

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

Material Suplementar Ambiente Marinho

Tema: Sedimentação Costeira

RT- 44/ NOV 23

RSE2023 PMBA/Fest

Vitória,

Novembro de 2023

SUMÁRIO

1	HISTÓRICO DE MALHA E FREQUÊNCIA AMOSTRAL	3
2	RESULTADOS DOS INDICADORES	4
2.1	VARIABILIDADE DA RAZÃO ISOTÓPICA SR/ND EM SEDIMENTOS NA COLUNA D'ÁGUA E SUA RELAÇÃO COM PARÂMETROS METEOCEANOGRÁFICOS	7
2.1.1	FASE INICIAL: amostragens entre setembro de 2018 e setembro de 2022.....	7
2.1.2	NOVO CICLO DO PMBA: amostragens entre setembro de 2022 e março de 2023.....	16
2.2	EXCESSO DE FE EM SEDIMENTOS NA COLUNA D'ÁGUA	25
2.2.1	FASE INICIAL: amostragens entre setembro de 2018 e setembro de 2022.....	25
2.2.2	NOVO CICLO DO PMBA: amostragens entre setembro de 2022 e março de 2023.....	30
2.3	MINERALOGIA DOS SEDIMENTOS NA COLUNA D'ÁGUA.....	31
2.3.1	FASE INICIAL: amostragens entre setembro de 2018 e setembro de 2022.....	31
2.3.2	NOVO CICLO DO PMBA: amostragens entre setembro de 2022 e março de 2023.....	33
3	REFERÊNCIAS	36

1 HISTÓRICO DE MALHA E FREQUÊNCIA AMOSTRAL

O histórico de malha e frequência amostrais do Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática da Área Ambiental I (PMBA/Fest) abrange informações de suma importância para o balizamento do presente programa, uma vez que passou por modificações ao longo do tempo, visando melhor atender aos objetivos do PMBA/Fest. Estas alterações foram aprovadas pela Câmara Técnica da Biodiversidade (CTBio) por meio de: (1) ofício SEI nº 1/2020-CTBio/DIBIO/ICMBio, de outubro de 2019 (para o período de transição) e (2) Proposta Técnica de continuidade do monitoramento, apresentadas e aprovadas em 2022, visando o “Novo Ciclo do PMBA/Fest”.

As modificações implementadas se encontram nos seguintes Materiais Suplementares: 1) **MS – Malha e Frequência amostral**, onde as diferentes malhas e frequências amostrais são apresentadas nas abas “Ano 1”, “Transição”, “Novo Ciclo” e “Histórico Frequências” e 2) **MS – Mapas das malhas amostrais**, com a espacialização histórica referente às malhas amostrais dos Ambientes. Como forma de esclarecer os períodos contemplados em cada uma delas, “Ano 1” se refere às estações amostrais coletadas entre setembro de 2018 e setembro de 2019, “Transição” às estações entre outubro de 2019 e julho de 2022 e “Novo Ciclo” referente às estações amostrais coletadas a partir de agosto de 2022, à exceção do grupo da Ecotoxicologia, que iniciou a amostragem referente ao Novo Ciclo em janeiro de 2023.

2 RESULTADOS DOS INDICADORES

Nesta seção serão apresentados os resultados dos indicadores de qualidade ambiental e da biodiversidade aquática do Tema, os quais foram desenvolvidos pelo PMBA/Fest e obtidos ao longo do monitoramento (setembro/2018 – março/2023) na área ambiental I. Vale ressaltar que, os indicadores aqui apresentados têm como propósito clarificar e sintetizar a historicidade dos resultados, interpretação e conclusões do monitoramento, promovendo o acompanhamento espaço-temporal da qualidade ambiental e biodiversidade, além de configurarem importantes ferramentas de suporte aos gestores ambientais. A partir destes indicadores, pode-se identificar os impactos com relação direta ou indireta ao rompimento da Barragem de Fundão, em Mariana (MG).

Os indicadores do PMBA/Fest vêm se consolidando ao longo do monitoramento e, seguindo a proposta estabelecida desde o Relatório Anual de 2022 (RA2022), a apresentação dos resultados será exclusivamente a partir da apresentação dos indicadores, acompanhados de legenda estendida com a explicação de sua variação espaço-temporal de forma mais direta e objetiva.

Além disso, a fim de facilitar o entendimento dos indicadores apresentados para Sedimentação Costeira, as amostragens de sedimentos armadilhados e seus intervalos temporais na região de Abrolhos (FASE INICIAL DO PMBA/Fest) são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1: Intervalos temporais de integração de sedimentos armadilhados para cada atividade de campo.

ID	Período total de acúmulo de sedimentos nas armadilhas
ATV-04	27/03/2019 a 13-17/05/2019
ATV-05	13-17/05/2019 a 02-04/07/2019
ATV-06	02-04/07/2019 a 14/08/2019
ATV-07	14/08/2019 a 26-27/09/2019
ATV-09	26-27/09/2019 a 17-18/01/2020
ATV-10	17-18/01/2020 a 11/06/2020
ATV-11	30/01/2021 a 28/03/2021
ATV-12	28/03/2021 a 27/04/2021
ATV-13	27/04/2021 a 27/06/2021
ATV-14	27/06/2021 a 24/08/2021
ATV-15	21/08/2021 a 24/11/2021
ATV-16	24/11/2021 a 13/01/2022

ID	Período total de acúmulo de sedimentos nas armadilhas
ATV-17	13/01/2022 a 16/03/2022
ATV-18	15/03/2022 a 30/05/2022
ATV-19	30/05/2022 a 20/08/2022

Já as amostragens de sedimentos armadilhados nos Recifes Esquecidos e APA Costa das Algas (NOVO CICLO do PMBA/Fest) foram integradas de acordo com o cronograma da Tabela 2. Na Tabela 3 estão apresentadas as localizações das armadilhas e de dois testemunhos sedimentares curtos empregados para se obter as condições de pré-existência. Para a região de Recife Esquecidos, duas estações de monitoramento foram instaladas, RE-01, *inshore*, e RE-02, *offshore* o mesmo para a APA Costa das Algas.

Tabela 2: Intervalos temporais de integração de sedimentos armadilhados para cada atividade de campo durante o Novo Ciclo.

ID	Período total de acúmulo de sedimentos nas armadilhas
ATV-20/21	04/09/2022 a 20/11/2022
ATV-22	20/11/2022 a 11/01/2023
ATV-23	11/01/2023 a 18/04/2023
ATV-24	18/04/2023 a 11/07/2023
ATV-25	11/07/2023 a (em curso em 26 set. 2023)

Tabela 3: Localização das armadilhas de sedimentos para o Novo Ciclo, além do Sistema automático MacLane e 2 testemunhos para referência local.

ID	Local	Latitude	Longitude	Prof. (m)
ACA-01	APA Costa das Algas	S20°00'112"	W40°07'353"	-
ACA-02	APA Costa das Algas	S20°00'900"	W40°06'298"	-
Testemunho1	APA Costa das Algas	S19°50'906"	W40°03'387"	-
Testemunho 2	APA Costa das Algas	S19°50'906"	W40°03'387"	-
RE-01	Recife Esquecidos	S18°36'301"	W39°38'307"	18,0
RE-02	Recifes Esquecidos	S18°41'380"	W39°22'737"	30,4
MacLane	Recifes Esquecidos	S18°36'14.7"	W39°38'18.6"	-

2.1 VARIABILIDADE DA RAZÃO ISOTÓPICA SR/ND EM SEDIMENTOS NA COLUNA D'ÁGUA E SUA RELAÇÃO COM PARÂMETROS METEOCEANOGRÁFICOS

2.1.1 FASE INICIAL: amostragens entre setembro de 2018 e setembro de 2022

Figura 1: Contribuição do aporte sedimentar do Rio Doce (calculada a partir do modelo de mistura sedimentar) baseada nos isótopos de Sr e Nd, dados c dos ventos obtidos *in situ*, frequência de frentes frias e frequência de vento sul em Abrolhos.

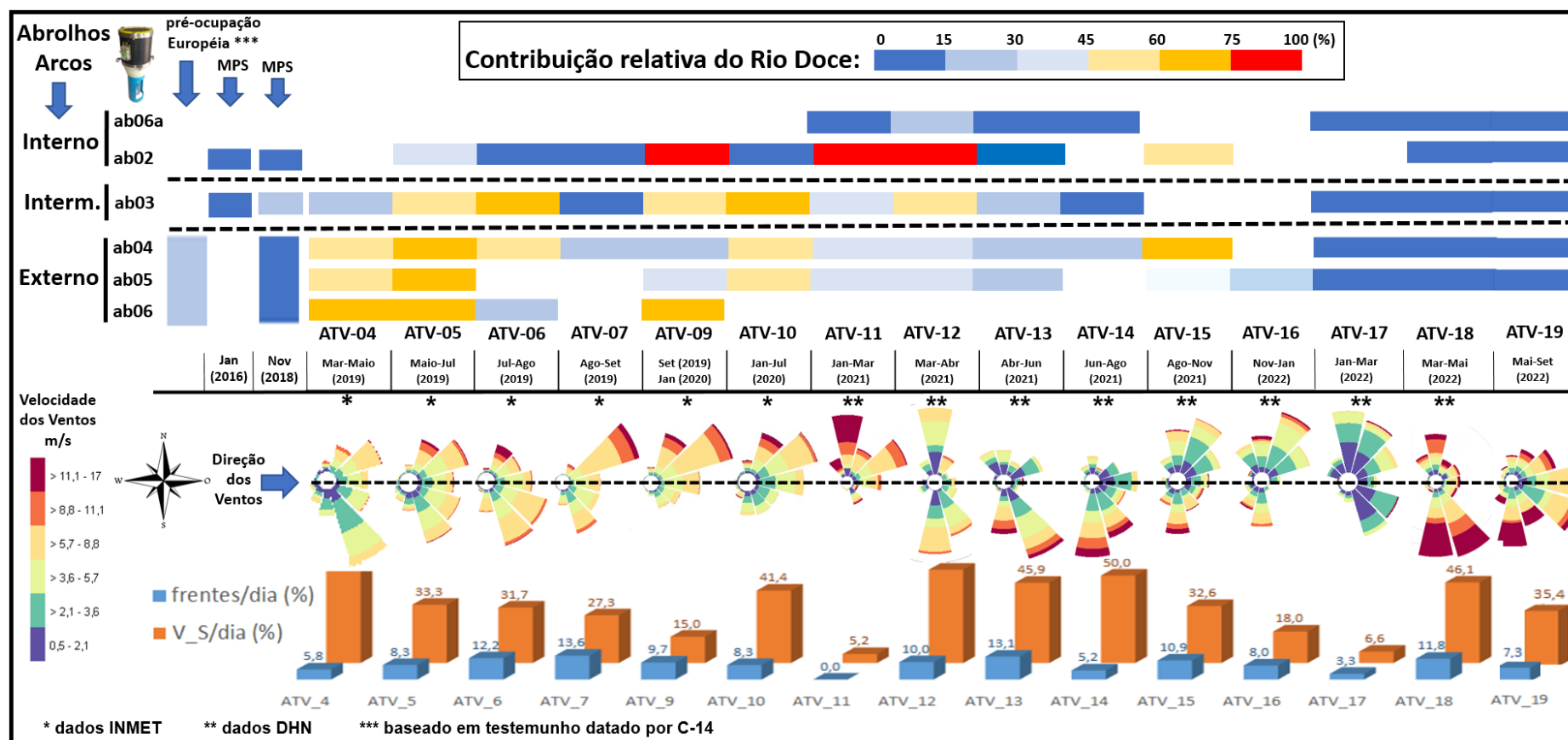


Figura 2: Contribuição do aporte sedimentar do Rio Doce (calculada a partir do modelo de mistura sedimentar) baseada nos isótopos de Sr e Nd, e dados de vazão do Rio Doce.

