



Estudo preliminar sobre a detecção da pluma de sedimentos do Rio Doce sobre o Parque Nacional dos Abrolhos-BA, para o evento de 5-6 de Janeiro 2016

Prof. Heitor Evangelista - Uerj
Prof. Claudio de Morisson Valeriano - Uerj
Dra. Elaine Alves dos Santos – Uerj
Gilberto Vaz – Uerj
Carla Neto – Uerj
Ms. Juliana de Souza Nogueira – Uerj
Prof. Marcus Vinicius Licinio - UFES
Joselito Nardy Ribeiro - UFES
Madson Godoi Pereira - UFES
Araceli Verônica F.N. Ribeiro – UFES
Emiliano Nicolas Calderon – Coral Vivo
Clovis B. Castro – Coral Vivo
Flávia Guebert – Coral Vivo
Ricardo Jerozolinski
Erley Cruz
Lourival Muniz Cajueiro
Alberto Rodrigues



Rio de Janeiro, 4 de Maio de 2016

1. Diretrizes Gerais

Este relatório visa descrever sucintamente a atividade de monitoração oceânica para o parâmetro Sólidos Totais em Suspensão, na região do Parque Nacional dos Abrolhos-BA, considerando sua importância ecológica, diante do desastre ocorrido em Mariana-MG, com graves conseqüências para os ecossistemas costeiros. É importante ressaltar que a interpretação da dispersão de plumas de sedimentos em áreas costeiras por sensoriamento remoto muitas vezes não elucidam suficientemente a questão da dispersão em si visto que há carência em estudos voltados para a calibração das imagens e o fato da turbidez ser um parâmetro de alta complexidade regional. O estudo de caso abordado aqui se refere ao evento de 6 de Fevereiro 2016 quando ocorreu a predominância de vento sul no litoral do Espírito Santo transportando parte da pluma de sedimentos no sentido norte, em direção ao Parque Nacional dos Abrolhos-BA, Figura 1.

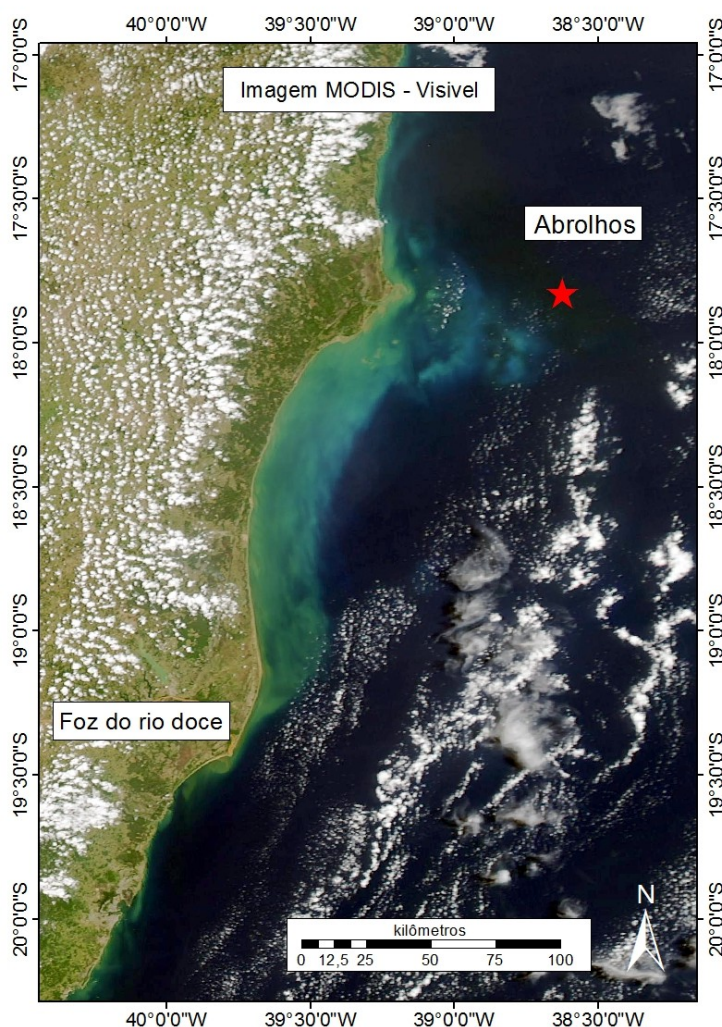


Figura 1 - Pluma de sedimentos entre a Foz do Rio Doce e Abrolhos no evento de 5-6 de Janeiro 2016, em condição de vento sul.

Durante o evento supracitado, nem os sobrevôos nem as imagens de satélite utilizadas evidenciaram inequivocamente a presença da pluma de sedimentos do Rio Doce sobre Abrolhos. Desta forma empregamos como estratégia de trabalho o uso de uma técnica de assinatura isotópica e química do material particulado na superfície do oceano. Tais assinaturas 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.

O Samário (Sm) e o Neodmio (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. Existem sete isótopos de Sm (^{144}Sm , ^{147}Sm , ^{148}Sm , ^{149}Sm , ^{150}Sm , ^{152}Sm e ^{154}Sm) e sete de Nd (^{142}Nd , ^{143}Nd , ^{144}Nd , ^{145}Nd , ^{146}Nd , ^{148}Nd e ^{150}Nd). O ^{147}Sm é radioativo, com uma meia-vida de 106 Ga e decai para ^{143}Nd a partir da emissão de uma partícula α , (núcleo de He duplamente ionizado). O elemento estrôncio (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 elemento Sr pode formar diversos minerais próprios, dos quais somente a estroncianita (SrCO_3) e a celestita (SrSO_4) tem abundâncias significativas. O Sr substitui o Cálcio em minerais comuns como feldspatos e carbonatos, sendo portanto muito disseminado em rochas ígneas e sedimentares. O Sr apresenta quatro isótopos de ocorrência natural: ^{84}Sr , ^{86}Sr , ^{87}Sr e ^{88}Sr . O isótopo ^{87}Sr é radiogênico, produto do decaimento do e ^{87}Rb . 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 Parque Nacional dos Abrolhos. Para tal foram adquiridos e analisados aqui 3 conjuntos de amostras: (1) filtros contendo material particulado da coluna d'água obtidos com o apoio do Projeto Coral Vivo; (2) sedimentos coletados na foz do Rio Doce anteriores ao desastre de Mariana-MG, obtidos com o apoio da UFES e; (3) sedimentos coletados na foz do Rio Doce posteriores ao desastre de Mariana-MG, também obtidos com o apoio da UFES.

A composição mineralógica dos rejeitos do beneficiamento do minério de ferro é essencialmente sílica (quartzo), óxidos de ferro (hematita FeO e magnetita Fe_2O_3) e

argilominerais. 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.

Os minerais e as rochas tem razões distintas de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ e $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$, de acordo com a derivação geológica. Estas razões isotópicas estão menos sujeitas a outras interferências e fontes do que os elementos químicos como o Fe, Ti e Al. No estudo hidrológico as diferenças na composição isotópica do Sr e Nd no material particulado em suspensão carregados pelos rios que alimentam os oceanos, revelam uma sobreposição da assinatura, refletindo a heterogeneidade das rochas fontes na escala de cada bacia de drenagem (WALTER et al., 2000; GOLDSTEIN & JACOBSEN, 1988). Para se identificar a proveniência continental de sedimentos a combinação das assinaturas dos isótopos radiogênicos $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ e $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ é uma das mais qualificadas, devido, entre outros fatores, suas razões típicas em determinados domínios geológicos (LEE et al., 2010). Essas razões não estão sujeitas ao fracionamento isotópico decorrente do intemperismo quando aplicado aos estudos de curta escala de tempo (GAIERO et al., 2004). Além disso, a composição dos isótopos de Sr e Nd da litosfera são significativamente diferentes do manto, o que permite a distinção entre as suas origens litológicas das zonas vulcânicas juvenis e dos velhos escudos continentais, (GROUSET & BISCAYE, 2005).

2. Áreas/estações de coleta e procedimentos de amostragem

2.1 Foz do Rio Doce

As amostragens na foz do Rio Doce estiveram sob a coordenação do Professor Marcus Vinícius Licínio (Departamento de Ciências Fisiológicas Centro de Ciências da Saúde CCS - UFES), sendo os mesmos pontos apresentados, Figura 2, amostrados antes e depois do acidente em Mariana-MG. As amostras se constituem em sedimentos superficiais.

