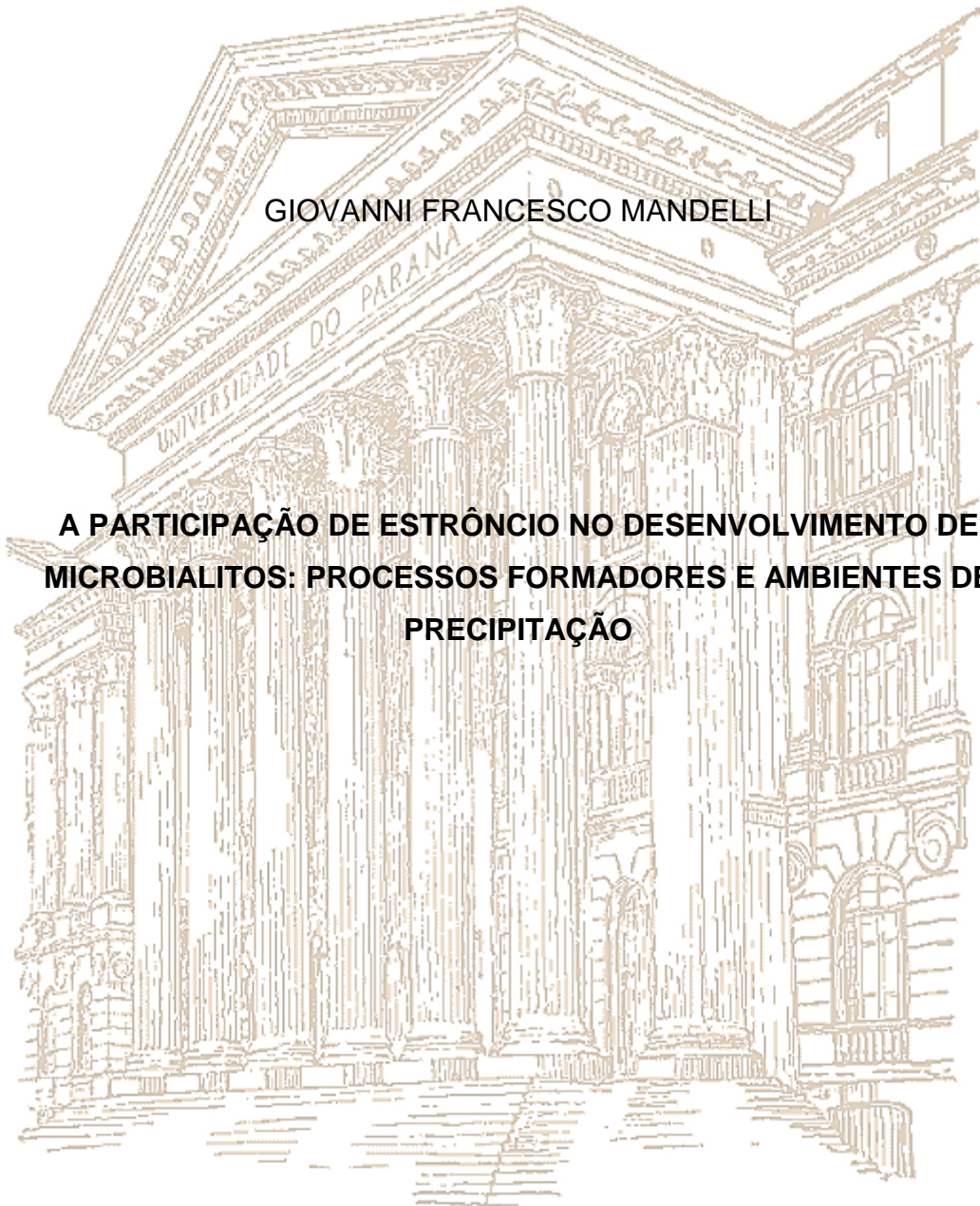


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
CURSO DE GEOLOGIA

GIOVANNI FRANCESCO MANDELLI

**A PARTICIPAÇÃO DE ESTRÔNCIO NO DESENVOLVIMENTO DE
MICROBIALITOS: PROCESSOS FORMADORES E AMBIENTES DE
PRECIPITAÇÃO**



CURITIBA

2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
CURSO DE GEOLOGIA

GIOVANNI FRANCESCO MANDELLI

**A PARTICIPAÇÃO DE ESTRÔNCIO NO DESENVOLVIMENTO DE
MICROBIALITOS: PROCESSOS FORMADORES E AMBIENTES DE
PRECIPITAÇÃO**

Monografia apresentada como requisito
à obtenção do título de Bacharel em
Geologia, Curso de Bacharelado em
Geologia, Setor de Ciências da Terra,
Universidade Federal do Paraná.

Orientadora:

Prof.^a Dr^a Anelize Bahniuk

Co-orientador:

MSc. Geólogo Rafael França de Mattos

CURITIBA

2016

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos aqueles que, de algum jeito estiveram envolvidos na execução deste trabalho, seja direta, ou indiretamente. Agradeço à estrutura fornecida pela Universidade Federal do Paraná (UFPR), pelo Setor de Ciências da Terra, pelo Departamento de Geologia e pelo Laboratório de Análise de Minerais e Rochas (LAMIR-UFPR).

Pessoalmente, gostaria de agradecer à orientação da Professora Anelize Bahniuk, as cobranças e “chamadinhas” que ajudaram na produção de um trabalho melhor. Também agradeço à orientação do Mestre Carioca (vulgo Rafael), a paciência, a amizade e a vontade de fazer um trabalho bem feito.

À toda equipe de professores que me fez chegar até aqui, à equipe técnica do LAMIR (Ivan, Roberto, Úrsula, Marcelo, Thiago, Keiji, Secci, Fran), aos amigos mestrandos do laboratório (o próprio Carioca, Larissa, Renato, Jéssica).

Aos amigos do curso, todos, que fizeram as aulas, aulas de campo, idas, feros, e tudo o mais serem momentos únicos. Especialmente à piizada, que fez as idas ao *Hayashida* fazerem sentido, por todos os papos cabeça e risadas idiotas que tivemos, e vamos ter ainda.

À Minha Namorada, Marina, pelo sentimento puro de amor e confiança, que só se encontra uma vez, pela parceria, pelos almoços de RU, pela goiaba roubada no pé, pela foto na grama, pelas caronas (com e sem *stress* e exageros italianos) e tudo o mais que nos faz ser cada vez mais namorados. Eu amo você

Finalmente, mas nunca menos importantes, meus pais, Dalmi e Elson, obrigado por toda a estrutura e paciência ao longo desses 5 anos de Geologia, e 23 de vida, gostaria de dizer que por mais que não pudessem me dar sempre tudo o que eu queria, sempre me deram tudo o que eu precisava. Por isso, sou eternamente, grato. Amo vocês e desculpa qualquer coisa.

Muito obrigado.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é o entendimento de mecanismos e processos envolvidos na precipitação e formação de rochas carbonáticas continentais, dentre elas, os microbialitos, termo que descreve depósitos organosedimentares, como tufas, travertinos e estromatólitos. Rochas carbonáticas são formadas nos mais diversos ambientes geológicos, desde o Proterozóico até o Recente, sendo que, nos últimos anos, intensificaram-se as pesquisas nesse assunto. As amostras aqui analisadas são de microbialitos e foram coletadas em diversas localidades (Brasil – MA, MS, RJ e PR; Turquia – região de Denizli, sudoeste do país; Japão – região de Kinki-Chugoku, sudoeste do país) e abrangem um intervalo de idades que vai do Proterozóico até a atualidade. Análises geoquímicas, difratometria e fluorescência de raios-X, e de biogenicidade, foram realizadas com o intuito de investigar uma possível correlação entre o aumento na concentração de estrôncio com registros de atividade microbiana envolvida no processo de precipitação dessas rochas. Conforme esta atividade microbiana se desenvolve no ambiente, ou até mesmo na rocha, surgem as EPS (substâncias poliméricas extracelulares), estruturas geralmente filamentosas consideradas um registro direto de organomineralização. Além destas estruturas orgânicas, acredita-se que a presença microbiana também poderia ser verificada por meio de concentrações de estrôncio, já que haveria um comportamento geoquímico semelhante ao de outros elementos constituintes de carbonatos (Ca e Mg). Verificou-se que há sim uma relação entre as concentrações de estrôncio e atividade microbiana, porém, esta relação não é direta, contrariando a hipótese inicial do trabalho.

Palavras-chave: Desenvolvimento de microbialitos. Concentrações de estrôncio (Sr). Processos organomineralizadores.

ABSTRACT

The objective of this work is the understanding of the mechanisms and processes involved in the precipitation and formation of continental carbonate rocks, among them, the microbialites, a term that describes organ-sedimentary deposits, such as tufas, travertines and stromatolites. Carbonate rocks are formed in the most diverse geological environments, from the Proterozoic to the Recent, and, in the last years, the researches in this subject have intensified. The samples selected here are microbialites and were collected in several locations (Brazil - MA, MS, RJ and PR, Turkey - Denizli region, Japan - Kinki-Chugoku region). An interval of ages that goes from the Proterozoic to the present time. Geochemical, X-ray diffraction and fluorescence, and biogenicity analyses were carried out with the purpose of investigating a possible correlation between the increase in the strontium concentration and microbial activity involved in the precipitation of these microbialites. EPS (extracellular polymer substances) are produced by microbial activity in the environment, or even in the rock. EPS occurs, generally filamentous structures considered a direct record of organomineralization. Besides these organic structures, it is believed that microbial presence could also be verified by contents of strontium, since there would be a geochemical behavior similar to the main constituent of carbonates (Ca and Mg). It was verified that there is a relation between the concentrations of strontium and microbial activity, however, this relation is not direct, contrary to the initial hypothesis of the work

Keywords: Microbialites. Strontium (Sr) concentrations. Organomineralizing processes.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** – Dados de raio atômico e eletronegatividade dos elementos cálcio e carbonato, retirados do banco de dados da © *Royal Society of Chemistry*. Acredita-se que suas semelhanças químicas sejam as responsáveis por substituições entre os elementos nos cristais formados em processos organomineralizadores. Além disso, estas semelhanças também facilitariam a captura desses elementos pelo EPS, que possui sítios específicos à nucleação e desenvolvimento de cristais, como verificados nos estudos de Dupraz et al. (2009). (Fonte: adaptação feita com os dados da © *Royal Society of Chemistry*). 18
- Figura 2** - Esquema de localização das áreas de interesse discutidas neste trabalho, em que as marcações em vermelho indicam a localização aproximada dos sítios de estudo e coleta de amostras. (Adaptadas de: banco de imagens licenciadas do Wikimedia Commons). 23
- Figura 3** - Afloramento de estromatólitos da Formação Capiru, com estratificação característica, evidenciada pela diferença de cores. O sentido de crescimento se dá acompanhando a convexidade dos estratos verificados. (Fonte: Cortesia de Lara Lange). 28
- Figura 4** - Imagens de amostra pertencente à Formação Capiru, obtida através de microscopia eletrônica de varredura. Não é possível a verificação de quaisquer registros de EPS, apenas de uma estrutura maciça e cristalina, decorrente de processos metamórficos. (Fonte: o autor). ... 28
- Figura 5** - Estromatólito esférico da Formação Codó. Verifica-se a estratificação característica, evidenciada pela alternância de cores claras e escuras. (Fonte: BAHNIUK, 2014). 29
- Figura 6** – Diferentes níveis de detalhe em lâmina delgada. A) Visão geral da lâmina, com níveis de crescimento, em tons de verde e preto; e porosidade, horizontal e vertical, em branco. A pequena fratura está preenchida por calcedônia. B) Detalhe de nível de crescimento, com porosidade horizontal maior no contato entre níveis. C) Esferulitos verificados nos níveis de crescimento da lâmina. (Fonte: o autor). 30
- Figura 7** – Imagens da amostra pertencente à Formação Codó, obtida através de microscopia eletrônica de varredura. A) Porção de tapete microbial, constituído por muco orgânico microbial, em que os gérmenes de cristalização dos minerais carbonáticos serão trapeados e se desenvolverão. B) Projeção de filamentos de crescimento e desenvolvimento das bactérias e EPS alveolares (hooneycomb). (Fonte: o autor). 31

Figura 8 - Tufas da região de Bonito, MS, nas localidades de Mimosa e Taíka. Observam-se estruturas de crescimento e escape de gases, produtos durante a formação e precipitação da rocha. (Fonte: OSTE, 2016, em prep.)..... 32

Figura 9 - Imagem de microscopia eletrônica de varredura, exibindo EPS com feição honeycomb característica, um registro de atividade microbiana na história de desenvolvimento da rocha. (Fonte: OSTE, 2016, em prep.)..... 33

Figura 10 – Fotografias de detalhe das amostras de travertino coletadas no furo Çinkaya, região de Denizli, na Turquia. A) Fácies caliche, com intensa dissolução, formando poros alargados. B) Packstone com matriz micrítica e poros, produtos de dissolução. (Fonte: OSTE, 2015)..... 34

Figura 11 - Estromatólitos modernos das Lagoas Fluminenses, RJ, Brasil. A e B) Estromatólitos encontrados na Lagoa Brejo do Espinho, em que pode se verificar a laminação típica, precipitação de halita e também EPS (substância coloidal, na figura, colorida em tons de verde). C e D) Estromatólitos encontrados na Lagoa Vermelha, em que se verifica a laminação típica e estruturas de escape dos gases, produtos do metabolismo microbiano que atuou durante o desenvolvimento da rocha. (Fonte: BAHNIUK, 2013)..... 35

Figura 12 – Imagens das amostras das Lagoas Fluminenses, obtidas através de microscopia eletrônica de varredura. São registros de diferentes partes das amostras, com conteúdo microbiano, EPS, exibindo diferentes morfologias. A e B) Porção de tapete microbiano em que os germes de cristalização dos minerais carbonáticos serão trapeados e se desenvolverão. C, D e F) Projeção de filamentos de crescimento e desenvolvimento das bactérias e EPS. F) nódulos mais claros de halita trapeados e precipitados em EPS. (Fonte: o autor)..... 36

Figura 13 - Travertinos modernos da região de Kinki-Chugoku, Japão. Notar a fonte hidrotermal, acima, e, abaixo a precipitação de travertinos. Na foto de detalhe, observar as bolhas de gases, liberados durante os processos de formação da rocha, e as comunidades de cianobactérias (verde). (Fonte: MATTOS, 2016). 37

Figura 14 - Imagem de microscopia eletrônica de varredura, exibindo cristais de aragonita, com morfologia esferulítica, crescendo ao redor de tubos cilíndricos (filamentos bacterianos). (Fonte: MATTOS, 2016). 38

Figura 15 - Gráfico de dados obtidos em análise isotópica de carbono (^{13}C) e oxigênio (^{18}O), para os microbialitos estudados. Os dados estão agrupados segundo o tipo de microbialito e sua localização geográfica. Verificam-se três áreas distintas, em amarelo, em que haveriam maiores chances de se verificar processos organomineralizadores influenciados; em lilás, em que poderiam haver processos mineralizadores com pouca, ou nenhuma atividade microbiana; e, por

fim, em verde, em que poderiam se verificar processos organomineralizadores induzidos. (Fonte: o autor). 46