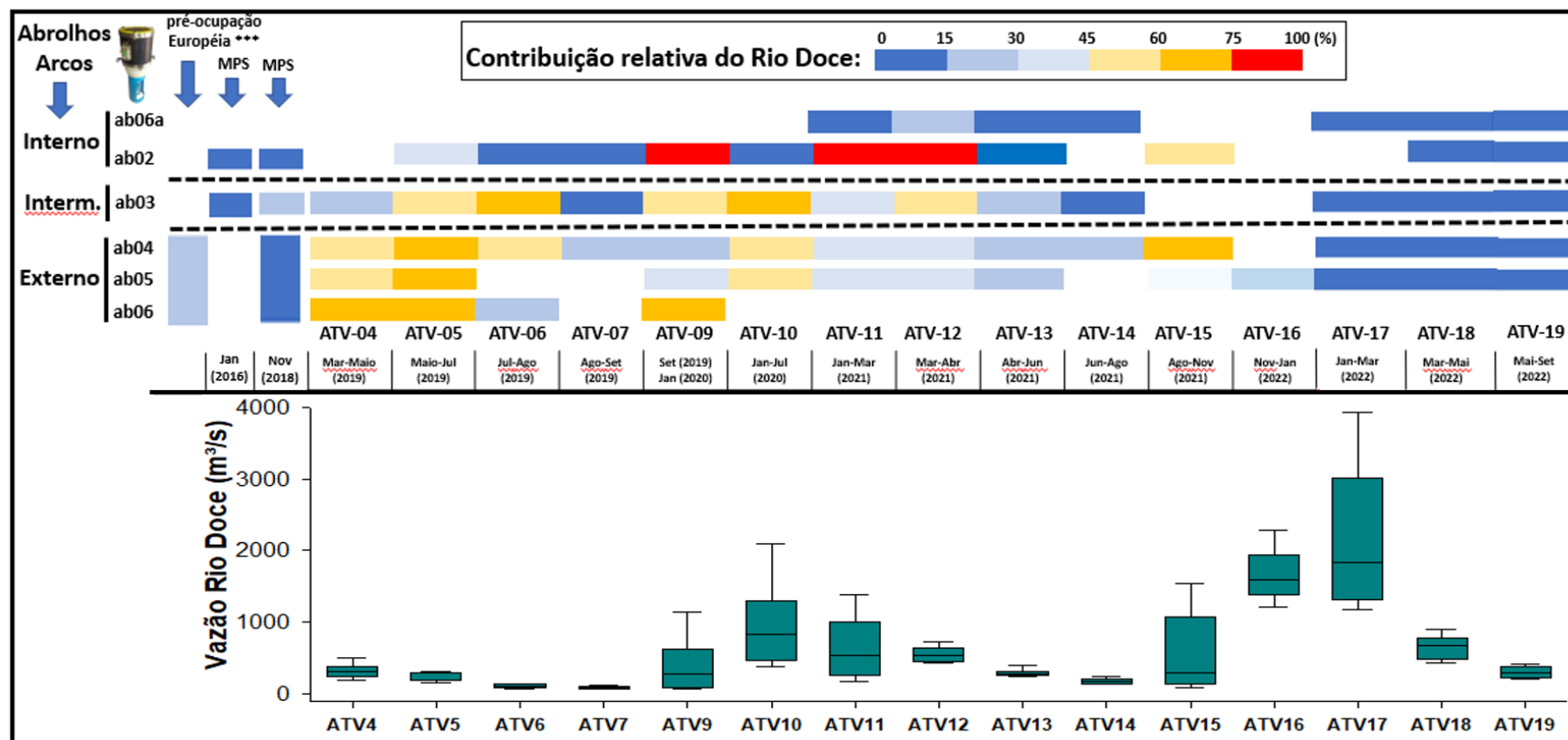
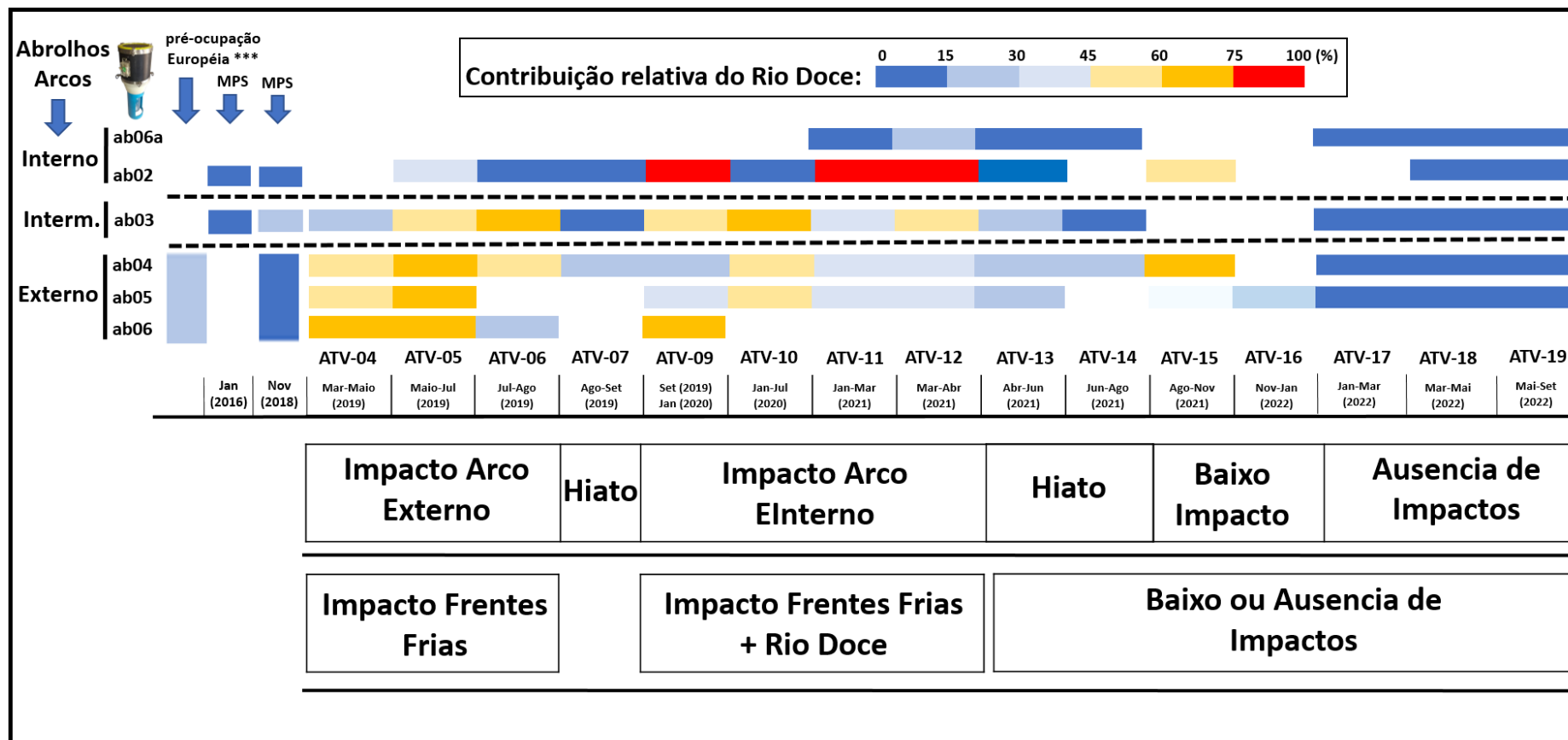


Figura 3: Contribuição do aporte sedimentar do Rio Doce (calculada a partir do modelo de mistura sedimentar) baseada nos isótopos de Sr e Nd, e análise dos impactos a partir de uma comparação entre o resultado isotópico, a dinâmica de frentes frias e a vazão do Rio Doce.



Os diagramas apresentados na Figura 1, Figura 2 e Figura 3 são o resultado da aplicação do modelo de mistura sedimentar que considera as razões isotópicas para o estrôncio e o neodímio e as concentrações desses elementos nas amostras de sedimentos armadilhados e nos termos-fonte previamente postulados. Dois modelos de mistura foram empregados aqui, sendo um para o arco externo de Abrolhos que considera três componentes sedimentares de primeira ordem (as fozes do Rio Doce e do Rio Jequitinhonha e os basaltos de Abrolhos) e outro para o arco interno de Abrolhos que considera três componentes sedimentares de primeira ordem (as fozes do Rio Doce e do Rio Jequitinhonha e combinadamente os Rios Caravelas e Rio Mucuri). Desta forma, a escala em cores na Figura 1 permite avaliar quantitativamente a presença/ausência de material decorrente da foz do Rio Doce em Abrolhos. Como resultado ao longo do tempo, de 2019 a 2022, a contribuição do Rio Doce variou de 0 a 94 % nas amostras do Arco Interno, de 0 a 74 % nas amostras do Arco Intermediário e, de 0 a 72 % nas amostras do Arco Externo. A contribuição do Rio Jequitinhonha variou de 20 a 53 % nas amostras do Arco Interno, de 25 a 73 % nas amostras do Arco Intermediário e, de 0 a 88 % nas amostras do Arco Externo. Vale ressaltar que, embora o rio Mucuri tenha sido considerado junto ao componente do Estuário de Caravelas, sua assinatura isotópica ($Nd = 0,511721$ e $Sr = 0,736697$) é similar à do rio Jequitinhonha ($Nd = 0,511736$ e $Sr = 0,733328$), de modo que parte do que está sendo contabilizado como Jequitinhonha possa ter origem no rio Mucuri, cuja contribuição seria ausente ou menor que 50 % para as amostras localizadas nos arcos Intermediário e Externo. A contribuição dos basaltos de Abrolhos foi estimada em inferior a 35 % nas amostras do Arco Externo. A contribuição do Rio Doce se mostrou mais constante nas amostras do Arco Intermediário, na região de Popa Verde. A localidade com menor influência do Rio Doce é a região de Timbebas (de 0 a 23 %). Há o predomínio de sedimentos do Rio Jequitinhonha nas amostras coletadas na região de Timbebas. Na região de Sebastião Gomes, o sinal do Rio Doce é mais evidente a partir de setembro de 2019, enquanto, nas demais localidades, o sinal isotópico do Rio Doce variou de 0 a 75 %, com uma média de 45 %. De março a agosto de 2019 sedimentos do Rio Doce chegam, principalmente, nas amostras coletadas nos arcos Intermediário e Externo, com contribuições que variaram de 30 a 75 %. Nesse período, as direções dos ventos foram predominantemente nos quadrantes NE e SE, sendo a componente SE mais expressiva. Na região de Sebastião Gomes, Arco Interno, por outro lado, as contribuições do Rio Doce não excederam 30 % nesse mesmo período. A partir de setembro de 2019 a junho de 2021, quando a componente NE dos ventos regionais se torna mais expressiva, a contribuição do Rio Doce varia de 75 a 100 % nas amostras do Arco Interno, enquanto há uma clara redução da contribuição do Rio Doce para as amostras dos arcos Intermediário e Externo.

Neste trabalho, postulamos 2 mecanismos físicos, potenciais, no transporte sedimentar do material particulado da Foz do Rio Doce para a região de Abrolhos: via a ação das frentes frias quando os ventos superficiais atuam do setor Sul para o Norte, responsáveis por intensos processos de ressuspensão dos sedimentos, ou via aumento da vazão do Rio Doce, o que disponibiliza maior volume de material terrígeno na região oceânica. Ao se comparar os dados meteoroclimatológicos na Figura 1 e Figura 2 pode-se verificar que, de um modo geral, as componentes formadas pelo sistemas frontais (frentes frias) e vazão do Rio Doce (pluviosidade da bacia sedimentar do Rio Doce) atuam de forma aproximadamente intercalada, ou seja, para a região de estudo, durante as ATVs 4 a 10 há o

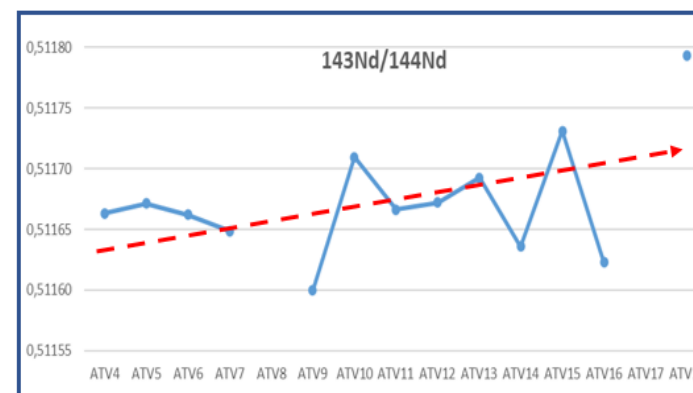
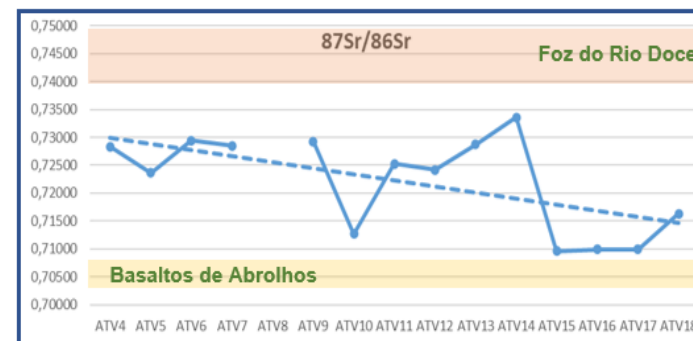
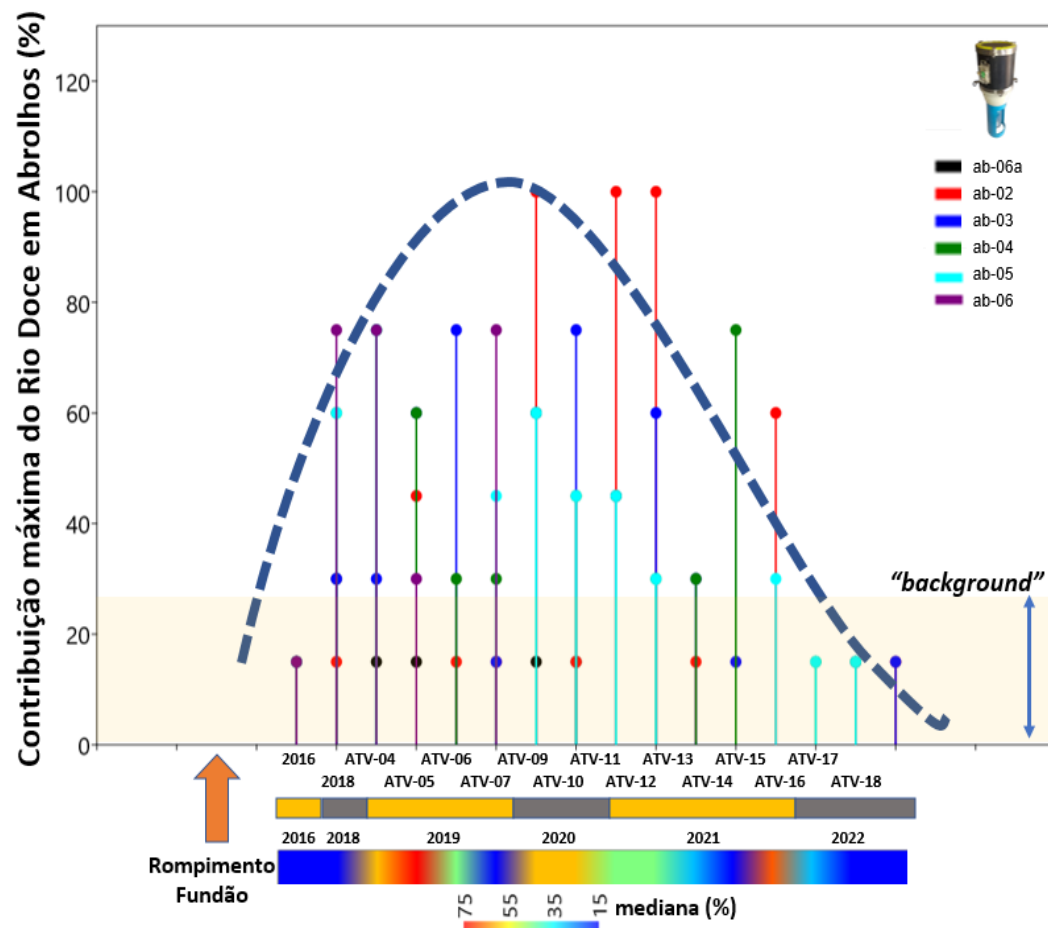
predomínio da ação das frentes frias no transporte sedimentar; durante as ATVs 9 a 12 há o predomínio da vazão do Rio Doce no aporte sedimentar, durante as ATVs 12 a 15 novamente o predomínio da ação das frentes frias, durante as ATVs 15 a 18 volta o predomínio da vazão do Rio Doce no aporte sedimentar, e finalmente durante as ATVs 18 a 19 há o predomínio da ação das frentes frias. Dentre as ATVs, aquela que mais efetivamente apresentou ambos os processos de forma significativa foi a ATV 10. Em relação a variabilidade do sinal isotópico do Rio Doce nos sedimentos de Abrolhos e a vazão dos Rios que aportam na região de estudo, principalmente o Rio Doce, o Arco Interno, e especialmente a estação de coleta em Sebastião Gomes, foi a região que evidenciou uma melhor correspondência. Entre março a setembro de 2019 a vazão do Rio Doce cai de $\sim 1200 \text{ m}^3/\text{s}$ para $\sim 200 \text{ m}^3/\text{s}$ e sua contribuição no Arco Interno varia de 30-45 % no período de maio-julho/2019 para 0-15 % no período de julho-setembro/2019. Entre setembro/2019 a janeiro/2020 a contribuição do Rio Doce aumenta para 60-75 % com as vazões do Rio Doce indo de $\sim 200 \text{ m}^3/\text{s}$ para $\sim 800 \text{ m}^3/\text{s}$. A vazão máxima do Rio Doce para a série temporal de 2019-2021 ocorre em março de 2020 ($\sim 2000 \text{ m}^3/\text{s}$) e decresce para $\sim 200 \text{ m}^3/\text{s}$ até setembro/2020, quando volta a aumentar novamente. Nesse período, a contribuição do Rio Doce no Arco Interno varia de 0-15 % a 75-100 %. A região de Popa Verde, Arco Intermediário, onde há uma influência mais constante do sinal isotópico do Rio Doce, os picos de influência ocorrem nos períodos de julho-agosto/2019 e janeiro-julho/2020. No período de março a agosto de 2019, quando as vazões do Rio Doce estavam decrescendo de $\sim 1200 \text{ m}^3/\text{s}$ a $\sim 200 \text{ m}^3/\text{s}$, houve um aumento do sinal do Rio Doce de 15-30 % para 60-75 %. Esse padrão pode estar associado à ação das frentes frias que geraram ressuspensão do material sedimentar e seu transporte em direção a regiões mais intermediárias de Abrolhos. Em agosto-setembro/2019 o sinal do Rio Doce cai para 0-15 % e volta a subir no intervalo de setembro/2019 a julho/2020, variando de 0-15 % a 60-75 %. Nesse período, o aumento do sinal acompanha um aumento da vazão do Rio Doce, de $\sim 200 \text{ m}^3/\text{s}$ para $\sim 1200 \text{ m}^3/\text{s}$. De julho/2020 a agosto/2021 o sinal do Rio Doce decresce de 60-75 % para 0-15 %.