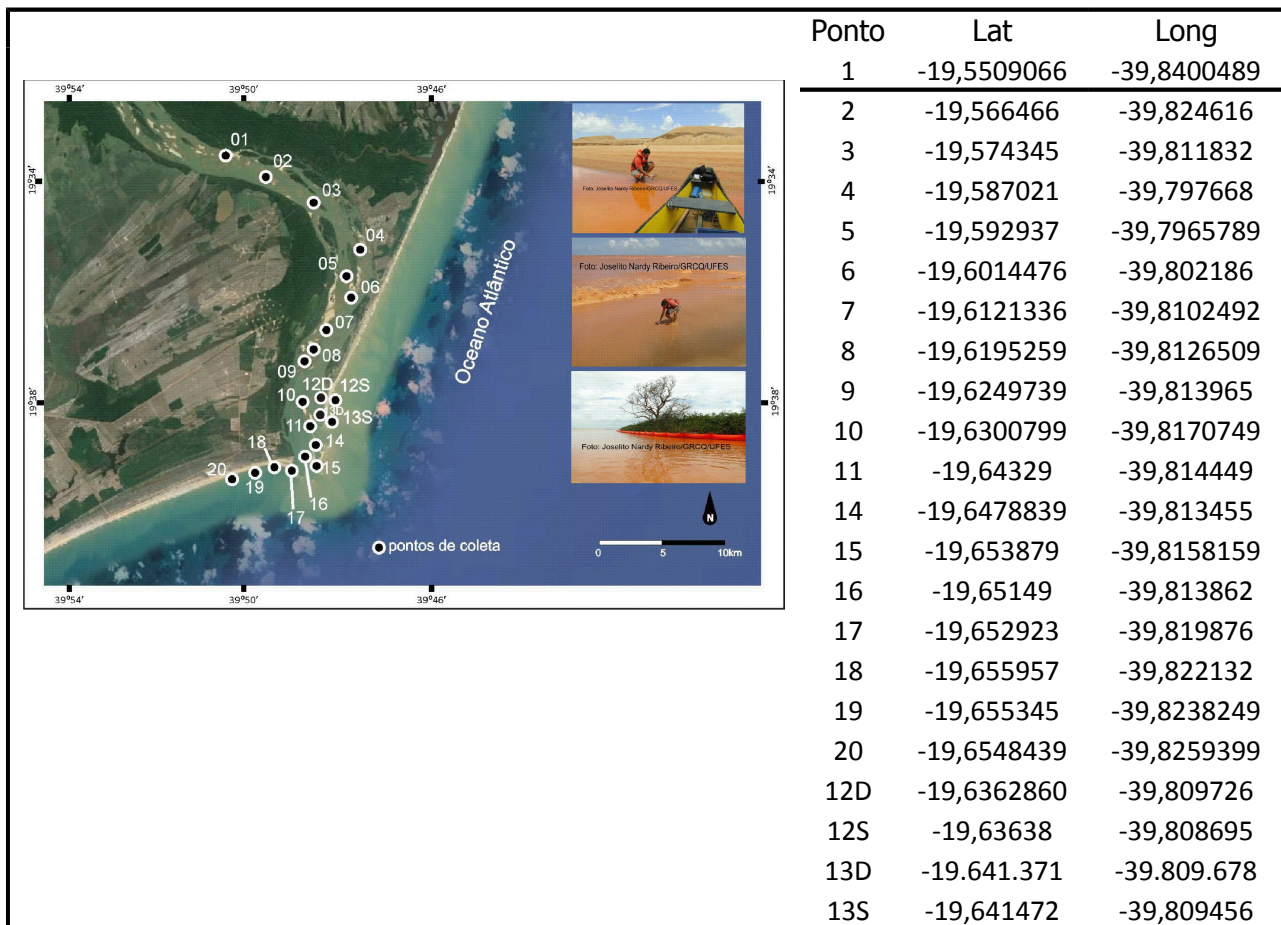


Figura 2 – Pontos de amostragem realizados pela UFES na foz do Rio Doce.

2.2 Parque Nacional dos Abrolhos

Para as amostras de Abrolhos, foi pré-definido um volume de amostra de 20 L, considerando o ineditismo da aplicação da técnica naquelas águas, no sentido de se garantir a detectabilidade necessária à técnica dos isótopos radiogênicos, principalmente os isótopos de Nd. Galões plásticos de polipropileno (PP) foram previamente lavados com água do local de amostragem. A Tabela 1 mostra um resumo dos dados das amostragens e suas referências geográficas.

Tabela 1 – Dados gerais das coletas de águas superficiais no Parque Nacional dos Abrolhos em 8 de Janeiro de 2016.

Amostra	Latitude		Longitude		Hora	Referência
	Graus	Minutos	Graus	Minutos		
1	17	54,960	39	09,943	10:57	Sebastião Gomes
2	17	27,976	38	56,098	12:36	Ponta Sul (Parcel das Paredes)
3	17	27,976	38	56,098	13:13	Ponta Sul (Parcel das Paredes)
4	18	00,125	38	43,048	13:13	Arquipélago - sul (Parque de Abrolhos)
5	18	00,125	38	43,048	13:13	Arquipélago - sul (Parque de Abrolhos)
6	17	56,354	38	41,932	13:36	Arquipélago - norte (Parque de Abrolhos)
7	17	58,578	38	40,905	16:28	Arquipélago - leste (Parque de Abrolhos)
8	17	58,578	38	40,905	16:28	Arquipélago - leste (Parque de Abrolhos)
9	17	57,334	38	50,979	17:02	Entre Pontas e Popa Verde
10	17	56,159	38	58,047	17:27	Pontas -sul (Parcel das Paredes)
11	17	53,901	39	03,712	17:47	Entre Pontas e continente
12	17	49,932	39	09,238	18:08	Costeiro

O deslocamento para as amostragens foi realizado pela lancha Seap 11, sendo os pontos definidos a partir de sobrevôo no dia anterior e orientações do Sr Joao Carlos Alciati Thomé, Coordenador do Centro TAMAR-ICMBio/Vitoria-ES e Guilherme Dutra (CI). Chegando aos locais, caso fosse possível visualizar algum local com maior concentração de sedimentos em suspensão, a coleta foi realizada nestas posições. A localização do ponto onde foram realizadas as coletas das amostras 2 e 3 foi definida a partir de comunicação com o Sr. Fábio Negrão (Prefeitura de Caravelas), que visualizou uma área com maior turbidez durante um sobrevôo de avião no mesmo momento das coletas, e nos passou a coordenada geográfica.

Nos locais onde foi possível visualizar algum local com maior concentração de sedimentos em suspensão, foi realizado antes da coleta um mergulho e verificado visualmente que a dispersão na coluna d'água atingia as camadas superficiais, assim as coletas foram feitas a cerca de 0,5 m de profundidade. Caso não fosse possível visualizar locais com maior concentração de sedimentos as coletas foram realizadas à mesma profundidade (0,5 m). Após lavagem, os galões foram colocados dentro da água, na profundidade desejada e aguardou-se que a água preenchesse-os completamente. Em alguns casos foi utilizado um cabo com lastro para auxiliar o posicionamento dos galões dentro da água. Após serem colocados dentro da embarcação, os galões foram fechados com um plástico e fixados com

fita adesiva. Assim como foram identificados e colocados à sombra, Figura 3. Depois as amostras foram levadas para a sede do Parque Nacional em Caravelas e deste local, levadas no dia seguinte para Porto Seguro por equipe do Coral Vivo.



Figura 3 – Coleta de Sólidos em Suspensão no Parque Nacional dos Abrolhos em 8 de Janeiro de 2016.

