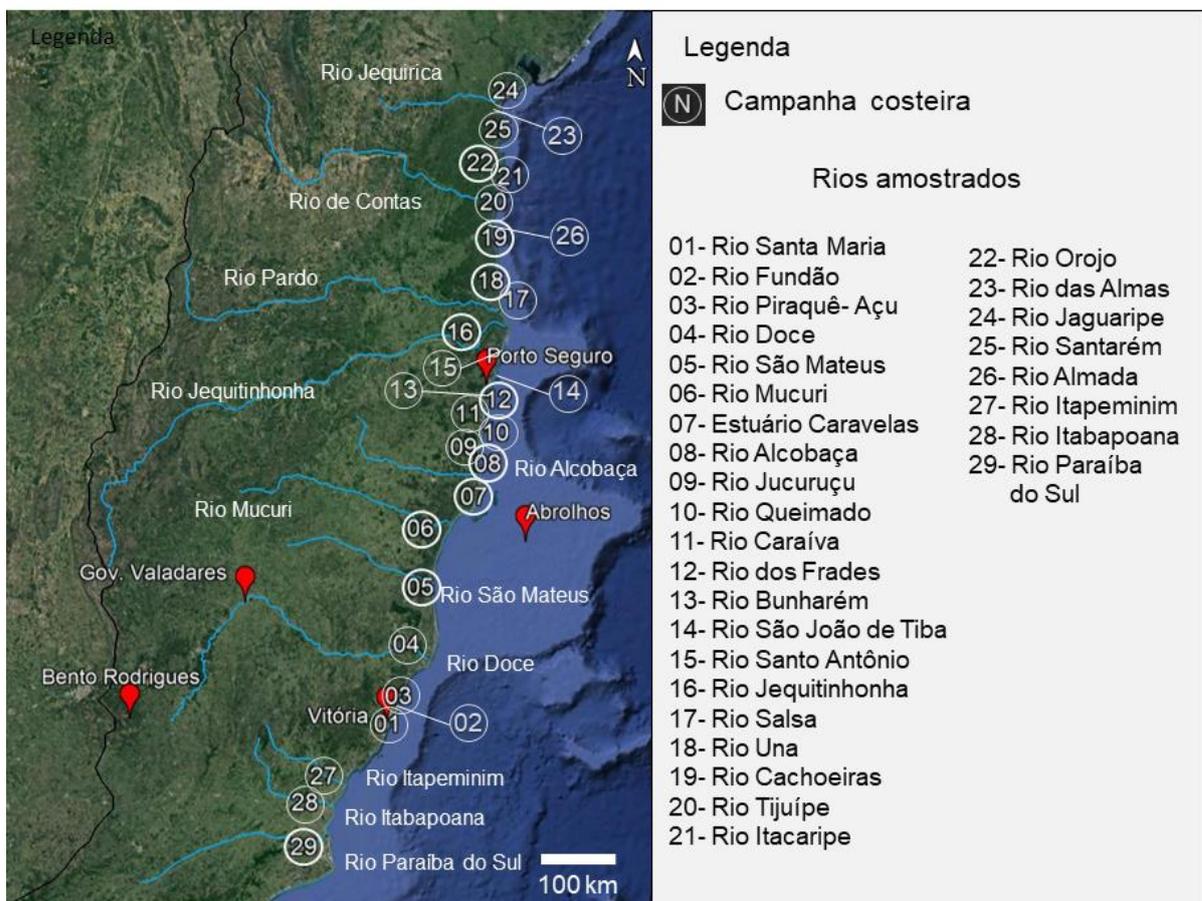
SEDIMENTOS													ÁGUA			
Atividade ANEXO8	Campanha RRDM	Data Inicial	Data Final	ARMADILHAS DE SEDIMENTOS						LEVANTAMENTO TERRESTRE			MPS	Parâmetros coluna d'água	Sensoriamento Remoto	
				AB01	AB02	AB03	AB04	AB05	AB06	Zona Costeira	Bacia do Rio Doce	Sed. em Suspensão (IBA)				
1	2	17/11/2018	19/11/2018													
2	5	18/02/2019	26/02/2019													
3	6	24/03/2019	01/04/2019													
4	8	09/05/2019	19/05/2019													
5	9	30/06/2019	02/07/2019													
6	11	14/08/2019	17/08/2019													
7	12	23/09/2019	26/09/2019													
Período de exposição das armadilhas																

2.6.1 Campanha terrestre

As campanhas de coleta para amostras sedimentares no setor terrestre (campanhas 5 e 6) ocorreram em 2 domínios: (1) na zona costeira entre o Rio Paraíba do Sul/Rio de Janeiro até o Rio Jaguaribe/Bahia) e na região continental (ao longo do Rio Doce), apenas nas fozes de rios relacionados na Figura 17; (2) nas margens do Rio Doce a partir do Distrito de Bento Gonçalves até a área estuarina.

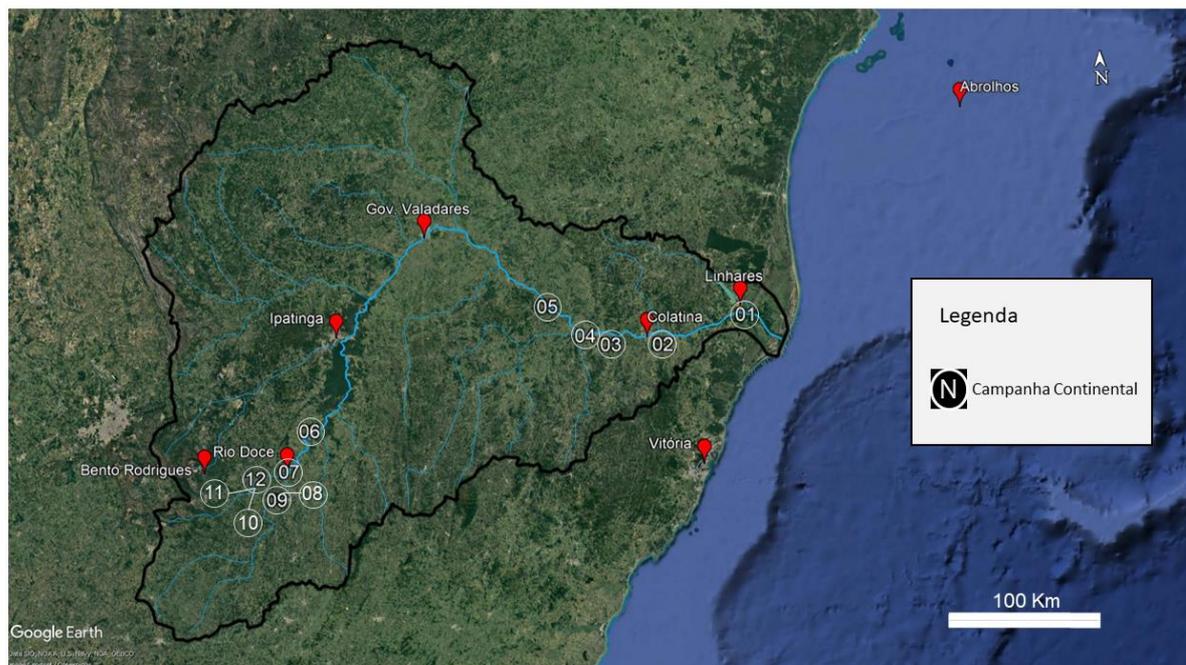
A Campanha 5, foi realizada entre os dias 18/02/2019 ao dia 26/02/2019, sendo amostrados 28 rios selecionados por suas dimensões. A Figura 17 mostra a localização dos rios amostrados durante a Campanha 5.

Figura 17. Vinte e oito (28) pontos de amostragem de sedimentos superficiais realizados para a Campanha 5, entre os dias 18/02/2019 e 26/02/2019.



A Campanha 6 ocorreu entre os dias 26/03/2019 ao dia 29/03/2019, sendo 12 coletas realizadas ao longo do Rio Doce. A Figura 18 mostra os pontos amostrados.

Figura 18. Pontos de amostragem da Campanha 6, entre os dias 26/03/2019 ao dia 29/03/2019, sendo que 12 coletas foram realizadas ao longo da bacia do Rio Doce.



A Figura 19 ilustra o processo de coleta de sedimento terrestre.

Figura 19. Coleta de sedimento da região terrestre.



Para os sedimentos coletados na campanha costeira e continental, estes foram levadas ao laboratório, submetidos ao processo de secagem em estufa a 50°C por 1 dia, e pesadas. Após esta fase, estas foram destorroadas, isto é, desagregadas devido as aglutinações causadas por material argiloso e humidade na amostra original. Em seguida, as amostras foram quarteadas até que alíquotas com cerca de 20 g fossem obtidas. As preparações para geoquímica foram feitas em duas frações granulométricas, a fração total, sem fracionamento granulométrico, e outra na fração menor do que 74

microm. A fração de 74 microm apresentou grande interesse geológico e ambiental por se tratar da granulometria usualmente utilizada em barragens de terra e também por apresentar um transporte aluvionar tipicamente por suspensão.

O preparo da fração total foi realizada em um moinho de bolas. O moinho de bolas é composto por um cadinho e bolas de tungstênio e funciona a partir da vibração que causa o choque dessas bolas de tungstênio com o material particulado causando uma pulverização da amostra até uma granulometria próxima a 60 microm. A pulverização do material deve ser bem trabalhada para que a abertura química da amostra em laboratório seja a mais efetiva possível.

A fração mais fina que 74 microm foi separada a partir de um peneiramento em via úmida. Para evitar qualquer tipo de contaminação, o peneiramento foi feito com uma tela descartável e utiliza água deionizada. O material mais fino do que a abertura da peneira foi levado à estufa a 50°C para secagem por 1 dia. O material seco é posteriormente pesado e, assim, pode-se calcular a razão da fração fina em relação ao peso total da amostra.

Algumas amostras foram priorizadas para serem levadas às análises (Quadro 3). As escolhas dessas amostras (Campanha continental, realizada ao longo do curso do Rio Doce) tiveram como base argumentos geomorfológicos, litológicos e antrópicos. Foram selecionadas seis amostras expostas na Quadro 3.

Quadro 3. Amostras da Campanha Continental escolhidas para análise.

Amostra	Data de coleta	Localidade	Curso	Tipo de amostra
Rd-01	26/03/2019	Linhares	Baixo	Depósito de leito
Rd-03	27/03/2019	Aimorés	Médio	Depósito de margem
Gv-11*	02/11/2018	Resplendor	Médio	Depósito de margem
Gv-20*	03/11/2018	Ipaba	Médio	Depósito de margem
Rd-06	28/03/2019	São José do Goiabal	Alto	Depósito de leito
Rd-07	28/03/2019	Rio Doce	Alto	Depósito de leito

*amostras comparativas com o estudo do Prof. Valeriano, o qual será explicado posteriormente.

Com base na geomorfologia, o curso do Rio Doce pode ser dividido em três compartimentos. No primeira, o rio corre sobre uma superfície de aplainamento próximo a 400 m de altitude, seu leito possui um substrato rochoso bem raso e margens curtas com planície de inundação pouco desenvolvida onde predominam processos erosivos. Em seu médio curso, o rio ganha volume, o canal torna-se mais largo e sinuoso com depósitos de barras laterais e raras longitudinais. O curso final, próximo à desembocadura, o Rio Doce adquire um padrão de canal deltaico, próximo ao anastomosado, com largas barras laterais e longitudinais.

O argumento litológico foi considerado com base em diferentes assinaturas isotópicas de áreas fontes de sedimentos, as quais podem ser divididas em quatro tipos principais: fontes arqueanas de onde derivam os rejeitos de mineração, fontes de rochas metassedimentares mesoproterozoicas a neoproterozoicas, fontes de granitos pós-colisionais neoproterozoicos e a Formação Barreiras constituída de sedimentos cenozoicos.

Ao longo do curso do Rio Doce, existem quatro represas que foram responsáveis pela diminuição do volume de sedimentos transportados pelo rio após o desastre de Mariana. São eles, a represa de Risoleta Neves (antiga Candonga) em Rio Doce, represa de Bafuani, e as represas de Resplendor e Aimorés.

A campanha costeira, com o objetivo a amostragem de sedimentos próximo a desembocadura de rios ao longo da costa sudeste e leste do Brasil. Estes rios têm contribuição direta com a região de Abrolhos, logo a sua assinatura geoquímica torna-se importante para a modelagem de áreas fontes na região de Abrolhos. A pré-seleção de amostras (Quadro 4) foi efetuada usando critérios de vazão do rio e proximidade com a região de Abrolhos.

Quadro 4. Amostras da Campanha Costeira escolhidas para análise.

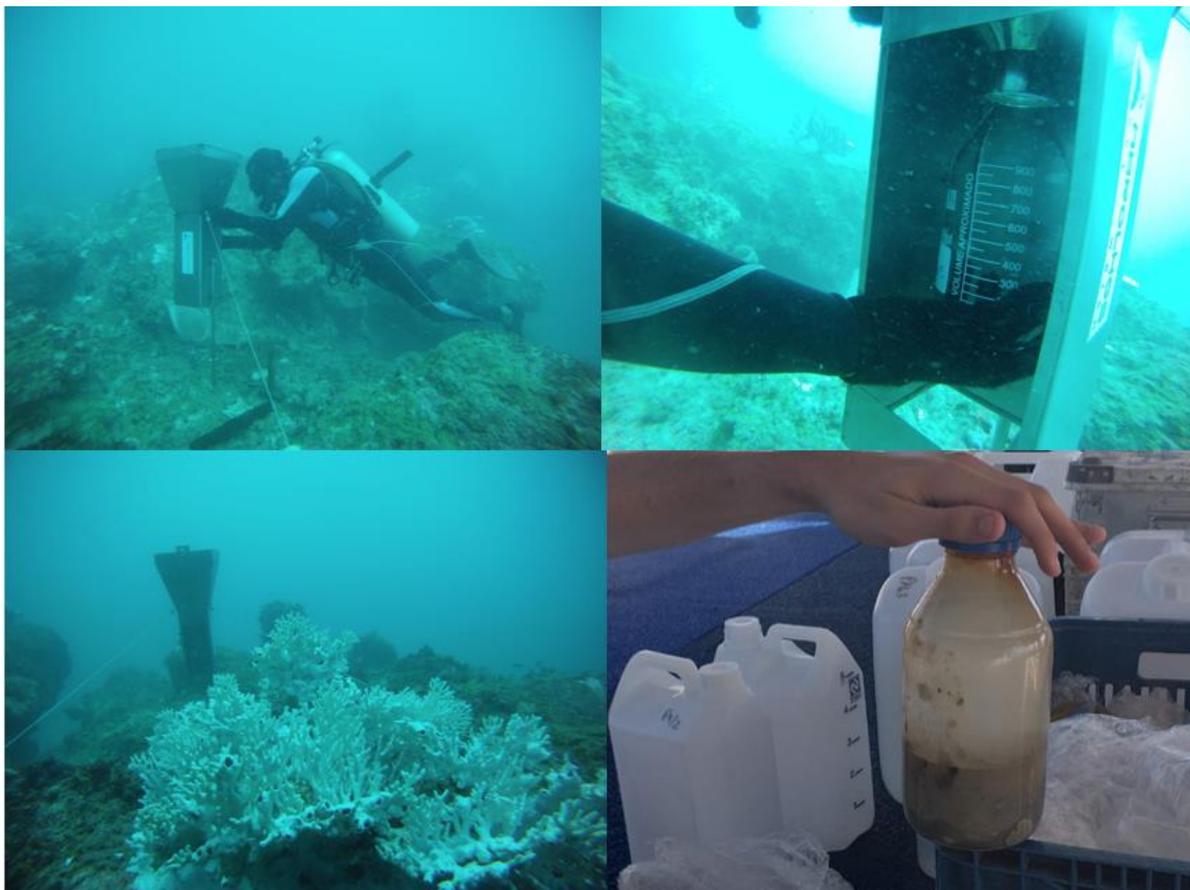
Amostra	Rio	Sub-Bacia	Vazão acumulada (m ³ /s)*
05	São Mateus	São Mateus	91,7
06	Mucuri	Mucuri	98,6
07	Caravelas	Litoral Sul da Bahia	256,4
08	Alcobaça		
12	Dos Frades		
16	Jequitinhonha	Jequitinhonha	438,6
18	Una	Pardo	77,3
19	Cachoeiras	Contas	150,6
22	Orojo	Recôncavo 1	42,2
29	Paraíba do Sul	Paraíba do Sul	1249,9

**(dados disponibilizados pela ANA (2006) em cadernos de Região Hidrográfica do Atlântico Sudeste e do Atlântico Leste)*

2.6.2 Campanhas de manutenção da rede de amostragem oceânica/sedimentar

As campanhas oceânicas ocorreram com o objetivo de se trocar as garrafas amostradoras de sedimentos nas armadilhas. Esta atividade é realizada embarcada com o apoio de 2 ou 3 mergulhadores e dura de 2 a 4 dias dependendo das condições de mar. As atividades subaquáticas também envolvem a manutenção das armadilhas, a limpeza de desincrustação da tampa superior da armadilha e na remoção e limpeza do sensor de luminosidade e temperatura. Os dados relativos a estes parâmetros são baixados a bordo da embarcação e os sensores reiniciados para nova fase de medidas. A Figura 20 ilustra a atividade de mergulho para manutenção e troca das garrafas amostradoras.

Figura 20. Atividade de mergulho para coleta das garrafas instaladas nas armadilhas de sedimento.

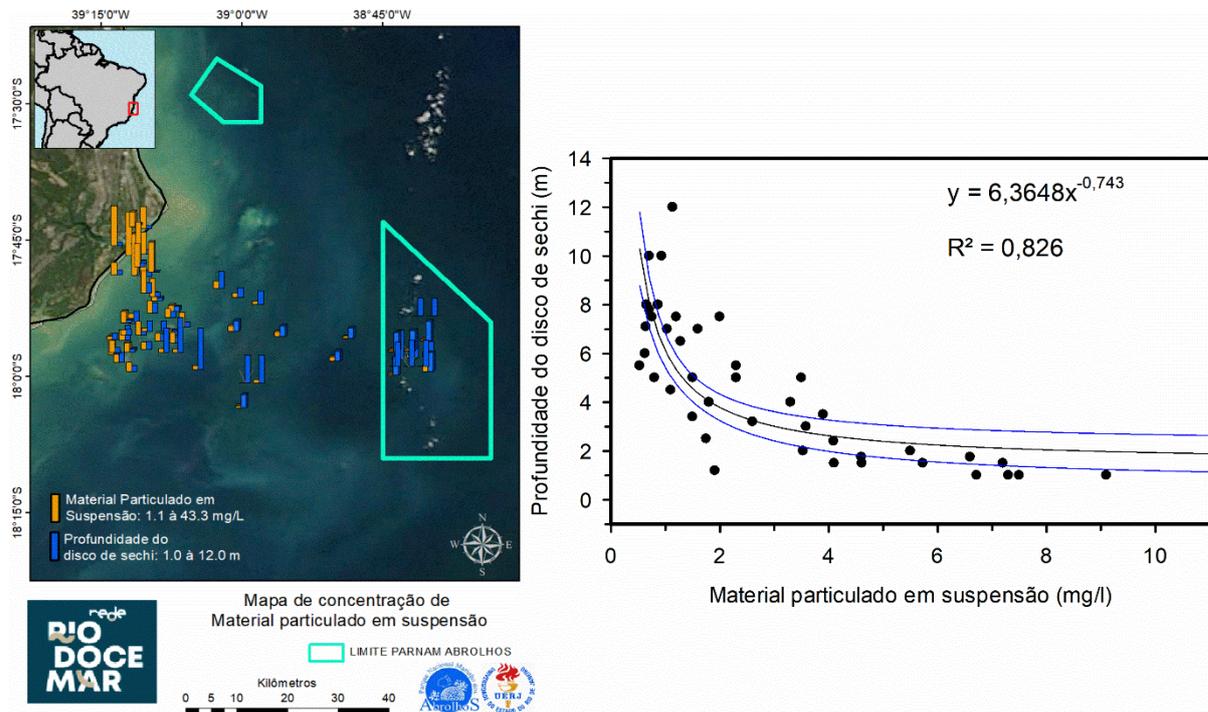


3 RESULTADOS

3.1 VARIABILIDADE ESPACIAL DAS CONCENTRAÇÕES DE MPS E SUA RELAÇÃO COM A TRANSPARÊNCIA NO AMBIENTE MARINHO

Os principais componentes opticamente ativos na água e que podem alterar significativamente a disponibilidade de luz no ambiente marinho são o MPS, a clorofila-a e a matéria orgânica colorida dissolvida. Dentre estes, nós avaliamos a relação entre o MPS e a disponibilidade de luz, utilizando as medições da profundidade do disco de sechi. Observamos uma forte correlação entre a concentração de MPS e a profundidade do disco de sechi medida no campo ($r^2 = 0,82$). Dessa forma, parece existir uma relação exponencial entre a quantidade de MPS e a disponibilidade de luz (Figura 21). A disponibilidade de luz diminui rapidamente com o aumento da concentração de MPS, mesmo em concentrações baixas. Isto mostra a importância do MPS para a região. Concentrações de MPS maiores que 4 mg/L são capazes de reduzir significativamente a disponibilidade de luz no ambiente aquático.

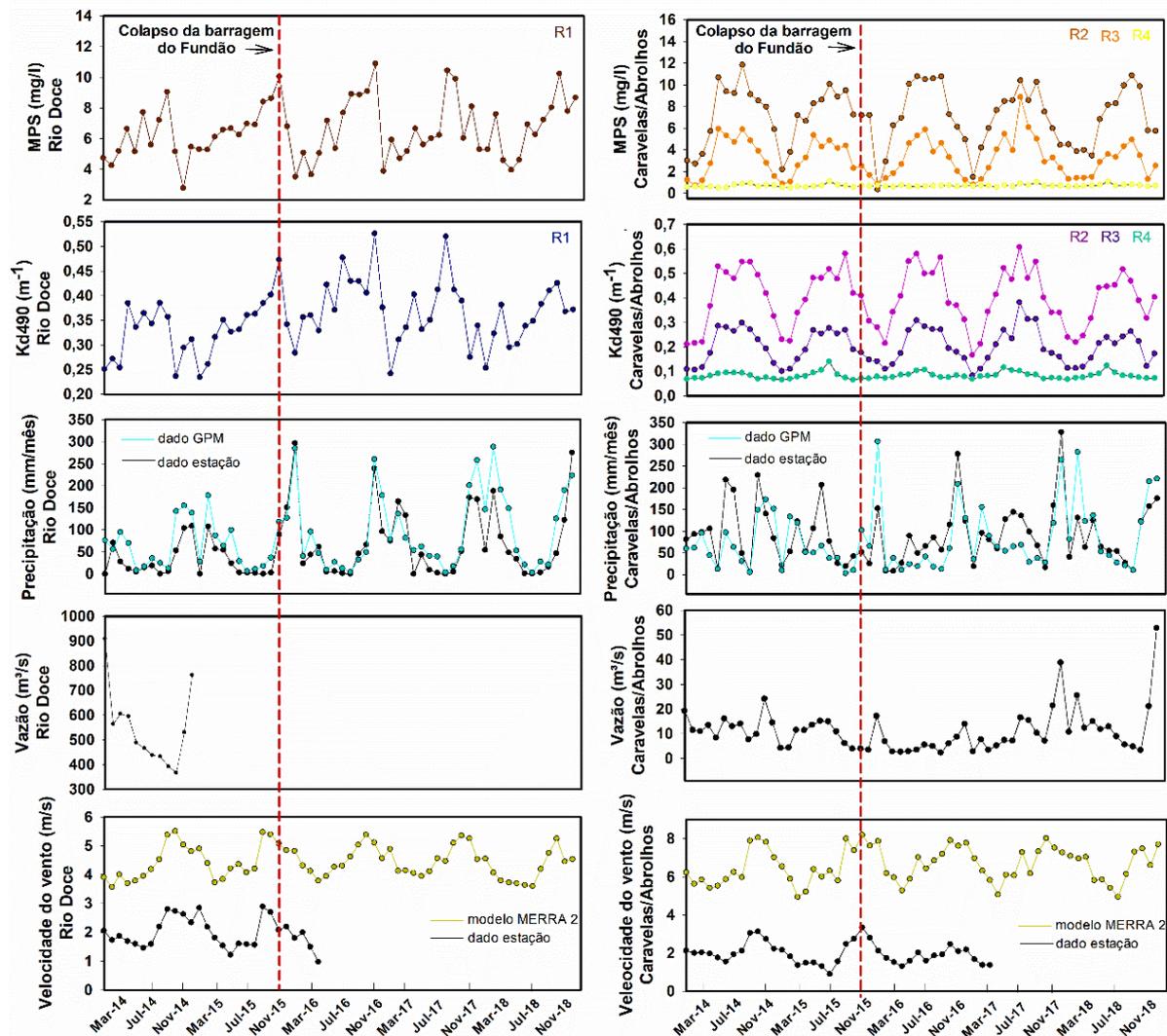
Figura 21. Relação entre a concentração de MPS e a profundidade *Secchi* para a região do PARNA de Abrolhos.



3.2 VARIABILIDADE DOS INDICADORES DA DISPONIBILIDADE DE LUZ NA COLUNA D'ÁGUA (MPS E K_d490)

As séries temporais de MPS, k_d490 , precipitação, vazão e velocidade do vento estão apresentadas na Figura 22. Em geral, o k_d490 varia conforme as concentrações de MPS. Isto indica que o MPS atua eficientemente atenuando a penetração de luz tanto na região da foz do Rio doce, quanto na região de Caravelas/Abrolhos.

Figura 22. Séries temporais de MPS, kd490, precipitação, vazão e velocidade do vento para o período de janeiro de 2014 a dezembro de 2018.



3.2.1 Análise espaço-temporal dos perfis latitudinais e longitudinais dos indicadores da disponibilidade de luz na coluna d'água (MPS e k_d490).

Com o objetivo de avaliar o possível alcance do desastre do rompimento da barragem do Fundão entre a foz do Rio doce e a região de Caravelas/Abrolhos, analisamos os perfis latitudinais de MPS e k_d490 considerando as médias de maio a novembro ao longo do período de 2003 a 2018. A análise foi realizada através de um transecto desde a foz do Rio doce até a Região do parque nacional marinho dos Abrolhos (PARNAM Abrolhos) (Figura 23a e Figura 24a). Para o transecto, foi considerada uma distância de 20 km da costa. Comparamos os perfis dos anos após o desastre com a média histórica para o período anterior ao desastre, ou seja, de 2003 a 2014 (Figura 23b e Figura 24b). Um impacto sobre o MPS e o k_d490 devido ao rompimento da barragem é esperado principalmente nos primeiros anos após o rompimento. Porém, observamos que não houve mudanças ao longo do perfil latitudinal

nos anos de 2015 e 2016, já que os valores de MPS e Kd490 não foram significativamente diferentes da média histórica. A análise do perfil longitudinal entre a foz do Rio Peruípe e a região do PARNAM dos Abrolhos também mostrou que não houve alterações significativas para o MPS e o k_d490 (Figura 25 e Figura 26).

Figura 23. (a) Definição do transecto latitudinal utilizado. (b) Análise dos perfis latitudinais de MPS para os anos de 2015, 2016, 2017 e 2018.

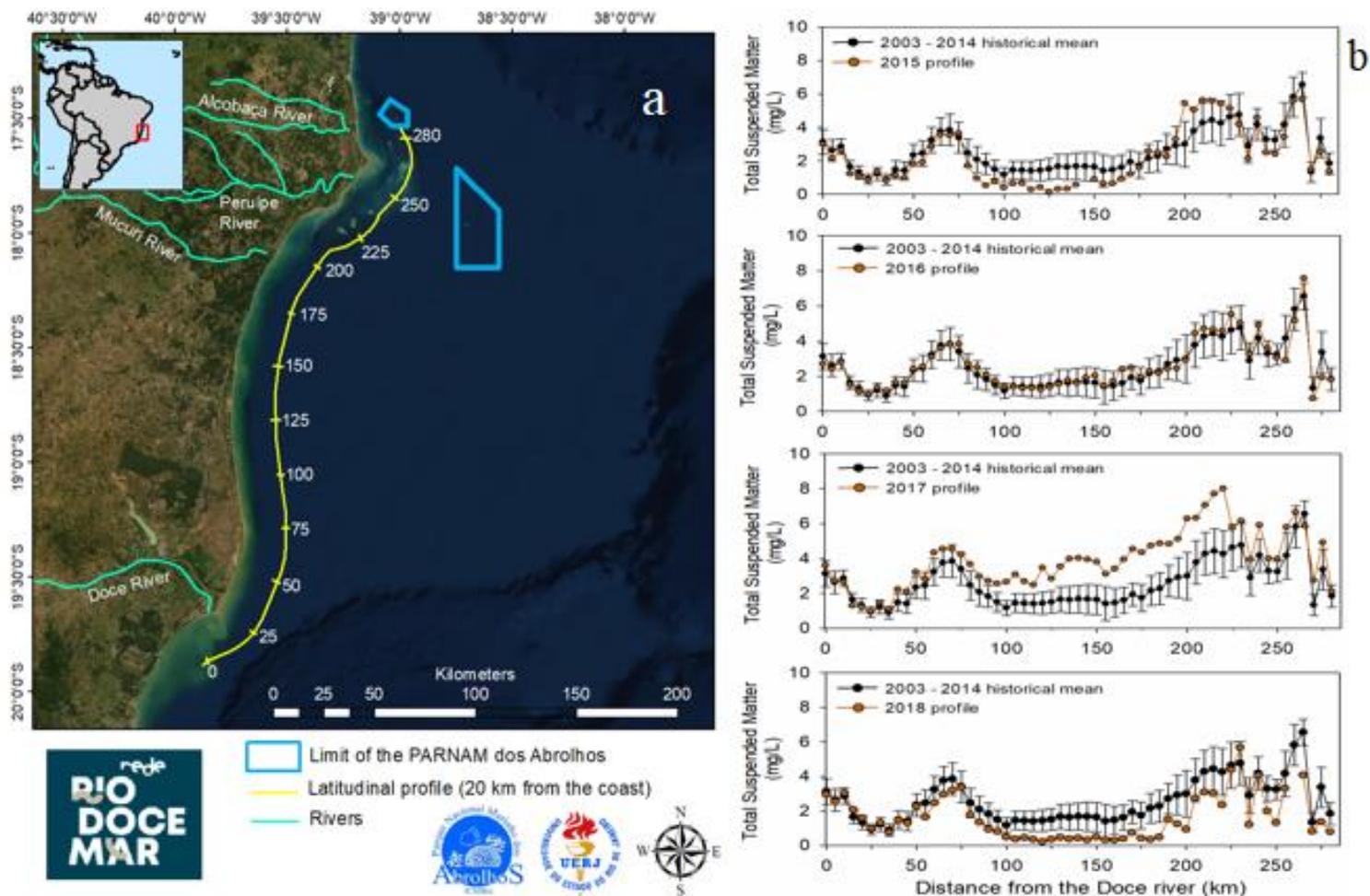


Figura 24. (a) Definição do transecto latitudinal utilizado. (b) Análise dos perfis latitudinais de kd490 para os anos de 2015, 2016, 2017 e 2018.

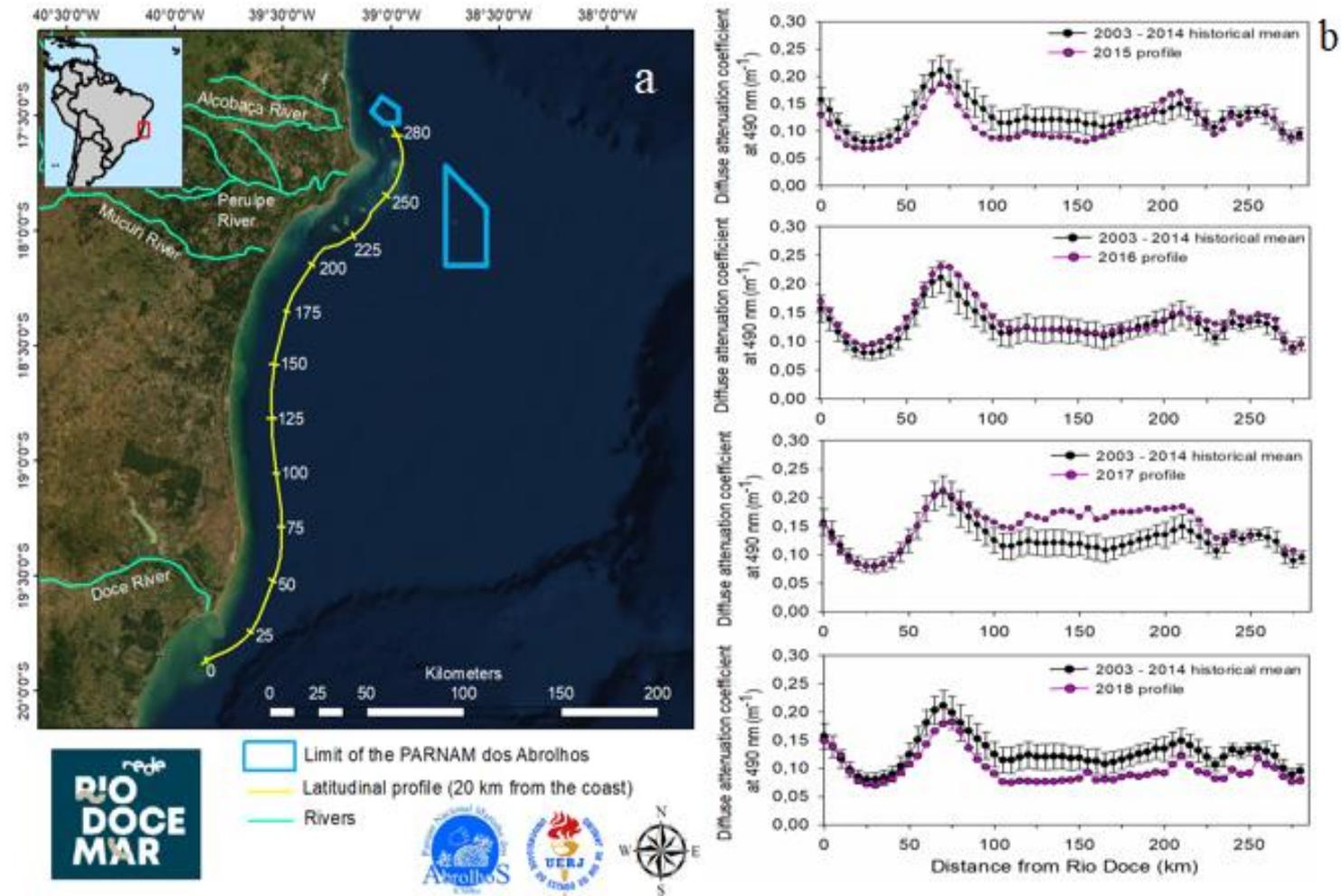


Figura 25.(a) Definição do transecto longitudinal utilizado. (b) Análise dos perfis longitudinais de MPS para os anos de 2015, 2016, 2017 e 2018.