Nas amostras coletadas no Arco Externo, o sinal isotópico do Rio Doce é, no geral, menor que nos sedimentos dos arcos Interno e Intermediário. Isto implica em menor aporte de material sedimentar do Rio Doce nas porções mais afastadas do parcel de Abrolhos. O conjunto de ilhas poderia servir de barreira para a chegada de sedimentos vindos de SW, principalmente, no Chapeirão do Sueste. No período de março a agosto de 2019 as interações entre pluma fluvial e dinâmica marinha parecem ter sido mais complexas que de agosto/2019 a agosto/2021, quando o sinal isotópico do Rio Doce acompanha o aumento/diminuição da sua vazão. Entre março-julho/2019 e setembro/2019-janeiro/2020 o sinal isotópico do Rio Doce é mais forte no Chapeirão das Manchas em relação aos chapeirões do Pierre e Sueste, sugerindo que os sedimentos estão sendo carregados de SW para NE.

Quando comparamos a variabilidade do aporte sedimentar em Abrolhos com os dados de vazão do Rio Doce e a incidência de frentes frias, simultaneamente, observamos a seguinte evolução dos dados: Entre as ATVs 4 e 6 o sinal da foz do Rio Doce aumentou concomitante a uma forte componente dos ventos superficiais oriundos no setor Sudeste de acordo com os dados locais de direção do vento. Este período também se caracterizou pela alta frequência de frentes frias e baixa vazão do Rio Doce. Isto sugere que o primeiro aporte sedimentar detectado em Abrolhos se deu pela ação das frentes frias

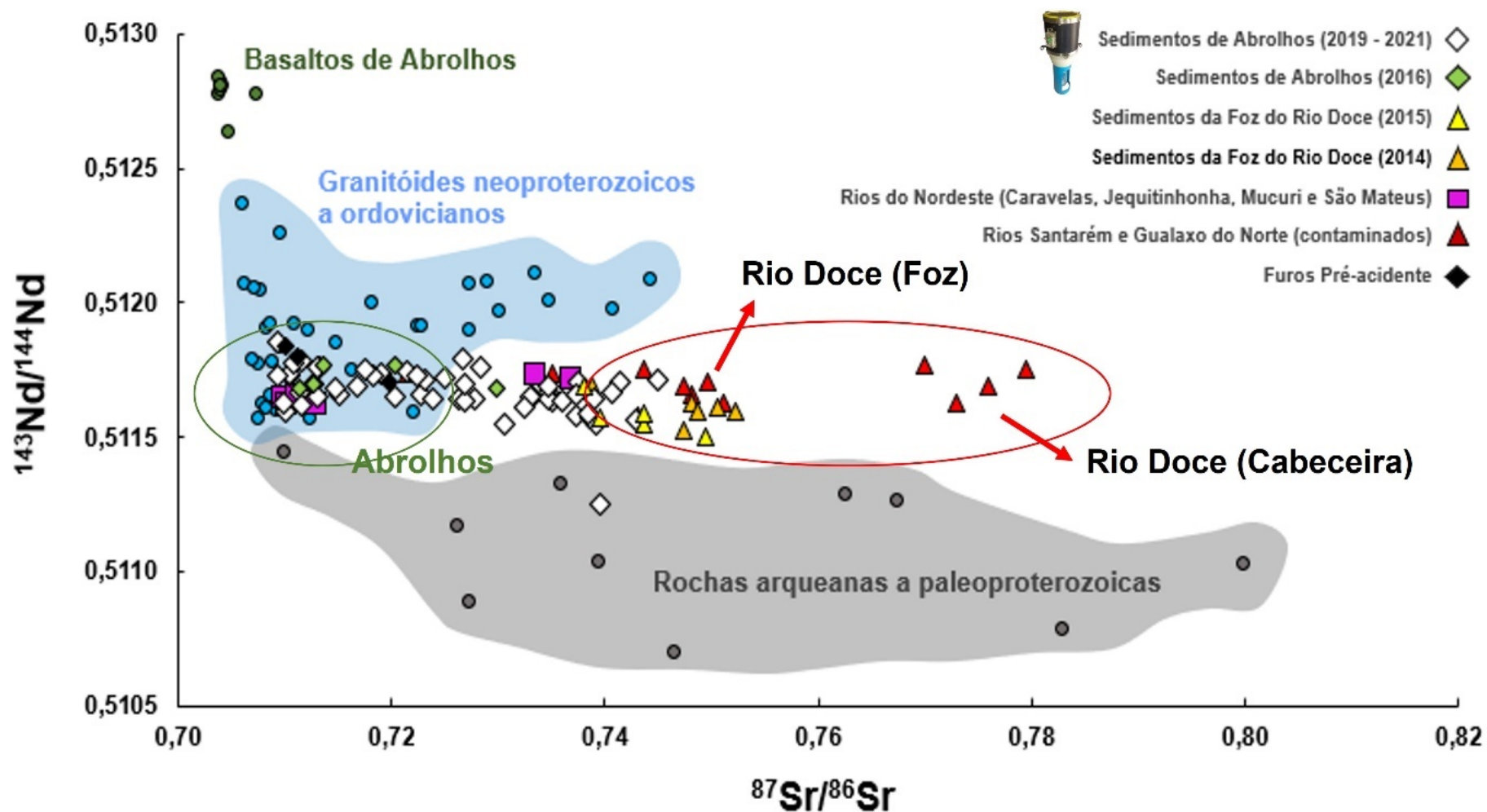
sobre o material lançado na região oceânica adjacente à foz do Rio Doce desde final de 2015. Os dados também mostraram que o arco externo foi a primeira área a ser atingida durante a ATV 4, seguido do arco intermediário durante a ATV 5 e ausência de material exógeno até então no arco interno de Abrolhos. Durante a ATV 7 houve um hiato no aporte sedimentar. Durante esta ATV a vazão do Rio Doce continuava em seus níveis mais baixos, entretanto com presença ativa das frentes frias. O que mudou radicalmente durante esta ATV foi a direção do vento que passou a atuar a partir do Setor Nordeste. Acreditamos que tal mudança tenha impedido um transporte efetivo dos sedimentos pelos Setores Sul e Sudeste. Entre as ATVs 9 e 12 foram verificadas forte presença do Material do Rio Doce, coincidindo com a fase úmida na região e consequentemente aumento da vazão do Rio Doce. Apesar da ATV 10 representar o período com maior vazão do Rio Doce desde o início do monitoramento, este também se caracterizou pelo acaso de sistemas frontais com frequência superior a 40%. Neste período, tanto o arco intermediário como o arco externo apresentaram impactos do Rio Doce, fato que não foi observado para o arco interno. É provável que a presença destes sistemas frontais tenha promovido elevado padrão de ressuspensão e diluído a presença do material exógeno do Rio Doce para porcentagens inferiores a 15%. A partir da ATV 13, até a ATV 19, observamos uma progressiva redução no sinal do Rio Doce em Abrolhos. Apenas uma exceção ocorreu na ATV 15, quando tanto a frequência de frentes frias quanto a vazão do Rio Doce estavam em fases máximas. Durante as ATVs 17, 18 e 19 pelo menos um dos processos potenciais de transporte sedimentar estiveram ativos. Entretanto, os aportes estimados estavam dentro do padrão histórico indeferido antes do programa de monitoramento, o que mostra uma tendência de redução no processo de transporte ao longo do tempo.

Figura 4: Evolução da contribuição máxima do sinal isotópico referente ao aporte sedimentar do Rio Doce (calculada a partir do modelo de mistura isotópica/sedimentar) em Abrolhos.



A Figura 4 mostra uma sinopse dos indicadores de impacto a partir de uma caracterização das condições pré-rompimento de fundão; nela estabelecemos o “*background*” baseado no testemunho sedimentar holocênico empregado neste trabalho como referência temporal de nossos indicadores isotópicos, e os valores de máxima contribuição para o aporte dos sedimentos lançados à foz do Rio Doce ao longo das campanhas do monitoramento. Tal contribuição foi calculada pelo modelo de mistura sedimentar baseado nas razões dos isótopos radiogênicos de Sr e Nd. A evolução temporal da curva na Figura 4 evidencia claramente a presença de um “pulso sedimentar” em Abrolhos, com aumento do sinal após 2016, atingindo o máximo entre 2019 e 2020 e voltando aos níveis pré-rompimento após 2022. São apresentadas também as curvas para a média global dos isótopos de Nd e Sr, ambas evidenciando tendência aos valores típicos do estuário de Caravelas e da zona recifal de Abrolhos.

Figura 5: Distribuição do sinal isotópico dos sedimentos armadilhados em Abrolhos e as assinaturas isotópicas nos principais domínios geológicos da área de estudo.



Na A Figura 4 mostra uma sinopse dos indicadores de impacto a partir de uma caracterização das condições pré-rompimento de fundão; nela estabelecemos o “background” baseado no testemunho sedimentar holocênico empregado neste trabalho como referência temporal de nossos indicadores isotópicos, e os valores de máxima contribuição para o aporte dos sedimentos lançados à foz do Rio Doce ao longo das campanhas do monitoramento. Tal contribuição foi calculada pelo modelo de mistura sedimentar baseado nas razões dos isótopos radiogênicos de Sr e Nd. A evolução temporal da curva na Figura 4 evidencia claramente a presença de um “pulso sedimentar” em Abrolhos, com aumento do sinal após 2016, atingindo o máximo entre 2019 e 2020 e voltando aos níveis pré-rompimento após 2022. São apresentadas também as curvas para a média global dos isótopos de Nd e Sr, ambas evidenciando tendência aos valores típicos do estuário de Caravelas e da zona recifal de Abrolhos.

Figura 5 é mostrado os dados para as armadilhas no contexto da geologia continental associada a região de Abrolhos. É possível observar as influências dos basaltos de Abrolhos representando os processos erosivos marinhos e os principais aportes continentais representados pelos domínios: “granitóides neoproterozoicos a ordovicianos” e “rochas arqueanas a paleoproterozoicas”. As assinaturas isotópicas dos sedimentos armadilhados correspondem claramente a uma mistura destas fontes geológicas, sendo as variações das razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ significativas na diferenciação entre os sedimentos originários da foz do Rio Doce e aqueles encontrados em Abrolhos em condições pristinas. A evolução temporal dos dados isotópicos para Sr e Nd considerando-se Abrolhos como um todo é representada nos quadros a partir dos valores médios para cada ATV. Observamos que entre 2019 e 2022 houve um decréscimo significativo do sinal isotópico para o Sr no sentido dos basaltos de Abrolhos, o que sugere uma progressiva redução da contribuição do sinal sedimentar da foz do Rio Doce sobre Abrolhos e uma tendência de restauração das condições originárias para Abrolhos em termos de assinatura dos sedimentos. Para as razões isotópicas de Nd, este se manteve relativamente constante ao longo do monitoramento.

2.1.2 NOVO CICLO DO PMBA: amostragens entre setembro de 2022 e março de 2023

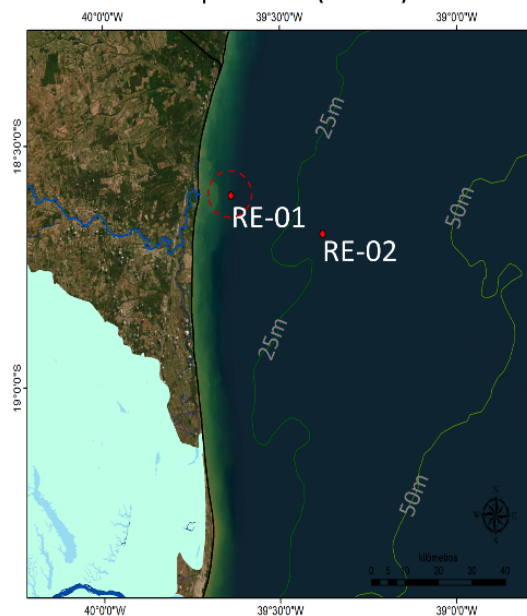
As atividades relativas ao Novo Ciclo, visam o monitoramento oceânico da natureza dos “sedimentos armadilhados” para duas novas regiões de interesse localizadas nas adjacências da Foz do Rio Doce: (1) ao Norte, na porção capixaba do Banco de Abrolhos, onde encontramos os Recifes Esquecidos; e (2) ao Sul, na APA Costa das Algas (motivo principal deste pedido). Este monitoramento em si abrange os seguintes tópicos: (1) integrar, em caráter trimestral, o material particulado sedimentável na coluna d’água nas regiões definidas acima a partir da instalação de armadilhas de sedimentos, objetivando determinar sua “assinatura geoquímica”, ao nível isotópico, possibilitando inferir a origem provável dos sedimentos “armadilhados”; (2) buscar uma relação entre o aporte sedimentar e as variáveis meteorológicas que atuam nas regiões de interesse durante as amostragens, através de modelos numéricos e o uso de produtos de satélite. Além da análise isotópica dos sedimentos, o estudo prevê a análises mineralógicas e de composição elementar sobre os sedimentos no sentido de oferecer maior robustez as interpretações relativas à proveniência mineral. Testemunhos sedimentares (entre 1 e 2),

que serão datados por Pb-210, também serão coletados em cada localidade no sentido de se inferir as características dos sedimentos anteriores ao desastre da barragem de Fundão.