O processo de filtração ocorreu nas dependências do Projeto Coral Vivo na Bahia. O sistema de filtração utilizado baseou-se na filtração a vácuo com o uso de filtros do tipo Nuclepore de 0,4 μm de porosidade e diâmetro de 47 mm. Para cada 20 L de amostra, utilizou-se um set de filtros em virtude da quantidade de material particulado encontrado em cada estação. Desta forma, e de acordo com a Tabela 1, a AMOSTRA 1 foi composta por 7 filtros, a AMOSTRA 2 por 7 filtros, a AMOSTRA 3 por 6 filtros, a AMOSTRA 4 por 5 filtros, a AMOSTRA 6 por 5 filtros, a AMOSTRA 7 por 3 filtros (obs: menos de 10 L nesta amostra), a AMOSTRA 8 por 4 filtros, a AMOSTRA 9 por 6 filtros, a AMOSTRA 10 por 5 filtros, a AMOSTRA 11 5 filtros, a AMOSTRA 12 por 3 filtros e outras 3 amostras adicionais, P3 01/16 com 2 filtros e AD 01/16 com e filtro. Cada set de filtros que compõem na estação/ponto de amostragem foi devidamente acomodado em um frasco do tipo eppendorf, Figura 4.

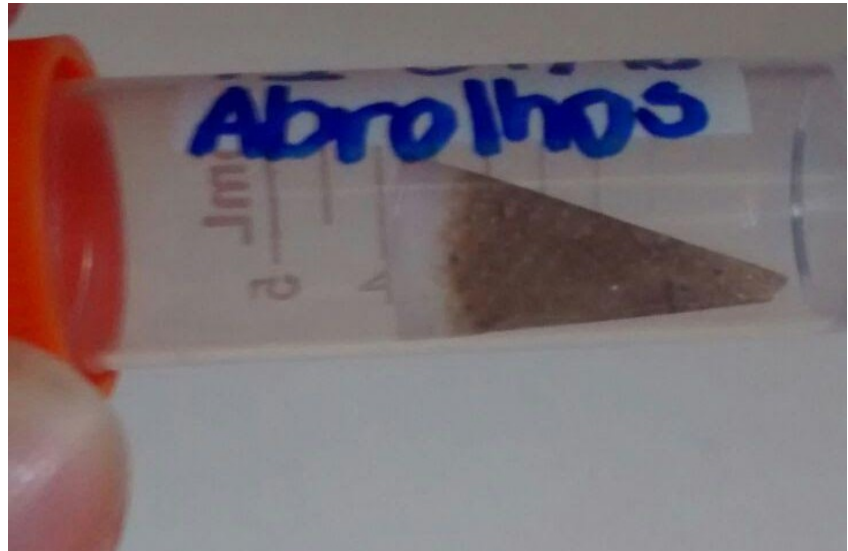
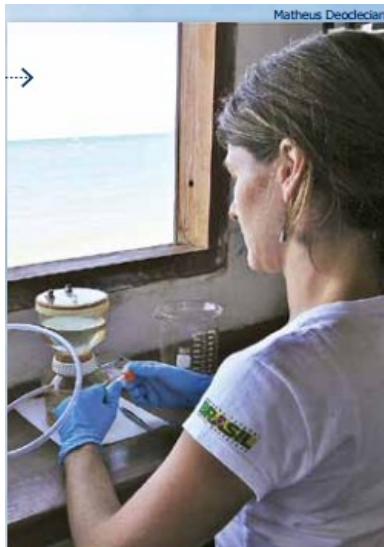


Figura 4 – (esquerda) Filtragem de água do mar, coletada no Parque Nacional dos Abrolhos em 8 de Janeiro de 2016; (direita) Filtro contendo Sólidos em Suspensão recebido na Uerj/IBRAG/LARAMG.

3. Resultados

3.1 Análise por isótopos radiogênicos

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 foi quarteado e peneirado em malha de #200 (0,074mm). A fração fina foi submetida a digestão ácida a partir da técnica já estabelecida por GIOIA (2010) que sofreu pequenas modificações referentes ao volume de ácido utilizado e tempo de permanência na chapa quente. Devido ao fato de haver pouco material particulado em alguns filtros de Abrolhos e comprometer a detectabilidade de sinal no momento da espectrometria, decidiu-se pela junção de alguns filtros. 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.

Os resíduos provenientes da separação de Sr e Nd foram depositados em filamentos de rênio para determinação das razões isotópicas em um espectrômetro de massa multicoletor por ionização térmica (TIMS) TRITON – Thermo Finnigan (Figura 5). A espectrometria baseia-se na ionização de amostras por meio térmico através de uma injeção corrente elétrica em que os feixes de íons produzido são focalizados e acelerados por uma diferença de potencial para atravessar um campo magnético e são separados por suas diferenças de massa criando uma trajetória individual para serem coletados por copos Faraday e contadores de íons (SEM e MIC). Todas as análises são realizadas utilizando o arranjo de filamento duplo devido à grande facilidade do Nd e Sr serem oxidados. Com isso o filamento de ionização é aquecido a uma elevada corrente para dissociar molécula de oxigênio garantindo a medida dos isótopos de Nd sob a forma de metal.

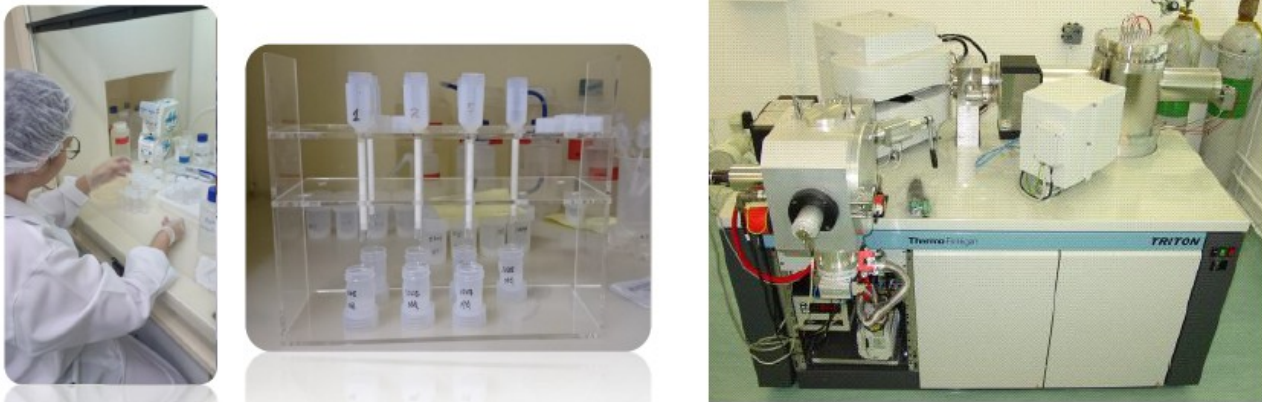


Figura 5 – Processamento das amostras no LAGIR/Uerj e análise por espectrometria de massa.

Para esta fase preliminar do estudo foram analisadas 6 amostras da foz do Rio Doce anteriores ao acidente em Mariana-MG e 6 nos mesmos sítios após o acidente. Para Abrolhos, 4 amostras foram submetidas à espectrometria. Para o material coletado na foz do Rio Doce, o material pós-rompimento da barragem é comparativamente mais radiogênico, compatível com o aumento no aporte de material do Quadrilátero Ferrífero (datado de 2.5 a 2.0 bilhões de anos), Figura 6. No diagrama da Figura 6 é possível observar a diferenciação do grupo pré e pós rompimento da barragem de Mariana-MG, em acordância com os diferentes domínios geológicos de que derivam as amostras.