Figura 16 - Razões elementares entre Ca e Mg, projetadas para todas as amostras, após a normalização dos teores elementares para 100%. Os dados estão agrupados de acordo com a localização geográfica e tipo de microbialito das amostras. (Fonte: o autor). 48

Figura 17 - Razões elementares entre Ca e Sr, projetadas para todas as amostras, após a normalização dos teores elementares para 100%. Os dados estão agrupados de acordo com a localização geográfica e tipo de microbialito das amostras. (Fonte: o autor). 49

Figura 18 - Razões elementares entre Mg e Sr, projetadas para todas as amostras, após a normalização dos teores elementares para 100%. Os dados estão agrupados de acordo com a localização geográfica e tipo de microbialito das amostras. (Fonte: o autor). 50

Figura 19 - Diagramas ternários (Ca, Mg e Sr) construídos para cada localidade estudada, afim de demonstrar tendências composicionais, após cálculo de normalização para 100%, em cada tipo de microbialito e localidade. (Fonte: o autor). 53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Principais processos mineralizadores (biomineralização, organomineralização e mineralização) verificados na natureza, seus principais elementos constituintes e características essenciais, bem como os produtos esperados de cada processo. (Fonte: adaptada de DUPRAZ *et al.*, 2009). 14

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Resultados das análises mineralógicas (DRX) das amostras dos microbialitos estudados, arranjados de acordo com suas idades (mais recentes na base e mais antigas no topo), localização geográfica e tipos de microbialitos (separados pelas linhas horizontais dispostas ao longo do eixo vertical do gráfico).(Fonte: o autor). 40

Gráfico 2 – Resultados das análises de composição química (FRX) das amostras dos microbialitos estudados, arranjados de acordo com suas idades (mais recentes na base e mais

antigas no topo), localização geográfica e tipos de microbialitos (separados pelas linhas horizontais dispostas ao longo do eixo vertical do gráfico). (Fonte: o autor)..... 43

Gráfico 3 – Resultados das análises de concentração de estrôncio (Sr), em porcentagem, dos microbialitos estudados, arranjados de acordo com suas idades (mais recentes na base e mais antigas no topo), localização geográfica e tipos de microbialitos (separados pelas linhas horizontais dispostas ao longo do eixo vertical do gráfico). (Fonte: o autor)..... 44

Gráfico 4 – Variação das concentrações de Sr, em porcentagem, ao longo do tempo geológico, considerando as idades das amostras envolvidas no trabalho. Percebe-se um aumento nas concentrações de estrôncio para as amostras mais recentes, independentemente do tipo de amostra e, conseqüentemente, do ambiente em que se formam ou estão sendo precipitados. Os dados das amostras estão arranjados de acordo com suas idades (mais antigas na esquerda, mais recentes na direita), localização geográfica e tipos de microbialitos (separados pelas linhas verticais dispostas ao longo do eixo horizontal do gráfico). (Fonte: o autor)..... 52

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 OBJETIVOS.....	9
1.2 JUSTIFICATIVA.....	10
2 ESTADO DA ARTE / REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
2.1 MICROBIALITOS E PROCESSOS MINERALIZADORES RELACIONADOS.....	11
2.2 SUBSTÂNCIAS POLIMÉRICAS EXTRACELULARES (EPS).....	16
2.3 ESTRÔNCIO (Sr).....	17
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	18
3.1 MATERIAIS.....	18
3.2 MÉTODOS.....	19
3.2.2 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX).....	19
3.2.3 FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X (FRX)	20
3.2.4 PETROGRAFIA	20
3.2.5 ISÓTOPOS DE CARBONO E OXIGÊNIO	21
4 LOCALIZAÇÃO E GEOLOGIA REGIONAL.....	22
4.1 LOCALIZAÇÃO.....	22
4.2 GEOLOGIA REGIONAL.....	24
4.2.1 BRASIL.....	24
4.2.2 JAPÃO – Travertinos de Kinki-Chugoku, Fonte Hidrotermal Shionoha-Yama	26
4.2.3 TURQUIA – Travertinos de Denizli, testemunho Çinkaya.....	26
5 RESULTADOS OBTIDOS.....	27
5.1 PETROGRAFIA	27
5.1.1 ESTROMATÓLITOS – FORMAÇÃO CAPIRU (PR), BRASIL.....	27

5.1.2 ESTROMATÓLITOS – FORMAÇÃO CODÓ (MA), BRASIL	29
5.1.3 TUFAS – BONITO (MS), BRASIL	32
5.1.4 MICROBIALITOS MODERNOS – LAGOAS FLUMINENSES (RJ), BRASIL	35
5.1.5 TRAVERTINOS – KINKI-CHUGOKU, JAPÃO	37
5.2 COMPOSIÇÕES MINERALÓGICAS (DRX)	38
5.3 COMPOSIÇÕES QUÍMICAS (FRX)	41
5.4 GEOQUÍMICA ISOTÓPICA	45
6 RAZÕES ELEMENTARES (Ca, Mg e Sr).....	47
7 VARIAÇÕES NA CONCENTRAÇÃO DE Sr.....	51
8 CONCLUSÕES	54
REFERÊNCIAS.....	55
APÊNDICE I	58
APÊNDICE II	60
APÊNDICE III	62

1.INTRODUÇÃO

Cerca de 75% da superfície da crosta terrestre é recoberta por rochas sedimentares, sendo que 15% deste volume corresponde a rochas carbonáticas, incluindo continentais e, dentre elas, microbialitos (PRESS e SEVIER, 2001 *in* FRANÇA, 2016). Estas rochas, estão presentes nos mais diversos ambientes geológicos, ocorrendo desde o Proterozóico até o Recente (AWRAMIK & SPRINKLE, 1999 *in* FRANÇA, 2016). A precipitação dos minerais carbonatos que constituem essas rochas, é condicionada por diferentes processos físico-químicos, tais como: temperatura, luminosidade, salinidade, pH, saturação do meio (em Ca^{2+} , Mg^{2+} CO_3^{2-} , matéria orgânica, entre outros), ausência ou presença de atividade biológica, fatores climáticos, entre outros (BAHNIUK, 2013).

O objetivo desta pesquisa é o entendimento da concentração e variação de Sr em diferentes amostras de microbialitos precipitados nos mais diversos ambientes, tanto com influência biológica quanto precipitados inorganicamente. A hipótese de trabalho é que a presença de bactérias aumentaria a concentração de Sr, que tem o comportamento geoquímico semelhante ao do Ca, elemento de maior representatividade na composição de carbonatos, seguido do Mg. Para este estudo, foram selecionadas amostras de estromatólitos, PR e MA, Brasil; tufas, MS, Brasil; travertinos, sudoeste do Japão e sudoeste da Turquia; microbialitos modernos, RJ, Brasil.

1.1. OBJETIVOS

- Objetivo Geral

Identificar variações na concentração de Sr em diferentes amostras de carbonatos continentais e entender a participação biológica em sua precipitação.

- Objetivos específicos:
 - Análises de razões elementares, proporcionais e totais, envolvidas no sistema, com base em estudos de composição química;
 - Entendimento dos processos biológicos no fracionamento isotópico dos sistemas de Carbono e Oxigênio;
 - Compreensão das variações das razões Sr, Ca e Mg e sua relação no sistema carbonático;

1.2. JUSTIFICATIVA

Os trabalhos e pesquisas acerca de microbialitos vem intensificando-se nos últimos anos por se tratarem de rochas reservatório, tanto de água, quanto de hidrocarbonetos, e por estarem diretamente associados à vida primitiva e evolução no planeta em condições extremas. A compreensão dos processos formadores e o correto entendimento dos parâmetros envolvidos na formação deste tipo de rocha é fundamental na diminuição do risco exploratório e no avanço das pesquisas científicas relacionadas a vida, tanto intraterrestre, quanto extraterrestre. (MATTOS *et al.*, 2016).

Acredita-se que formas primordiais de vida intraterrestre alimentam-se de ferro e colonizam alguns dos locais mais inóspitos da Terra como a crosta ígnea que chega a cerca de 500 metros abaixo do fundo do oceano (MASCARELLI, 2009 *in* MATTOS, 2016). D'Hont *et al.*, (2009 *in* MATTOS, 2016), investigaram se a vida microbial do fundo do mar pode obter energia a partir de hidrogênio liberado durante o decaimento radioativo de urânio, tório e potássio quando nesse processo, a molécula de água é dividida em hidrogênio e oxigênio. De acordo com D'Hont *et al.*, (2009, *in* MATTOS, 2016), este processo pode ter ocorrido ao longo da história da Terra e pode estar ocorrendo atualmente em Marte.

Microbialitos também podem ser vistos como produtos físicos da interação entre as primeiras formas de vida (comunidades de bactérias) e o meio em que se encontravam. Essas interações, segundo Dupraz *et al.* (2009), são resultado de condições redox modificadas durante fotossíntese com oxigênio por cianobactérias e fazem com que sejam geradas as condições ótimas necessárias à precipitação dos microbialitos. Permitindo, ainda de acordo com o autor, a investigação de: interações microbiais, ciclagem biogeoquímica de elementos e interação entre minerais e microorganismos.

2. ESTADO DA ARTE / REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. MICROBIALITOS E PROCESSOS MINERALIZADORES RELACIONADOS

Microbialitos são depósitos organossedimentares formados pela ação de comunidades microbiais bentônicas, que aprisionam sedimentos detríticos e/ou realizam a precipitação mineral *in loco* (BURNE e MOORE, 1987 *in* RIDING, 2011). Tais comunidades microbiais são compostas de microorganismos eucariotas, uni ou multicelulares, e/ou procariotas, de domínios *Archea* e *Bacteria* (FAIRCHILD, *et al.*, 2015, *in* MATTOS, 2016). No entanto, cianobactérias filamentosas e cocóides poderiam ser consideradas as principais produtoras primárias e construtoras para microbialitos, tanto modernos quanto fósseis, especialmente estromatólitos (KNOLL *et al.*, 2013, *in* MATTOS, 2016). As comunidades microbiais também podem ser chamadas “tapetes microbiais”, termo introduzido por Doemel & Brock (1974, *in* MATTOS, 2016). No início foram utilizados três termos: “tapete de algas”, “tapete de bactérias” e “tapete microbial” simultaneamente, e nem sempre discriminativamente (GORBUSHINA e KRUMBEIN, 2000, *in* MATTOS, 2016).

Microbialitos desenvolvem-se ao longo de uma vasta gama de salinidade, alcalinidade e temperatura, seja em água salobra, marinha, hipersalina, hiperalcalina, hidrotermais ou meteóricas; ou ainda sob uma grande variedade de ambientes em condições de baixa umidade: sublitoral, abaixo do nível de

base das ondas de tempo bom, bacia epicratônica, ambiente lacustre, fluvial e terrestre (FAIRCHILD *et al.*, 2015, *in* MATTOS, 2016). Essas rochas e suas estruturas podem fornecer informações paleoambientais e paleogeográficas importantes, por exemplo, em relação à profundidade, grau de agitação e a clareza de água, e a direção da linha de costa. Como recifes, microbialitos podem constituir barreiras, com propriedades estruturais e porosas próprias, entre paleoambientes sedimentares, calmos ou agitados, rasos ou profundos e marinhos abertos ou fechados. Sendo assim, pode haver implicações importantes, especialmente no que diz respeito à migração de óleo e localização de reservatórios de hidrocarbonetos, ou mineralizações de fosfato, Zn, Pb, Cu, L, etc. (MENDELSON, 1976 *in* MATTOS, 2016).

O processo de mineralização que irá gerar o microbialito, a organomineralização (PERRY *et al.*, 2007; DUPRAZ *et al.*, 2009), pode ser de diferentes naturezas:

1) influenciada (as características do ambiente forçam os organismos a precipitarem os minerais, (LOWENSTAM, 1981; DUPRAZ *et al.*, 2009)

2) induzida (os organismos são responsáveis por alterações ambientais que fazem com que se direcione a nucleação e precipitem os minerais – MANN, 1983 *in* MATTOS, 2016; DUPRAZ *et al.*, 2009)

Este último, pode ser confundido com outro processo mineralizador, chamado biomineralização, em que existem evidências diretas de participação biológica na construção mineral (esqueletos internos e/ou externos, restos esqueletais), porém diferem quanto à participação microbial na precipitação mineral. Enquanto a biomineralização é resultado de uma participação direta, a organomineralização é resultado de uma participação indireta (DUPRAZ *et al.*, 2009) (Tabela 1).

A maioria dos microbialitos pode ser classificada em três grandes categorias (estromatólitos, trombólitos e leiólitos), com base em suas características macroscópicas (RIDING, 1991, *in* RIDING, 2011; DUPRAZ e STRASSER, 1999 *in* DUPRAZ *et al.*, 2009):

- Estromatólitos

Estromatólitos são depósitos microbiais bentônicos laminados (RIDING, 1991 *in* RIDING, 2011). Vários autores discutem ainda a participação biológica ou não, na formação deste tipo de rocha (KRUMBEIN, 1983, *in* BAHNIUK, 2013; SEMIKHATOV *et al.* 1979, *in* BAHNIUK, 2013; RIDING, 2011). Segundo Vasconcelos *et al.*, (2006, *in* MATTOS, 2016), que consideram a participação biológica na formação da rocha, a cobertura viva microbial é composta pela alternância de carbonato e camadas orgânicas não litificadas nas quais ocorrem associações simbióticas de microrganismos. Ocorrem em áreas usualmente hipersalinas, mas também incluem *habitats* de elevada alcalinidade, baixos níveis de nutrientes, temperaturas elevadas ou baixas, precipitação mineral durante o crescimento e ação intensa de águas ou correntes marinhas (MCNAMARA e AWRAMIK, 1992, *in* DUPRAZ *et al.*, 2009).

- Trombólitos e leiólitos

Trombólitos são rochas com estruturação do tipo *cryptalgal* relacionadas à estromatólitos, porém, carentes de laminação e caracterizados por uma estrutura compacta, coagulada (*clotted fabric*) (AITKEN, 1967 *in* RIDING, 2011). Já os Leiólitos, são rochas carbonáticas microbiais com estruturação interna afanítica (RIDING, 2011).

Além de microbialitos, outras rochas carbonáticas, como tufas e travertinos podem apresentar evidências de participação biológica enquanto litificam. Travertinos são encontrados em sistemas termais ascendentes (por meio de falhas e fraturas) de água quente, formados por carbonato de cálcio, principalmente calcita. Já os depósitos de tufa, são produtos de descargas de água meteórica em sistemas cársticos em regiões carbonáticas (FORD e PEDLEY, 1996; DUPRAZ *et al.*, 2009). Como a diferença entre ambos os depósitos está, principalmente, no ambiente deposicional, existe a chance de se verificar a transição de travertinos para tufas conforme os depósitos se afastem da fonte quente do sistema termal.

De acordo com a revisão de microbialitos feita por Riding (2000), tufas e travertinos são rochas carbonáticas continentais parcialmente microbiais, e estão diretamente relacionados com a precipitação química a depender do ambiente. O termo tufa e travertino são bastante controversos na literatura, sendo que diversos autores tentam diferenciá-los quanto ao fluido formador, fonte do dióxido de carbono ou quanto a aspectos mais descritivos. Ambas as variedades de carbonatos continentais, possuem depósitos preservados no Quaternário, mas o registro em depósitos mais antigos é fragmentado e comumente modificado devido à processos diagenéticos. Estes carbonatos geram registros importantes sobre ciclos sedimentológicos e paleontológicos (CAPEZZUOLI *et al.*, 2014, *in* MATTOS, 2016).