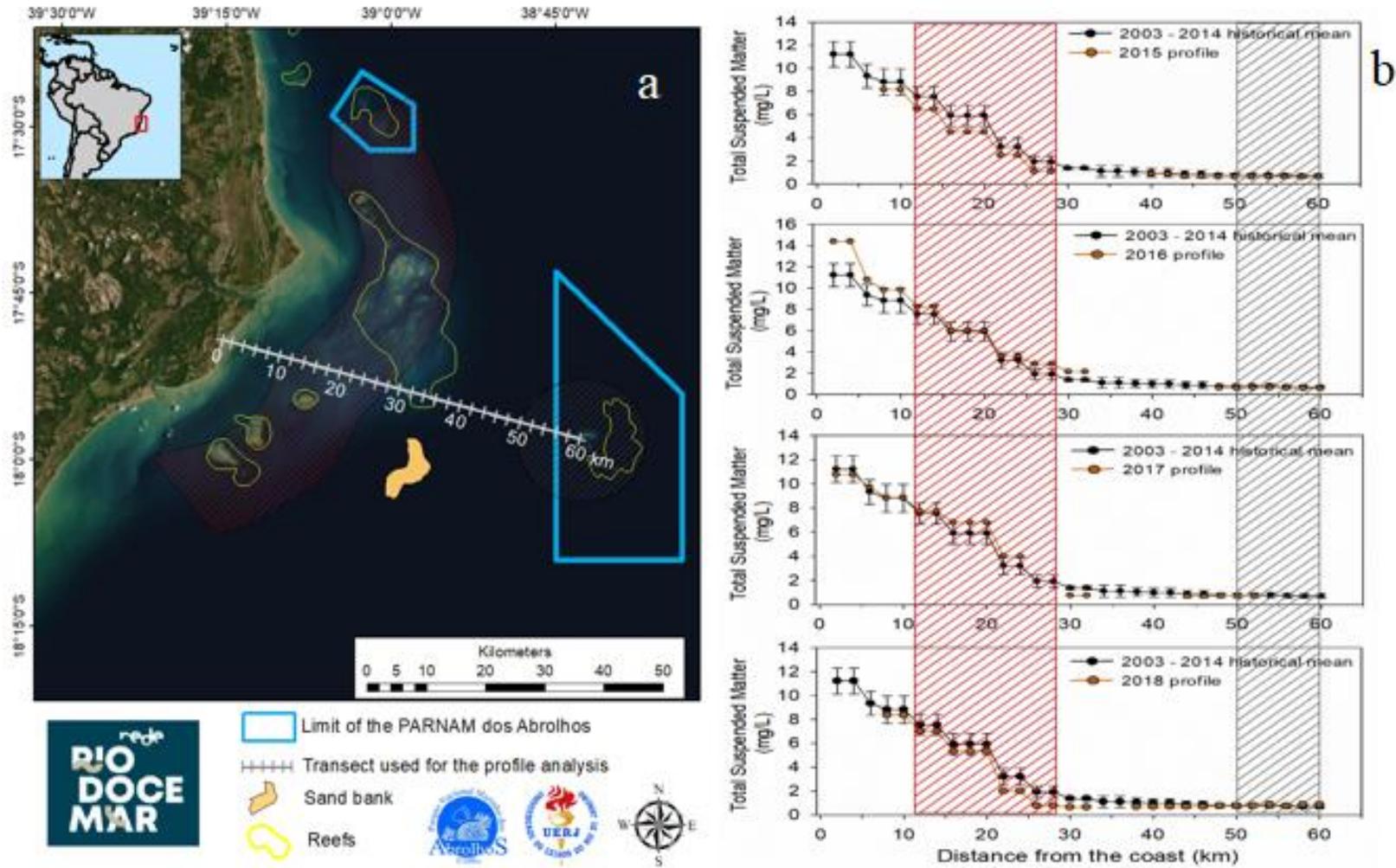
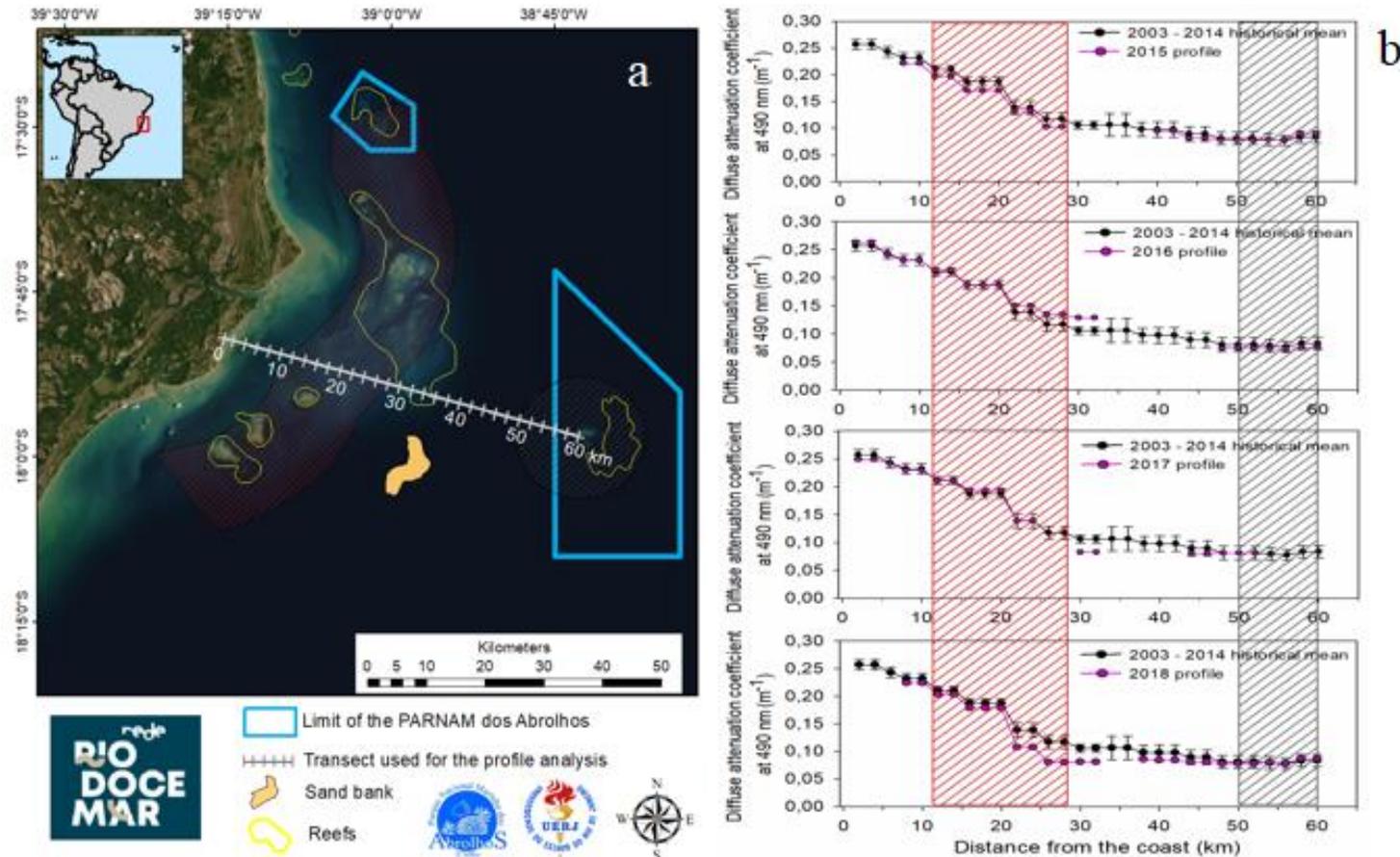


Figura 26. (a) Definição do transecto longitudinal utilizado. (b) Análise dos perfis longitudinais de kd490 para os anos de 2015, 2016, 2017 e 2018.



Nenhuma mudança significativa no padrão da variabilidade das concentrações de MPS e do k_d490 foram observados após o desastre da barragem na região de Caravelas/Abrolhos. Isto indica que o rompimento da barragem do Fundão não alterou a disponibilidade de luz na coluna de água em Abrolhos de acordo com o dado satelital. Apesar disso, estes resultados não descartam a hipótese de que o material sedimentar da barragem tenha chegado à região, apenas indica que a quantidade de material não foi suficiente para alterar as propriedades óticas da coluna d'água.

3.3 LUMINOSIDADE E TEMPERATURA (DADOS DOS SENSORES ACOPLADOS NAS ARAMDILHAS)

Em cada armadilha foi instalado um sensor de luminosidade e temperatura, o qual fornece dados que irão integrar e complementar a discussão dos resultados.

A Figura 27 e a Figura 28 indicam os dados do sensor instalado na armadilha AB_01, em Porto Seguro. O sensor foi instalado no dia 16 de maio de 2019. No dia 4 de julho foi feita a primeira coleta de sedimento na armadilha, e também sua manutenção e limpeza.

Figura 27. Dados de temperatura da água do mar para o sensor instalado na armadilha AB_01. A indicação em azul mostra o momento de troca da armadilha de sedimentos e reinício do sensor no dia 4 de julho de 2019.

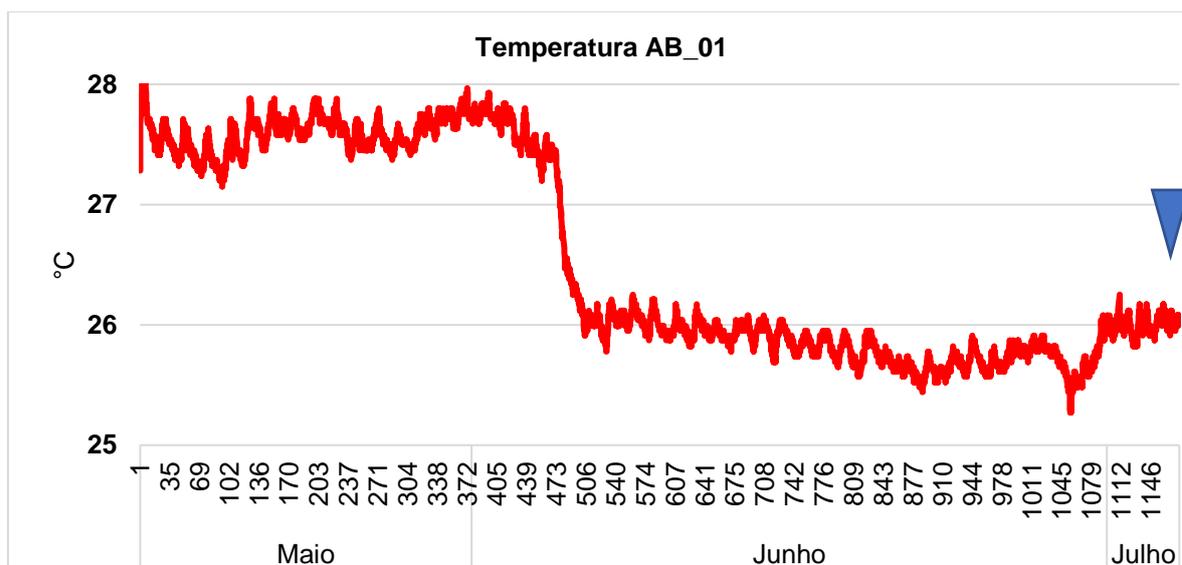
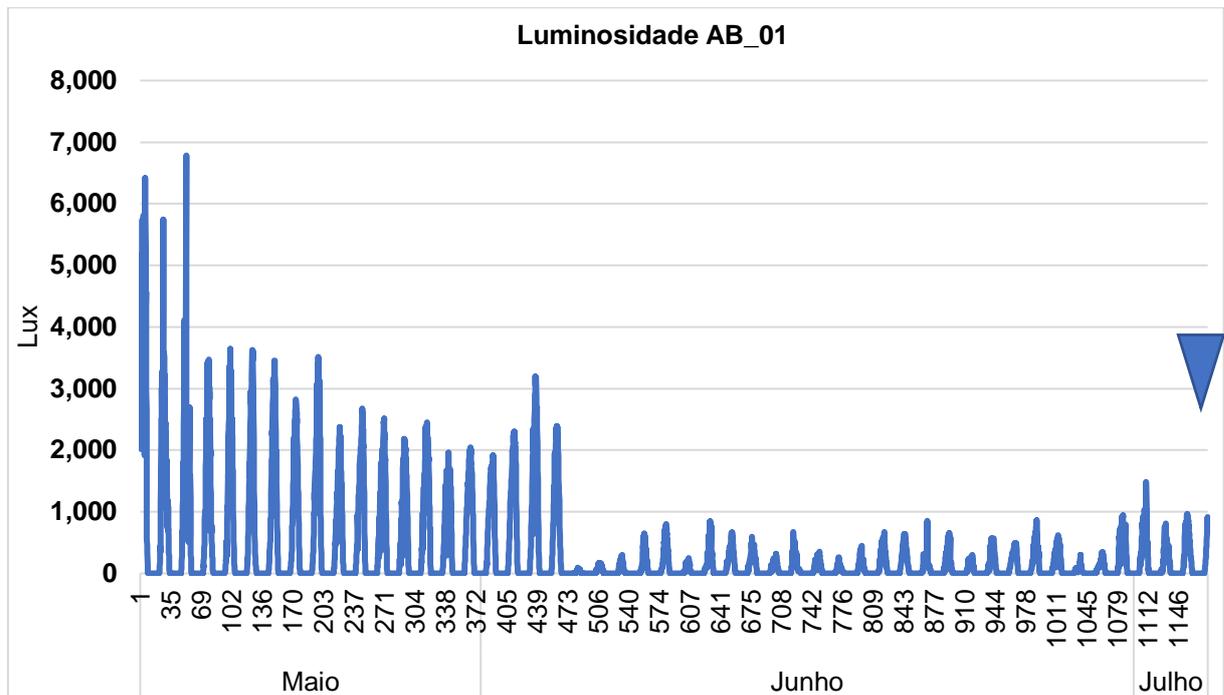


Figura 28. Dados de luminosidade (lux) para a armadilha AB_01. A indicação em azul mostra quando houve a primeira coleta de sedimento da armadilha, a qual ocorreu no dia 4 de julho de 2019.



A Figura 29 e Figura 30 indicam os dados do sensor instalado na armadilha AB_02, em Sebastião Gomes. O sensor foi instalado no dia 13 de maio de 2019. Nos dias 30 de julho à 2 de junho, 16 à 17 de agosto e 25 à 26 setembro de 2019 foram realizadas as coletas, manutenção e limpeza nesta armadilha.

Figura 29. Dados de temperatura para a armadilha AB_02. As indicações mostram quando houve coleta de material e manutenção nas armadilhas.

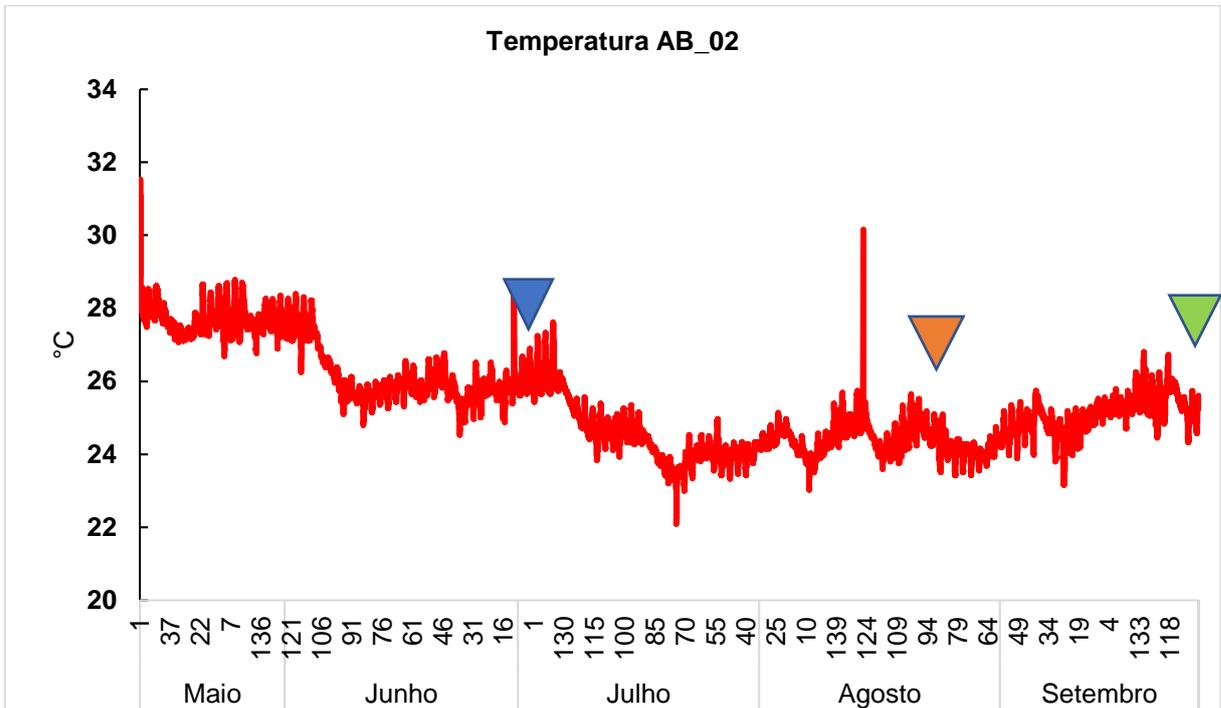
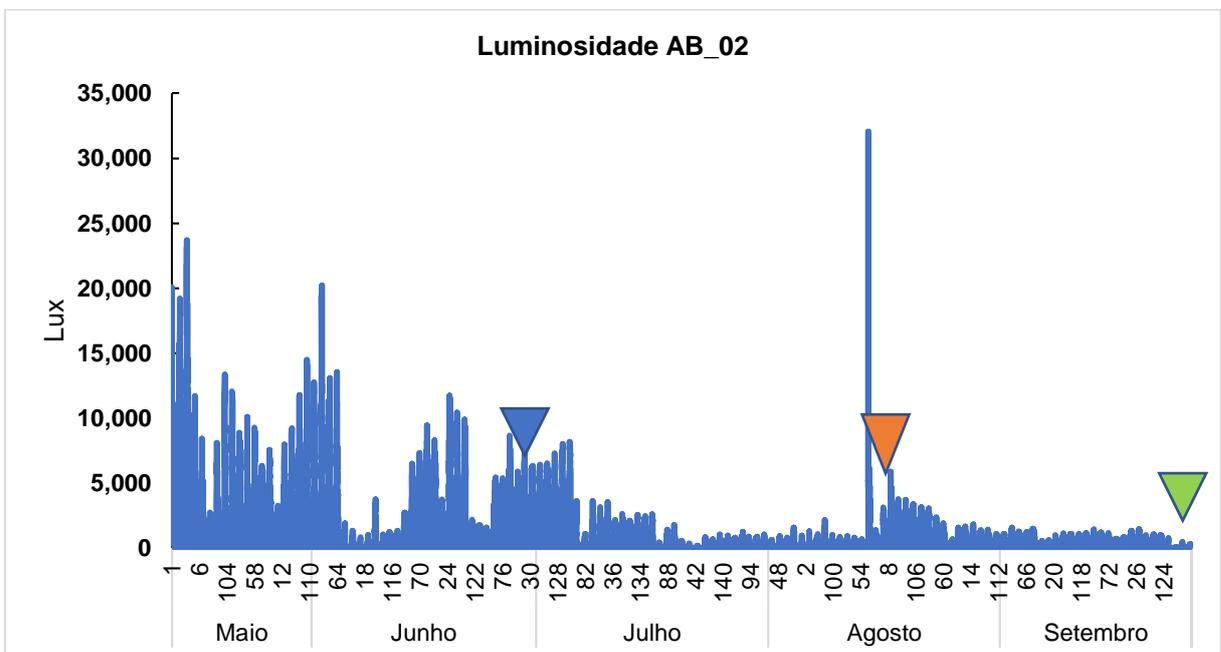


Figura 30. Dados de luminosidade para a armadilha AB_02. As indicações mostram quando houve coleta de material e manutenção nas armadilhas.



A Figura 31 e Figura 32 indicam os dados do sensor instalado na armadilha AB_03, em Polpa Verde. O sensor foi instalado no dia 28 de março de 2019. Nos dias 14 à 15 de maio, 30 de julho à 2 de junho, 16 à 17 de agosto e 25 à 26 setembro de 2019 foram realizadas as coletas, manutenção e limpeza nesta armadilha.

Figura 31. Dados de temperatura para a armadilha AB_03. As indicações mostram quando houve coleta de material e manutenção nas armadilhas.

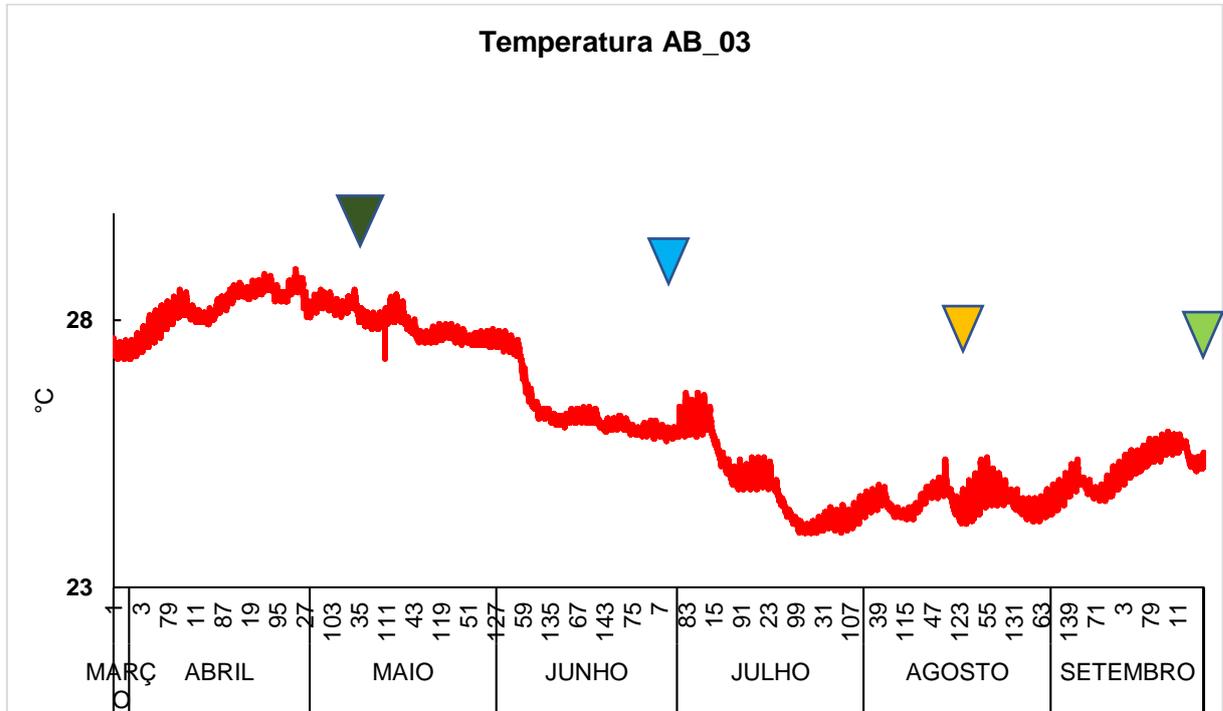
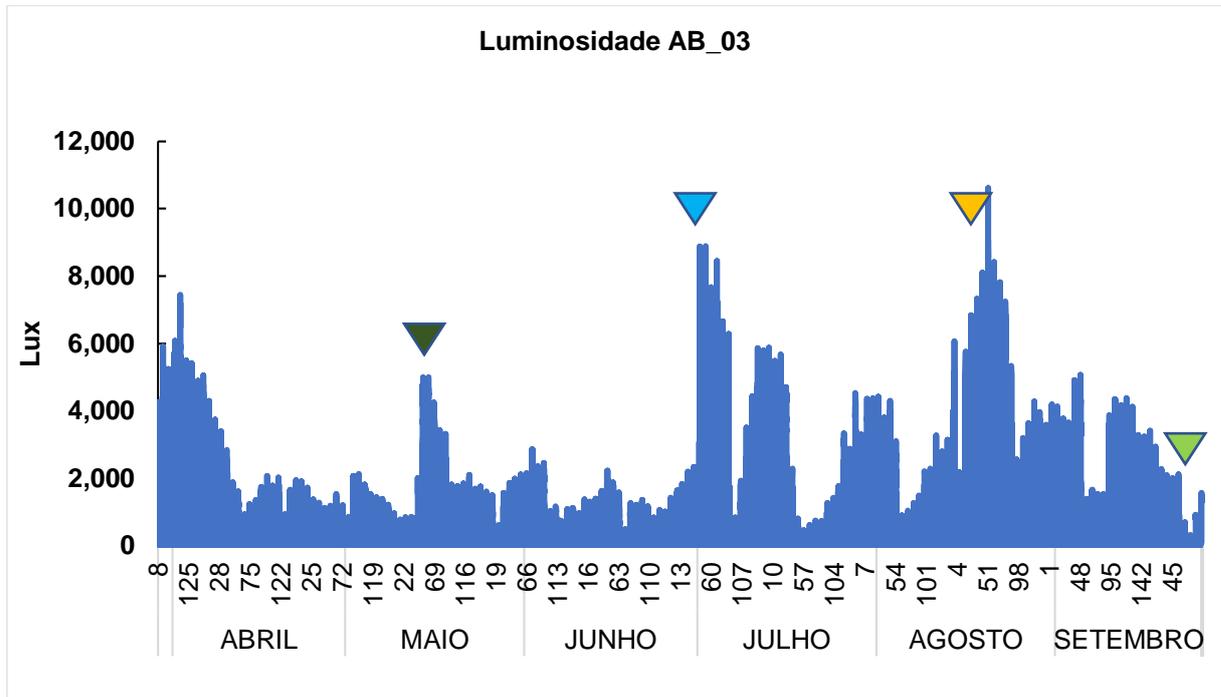


Figura 32. Dados de luminosidade para a armadilha AB_03. As indicações mostram quando houve coleta de material e manutenção nas armadilhas.



A Figura 33 e Figura 34 indicam os dados do sensor instalado na armadilha AB_04, em Chapeirão do Pierre. O sensor foi instalado no dia 28 de março de 2019. Nos dias 14 à 15 de maio, 30 de julho à 2 de junho, 16 à 17 de agosto e 25 à 26 setembro de 2019 foram realizadas as coletas, manutenção e limpeza nesta armadilha.

Figura 33. Dados de temperatura para a armadilha AB_04. As indicações mostram quando houve coleta de material e manutenção nas armadilhas.

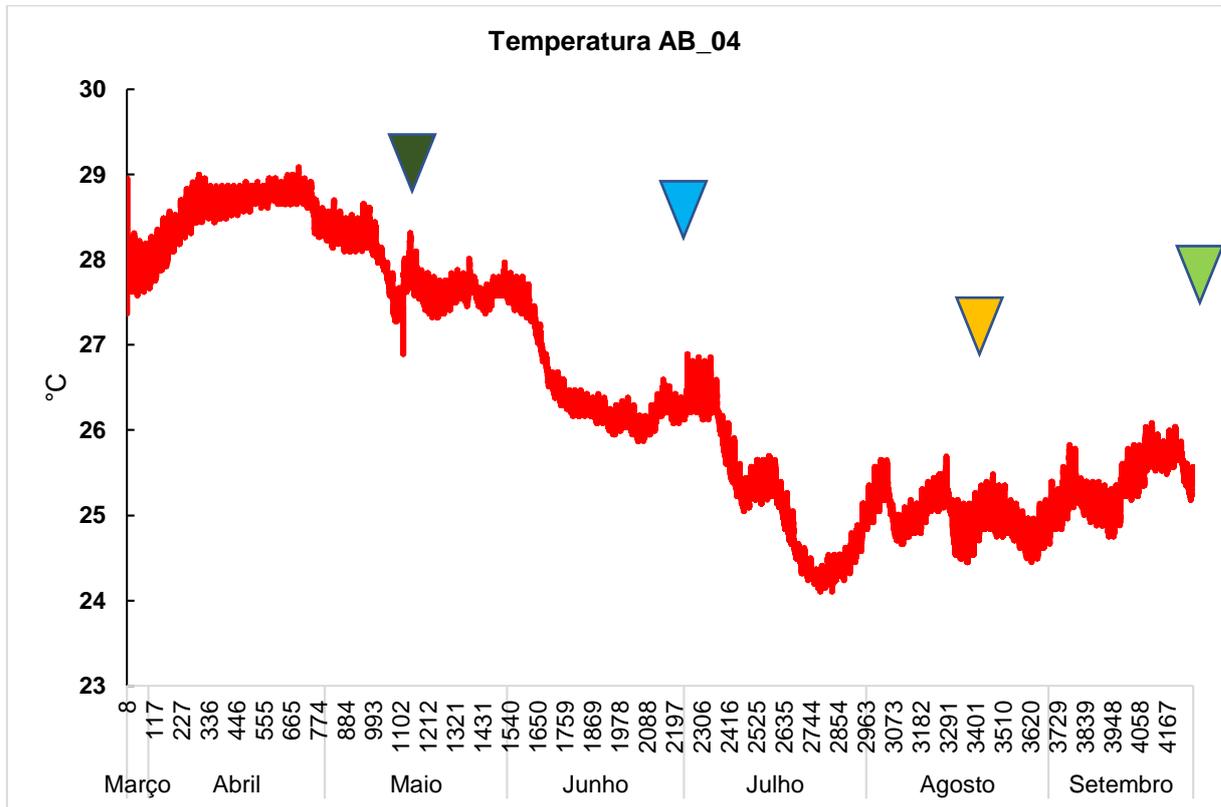
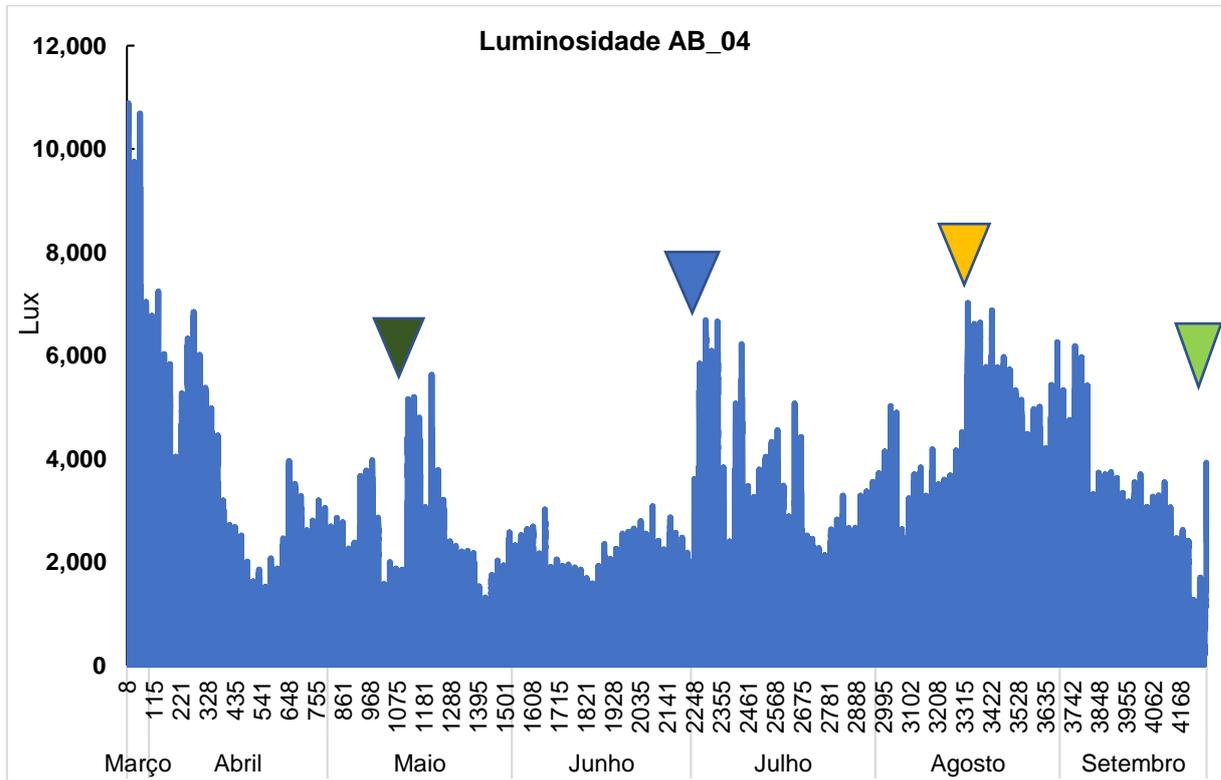


Figura 34. Dados de luminosidade para a armadilha AB_04. As indicações mostram quando houve coleta de material e manutenção nas armadilhas.



A Figura 35 e Figura 36 indicam os dados do sensor instalado na armadilha AB_05, em Chapeirão do Sueste. O sensor foi instalado no dia 28 de março de 2019. Nos dias 14 à 15 de maio, 30 de julho à 2 de junho, 16 à 17 de agosto e 25 à 26 setembro de 2019 foram realizadas as coletas, manutenção e limpeza nesta armadilha.

Figura 35. Dados de temperatura para a armadilha AB_05. As indicações mostram quando houve coleta de material e manutenção nas armadilhas.

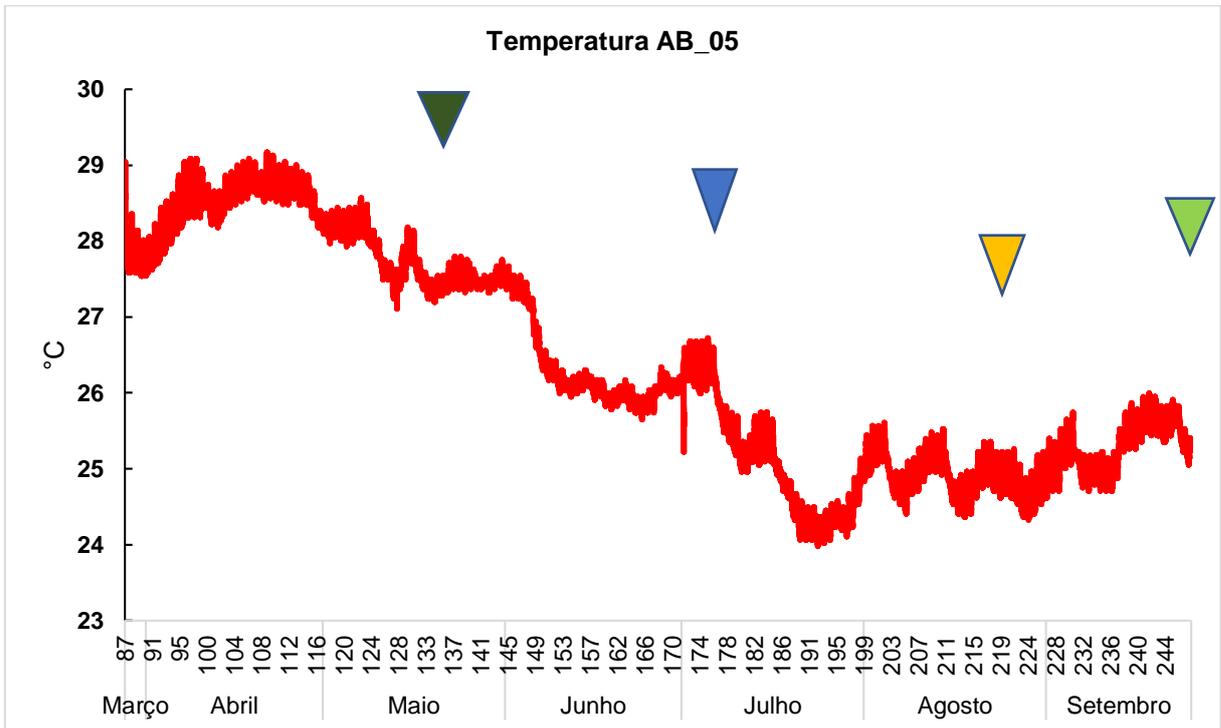
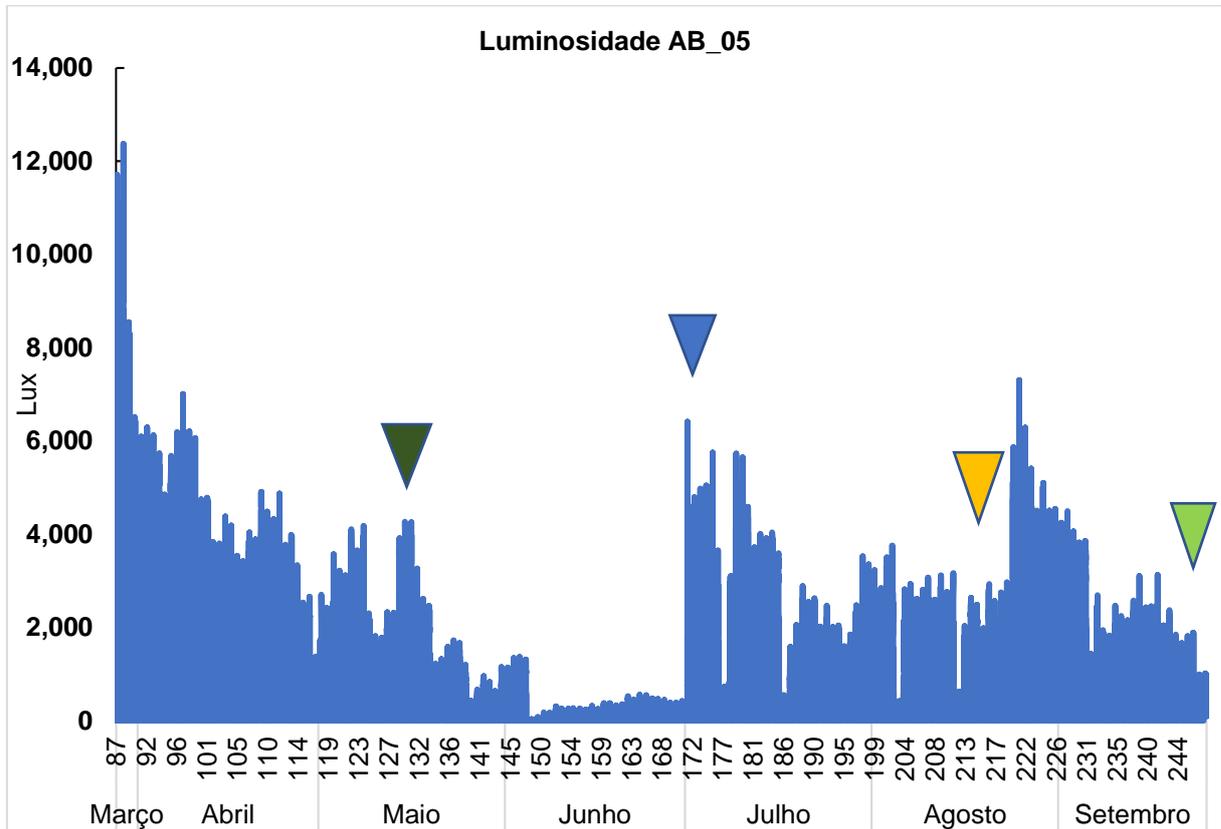


Figura 36. Dados de luminosidade para a armadilha AB_05. As indicações mostram quando houve coleta de material e manutenção nas armadilhas.



A Figura 37 e Figura 38 indicam os dados do sensor instalado na armadilha AB_06, em Chapeirão das Manchas. O sensor foi instalado no dia 28 de março de 2019. Nos dias 14 à 15 de maio, 30 de julho à 2 de junho, 16 à 17 de agosto e 25 à 26 setembro de 2019 foram realizadas as coletas, manutenção e limpeza nesta armadilha.

Figura 37. Dados de temperatura para a armadilha AB_06. As indicações mostram quando houve coleta de material e manutenção nas armadilhas.