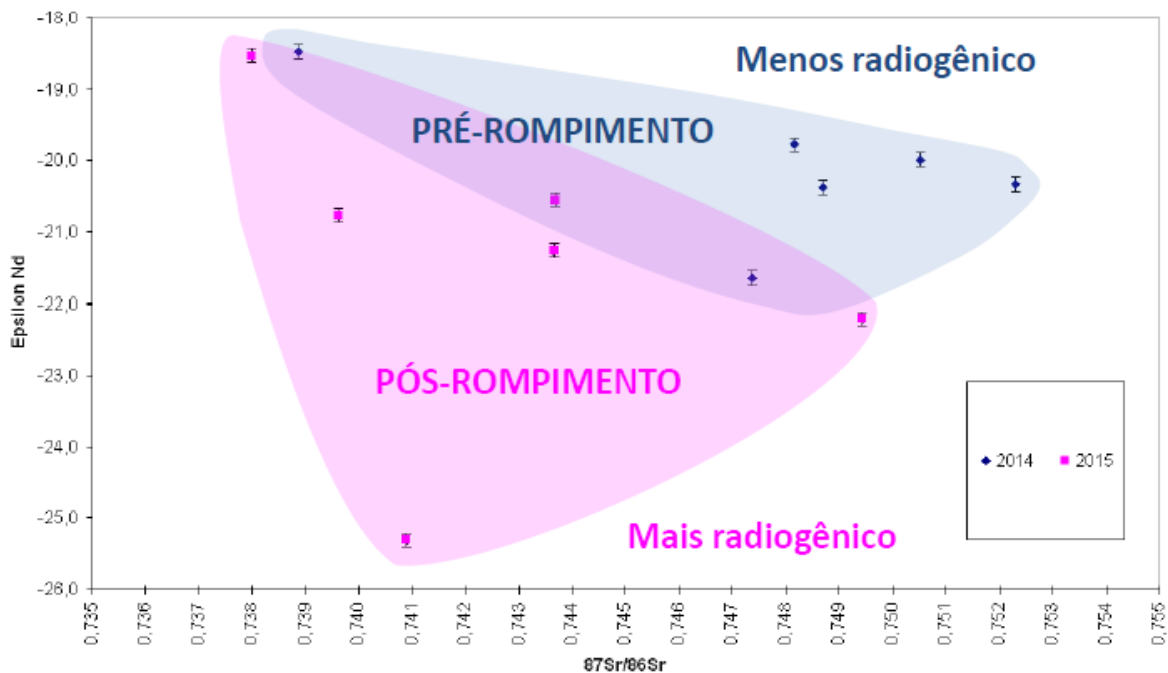


Figura 6 – Diagrama para isótopos radiogênicos de Sr e Nd em amostras coletadas na foz do Rio Doce em 2014 (antes do acidente) e em novembro de 2015 (após o acidente).

Ao se introduzir os resultados de Abrolhos no diagrama dos isótopos radiogênicos, observa-se o caráter mais “juvenil” do material coletado em suspensão por conter valores de $\epsilon\text{Nd}(0)$ menos negativos e valores menores da razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, o que pode refletir sua proveniência a partir das rochas vulcânicas que formam o arquipélago dos Abrolhos, Figura 7. Neste caso, pode-se verificar que os domínios definidos por Abrolhos, com valores de baixa variabilidade, e a foz do Rio Doce estão suficientemente distantes para se sugerir que os sedimentos tem proveniências distintas.

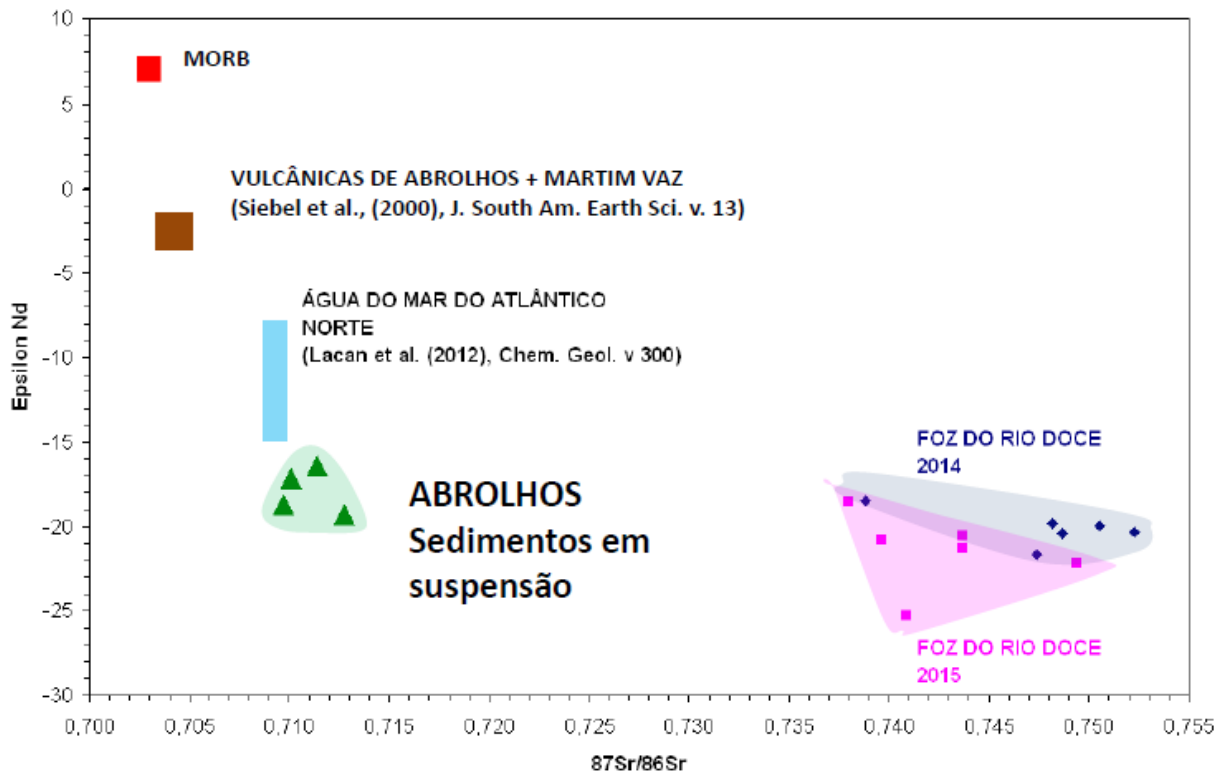


Figura 7 – Diagrama para isótopos radiogênicos de Sr e Nd para as amostras coletadas neste estudo e comparações com rochas vulcânicas de Abrolhos, Martim Vaz e água do mar do Atlântico Norte, e o valor de referência MORB (mid-oceanic ridge basalts).

3.2 Análise por MEV+EDS

As análises por MEV+EDS foram aplicadas à (1) fração fina dos sedimentos coletados na foz do Rio Doce anteriores ao acidente em Mariana-MG, (2) fração fina dos sedimentos da foz do Rio Doce durante a presença da lama de minério na foz do Rio Doce, ou seja, após o acidente na mineradora da Samarco, (3) sobre os filtros contendo material particulado das águas superficiais de Abrolhos. 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, foram selecionadas um total de 27 partículas. Para cada partícula se determinou as abundâncias relativas de C, O, Si, Al, Fe, Ti, Ca, Cl, Zn, Cu, K, Mg e Na. Considerando que o substrato para as análises de EDS é um policarbonato, os valores de abundância relativa destes elementos foram corrigidos para a exclusão de C nas amostras. As figuras abaixo mostram os espectros e as morfologias para as principais partículas encontradas nos 3 conjuntos de matrizes apresentadas acima.

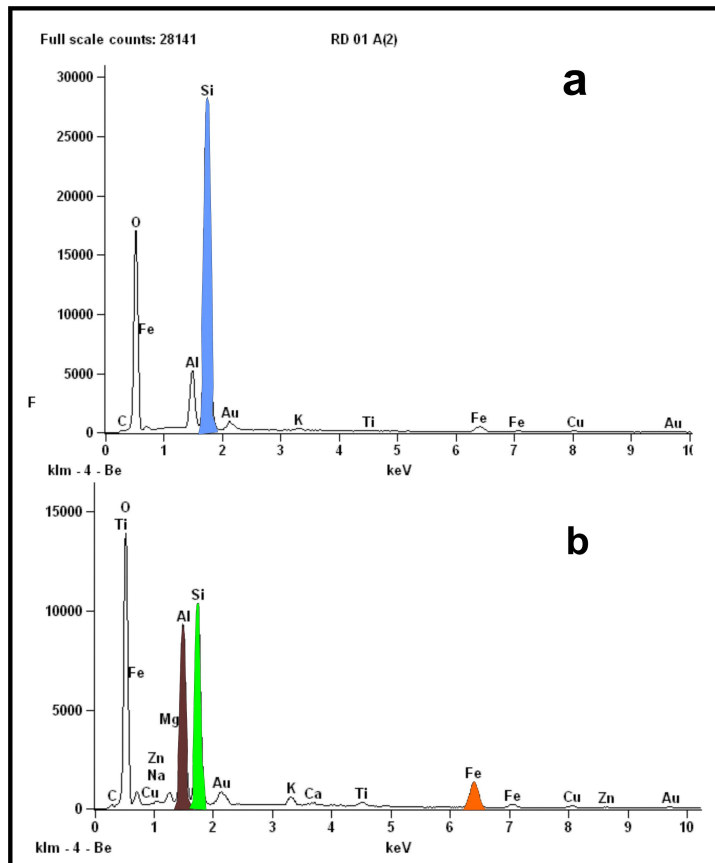


Figura 8 – Espectros de composição elemental por EDS de partículas típicas dos sedimentos da foz do Rio Doce anteriores ao acidente de Mariana-MG. (a) Micropartículas com enriquecimento em Si; (b) Micropartículas com enriquecimento em Si e Al e baixo teor de Fe.