Tabela 1: Principais processos mineralizadores (biomineralização, organomineralização e mineralização) verificados na natureza, seus principais elementos constituintes e características essenciais, bem como os produtos esperados de cada processo. (Fonte: adaptada de DUPRAZ *et al.*, 2009).

	BIOMINERALIZAÇÃO	ORGANOMINERALIZAÇÃO		MINERALIZAÇÃO
	Biologicamente controlada	Biologicamente induzida	Biologicamente influenciada	Mineralização inorgânica
Processos & participantes	Processos intrínsecos (fotossíntese e respiração) aos organismos <i>Eukaryotes</i> ; controle enzimático	Processos intrínsecos (fotossíntese e respiração) aos organismos <i>Prokaryotes</i> ; difusão de elementos a partir do metabolismo microbial	Processos extrínsecos (evaporação, <i>degassing</i> , <i>input</i> de alcalinidade) à uma matriz orgânica ou organismos <i>Prokaryotes</i> ; difusão de elementos a partir das condições ambientais	Processos extrínsecos a um substrato abiótico, direcionados pelas condições ambientais
Sítios de nucleação	Matriz macromolecular geneticamente controlada	<i>EPS</i> (substância polimérica extracelular) randomicamente organizada	Matriz macromolecular diageneticamente produzida ou <i>EPS</i> randomicamente organizado	variedade de núcleos
Necessidade de organismos no processo	SIM	SIM	NÃO NECESSÁRIOS À MINERALIZAÇÃO	NÃO
Nível de controle na precipitação	estrito Atividade celulares <i>controlam</i> nucleação, crescimento, morfologia e localização final	induzido Atividades metabólicas <i>induzem</i> condições para a precipitação. A matriz orgânica influencia na morfologia e composição do cristal	passivo Mineralização passiva da matriz orgânica. A matriz orgânica influencia na morfologia e composição do cristal	nenhum
Produtos	esqueletos internos e externos (biominerais – evidências diretas de vida)	microbialito (organomineral – evidências indiretas de vida)		Espeleotemas: estactites e estalagmites

2.2. SUBSTÂNCIAS POLIMÉRICAS EXTRACELULARES (EPS)

A colonização de superfícies por bactérias é dependente da formação de Substâncias Poliméricas Extracelulares (EPS) (MARSHALL *et al.*, 1971, *in* MATTOS, 2016; COSTERNTON *et al.*, 1981, *in* MATTOS, 2016). As EPS são importantes fatores de bio e organomineralização, constituindo-se de organopolímeros secretados por comunidades microbiais bentônicas que irão cimentar e aprisionar grãos, além de preservar estruturas biosedimentares (DUPRAZ *et al.*, 2009).

As EPS são constituídas de uma mistura de carboidratos, proteínas e ácidos nucleicos, secretados em diferentes proporções, e são conhecidos por terem papel positivo ou negativo na formação de carbonato, isso em função de sua capacidade de ligação com cátions divalentes, tornando Ca^{2+} ou Mg^{2+} disponíveis, ou não, para a precipitação (BRAISSANT *et al.*, 2007, 2009, *in* DUPRAZ *et al.*, 2009).

Essas substâncias, EPS, podem exibir texturas suaves, por vezes fibrilares ou alveolares (*honeycomb*). Posteriormente, uma esteira filamentosa é transformada em um muco orgânico, dentro do qual as estruturas são mal definidas (BAHNIUK, 2014). Além disso, a atividade microbial pode levar à formação de determinadas estruturas mineralógicas que, quando associadas com restos de células ou polímeros orgânicos, podem ser entendidas como bioassinatura da vida passada na Terra e/ou, eventualmente, outros planetas (ex. BENZERARA *et al.*, 2006, *in* DUPRAZ, 2009; BENZERARA e MENGUY, 2009; DUPRAZ *et al.*, 2009).

EPS estão intrinsecamente relacionadas à organomineralização durante a formação de estruturas de microbialitos, já que seriam a prova de relação indireta entre o organismo e o processo de litificação dos minerais carbonáticos em microbialitos (PERRY *et al.*, 2007 *in* DUPRAZ, 2009).

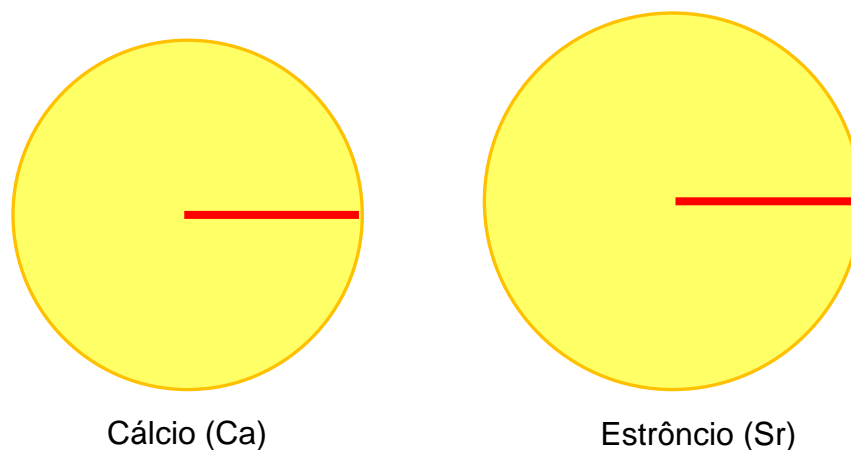
2.3. ESTRÔNCIO (Sr)

Trabalhos recentes (VÖGELI *et al.*, 2012; BENZERARA *et al.*, 2014) discutem a presença de estrôncio na precipitação de microbialitos modernos, com comunidades microbiais ativas envolvidas. Segundo Benzerara *et al.* (2014), carbonatos produzidos e situados dentro de células, posteriormente secretados por suas produtoras, cianobactérias, compõe microbialitos modernos no México apresentando estruturas enriquecidas em Sr.

Outros trabalhos, tratando de biomineralização, também discutem a substituição Sr-Ca em estruturas cristalinas. Blaschko *et al.* (2013) verificam esta substituição, parcialmente, em pedras de rim tradicionais (oxalato de cálcio, fosfato de cálcio, ácido úrico). Os autores também afirmam que as propriedades químicas semelhantes entre os dois elementos seriam as responsáveis pelas substituições em processos biomineralizadores. Uma das aplicações dessas similaridades e substituições de íons Ca^{2+} por íons Sr^{2+} , é a aplicação de estrôncio em tratamentos e prevenção de osteoporose (HILLIGSMANN *et al.*, 2010, *in* BLASCHKO, 2013; O'DONNELL *et al.*, 2006, *in* BLASCHKO, 2013).

As substituições de Sr-Ca também são verificadas em corais, conforme discutido por Allison *et al.* (2000), para a espécie *Porites lobata*, porém em duas fases esqueléticas: 1) substituição dos íons em cristais de aragonita, que depende de temperatura específicas no meio e 2) cristais de estroncionita (SrO_3).

O fator determinante para o enriquecimento em Sr durante a organomineralização seria, possivelmente, segundo Vögeli *et al.* (2012) e Bahniuk (2013), a semelhança entre os raios atômicos e valores de eletronegatividade dos elementos Sr e Ca (2,49Å e 2,31Å, respectivamente; 0,95 e 1,00, de acordo com escala de Pauling, também respectivamente) (Figura 1). Com isso, discutem as autoras, a atividade metabólica envolvida na organomineralização não será seletiva, já que não haverá necessidade de maiores gastos de energia para se incorporar o Sr nas estruturas orgânicas.



	Cálcio	Estrôncio
Raio atômico (Å)	2,31	2,49
Eletronegatividade	1,00	0,95

© Royal Society of Chemistry 2016

Figura 1 – Dados de raio atômico e eletronegatividade dos elementos cálcio e carbonato, retirados do banco de dados da © Royal Society of Chemistry. Acredita-se que suas semelhanças químicas sejam as responsáveis por substituições entre os elementos nos cristais formados em processos organomineralizadores. Além disso, estas semelhanças também facilitariam a captura desses elementos pelo EPS, que possui sítios específicos à nucleação e desenvolvimento de cristais, como verificados nos estudos de Dupraz *et al.* (2009). (Fonte: adaptação feita com os dados da Royal Society of Chemistry).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. MATERIAL

Para as análises de biogenicidade, composição química e mineral, e estudo das razões elementares desses microbialitos, afim de se verificar variações e fatores e, talvez, algum tipo de controle nas concentrações de estrôncio dessas rochas, foram selecionadas amostras, e utilizados dados já disponíveis, de:

– estromatólitos do estado do Paraná, Brasil;

- ↪ estromatólitos do estado do Maranhão (BAHNIUK, 2014), Brasil;
- ↪ tufas do estado de Mato Grosso do Sul (OSTE, 2016), Brasil;
- ↪ travertinos do sudoeste do Japão (MATTOS, 2016);
- ↪ travertinos do sudoeste da Turquia (OSTE, 2015);
- ↪ microbialitos modernos das lagoas fluminenses do estado do Rio de Janeiro, Brasil (BAHNIUK, 2015).

3.2. MÉTODOS

O material do Brasil, Japão e Turquia foi coletado de modo a se prevenir possíveis variações nas condições físico-químicas originais e eventuais possíveis contaminações, enviado ao Laboratório de Análises de Minerais e Rochas da Universidade Federal do Paraná (LAMIR-UFPR) e analisado de acordo com a seguinte rotina:

3.2.2. DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX)

A determinação da composição mineralógica das amostras foi realizada utilizando-se o Difratorômetro *Pananalytical*, modelo EMPERYAN, com ânodo de Cu (Cu K α 1 = 1,5406 Å) e gerador de tensão e corrente ajustados para 40kV e 40mA, respectivamente. As análises foram executadas com ângulos de 3° a 70° 2 θ .

A interpretação dos difratogramas com a porcentagem semi-quantitativa dos minerais é obtida pelo método RIR (*Reference Intensity Ratio* – Razões das Intensidades de Interferência), utilizando-se o *software X'Pert High Score Plus Data Collector* com banco de dados PDF-2 no LAMIR. O percentual semi-quantitativo obtido pelo software é, em seguida, recalculado em 100%, obtendo-se um resultado indireto da quantidade equivalente do mineral na amostra.

3.2.3. FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X (FRX)

Com o objetivo de se obter a caracterização química dos microbialitos, realizou-se análises de Fluorescência de Raios-X. O método consiste na pulverização de cerca de 30g de amostras em moinho de Tungstênio, no pulverizador AMEF, durante 30 segundos. O pó resultante é levado a uma estufa, com temperatura de 100°C, por 24h, para secagem. As amostras secas são pesadas e misturadas na proporção de 7,000g \pm 0,0003g de amostra com 1,4000g \pm 0,0003g de cera orgânica. Após pesagem, realiza-se a prensagem da mistura para a confecção de pastilhas. Cada mistura, devidamente seca, é levada à prensa mecânica PFAFF a uma pressão de 20ton/cm³ com tempo de ascensão de 50s, tempo de construção de 60s e tempo de descida de 30s, padrão utilizado para carbonatos.

As análises de composição química são realizadas no equipamento *Panalytical*, modelo AXIOS MAX, a partir de amostras prensadas. Em seguida, um *software* analítico quantitativo desenvolvido para rochas carbonáticas, “Rocha Carbonática Prensa”, analisa, por pastilha prensada, os 10 óxidos maiores, em porcentagem, (CaO, MgO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, Na₂O, K₂O, TiO₂, MnO, P₂O₅) e 4 elementos traço, em parte por milhão (S, Sr, Cl, Ba).

Complementares à análise química, serão realizados ensaios de perda ao fogo, ou LOI – *Loss on Ignition*, em Termogravímetro Mettler Toledo e na Mufla Jung com 0,5g a 1100°C por período de 2h.

3.2.4. PETROGRAFIA

O estudo petrográfico visa caracterizar as relações estruturais, texturais e mineralógicas da rocha. A análise petrográfica é composta por estudo macroscópico, com o auxílio de lupa digital (Axios Cam MRC) e por análises microscópicas feitas com microscópio óptico convencional, de luz transmitida (Zeiss Axios A.2M).

Análises complementares, utilizando Microscópio Eletrônico de Varredura JEOL JSM-6010LA também foram realizadas nas amostras, previamente metalizadas com paládio e ouro (Debton Vacuum Desk V). O principal objetivo é investigar traços bióticos (substâncias poliméricas extracelulares – EPS, restos fósseis e filamentos de cianobactérias) e/ou abióticos de precipitação. A técnica permite observações em alta resolução, podendo alcançar valores de resolução maiores do que 1nm (NAGATANI *et al.*, 1987).

3.2.5. ISÓTOPOS DE CARBONO E OXIGÊNIO

A variação de isótopos estáveis de carbono e oxigênio ($\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$) em microbialitos tem sido usada para estimar processos biogeoquímicos de precipitação de carbonatos e interpretar a origem do fluido responsável por esta precipitação. O $\delta^{18}\text{O}$ de microbialitos modifica-se de acordo com a temperatura de precipitação e de acordo com o fluido em que se desenvolve. Já o $\delta^{13}\text{C}$, modifica-se conforme presença ou ausência de elementos biológicos no fluido.

Para a obtenção de isótopos estáveis foi realizada a comparação relativa do valor da razão isotópica medida com o valor obtido em um material de referência ou padrão arbitrário. A análise da razão isotópica do carbono e oxigênio foi feita em relação ao padrão CO_2 , calibrado internacionalmente. Os resultados foram emitidos em notação convencional “ δ ” em partes por milhar (‰) com relação ao padrão VPDB (Vienna Pee Dee Belemnite) original. As análises isotópicas foram realizadas nos equipamentos GasBunch II e espectrômetro de massa Thermo Delta V Advantage.