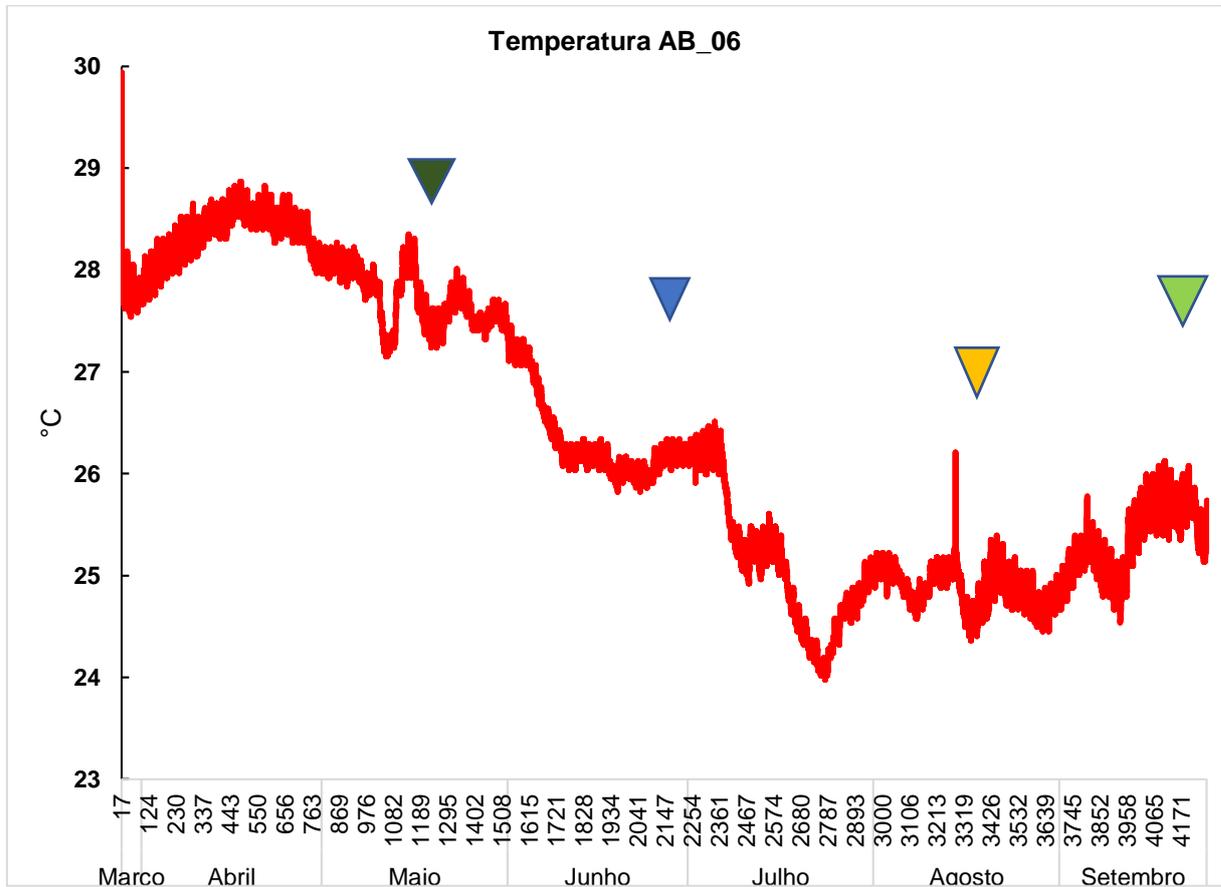
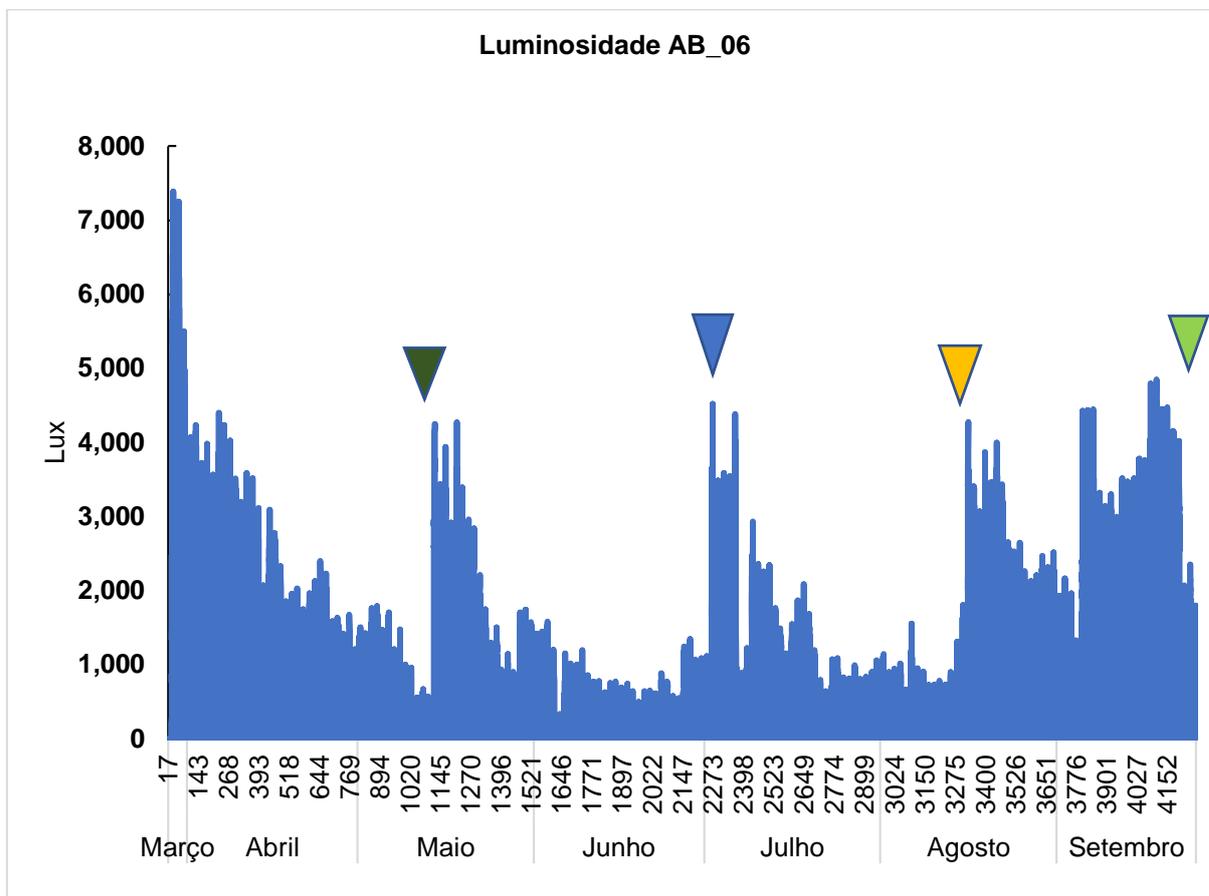


Figura 38. Dados de luminosidade para a armadilha AB_06. As indicações mostram quando houve coleta de material e manutenção nas armadilhas.



3.4 ANÁLISE ISOTÓPICA

Os resultados isotópicos encontram-se relacionados na Tabela 1 abaixo. Como a variação nas razões $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ em materiais crustais é muito pequena, abaixo de 0,01%, a notação ϵNd é comumente utilizada como a expressão da diferença da razão medida na amostra em relação àquela do valor de referência do CHUR (Chondritic Uniform Reservoir), interpretado como representativo do manto primordial da Terra, igual a 0,512638, utilizando-se a expressão $\epsilon\text{Nd} = ((^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} / 0.512638) - 1) \times 10000$.

Tabela 1. Resultados isotópicos.

Amostra	Toponímia	Período de Coleta (2019)	Latitude	Longitude	Sm (ppm)	Nd (ppm)	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	ϵNd	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
IBA	Recife de Fora (PS)		-	-	6,2	34,6	0,1090	0,511927 (7)	-13,9	0,752370 (9)
Ab01-ATV4	Recife de Fora (PS)	26/03 a 17/05	-16,423611	-38,985944	-	-	-	0,511713 (4)	-18,0	0,745058 (10)
Ab03-ATV4	Polpa Verde	27/03 a 13/05	-18,036111	-39,002472	-	-	-	0,511670 (5)	-18,9	0,734756 (5)
Ab04-ATV4	Chapeirão do Pierre	27/03 a 13/05	-17,963667	-38,670806	-	-	-	0,511480 (9)	-22,6	0,722763 (10)
Ab05-ATV4	Sueste	27/03 a 14/05	-17,980972	-38,704500	-	-	-	0,511768 (10)	-17,0	0,727867 (9)
Ab06-ATV4	Mancha	27/03 a 14/05	-17,888278	-38,689361	-	-	-	0,511683 (4)	-18,6	0,711408 (3)
Ab01-ATV5	Recife de Fora (PS)	17/05 a 04/07	-16,423611	-38,985944	-	-	-	0,511703 (9)	-18,2	0,741383 (8)
Ab02-ATV5	Sebastião Gomes	13/05 a 02/07	-17,916861	-39,143750	-	-	-	0,511647 (3)	-19,3	0,733294 (8)
Ab03-ATV5	Polpa Verde	13/05 a 02/07	-18,036111	-39,002472	-	-	-	0,511643 (5)	-19,4	0,726255 (10)
Ab04-ATV5	Chapeirão do Pierre	13/05 a 03/07	-17,963667	-38,670806	-	-	-	0,511537 (9)	-21,5	0,712921 (10)
Ab05-ATV5	Sueste	14/05 a 03/07	-17,980972	-38,704500	-	-	-	0,511696 (7)	-18,4	0,712785 (3)
Ab06-ATV5	Mancha	14/05 a 03/07	-17,888278	-38,689361	-	-	-	0,511706 (8)	-18,2	0,715159 (8)
Ab02-ATV6	Sebastião Gomes	02/07 a 14/08	-17,916861	-39,143750	-	-	-	0,511644 (23)	-19,4	0,738935 (11)
Ab03-ATV6	Polpa Verde	03/07 a 14/08	-18,036111	-39,002472	-	-	-	0,511580 (9)	-20,6	0,737257 (9)
Ab04-ATV6	Chapeirão do Pierre	03/07 a 14/08	-17,963667	-38,670806	-	-	-	0,511680 (8)	-18,7	0,714763 (8)
Ab06-ATV6	Mancha	03/07 a 14/08	-17,888278	-38,689361	-	-	-	0,511698 (7)	-18,3	0,726826 (6)

3.5 MINERALOGIA

As fases mineralógicas presentes nos sedimentos coletados nos *traps* sedimentares foram determinadas por métodos de difração de raios X (DRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV-EDS). A caracterização elementar por MEV+EDS estão na Tabela 2, Tabela 3, Tabela 4, Tabela 5 e Tabela 6 e na Figura 39, Figura 40, Figura 41, Figura 42 e Figura 43.

Tabela 2. Caracterização elementar da Amostra AB03_ATV04 para os campos de análise.

Elemento	Campo 1	Campo 2	Campo 3	Campo 4	Campo 5	Campo 6	Campo 7	Campo 8	Campo 9	Campo 10
C	2,02	3,42	2,38	1,87	0,98	1,8	0,39	0,3	3,07	1,21
O	53,73	56,6	56,48	53,6	47,14	55,1	56,36	56,99	56,24	56,54
Na	1,12	0,93	0,88	2,52	4,11	0,74	0,83	0,98	1,26	2,23
Mg	2,38	1,21	2,47	1,42	1,78	1,94	1,72	2,63	2,41	1,69
Al	4,34	3,39	3,94	3,13	3,48	3,08	3,46	4,93	4,78	2,62
Si	6,15	14,97	5,69	6,42	8,67	4,19	16,59	6,61	5,84	3,55
S	0,15	0,22	0	0,17	2,1	0,27	0,19	0,35	0,29	0,6
Cl	2,37	1,07	2,07	3,58	7,34	1,65	1,61	1,97	2,66	2,8
K	0,36	1,69	0,3	0,73	0,42	0,32	0,3	0,42	0,51	0,25
Ca	22,7	12,96	22,01	24,11	18,39	26,32	16,28	21,17	18,66	25,32
Fe	4,25	1,87	-	2,44	5,4	4,16	2,1	3	4,29	-
Ti	0,21	-	0,23	-	0,18	-	0,16	0,22	-	1,98
Cr	0,23	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pd	0	1,66	-	-	-	-	-	-	-	-

Figura 39. Gráfico para os resultados da caracterização elemental da amostra AB03_ATV4.

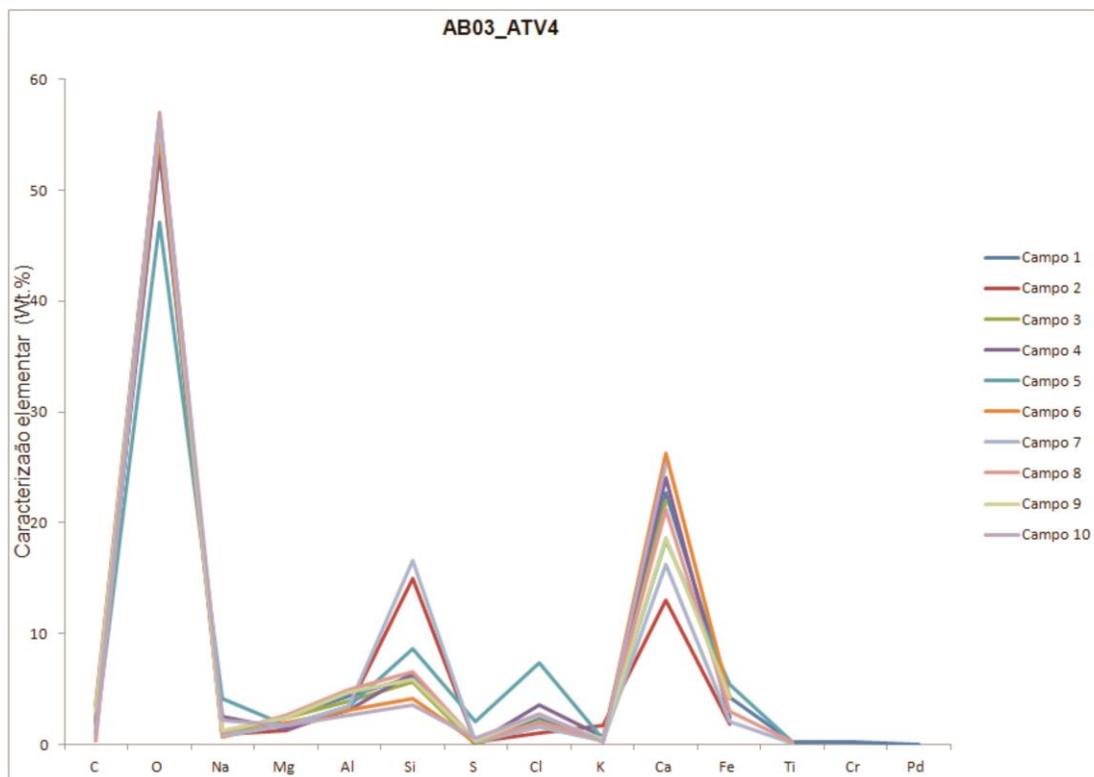


Tabela 3. Caracterização elemental da Amostra AB06_ATV06 para os campos de análise.

Elemento	Campo 1	Campo 2	Campo 3	Campo 4	Campo 5	Campo 6	Campo 7	Campo 8	Campo 9	Campo 10
C	0,26	0,16	1,09	0,15	2,97	0,71	0,27	0,52	0,82	2,29
O	57,33	38,76	54,06	55,03	57,52	54,5	52,23	56,41	53,9	60,86
Na	0,95	0,6	2,86	0,62	0,58	0,71	0,7	0,73	1,74	0,54
Mg	0,57	1,53	2,75	2,86	2,33	3	1,05	1,8	1,61	1,57
Al	0,49	0,81	1,49	1,11	1,8	1	0,91	1,37	1,41	0,8
Si	0,46	0,62	1,59	2,78	2,5	1,09	1,59	3,23	1,84	0,95
Cl	0,61	2,93	3,24	0,65	1,25	0,7	0,66	0,77	2,09	0,52
S	0,13	-	0,33	0,27	0,39	0,37	0,21	0,16	0,24	-
Ca	38,38	53,76	30,51	34,57	27,92	36,09	40,78	33,27	34,09	32,47
K	0,09	-	0,13	0,13	0,22	-	-	0,12	0,14	-
Fe	-	0,83	0,58	0,53	0,76	0,25	0,39	0,53	0,94	-
Nb	0,75	-	1,26	1,31	1,76	1,58	1,21	1,09	1,17	-
Pd	-	-	0,11	-	-	-	-	-	-	-

Figura 40. Gráfico para os resultados da caracterização elemental da amostra AB06_ATV6.

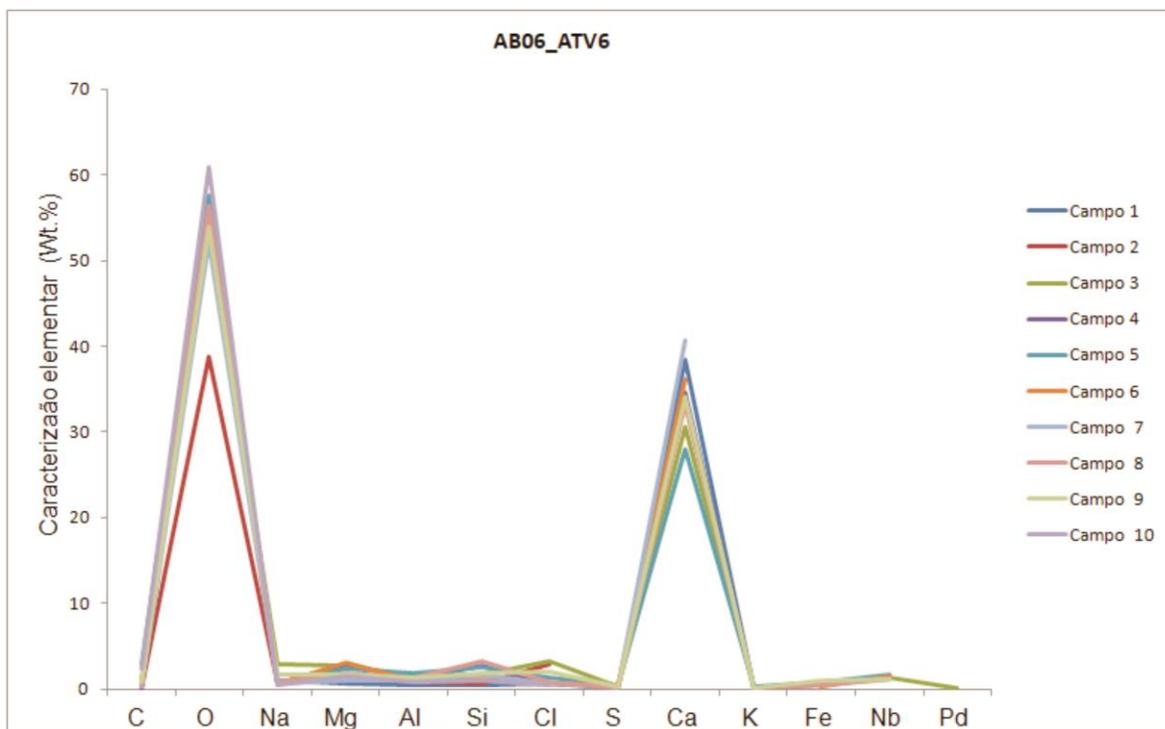


Tabela 4. Caracterização elemental da Amostra AB03_ATV06 para os campos de análise.

Elem ento	Camp o 1	Camp o 2	Camp o 3	Camp o 4	Camp o 5	Camp o 6	Camp o 7	Camp o 8	Camp o 9	Campo 10	Campo 11
C	3,12	0,68	0,35	57,01	0,77	0,79	0,8	1,52	0,74	1,36	0,44
O	62,89	56,09	58,26	1,74	55,97	56,54	57,25	57,35	56,84	59,96	55,56
Na	0,42	2,15	0,96	2,57	1,21	1,17	1,04	1,82	2,1	0,9	3,1
Mg	1,84	2,35	2,19	6,06	2,03	1,58	2,1	2,49	2,55	1,56	2,41
Al	3,59	4,28	5,14	7,96	5,02	6,17	4,86	4,2	4,93	3,57	4,8
Si	4,75	5,74	7,23		6,19	6,69	6,94	5,99	6,79	4,48	6,37
Cl	0,91	3,11	1,5	2,53	2,12	1,48	1,76	2,2	3,09	1,13	4,4
S	-	0,19	0,36	0,09	-	-	-	0,16	-	-	0,12
K	0,17	0,45	0,38	0,36	0,31	0,3	0,48	0,3	0,31	0,22	0,36
Ca	20,87	23,27	21,92	19,7	23,67	23,94	22,85	20,54	21,11	25,98	20,68
Fe	1,45	1,46	1,56	1,71	1,54	1,34	1,92	1,57	1,54	0,85	1,76
Ti	-	0,23	0,16	0,27	0,19	-	-	-	-	-	-

Figura 41. Gráfico para os resultados da caracterização elemental da amostra AB03_ATV6.

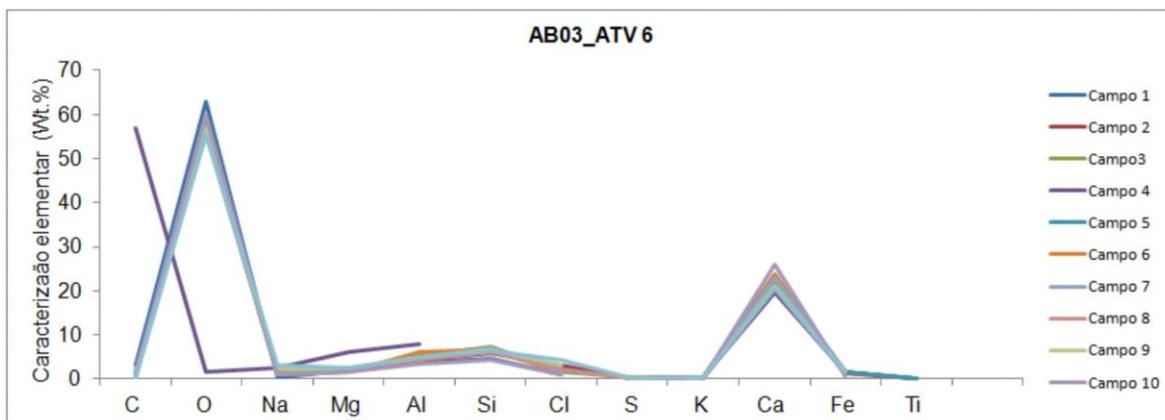


Tabela 5. Caracterização elemental da Amostra AB06_ATV04 para os campos de análise.

Elem ento	Camp o 1	Camp o 2	Camp o 3	Camp o 4	Camp o 5	Camp o 6	Camp o 7	Camp o 8	Camp o 9	Camp o 10	Camp o 11	Camp o 12
C	0,91	0,55	1,25	0,49	1,48	1,24	Wt, %	3,23	0,93	0,78	3,11	1,79
O	55,91	62,88	54,75	50,99	53,42	49,05	2,93	51,97	57,42	56,3	55,12	39,07
Na	0,68	1,76	0,66	0,46	1,03	0,85	53,54	3,22	0,92	1,99	4,68	12,91
Mg	2,72	7,22	3,03	3,1	2,17	1,52	2,29	3,07	3,33	2	1,98	2,21
Al	1,67	5,05	1,38	1,13	1,59	1,49	1,49	1,76	1,04	1,63	1,5	1,69
Si	2,12	6,59	1,72	1,28	3,49	5,68	2,11	2,5	1,28	2,73	2,51	1,54
S	0,35	0,9	2,88	8,24	4,95	8,13	0,5	0,8	0,23	0,41	0,3	0,33
Cl	2,02	5,96	1,42	0,85	2,64	2,04	3,39	5,42	1,4	3,13	5,99	16,67
K	0,31	5,56	0,17	0,15	0,38	0,27	0,28	0,42	-	0,3	0,34	0,3
Ca	31,77	-	30,58	32,2	26,63	27,83	27,45	20,86	32,39	26,6	23,29	21,93
Fe	1,53	3,52	1,55	1,11	1,49	1,9	3,06	5,82	1,05	2,36	1,17	1,15
Cr	-	-	-	-	-	-	0,38	0,92	100	0,44	-	0,4
Nb	-	-	0,6	-	0,75	-	-	-	-	1,33	-	-

Figura 42. Gráfico para os resultados da caracterização elemental da amostra AB06_ATV4.

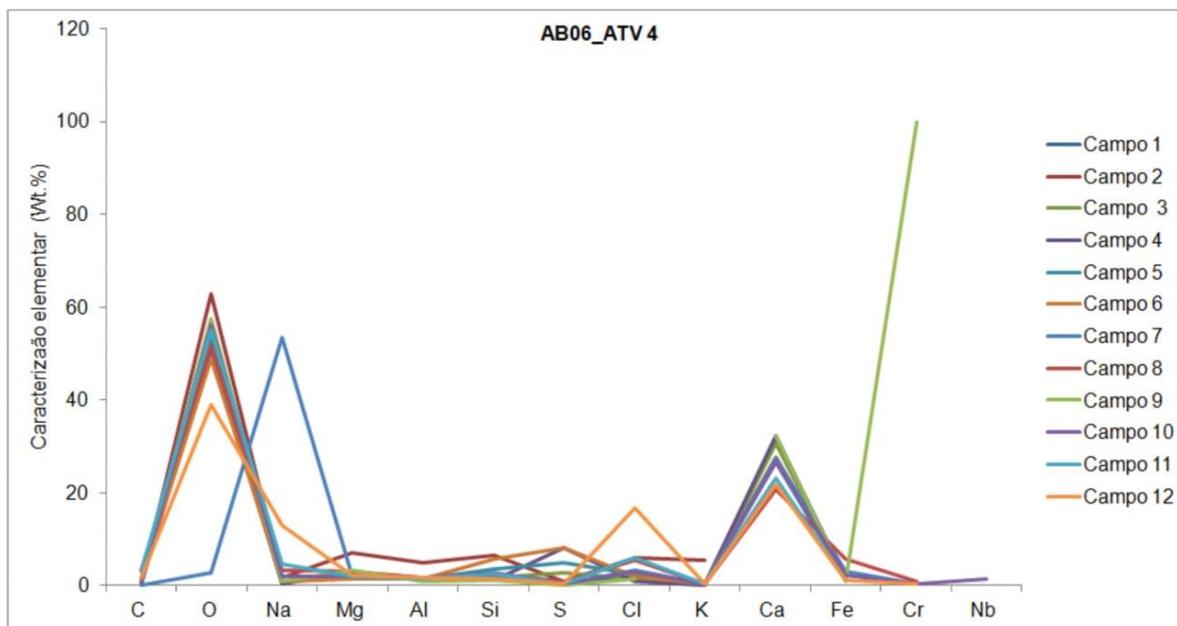
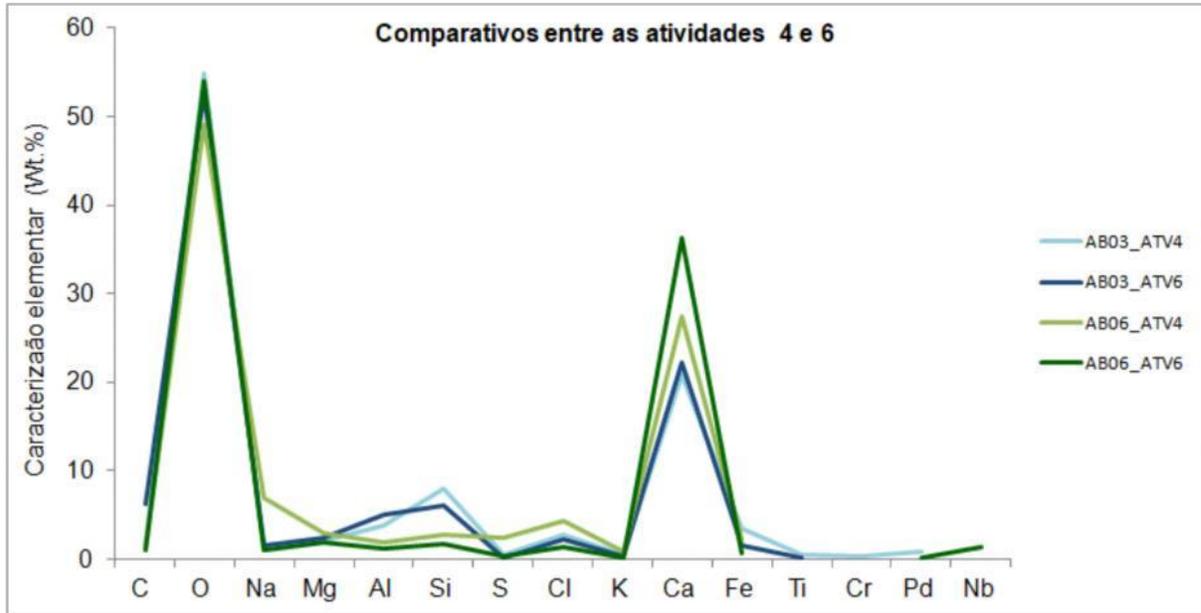


Tabela 6. Comparação entre os resultados do MEV-EDS das atividades 4 e 6

	AB03_ATV4	AB03_ATV6	AB06_ATV4	AB06_ATV6
C	1,74	6,14	1,43	0,92
O	54,88	52,59	49,15	54,06
Na	1,56	1,59	6,89	1,00
Mg	1,97	2,47	2,89	1,91
Al	3,72	4,96	1,79	1,12
Si	7,87	6,12	2,80	1,67
S	0,43	0,18	2,34	0,26
Cl	2,71	2,20	4,24	1,34
K	0,53	0,33	0,77	0,14
Ca	20,79	22,23	27,41	36,18
Fe	3,44	1,52	2,14	0,60
Ti	0,50	0,21	-	-
Cr	0,23	-	20,43	-
Pd	0,83	-	-	0,11
Nb	-	-	0,89	1,27

Figura 43. Resultados médios do MEV-EDS para comparação entre as Atividades 4 e 6 referentes aos pontos de coleta AB03 e AB06.



A Tabela 7 apresenta as fases mineralógicas detectadas e quantificadas por DRX.

Tabela 7. Fases mineralógicas detectadas e quantificadas por DRX, pelo método de Rietveld, nas amostras de *traps* sedimentares de Abrolhos e Recife de Fora. Legenda: (-) fases minerais ausentes.

Amostra	Coleta	Muscovita	Caulinita	Gibbsita	Quartzo	Halita	Calcita	Calcita (Mg)	Aragonita	Bassanita + gipso	(Ca,F) Apatita	Lepidocrocita
Ab-01	mai/19	8,5	32,8	1,7	1,2	23,2	2,2	18,4	7,2	4,9	-	-
Ab-01	jul/19	8,9	36,6	1,9	1,4	10,7	2,5	24,8	11,4	1,8	-	-
Ab-02	jul/19	6,5	37,7	2,2	2,1	7,7	3,2	24,5	13,8	1	0,4	-
Ab-02	ago/19	6	31,9	2,2	2,1	6,6	2,7	29,9	17,2	1	0,3	-
Ab-03	mai/19	3,1	18,3	1,7	0,9	9,9	5,6	35,3	22,7	1,4	-	1,2
Ab-03	jul/19	3,6	17	2	0,9	5,4	6,4	38,4	25,6	0,4	0,2	-
Ab-03	ago/19	3,1	17,1	2,1	0,9	4,8	6,4	39,1	25,8	0,5	0,3	-
Ab-04	mai/19	-	4,6	-	0,7	6,1	5,8	47,7	33,8	0,8	0,6	-
Ab-04	jul/19	-	4,1	-	0,7	3,7	6,1	49,6	35,2	0,3	0,3	-
Ab-04	ago/19	-	4,1	-	0,9	3,2	6,2	49,7	35,5	0,4	-	-
Ab-05	mai/19	-	6,3	0,9	0,6	10,2	5,9	44,8	28,8	1	0,4	1,1
Ab-05	jul/19	-	4,7	0,8	0,7	6	5,9	49,1	32,1	0,6	0,2	-
Ab-06	mai/19	-	4,4	-	1	7,1	6,1	47,9	32,4	0,8	0,3	-
Ab-06	jul/19	-	4,2	-	1	3,5	6	50,6	33,9	0,3	0,5	-
Ab-06	ago/19	-	3	-	1,5	2,2	5,9	52,3	34,9	0,3	0,1	-

Os resultados para o traps Ab01 (Figura 44), localizado em Recife de Fora, para o Ab02 (Figura 45 e Ab03 (Figura 46), localizados em Sebastião Gomes e Polpa Verde respectivamente, apresentaram maior variedade e quantidade de fases terrígenas (Tabela 7). Estão presentes na associação mineralógica muscovita, caulinita, gibbsita e quartzo. Estes sedimentos então posicionados mais próximos ao continente onde se localizam os estuários dos rios Caravelas (no caso de Ab02 e Ab03) e Bunharém (Ab01).

Os *traps* posicionados mais próximos às ilhas de Abrolhos apresentaram uma associação somente de caulinita e quartzo, como no caso do ponto Ab04 (Figura 47), localizado no Chapeirão do Pierre, e do ponto Ab06 (fig. 8), localizado no Chapeirão das Manchas. O ponto Ab05 (fig. 7), Chapeirão de Sueste, apresenta gibbsita associada a caulinita e quartzo

A muscovita é um filossilicato primário ou secundário comum em rochas metamórficas de protólito sedimentar, granitos, leuco-granitos e pegmatitos (litotipos comuns em toda a costa do Espírito Santo e sul da Bahia). Ao contrário, a gibbsita e a caulinita são argilominerais frequentemente associados a mantos de intemperismo desenvolvidos em climas úmidos. Quartzo, por sua vez, é um mineral resistado, ou seja, com nenhuma capacidade de alteração nos processos de intemperismo químico, e presente em uma grande variedade de litotipos.

Duas fases mineralógicas foram determinadas pelas análises em DRX e requerem estudos mais específicos. A primeira, a cálcio-flúor apatita, é um fosfato presente em fragmentos de esqueletos de peixes e pode carrear elementos terras raras. Estas fases fosfáticas foram identificadas em todas as amostras coletadas menos em Polpa Verde e Chapeirão do Pierre nos meses de maio e agosto respectivamente. O problema relevante associado à presença desses bioclastos fosfáticos é o efeito “pepita” causado principalmente por amostragem, ou seja, quando pequenas quantidades de material podem causar mudanças significativas das medidas geoquímicas.

Estudos de microscopia eletrônica de varredura podem contribuir com a identificação destes minerais. A segunda fase é lepidocrocita (ou hidróxi-hematita), a qual representa óxi-hidróxidos de ferro de alteração. Este mineral foi identificado nos traps de Polpa Verde (maio/19) e Sueste (julho/19) e provavelmente não está associada a nenhuma fase detrítica.

Figura 44. Difratomogramas interpretados da amostra Ab01 (Recife de Fora) coletada nos meses de maio (ATV 4) e julho (ATV 5).

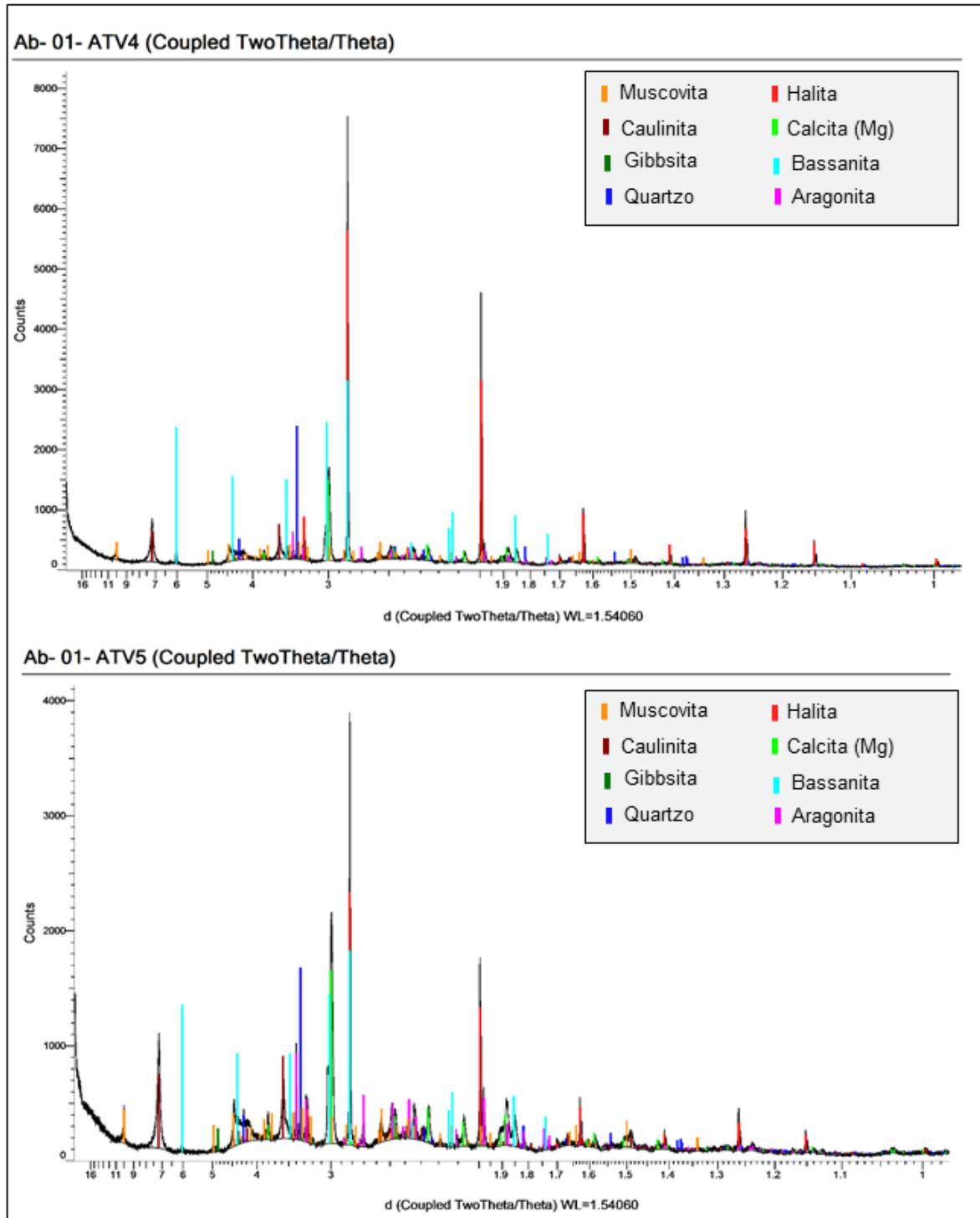


Figura 45. Difratomogramas interpretados da amostra Ab02 (Sebastião Gomes) coletada nos meses de julho (ATV 5) e agosto (ATV 6).