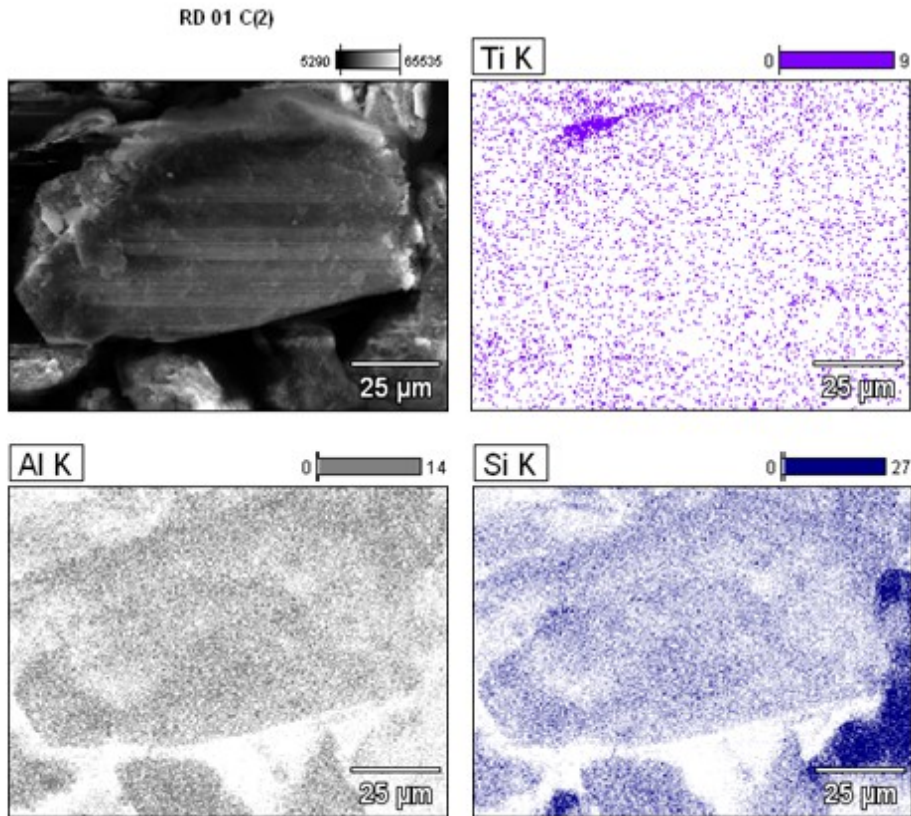


Figura 9 – Distribuição superficial dos elementos majoritários sobre micropartícula típica dos sedimentos da foz do Rio Doce anteriores ao acidente de Mariana-MG (ref. Figura 8).

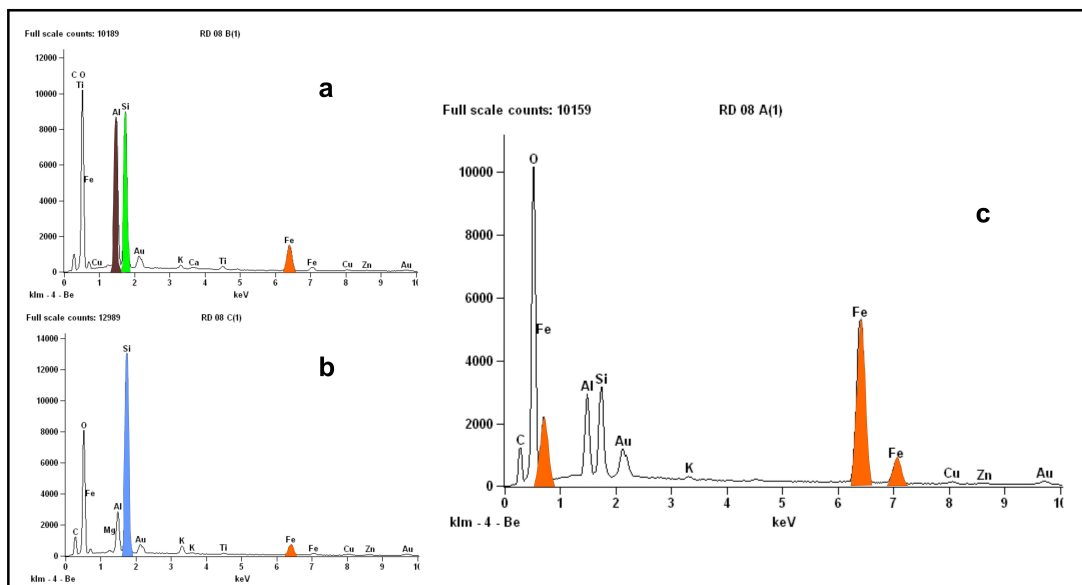


Figura 10 – Espectros de composição elemental por EDS de partículas típicas dos sedimentos da foz do Rio Doce após o acidente de Mariana-MG: (a) Micropartícula com enriquecimento em Si e Al e teor médio de Fe; (b) Micropartícula com enriquecimento em Si e baixo teor de Fe; (c) Micropartícula com alto enriquecimento em Fe.