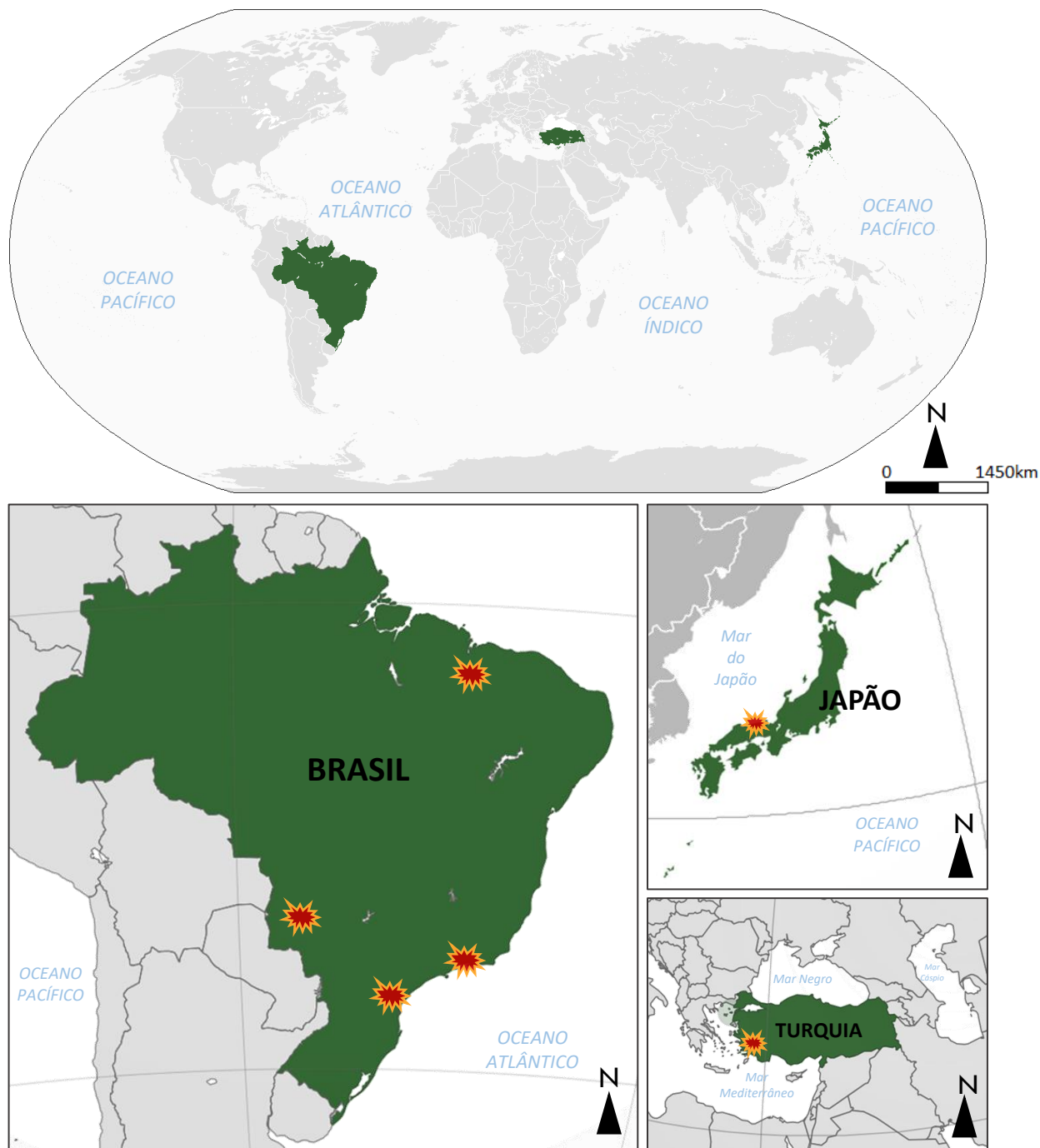
As razões isotópicas foram realizadas após a conclusão das reações de purificação e estabilização com gás hélio e 0,5ml de ácido ortofosfórico, H_3PO_4 . Subsequentemente, o gás de CO_2 produzido nas reações com o ácido, é recolhido pelo amostrador e purificado dentro do GasBench II e injetado no espectrômetro Advantage Thermo Delta V.

Os dados estatísticos foram trabalhados com 10 picos avaliados em cada análise, e, média e desvio padrão é $<0,1 \text{ ‰ VPDB}$. A faixa de linearidade definida para o equipamento é entre 4000 e 6000mV.

4. LOCALIZAÇÃO E GEOLOGIA REGIONAL

4.1. LOCALIZAÇÃO

As áreas estudadas localizam-se ao redor do mundo, e foram selecionadas amostras representativas de diferentes ambientes formadores de microbialitos, como: de travertinos do Japão e Turquia; tufas, estromatólitos e microbialitos modernos do Brasil (Figura 2).



LEGENDA:

- Países de origem das amostras
 Região de coleta das amostras

Figura 2 - Esquema de localização das áreas de interesse discutidas neste trabalho, em que as marcações em vermelho indicam a localização aproximada dos sítios de estudo e coleta de amostras. (Fonte: adaptação de imagens disponíveis no banco de imagens licenciadas do *Wikimedia Commons*).

4.2. GEOLOGIA REGIONAL

4.2.1. BRASIL

FORMAÇÃO CAPIRU, RIO BRANCO DO SUL, PARANÁ

A Formação CapiRU, é constituída por rochas que afloram na porção norte do Terreno Curitiba e ao sul da Zona de Cisalhamento Lancinha, caracterizada como uma faixa alongada de direção NE-SW, com idade ainda não definida, associada ao meso ou neoproterozoico (SIGA JR., 1995). A Formação foi caracterizada por Bigarella e Salamuni (1956; 1958 e 1967) como sendo composta por rochas calcárias, mármoreS, metapelitos e quartzitos. São comuns nestes litotipos a preservação das estruturas sedimentares, principalmente nas rochas carbonáticas em que ocorrem brechas intraformacionais, gretas de contração, estruturas pisolíticas e estromatolíticas – estruturas biogênicas (BIGARELLA e SALAMUNI, 1958; FIORI e GASPAR, 1993).

FORMAÇÃO CODÓ, CODÓ, MARANHÃO

A Formação Codó, definida por Lisboa (1914, *in* BAHNIUK, 2014) e Campbell *et al.* (1949, *in* BAHNIUK, 2014), como uma sucessão composta por arenitos, evaporitos, xistos e calcários, datada do Cretáceo Inferior, originada a partir do rompimento do supercontinente Gondwana. Paz & Rossetti (2001, *in* BAHNIUK, 2014) reconhecem três fácies lacustres associadas à Formação Codó:

- 1) xisto betuminoso e evaporitos depositados em um lago central relativamente profundo;
- 2) argilitos e calcários depositados em lagos rasos;
- 3) calcários e tufas depositados em lagos marginais.

Conforme inicia-se o rompimento do supercontinente Gondwana, no Jurássico Superior, e, posteriormente, a derivação América do Sul para o oeste da África, Cretáceo Inferior, mais especificamente durante o Aptiano, há a

divisão, de sul para norte, entre estas duas porções continentais (DIETZ e HOLDEN, 1970, *in* BAHNIUK, 2014). Este processo estabeleceu várias bacias rifte ao longo da margem brasileira equatorial (SOARES JUNIOR *et al.*, 2008, *in* BAHNIUK, 2014).

REGIÃO DAS LAGOAS FLUMINENSES, RIO DE JANEIRO, RIO DE JANEIRO

O sistema lagunar verificado na costa do Rio de Janeiro, formou-se relacionado às flutuações do nível relativo do mar durante o Quaternário Tardio. (SUGUIO *et al.*, 1985, *in* BAHNIUK, 2013). A costa do Estado do Rio de Janeiro, de Guaratiba até Cabo Frio, compreende um sistema lagunar interno e outro externo, sendo que os microbialitos descritos nas lagoas fluminenses estão relacionados ao sistema externo (VASCONCELOS *et al.*, 2006, *in* BAHNIUK, 2013; VASCONCELOS *et al.*, 1997, *in* BAHNIUK, 2013).

O sistema lagunar atual é produto de transgressões e regressões marinhas, mais especificamente a transgressão Flandriana, ocorrida há cerca de 120.000anos. Houve o retrabalhamento dos sedimentos já depositados, chegando a cerca de 4 a 6 metros acima do nível do mar atual e, posteriormente, uma baixa, abandonando a restinga externa (BAHNIUK, 2013).

REGIÕES DE MIMOSA E TAÍKA, BONITO, MATO GROSSO DO SUL

A Serra da Bodoquena consiste de um conjunto de serras dispostas na orientação norte-sul, fazendo parte do Planalto da Bodoquena (SALLUN FILHO *et al.*, 2009, *in* OSTE, 2016), na Faixa de Dobramentos Paraguai. Estratigraficamente, a faixa de dobramentos pode ser dividida em três unidades: a unidade inferior, constituída por turbiditos glaciogênicos (Grupo Cuiabá, formações Puga e Buxi); unidade intermediária carbonatada pertencente aos grupos Corumbá e Araras e, por fim, a superior, detrítica, denominada Grupo Alto Paraguai (ALVARENGA e TROMPETTE, 1993, *in* OSTE, 2016).

As tufas calcárias do Quaternário, pertencentes à Formação Serra da Bodoquena, ocorrem distribuídas ao longo de drenagens atuais. Esta Formação é diferenciada em dois membros: Membro Rio Formoso, com depósitos de tufas

do tipo represa e cachoeiras (ativas ou não) e Membro Fazenda São Geraldo, com depósitos micríticos (SALLUN FILHO *et al.*, 2009, *in* OSTE, 2016).

O Membro Rio Formoso reúne as tufas do tipo cachoeira e represas, cuja precipitação ocorre exclusivamente em canais fluviais atuais (SALLUN FILHO *et al.*, 2009, *in* OSTE, 2016). O Membro Fazenda São Geraldo, por sua vez, é composto essencialmente por depósitos antigos de “micritas inconsolidadas. Estes depósitos ocorrem em planícies associadas com antigas regiões alagadas, lagos ou meandros abandonados (SALLUN FILHO *et al.*, 2009, *in* OSTE, 2016).

4.2.2. JAPÃO – REGIÃO DE KINKI-CHUGOKU, SUDOESTE DO PAÍS, FONTE HIDROTERMAL SHIONOHA-YAMA

A geologia regional é característica de zona de arcos acrescionários, compondo-se principalmente por rochas sedimentares, arenitos e calcários (Jurássico – Cretáceo). A fonte do calor na área está diretamente relacionada com o processo de subducção da Placa Filipina com a Placa do Pacífico (SENO *et al.*, 2001, *in* MATTOS, 2016). A água da fonte termal de Shionoha vem do ponto de intersecção entre a Linha Tectônica Butsuzo e a Falha Shionoha. Mesmo com a ocorrência de diversos corpos de calcário em volta da área, o Ca^{2+} e o CO_2 são produtos da interação água-rocha, no subsolo (TAKASHIMA e KANO, 2005, *in* MATTOS, 2016).

4.2.3. TURQUIA – REGIÃO DE DENIZLI, SÍTIO DE RETIRADA DO TESTEMUNHO ÇINKAYA

A Bacia de Denizli é uma bacia extensional, de direção NE-SW, localizada na porção ocidental de Anatólia, Turquia. Está localizada a leste da junção dos grábens Büyük Menderes e Gediz (WESTAWAY, 1993, *in* OSTE, 2015), limitada por falhas normais a norte e a sul, as quais delimitam um gráben. A Bacia de Denizli é rica em fontes hidrotermais que se encontram associadas à formação de carbonatos travertinos.

Os depósitos quaternários são caracterizados por ambientes de terraços fluviais, porém estes apresentam uma abrangência local, e por depósitos extensos de carbonatos travertinos (ÖZKUL *et al.*, 2013, *in* OSTE, 2015). As falhas e fraturas quaternárias atuam como condutos naturais para a água meteórica, que permeia até sub-superfície e se mistura com fluidos hidrotermais, aquecendo-se. Essas falhas também servem como condutos para que esse fluido ascenda até a superfície, formando as fontes hidrotermais da região (ÖZKUL *et al.*, 2013, *in* OSTE, 2015). As fontes hidrotermais requerem íons disponíveis no embasamento carbonático para a acumulação e formação de carbonatos travertinos, próximos as falhas e fraturas (ÖZKUL *et al.*, 2002, *in* OSTE, 2015).

5. RESULTADOS OBTIDOS

5.1. PETROGRAFIA

5.1.1. ESTROMATÓLITOS – FORMAÇÃO CAPIRU, RIO BRANCO DO SUL, PARANÁ (PR), BRASIL

Em observação macroscópica, verifica-se, nos estromatólitos da Formação Capiru, a estratificação característica deste tipo de microbialito, produto da dinâmica de atividade microbial e precipitação de carbonatos, evidenciada pela alternância de cores (Figura 3).

Já em lâmina, estes estromatólitos, raramente exibem a estruturação característica de microbialito, sendo verificados majoritariamente como rochas metamórficas cristalinas. Quanto às observações em MEV, foi verificada apenas estrutura maciça da rocha (Figura 4), justamente devido ao metamorfismo, responsável por apagar a porosidade original e quaisquer registros de EPS da rocha.



Figura 3 - Afloramento de estromatólitos da Formação Capiru, com estratificação característica, evidenciada pela diferença de cores. O sentido de crescimento se dá acompanhando a convexidade dos estratos verificados. (Fonte: Cortesia de Lara Lange).

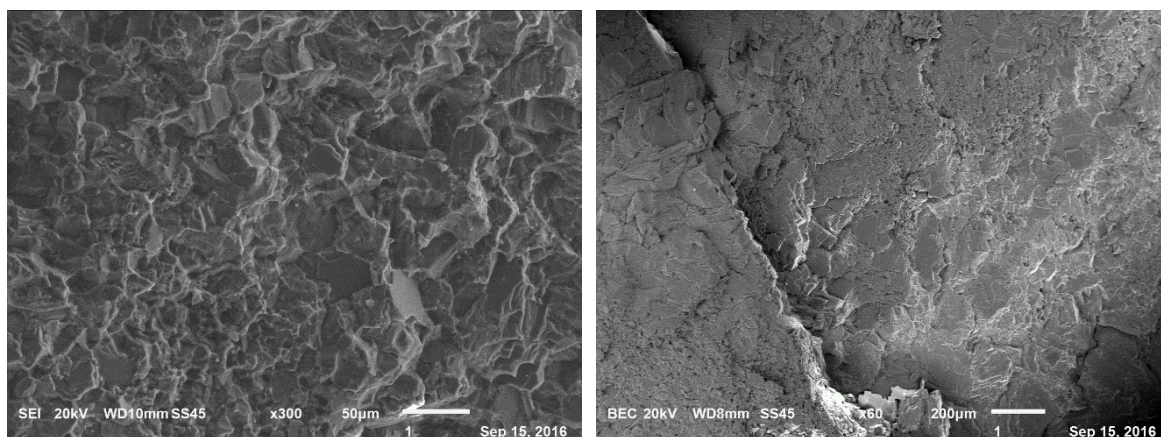


Figura 4 - Imagens de amostra pertencente à Formação Capiru, obtida através de microscopia eletrônica de varredura. Não é possível a verificação de quaisquer registros de EPS, apenas de uma estrutura maciça e cristalina, decorrente de processos metamórficos. (Fonte: o autor).

5.1.2. ESTROMATÓLITOS – FORMAÇÃO CODÓ, CODÓ (MA), BRASIL

Em observação macroscópica pode-se verificar, nos estromatólitos na Formação Codó, a estratificação característica, evidenciada pela alternância de cores (Figura 5).



Figura 5 - Estromatólito esférico da Formação Codó. Verifica-se a estratificação característica, evidenciada pela alternância de cores claras e escuras. (Fonte: BAHNIUK, 2014)

Em lâmina petrográfica, os estromatólitos de Codó, exibem níveis de crescimento, evidenciados por diferença de cor. A matriz, é micrítica, com esferulitos de carbonato e microcristais de SiO_2 . A porosidade vertical é baixa. A porosidade horizontal, com poros arredondados é boa, com permeabilidade aumentando nos contatos entre os níveis de crescimento (Figura 6).