Os resultados apresentados aqui foram separados individualmente por estação de coleta. Tal procedimento ocorreu pelo fato de ainda termos uma base de dados relativamente pequena, resultado de um monitoramento em escala trimestral, e que “didaticamente” facilita a visualização dos resultados e pelo fato dos autores ainda não terem implementado um modelo de mistura definitiva pois ainda aguardamos dados complementares de composição elementar para Neodimium em sedimentos da foz de rios que potencialmente aportam materiais para as estações de coleta. A estação RE-01, mais próximo a linha de costa - *inshore*, apresentou características do estuário do Caravelas na ATV 23 que compreende o período 11/01/2023 a 18/04/2023, ou seja, no auge da fase chuvosa. Isto sugere que durante a estação chuvosa de 2023 o aporte dos sedimentos dos rios locais, no trecho São Matheus e Caravelas, predominou no local monitorado. Para as atividades ATV 21 (04/09/2022 a 20/11/2022) e ATV24 (18/04/2023 a 11/07/2023), ou seja, predominantemente relacionada a fase seca quanto a pluviosidade continental, todos os sinais isotópicos para o Sr e Nd convergem para assinaturas da Foz do Rio Doce. Observamos também que para a ATV 22 (20/11/2022 a 11/01/2023), que representa o início da fase úmida o sinal do Rio Doce ainda predominava sobre o ponto de amostragem.

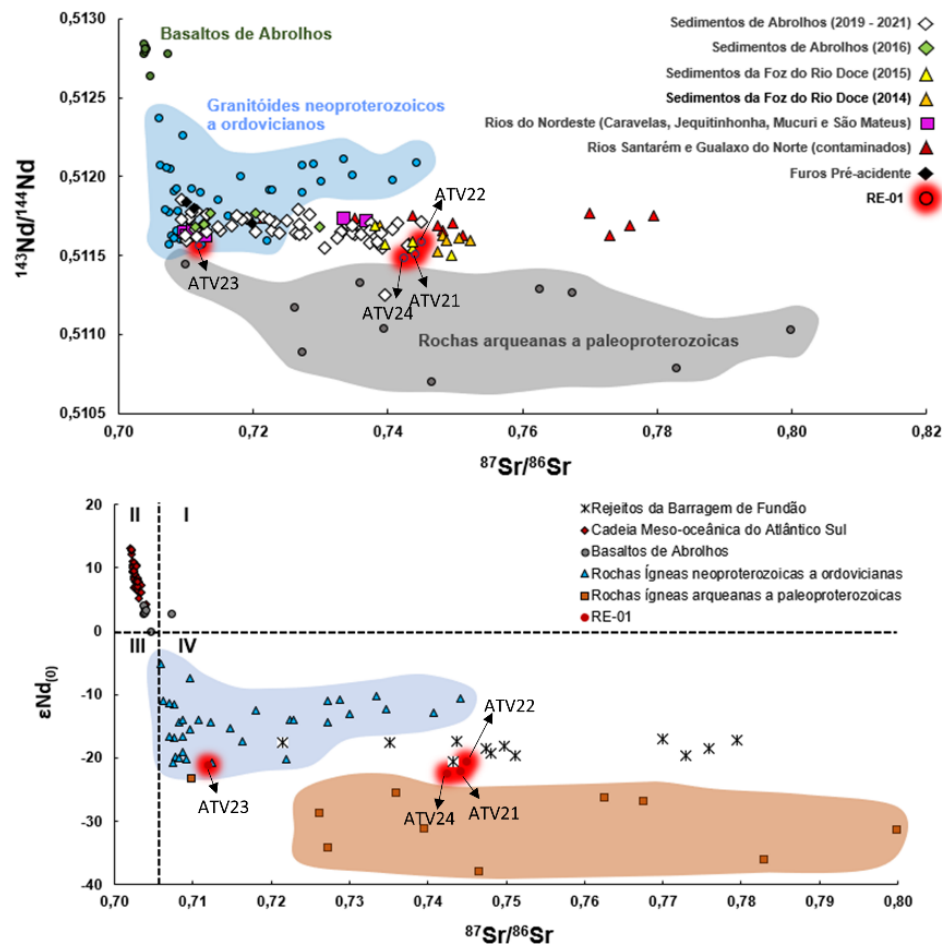
Figura 6: Resultados isotópicos para as amostras de sedimento provenientes da estação RE-01 para o Novo Ciclo de monitoramento da Sedimentação Costeira.

Recife dos Esquecidos (RE-01)



Localização da armadilha de sedimento

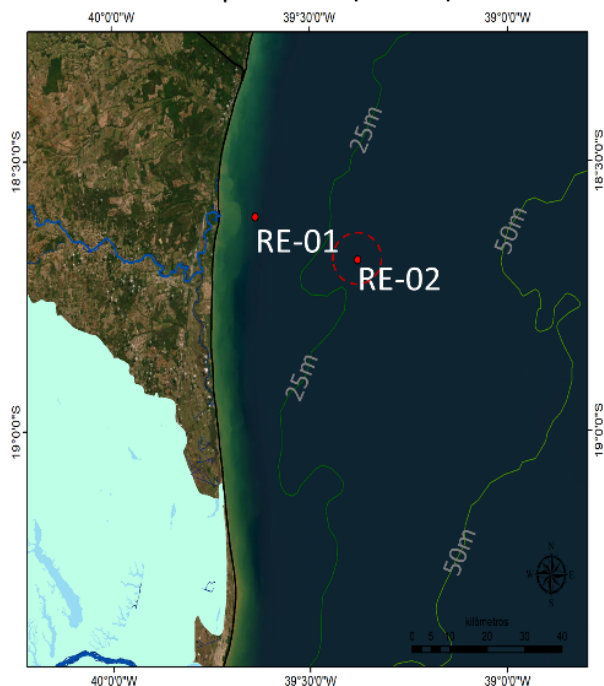
ATV 21: 04/09/2022 a 20/11/2022
ATV 22: 20/11/2022 a 11/01/2023.
ATV 23: 11/01/2023 a 18/04/2023.
ATV 24: 18/04/2023 a 11/07/2023.



No caso da estação RE-02, *offshore*, todas as assinaturas das ATV 21 (04/09/2022 a 20/11/2022), ATV 22 (20/11/2022 a 11/01/2023) e ATV 24 (18/04/2023 a 11/07/2023), representantes da fase seca (predominantemente) e início da fase úmida (ATV 22), apresentaram características do Estuário de Caravelas. Este comportamento é oposto ao observado na RE-01. Infelizmente não obtivemos material quantitativo suficiente para análise isotópica na ATV 23, fase úmida.

Figura 7: Resultados isotópicos para as amostras de sedimento provenientes da estação RE-02 para o Novo Ciclo de monitoramento da Sedimentação Costeira.

Recife dos Esquecidos (RE-02)



Localização da armadilha de sedimento

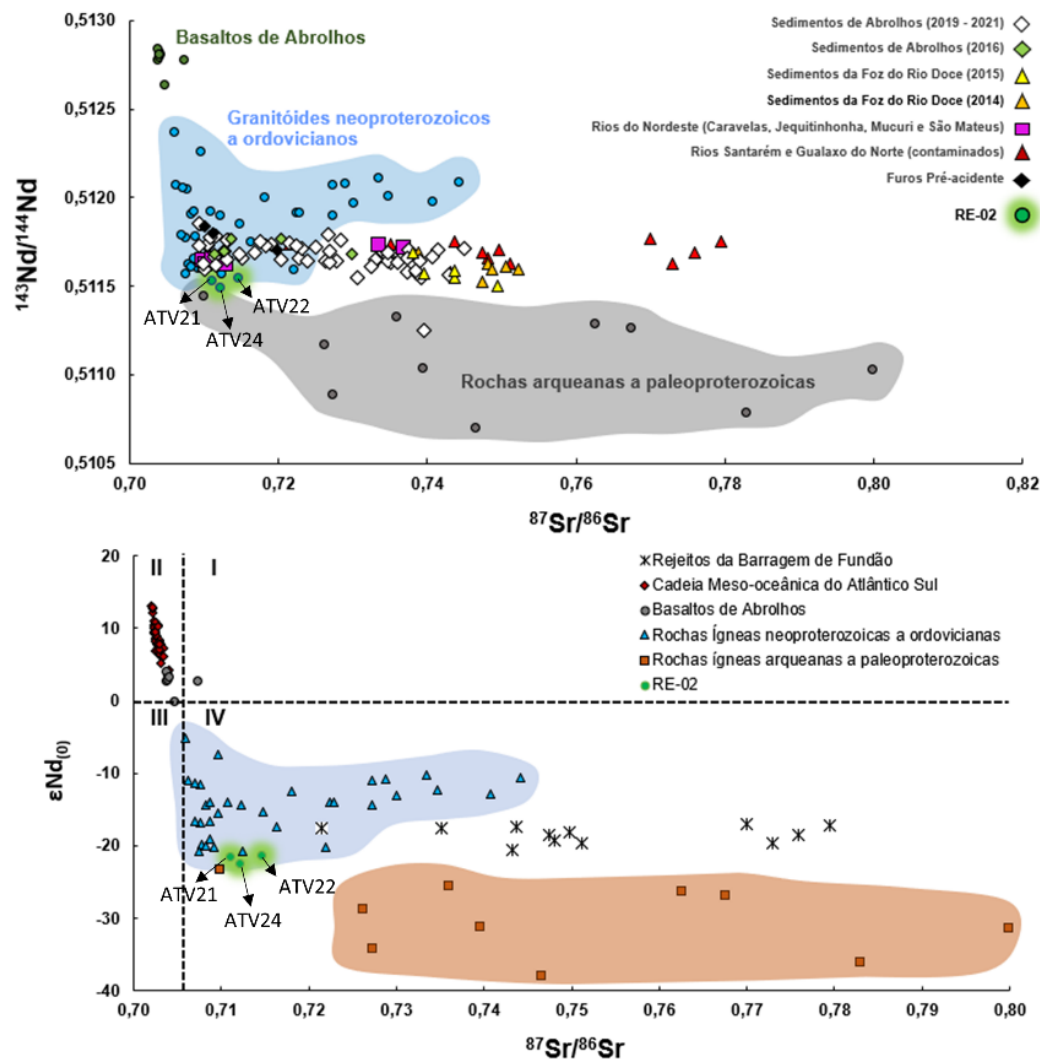
ATV 21: 04/09/2022 a 20/11/2022

ATV 22: 20/11/2022 a 11/01/2023.

ATV 23: 11/01/2023 a 18/04/2023.*

ATV 24: 18/04/2023 a 11/07/2023.

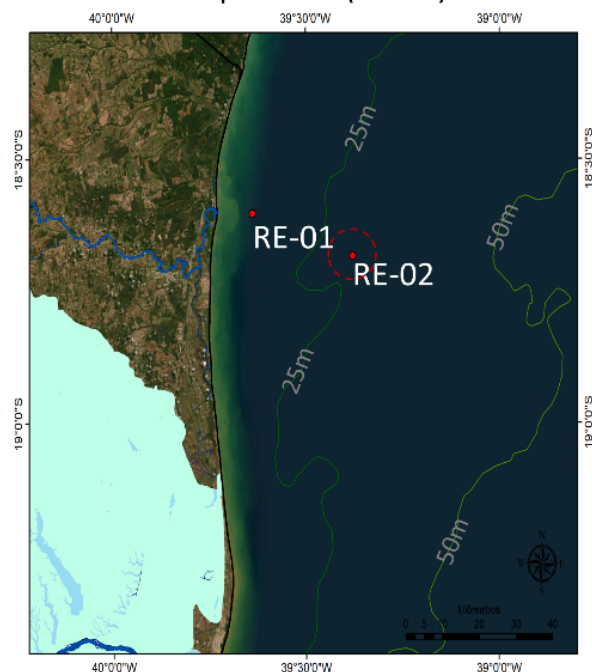
*Sem dados para Nd.