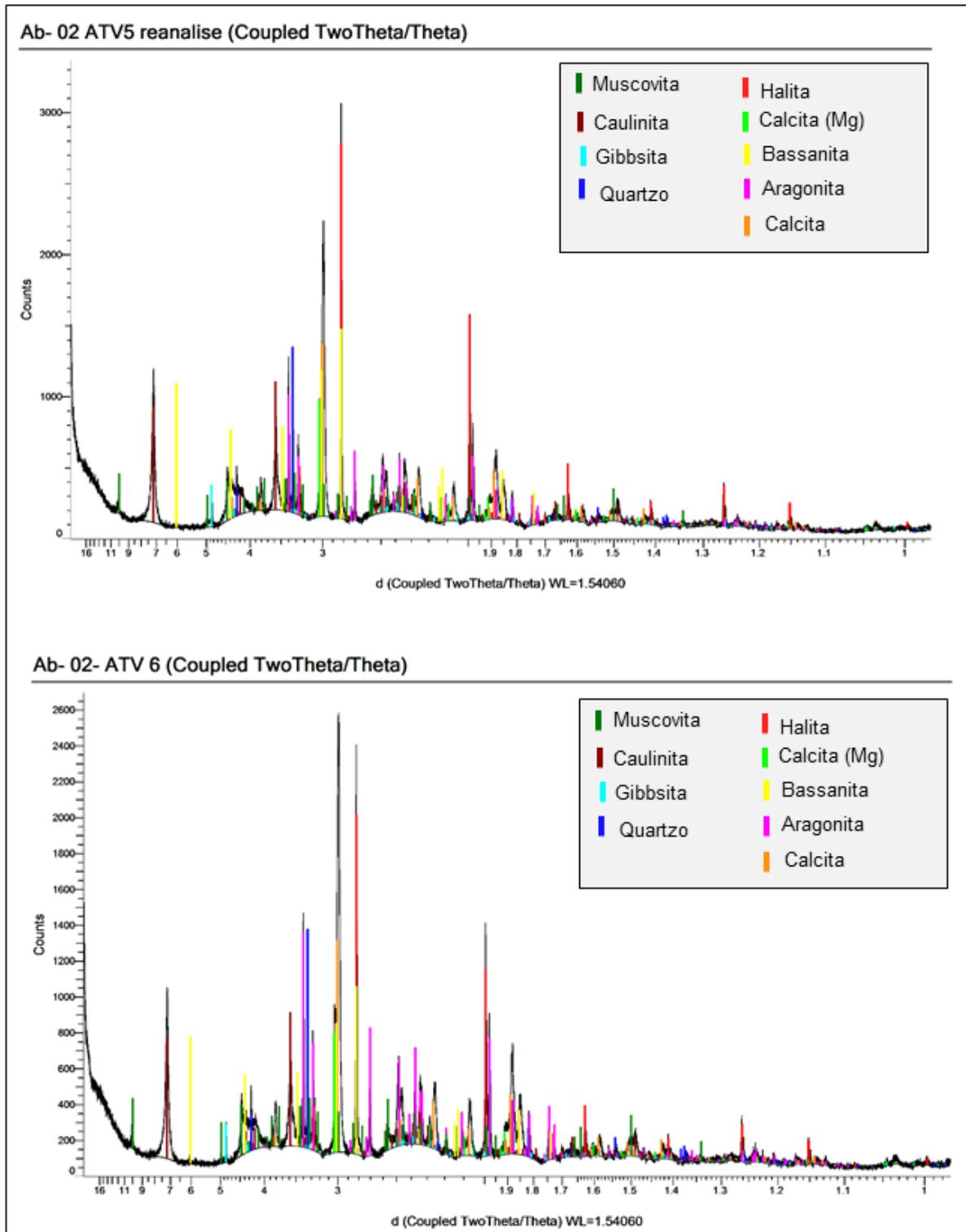


Figura 46. Difractogramas interpretados da amostra Ab03 (Polpa Verde) coletada nos meses de maio (ATV 4), julho (ATV 5) e agosto (ATV 6).

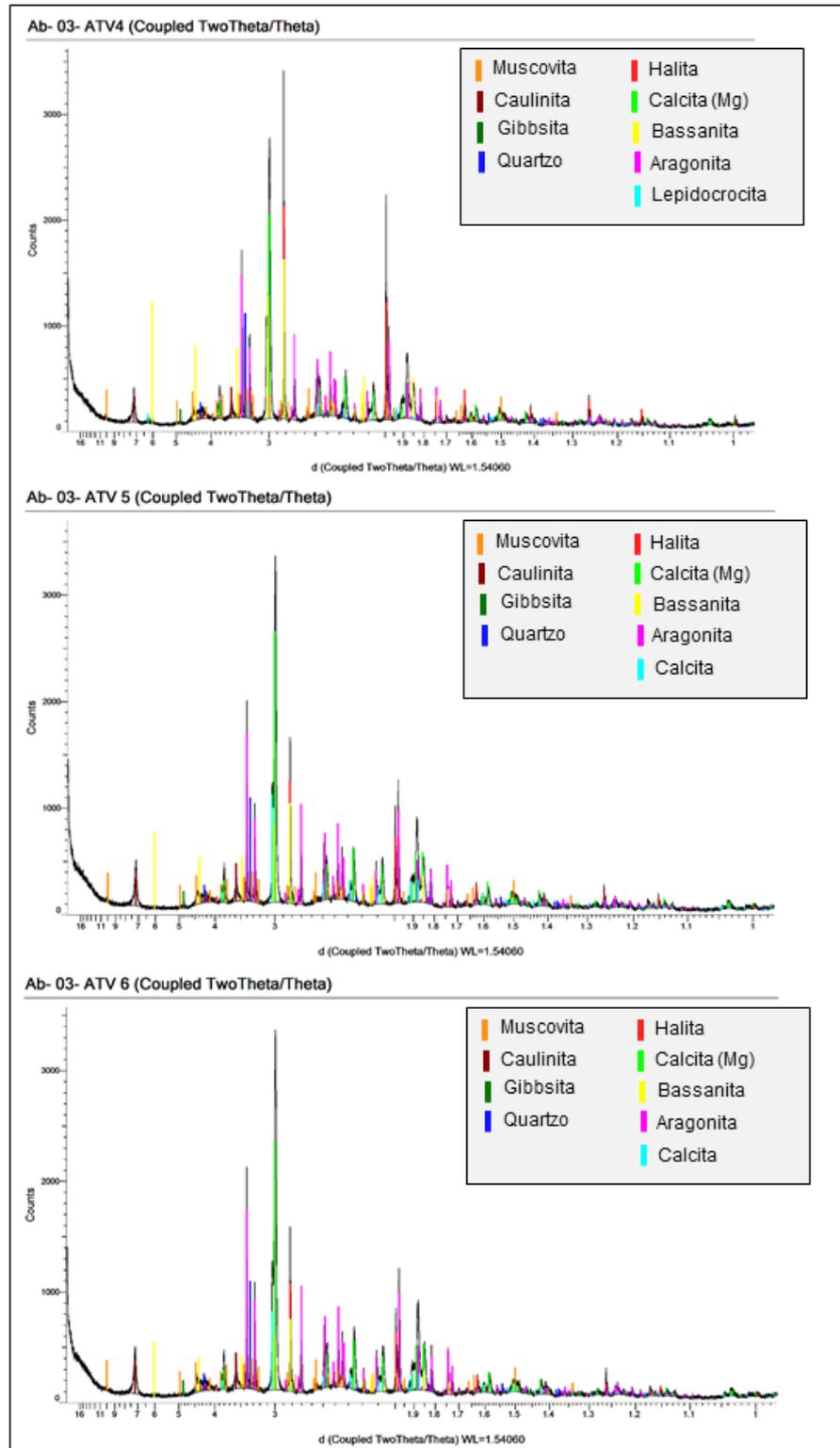


Figura 47. Difratomogramas interpretados da amostra Ab04 (Chapeirão do Pierre) coletada nos meses de maio (ATV 4), julho (ATV 5) e agosto (ATV 6).

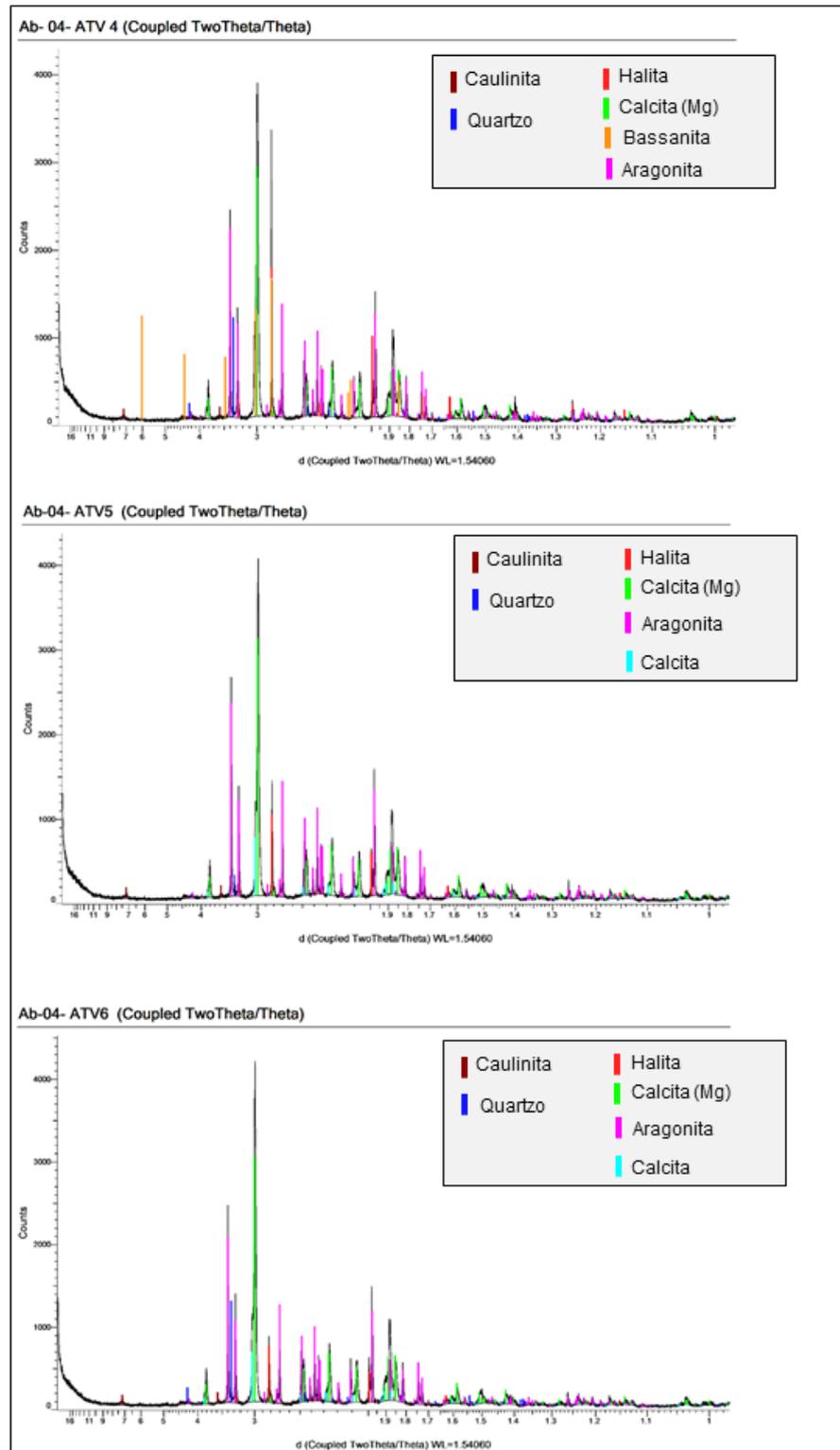


Figura 48. Difratomogramas interpretados da amostra Ab05 (Chapeirão de Sueste) coletada nos meses de maio (ATV 4) e julho (ATV 5).

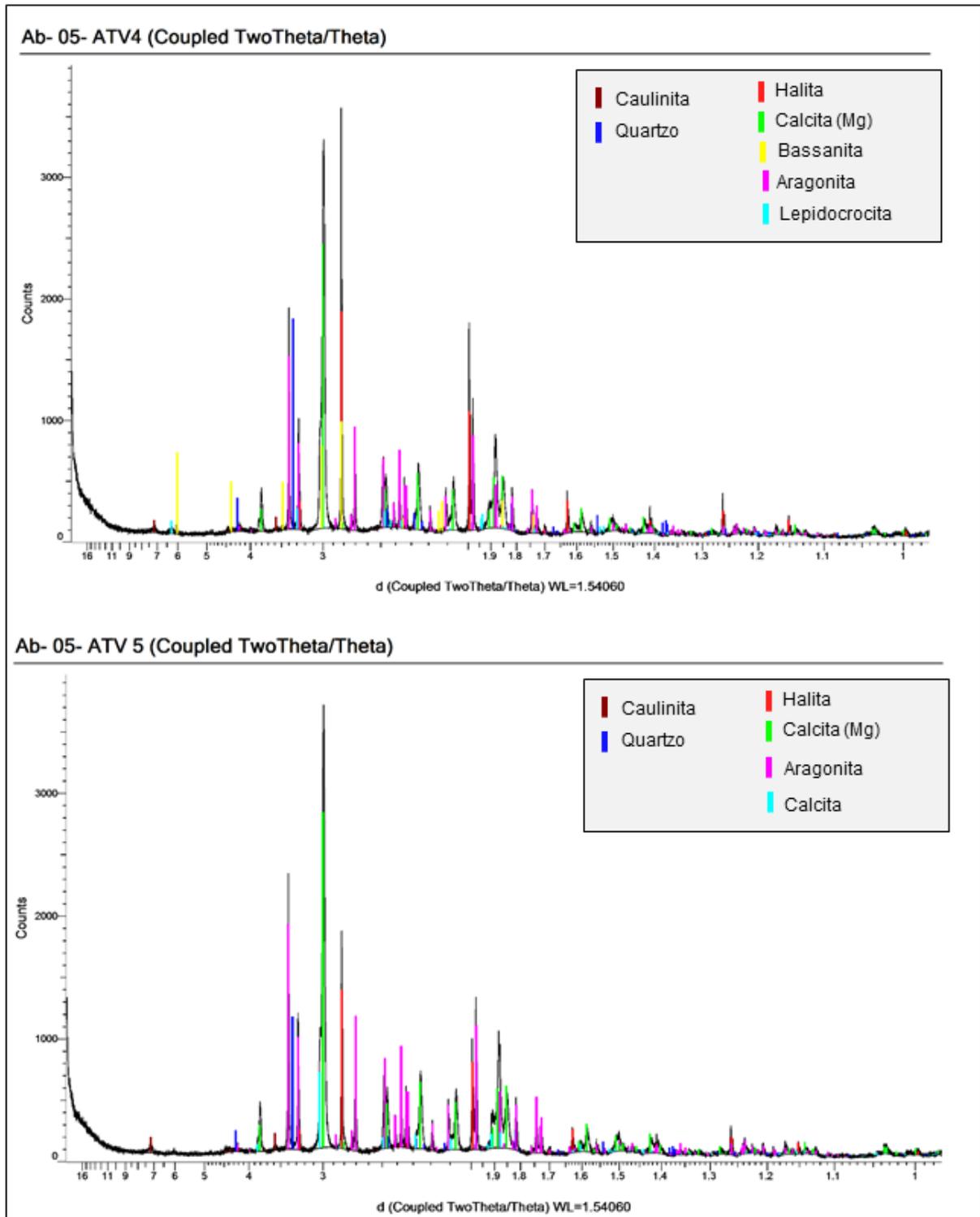
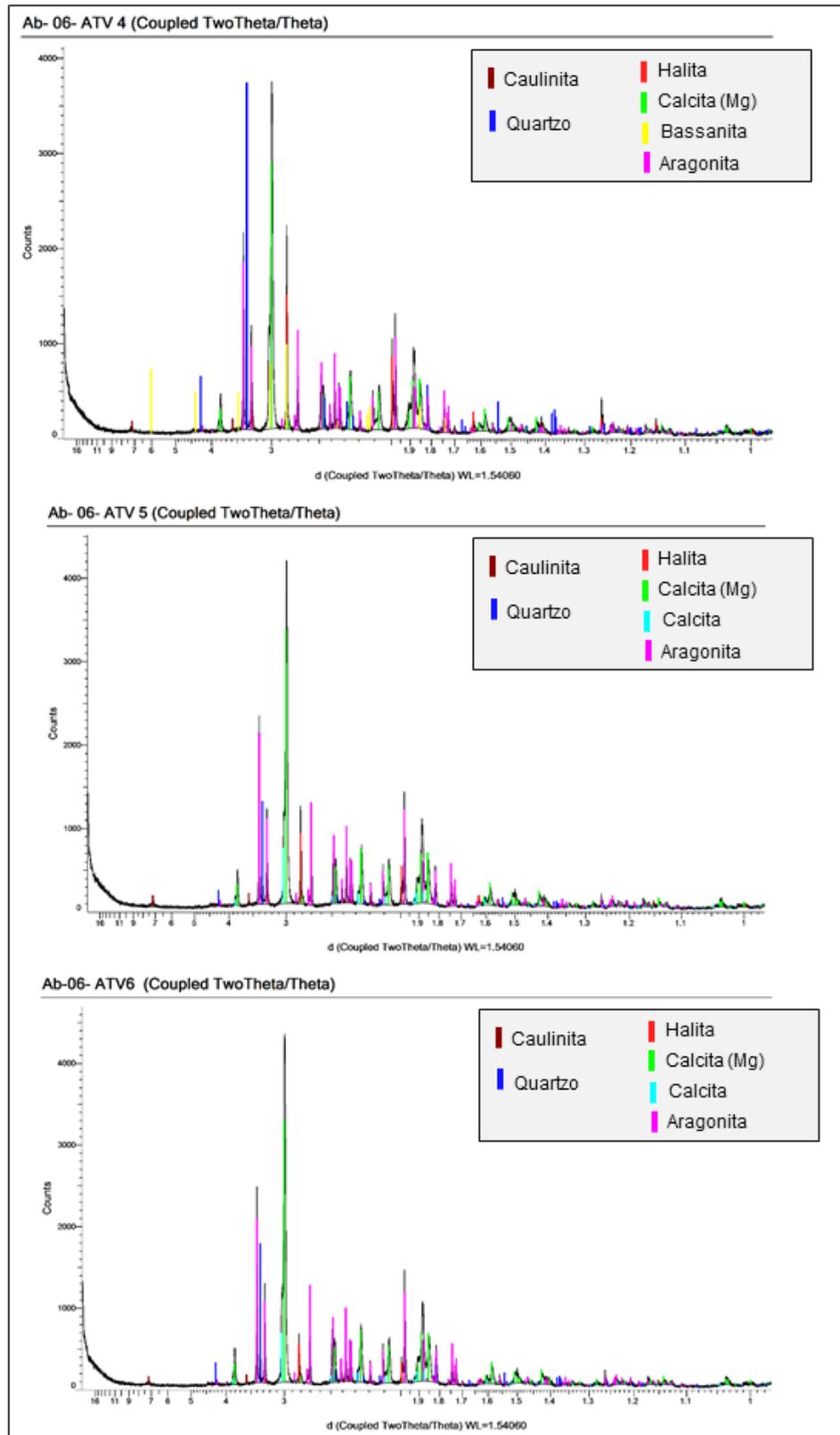


Figura 49. Difratogramas interpretados da amostra Ab06 (Chapeirão da Mancha) coletada nos meses de maio (ATV 4), julho (ATV 5) e agosto (ATV 6).



Análises por microscopia eletrônica de varredura foram conduzidas preliminarmente em quatro amostras: amostras do ponto Ab03 (Polpa Verde) coletadas em maio e agosto de 2019; e nas amostras do ponto Ab06 (Mancha) coletadas também em maio e agosto de 2019.

A partir das imagens em MEV puderam ser identificados grãos bioclásticos aragoníticos e silicosos (Figura 50), grãos siliciclásticos e cristais de halita, em geral, recobrendo os outros minerais. Os grãos siliciclásticos ocorrem com agrupamentos de argilominerais demonstrando um hábito micáceo (Figura 51). Estes estão aglutinados por uma matriz micrítica, provavelmente de composição carbonática. Os carbonatos de cálcio estão sempre associados com magnésio como também indicado pelo método de DRX. A presença de bioclastos silicosos é acompanhada de aumentos no background dos difratogramas entre os ângulos de 15° e 40° que, em geral, indicam presença de sílica amorfa.

Figura 50. Bioclastos aragoníticos (fragmentos de corais) e bioclastos silicosos.

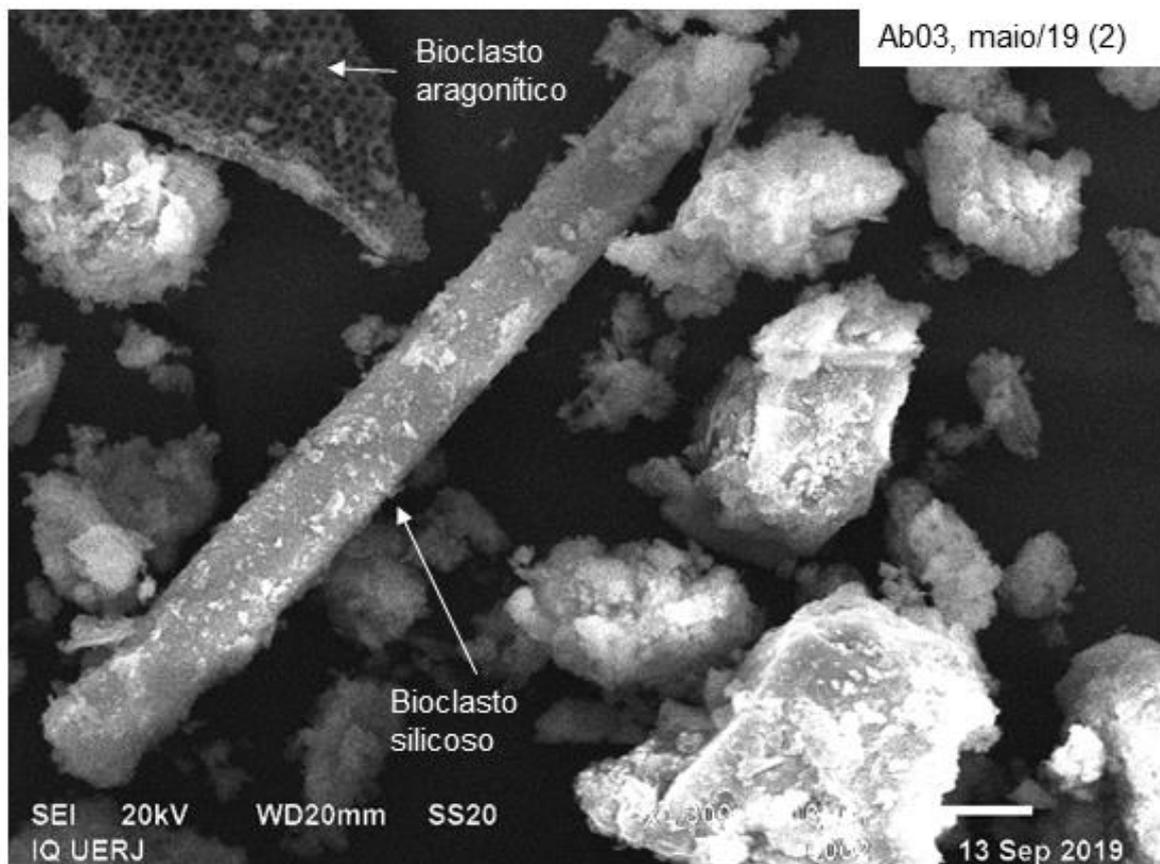
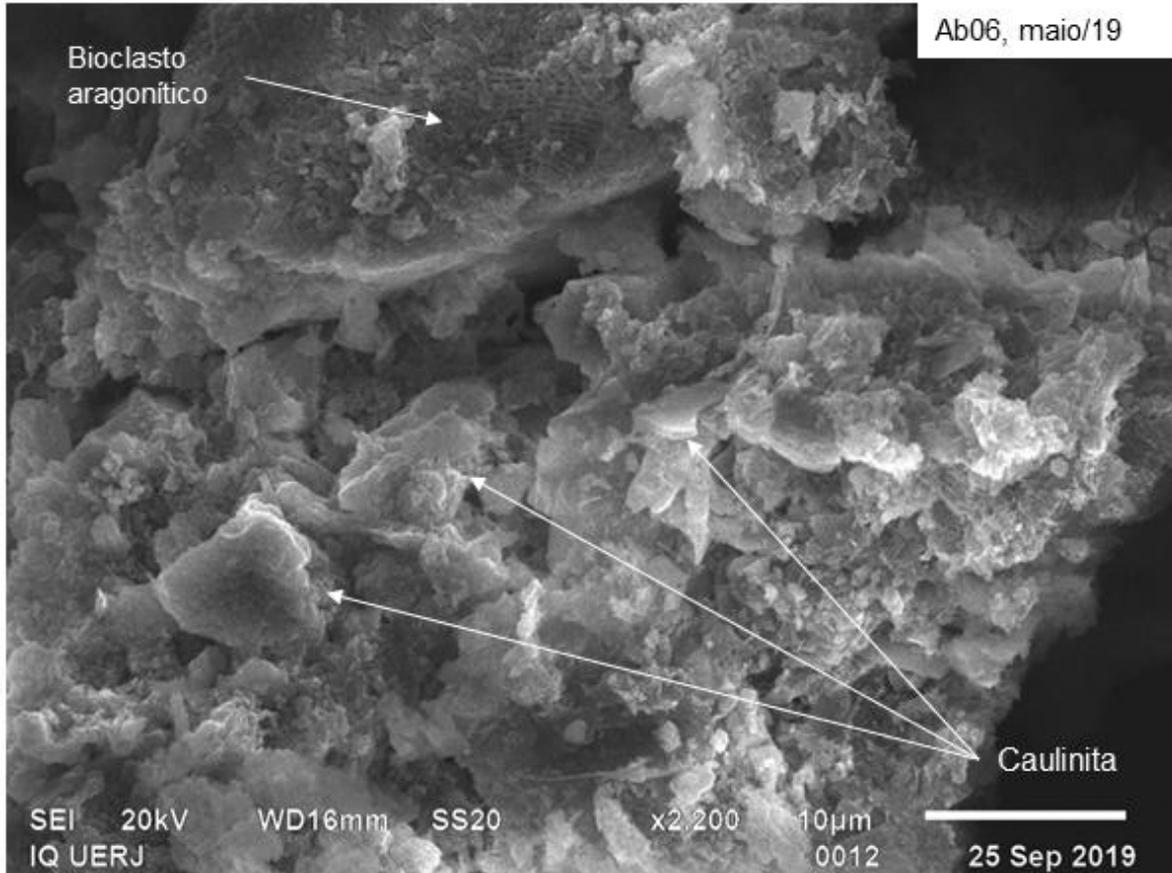
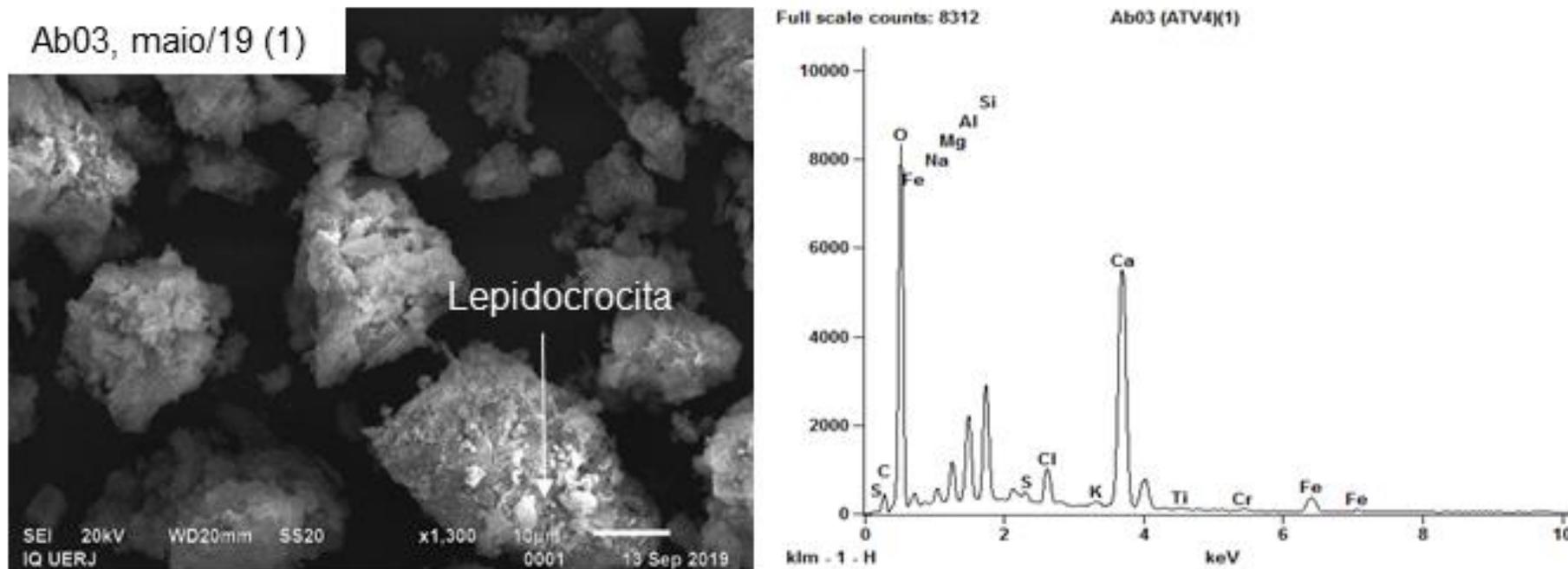


Figura 51. Bioclastos aragoníticos e grãos detríticos com hábitos micáceos. Os minerais detríticos identificados para essa amostra no DRX são caulinita e quartzo.



A ausência de fases mineralógicas de ferro no DRX é aparente também nas análises de MEV. Os picos de Fe para grãos individuais de todas as amostras analisadas não estão diretamente associados a grãos detríticos e devem ser, portanto considerados como produtos de deposição de ferro dissolvido na coluna d'água. No entanto, chama atenção a ocorrência de concentrações de Fe pontuais na amostra Ab03 (de maio/19). Este Fe está associado a grãos cristalinos com alta refletância que recobrem especialmente os materiais terrígenos (Figura 52). Este material deve ser associado ao mineral lepidocrocita identificado pelo DRX. Foi possível observar picos de Ni, Ti (amostras Ab03 de maio e agosto) e Cr (amostras Ab03 e Ab06 ambos de maio). Estes elementos podem estar associados ao ferro. Também foram identificados picos de Nb, mas estes estão sempre associados com enxofre e não há certeza se são geologicamente significativos.

Figura 52. Fase de ferro em MEV identificada como lepidocrocita pelo método do DRX.

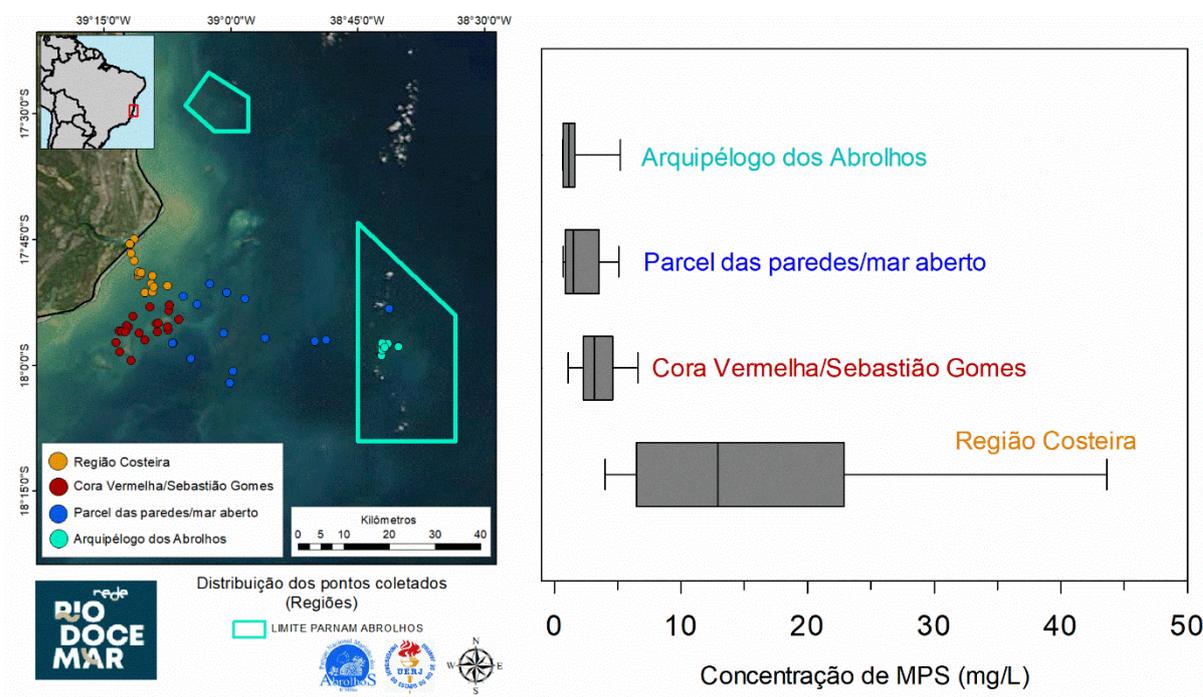


4 DISCUSSÃO INTEGRADA

4.1 VARIABILIDADE ESPACIAL DAS CONCENTRAÇÕES DE MPS E SUA RELAÇÃO COM A DISPONIBILIDADE DE LUZ NO AMBIENTE MARINHO

Em geral, as concentrações de MPS diminuem com a distância em relação a costa. Na região costeira, próxima a foz do Rio Peruípe, foram encontradas as maiores concentrações de MPS ao mesmo tempo em que a profundidade de sechi foi menor (Figura 53). O oposto ocorrendo para a região do arquipélago de Abrolhos, onde foram encontradas as menores concentrações de MPS e maiores profundidades de sechi. As concentrações média encontradas ao longo do período de estudo foram $15,8 \pm 14,2$ na região costeira, $3,6 \pm 2,2$ na região da coroa vermelha/Sebastião Gomes, $2,1 \pm 1,5$ na região do parcel das paredes/mar aberto e $1,5 \pm 1,2$ na região do arquipélago dos Abrolhos (Figura 53).

Figura 53. Variabilidade espacial das concentrações de MPS.

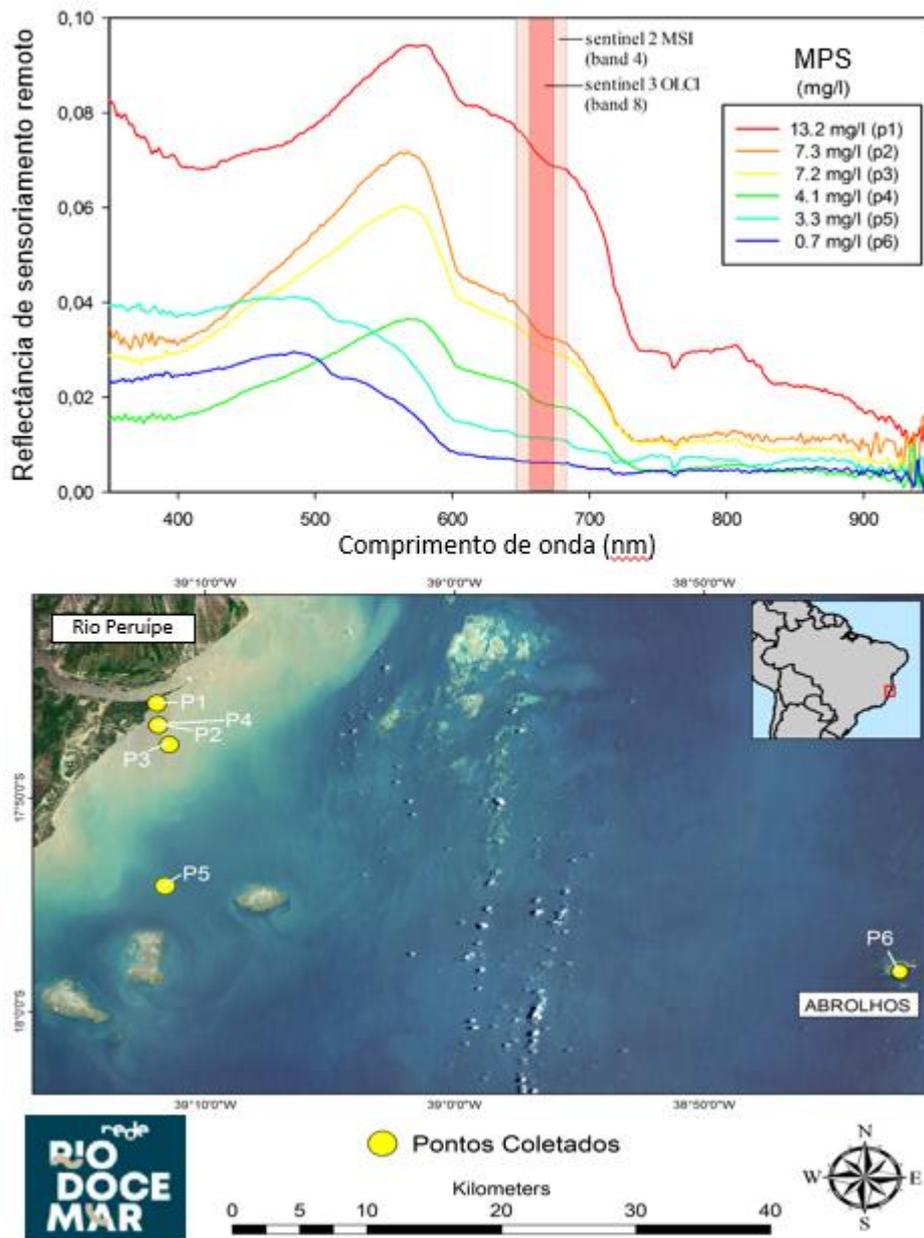


4.2 ELABORAÇÃO E AVALIAÇÃO DE ALGORITMOS PARA ESTIMATIVAS DE MPS POR SENSORIAMENTO REMOTO ORBITAL NA REGIÃO DE ABROLHOS.

A assinatura espectral da água em regiões com diferentes concentrações de MPs foi obtida através do uso de um radiômetro de campo. Os valores de reflectância da água registrados juntamente com as concentrações de MPS estão representados na Figura 54. Através desta análise observamos que a reflectância no espectro entre 600 e 700 nm aumenta com o aumento da concentração de MPS. Esta

região do espectro corresponde a banda do vermelho dos sensores MSI (multi spectral instrument) a bordo do satélite sentinel 2 (resolução espacial de 10 metros) e OLCI (ocean and land color instrument) a bordo do satélite sentinel 3 (resolução espacial de 300 metros). Decedimos concentrar o trabalho no uso de imagens da banda 8 (665nm) do sentinel 3 devido a maior resolução temporal de imageamento comparado com o satélite sentinel 2. O Sentinel 3 possui resolução diária de imageamento, enquanto o sentinel 2 registra uma imagem a cada 5 dias. A alta presença de nuvens na região dificulta o uso das imagens do sentinel 2.

Figura 54. Assinatura espectral da água na região de Abrolhos.