As observações em MEV (Figura 7), permitiram verificar a presença de EPS e confirmar tanto a presença quanto a interação de microorganismos no processo de formação do microbialito. A maioria das estruturas observadas são tapetes microbiais, além de estruturas filamentosas de projeção e crescimento.

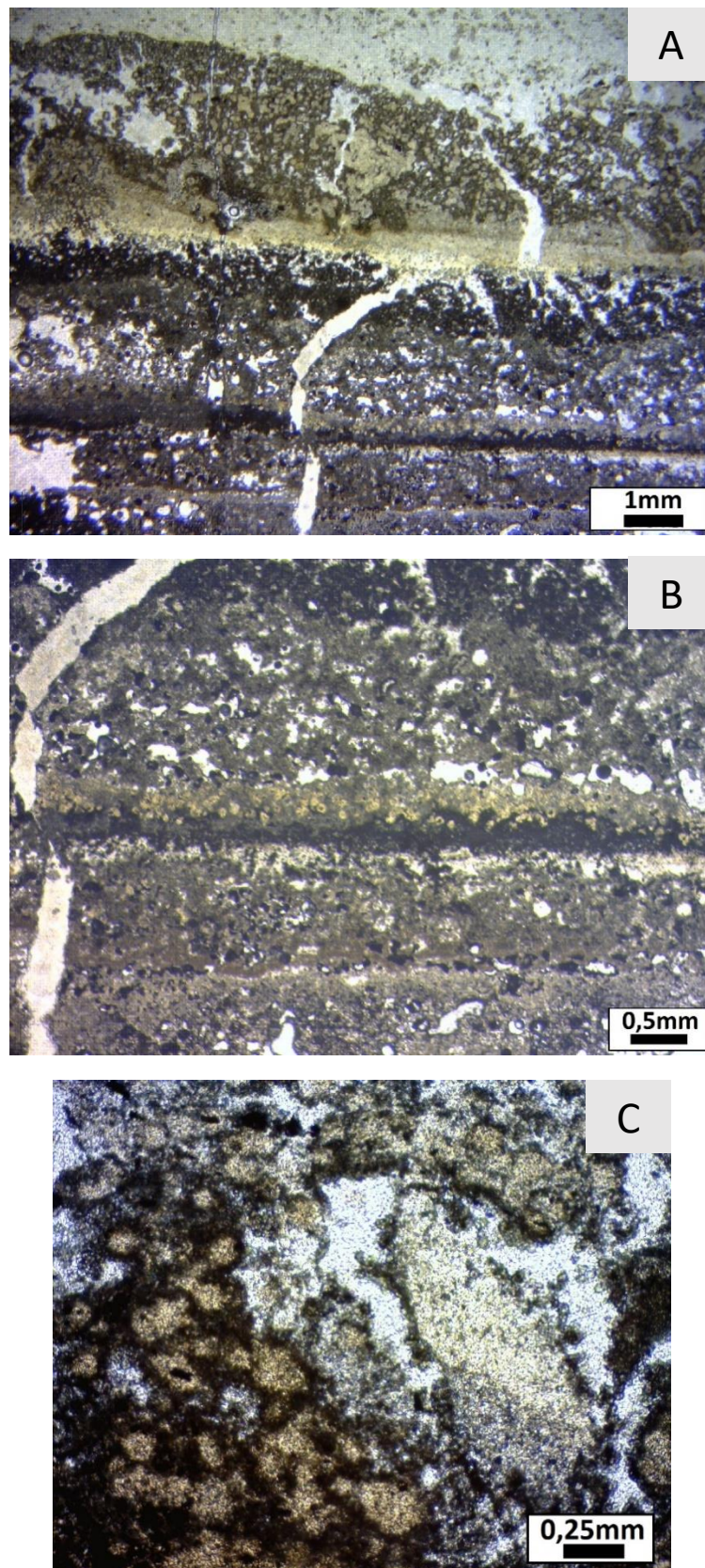


Figura 6 – Diferentes níveis de detalhe em lâmina delgada. A) Visão geral da lâmina, com níveis de crescimento, em tons de verde e preto; e porosidade, horizontal e vertical, em branco. A pequena fratura está preenchida por calcedônia. B) Detalhe de nível de crescimento, com porosidade horizontal maior no contato entre níveis. C) Esferulitos verificados nos níveis de crescimento da lâmina. (Fonte: o autor).

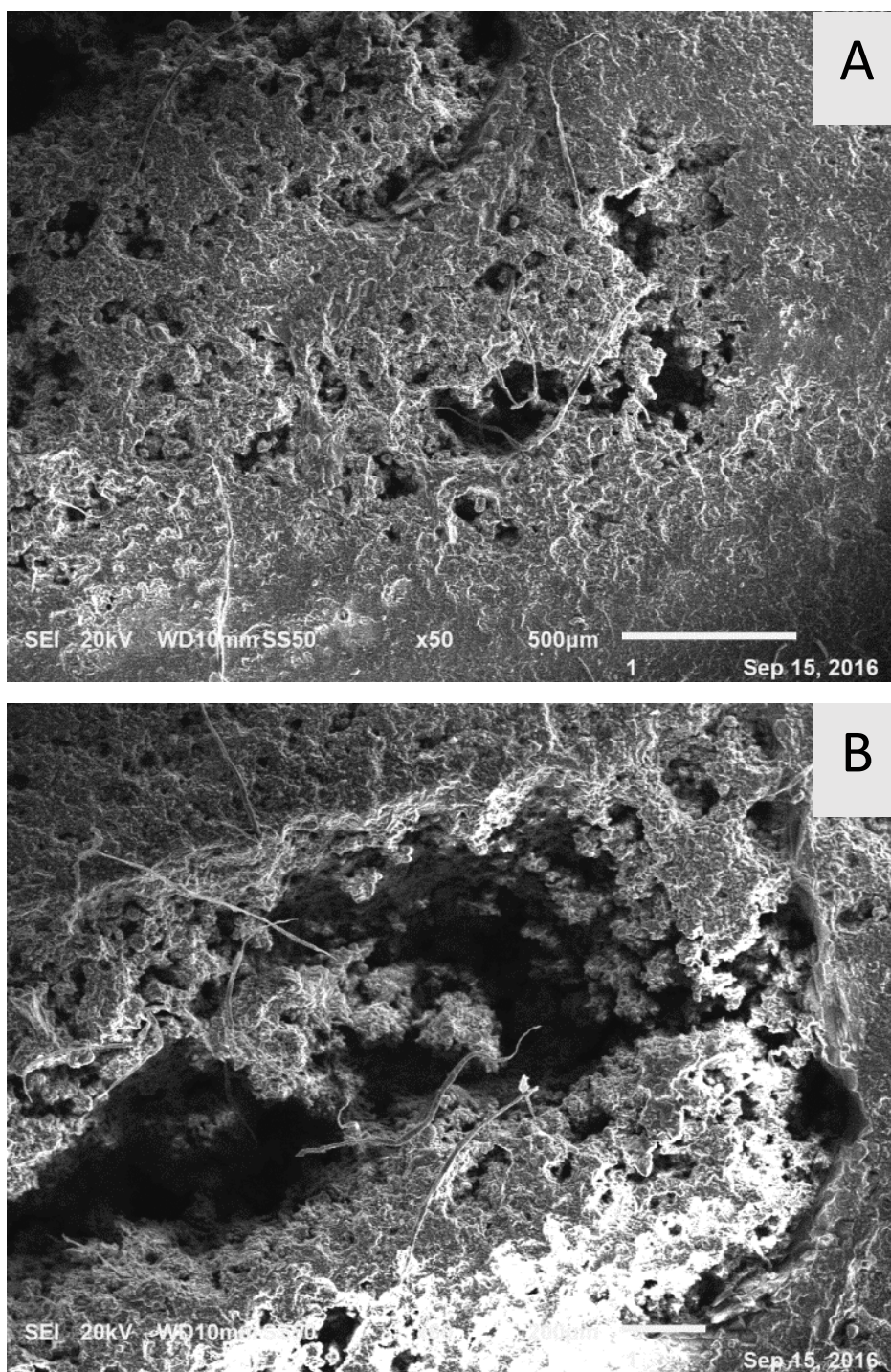


Figura 7 – Imagens da amostra pertencente à Formação Codó, obtida através de microscopia eletrônica de varredura. A) Porção de tapete microbial, constituído por muco orgânico microbial, em que os germens de cristalização dos minerais carbonáticos serão trapeados e se desenvolverão. B) Projeção de filamentos de crescimento e desenvolvimento das bactérias e EPS alveolares (*hooneycomb*). (Fonte: o autor).

5.1.3. TUFAS – REGIÕES DE MIMOSA E TAÍKA, BONITO (MS), BRASIL

Em observação macroscópica pode-se verificar, nas tufas de Bonito, as feições características deste tipo de microbialito, correspondente à fácies pisóide (estruturas esféricas e irregulares, dependendo da energia da água, resultado da combinação de processos abióticos e atividade microbial – GUO e RIDING, 1998) (Figura 8).

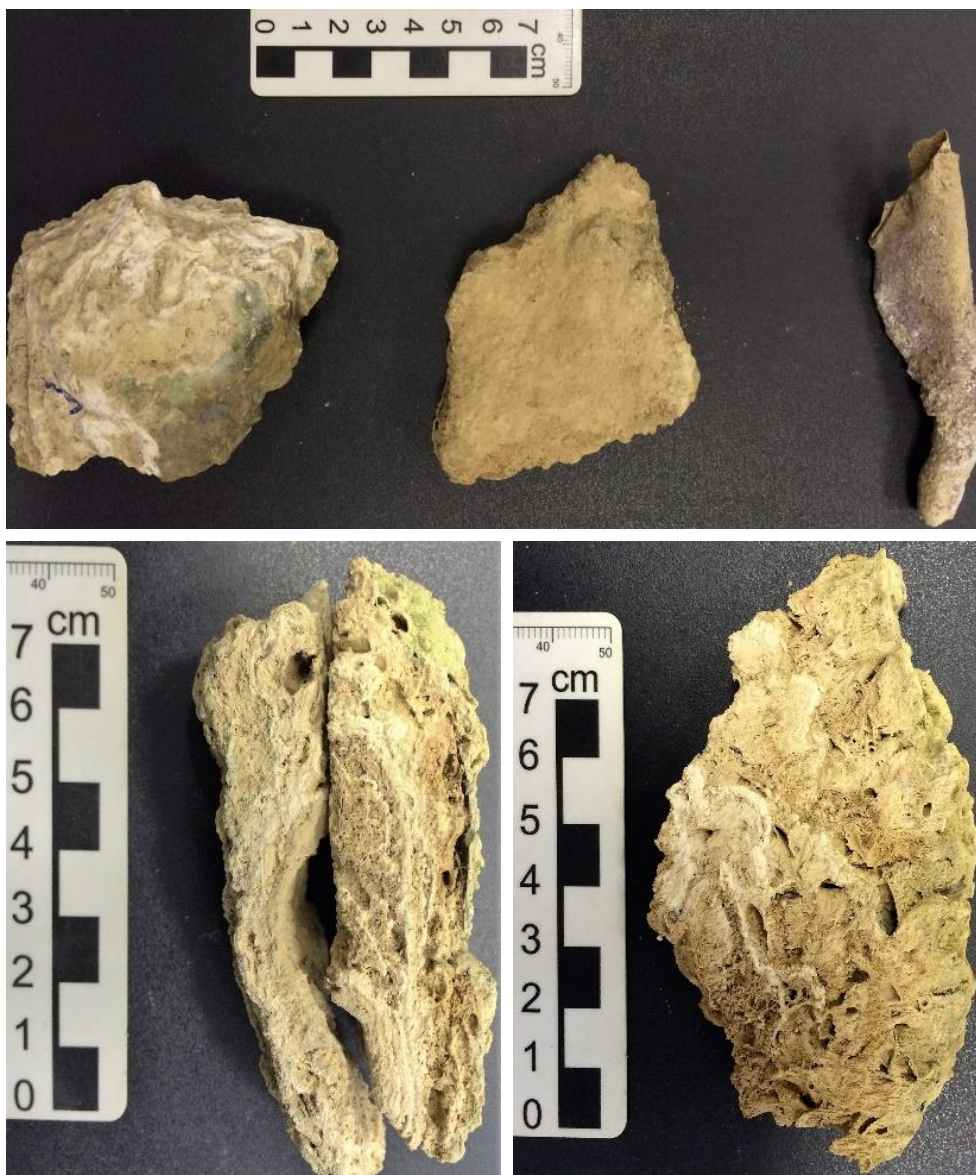


Figura 8 - Tufas da região de Bonito, MS, nas localidades de Mimosa e Taíka. Observam-se estruturas de crescimento e escape de gases, produtos durante a formação e precipitação da rocha. (Fonte: OSTE, 2016, *em prep.*).

As observações em MEV, permitiram verificar a presença, segundo Oste (2016, *em prep.*), de EPS, com morfologia *honeycomb* bastante características, evidenciando a presença de bactérias na história de desenvolvimento do microbialito (Figura 9).

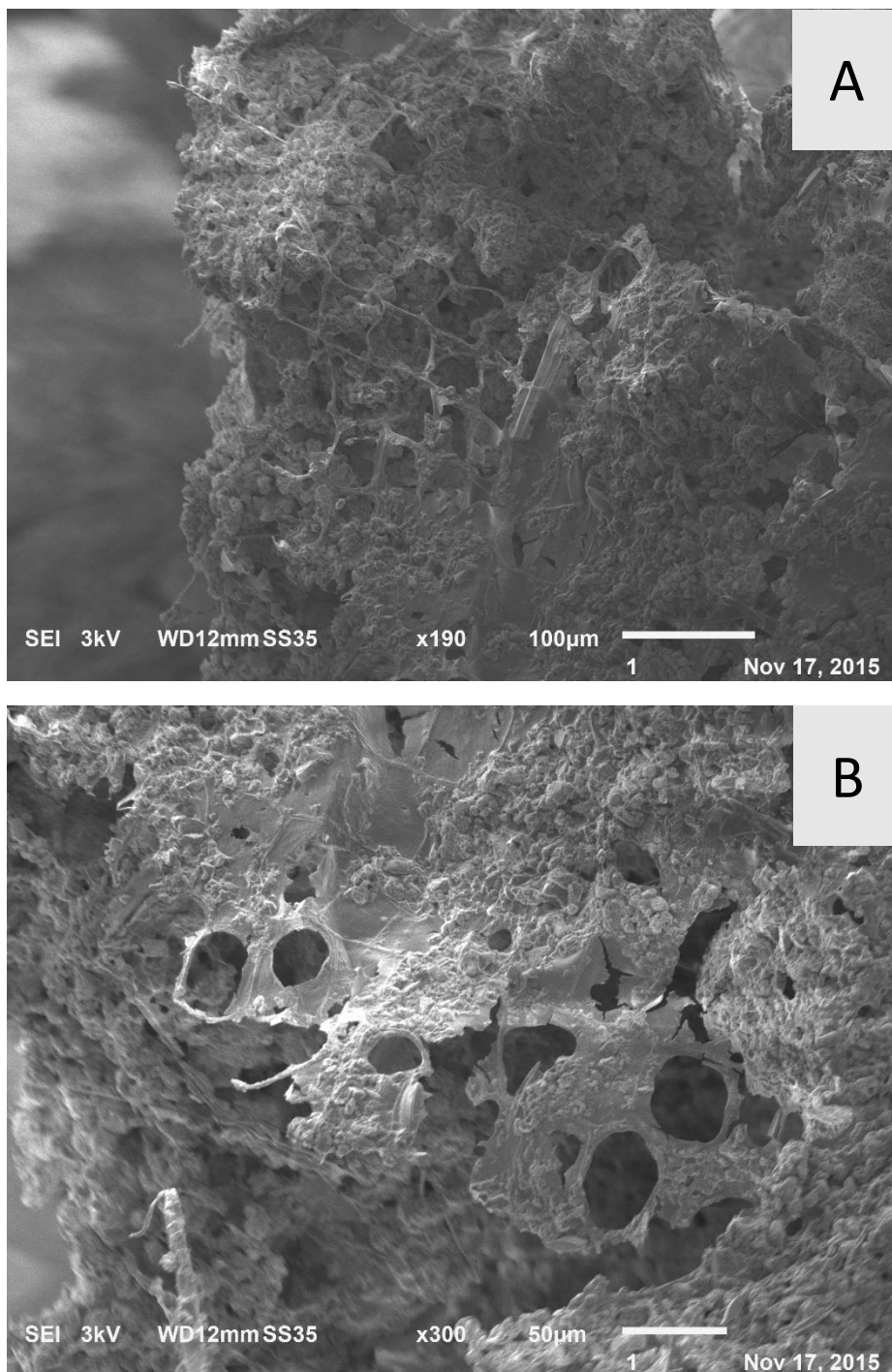


Figura 9 - Imagem de microscopia eletrônica de varredura, exibindo EPS com feição *honeycomb* característica, um registro de atividade microbiana na história de desenvolvimento da rocha. (Fonte: OSTE, 2016, *em prep.*).