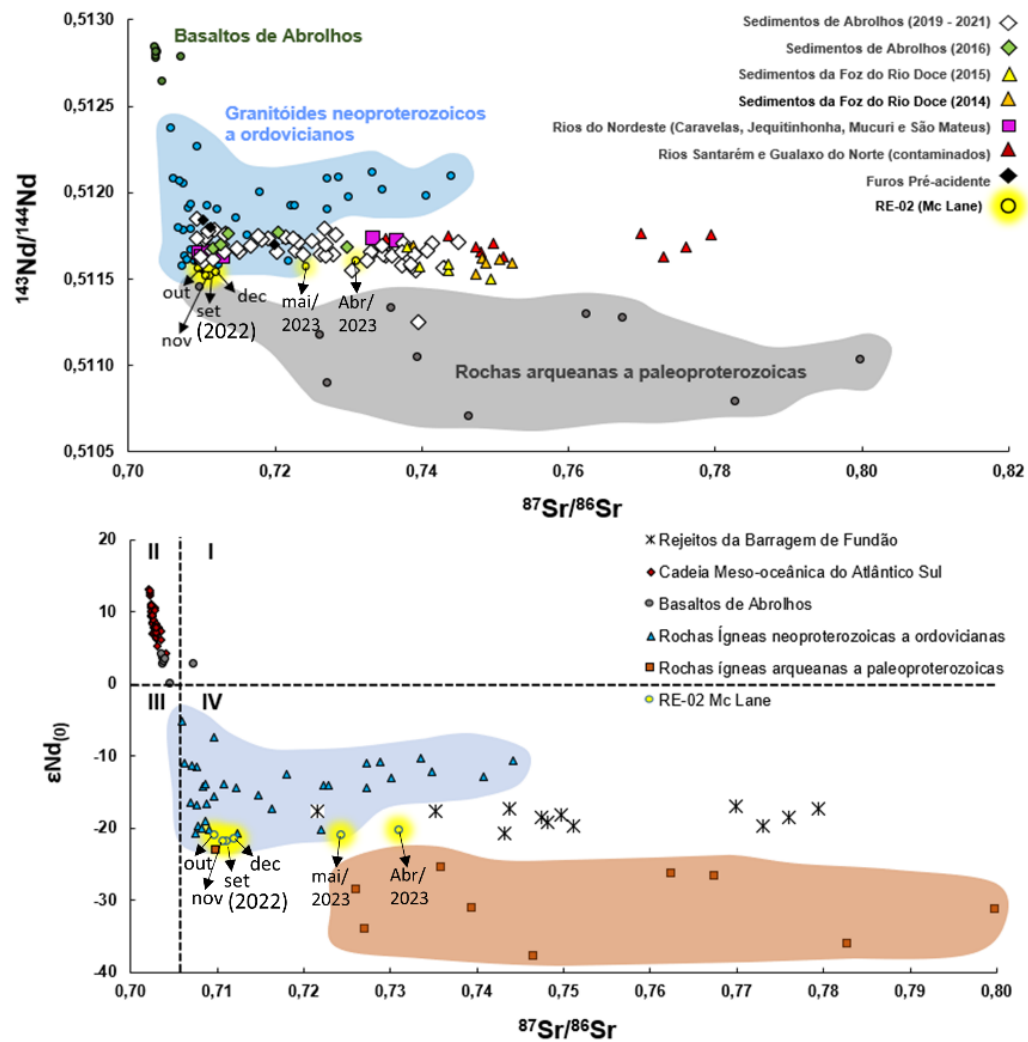
Para o amostrador automático, programado para amostragem com resolução mensal, MacLane, instalado próximo a RE-02, *offshore*, foi possível observar com maior nível de detalhes a evolução sazonal das assinaturas isotópicas. Para o período seco abril e maio de 2023 obtivemos resultados que sugerem mistura sedimentar entre os materiais da foz do Rio Doce e o Estuário de Caravelas. Já para a fase inicial das chuvas regionais, setembro, outubro, novembro e dezembro de 2022, predominou o aporte de sedimentos do Estuário de Caravelas.

Figura 8: Resultados isotópicos para as amostras de sedimento provenientes do Sistema automático MacLane para o Novo Ciclo de monitoramento da Sedimentação Costeira.

Recife dos Esquecidos (RE-02)



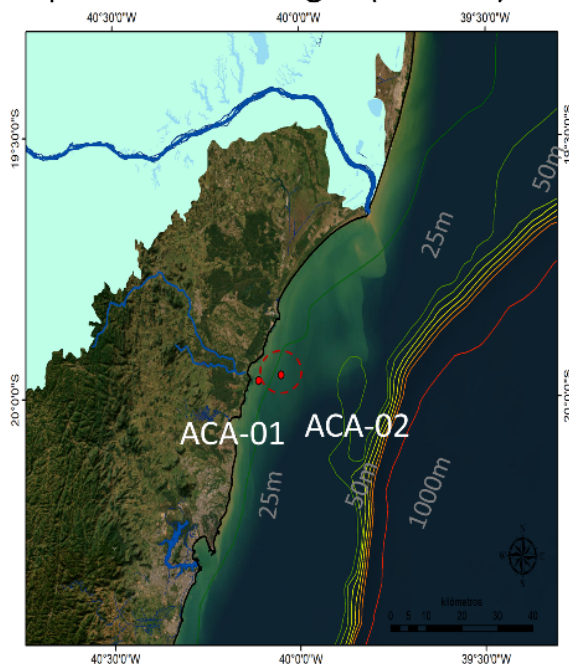
Localização da armadilha de sedimento



Para o amostrador automático MacLane, programado para coletas independentes com resolução mensal, instalado próximo à estação RE-02, *offshore*, o método possibilitou observar com maior nível de detalhes a evolução mensal das assinaturas isotópicas. Para o período seco correspondendo a abril e maio de 2023 obtivemos resultados característicos de mistura sedimentar entre fontes do Estuário de Caravelas e a Foz do Rio Doce, sendo a amostra de abril com características mais próximas a Foz do Rio Doce. Para o período imediatamente anterior a estação úmida nos meses de setembro, outubro, novembro e dezembro, houve total predominância da assinatura do Estuário de Caravelas.

Figura 9: Resultados isotópicos para as amostras de sedimento provenientes da estação ACA-02 para o Novo Ciclo de monitoramento da Sedimentação Costeira.

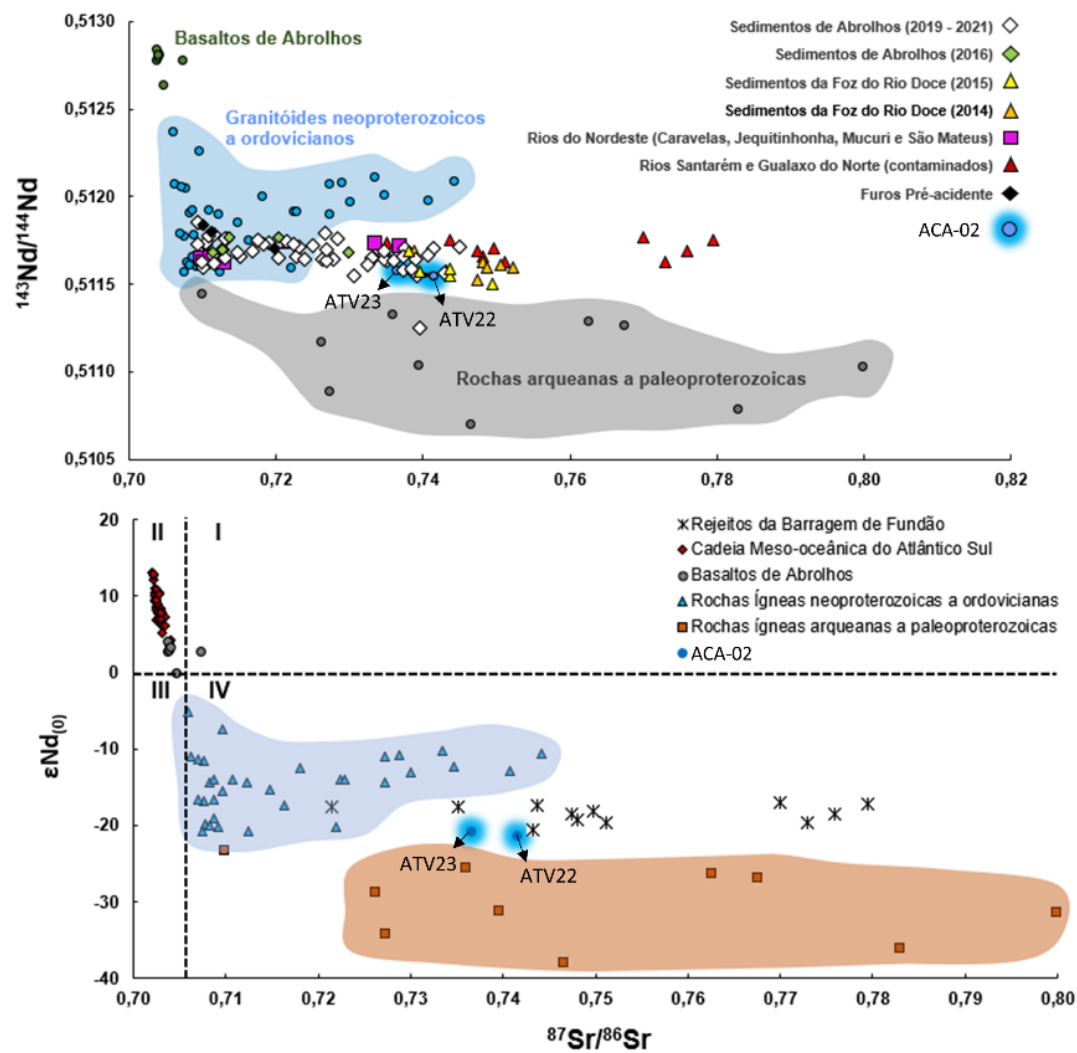
Apa Costas das Algas (ACA-02)



Localização da armadilha de sedimento

ATV 21: 04/09/2022 a 20/11/2022.*
ATV 22: 20/11/2022 a 11/01/2023.
ATV 23: 11/01/2023 a 18/04/2023.
ATV 24: 18/04/2023 a 11/07/2023.*

*Armadilha não encontrada.



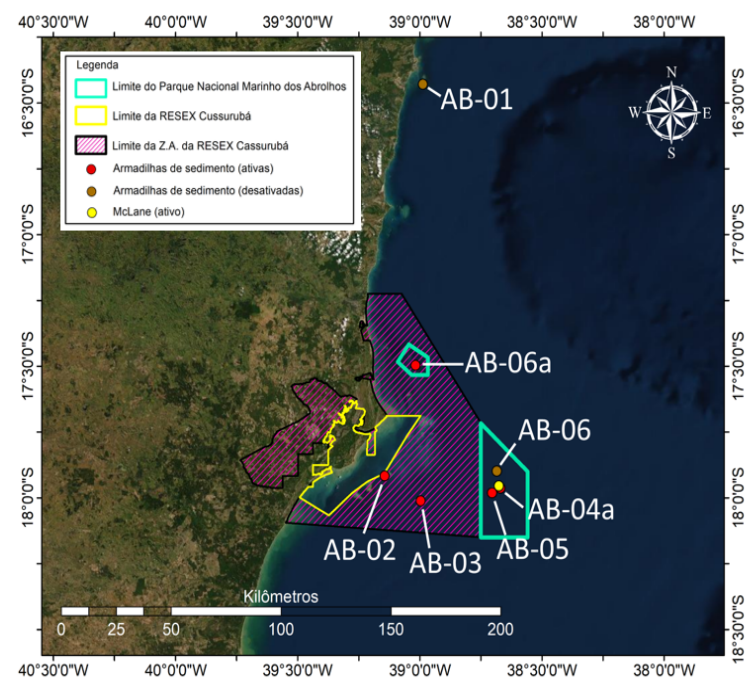
Para a região da APA Costa das Algas, diversas dificuldades foram encontradas, principalmente relacionadas à logística de campo. Para a estação ACA-01 tivemos as armadilhas furtadas ou semidestruídas por rede de arrasto em quase toda ATV realizada. Em quase todas as campanhas de resgate de material, a armadilha era encontrada emaranhada por redes de pesca. A equipe tomou várias atitudes para evitar sua perda tais como o fortalecimento da base de fixação da armadilha no substrato marinho, a mudança de ponto geográfico, realizamos campanhas de campo com os coordenadores da APA, mas em todos os casos não recuperamos o material coletado. Para a ACA-02, mais afastada da linha de costa, conseguimos recuperação para as ATV 22 e ATV 23, ou seja, para o início e desenvolvimento da fase chuvosa. A ATV 21 não foi realizada porque na oportunidade não tínhamos ainda a autorização do IBAMA para atuar dentro dos limites da APA. Nossos resultados até aqui mostram forte componente do Rio Doce sobre aquela região, com os dados isotópicos para Sr e Nd dentro dos valores da Foz do Rio Doce.

2.2 EXCESSO DE FE EM SEDIMENTOS NA COLUNA D'ÁGUA

2.2.1 FASE INICIAL: amostragens entre setembro de 2018 e setembro de 2022

Neste trabalho, além do uso de um traçador isotópico de proveniência mineral empregamos paralelamente um segundo traçador com características completamente independente. Neste caso, empregamos o ferro em excesso cujos resultados ao longo do monitoramento estão apresentados na Figura 10.

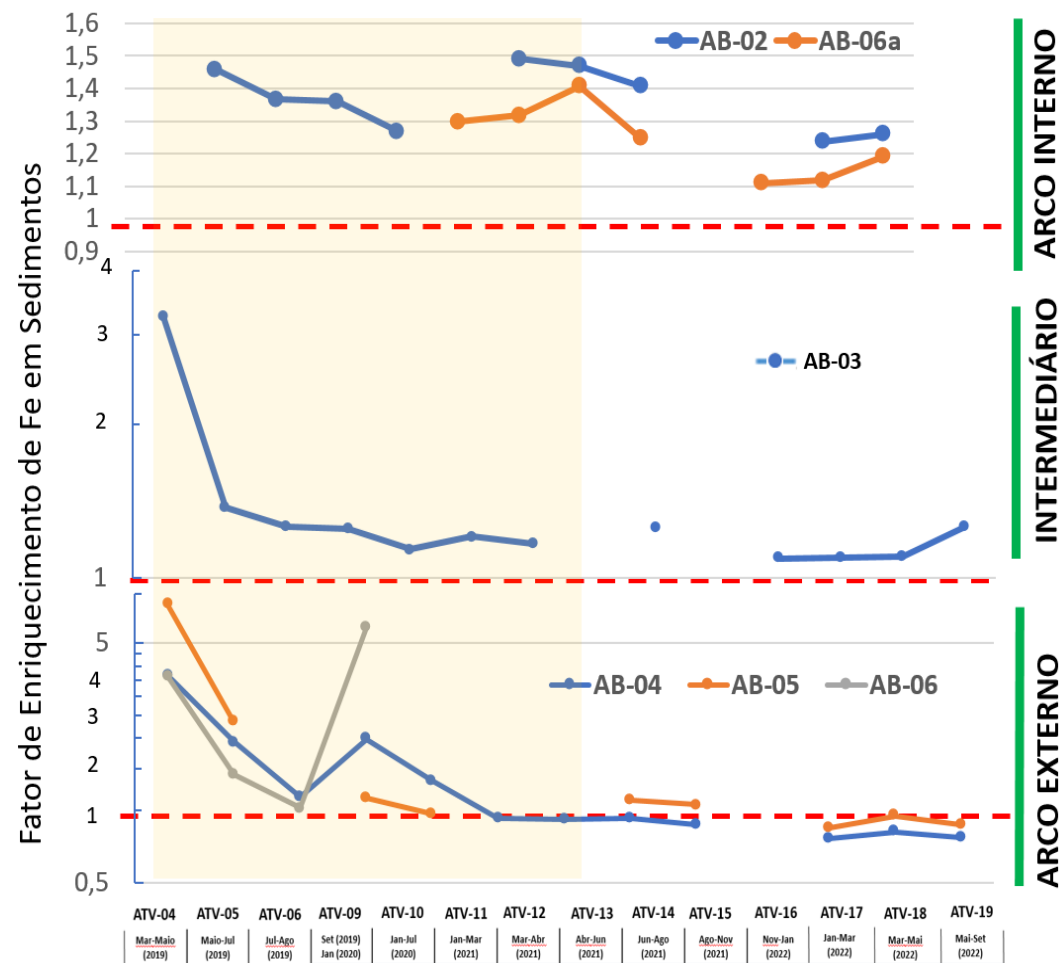
Figura 10: Mapa de localização das estações de coleta de sedimentos armadilhados e cálculo do enriquecimento de Fe ao longo das ATVs. A linha tracejada delimita o limite de corte para aportes sedimentares externos quando os valores excedem esta referência (valores maiores ou iguais a 1,0) ou quando ocorrem diluições (valores menores do que 1,0). O modelo para o cálculo do enriquecimento de Fe é baseado em dados de referência para Fe e Al em Netto, 2008, onde foram analisados 2 testemunhos sedimentares curtos cuja cronologia é anterior a chegada dos rejeitos de minério a foz do Rio Doce.