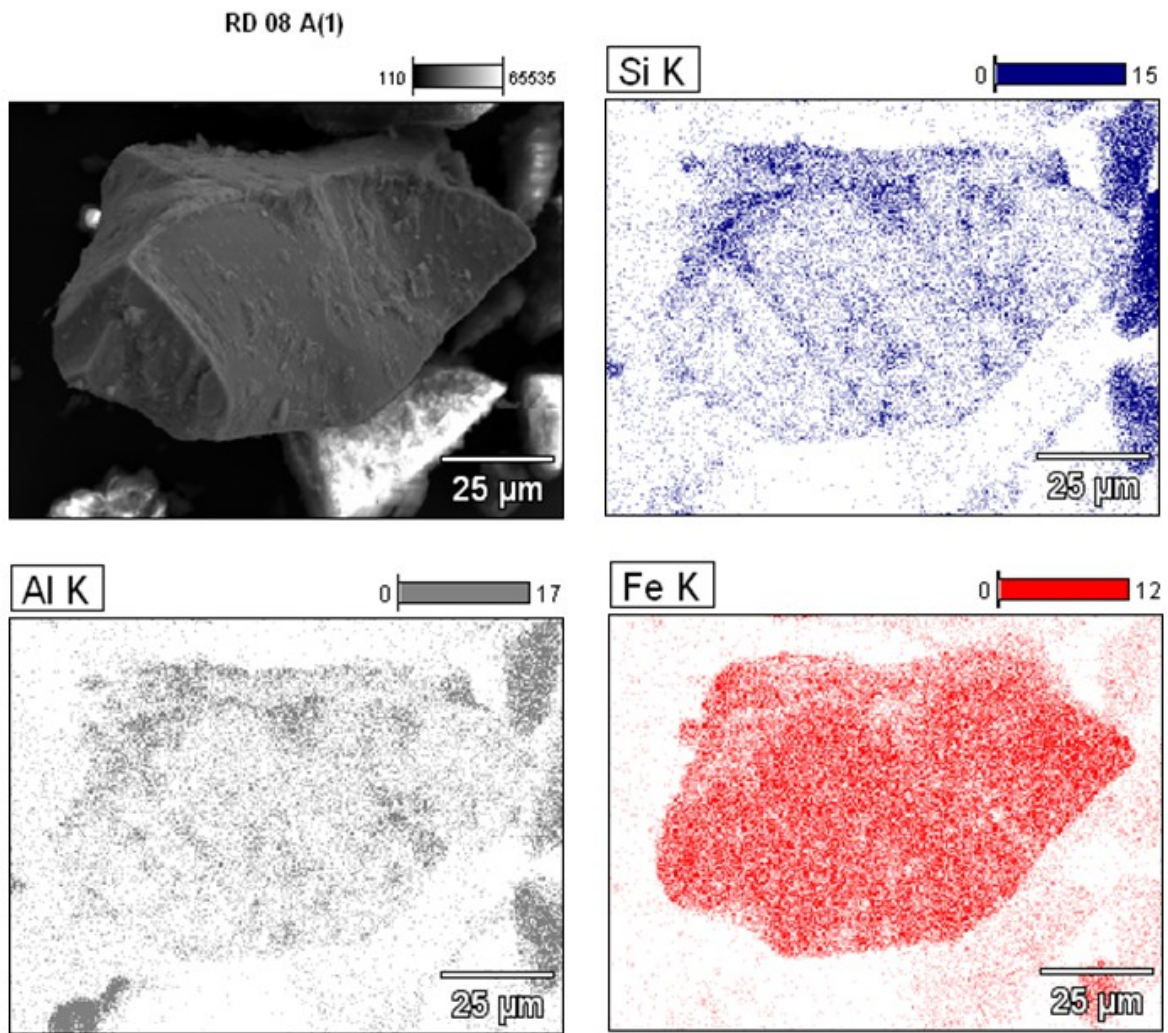


Figura 11 – Distribuição superficial dos elementos majoritários sobre micropartícula típica encontrada nos sedimentos da foz do Rio Doce após o acidente de Mariana-MG (ref. Figura 10).

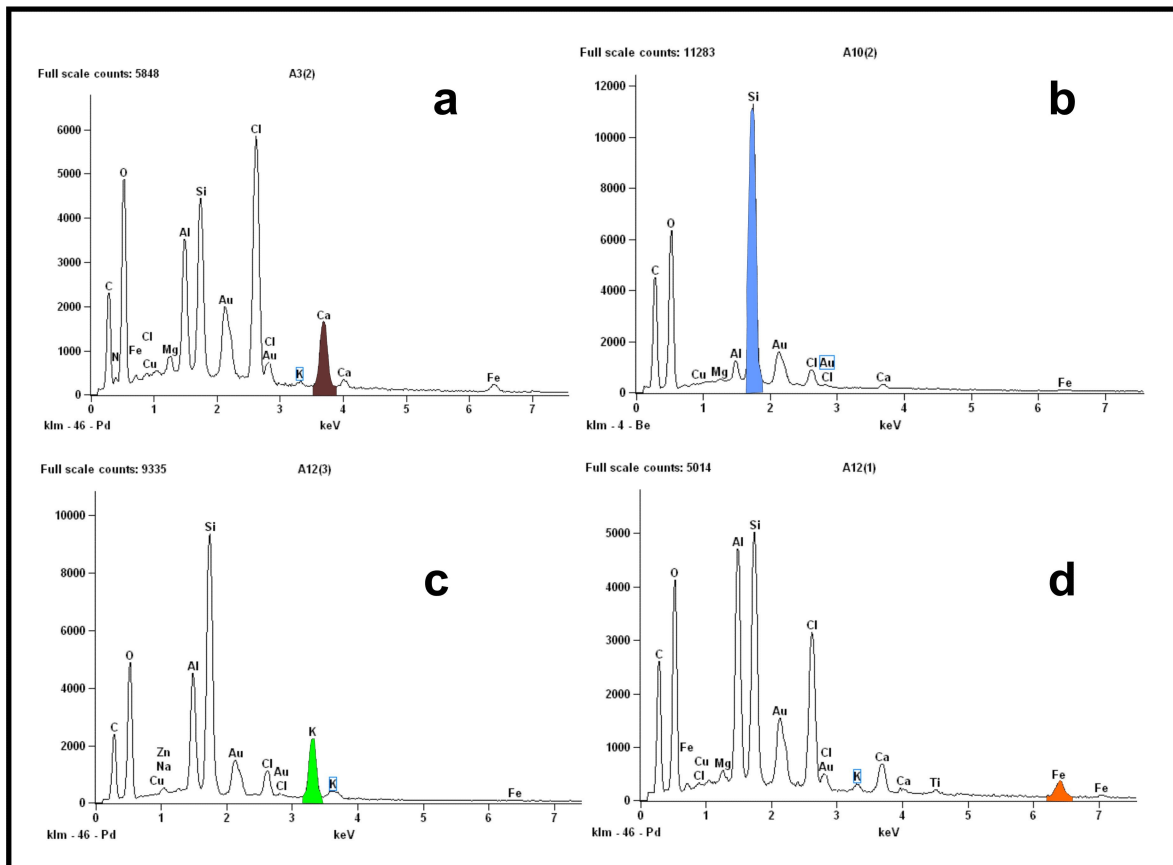


Figura 12 – Espectros de composição elemental por EDS de partículas típicas encontradas em águas superficiais de Abrolhos após o acidente de Mariana-MG: (a) Micropartícula com enriquecimento em Ca; (b) Micropartícula com enriquecimento em Si; (c) Micropartícula com alto enriquecimento multielementar com ocorrência de K; (d) Micropartícula com enriquecimento multielementar com ocorrência de Fe em baixo teor.

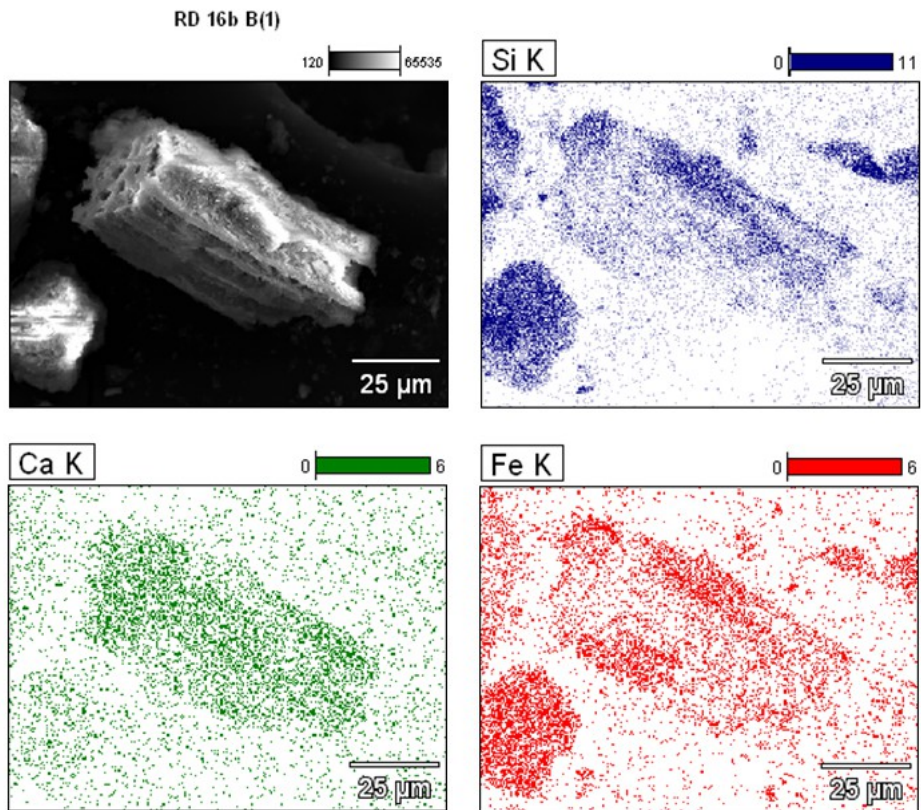


Figura 13 – Distribuição superficial dos elementos majoritários em micropartícula típica encontrada em águas superficiais de Abrolhos após ao acidente de Mariana-MG (ref. Figura 12).