5.1.4. TRAVERTINOS – REGIÃO DE DENIZLI, SÍTIO DE RETIRADA DO TESTEMUNHO ÇINKAYA, TURQUIA

Em observação macroscópica (Figura 10), verifica-se nos travertinos de Denizli feições de escape de gases e fácies características das rochas carbonáticas da região, descritas por Oste (2015) como caliche, junco e micrita.

Em observações microscópicas, Oste (2015), descreve fácies micríticas, granulares e pontualmente, *shrubs*. Ainda segundo a autora, nestes travertinos praticamente não há ação de bactérias.

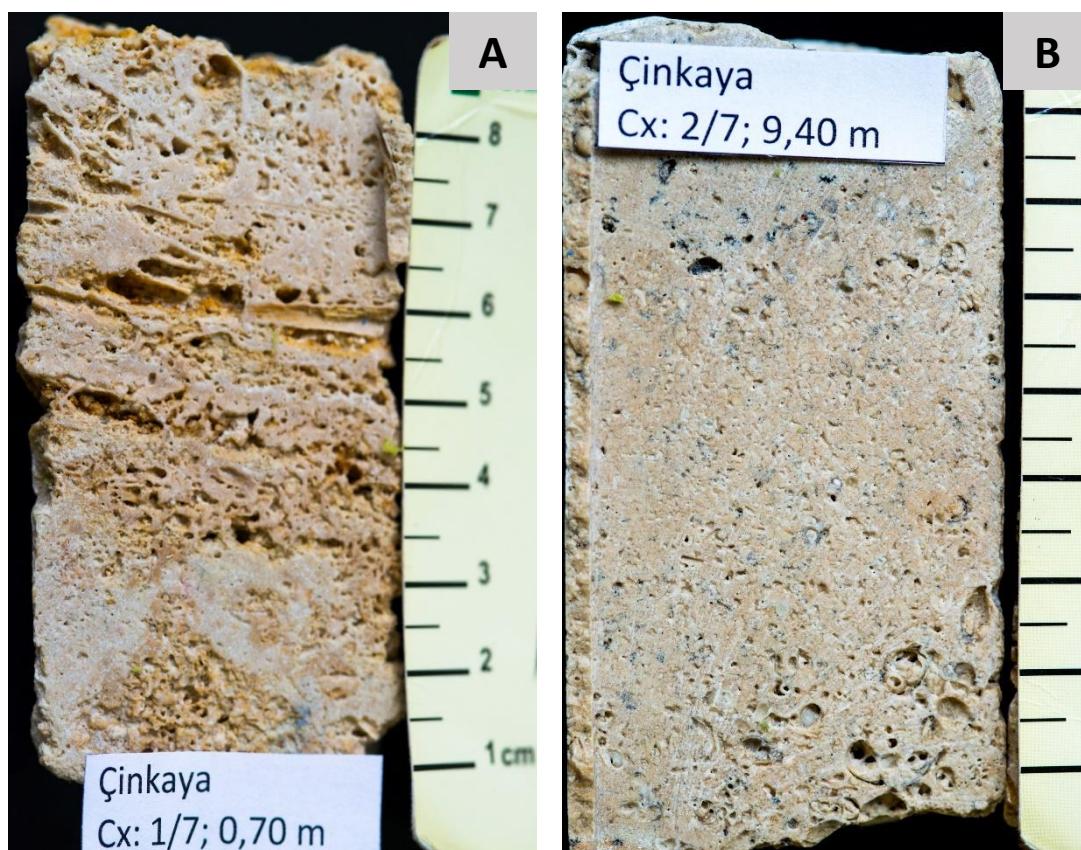


Figura 10 – Fotografias de detalhe das amostras de travertino coletadas no furo Çinkaya, região de Denizli, na Turquia. A) Fácies caliche, com intensa dissolução, formando poros alargados. B) *Packstone* com matriz micrítica e poros, produtos de dissolução. (Fonte: OSTE, 2015).

5.1.5. MICROBIALITOS MODERNOS – REGIÃO DAS LAGOAS FLUMINENSES, RIO DE JANEIRO (RJ), BRASIL

Em observação macroscópica (Figura 11) pode-se verificar a estratificação característica, produto da dinâmica da comunidade microbial ativa no ambiente de precipitação desses microbialitos, evidenciada pela alternância de cores.

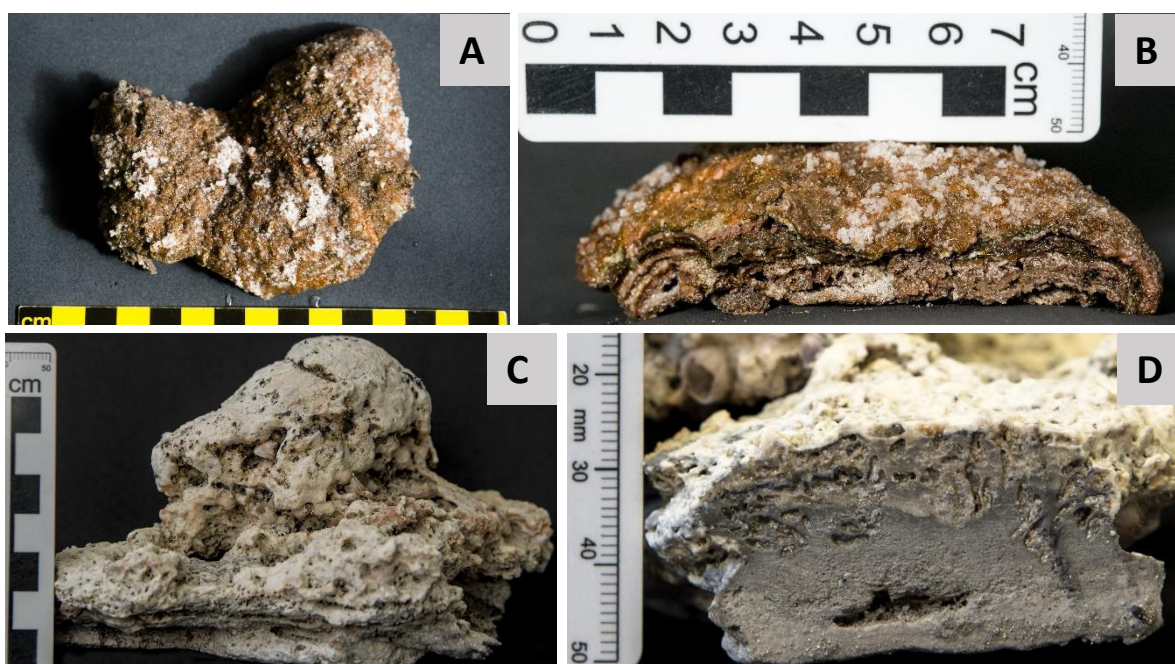


Figura 11 - Estromatólitos modernos das Lagoas Fluminenses, RJ, Brasil. A e B) Estromatólitos encontrados na Lagoa Brejo do Espinho, em que pode se verificar a laminação típica, precipitação de halita e também EPS (substância colóide, na figura, colorida em tons de verde). C e D) Estromatólitos encontrados na Lagoa Vermelha, em que se verifica a laminação típica e estruturas de escape dos gases, produtos do metabolismo microbial que atuou durante o desenvolvimento da rocha. (Fonte: BAHNIUK, 2013).

As observações em MEV (Figura 12), indicam a presença de EPS e confirmam tanto a presença quanto a interação de microorganismos no processo de formação e precipitação de carbonatos que virão a constituir microbialitos. A maioria das estruturas observadas são tapetes microbiais e estruturas filamentosas de projeção e crescimento.

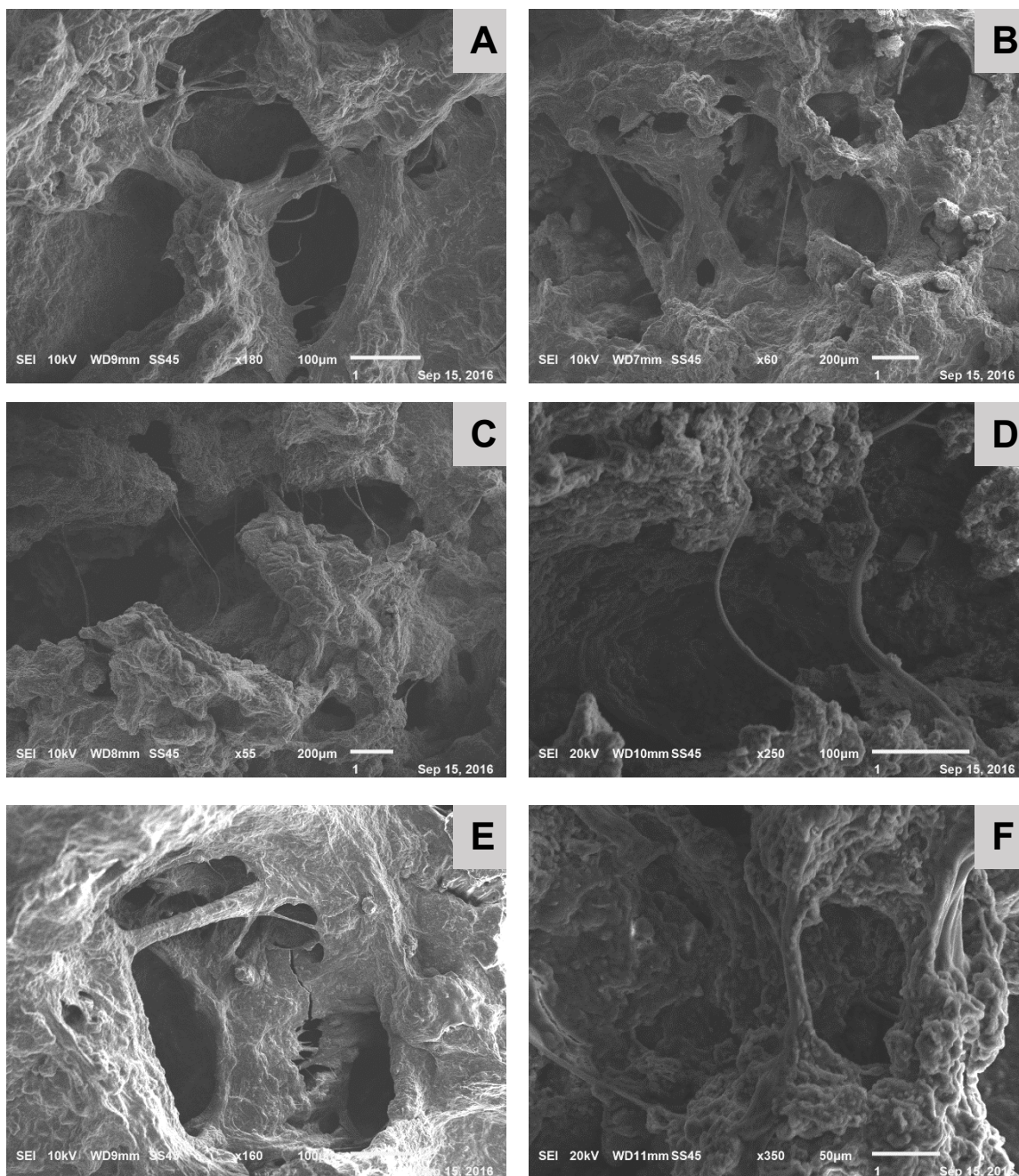


Figura 12 – Imagens das amostras das Lagoas Fluminenses, obtidas através de microscopia eletrônica de varredura. São registros de diferentes partes das amostras, com conteúdo microbial, EPS, exibindo diferentes morfologias. A e B) Porção de tapete microbial em que os gérmens de cristalização dos minerais carbonáticos serão trapeados e se desenvolverão. C, D e F) Projeção de filamentos de crescimento e desenvolvimento das bactérias e EPS. F) nódulos mais claros de halita trapeados e precipitados em EPS. (Fonte: o autor).

5.1.6. TRAVERTINOS – KINKI-CHUGOKU, REGIÃO DE KINKI-CHUGOKU, SUDOESTE DO JAPÃO, FONTE HIDROTERMAL SHIONOHA-YAMA

Em observação macroscópica pode-se verificar, segundo Mattos (2016), as características principais da fácies *bubble* (fácies de microbialito caracterizada por apresentar uma elevada porosidade, devido às bolhas de gás geradas nos processos microbiais de formação da rocha e seu escape para atmosfera – GUO e RIDING, 1998) (Figura 13).



Figura 13 - Travertinos modernos da região de Kinki-Chugoku, Japão. Notar a fonte hidrotermal, acima, e, abaixo a precipitação de travertinos. Na foto de detalhe, observar as bolhas de gases, liberados durante os processos de formação da rocha, e as comunidades de cianobactérias (verde). (Fonte: MATTOS, 2016).

Com relação às observações realizadas com MEV, observou-se cristais de Aragonita, de morfologia esferulítica, desenvolvendo-se ao redor de tubos cilíndricos, prováveis filamentos bacterianos, ou EPS, que funcionam como substrato para o crescimento dos agregados de cristais (Figura 14) (MATTOS, 2016).