Ref: Netto, 2008

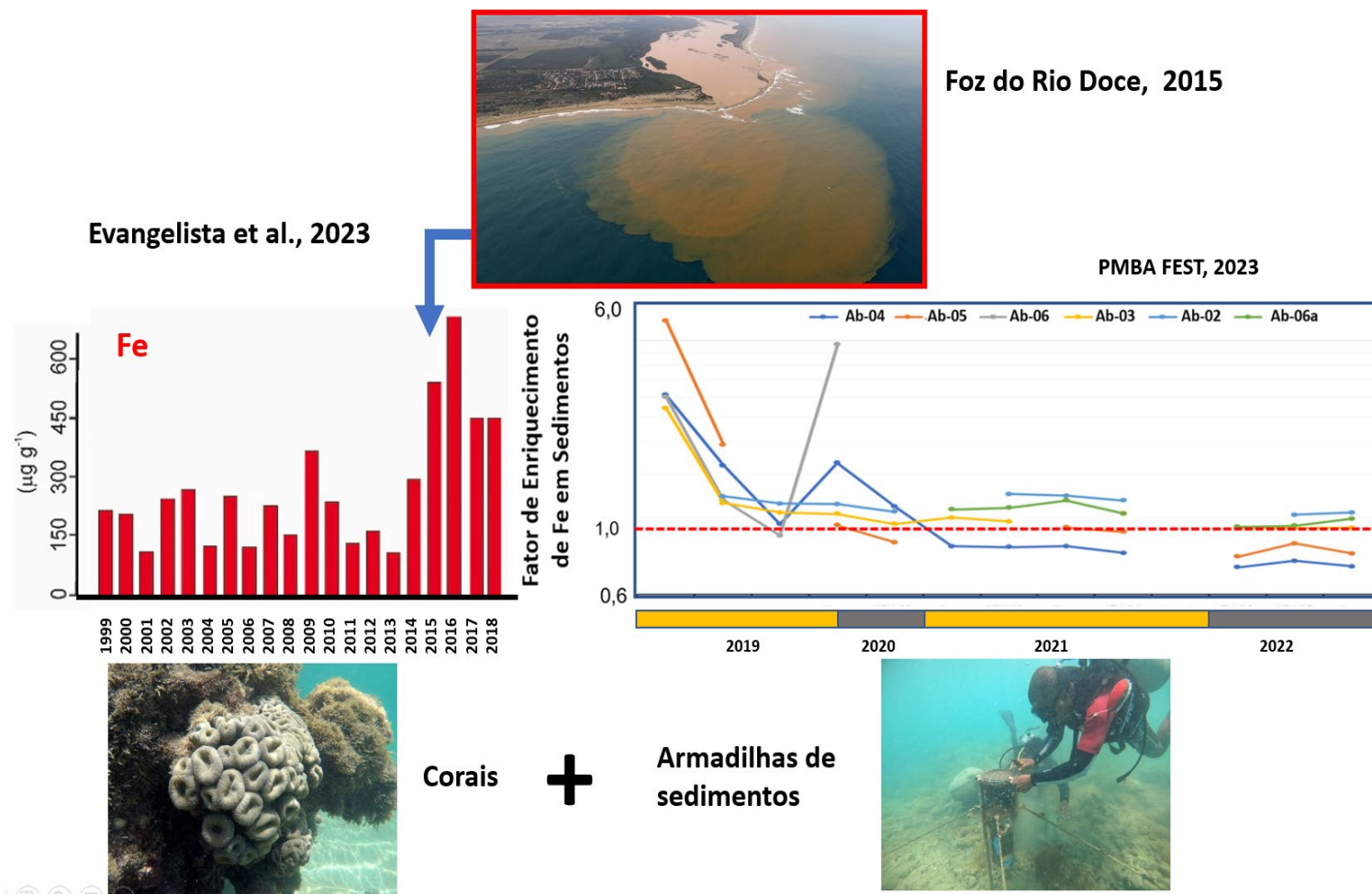
Médias: Fe= 55 mg/g
e Al= 80 mg/g

$$FE_{Fe} = \frac{\left\{ \frac{Fe}{Al} \right\}_{armadilha}}{\left\{ \frac{Fe}{Al} \right\}_{referência}}$$



Excessos de Fe foram analisados nos sedimentos armadilhados em Abrolhos em virtude deste elemento representar um dos maiores contaminantes presentes nos rejeitos da Samarco. Os valores de referência para a análise do excesso foram obtidos a partir de 2 testemunhos sedimentares coletados próximos a foz do Rio Caravelas anteriormente ao rompimento da barragem de Fundão e descritos na tese de Netto, 2008, “Modificações da Zona Costeira do Extremo Sul da Bahia nos últimos 150 anos, e sua relação com a sedimentação do Banco de Abrolhos - UFBA”. Foram utilizadas as razões Fe/Al dos testemunhos sedimentares como referências. Os resultados evidenciam claramente as anomalias de Fe, cuja variabilidade temporal está relacionada aos setores geográficos locais. Há predominância de valores de excesso $> 1,0$ para o arco interno, com tendência de redução (de 1,5 para 1,1) entre as ATVs 4 e 18. Esta tendência dos valores em direção aos padrões naturais indica uma provável redução do impacto dos rejeitos de minério enriquecidos com Fe para o arco interno de Abrolhos. Para a região intermediária, caracterizada pela estação ab-03, observou-se um grande aumento 1,5 e 3,0 no início do monitoramento, até a ATV6, seguindo de redução expressiva com tendência clara aos níveis naturais para a região, mantendo-se assim até o término do monitoramento. Para o arco externo, observamos um período de transição com fortes anomalias no início do monitoramento, entre as ATVs 4 e 9, com valor máximo atingindo fator de enriquecimento 7. Após esta fase, observamos decréscimo da componente exógena e tendência dos valores aos padrões esperados para a região, ou seja, com a valores de 1,0. Os dados de enriquecimento de Fe obtidos no monitoramento para os arcos interno, externo e região intermediária, corroboram a análise dos dados isotópicos para Sr e Nd que evidenciaram a presença de um pulso sedimentar decorrente do aporte de traços de rejeitos de minério contendo Fe a partir da Foz do Rio Doce com tendência de redução progressiva na série temporal. Vale ressaltar que o arco interno ainda permanece, ao término da etapa de monitoramento em Abrolhos, sob influência de sedimentos de fontes externas contendo Fe.

Figura 11: Composição da presença de Fe em excesso em Abrolhos a partir do enriquecimento de Fe para as amostras das armadilhas de sedimentos e; de forma complementar, para Fe em bandas de crescimento anuais em esqueleto de coral (*Mussismilia Harttii* em Evangelista et al. 2023).

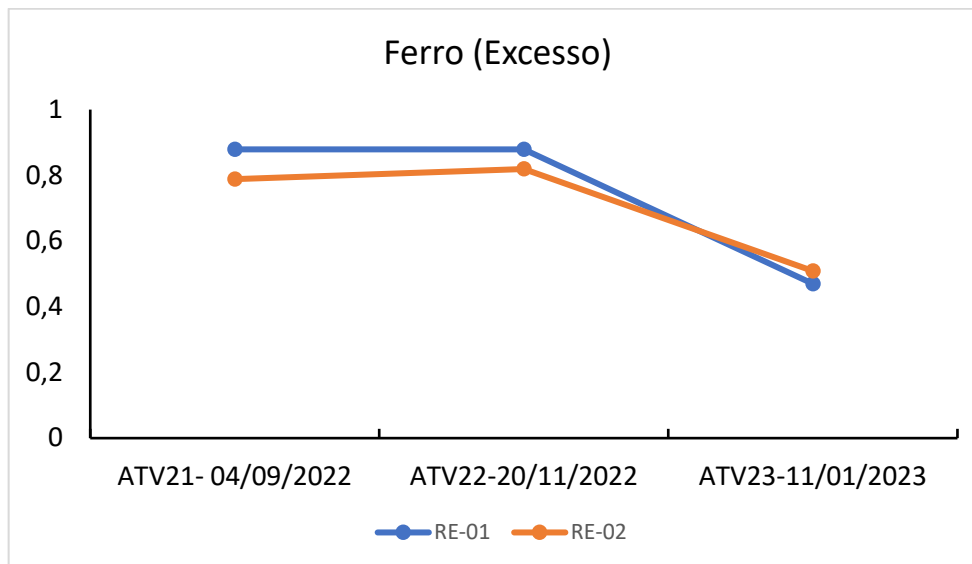


Neste trabalho, combinamos dados de excesso de Fe das armadilhas de sedimentos com os dados de incorporação de Fe em bandas de crescimento de carbonato de cálcio (Evangalista et al., 2023). Os dados de Fe em corais são retrospectivos de 1999 até 2018 quando a colônia foi coletada ainda viva no Parque Nacional Marinho dos Abrolhos. Já os dados dos sedimentos armadilhados cobrem o período de 2019 a 2022. O alinhamento destas bases de dados evidencia a ocorrência de um “pulso sedimentar” caracterizado por um aumento após 2015, atingindo um máximo em 2019, com posterior decréscimo após 2020 até final de 2022. Este comportamento corrobora o padrão observado pelos isótopos radiogênicos de Sr e Nd apresentados na Figura 4.

Apesar de observarmos uma redução importante do sinal sedimentológico da foz do Rio Doce em Abrolhos a partir do final de 2021, quando foram atingidos os níveis pré-rompimento de Fundão, dois aspectos devem ser considerados: (1) dados sedimentológicos obtidos no contexto do PMBA mostraram que há um aumento crescente no potencial de mobilidade do sedimento de fundo depositados nas adjacências da Foz do Rio Doce; (2) Jesus *et al.* (2022) avaliaram pela primeira vez a tendência de longo prazo na climatologia dos Ciclones Subtropicais sobre a bacia do Atlântico Sul sob o cenário RCP8.5. Neste trabalho foram empregadas duas projeções de conjunto compostas por três membros do RegCM4 e seus três GCMs orientados (HadGEM2-ES, MPI-ESM-MR e GFDL-ESM2M) com foco na validação do período histórico (1979-2005) além das projeções futuras para 2050–2080. Esta rodada de modelo empregou a reanálise ERA-Interim. Ambos os conjuntos projetam uma tendência negativa e estatisticamente significativa (ao nível de 90%) na frequência de Ciclones Subtropicais no clima futuro (2050–2080). Uma interpretação para este resultado seria devida, principalmente uma redução de Ciclones Subtropicais durante as estações de transição (outono e primavera), já que no verão austral não há tendências e o inverno apresenta tendência positiva. De Jesus *et al.* (2022) acrescentam que em termos de tempo de vida dos Ciclones Subtropicais, há projeções de uma tendência negativa (não ultrapassando – 20%) para sistemas com duração inferior a 6 dias, enquanto a frequência de Ciclones Subtropicais de longa duração (vida útil de 7 e 9 dias) vai aumentar. Por fim, e mais importante em relação aos estudos de sedimentação costeira no Brasil, os autores desmontaram que em relação à intensidade, esta aumentará em mais de 40% nos cenários avaliados acima. Tais sistemas frontais são responsáveis pelo transporte Sul-Norte de sedimentos da plataforma continental. Ao combinarmos estes dois fatores pode-se perceber que as projeções futuras para a sedimentação em Abrolhos requerem atenção e monitoramento permanente visto que temos um cenário futuro favorável para novos “pulsos sedimentares” naquela região.

2.2.2 NOVO CICLO DO PMBA: amostragens entre setembro de 2022 e março de 2023

Figura 12: Resultados para Fe em excesso calculados para RE-01 e RE-02 para o Novo Ciclo de monitoramento da Sedimentação Costeira.