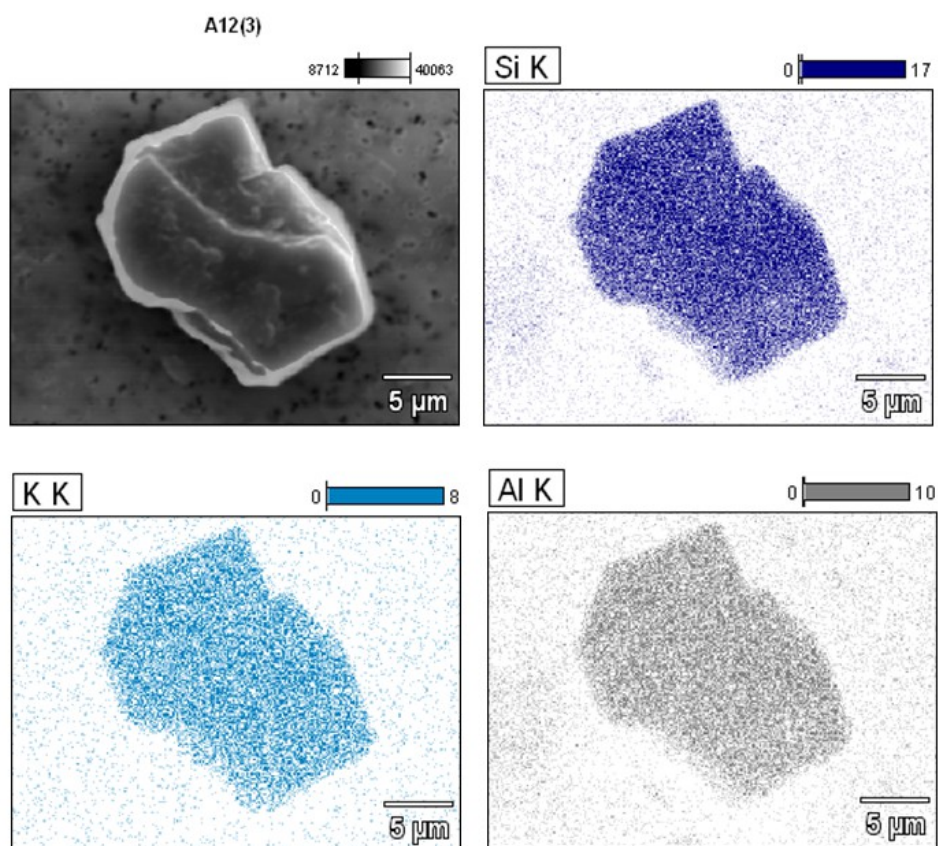


Figura 14 – Distribuição superficial dos elementos majoritários sobre micropartícula típica encontrada em águas superficiais de Abrolhos após ao acidente de Mariana-MG (ref. Figura 12).

A Tabela 2 mostra o resumo das abundâncias elementares relativas das amostras analisadas neste estudo.

Tabela 2 - Abundâncias elementares relativas (em Wt%) obtidas por MEV+EDS das amostras analisadas neste estudo. Ai: amostra proveniente de Abrolhos; Di: amostras provenientes da foz do Rio Doce anteriores ao acidente em Mariana-MG; Si: amostras provenientes da foz do Rio Doce após o acidente em Mariana-MG.

Amostras	Elementos												
	O K	Na K	Mg K	Al K	Si K	Cl	K K	Ca K	Ti K	Fe K	Cu K	Zn K	Au L
D1	52,36	0,00	0,00	5,35	33,80	0,00	0,26	0,00	0,16	3,01	0,96	0,00	4,09
D2	48,34	0,00	0,00	8,80	28,22	0,00	0,00	0,00	0,46	6,05	1,27	0,92	5,93
D3	47,59	0,00	0,21	16,46	21,76	0,00	0,38	0,00	0,54	5,90	1,15	0,88	5,13
S1	36,85	0,00	0,00	5,41	5,74	0,00	0,21	0,00	0,00	42,52	0,92	0,76	7,59
S2	46,71	0,00	0,00	14,01	16,96	0,00	0,53	0,24	0,75	12,02	1,19	0,96	6,61
S3	49,64	0,00	0,21	5,16	26,75	0,00	1,64	0,00	0,33	6,82	1,14	1,36	6,93
S4	48,35	0,00	0,31	10,14	18,50	0,00	1,96	0,00	0,49	10,42	1,43	1,30	7,10
S5	53,65	0,43	0,86	9,01	12,54	0,00	0,73	0,32	0,49	10,37	1,42	1,44	8,73
S6	50,29	0,00	0,47	6,94	18,82	0,00	0,66	0,00	0,36	11,87	1,86	1,32	7,41
S7	58,35	0,49	0,59	7,95	8,54	0,00	0,49	1,42	0,21	7,62	1,98	1,51	10,84
S8	60,13	0,00	0,24	6,67	15,76	0,00	3,01	0,00	0,19	4,97	1,64	1,17	6,23
D4	48,18	0,00	0,59	13,61	20,06	0,00	1,35	0,00	0,89	8,63	1,07	0,98	4,64
S9	51,42	0,27	0,34	10,80	15,43	0,00	0,96	0,00	0,48	10,82	1,82	1,16	6,51
S10	49,82	0,00	0,17	8,62	23,42	0,00	0,36	0,08	0,29	8,49	1,74	0,77	6,23
S11	53,56	0,00	0,18	8,22	18,02	0,00	0,00	0,00	0,37	8,49	2,07	1,13	7,97
S12	50,70	0,39	0,44	15,28	15,64	0,00	3,70	0,00	0,35	7,20	0,00	1,38	4,92
A1	48,18	0,00	0,00	6,71	6,23	0,00	4,28	1,23	0,26	1,51	3,38	2,57	25,65
A2	54,21	0,00	0,21	1,62	23,40	2,05	0,00	0,64	0,00	0,51	2,34	1,66	13,36
A3	52,94	0,60	0,66	10,55	19,86	5,44	1,02	1,95	0,38	2,27	2,45	1,89	15,02
A4	40,74	0,00	0,52	10,45	12,26	9,89	0,50	2,54	0,47	3,33	2,44	1,88	14,97
A5	49,99	0,10	0,64	12,98	17,37	9,61	0,37	2,30	0,29	3,09	2,01	1,25	-
A6	42,54	0,49	0,00	8,11	20,12	2,73	7,77	0,00	0,00	0,62	2,25	1,58	13,80
A7	42,92	3,63	0,76	4,63	5,76	13,94	0,00	4,54	0,00	1,14	2,62	1,95	18,12
A8	4,96	42,24	0,90	5,68	7,75	14,11	0,22	5,24	0,00	1,40	2,02	1,86	13,61
A9	42,68	1,36	0,82	5,89	6,80	14,86	0,15	5,12	0,00	1,32	2,63	1,85	16,52
D5	51,21	0,00	0,20	13,36	20,15	0,00	2,92	0,00	0,44	5,30	1,00	0,78	4,63
D6	49,58	0,00	0,86	13,51	17,40	0,00	0,97	0,32	0,78	9,35	1,15	0,96	5,12
D7	45,83	0,00	0,49	10,49	25,47	0,00	1,01	0,00	0,59	6,81	1,31	1,07	6,91

Sobre os dados da Tabela 2 aplicamos uma análise de agrupamento, ou análise de "cluster", que é uma técnica usada para classificar um conjunto de dados em grupos chamados de agrupamentos. Os objetos em cada agrupamento tendem a ser semelhantes entre si, mas diferentes de objetos em outros agrupamentos. Conforme Hair et al. (2005), as características de cada objeto são combinadas através de uma medida de semelhança,

calculada para todos os pares de objetos, possibilitando a comparação de qualquer objeto com outro pela medida de similaridade. A associação dos objetos semelhantes depende do método de análise de agrupamento. Existem três questões fundamentais que envolvem a aplicação da análise de agrupamento: (1) qual será a medida de similaridade entre os dados; (2) qual o método para a formação dos agrupamentos; (3) como decidir quantos grupos formar. Neste trabalho a distância euclidiana foi utilizada para calcular as medidas de similaridade entre as amostras das diferentes localidades e tomadas. A distância euclidiana é a medida mais frequentemente empregada quando todas as variáveis são quantitativas (Hair et al., 2005). A distância euclidiana (DE) é definida por:

$$DE = \sqrt{\sum_{j=1}^p (w_k \cdot (x_{ij} - x_{i',j}))^2}$$

Onde:

x_{ij} é a j-ésima informação da i-ésima variável.

$x_{i',j}$ é a j-ésima informação da i'-ésima variável.

w_k é um fator de adequação de escalas.