Através das medições de MPS no campo durante a passagem do satélite foi possível estabelecer uma relação entre a concentração de MPS e a reflectância de sensoriamento remoto na banda 8 do sensor

OLCI. Infelizmente, o número de amostras em condições de ausência de nuvem foram poucas. Apenas 8 amostras foram coletadas em regiões livres de nuvem (Figura 55). Nossos resultados, dessa forma, são preliminares. Porém indicam que a utilização de um algoritmo empírico regional produz valores estimados de MPS mais coerentes com os valores reais medidos no campo, quando comparado com o algoritmo C2RCC, o qual é um algoritmo global testado principalmente em regiões costeiras no hemisfério norte (Figura 55). Nosso algoritmo empírico preliminar para a região de Abrolhos apresentou um erro médio quadrático de 1,7. Enquanto o algoritmo C2RCC apresentou um erro médio quadrático de 12,0. A Figura 56 mostra um exemplo da estimativa de MPS gerada a partir do nosso algoritmo para Abrolhos e para o algoritmo global C2RCC. Em geral, o algoritmo C2RCC tende a superestimar as concentrações de MPS.

Figura 55. Comparação entre a concentração de MPS medida no campo e o algoritmo empírico regional e o algoritmo global C2RCC (Case 2 Regional Coast Colour).

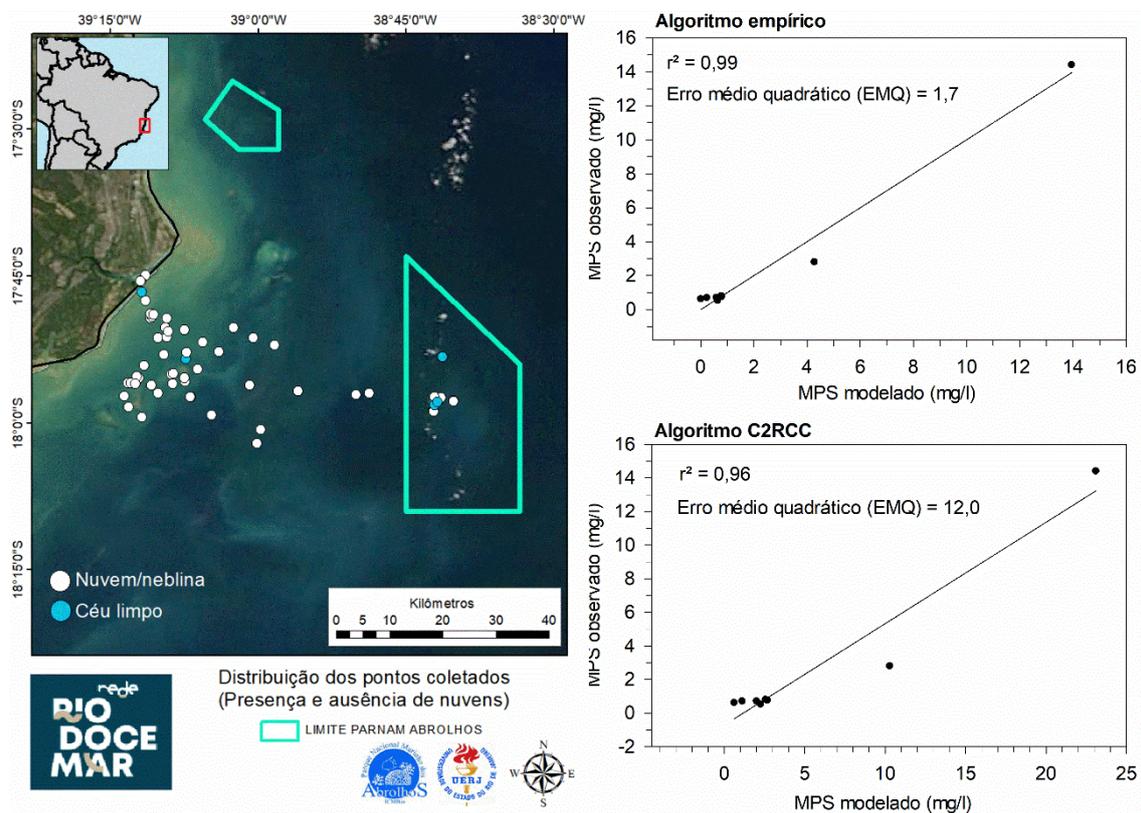
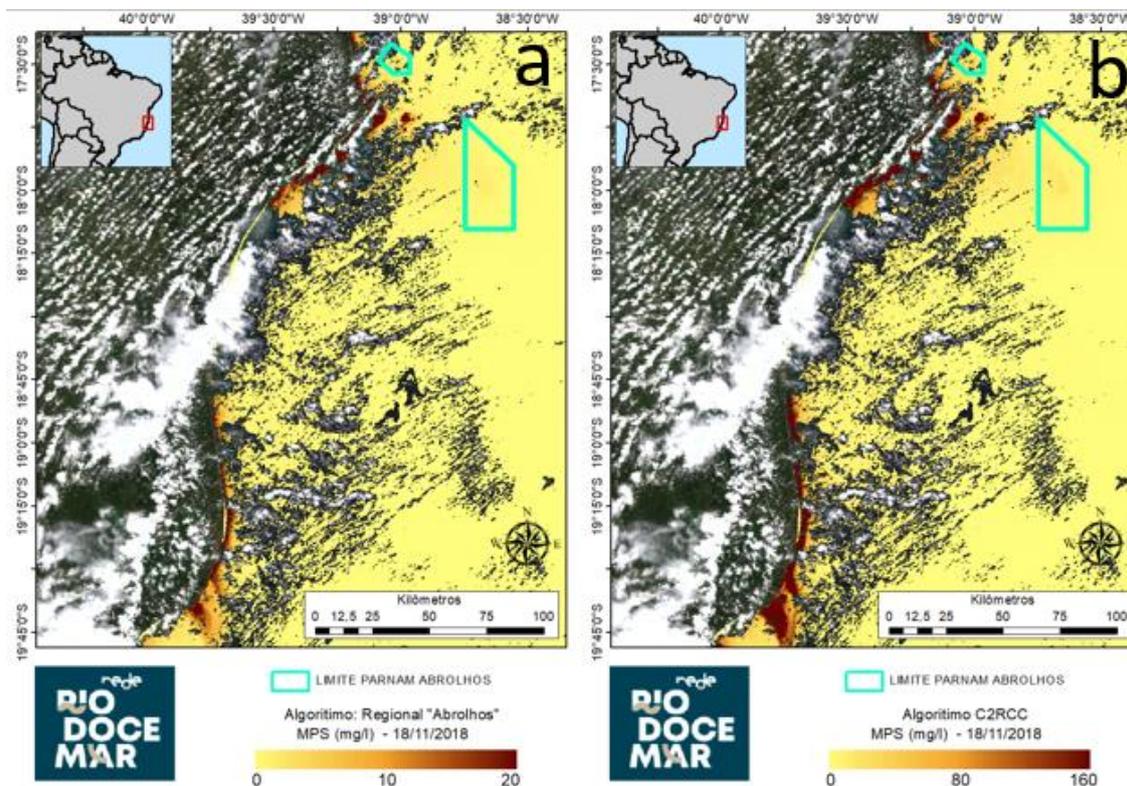


Figura 56. Mapas de estimativa da concentração de MPS para o dia 18/11/2018 (a) Algoritmo regional para Abrolhos. (b) Algoritmo global C2RCC (Case 2 Regional Coast Colour).



4.3 VARIABILIDADE DOS INDICADORES DA DISPONIBILIDADE DE LUZ NA COLUNA D'ÁGUA (MPS E K_d490)

O impacto do colapso da barragem do Fundão na região da foz do Rio Doce pode ser observado no mês de novembro de 2015, quando ocorreu o desastre. Neste mês, pode-se observar um pico nas concentrações de MPS e do k_d490 quando a precipitação ainda estava baixa, o que indica a chegada do material de rejeito da barragem. Porém, um mês após o ocorrido os valores de MPS e k_d490 diminuíram, indicando que a deposição do sedimento ocorreu rapidamente. Além disso, o aumento da precipitação nos meses seguintes ao desastre, dezembro (150 mm/mês) e janeiro (296 mm/mês) de 2016, não fizeram com que a concentração do MPS aumentasse. Na verdade, a concentração de MPS diminuiu. Talvez o material pesado tenha se depositado rapidamente no fundo do rio e a chuva tenha atuado como um agente diluidor, diminuindo a concentração do MPS. Nos meses seguintes, é possível observar que os valores de MPS e k_d490 aumentam quando ocorre um aumento significativo da precipitação. Eventos de ressuspensão devido ao aumento da velocidade do vento são difíceis de serem analisados, já que o aumento da velocidade do vento ocorre quase sempre em conjunto com o aumento da precipitação. Porém, de julho a dezembro de 2018 as concentrações de MPS e o k_d490 aumentam em conformidade ao aumento da velocidade do vento, indicando um possível evento de ressuspensão, já que nesse período a precipitação está baixa.

Já as concentrações de MPS e o k_d490 para a região de Caravelas/Abrolhos, apresentam marcada sazonalidade. Isto é, valores mais altos de maio a novembro e valores mais baixos de dezembro a fevereiro. Nenhuma mudança no padrão da variabilidade das concentrações de MPS e no k_d490 são observados após o desastre da barragem. Isto indica que o rompimento da barragem do Fundão não alterou a disponibilidade de luz na coluna de água na região de Caravelas/Abrolhos.

4.4 ANÁLISE ISOTÓPICA

Os resultados indicam uma certa distinção entre as assinaturas isotópicas dos sedimentos coletados em Abrolhos daqueles coletados na bacia do Rio Doce. Tanto os sedimentos holocênicos obtidos a partir do testemunho Ab05/1 (Almeida, 2009), quanto MPS coletado na coluna d'água de Abrolhos antes de 2015 indicam um range "natural" de ϵNd para os sedimentos locais de -15 a -18, e de 0,7101 a 0,7128 para a razão $^{87}Sr/^{86}Sr$. Em contraste, o MPS na foz do Rio Doce antes do rompimento e imediatamente após este evento mostram campos composicionais bastante semelhantes respectivamente caracterizados por ϵNd entre -18,5 e -22, e a razão $^{87}Sr/^{86}Sr$ entre 0,7030 e 0,7505 (Figura 57). A assinatura da foz do Rio Doce indica a proveniência de uma crosta mais antiga. É interessante notar que estes dados não são totalmente sobrepostos àqueles da barragem analisados por Valeriano et al. (2019). Possivelmente, isto se deve à não homogeneização do material sedimentar transportado e o intervalo curto entre o evento e a coleta de amostras

As primeiras análises de sedimentos de fundo, coletados em *traps* no ano de 2016, demonstraram anomalias localizadas no *trap* de Sueste, com valores de $^{87}Sr/^{86}Sr$ (~ 0,7299) e de ϵNd (-18,7), respectivamente maior e mais negativa do que o *range* observado para as assinaturas de Abrolhos.

No início da etapa em Abrolhos, em novembro de 2018 e fevereiro de 2019, foram feitas coletas de MPS próximas ao Rio Caravelas e nas ilhas de Abrolhos. Resultados de MPS anômalos foram encontrados no estuário de Caravelas e em Coroa Vermelha. Nestes, foram observados valores de $^{87}Sr/^{86}Sr$ mais elevados do que o range de Abrolhos (0,7272 e 0,7332) e valores de ϵNd menos negativos do que a foz do Rio Doce e a lama de rejeito da barragem (-17,1 e -17,5). Amostras de MPS próximo às ilhas de Abrolhos demonstram o ϵNd pouco negativo em relação a todos os padrões já observados (-10,6 e -11,4) e a razão $^{87}Sr/^{86}Sr$ dentro do esperado de Abrolhos. Estas amostras estão relacionadas a uma composição intermediária entre o embasamento vulcânico (basáltico) de Abrolhos e uma fonte continental.

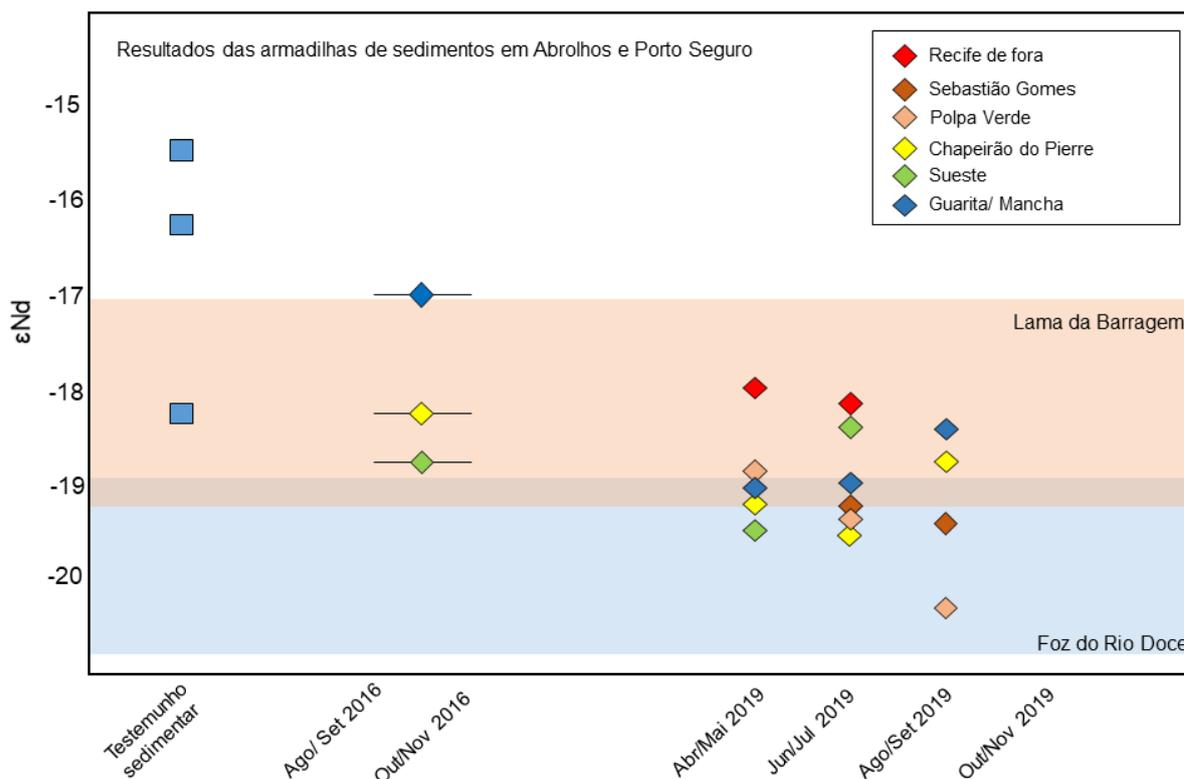
isotópicas bem diferentes dos *traps* de Abrolhos, possivelmente explicadas por uma componente continental heterogênea. A utilização deste como ponto controle deve ser, portanto, reavaliada.

A amostra IBA representa sedimentos de fundos re-depositados em Recife de Fora após o evento de tempestade tropical. Os valores e razão isotópica, em especial $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$, indicam uma fonte continental consideravelmente mais juvenil do que a observada para todas as outras amostras.

4.4.1 Variação temporal

Observando-se os dados em sua cronologia de coleta, percebe-se uma tendência de variação temporal para valores mais negativos de ϵNd quando são analisadas as amostras de sedimentos coletados no ano de 2019 em relação aos sedimentos coletados de 2016 e do testemunho sedimentar (Figura 58). Mensalmente, somente os *traps* localizados em Sebastião Gomes e Polpa Verde possuem essa tendência cada vez mais negativa para todos os meses de coleta. Enquanto que as amostras localizadas em Chapeirão do Pierre e Mancha apresentam valores menos negativos nos meses de agosto a setembro.

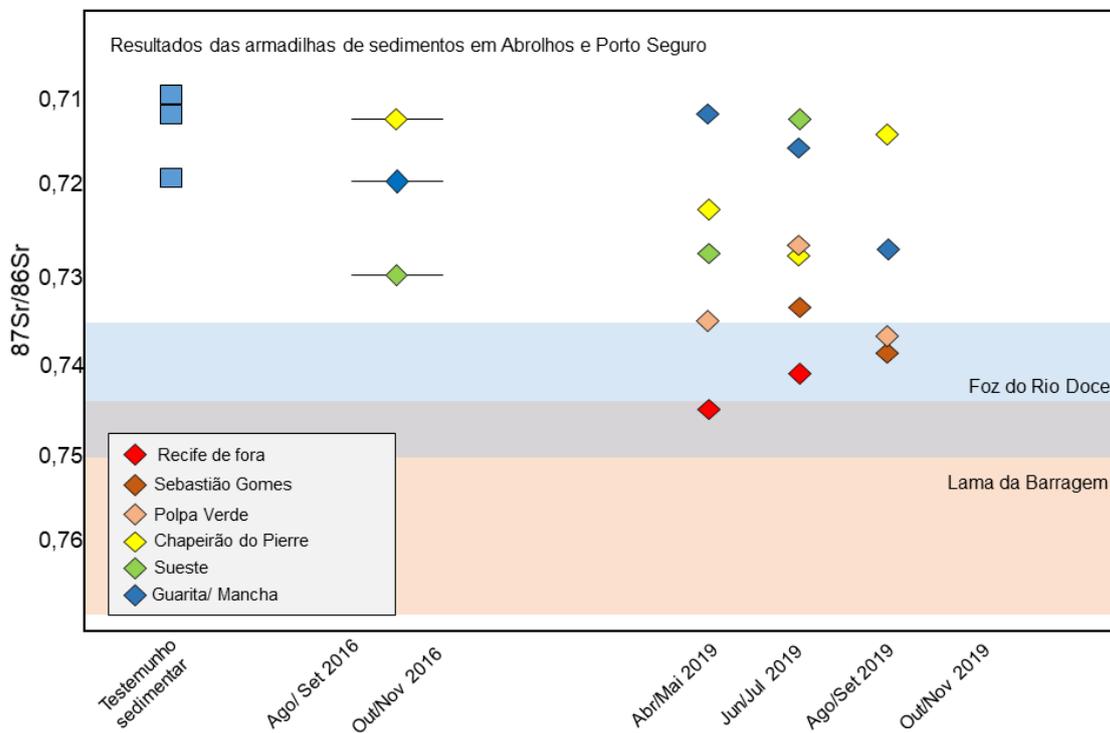
Figura 58. Variação das razões $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ medidas dentro dos meses de coleta e relação das condições atuais com 2016 e com o range natural para Abrolhos (testemunho sedimentar).



A tendência temporal da razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ acompanha o comportamento do sistema Sm-Nd, tendendo a ficar maior para os sedimentos coletados em 2019 em relação aos sedimentos coletados em 2016 e

no testemunho sedimentar (Figura 59). Mensalmente, as variações para Sebastião Gomes e Polpa Verde são semelhantes ao comportamento do Nd e tendem a aumentar até os meses de agosto e setembro.

Figura 59. Variação da razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ das amostras de sedimentos nos diferentes meses de coletas e relação com os sedimentos coletados em 2016 e do testemunho sedimentar.



A partir dessas análises, conclui-se preliminarmente que ocorrem incursões de sedimentos continentais que contrastam com as assinaturas consideradas locais de Abrolhos, anteriores às do rompimento da barragem de Fundão. Estas incursões variam em escala mensal, mas apresentam uma tendência de aumento bem marcada desde o início da série histórica em 2016.

4.4.2 Modelagem de misturas isotópicas

Esta seção tem por objetivo discutir os testes de hipótese desenvolvidos levando em conta os resultados preliminares dos métodos isotópicos de Nd e Sr. Ou seja, estabelecer possibilidades preliminares de interpretação qualitativa e quantitativa das possíveis fontes sedimentares

De modo a testar possíveis fontes continentais dos sedimentos coletados no ambiente marinho, foram modeladas curvas para diferentes hipóteses de misturas. A equação utilizada para a mistura (segundo Faure, 1978) é apresentada abaixo:

$$R_M^x = \frac{R_A^x X_A f + R_B^x X_B f}{X_A f + X_B (1 - f)}$$

Sendo R as razões isotópicas para um elemento x, com concentração X, dos componentes (*end-members*) A e B. O valor f nessa equação representa a proporção do componente A para a mistura M.

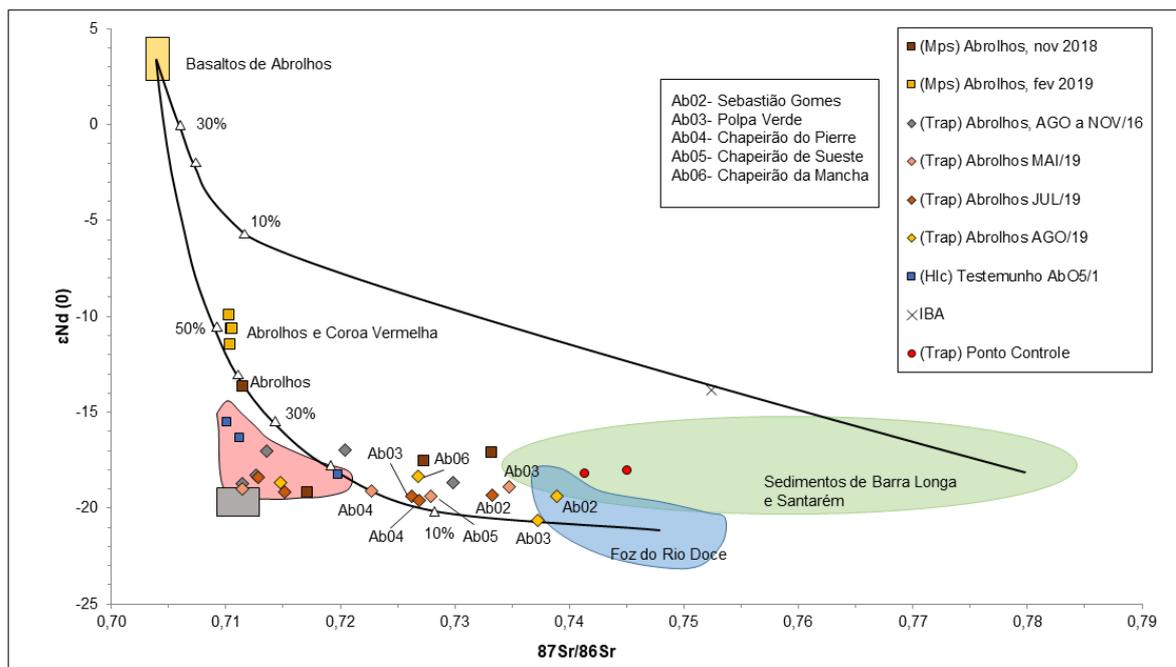
Os primeiros testes de hipótese levaram em conta como *end-members* os basaltos de Abrolhos que compõem o assoalho vulcânico da plataforma (*end-member A*), e como fonte continental (*end-member B*), a lama da barragem coletada em Santarém e o sedimento da foz do Rio Doce anterior ao rompimento da barragem (Tabela 8). Os valores para o *end-member A* foram calculados como a média da geoquímica dos basaltos de Abrolhos publicados por Fodor et al (1989). Desse modo, a razão $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ dessa componente é de 0,5122808 com concentração de 36,3 ppm de Nd. Enquanto que a razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ é de 0,703878 para uma concentração de 394 ppm de Sr.

Tabela 8. Valores de razão isotópica e concentração utilizados para o cálculo da curva de mistura para duas hipóteses de componentes continentais distintas

Hipóteses	End-member B			
	Ra (Nd)	Xa (Nd-ppm)	Ra (Sr)	Xa (Sr-ppm)
Lama da barragem em Santarém	0,511753	3,2	0,779464	5 (estimado)
Foz do Rio Doce pós-rompimento	0,511500	43,3 (estimado)	0,749438	50 (estimado)

As curvas de mistura calculadas para essas hipóteses (Figura 60) indicam que a lama da barragem amostrada em Santarém não representa um *end-member* possível para as análises feitas na região de Abrolhos. O componente estabelecido pela Foz do Rio Doce pós-rompimento, no entanto, pode ser usada para descrever a maioria dos sedimentos do grupo II descritos nos *traps*. A diferença entre essas duas componentes pode ser causada por fracionamentos mineralógicos e granulométricos ao longo do curso do Rio Doce.

Figura 60. Curvas hipotéticas de mistura a partir de um componente juvenil (basaltos de Abrolhos) e dois possíveis componentes continentais, a lama da barragem em Santarém e os sedimentos da foz do rio Doce pós-rompimento da barragem.



A partir da curva, então, pode-se descrever os sedimentos dos *traps* do grupo II em Abrolhos como uma mistura entre sedimentos da Foz do Rio Doce com 5% a 15% de uma componente juvenil basáltica. As dispersões ao longo da curva podem ser causadas por variações no teor de Nd e Sr das componentes, no entanto, estas dispersões estão dentro do range esperado para a variação das composições medidas nos sedimentos da Foz do Rio Doce. Análises de material particulado em suspensão, coletados na região das ilhas de Abrolhos e Coroa Vermelha em fevereiro de 2019, também puderam ser descritos a partir desse modelo de mistura para 40% a 50% de componente juvenil em relação ao componente continental. Os resultados de material particulado em suspensão com mais alta dispersão (coletados em Coroa vermelha em novembro de 2018) podem indicar outra fonte continental distinta.

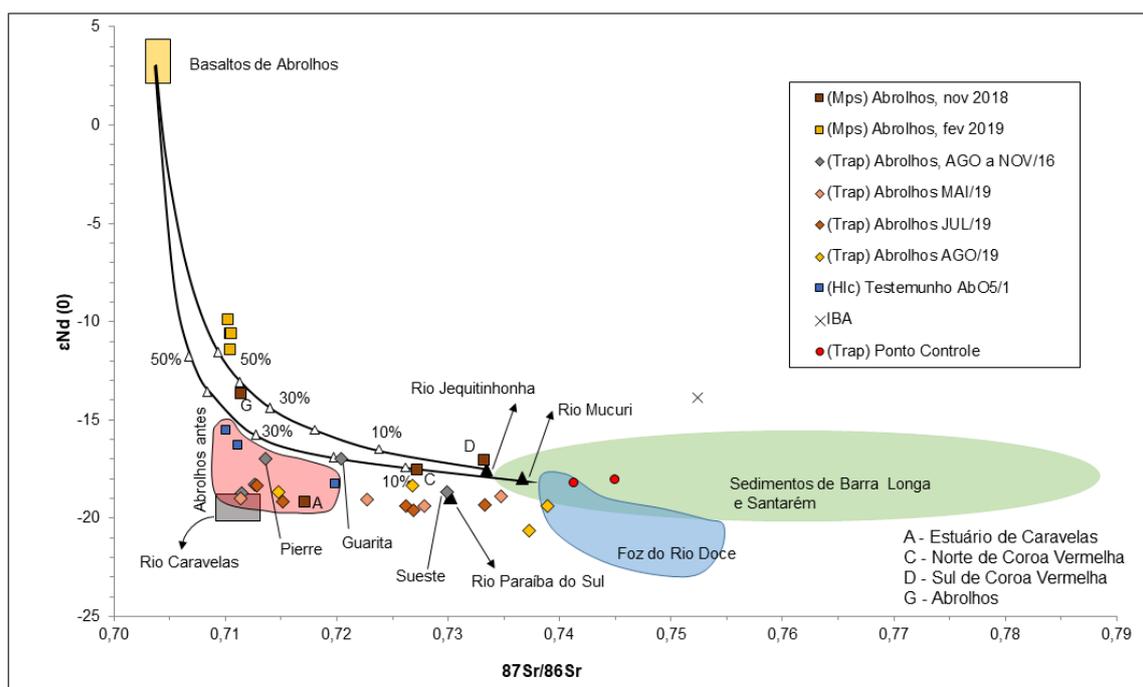
Para confirmar se as assinaturas de Abrolhos poderiam ter outra fonte continental, foi realizado um trabalho de campo para coleta de amostras ao longo dos rios da costa leste entre o norte do Rio de Janeiro e Salvador. Os rios São Mateus e Caravelas possuem uma composição isotópica bem restrita, com ϵNd entre -19,2 e -19,7, e razão $^{87}Sr/^{86}Sr$ entre 0,7097 e 0,7110. A composição para o Rio Caravelas foi incluída para o range isotópico natural de Abrolhos, confirmando a diferença, portanto, do observado no Rio Doce. Para o caso do Rio Mucuri e do Rio Jequitinhonha, cujas assinaturas isotópicas se aproximam daquela observada no Rio Doce, foram calculadas curvas de mistura utilizando como componente A os mesmos basaltos descritos anteriormente (Tabela 9).

Tabela 9. Razões isotópicas e concentrações elementares para duas componentes continentais hipotéticas.

Hipóteses	End-member B			
	Ra (Nd)	Xa (Nd-ppm)	Ra (Sr)	Xa (Sr-ppm)
Rio Mucuri	0,511721	211,5	0,736697	90 (estimado)
Rio Jequitinhonha	0,511736	87,9	0,733328	90 (estimado)

As curvas indicam que naturalmente Abrolhos pode ser descrito como uma mistura entre pelo menos 30% de componente basáltico e um componente continental que está presente tanto no embasamento do Mucuri, Jequitinhonha e no alto Rio Doce, o que é comprovado especialmente pelas medidas de material particulado em suspensão em novembro de 2018 e fevereiro de 2019 (Figura 61). No entanto, os *traps* indicam outro componente, uma vez que as medidas se desviam em muito da curva calculada.

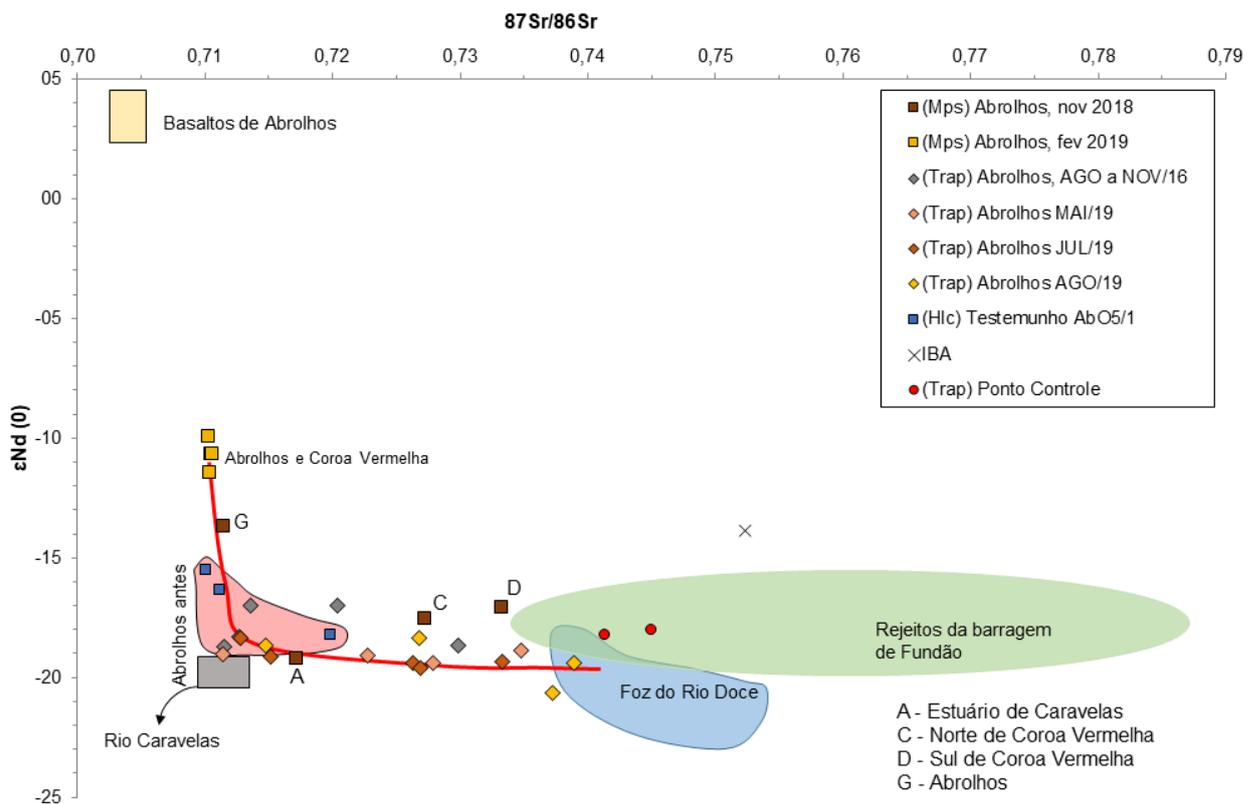
Figura 61. Curvas de mistura calculadas com relação à uma componente juvenil (basaltos de Abrolhos) e duas possíveis componentes continentais indicadas pelos rios Jequitinhonha e Mucuri.



De modo a complementar as hipóteses de mistura aqui levantadas, é sugerida uma curva relacionando todos os sedimentos dos *traps* de Abrolhos coletados entre maio e agosto de 2019 a fontes semelhantes. Para esta mistura, foi modelado como componente A a média das razões isotópicas do material particulado em suspensão coletado em fevereiro de 2019 em Abrolhos e Coroa Vermelha. As

razões $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ e $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ para o componente a são, respectivamente, 0,512093 e 0,710375. A escolha desse componente se justifica pelo fato de ser uma composição intermediária entre os *end-members* mais juvenis (basaltos de Abrolhos) e os *end-members* mais continentais representados pelos sedimentos dos rios Mucuri, Jequitinhonha e Doce. O componente B representa a média das razões isotópicas e concentrações elementares medidas para a lama da barragem na região de Barra Longa. As amostras de sedimentos de Barra Longa apresentam razão isotópica $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ média de 0,511662 para 3,7 ppm de Nd, e razão isotópica $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de 0,750873 para 5,83 ppm de Sr. Na equação de mistura, a abertura da curva hiperbólica (K) é igual à razão entre as concentrações de Sr e Nd da componente A normalizadas pela razão da concentração desses elementos na componente B. É possível, portanto, variar o grau de curvatura da curva na tentativa de ajustá-la à variação dos dados medidos. O melhor ajuste para os sedimentos de *trap* foi obtido para um K igual a 0,008 (Figura 62).

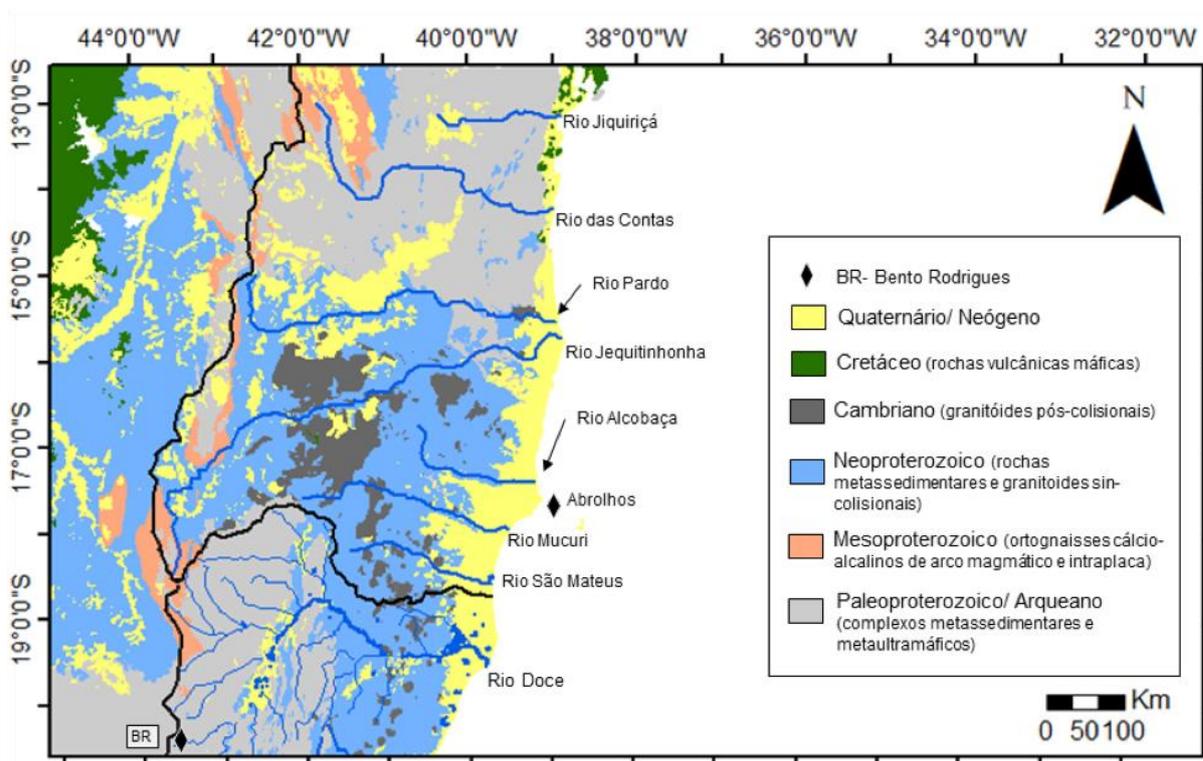
Figura 62. Modelo de mistura entre material particulado em suspensão coletado em fevereiro de 2019 e a lama da barragem coletada em Barra Longa. O melhor ajuste da curva para todos os dados de sedimentos ocorre para uma curvatura de 0,008.



Cabe ressaltar que a semelhança litológica entre as bacias hidrográficas do rio Doce e dos rios do Sul da Bahia deve ser levada em consideração. À montante, o rio Doce e seus afluentes retrabalham materiais geológicos derivados principalmente de rochas de idade arqueana ou paleoproterozóico, cuja variação do ϵNd atual está entre -20 e -40 (Sato, 1998). Litotipos desta idade representam a principal contribuição para os sedimentos coletados na região de Barra Longa e Santarém, e para os rejeitos da barragem (Valeriano et al. 2019). À jusante do rio Doce, as rochas neoproterozoicas a cambrianas são

mais representativas, geralmente relacionadas a rochas metassedimentares e granitoides sin- a pós-colisionais, os quais apresentam ϵNd entre -4 e -40 (Martins et al. 2004), em parte por conta de certa herança das rochas mais antigas. Estes litotipos compõe a cabeceira dos principais rios do sul bahiano, rios Mucuri, Caravelas e Alcobaça (Figura 63). A foz desses rios está sobre depósitos neógenos da Formação Barreiras e outros depósitos quaternários. Estes são representados por arenitos arcoseanos, geralmente ferruginosos formados pelo retrabalhamento proximal de rochas mais antigas e, portanto, devem apresentar características isotópicas semelhantes.