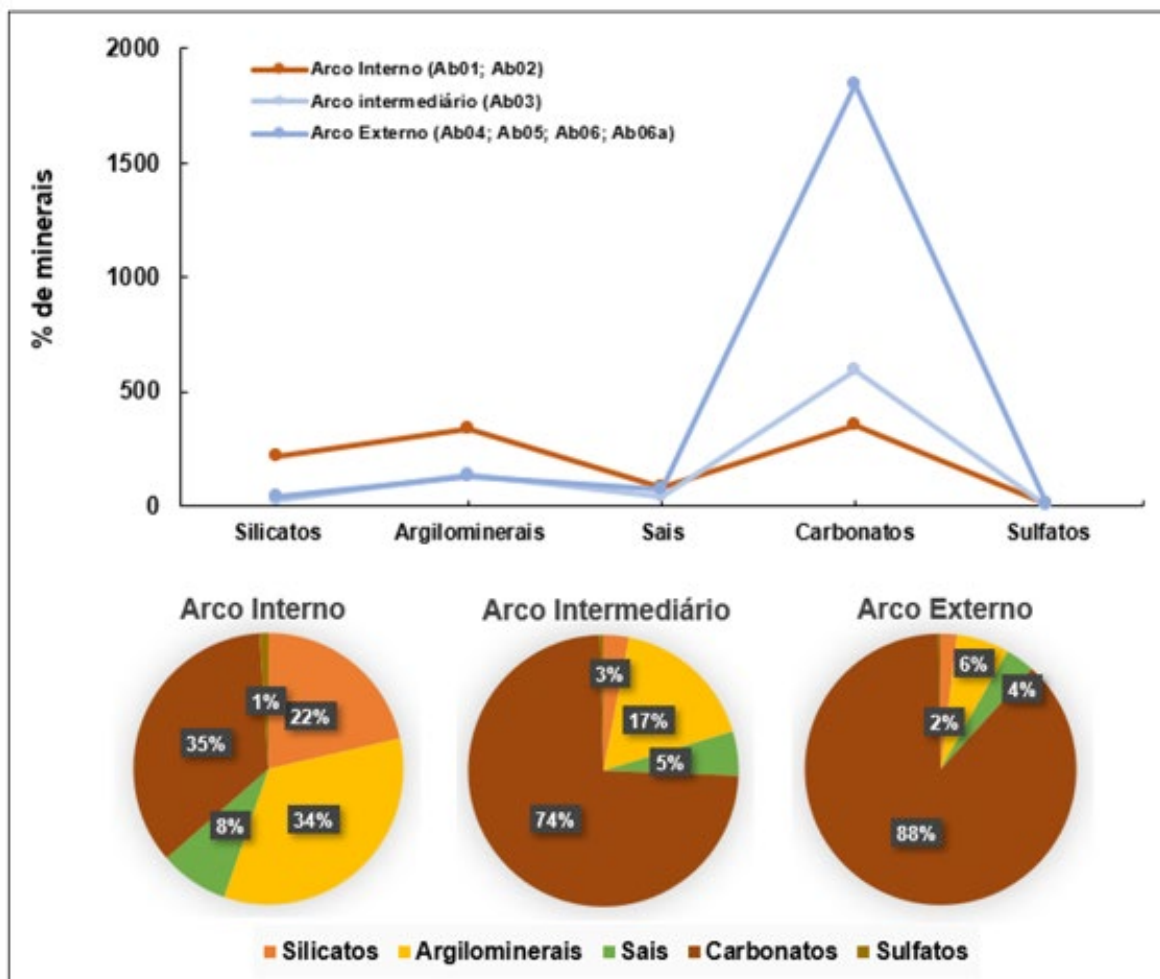


Os dados para Fe em excesso apresentados aqui foram calculados utilizando o mesmo modelo apresentado na Figura 10. Foram avaliados dados para as estações RE-01 e RE-02 relativos às ATV 21, ATV 22 e ATV 23, ou seja, para o fim da fase seca e início da úmida (ATV 21 e ATV 22, respectivamente) e para a fase úmida, ATV 23. Para as ATVs 21 e 22, os dados para Fe em excesso estiveram próximos à unidade indicando a predominância de sedimentos de fontes continentais locais. Para a fase úmida em ATV 23 observamos diluição do sinal local.

2.3 MINERALOGIA DOS SEDIMENTOS NA COLUNA D'ÁGUA

2.3.1 FASE INICIAL: amostragens entre setembro de 2018 e setembro de 2022

Figura 13: Proporção de minerais nas amostras de Abrolhos distribuídas entre Arco Interno, Arco Intermediário e Arco Externo.



Quanto os resultados de mineralogia, estes evidenciaram associações restritas de minerais que podem estar presentes em litotipos muito variados. A caulinita, gibbsita e illita são argilominerais secundários, formados a partir do intemperismo de feldspatos e micas em climas úmidos e, portanto, não são bons indicadores de proveniência neste estudo. 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). Quartzo, por sua vez, é um mineral resistato, ou seja, com nenhuma capacidade de alteração nos processos de intemperismo químico, e presente na maior parte das rochas. A associação mineralógica dos sedimentos coletados pode indicar uma proveniência a partir do retrabalhamento de rochas sedimentares, metassedimentares e de rochas granitóides mais antigas associadas as Bacias Hidrológicas no continente.

A mineralogia dos sedimentos de Abrolhos mostra a presença de minerais dos grupos dos silicatos (quartzo, albita, muscovita e apatita), incluindo os argilominerais (illita, caulinita e gibbsita), carbonatos

(calcita, aragonita e calcita magnesiana), sais (halita) e sulfatos (bassanita e gipsita). As amostras de Abrolhos são constituídas, predominantemente, por carbonatos, que compõem 48,09 % a 76,15 % dos minerais. Argilominerais são o segundo grupo mais abundante, variando de 3,54 a 27,10 %. Sais correspondem a < 10 %. Silicatos variam de 3,14 a 13,65 % e sulfatos ficam em torno de 1-3 %.

2.3.2 NOVO CICLO DO PMBA: amostragens entre setembro de 2022 e março de 2023

Figura 14: Proporção de minerais nas amostras de diferentes campanhas para a estação RE-01. A sequência numérica identifica a especiação mineralógica encontrada em cada campanha (ver texto).

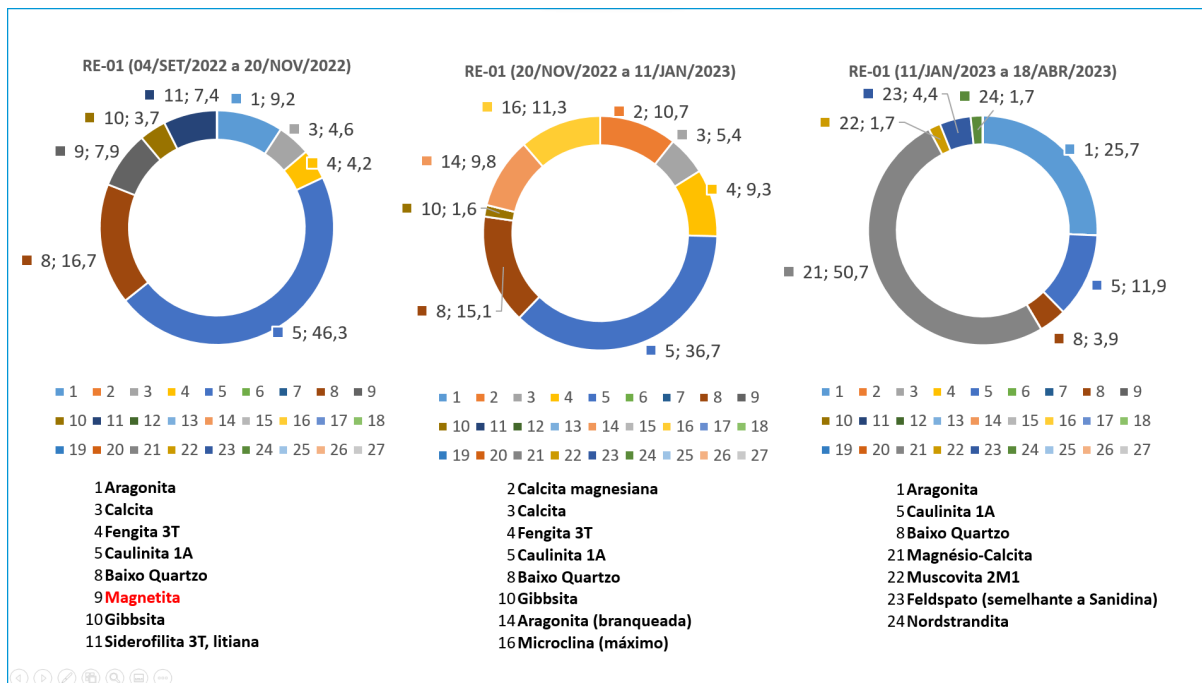


Figura 15: Proporção de minerais nas amostras de diferentes campanhas para a estação RE-02. A sequência numérica identifica a especiação mineralógica encontrada em cada campanha (ver texto).

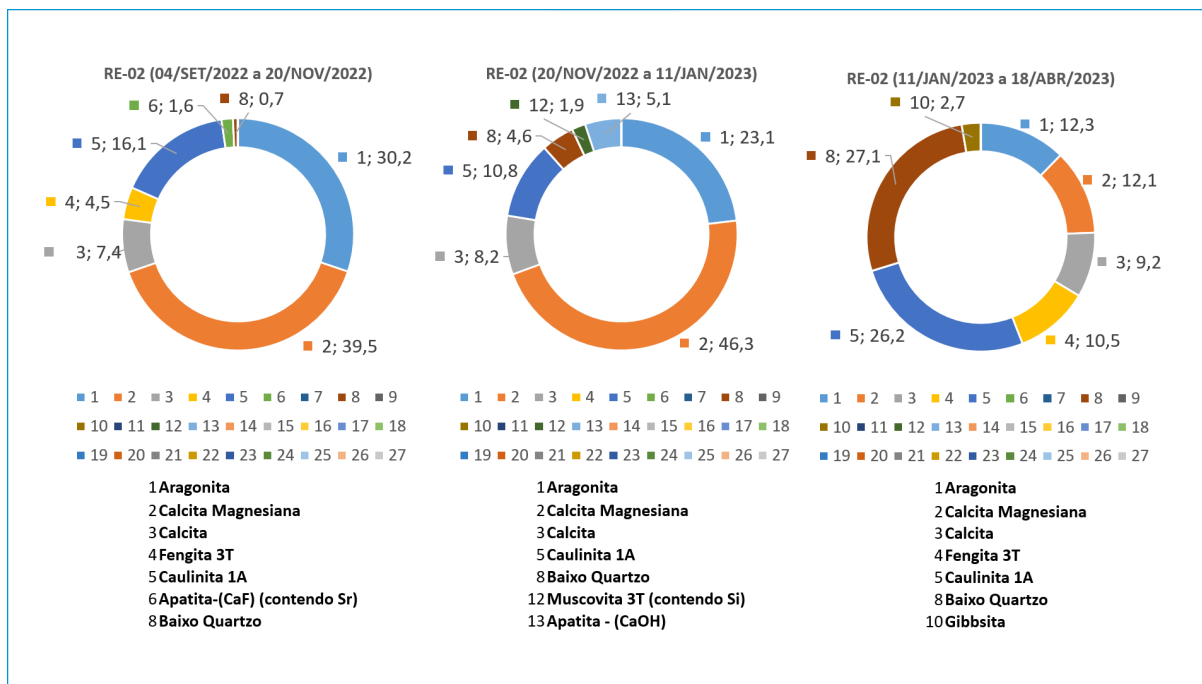
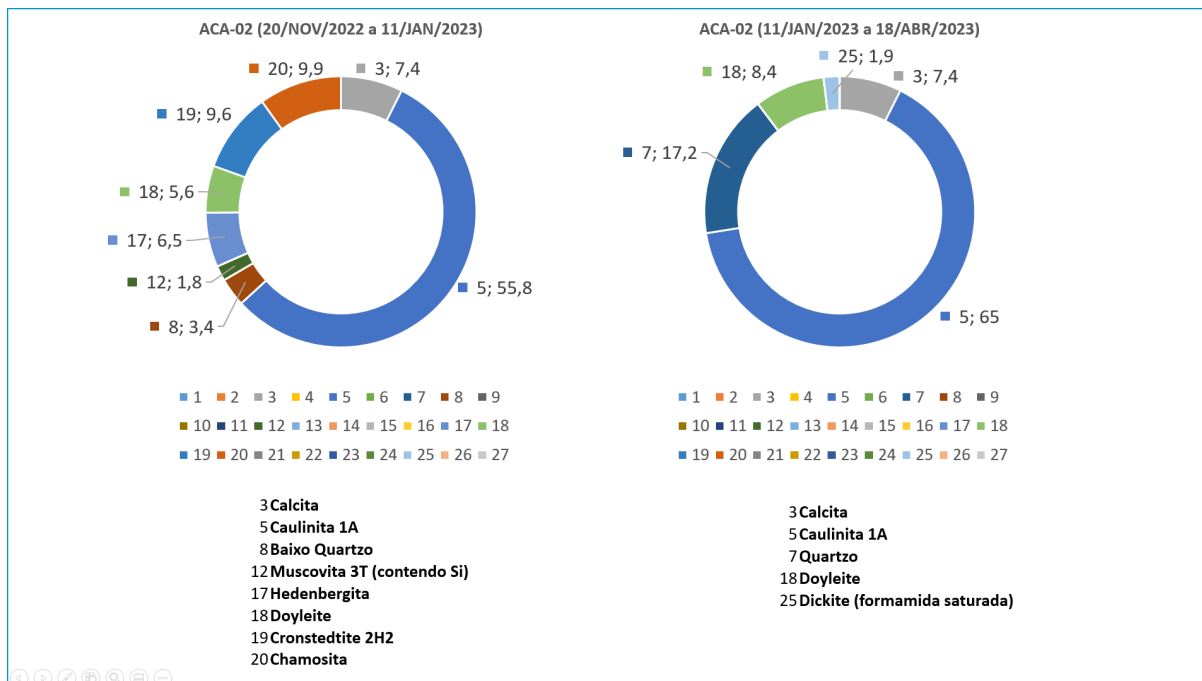


Figura 16: Proporção de minerais nas amostras de diferentes campanhas para a estação ACA-02. A sequência numérica identifica a especiação mineralógica encontrada em cada campanha (ver texto).



As amostras apresentam, em geral, fases minerais semelhantes, com variações nas intensidades dos picos e na proporção em relação ao total. As fases que surgem com maior frequência são caulinita, gibbsita, dickita, muscovita (muito frequentemente a variedade fengítica), quartzo, calcita e magnésio-calcita. Outras fases que ocorrem esporadicamente são apatita, magnetita, feldspatos alcalinos, doyleite, norstrandita, chamosita, cronstedtita e hedenberguita.

A análise por difratometria de raios X se vale da combinação entre intensidades e posicionamento de picos principais e secundários, independentemente da quantificação pelo método de Rietveld. A escolha das fases foi feita utilizando-se este critério, associado às pequenas variações de abertura e de posicionamento, da ordem de 0.2Å a 1Å, que indicam variações composicionais de acordo com as substituições e vacâncias possíveis nas estruturas cristalinas.

Alguns pontos a considerar:

- Caulinita, dickita, halloysita e nacrita são polimorfos de $\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$, e frequentemente ocorrem juntos ou em camadas intercaladas, embora a definição dos picos presentes nos difratogramas permita inferir que a cristalinidade dos argilominerais é relativamente alta. Sendo assim, a presença de halloysita pode ser descartada, mesmo sendo uma das possibilidades em sedimentos marinhos e fluviais, e a estrutura da nacrita preferencialmente se forma em ambientes hidrotermais, o que justificaria sua ausência nas análises.
- Gibbsita, bayerite, doyleite e nordstrandite são polimorfos de $\text{Al}(\text{OH})_3$ e podem ocorrer juntos da mesma forma, a depender do ambiente de formação e das condições de transporte e de deposição. Todos podem ser componentes, junto com outros minerais, de bauxitas e solos altamente intemperizados, e comumente resultam da lixiviação de polimorfos de caulinita.