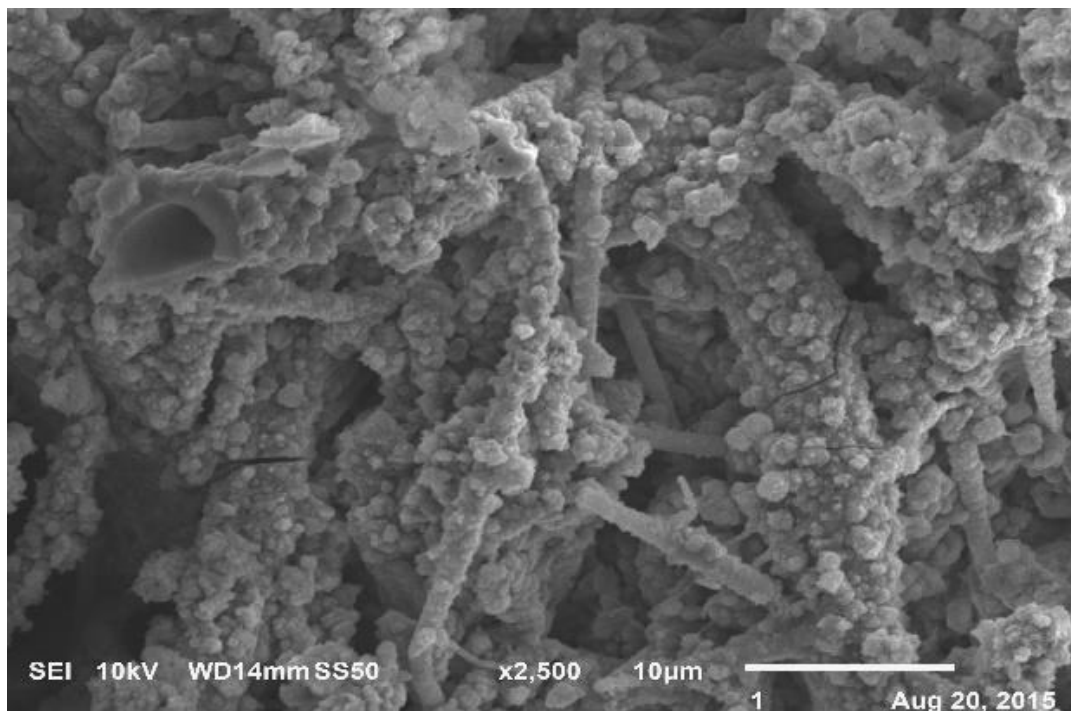


Figura 14 - Imagem de microscopia eletrônica de varredura, exibindo cristais de aragonita, com morfologia esferulítica, crescendo ao redor de tubos cilíndricos (filamentos bacterianos). (Fonte: MATTOS, 2016).

5.2. COMPOSIÇÕES MINERALÓGICAS (DRX)

Os estromatólitos neoproterozoicos da Formação Capiru, já descritos por Guimarães *et al.* (2002), Bahniuk (2007), são compostos por dolomita, principalmente, com ocorrências de quartzo (Gráfico 1, porção inferior). Os estromatólitos da Formação Codó (Cretáceo Inferior), apresentam elevados teores de quartzo e, subordinadamente, calcita, dolomita, anidrita e goethita (Gráfico 1, porção inferior).

Os travertinos holocênicos da região de Denizli, na Turquia, exibem elevados teores de calcita, com ocorrências de quartzo (Gráfico 1, porção central). As tufas de Bonito (MS), também holocênicas, exibiram elevados teores de calcita e calcita magnesiana (Mg-calcita), com ocorrências de quartzo (Gráfico 1, porção central) (OSTE, 2016 *em prep.*).

As amostras de microbialitos modernos das Lagoas Fluminenses (RJ), apresentaram altos teores de Mg-calcita, principalmente, dolomita cálcica (Ca-dolomita), dolomita e quartzo; subordinadamente, foram verificadas ocorrências de calcopirita e gipso (Gráfico 1, porção superior) (BAHNIUK, 2013).

Finalmente, com relação aos travertinos modernos do Japão, foram verificados elevados teores de calcita e aragonita com ocorrências de Mg-calcita (Gráfico 1, porção superior) (MATTOS, 2016).

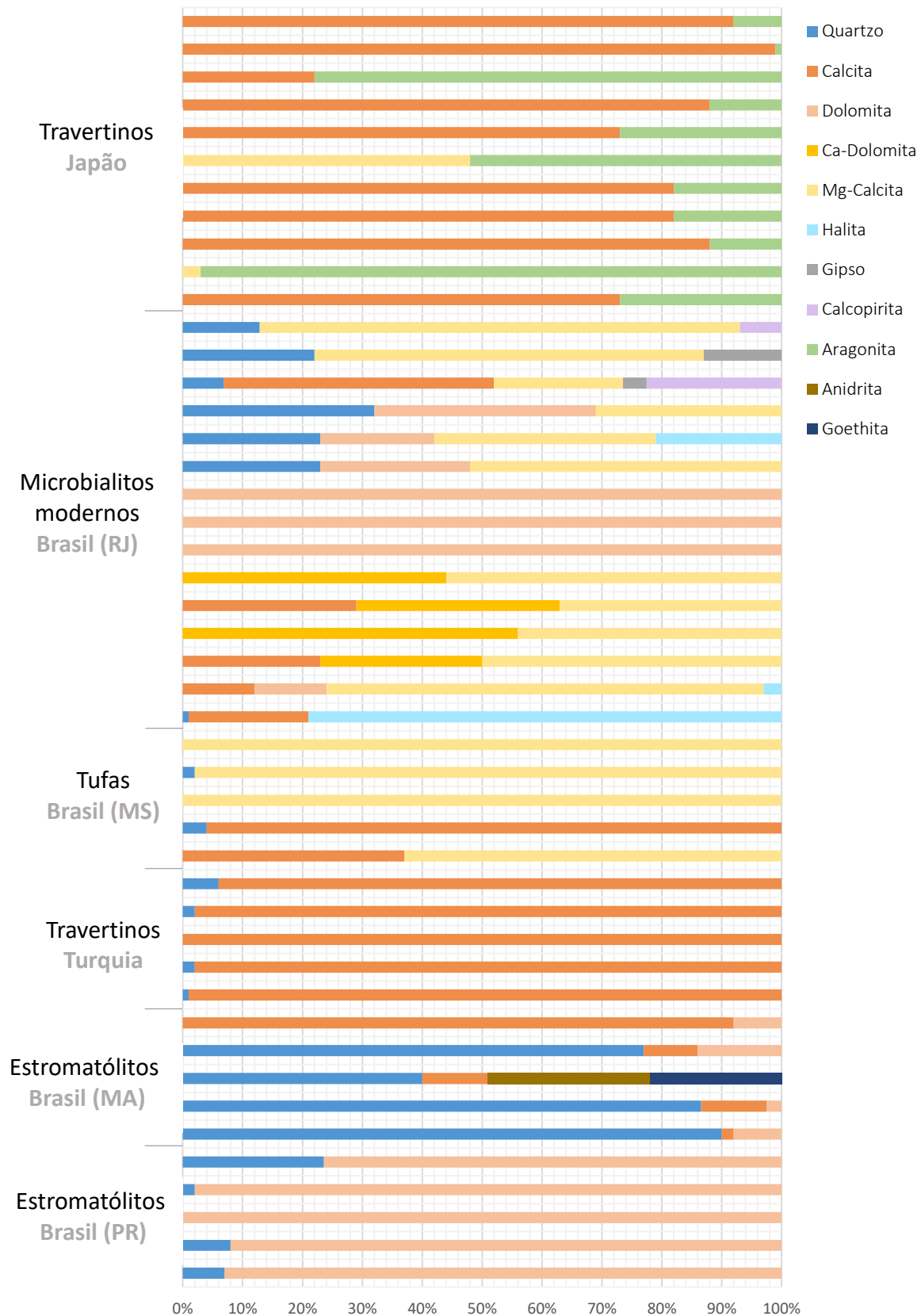


Gráfico 1 – Resultados das análises mineralógicas (DRX) nas amostras dos microbialitos estudados, arranjados de acordo com suas idades (mais recentes na base e mais antigas no topo), localização geográfica e tipos de microbialitos (separados pelas linhas horizontais dispostas ao longo do eixo vertical de 0,00% do gráfico). (Fonte: o autor).

5.3. COMPOSIÇÕES QUÍMICAS (FRX)

Os resultados de análises químicas para as amostras de estromatólitos da Formação Capiru, de idade Neo-Proterozoica, demonstram elevados e homogêneos teores de CaO e MgO, variando entre 29,78 a 33,20%, e 19,30% a 21,93%, respectivamente, reduzidos teores de Sr, em torno de 80 ppm, além de baixos teores dos demais óxidos maiores (SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, Na₂O, K₂O, TiO₂, MnO, P₂O₅). Os teores de Perda ao Fogo foram de cerca de 45,29%, coerentes com a presença de carbonatos.

As amostras de estromatólitos da Formação Codó, Cretáceo Inferior, exibiram reduzidos teores de CaO e elevados teores de Si₂O, variando de 6% a 20% e 16% a 84%, respectivamente, e teores de Sr em torno de 150 ppm, além de baixos teores dos demais óxidos maiores (MgO, Al₂O₃, Fe₂O₃, Na₂O, K₂O, TiO₂, MnO, P₂O₅). Os teores de Perda ao Fogo foram de cerca de 20%, coerentes com a presença de carbonatos.

As amostras de microbialitos modernos das Lagoas Fluminenses, Rio de Janeiro (RJ), apresentaram elevados e homogêneos teores de CaO e MgO, com cerca de 35% a 40% e 6% a 20%, respectivamente, e teores de Sr em torno de 1393,84 ppm, e baixos teores dos demais óxidos maiores (SiO₂, Na₂O, Al₂O₃, Fe₂O₃, Na₂O, K₂O, TiO₂, MnO, P₂O₅) (BAHNIUK, 2013). Os teores de Perda ao Fogo foram de cerca de 53%, coerentes com a presença de carbonatos (BAHNIUK, 2013).

As tufas holocênicas das regiões de Taíka e Mimosa, em Bonito (MS), exibem elevados e homogêneos teores de CaO, variando entre 50 a 52% e reduzidos teores de Sr, cerca de 174 ppm, e baixos teores dos demais óxidos maiores (MgO, Na₂O, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, Na₂O, K₂O, TiO₂, MnO, P₂O₅) (Oste, 2016, *em prep.*). Os teores de Perda ao Fogo foram de cerca de 44%, coerentes com a presença de carbonatos (OSTE, 2016, *em prep.*).

Os resultados químicos para as amostras de travertino, próximos à região de Denizli, na Turquia, demonstram elevados e homogêneos teores de CaO, variando entre 53 a 55% e teores de Sr em cerca de 774 ppm, e baixos teores dos demais óxidos maiores (MgO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, Na₂O, K₂O, TiO₂, MnO,

P₂O₅) (OSTE, 2015). Os teores de Perda ao Fogo foram de cerca de 43%, coerentes com a presença de carbonatos (OSTE, 2015).

As amostras de carbonatos travertinos de Kinki-Chugoku, Japão, demonstram elevados e homogêneos teores de CaO e Sr, variando entre 51 a 57% e 1462 ppm, respectivamente, e baixos teores dos demais óxidos maiores (MgO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, Na₂O, K₂O, TiO₂, MnO, P₂O₅) (MATTOS, 2016). Os teores de Perda ao Fogo foram de cerca de 43%, coerentes com a presença de carbonatos (MATTOS, 2016).

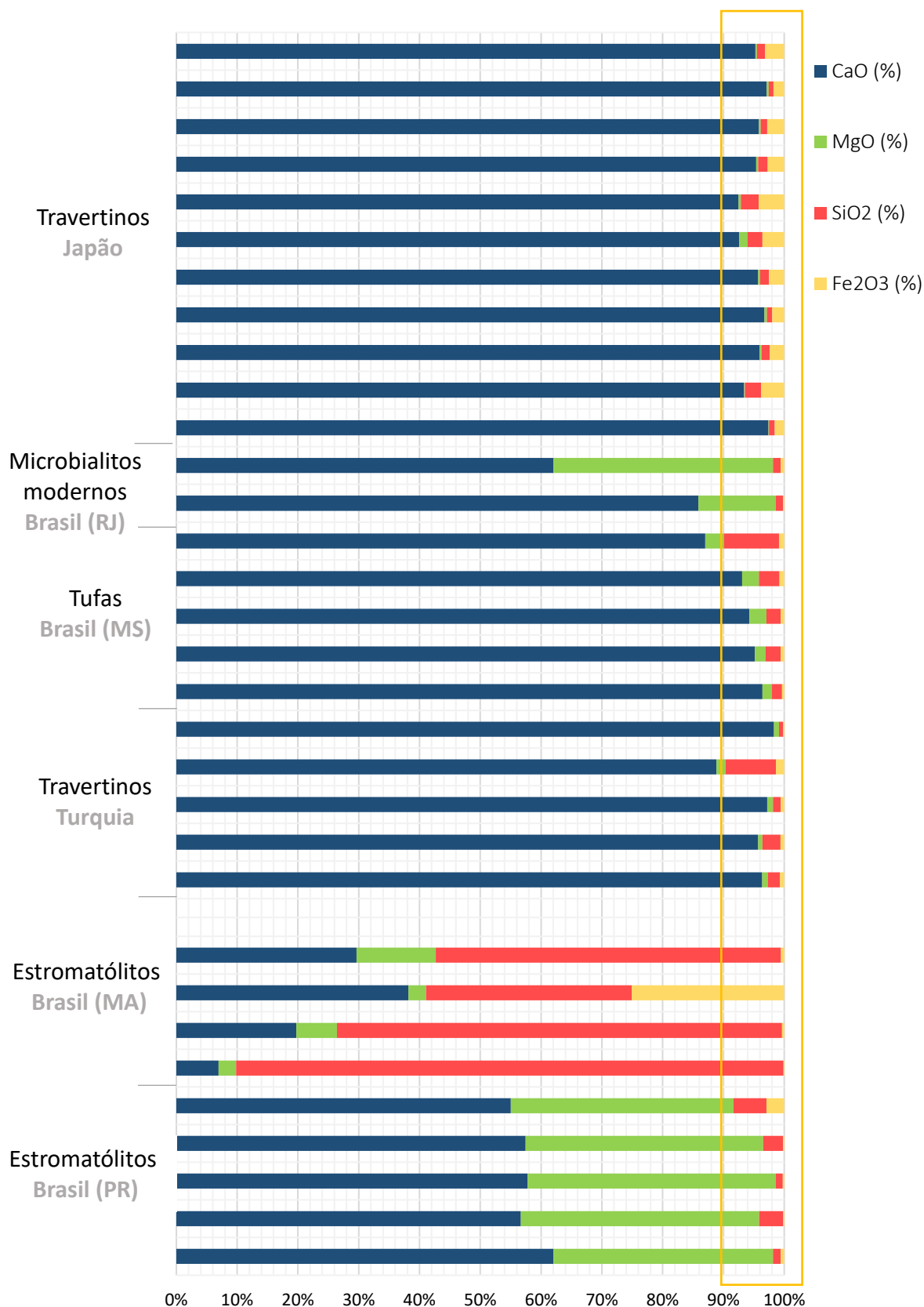


Gráfico 2 - Resultados das análises de composição química (FRX) das amostras dos microbialitos estudados, arranjados de acordo com suas idades (mais recentes na base e mais antigas no topo), localização geográfica e tipos de microbialitos (separados pelas linhas horizontais dispostas ao longo do eixo vertical de 0,00% do gráfico). (Fonte: o autor).