Figura 63. Mapa geológico norte do Espírito Santo e sul da Bahia, mostrando os principais rios na costa próxima à região de Abrolhos.



4.5 MINERALOGIA

Os resultados de mineralogia indicam uma associação muito restrita de minerais e que podem estar presentes em litotipos muito variados. A caulinita e a gibbsita são argilominerais secundários, formados a partir do intemperismo de feldspatos e micas e, portanto, não são bons indicadores de proveniência para este caso. A presença de muscovita, no entanto, deve estar relacionada à presença de rochas metamórficas de protólito sedimentar, de granitos e pegmatitos. Levando em consideração estes pontos, a interpretação inicial para a associação mineralógica é uma proveniência a partir do retrabalhamento de rochas sedimentares, metassedimentares e de rochas granitoides mais antigas. A Formação Barreiras, depositada entre o Mioceno e Pleistoceno, pode ser considerada como uma das áreas fontes potenciais. No entanto, esta é uma formação litológica que está presente tanto no baixo

Rio Doce quanto em toda costa sudeste da Bahia. Esta associação mineralógica também está presente no trap instalado em Recife de Fora (Porto Seguro), o que argumenta também em favor da interpretação preliminar para a rocha fonte.

A ausência de minerais pesados, inclusive óxidos de ferro e titânio, é bom indicador de que o transporte de material terrígeno ocorre por suspensão na coluna de água. Minerais de alta densidade não conseguem ser transportados por distâncias longas. Nem mesmo as rochas vulcânicas mais próximas, ou seja, os basaltos de Abrolhos, que em geral contém óxidos de ferro como a magnetita, parecem estar contribuindo mineralologicamente para os sedimentos do entorno. Esta indicação se reflete em valores de ϵNd muito negativos, como observado nos sedimentos coletados próximos às ilhas de Abrolhos.

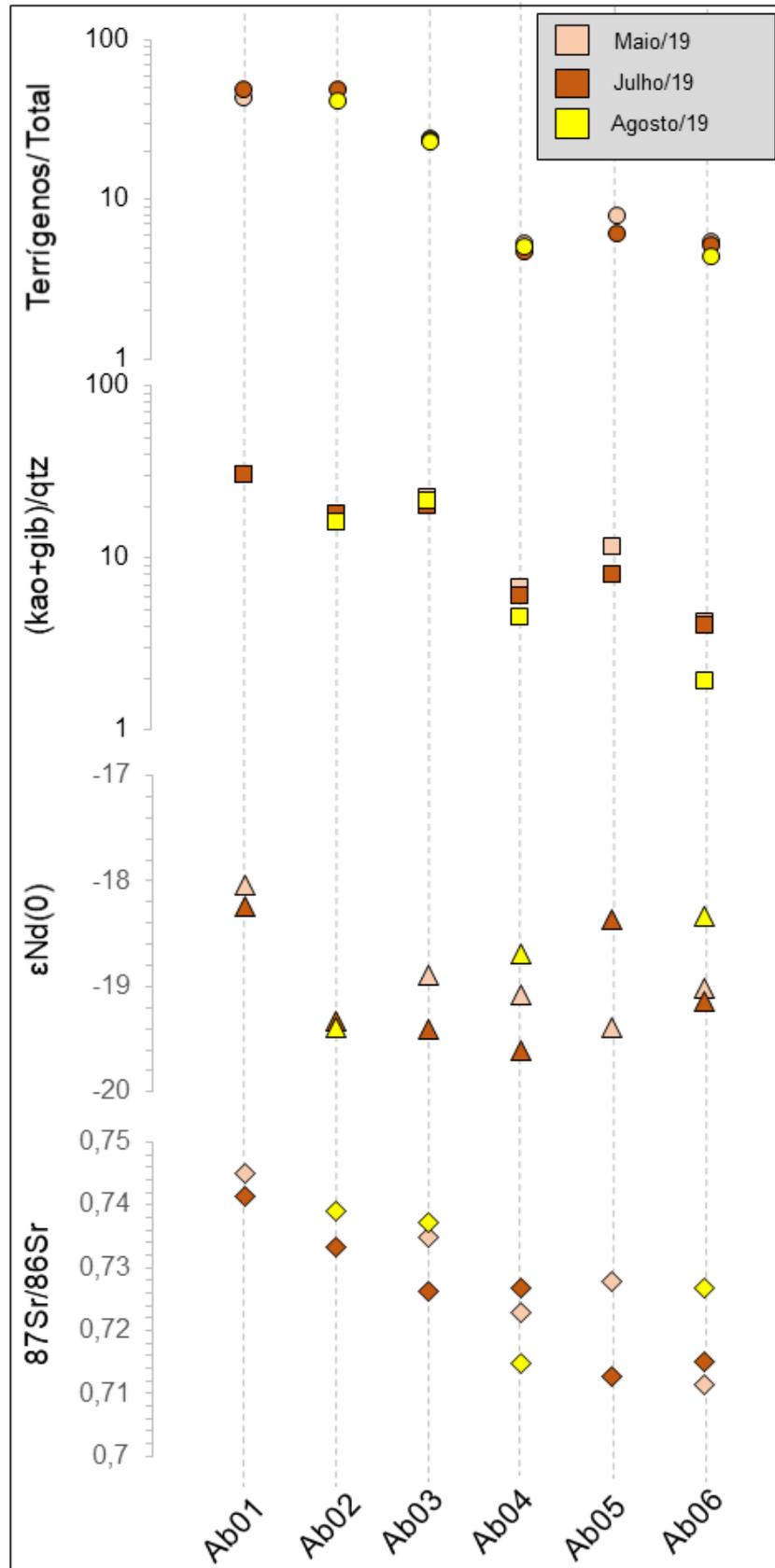
Tabela 10. Síntese dos parâmetros mineralógicos usados como comparação para a variação de razões isotópicas. O parâmetro Mg em calcita se refere à substituição estequiométrica de magnésio neste mineral, quantificada a partir de rotina em DRX. Legenda: kao= caulinita; gib= gibbsita; e qtz= quartzo.

	Ab01	Ab02	Ab03	Ab04	Ab05	Ab06
Maio/19						
Terrígenos totais	44,1%	-	23,9%	5,3%	7,9%	5,4%
(kao+gib)/qtz	30,5	-	22,7	6,8	11,8	4,2
Mg em calcita	0,127	-	0,127	0,126	0,125	0,126
Julho/19						
Terrígenos totais	48,9%	49,3%	23,5%	4,7%	6,2%	5,2%
(kao+gib)/qtz	30,5	18,0	20,3	6,1	8,0	4,1
Mg em calcita	0,122	0,128	0,128	0,130	0,127	0,125
Agosto/19						
Terrígenos totais	-	41,7%	23,2%	5,0%	-	4,5%
(kao+gib)/qtz	-	16,1	21,7	4,6	-	2,0
Mg em calcita	-	0,131	0,129	0,129	-	0,125

A presença de caulinita e gibbsita tende a diminuir com o afastamento do continente, acompanhando a diminuição da concentração de fases terrígenas (Tabela 10). No caso da caulinita, a diminuição ocorre de 32% em Sebastião Gomes para 17% em Polpa Verde e cerca de 4% nas ilhas próximo a Abrolhos. A gibbsita está presente em 2% do conteúdo mineralógico total até Polpa Verde enquanto está ausente nos chapeirões do Pierre e da Mancha e ocorre em cerca de 1% no chapeirão de Sueste. Das mudanças geográficas, a maior deve ser a da muscovita com ocorrências significantes mais próximas ao continente, mas ausente nas ilhas de Abrolhos. No entanto, nenhuma mudança qualitativa pode ser diagnosticada em relação aos meses de coleta. Nesse caso, a única variação quantitativa significativa deve ser a presença de maior proporção de caulinita nos *traps* Ab02, Ab03 e Ab05 no mês de maio.

Quanto às razões isotópicas, as fases autoclásticas, isto é, carbonáticas e evaporíticas, não contribuem para os valores medidos, uma vez que são eliminados no procedimento em laboratório. Sendo assim, somente as fases terrígenas contribuem para os valores de isótopos de Nd e Sr. Para investigar essas relações, foi confeccionado um gráfico síntese (Figura 64) estabelecendo as relações entre os terrígenos totais e a proporção de argilominerais em relação ao quartzo, sendo os argilominerais principais carreadores de terras raras proveniente das rochas fontes.

Figura 64. Síntese da variação mineralógica e relações com os valores de razões isotópicas para os pontos amostrados em Recife de Fora e Abrolhos nos diferentes meses de campanha. Legenda: kao= caulinita; gib= gibbsita; e qtz= quartzo.



Variações mensais são observadas no comportamento das razões isotópicas de neodímio. Enquanto no mês de maio, os valores de ϵNd tendem a ficar mais negativos do continente para as ilhas de Abrolhos, nos meses de julho e agosto esse comportamento se inverte. Este padrão ainda é acompanhado de uma tendência geral (em todos os pontos) dos valores de ϵNd ficarem cada vez mais negativos em comparação aos meses de maio e agosto (Figura 57). Esses valores menos negativos observados são acompanhados de menor concentração de fases terrígenas e menor proporção argilominerais para quartzo observadas nos mesmos meses de julho e agosto em comparação ao mês de maio. Estes parâmetros indicam que há uma variação mensal no aporte de material siliciclástico de alguma fonte sedimentar crustal mais próxima, com aumento paralelo de outra fonte mais evoluída isotopicamente, em especial nos pontos mais próximos ao continente. Ao contrário do neodímio, as variações da razão isotópica de estrôncio acompanham a variação de terrígenos em todos os meses de campanha.

A ausência de gibbsita associada à caulinita nos pontos Ab04 e Ab06 e a ausência completa da muscovita nos pontos próximos as ilhas de Abrolhos indicam possíveis fracionamentos mineralógicos. Outro argumento possível para o comportamento mineralógico é a ocorrência de rochas fontes distintas, no entanto, mesmo que as heterogeneidades significativas detectadas nas razões de Nd sugiram fontes distintas, não se espera que variem em termos mineralógicos. O fracionamento mineralógico é muito importante para os estudos isotópicos. Na Figura 64, o gráfico de variação da razão $87\text{Sr}/86\text{Sr}$ aponta para duas drásticas reduções nos valores medidos, a primeira entre Ab01 (Recife de Fora) e Ab02 (Sebastião Gomes), e, a segunda, entre Ab03 (Polpa Verde) e Ab04 (Chapeirão do Pierre) nos meses de maio e agosto (época seca). Estudando os valores de muscovita quantificados para essas amostras, a média para os meses de coleta no ponto Ab01 é de cerca de 9%, enquanto que no ponto Ab02 é 6,5%. No ponto Ab03 o valor de muscovita é próximo a 3% e o mineral está ausente nas ilhas de Abrolhos. Faz-se necessário entender que para uma mesma fonte sedimentar, a quantidade de muscovita não influencia na razão isotópica. Ou seja, a variação entre Recife de Fora e Sebastião Gomes é melhor explicada por rochas fontes distintas, enquanto que para Abrolhos, o fracionamento mineralógico durante o transporte é um importante controle isotópico. Ao mesmo tempo, leva-se em conta que uma vez se aproximando das composições isotópicas do estuário do rio Caravelas, as amostras ditas fracionadas mineralogicamente indicam que a fonte da muscovita deve ser outra que não o rio supracitado, nem as rochas associadas a ele. Sendo assim, este pode ser um excelente mineral diagnóstico da área fonte. O fracionamento, no entanto, não parece afetar significativamente as razões de $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$.

As fases autoclásticas e evaporíticas foram diagnosticadas como aragonita, calcita, calcita com substituições de magnésio halita, bassanita e gipso. Estas fases não indicam proveniência sedimentar dessa bacia e estão associadas principalmente a materiais biogênicos e precipitação. São associações comuns a todas as amostras analisadas e não ocorrem variações diagnosticáveis qualitativamente em escala temporal ou geográfica. Na Tabela 10, estão expostos dados de substituição estequiométrica

de magnésio em calcita calculados pelo método desenvolvido por Santos et. al. (2017) em DRX. Estes parâmetros têm implicação biológica, mas não foram usados em questões de proveniência.

5 RESUMO DO ANEXO

Neste projeto empregamos o modelo clássico de mistura binária isotópica, para testar a hipótese sobre a influência de potenciais fontes contribuintes para os sedimentos na coluna d'água no PARNA de Abrolhos. Empregando-se de forma integrada dados isotópicos dos sedimentos armadilhados e MPS em Abrolhos e Porto Seguro, ao longo de aproximadamente 1 ano de amostragem, dados dos principais rios que aportam no em torno do Parque Marinho e aqueles provenientes da Bacia Hidrográfica do Rio Doce foi possível modelar diferentes graus de mistura entre os termos-fonte postulados acima. As curvas de mistura calculadas indicam que a lama da barragem amostrada em Santarém não representa um *end-member* possível para os resultados na região de Abrolhos; por outro lado, o componente estabelecido pela Foz do Rio Doce pós-rompimento pode ser usada para descrever a maioria dos sedimentos encontrados nas armadilhas em Abrolhos. Nosso modelo estima que os sedimentos armadilhados tenham assinatura isotópica equivalente a Foz do Rio Doce apresentando um padrão de mistura entre 5% a 15% da componente juvenil basáltica de Abrolhos (fonte local). As dispersões ao longo da curva podem ser causadas por variações no teor de Nd e Sr das componentes, no entanto, estas dispersões estão dentro do range esperado para a variação das composições medidas nos sedimentos da Foz do Rio Doce. Análises de material particulado em suspensão, coletados na região das ilhas de Abrolhos e Coroa Vermelha em fevereiro de 2019, também puderam ser descritos a partir desse modelo de mistura para 40% a 50% de componente juvenil de Abrolhos em relação ao componente continental. O modelo de mistura aplicado aos Rios Mucuri e Jequitinhonha mostrou que estes também contribuem para o aporte sedimentar em Abrolhos, porém com menor grau de mistura.

Para o Sensoriamento Remoto, os dados de coeficiente de atenuação difuso da irradiância em 490 nm (k_d490) e MPS, este último calibrado a partir dos dados de campo deste projeto, e que estão relacionados com a penetração e disponibilidade de luz na coluna d'água no oceano não exibiram variações significativas para os períodos antes e depois da chegada dos rejeitos da Samarco na foz do Rio Doce, apesar do registro de precipitação no continente ter aumento nos anos posteriores a chegada dos rejeitos. Combinando os resultados acima (análises geoquímicas e sensoriamento remoto), podemos concluir que apesar da detecção da chegada da pluma de rejeitos da Samarco no PARNA de Abrolhos, não observamos mudanças nos padrões de transparência das águas superficiais no parque, parâmetro este importante para o desencadeamento de vários processos biológicos inerentes a vida marinha em Abrolhos. Vale ressaltar que o presente trabalho aborda apenas a fração particulada relacionada aos sedimentos em Abrolhos, no Rio Doce e adjacências. O impacto da fração dissolvida não foi alvo do presente estudo mas requer caracterização. Neste caso, um aprofundamento sobre o estudo da bioacumulação de metais e isótopos dissolvidos nas espécies de corais em Abrolhos poderá

ser uma ferramenta importante e complementar na mensuração dos impactos sobre a biota marinha daquele local.

6 REFERÊNCIAS

Aguiar Neto, C. Caracterização Isotópica (Nd-Sr) E Litogeoquímica De Sediamentos Atuais Da Namíbia (África) Implicações Para Proveniência Sedimentar E Potencial Fonte De Aerossol. Dissertação De Mestrado. **Universidade Do Estado Do Rio De Janeiro**, Rio De Janeiro. 2018, 145p

Andronikov, A. V. *et al.* Sm-Nd And Rb-Sr Isotopic Systematics Of The East Antarctic Manning Massif Alkaline Trachybasalts And The Development Of The Mantle Beneath The Lambert-Amery Rift. **Mineralogy And Petrology**, V. 63, P. 243-261, 1998.

Basile, I. *et al.* Patagonian Origin Of Glacial Dust Deposited In East Antarctica (Vostok And Dome C) During Glacial Stages 2,4 And 6. **Earth And Planetary Science Letters**, V. 146, P. 573-589, 1997.

Basu, A. R. *et al.* Nd, Sr-Isotopic Provenance And Trace Element Geochemistry Of Amazonian Foreland Basin Fluvial Sands, Bolivia And Peru: Implications For Andean Orogeny. **Earth And Planetary Science Letters**, N. 100, P. 1-17, 1990.

Bondarenko, I. Idas: A Windows Based Software Package For Cluster Analysis. **Spectrochimica Acta Part B - Atomic Spectroscopy**. V. 51, N.4, P. 441-456, 1996.

Cao, Z., Du, H., Feng, L., Ma, R., Xue, K. Climate And Human Induced Changes In Suspended Particulate Matter Over Lake Hongze On Short And Long Timescales. **Remote Sens. Environ.** 192, 98–113, 2017.

Carlson, R. W. *et al.* Chemical And Isotopic Relationships Between Peridotite Xenoliths And Mafic–Ultrapotassic Rocks From Southern Brazil. **Chemical Geology**, V. 242, P. 415-434, 2007.

Dammshäuser, A. *et al.* Atmospheric Supply Of Al, Fe And Ti To The Atlantic Ocean. **Geophysical Research Abstracts**, V. 13, P. Egu2011-10076, 2011.

Deckart, K. *et al.* Geochemistry And Sr, Nd, Pb Isotopic Composition Of The Central Atlantic Magmatic Province (Camp) In Guyana And Guinea. **Lithos**, V. 82, P. 289-314, February 2005.

Dussin, T. M. Associations Plutono-Volcaniques De L'espinhaço Meridional (Se-Brasil): Un Exemple D'évolution De La Croûte Protérozoïque. **Lab. Geologie Structurale**, Univ. Orléans, Orléans, Tese De Doutorado, 177 P, 1994.

Faure, G. Principles Of Isotope Geology. John Wiley & Sons, United States, P.588, 1986

Ferreira, V. P. *et al.* Contrasting Sources And P-T Crystallization Conditions Of Epidote-Bearing Granitic Rocks, Northeastern Brazil: O, Sr, And Nd Isotopes. **Lithos**, V. 121, P. 189-201, 2011.

- Gangloff, A., Verney, R., Doxaran, D., Ody, A., Estournel, C., 2017. Investigating Rhône River Plume (Gulf Of Lions, France) Dynamics Using Metrics Analysis From Themis 300m Ocean Color Archive (2002–2012). *Cont. Shelf Res.* 144, 98–111.
- Gaudette, H. E. *et al.* Geochronology Of Precambrian Rocks From The Northern Part Of The Guiana Shield, State Of Roraima, Brazil. **Journal Of South American Earth Science**, Vol. 9, Nos 3/4, P. 183-195, 1996.
- Geraldes, M. C. Introdução À Geocronologia. **Sociedade Brasileira De Geociências**, São Paulo, P. 146, 2010.
- Girard, V. A. V. *et al.* Sr Nd Constraints And Trace-Elements Geochemistry Of Selected Paleo And Mesoproterozoic Mafic Dikes And Related Intrusions From The South American Platform: Insights Into Their Mantle Sources And Geodynamic Implications. **Journal Of South American Earth Sciences**, V. 41, P. 65-82, 2013.
- Goldstein, S.J.; Jacobsen, S.B. Nd And Sr Isotopic Systematics Of River Suspended Material: Implications For Crustal Evolution. **Earth Planet. Sci. Lett**, V. 87, P. 249–265, 1988.
- Gonçalves, L., Alkmim, F., Pedrosa-Soares, A.C., Dussin, I.A., Valeriano, C.M., Lana, C., Tedeschi, M.F. Granites Of The Intracontinental Termination Of A Magmatic Arc: An Example From The Ediacaran Araçuaí Orogen, Southeastern Brazil. **Gondwana Res.**, 2015.
- Gorring, M. L. *et al.* Mantle Processes Of Sources Of Neogene Slab Window Magmas From Southern Patagonia, Argentina. **Journal Of Petrology**, V. 42, N. 6, P. 1067-1094, 2001.
- Guarino, V. *et al.* U–Pb Ages, Sr–Nd Isotope Geochemistry, And Petrogenesis Of Kimberlites, Kamafugites And Phlogopite-Picrites Of The Alto Paranaíba Igneous Province, Brazil. **Chemical Geology**. V.353, P. 65-82, 2013.
- Hammer, O. *et al.* Past: Paleontological Statistics Software Package For Education And Data Analysis. **Palaeontologia Electronica**. V. 4, N.1, P 178, 2001.
- Iacumin, M. *et al.* Early Proterozoic Calc-Alkaline And Middle Proterozoic Tholeiitic Dyke Swarms From Central-Eastern Argentina: Petrology, Geochemistry, Sr-Nd Isotopes And Tectonic Implications. **Journal Of Petrology**, V. 42, N. 11, P. 2109-2143, 2001.
- Jambers W. *et al.* Characterization Of Particulate Matter From The Kara Sea Using Electron Probe X-Ray Micro Analysis. **Physicochemical And Engineering Aspects**. V.120, P. 61-75, 1997.
- Lee, Z. P. A Model For The Diffuse Attenuation Coefficient Of Downwelling Irradiance. *Journal Of Geophysical Research*, 110(C2). doi.org/10.1029/2004jc002275, 2005.
- Lucassen, F. *et al.* Pre-Cenozoic Intra-Plate Magmatism Along The Central Andes(17–34°S): Composition Of The Mantle At An Active Margin. **Lithos**, N. 99, P. 312–338, 2007.

- Martins, V.T.S., Teixeira, W., Noce, C.M., Pedrosa-Soares, A.C. Sr And Nd Characteristics Of Brasiliano-Pan African Granitoid Plutons Of The Araçuaí Orogen, Southeastern Brazil: Tectonic Implications. **Gondwana Research**, 7: 75-89, 2004.
- Nalini, H.A., Bilal, E., Paquette, J.L., Pin, C., Machado, R. Geochronologie U Pb Et Géochimie Isotopique Sr-Nd Des Granitoides Neoproterozoïques Des Suites Galileia Et Urucum, Vallée Du Rio Doce, Sud-Est Du Brésil. **Compte Rendu Academie Science Paris**, 331: 459-466, 2000.
- Nechad, B., Ruddick, K.G., Park, Y.. Calibration And Validation Of A Generic Multisensor Algorithm For Mapping Of Total Suspended Matter In Turbid Waters. **Remote Sens. Environ.** 114, 854–866, 2010.
- Neto, C.C.A. *et al.* Composição Isotópica Do Sr No Padrão Nbs987 E Nos Padrões De Rocha Do Usgs Bcr-1, Agv-1, G-2 E Gsp-1: Resultados Preliminares Obtidos Por Tims No Laboratório De Geocronologia E Isótopos Radiogênicos – Lagir – Uerj, Rio De Janeiro. Simpósio 45 Anos De Geocronologia No Brasil – Cpgeo- Igc – Usp. **Boletim De Resumos Expandidos**, P. 72-74, 2009.
- Novo, T., Pedrosa-Soares, A.C., Noce, C.M., Alkmim, F.F., Dussin, I. Rochas Charnockíticas Do Sudeste De Minas Gerais: A Raiz Granulítica Do Arco Magmático Do Orógeno Araçuaí. **Revista Brasileira De Geociências**, 40(4): 573-592, 2010.
- Parada, M. A. *et al.* Multiple Sources For The Coastal Batholith Of Central Chile (31–34°S): Geochemical And Sr–Nd Isotopic Evidence And Tectonic Implications. **Lithos**, V. 46, P. 505-521, 1999.
- Pimentel, M. M. *et al.* Shrimp U-Pb Age And Sr-Nd Isotopes Of The Morro Do Baú Mafic Intrusion: Implications For The Evolution Of The Arenópolis Volcano-Sedimentary Sequence, Goiás Magmatic Arc. **Annals Of The Brazilian Academy Of Sciences**, V. 75, N. 3, P. 331-339, 2003.
- Rocha-Júnior, E. R. V. Sr-Nd-Pb Isotopic Constraints On The Nature Of The Mantle Sources Involved In The Genesis Of The High-Ti Tholeiites From Northern Paraná Continental Flood Basalts (Brazil). **Journal Of South American Earth Sciences**, V. 46, P. 9-25, March 2013.
- Santos, H. N.; Neumann, R.; Ávila, C. A. Mineral Quantification With Simultaneous Refinement Of Ca-Mg Carbonate Non-Stoichiometry By X-Ray Diffraction, Rietveld Method. **Minerals**, 7, 164, 2017.
- Silva, D. R. A. *et al.* Whole-Rock Geochemistry And Sr E Nd Isotopic Composition Of The Pre-Rift Sequence Of The Camamu Basin, Northeastern Brazil. **Journal Of South American Earth Sciences**, N. 39, P. 59-71, 2012.
- Teixeira, W., Carneiro, M., Noce, C., Machado, N., Sato, K and Taylor, P. Pb, Sr And Nd Isotope Constraints On The Archean Evolution Of Gneissic Granitoid Complexes In The Southern São Francisco Craton, Brazil. **Precam Research** 78: 151-164, 1996a.
- Valeriano, C.M. *et al.* A New Tims Laboratory Under Construction In Rio De Janeiro, Brazil. In: Iv South American Symposium On Isotope Geology, Salvador. **Short Papers Iv South American Symposium On Isotope Geology**. Salvador, V. 1, P. 131-133, 2003.

Valeriano, C. M. *et al.* The Neodymium Isotope Composition Of The Jndi-1 Oxide Reference Material: Results From The Lagir Laboratory, Rio De Janeiro. In: Vi South American Symposium On Isotope Geology, 2008, San Carlos De Bariloche. **Proceedings Of The Vi South American Symposium On Isotope Geology**, V. 1. P. 1-2, 2008

Walter, A. V. *et al.* Rare-Earth Elements And Isotopes (Sr, Nd, O, C) In Minerals From The Juquiti Carbonatite (Brazil): Tracers Of A Multistage Evolution. **Chemical Geology**, N. 120 P. 27-44, 1995.

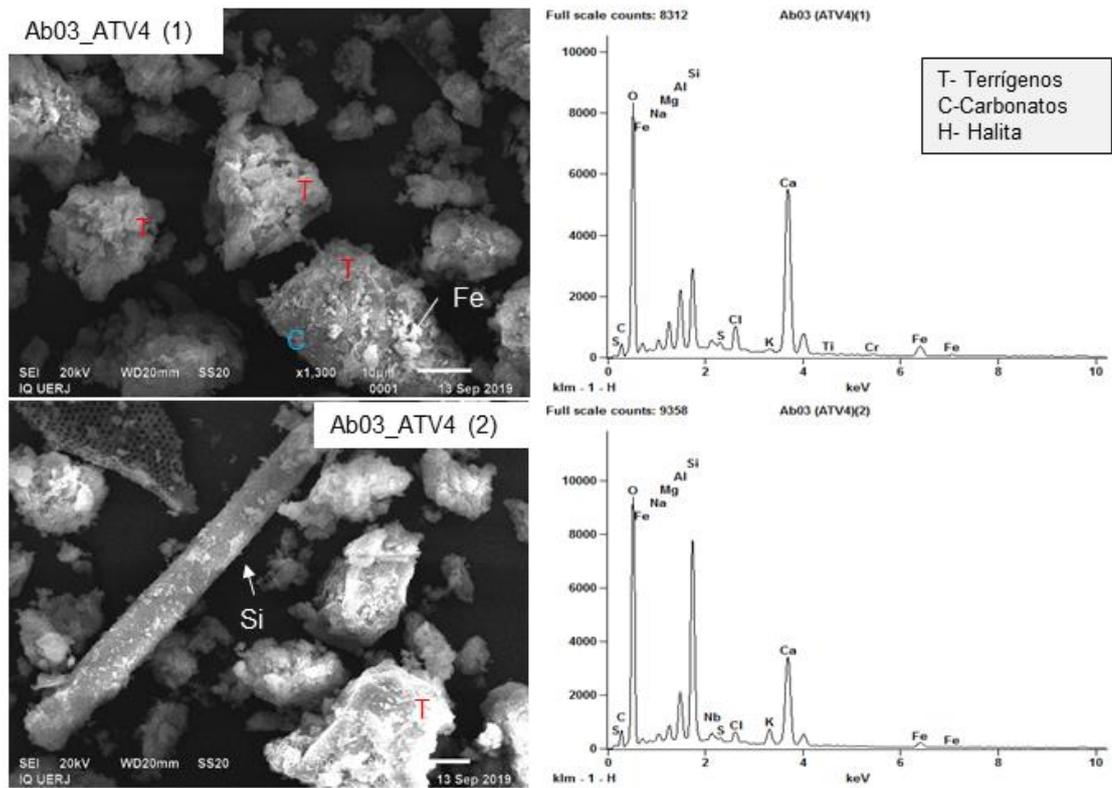
Walter, H. J. W. *et al.* Provenance And Transport Of Terrigenous Sediment In The South Atlantic Ocean And Their Relations To Glacial And Interglacial Cycles : Nd And Sr Isotopic Evidence. **Geochimica Et Cosmochimica Acta**, V. 64 N. 22, P. 3813–3827, 2000.

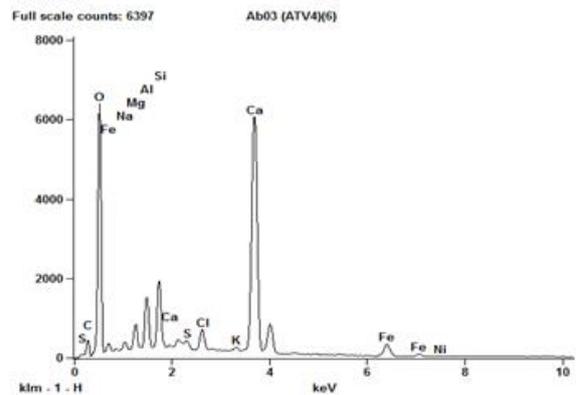
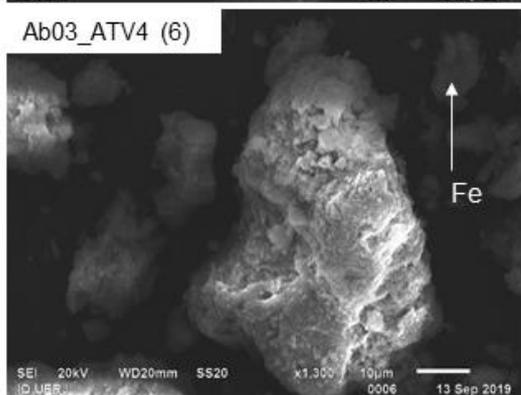
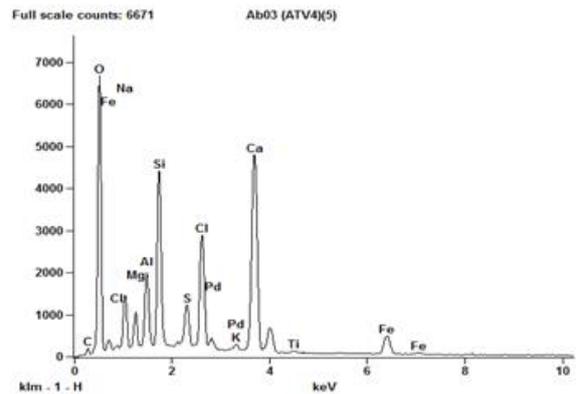
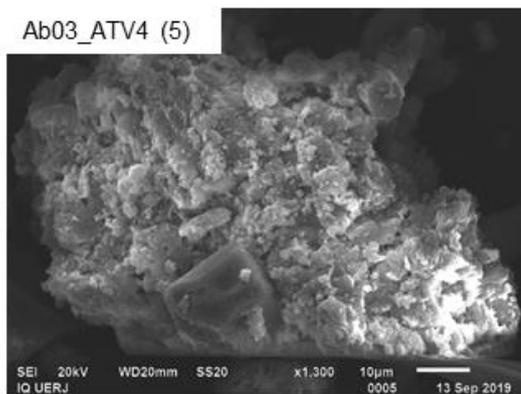
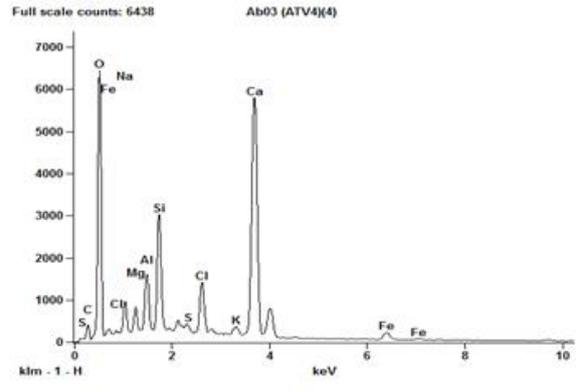
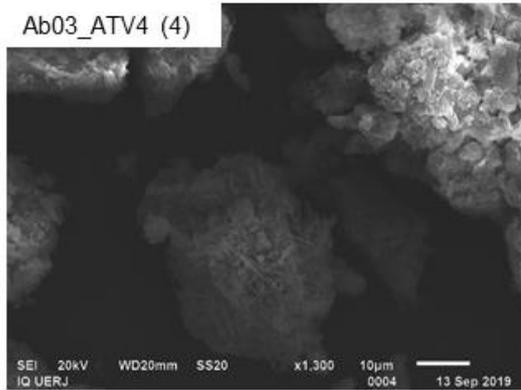
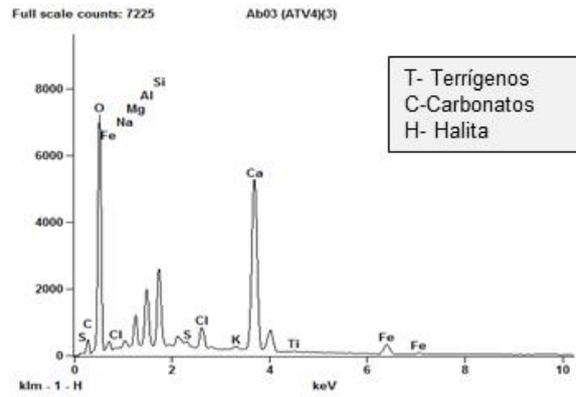
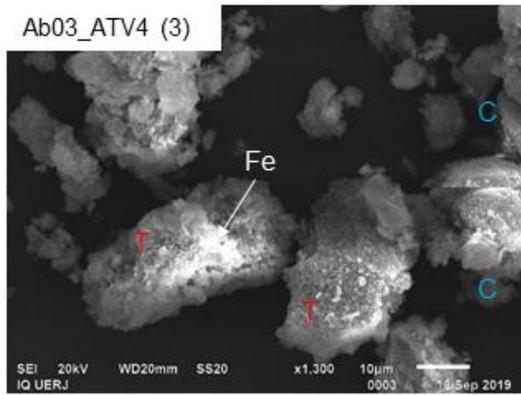
Young, D. N. *et al.* Geochemical And Sr-Nd Isotopic Mapping Of Source Provinces For The Mawson Charnockites, East Antarctica: Implications For Proterozoic Tectonics And Gondwana Reconstruction. **Precambrian Research**, V. 86, P. 1-19, 1997.