Quanto mais próximo de zero for a distância euclidiana, mais similares são os conjuntos de dados comparados. Para a formação dos agrupamentos foi utilizado o método de Ward. Este método é considerado consistente em estudos geoambientais, usando um algoritmo robusto baseado na análise da variância para validar a distância entre grupos de dados, se preocupando em minimizar a soma do quadrado dos desvios do centróide de agrupamento gerado a cada passo do método (Digby and Kempton, 1987). O método de Ward começa com a formação de um agrupamento para cada vetor componente da base de dados (n agrupamentos). Neste estágio inicial o erro interno de cada agrupamento é nulo, pois cada vetor que compõe cada agrupamento é o próprio vetor médio do grupo. Na etapa subsequente, n-1 agrupamentos são formados, um com dois vetores e os restantes com um vetor. Cada possibilidade de agrupamento entre os grupos, 2 a 2 é verificada, e é escolhido o agrupamento que causa o menor aumento da variância intra-grupo. Em seguida no segundo passo do algoritmo, n-2 agrupamentos são formados a partir dos n-1 agrupamentos definidos no passo anterior. Isto pode incluir dois agrupamentos com 2 vetores, ou um único agrupamento com 3 vetores. Novamente a variância interna intra-grupo é minimizada. O algoritmo para quando todos os vetores são combinados em um único agrupamento de tamanho n. O resultado da aplicação do método consiste em uma árvore hierárquica, o dendograma. Para a determinação do número de grupos a serem formados e das variáveis

que os constituem foi usado o método subjetivo. Foi determinado um corte transversal no dendograma considerando a coerência do resultado do agrupamento. Para os dados deste trabalho, o resultado da análise de cluster está apresentado na Figura 15. Pode-se observar claramente a formação e 3 grupos distintos considerando-se a linha de corte na distância métrica em torno de 45 unidades. O grupo G1 foi representado por uma única partícula que excepcionalmente apresentou ~43% de Fe, ou seja, uma partícula de minério de Fe, encontrada na foz do Rio Doce após o acidente de Mariana-MG. O grupo G2 foi formado por todas as amostras de Abrolhos, ao passo que o grupo G3 foi constituído por amostras encontradas na foz do Rio Doce. Este último é formado por 2 subgrupos sendo um formado somente por micropartículas encontradas após o acidente de Mariana-MG e outro com amostras da lama de minério misturada ao sedimento natural do Rio Doce.

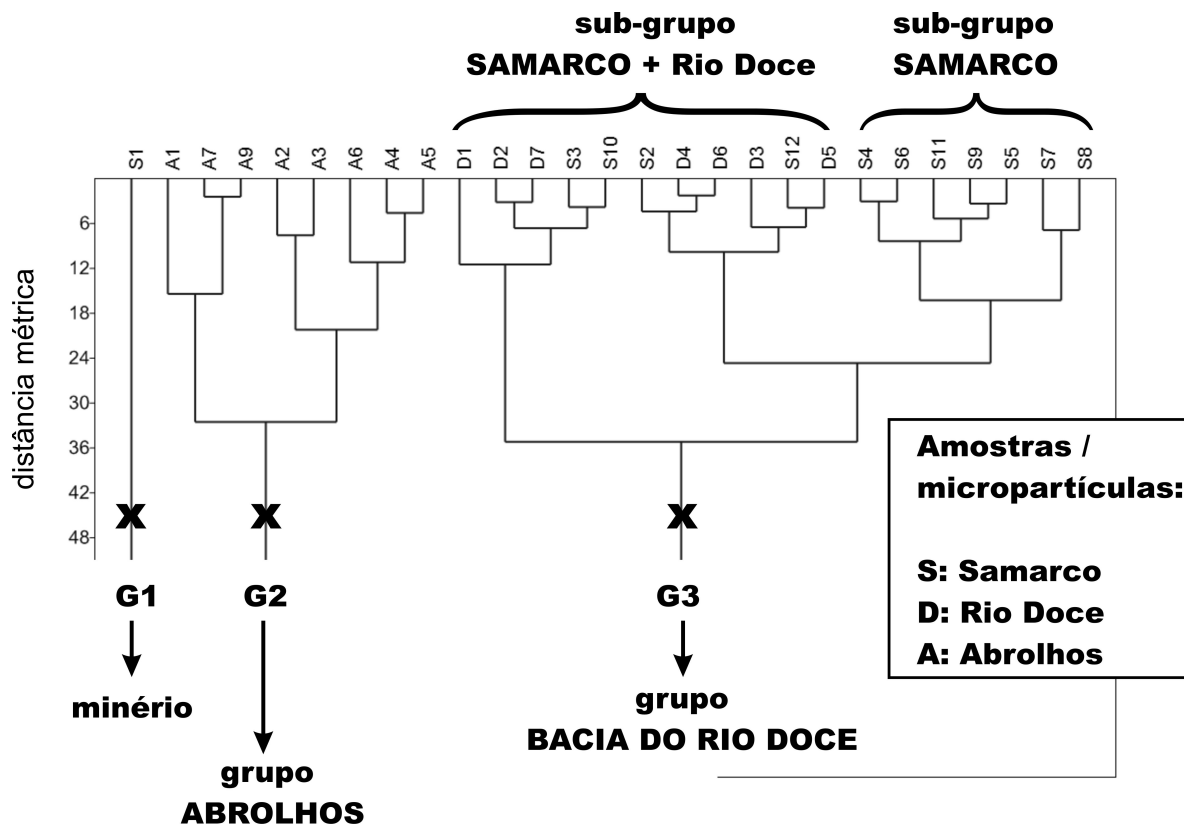


Figura 15 – Dendrograma para os dados obtidos por MEV+EDS das amostras minerais provenientes de Abrolhos e da Bacia do Rio Doce-ES.

Considerações finais

1. Este estudo tem caráter preliminar e foi baseado em um número restrito de amostras. Os resultados obtidos até aqui, a partir de uma combinação de análise de isótopos de Sr e Nd e microanálise elementar, mostram o alto potencial desta técnica para se identificar assinaturas de origem de sedimentos na área costeira entre a foz do Rio Doce e o Parque Nacional dos Abrolhos;
2. Os dados aqui apresentados sugerem que o evento de 5-6 de Janeiro de 2016 não teve impacto direto sobre o Parque Nacional dos Abrolhos. Deve-se ressaltar um ponto importante: o evento, caracterizado por uma brusca mudança dos ventos de Norte por ventos de Sul, ou seja, no sentido foz do Rio Doce para Abrolhos, foi de curta duração (máximo de 3 dias) e as coletas foram realizadas somente no dia 8 de Janeiro quando já se observava o redirecionamento da pluma de sedimentos do Rio Doce no sentido sul;
3. As diferenciações entre os padrões radiogênicos dos sedimentos antes e após o acidente de Mariana-MG, associados a presença de micropartículas com alto enriquecimento de ferro, não observados nas amostras de sedimento coletadas em 2014, mostram que ocorreu uma mudança nos tipos de sedimentos oportados na foz do Rio Doce;
4. O impacto costeiro dependerá, entre outras variáveis, dos padrões de corrente marinha e ventos de superfície, que se estabelecerão ao longo do ano. No verão existe um forte transporte de massas d'água de Norte para Sul o que minimizaria o impacto da pluma de sedimentos da foz do Rio Doce sobre Abrolhos. Durante o período de inverno, as frentes fria que atingem a região ocorrem com maior intensidade e com maior frequência. Estes sistemas constituem-se no principal elemento de ressuspensão do material depositado na plataforma continental o que potencialmente poderia disponibilizar a carga sedimentar na foz do Rio Doce para Abrolhos. Isto significa que o fato da não observação de vestígios da pluma de sedimentos do Rio Doce no evento de 5-6 Janeiro não implica que Abrolhos esteja fora do alcance de seu impacto; e,

5. Para uma perfeita caracterização isotópica das fontes naturais e industriais nas bacias hidrográficas da região de estudo, faz-se necessário a análise de um número maior de amostras e de sedimentos de outras localidades que influenciam diretamente o Parque Nacional dos Abrolhos. Criando-se tal base de dados, será possível no futuro investigar com menor grau de incerteza o impacto de plumas sedimentares sobre o recife de corais.

Bibliografia de Referência

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 ensialic 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

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.

FAURE G. 1986. *Principles of Isotope Geology*. John Wiley & Sons, United States, 588 pp

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.

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

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 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.

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.

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

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.

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.

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

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

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.

WALTER, A. V. et al. Rare-earth elements and isotopes (Sr, Nd, O, C) in minerals from the Juqiti 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.