- As micas comuns possuem estruturas muito próximas entre si, devido à constituição aproximadamente fixa das folhas siloxama e dioctaédricas/trioctaédricas. Filossilicatos do grupo da muscovita também apresentam picos iguais aos do grupo das illitas, contudo, a cristalinidade alta nas amostras analisadas permite inferir tratar-se predominantemente de muscovita, em geral na variedade fengita (contém ferro). São minerais exclusivamente de origem litogênica, assim como os feldspatos potássicos, e, portanto, podem ser utilizados para tomar inferências sobre a rocha-fonte dos sedimentos. Plagioclásios, principalmente cálcicos, são instáveis em ambiente aquoso. Albita, no entanto, pode se formar em sedimentos.
- A amostra de RE-02 da ATV-22 possui uma proporção entre os picos e o ruído de fundo (“background”), presença visível de $K\beta$ e scattering que dificultam a interpretação da amostra. Estas características costumam estar associadas a minerais com alto conteúdo em ferro, que não possui uma boa resposta quando incidido por radiação $CuK\alpha$. No caso, a presença de chamosita, cronstedtita e hedenberguita é condizente com essa condição, mas é possível que esta seja relacionada a outras espécies minerais que possuam alto teor de ferro, mas sem variar seu polimorfo, como é o caso da cronstedtita/bertierina (serpentinhas) e da hedenberguita/diopside (clinopiroxênios).
- Na combinação entre os diagramas, sem o tratamento matemático da identificação das fases, é possível verificar as mudanças entre as localidades e as campanhas de coleta.

Para a estação RE-01, localizada próximo a linha de costa, observamos uma importante mudança no padrão mineralógico entre as etapas de amostragens, Ativos. Entre os períodos de inverno e início da fase chuvosa de 2022 (Figura 14), houve o predomínio da caulinita ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$) e baixo quartzo nas amostras armadilhadas, normalmente associada a fração argila dos solos e, portanto, indicando aporte predominantemente terrígeno ou terrígeno de depósitos acumulados na região. Já no auge da estação chuvosa no verão, quando há forte predomínio dos ventos nos Setor N-NE, houve o predomínio da aragonita e Magnésio-Calcita, refletindo provavelmente os processos erosivos da zona recifal da região de Abrolhos localizada ao Norte e, provavelmente, do próprio Recife Esquecidos. Vale ressaltar que durante o período Setembro-Novembro, quando os sistemas frontais atuam na região trazendo ventos de Sul observamos 7,9% de magnetita (Fe_3O_4) nas amostras armadilhadas. Este dado é corroborado pela assinatura dos isótopos de Sr e Nd, durante a ATV-01, que apresentou a mesma assinatura dos sedimentos que fluem na foz do Rio Doce.

Para a estação RE-02, localizada “off shore”, em relação a estação RE-01, praticamente na área central dos Recifes Esquecidos, observamos um comportamento inversão em relação a RE-01, Figura 15. Durante os períodos de inverno e início da fase chuvosa houve o predomínio da aragonita e calcita magnesiana, caracterizando a influência local do próprio recife, enquanto que no auge da estação chuvosa no verão, houve o predomínio da caulinita e baixo quartzo, caracterizando uma influência exógena adicional sobre os sedimentos coletados. Parte desses “sedimentos exógenos” podem ter como origem a foz do Rio Doce pois a assinatura isotópica do material da garrafa de Abril 2023 do sistema automático MacLane instalado em Recife Esquecidos apresentou assinatura isotópica para Sr e Nd semelhante a Foz do Rio Doce, Figura 8.

Para a estação ACA-02, localizada a sul da foz do Rio Doce há o predomínio da caulinita durante toda a fase chuvosa. No período Novembro 2022 e Janeiro 2023, observamos quase aproximadamente 10% de chamosita $((\text{Fe}^{2+}, \text{Mg}, \text{Fe}^{3+})_5 \text{Al}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH}, \text{Cl})_8)$ na amostra armadilhas, Figura 16. Esse mineral de origem metamórfica ocorre em vários tipos de sedimentos ricos em ferro, tipicamente associado a siderita e magnetita (em menor escala a caulinita, quartzo, piroxênios, plagioclásio, olivina, calcita), mas também autígeno formado sob condições redutoras na presença de matéria orgânica decomposta.

3 REFERÊNCIAS

- Almeida, C.M., Barbosa, C.F. Cordeiro, R.C., Seoane, J.C.S., Fermino, G.M., Silva, Turcq, B.J. 2013. Palaeoecology of a 3-kyr biosedimentary record of a coral reef-supporting carbonate shelf, Continental Shelf Research, 70:168-176,
- Amorim, F.N., Cirano, M., Soares, I.D., Campos, E.J.D., Middleton, J.F., 2012. The influence of large-scale circulation, transient and local processes on the seasonal circulation of the eastern Brazilian shelf, 13 °S. Cont. Shelf Res. 32, 47–61. <http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2011.10.011>.
- Amorim, F.N., Cirano, M., Marta-Almeida, M., Middleton, J.F., Campos, E.J.D., 2013. The seasonal circulation of the eastern Brazilian shelf between 10°S and 16°S: a modelling approach. Cont. Shelf Res. 65, 121–140. <http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2013.06.008>.
- Bowen, H.J.M., Environmental chemistry of the elements, Academic Press, London, 1977
- Campos, C.P., Mendes J., Ludka I.P., by Medeiros S., Costa-de-Moura J., Wallfuss C. 2004. A review of the Brasiliano magmatism in southern Espírito Santo, Brazil, with emphasis on post-collisional magmatism. In: Weinberg, R., Trouw, R., Fuck, R., Hackspacher, P. (Eds.), The 750-550 Ma Brasiliano event of South America. Journal of the Virtual Explorer, Eletronic Edition. ISSN 1441-8142, 17: Paper 1.
- Campos, C.P., Medeiros, S.R., Mendes, J.C., Pedrosa-Soares, A.C., Dussin, I., Ludka, I.P., Dantas, E., 2016. Cambro-Ordovician magmatism in the Araçuaí Belt (SE Brazil): snapshots from a post-collisional event. J. S. Am. Earth Sci. 68: 248-268. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2015.11.016>
- Castro, M.P. 2019. Evolução do Grupo Macaúbas e Formação Salinas no Orógeno Araçuaí Central, MG. 180 f. Tese (Doutorado em Evolução Crustal e Recursos Naturais) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.
- De Paolo, D.J., Wassenburg, G.J. 1976. Nd Isotopic variations and petrogenetic models. Geophys. Res. Lett. 3 (5): 249-252. <https://doi.org/10.1029/GL003i005p00249>.
- Dickin, A.P. 2005. Radiogenic Isotope Geology. Cambridge University Press, New York. <https://doi.org/10.1017/9781316163009>

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

Dussin, I.A., Dussin, T.M. 1995. Supergrupo espinhaço: modelo de evolução geodinâmica. Geonomos. 3, 19-26.: <https://doi.org/10.18285/geonomos.v3i1.212>

Evangelista, H., Godiva, D., Sifeddine, A., Leão, Z. M. A. N., Rigozo, N. R., Segal, B., Ambrizzi, T., Kampel, M., Kikuchi, R. K. P., Le Cornec, F. 2007. Evidences linking ENSO and coral growth in the Southwestern-South Atlantic. Clim. Dyn. 29: 869-880. <https://doi.org/10.1007/s00382-007-0271-8>.

Gonçalves, L., Alkmim, F., Pedrosa-Soares, A.C., Dussin, I.A., Valeriano, C.M., Lana, C., Tedeschi, M.F. 2015. Granites of the Intracontinental termination of a Magmatic Arc: An Example From The Ediacaran Araçuaí Orogen, Southeastern Brazil. Gondwana Res. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2015.07.015>.

Hatje, V., Pedreira, R.M.A., Rezende, C.E., Schettini, C.E., Souza, G.C., Marin, D.C., Hackspacher, P.C. 2017. The environmental impacts of one of the largest tailing dam failures worldwide. Nat Sci Rep. 7:10706 13. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11143-x>.

Jesus, E. M; Rocha, R. P.; Crespo, N. M.; Reboia, M. S.; Gozzo, L. F. 2022. Future climate trends of subtropical cyclones in the South Atlantic basin in an ensemble of global and regional projections". Climate Dynamics, 28. (doi:10.1007/s00382-021-05958-8)

Johnson, M.A.; Shatalov, O., The', J. L.; The', C. L. Wind Rose Plots for Meteorological Data – WRPLOT View. Freeware. Version 8.0.2. [S.l.]: Likes Environmental Software, 2018. Accessed on march 2, 2021

Marshak, S., Alkmim, F.F., Jordt-Evangelista, H. 1992. Proterozoic crustal extension and generation of dome-and-keel structure in Archean granite-greenstone terrane. Nature. 357: 491-493. <https://doi.org/10.1038/357491a0>.

Marta-Almeida, M., Mendes, R., Amorim, F. N., Cirano, M., & Dias, J. M. 2016. Fundão Dam collapse: Oceanic dispersion of River Doce after the greatest Brazilian environmental accident. Marine Pollution Bulletin, 112(1-2), 359–364. doi:10.1016/j.marpolbul.2016.07.039 .

Martins, V.T.S., Teixeira, W., Noce, C.M., Pedrosa-Soares, A.C. 2004. Sr and Nd Characteristics of Brasiliano-Pan African Granitoid Plutons of the Araçuaí Orogen, Southeastern Brazil: Tectonic Implications. Gondwana Res. 7: 75-89. [https://doi.org/10.1016/S1342-937X\(05\)70307-5](https://doi.org/10.1016/S1342-937X(05)70307-5).

Martins, M., Karfunkel, J., Noce, C.M., Babinski, M., Pedrosa- Soares A.C., Sial A.N., Liu D. 2008. The Pre-Glacial Sequence of the Macaúbas Group in the standard area and the record of the opening of the Araçuaí rift. Rev. Bras. Geociênc. 38: 761–772. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.2008384761772>.

Miranda, L.B., Castro, F.B.M.1981. Geostrophic flow conditions of the Brazil Current at 19°S. Ciência Interamericana, 22(1-2): 44-48.

Nalini, H.A., Bilal, E., Paquette, J-L., Pin, C., Machado, R. 2000. Géochronologie U–Pb et géochimie isotopique Sr–Nd des granitoïdes néoproterozoïques des suites Galiléia et Urucum, vallée du Rio Doce, Sud-Est du Brésil. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science*. 331: 459-466. [https://doi.org/10.1016/S1251-8050\(00\)01440-3](https://doi.org/10.1016/S1251-8050(00)01440-3).

Noce, C.M., Teixeira, W., Quéméneur J.J.G., Martins, V.T.S., Bolzachini E. 2000. Isotopic signatures of paleoproterozoic granitoids from the southern São Francisco Craton and implications for the evolution of the Transamazonian Orogeny. *J South Am Earth Sci* 13: 225-239. [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(00\)00019-5](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(00)00019-5)

Noce, C.M., Pedrosa-Soares, A.C., Silva, L.C., Alkmim, F.F. 2007. O embasamento Arqueano e Paleoproterozóico do Orógeno Araçuaí. *Geonomos*. 15 (1): 17-23. <https://doi.org/10.18285/geonomos.v15i1.104>.

Novo, T.A., Pedrosa-Soares, A.C., Noce, C.M., Alkmim, F.F., Dussin, I. 2010. Rochas Charnockíticas do sudeste de Minas Gerais: A raiz granulítica do Arco Magmático do Orógeno Araçuaí. *Revista Brasileira de Geociências*, 40(4): 573-592. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.2010404573592>

Oliveira, E.P., Carvalho, M.J., Mc Naughton, N. 2004. Evolução do segmento Norte do Orógeno Itabuna- Salvador- Curaçá: cronologia da acreção de arcos, colisão continental e escape de terrenos. *Geol. USP. Sér. Cient.* 4(1): 41-53. <http://dx.doi.org/10.5327/s1519-874x2004000100003>.

Pedrosa-Soares, A.C., Noce, C.M., Wiedemann, C.M., Pinto, C.P., 2001. The Araçuaí–West Congo orogen in Brazil: An overview of a confined orogen formed during Gondwanland assembly. *Precambrian Research* 110, 307–323

Peterson, R., Stramma, L. 1991. Upper-level circulation in the South Atlantic Ocean. *Progr. Oceanogr.* 26(1): 1–73. [https://doi.org/10.1016/0079-6611\(91\)90006-8](https://doi.org/10.1016/0079-6611(91)90006-8).

Rodrigues, R.R., Rothstein, L.M., Wimbush, M., 2007. Seasonal variability of the south equatorial current bifurcation in the Atlantic Ocean: a numerical study. *J. Phys. Oceanogr.* 37, 16–30. <http://dx.doi.org/10.1175/jpo2983.1>.

Silveira, I.C.A., Schmidt, A.C.K., Campos, E.J.D., Godoi, S.S., Ikeda, Y.A. 2000. Corrente do Brasil ao Largo da Costa Leste Brasileira. *Rev. Bras. Oceanogr.* 48 (2): 171-183. <https://doi.org/10.1590/S1413-77392000000200008>.

Tedeschi M., Novo T., Pedrosa-Soares AC, Dussin, I. Tassinari C., Silva LC, Gonçalves L., Alkmim FF, Lana, C., Figueiredo C., Dantas E., Medeiros S., De Campos C., Corrales F., Heilbron M. 2016. The Ediacaran Rio Doce magmatic arc revisited (Araçuaí-Ribeira orogenic system, SE Brazil). *J. S. Am. Earth Sci.* 68: 167-186. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2015.11.011>

Valeriano, C.M., Neumann, R., Alkmim, A. R., Evangelista, H., Heilbron, Neto, C.A., Paravidini G.S. 2019. Sm–Nd and Sr isotope fingerprinting of iron mining tailing deposits spilled from the failed SAMARCO Fundão dam 2015 accident at Mariana, SE-Brazil. *Applied Geochemistry*. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.04.021>.

Vilas Boas, G.S., Sampaio, F.J., Pereira, A.M.S. 2001. The Barreiras Group in the Northeastern coast of the State of Bahia, Brazil: depositional mechanisms and processes. An. Acad. Bras. Ciênc.73(3): 417-427.