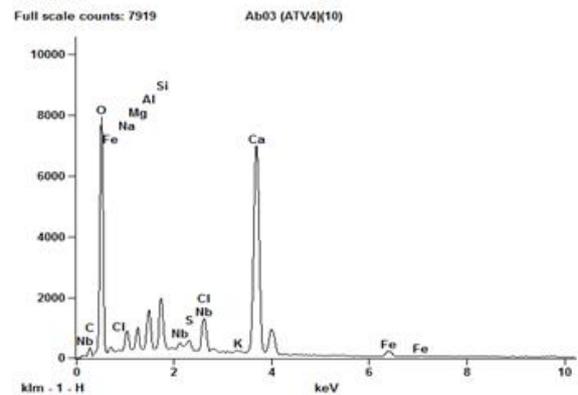
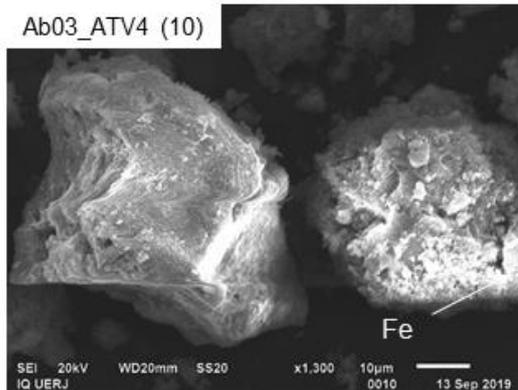
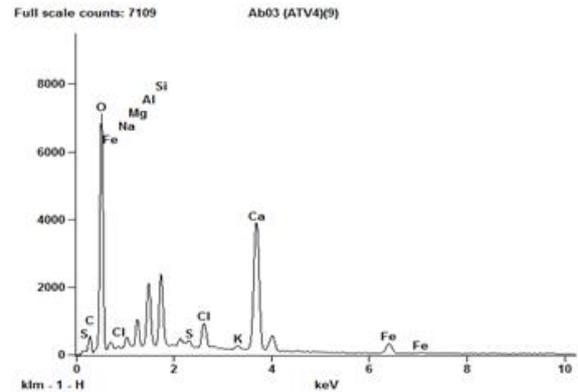
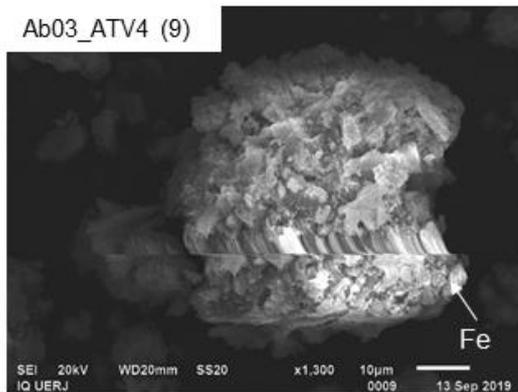
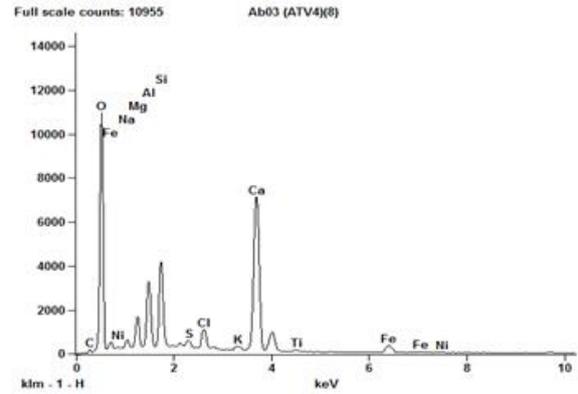
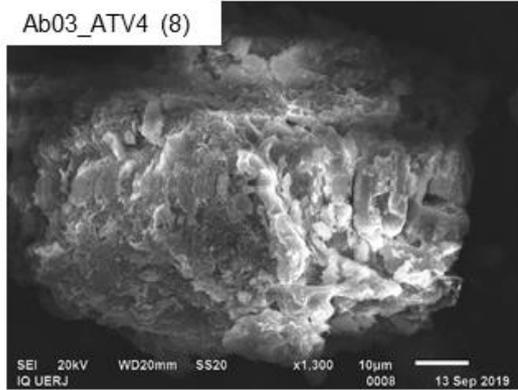
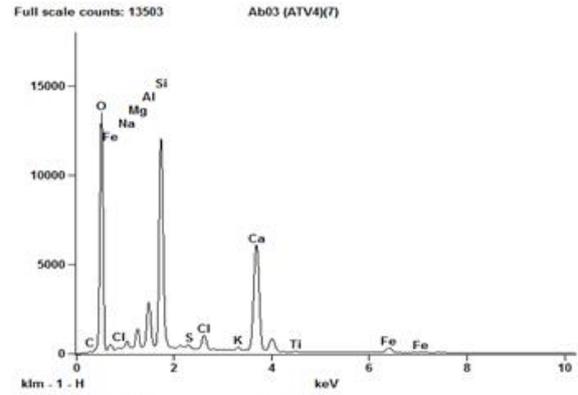
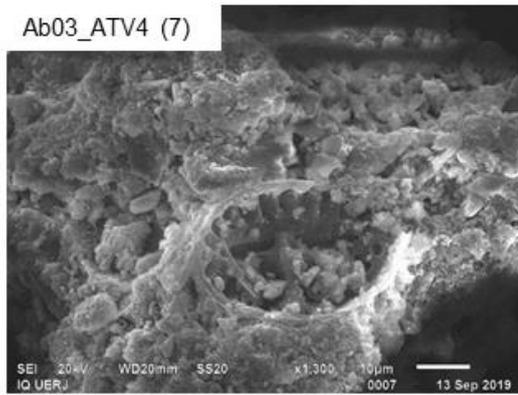
7 APÊNDICE

7.1 IMAGENS E ESPECTROS MEV-EDS E DRX

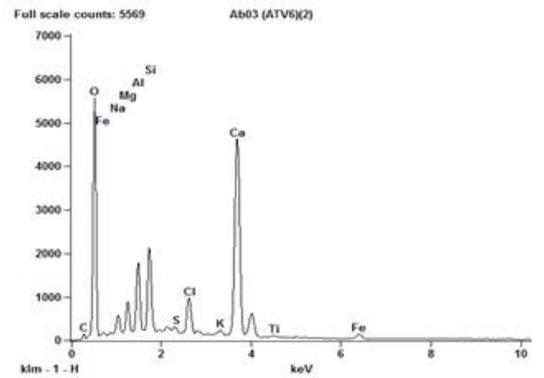
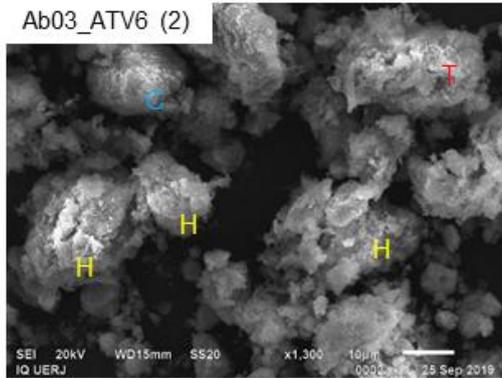
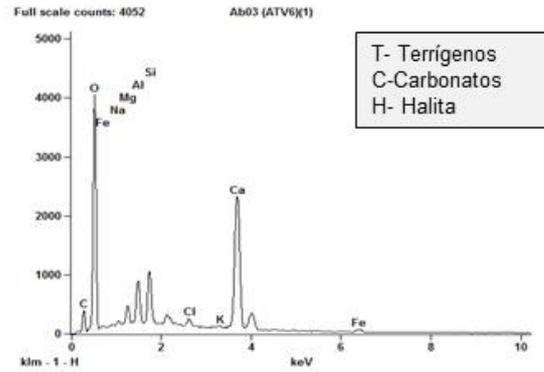
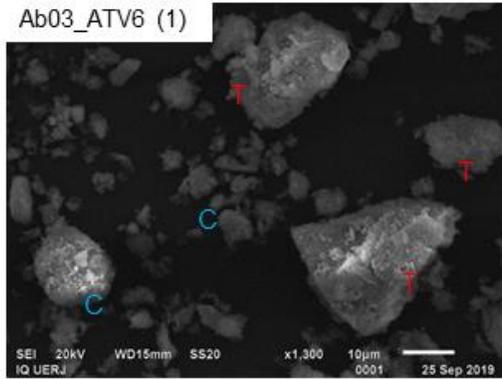
Amostra Ab03- ATV 4 (coleta maio/19)

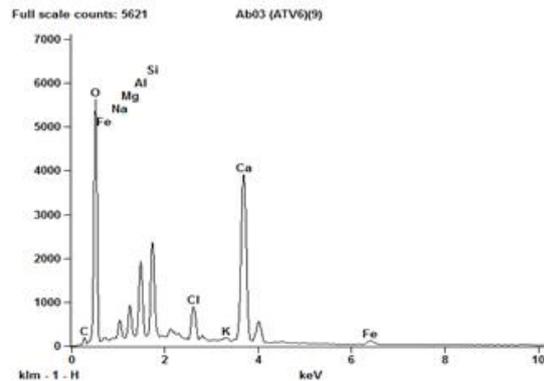
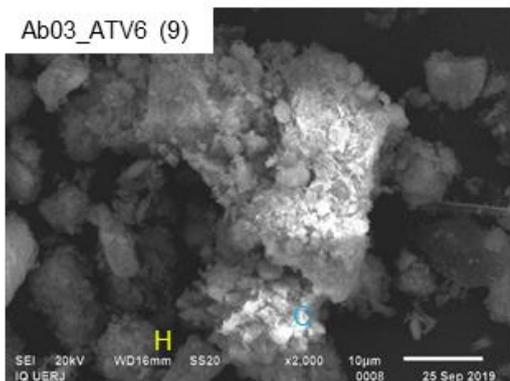
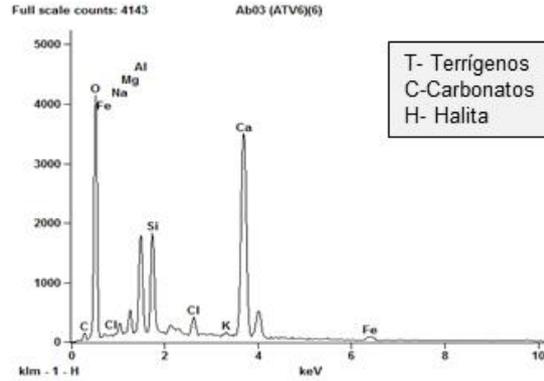
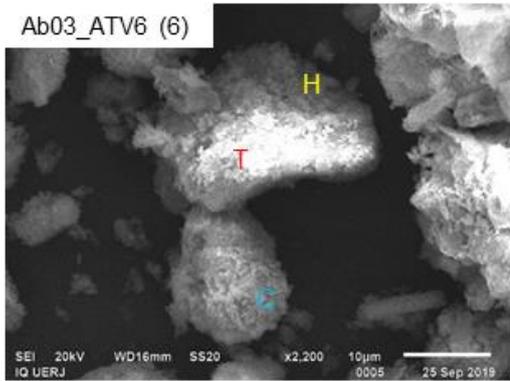
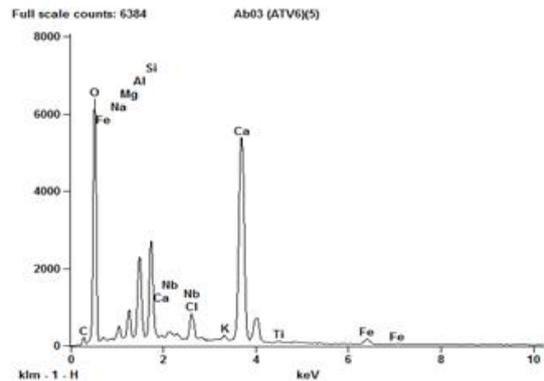
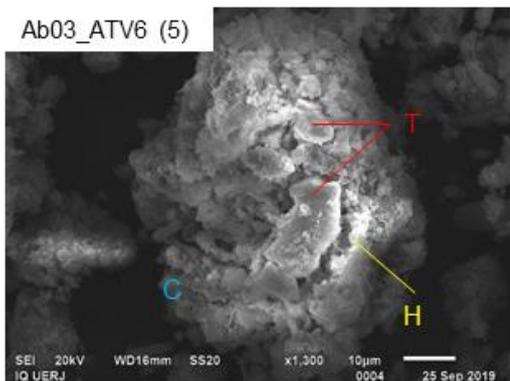
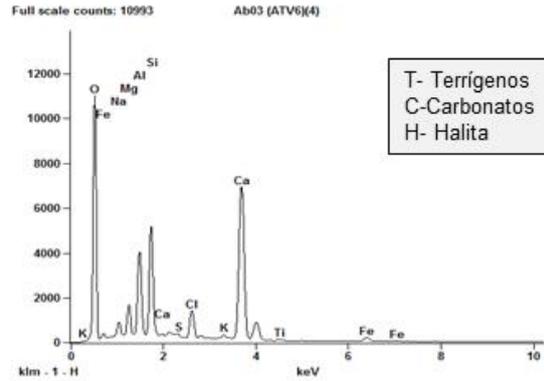
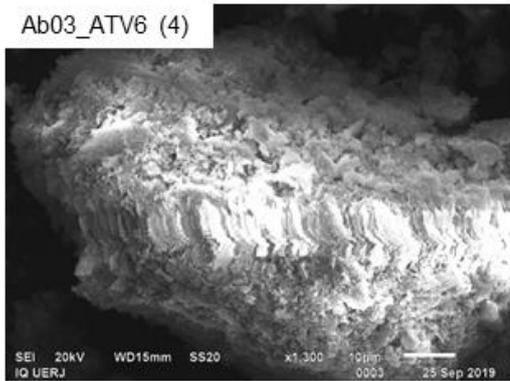




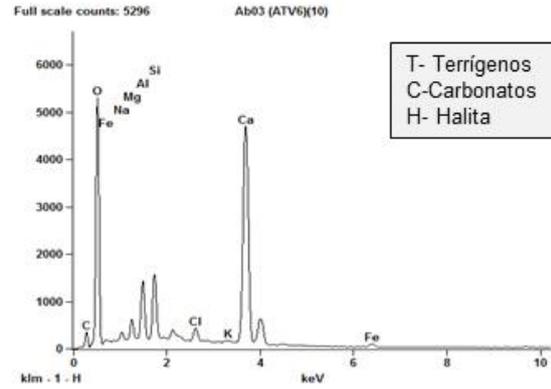
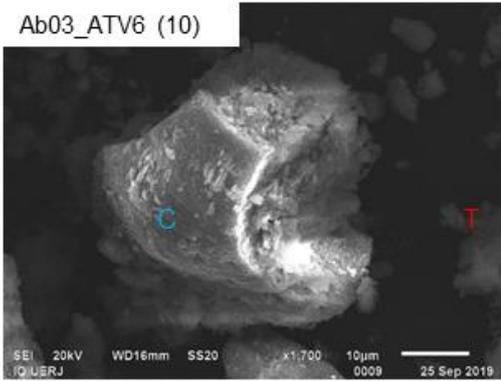


Amostra Ab03-ATV6 (coleta agosto/19)

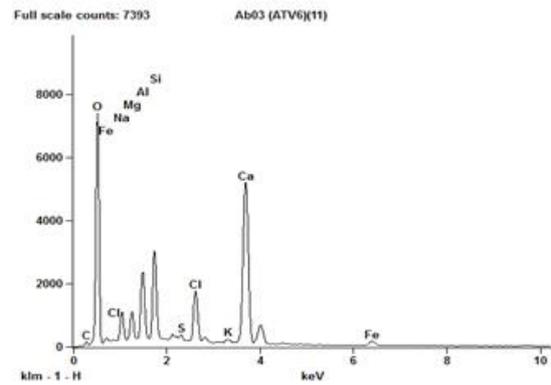
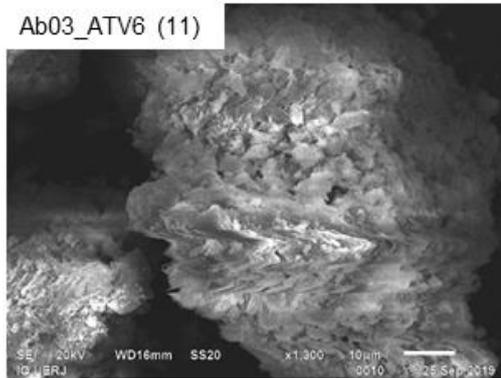




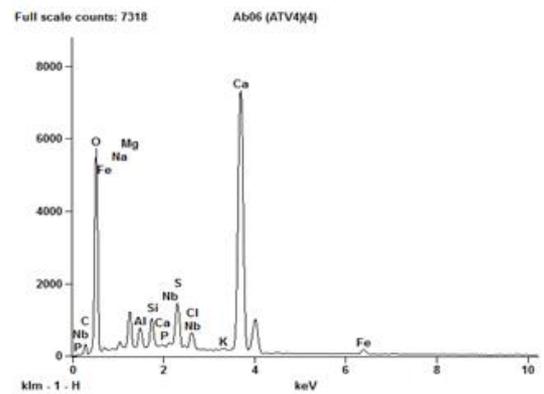
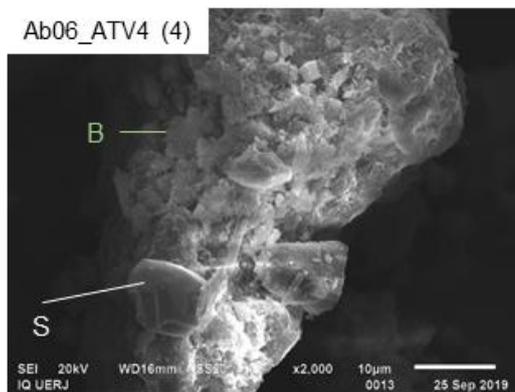
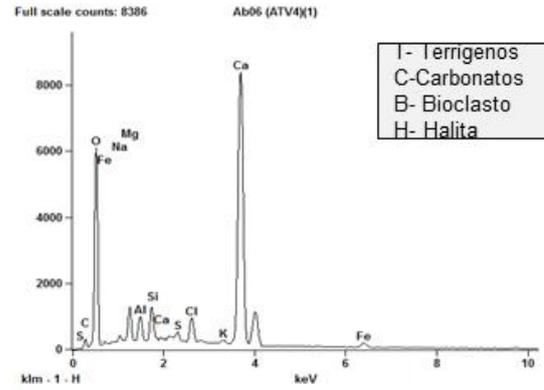
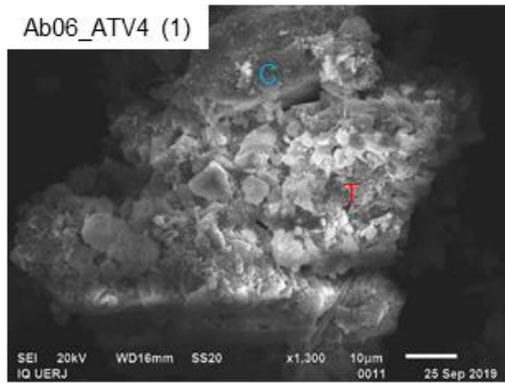
Ab03_ATV6 (10)

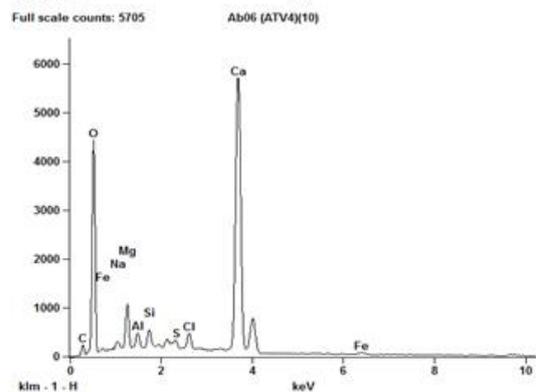
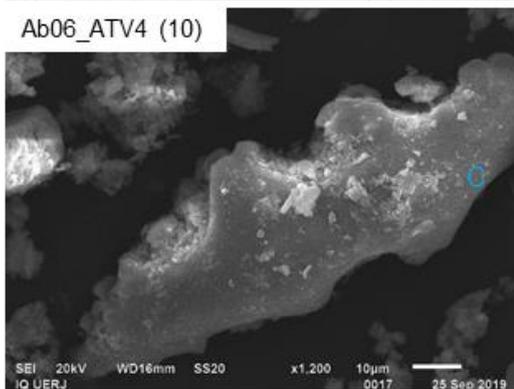
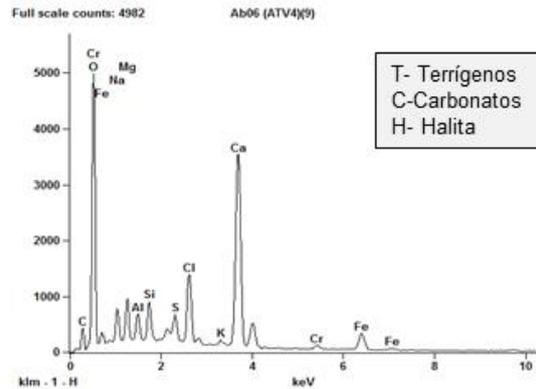
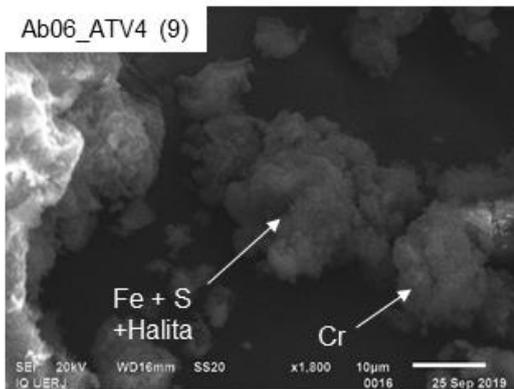
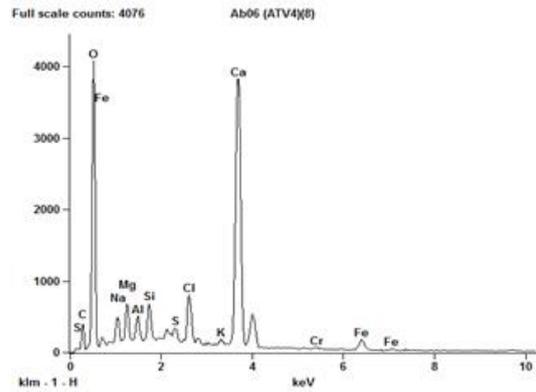
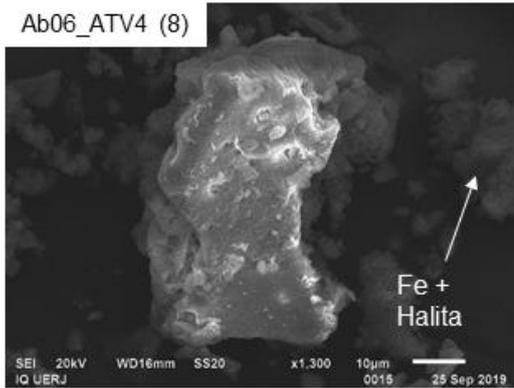
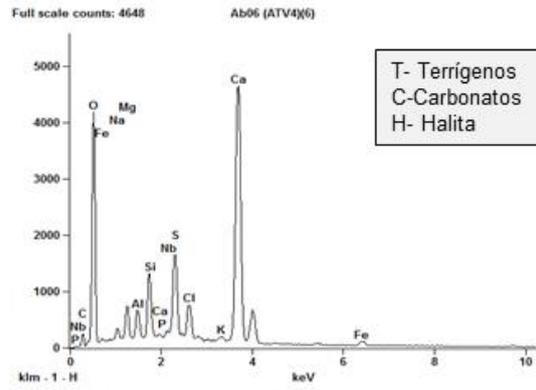
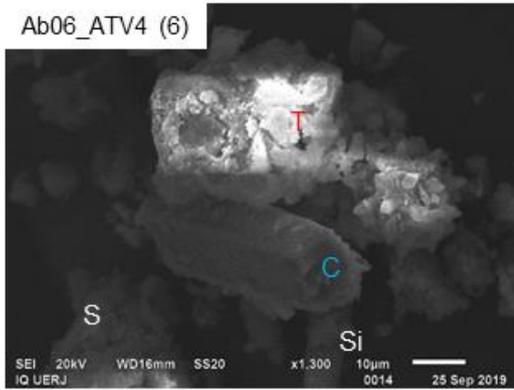


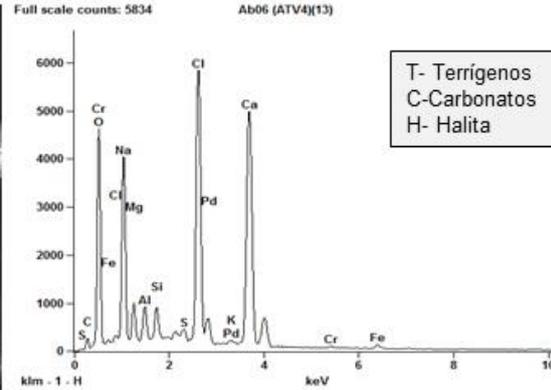
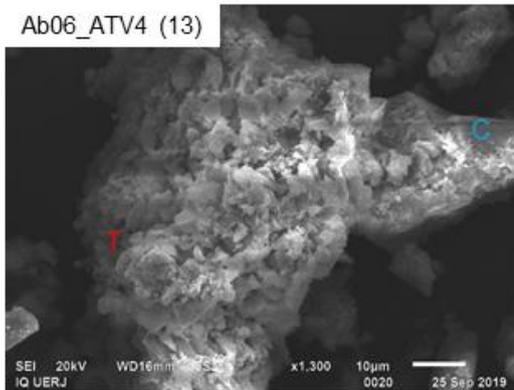
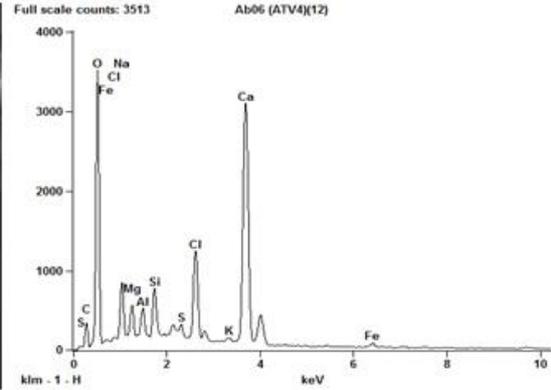
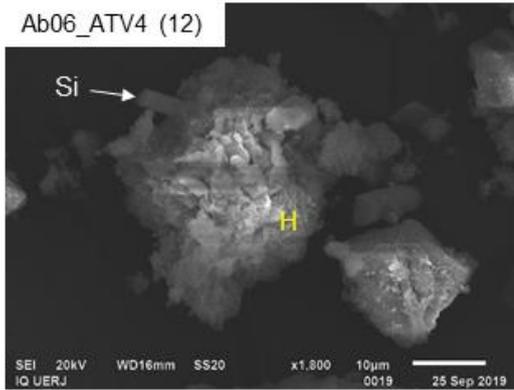
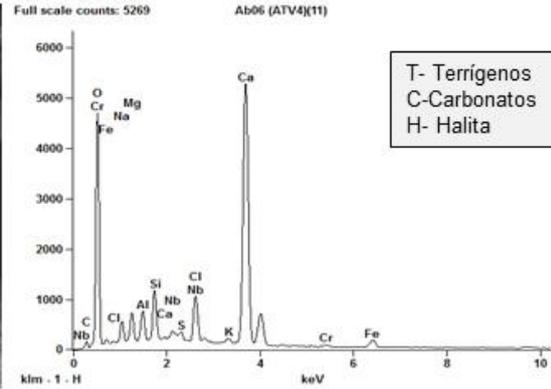
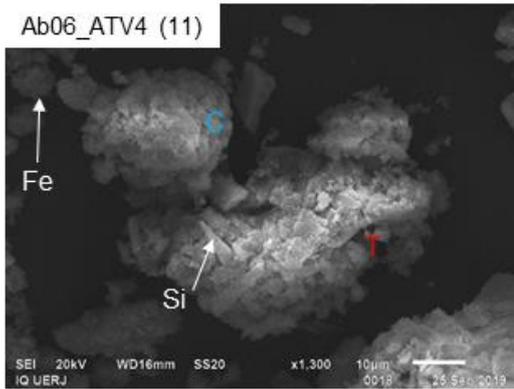
Ab03_ATV6 (11)



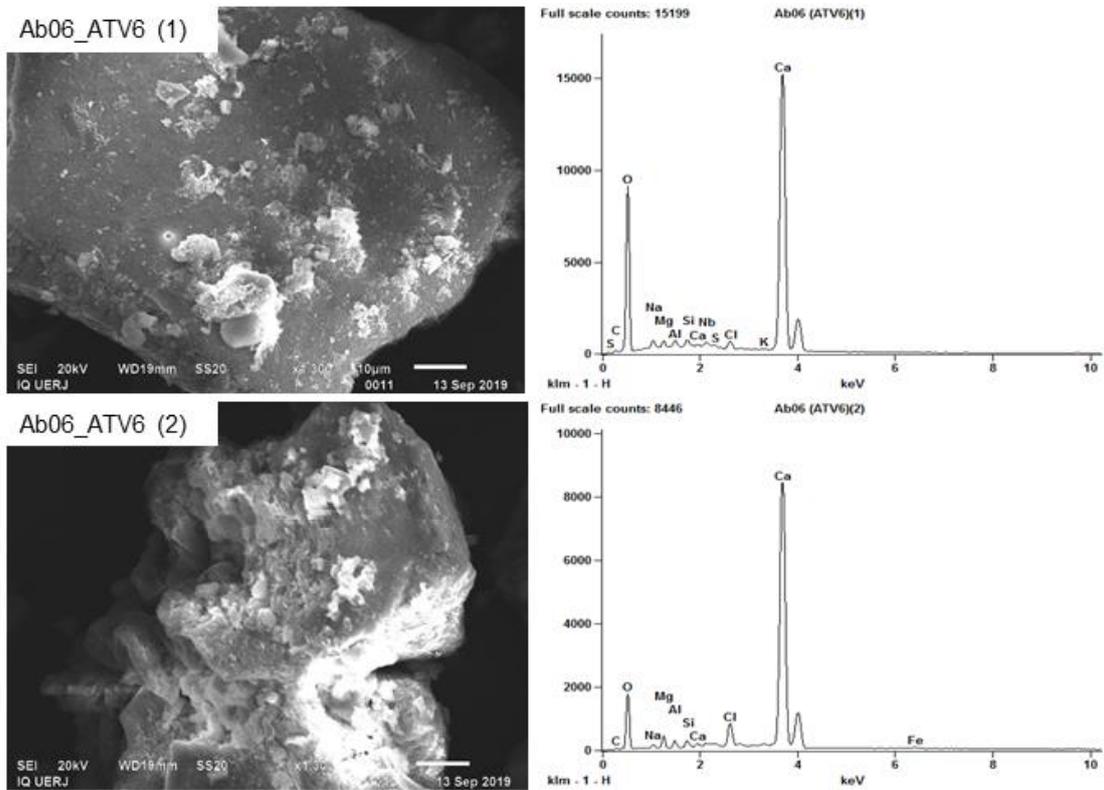
Amostra Ab06-ATV4 (coleta em maio/19)

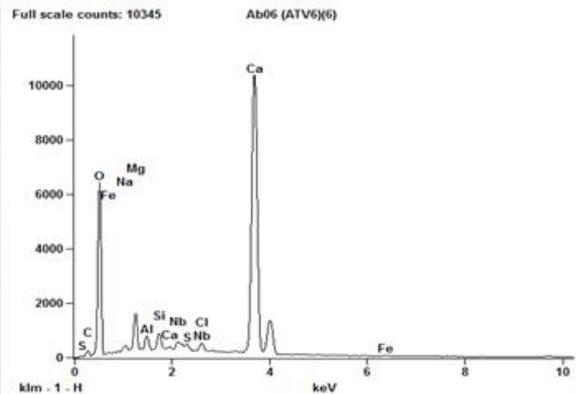
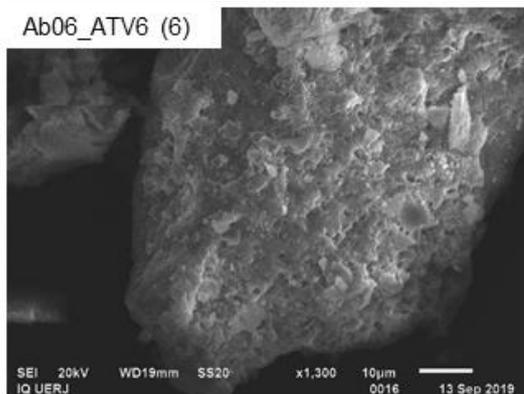
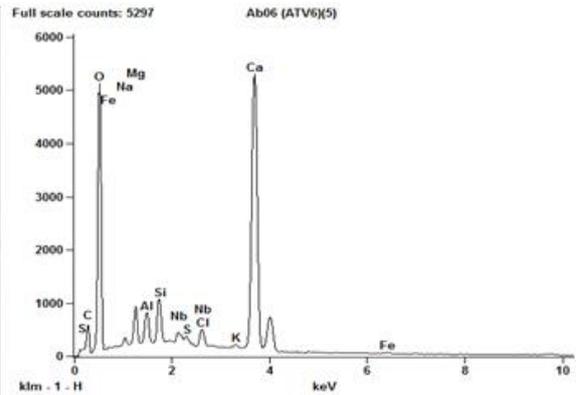
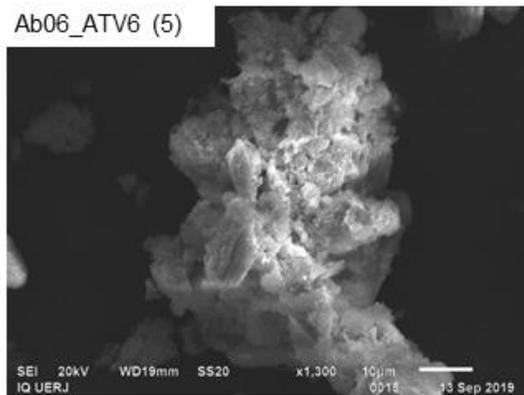
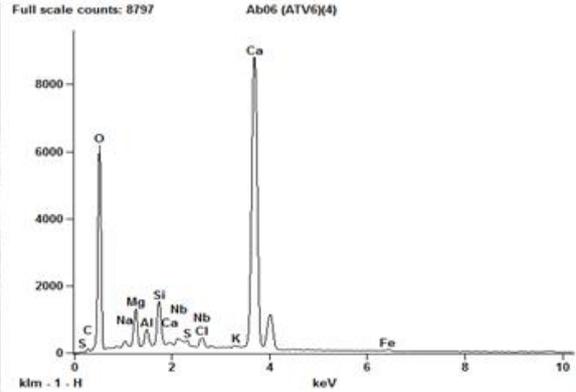
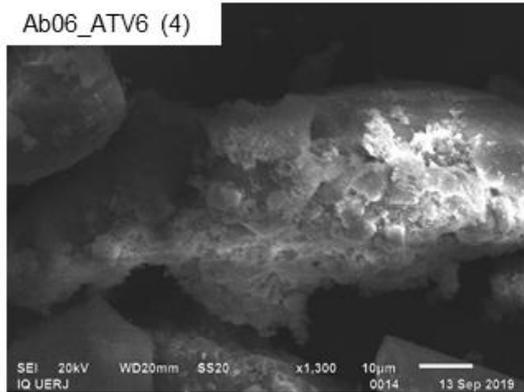
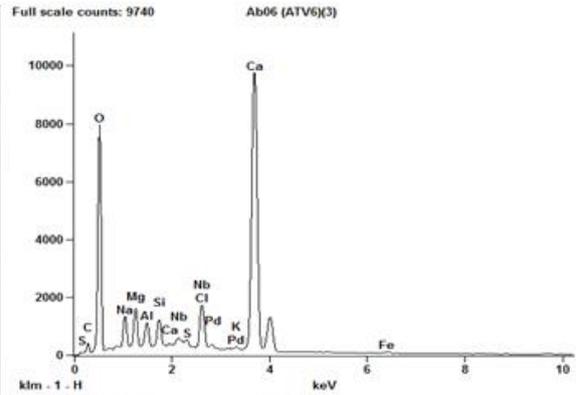
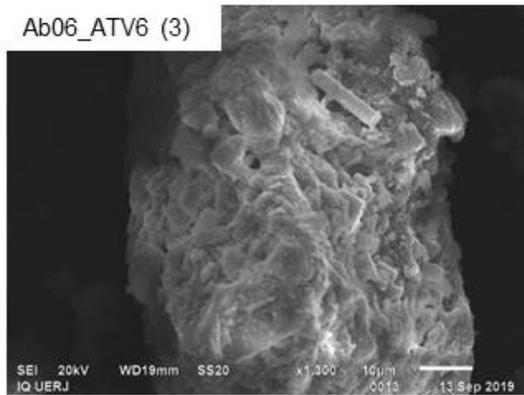


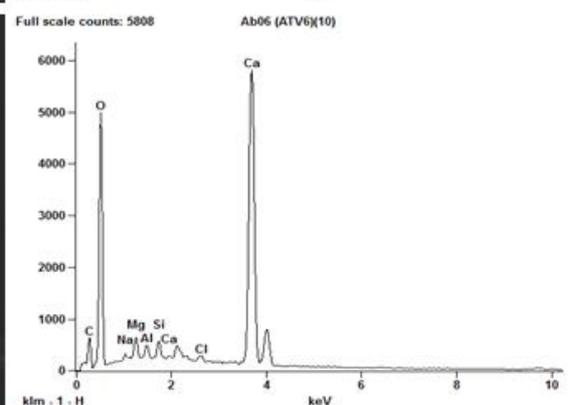
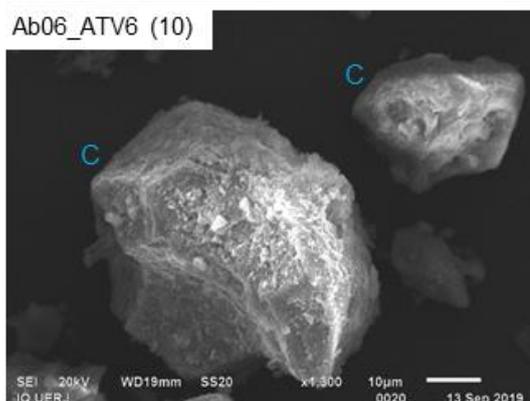
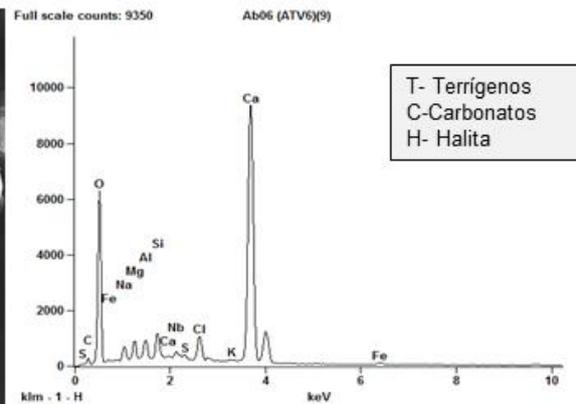
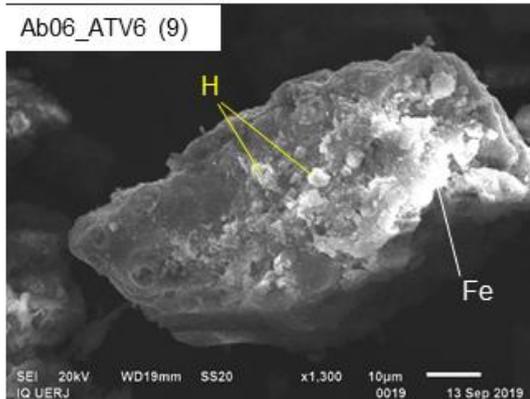
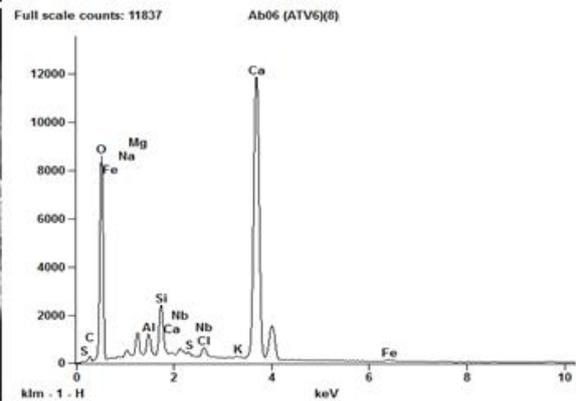
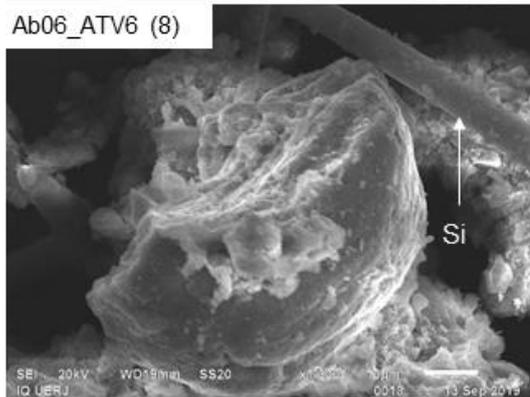
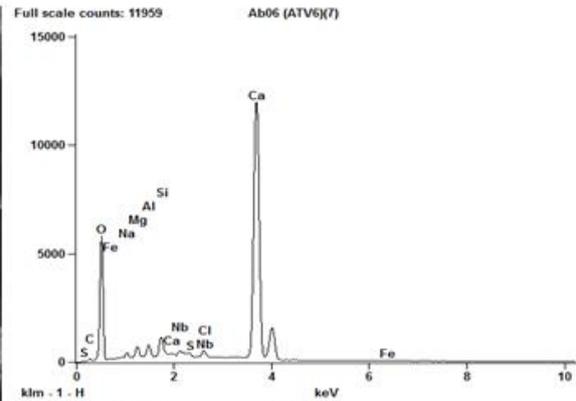
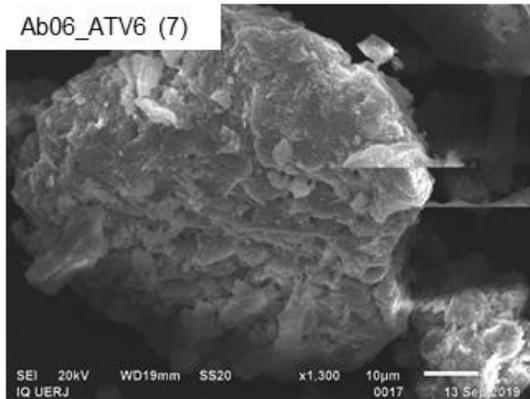




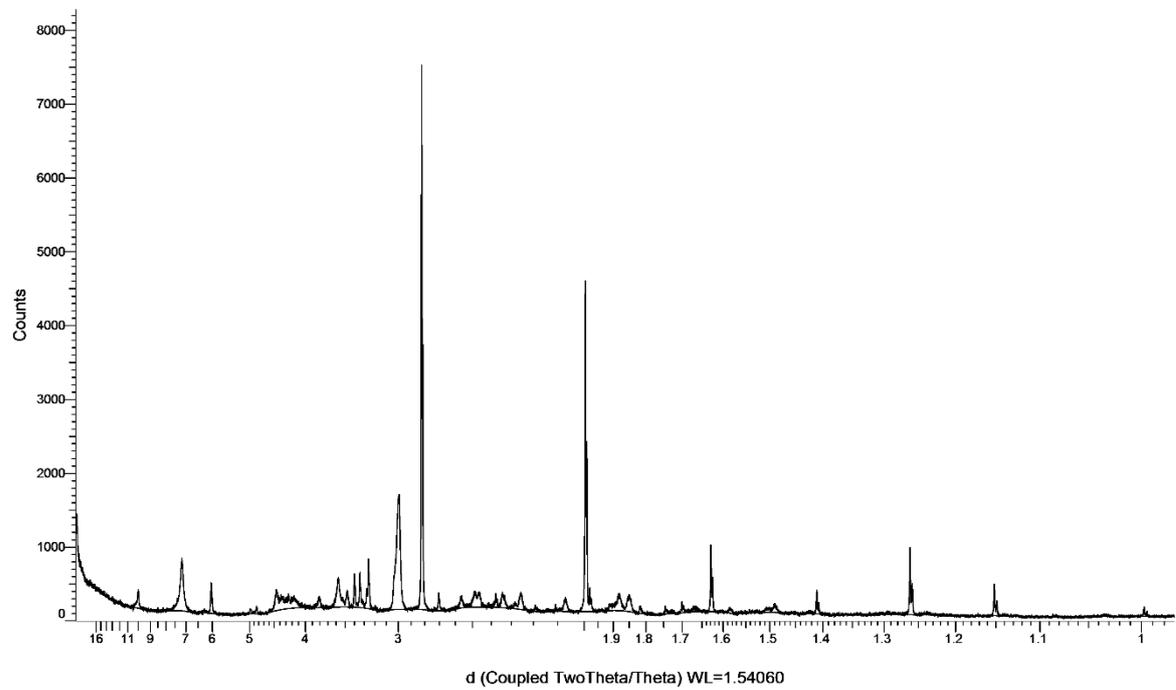
Amostra Ab06-ATV6 (coleta em agosto/19)



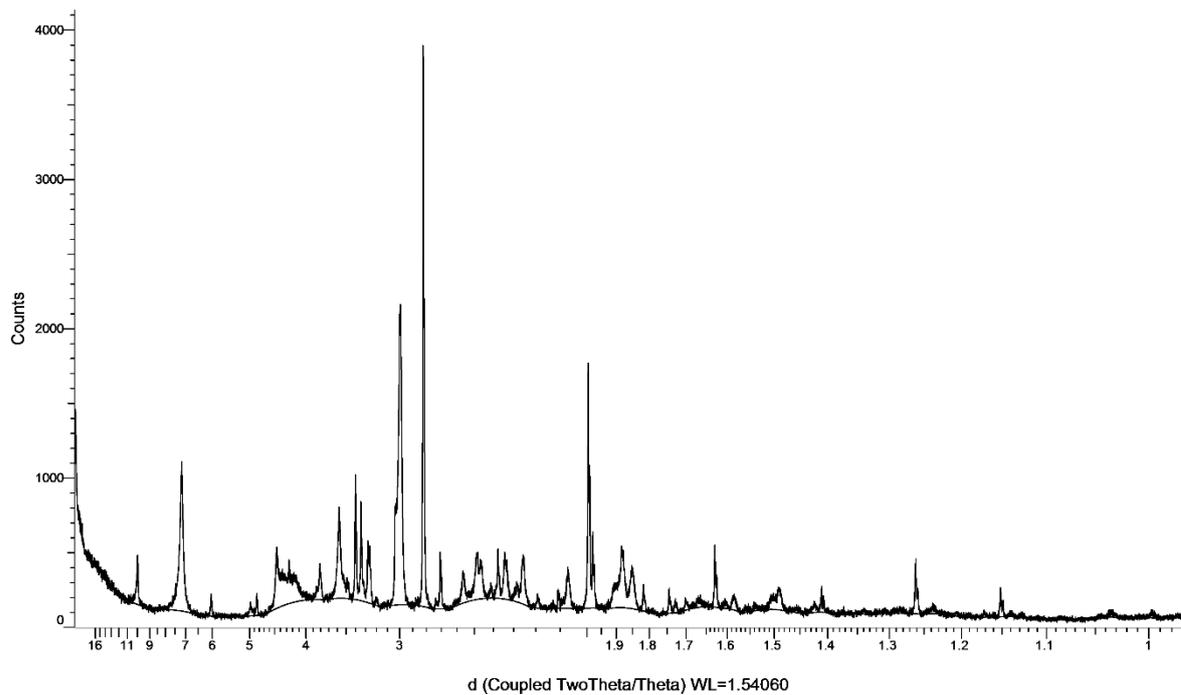




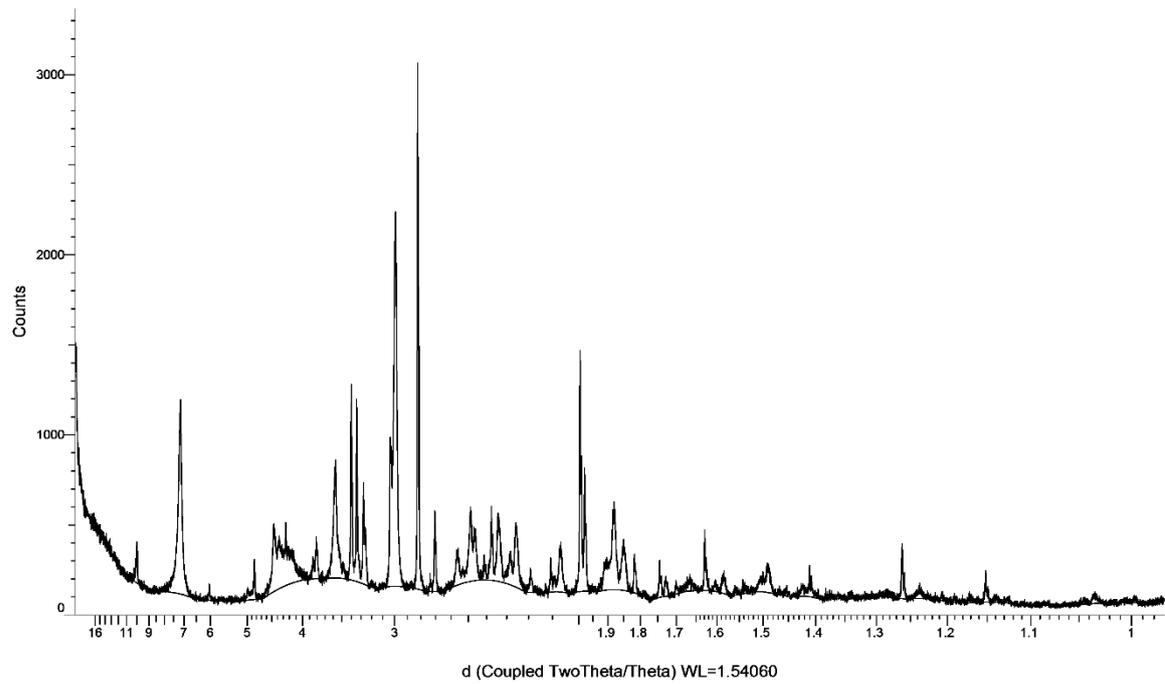
Ab- 01- ATV4 (Coupled TwoTheta/Theta)



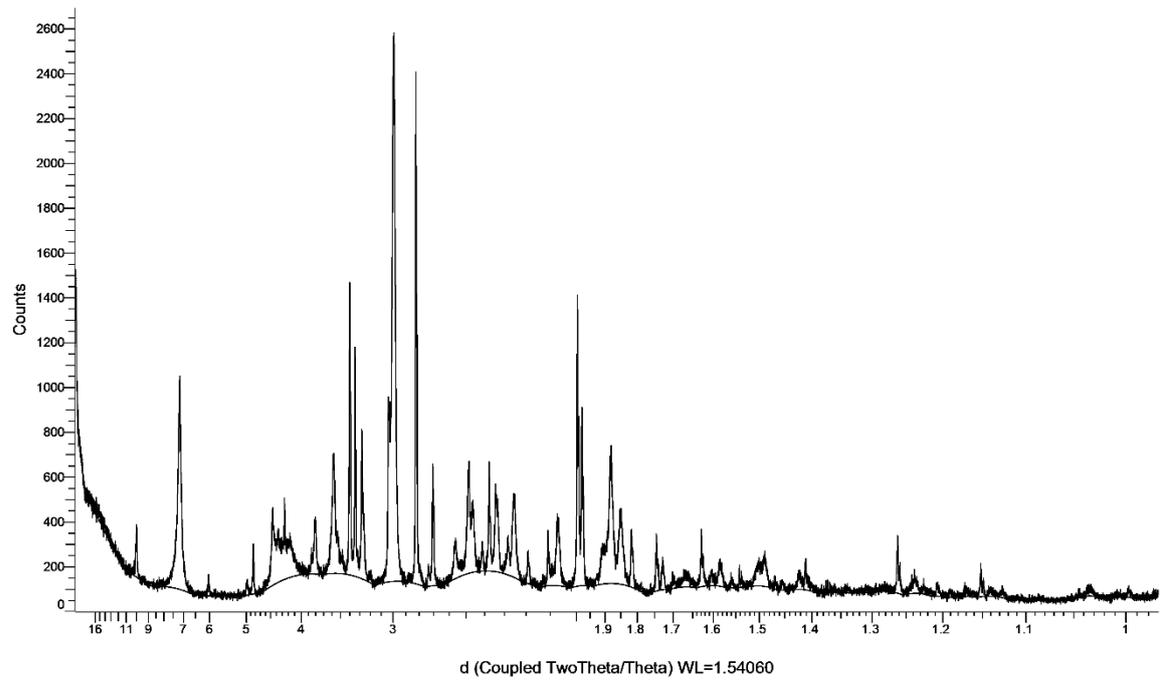
Ab- 01- ATV5 (Coupled TwoTheta/Theta)



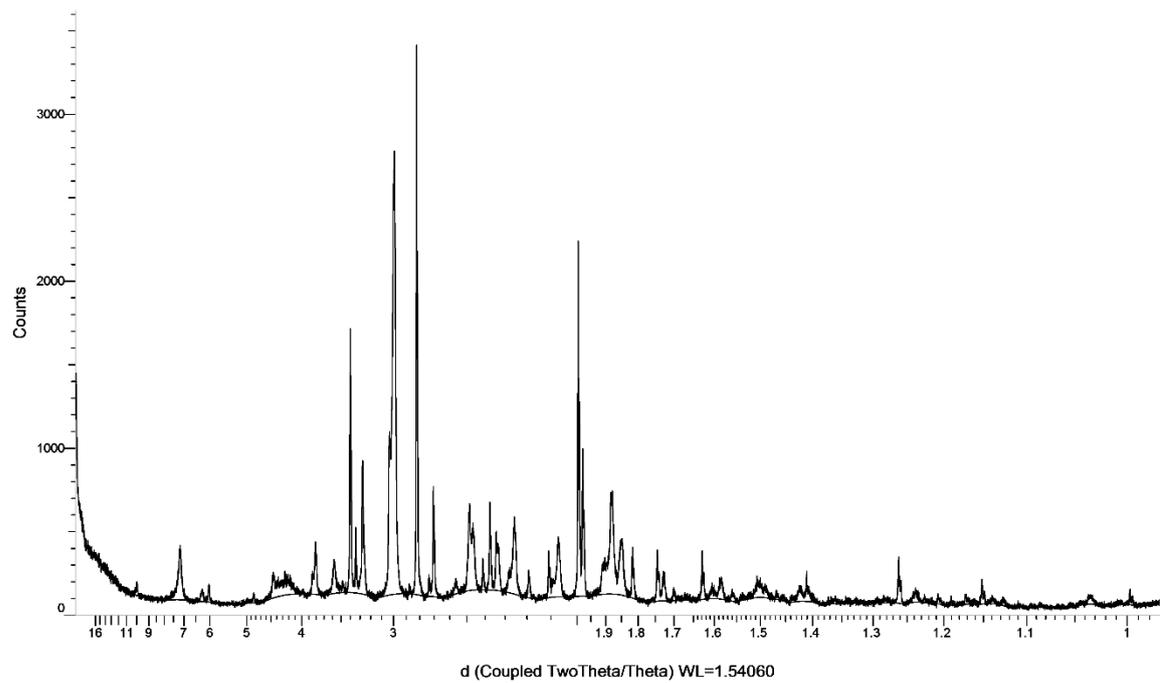
Ab- 02 ATV5 reanalise (Coupled TwoTheta/Theta)



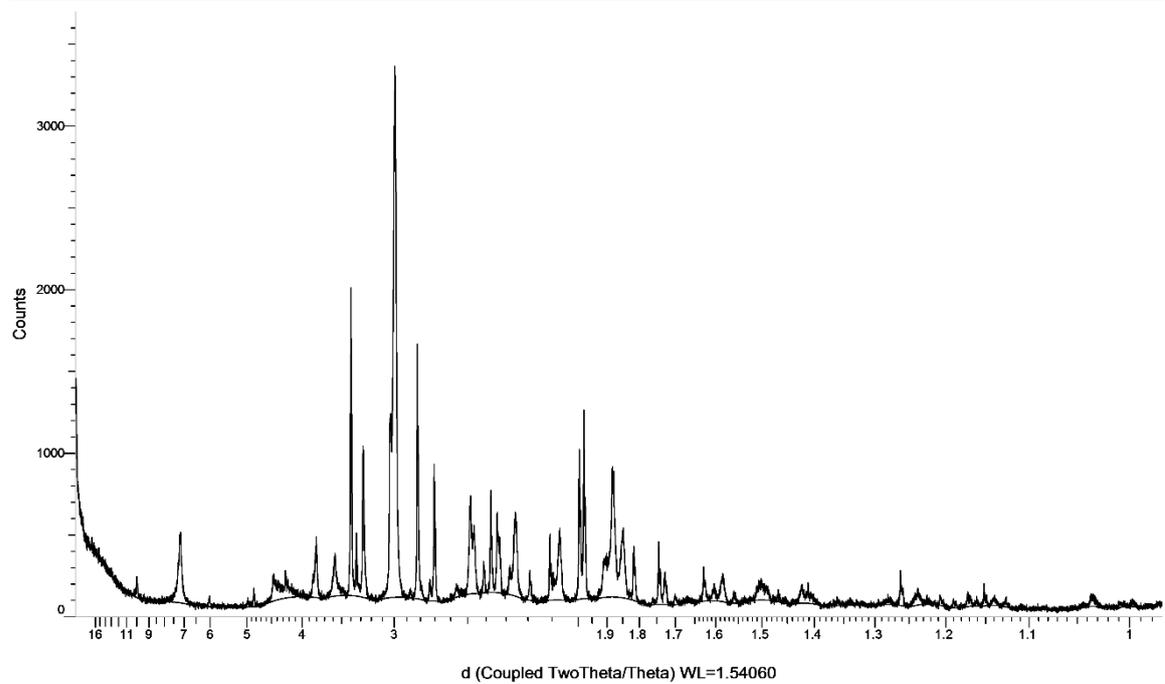
Ab- 02- ATV 6 (Coupled TwoTheta/Theta)



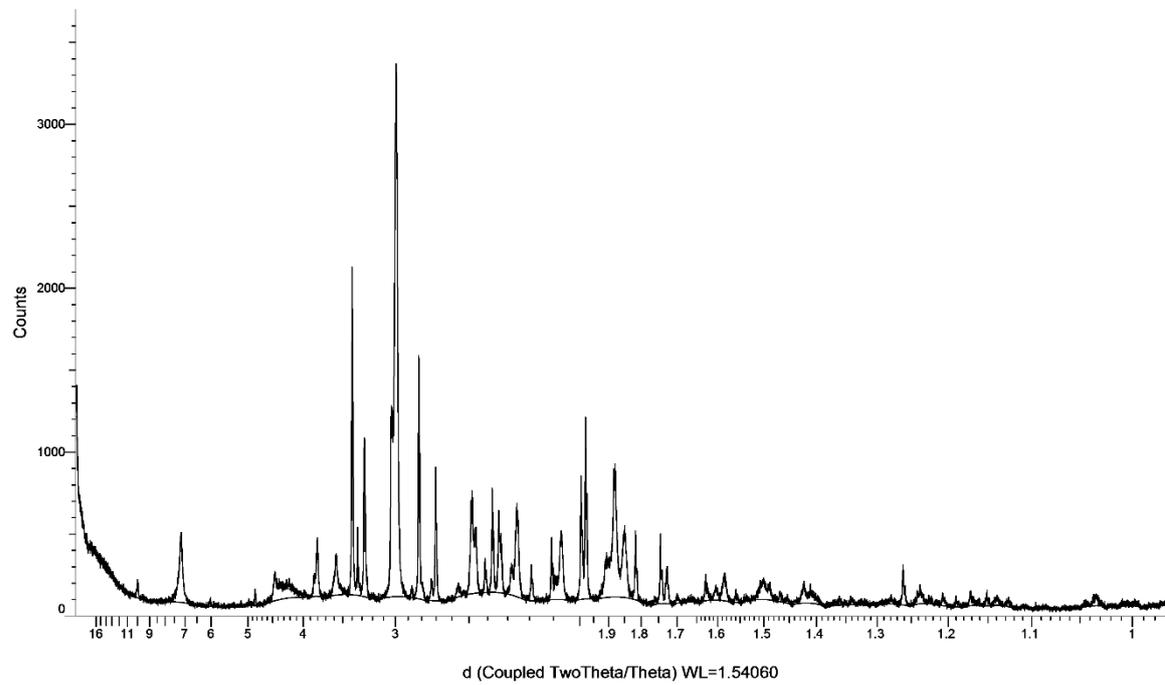
Ab- 03- ATV4 (Coupled TwoTheta/Theta)



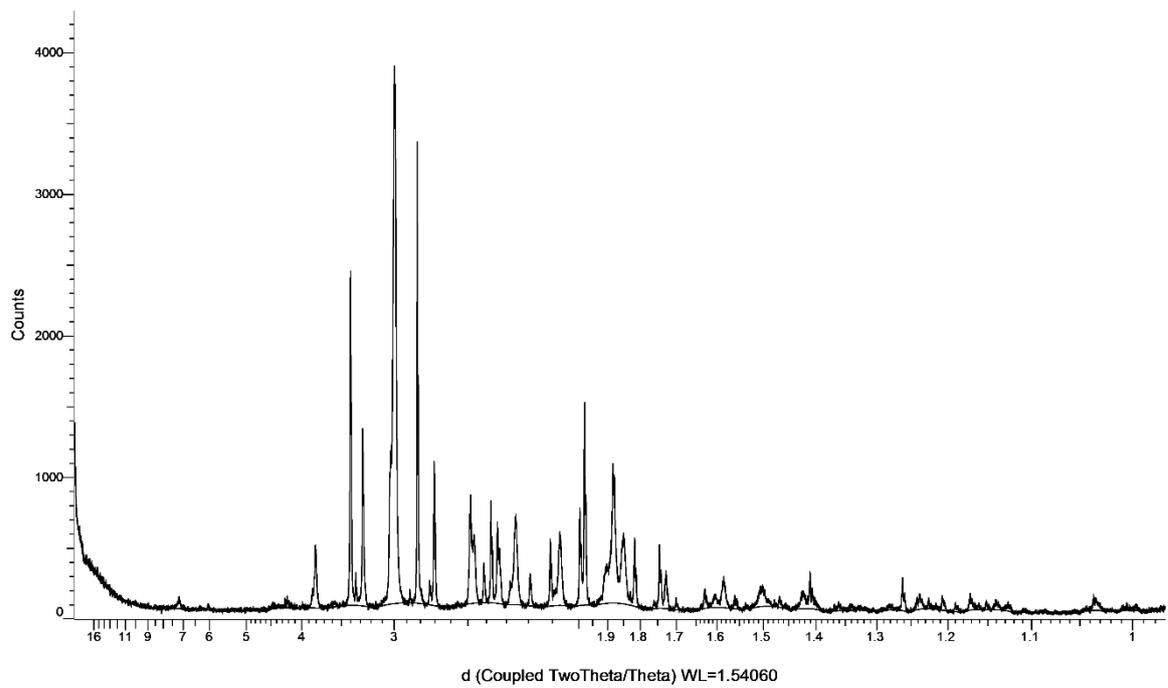
Ab- 03- ATV 5 (Coupled TwoTheta/Theta)



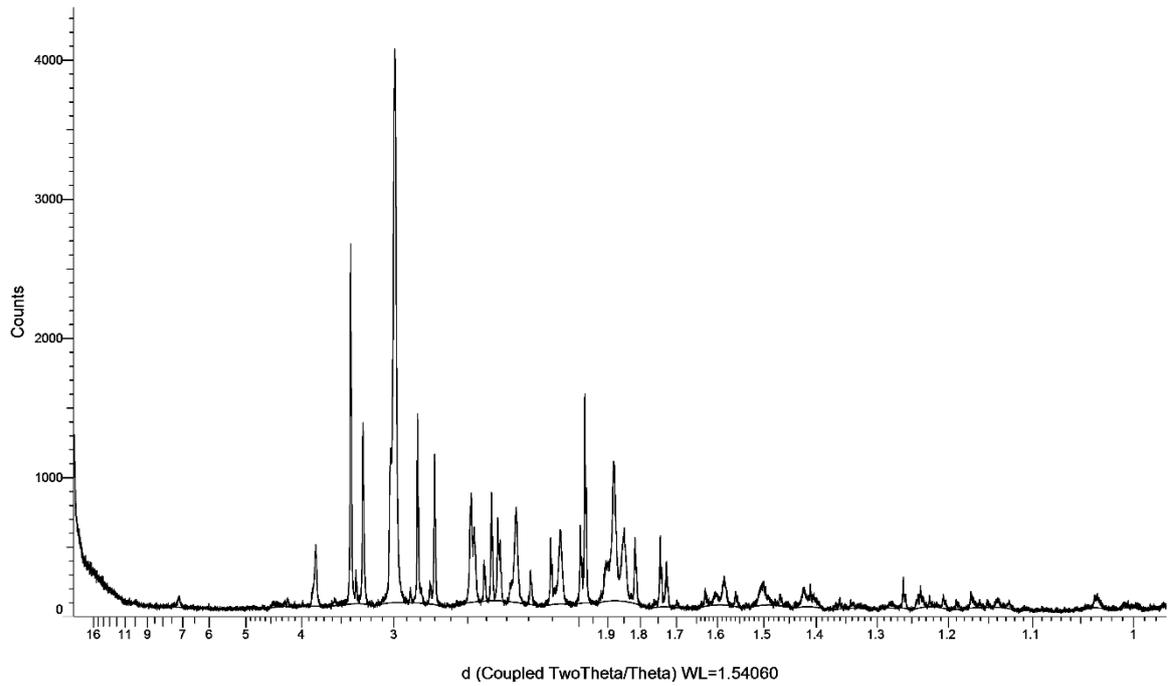
Ab- 03- ATV 6 (Coupled TwoTheta/Theta)



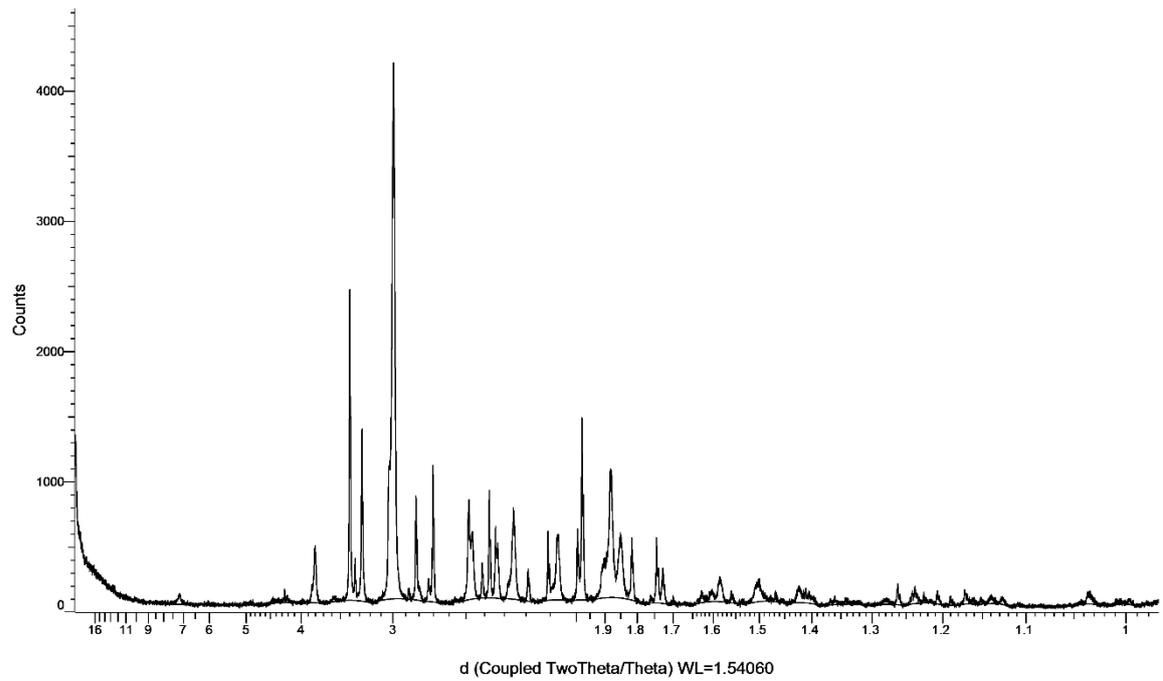
Ab- 04- ATV 4 (Coupled TwoTheta/Theta)



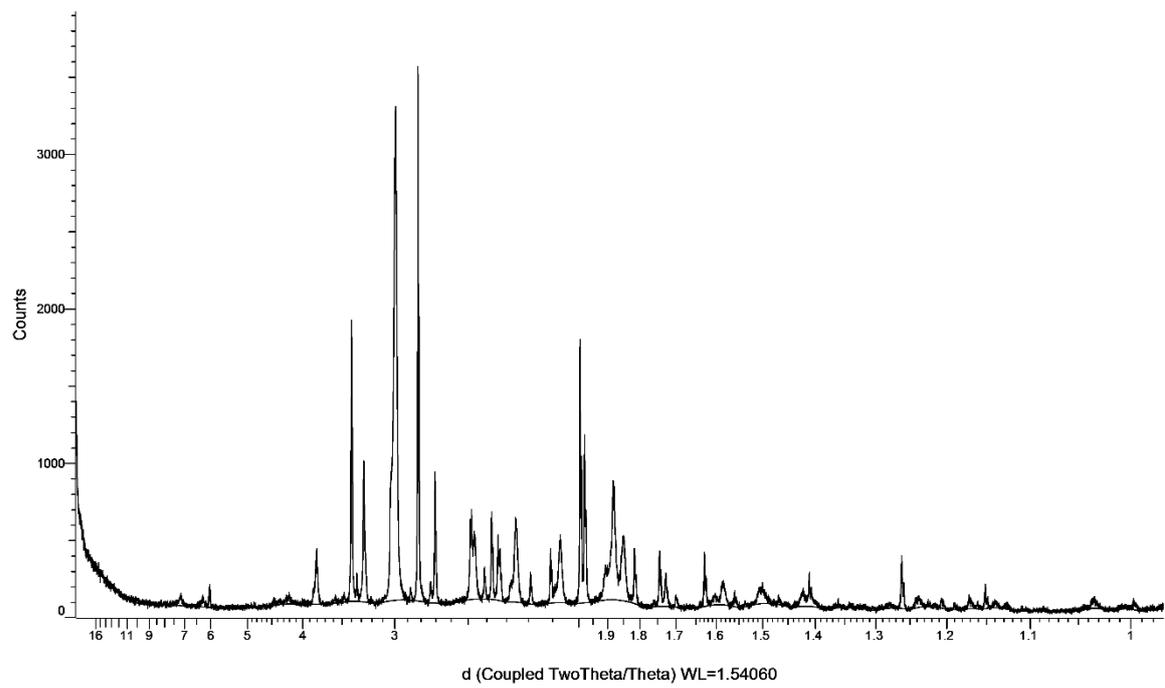
Ab-04- ATV5 (Coupled TwoTheta/Theta)



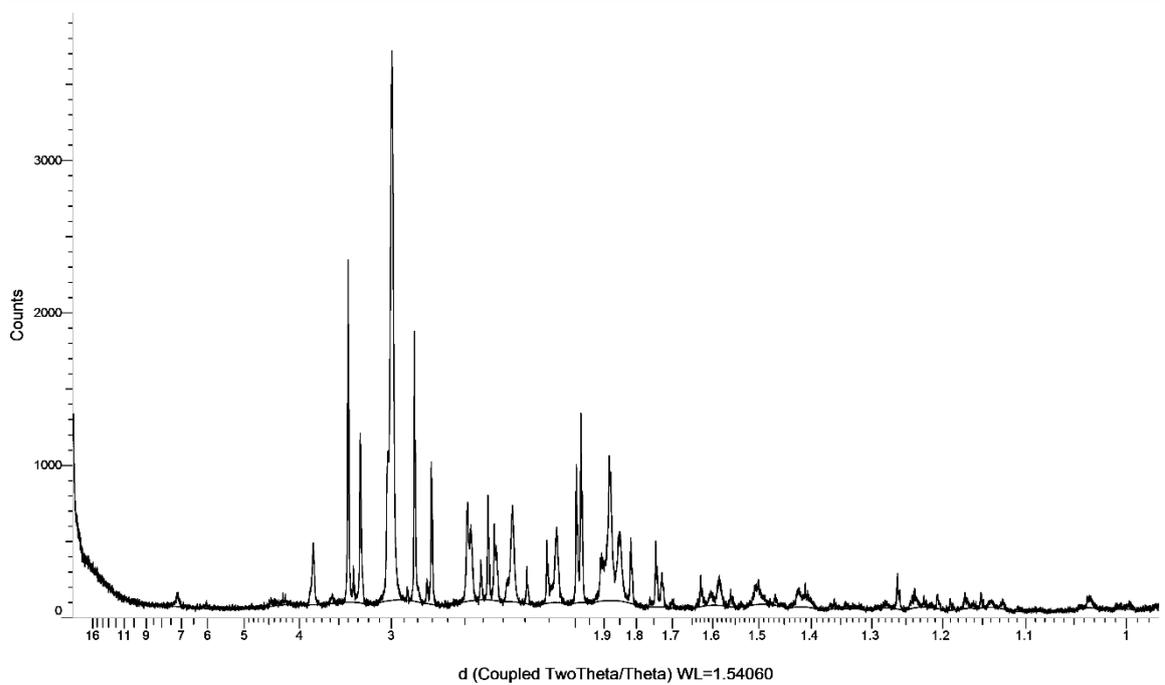
Ab-04- ATV6 (Coupled TwoTheta/Theta)



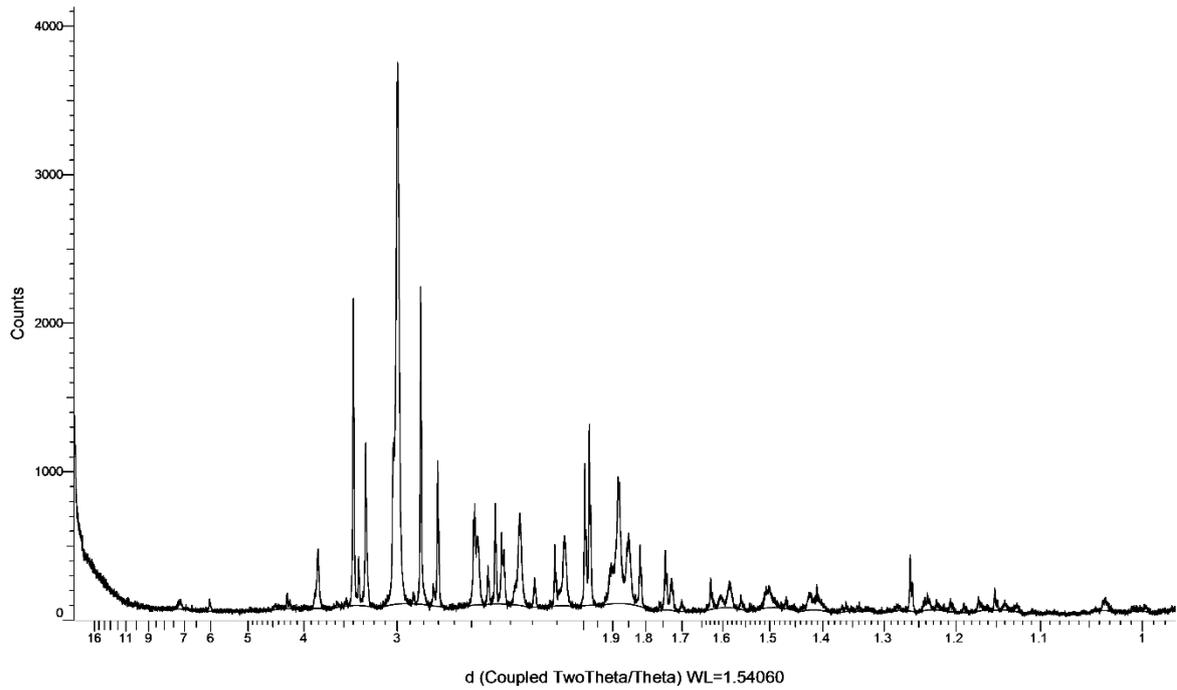
Ab- 05- ATV4 (Coupled TwoTheta/Theta)



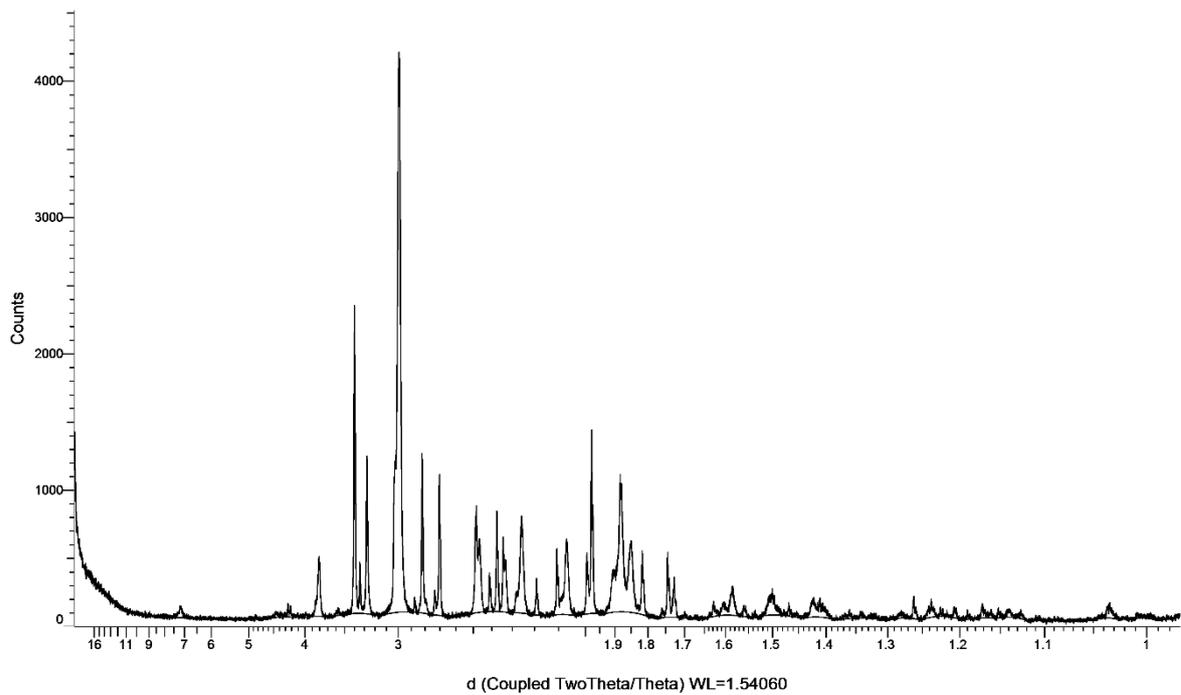
Ab- 05- ATV 5 (Coupled TwoTheta/Theta)



Ab- 06- ATV 4 (Coupled TwoTheta/Theta)



Ab- 06- ATV 5 (Coupled TwoTheta/Theta)



Ab-06- ATV6 (Coupled TwoTheta/Theta)