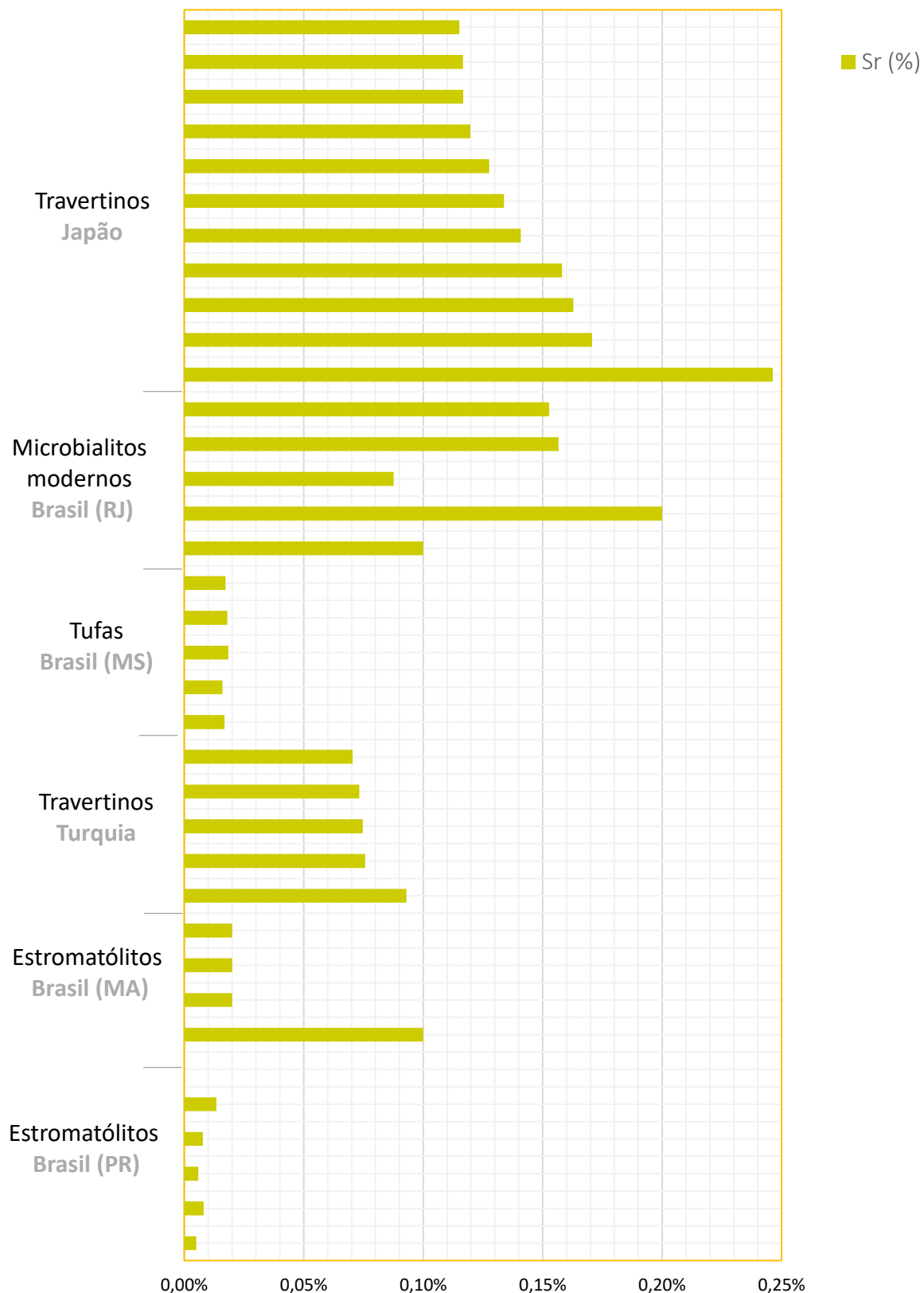


Gráfico 3 - Resultados das análises de concentração de estrôncio (Sr), em porcentagem, dos microbialitos estudados, arranjados de acordo com suas idades (mais recentes na base e mais antigas no topo), localização geográfica e tipos de microbialitos (separados pelas linhas horizontais dispostas ao longo do eixo vertical de 0,00% do gráfico). (Fonte: o autor).

5.4. GEOQUÍMICA ISOTÓPICA

Segundo Bahniuk (2013) e França (2016) concentrações isotópicas de ^{18}O ou ^{13}C são resultado de evaporação ou metabolização, de isótopos mais leves destes mesmos elementos e conseqüente enriquecimento de seus isótopos pesados no ambiente. Os resultados para as análises isotópicas utilizadas no trabalho são demonstrados na Figura 15.

As análises isotópicas de ^{18}O realizadas nas amostras da Formação Capiru, apresentam valores de $\delta^{18}\text{O}$ entre -5,43‰ e -8,84‰ VPBD, as análises de ^{13}C apresentam valores entre -0,70‰ e -1,57‰ VPBD para o $\delta^{13}\text{C}$,

Nas Lagoas Fluminenses as análises isotópicas, realizadas em amostras da Lagoa Salgada, apresentam valores de $\delta^{18}\text{O}$ entre -2,16‰ e 1,41‰ VPBD e valores entre 1,86‰ e 17,12‰ VPBD para o $\delta^{13}\text{C}$, indicando influência significativa de água do mar e processos microbiais, respectivamente, nos processos de precipitação desses carbonatos (BAHNIUK, 2015).

As análises isotópicas das amostras de tufa de Bonito, MS, apresentam valores de $\delta^{18}\text{O}$ entre -7,33‰ e -8,65‰ VPBD e valores entre -7,40‰ e -9,52‰ VPBD para o $\delta^{13}\text{C}$, indicando influência de fluidos meteóricos aquecidos em sub-superfície e pouca atividade microbiana, compatível com organomineralização induzida, como possíveis responsáveis pela precipitação desses carbonatos (OSTE, 2016, *em prep.*).

Nos travertinos de Denizli, Turquia, as análises isotópicas apresentaram valores de $\delta^{18}\text{O}$ entre -7,41‰ e -7,88‰ VPBD e valores entre -0,47‰ e -1,3‰ VPBD para o $\delta^{13}\text{C}$, indicando influência de fluidos aquecidos em sub-superfície e pouca atividade microbiana como possíveis responsáveis pela precipitação desses carbonatos (OSTE, 2015)

Com relação aos travertinos de Kinki-Chugoku, no Japão, as análises isotópicas realizadas exibem valores de $\delta^{18}\text{O}$ entre -13,60‰ e -10,97‰ VPBD e valores entre -2,41‰ e 2,46‰ VPBD para o $\delta^{13}\text{C}$, indicando influência de fluidos aquecidos em sub-superfície e pouca, ou insignificante, atividade microbiana como possíveis responsáveis pela precipitação desses carbonatos (FRANÇA, 2016).

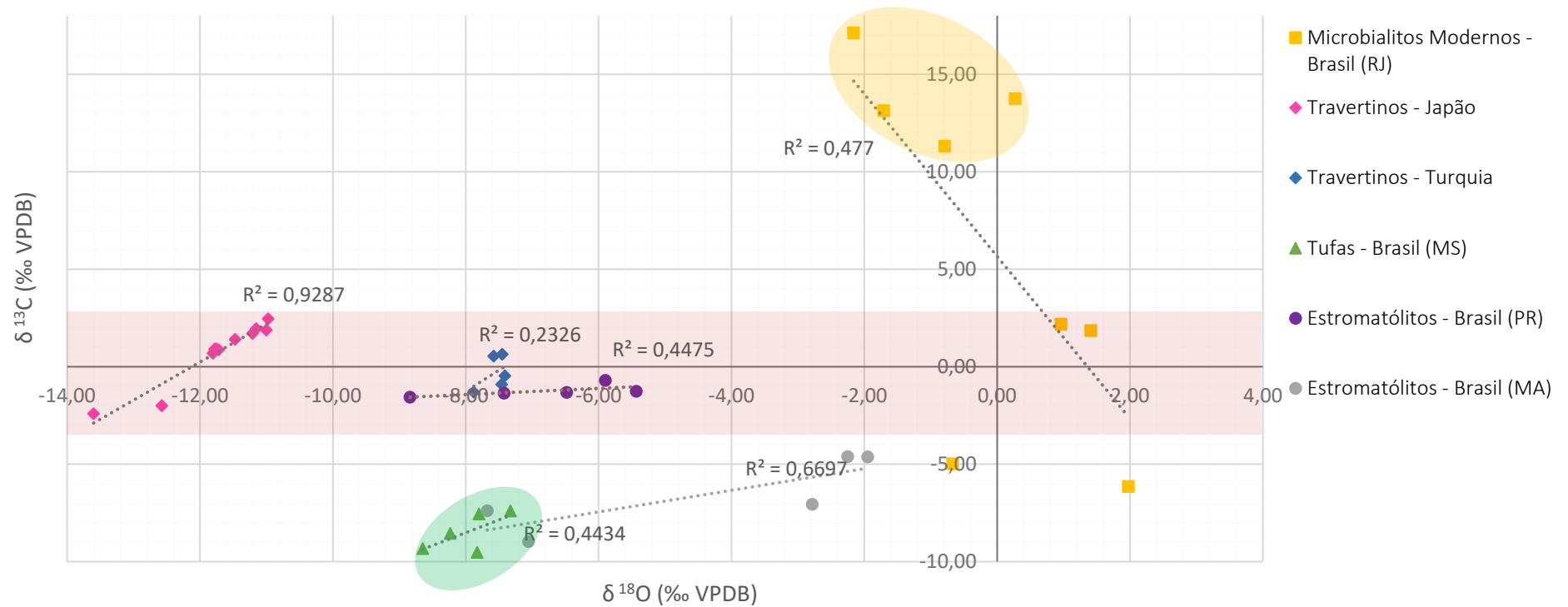


Figura 15 - Gráfico de dados obtidos em análise isotópica de carbono (^{13}C) e oxigênio (^{18}O), para os microbialitos estudados. Os dados estão agrupados segundo o tipo de microbialito e sua localização geográfica. Verificam-se três áreas distintas, em amarelo, em que haveriam maiores chances de se verificar processos organomineralizadores influenciados; em lilás, em que poderiam haver processos mineralizadores com pouca, ou nenhuma atividade microbiana; e, por fim, em verde, em que poderiam se verificar processos organomineralizadores induzidos. (Fonte: o autor).

6. RAZÕES ELEMENTARES (Ca, Mg e Sr)

As análises de razões elementares permitem a observação das proporções entre os principais elementos químicos alvo do trabalho: Ca, Mg e Sr. Observa-se uma relação entre a razão Ca/Mg (Figura 16) e a idade das amostras: conforme sejam mais recentes as rochas, há uma tendência de haver mais magnésio em sua composição.

Segundo a hipótese deste trabalho, pode-se dizer que quanto maiores os teores de Sr na amostra, maiores são as chances de ter havido participação microbial no desenvolvimento dos minerais constituintes dos microbialitos (Figura 17).

Por fim, no que diz respeito à razão Mg/Sr (Figura 18), pode-se perceber que os elementos não possuem estreita relação, isto ocorre, possivelmente, em função de maiores semelhanças químicas entre os elementos Sr e Ca.

Os mecanismos responsáveis pelas variações de concentrações verificadas nas razões elementares seriam os próprios processos de mineralização. Os organismos microbiais podem catalisar, por meio de variações no pH, por exemplo, a precipitação de minerais. Ou então, os organismos microbiais seriam influenciados a incorporar o Sr em suas matrizes orgânicas pela grande disponibilidade do elemento no ambiente.

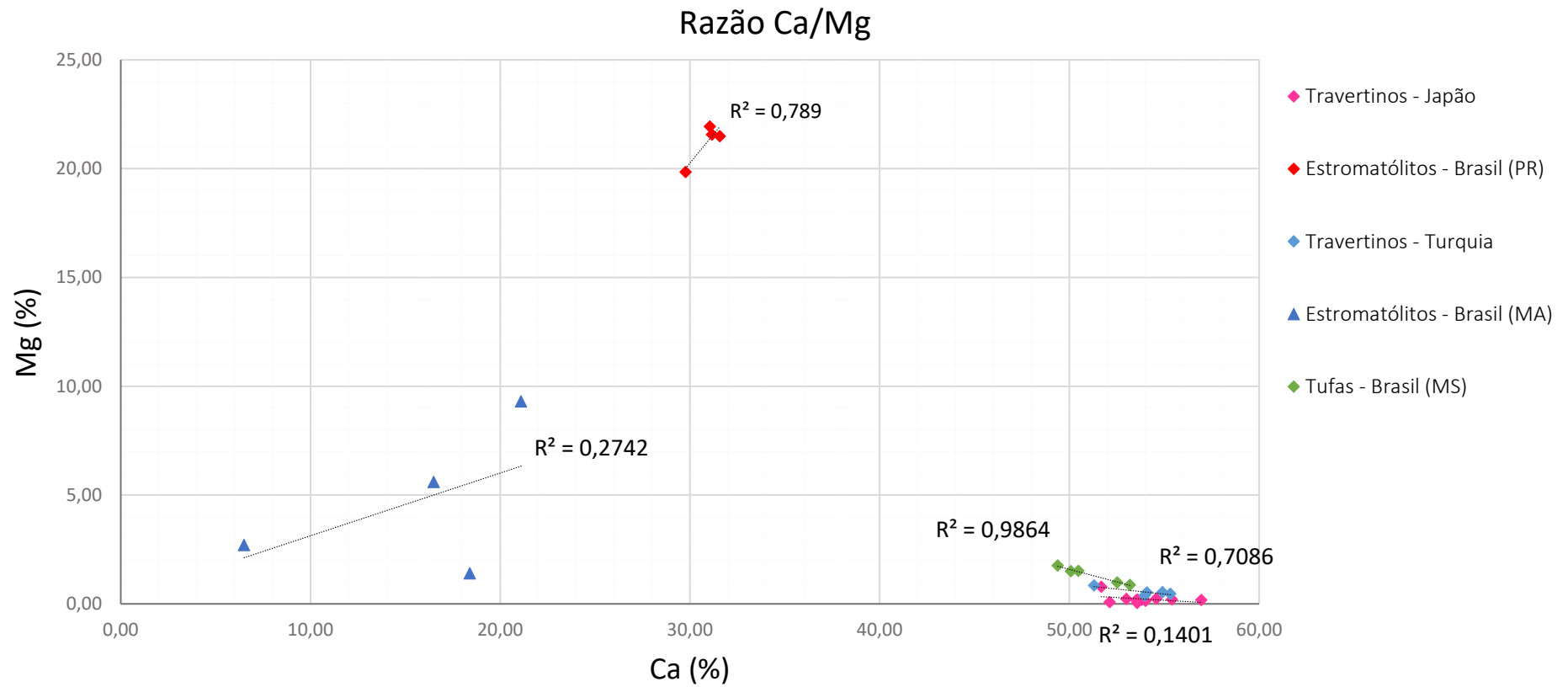


Figura 16 - Razões elementares entre Ca e Mg, projetadas para todas as amostras, após a normalização dos teores elementares para 100%. Os dados estão agrupados de acordo com a localização geográfica e tipo de microbialito das amostras. (Fonte: o autor).

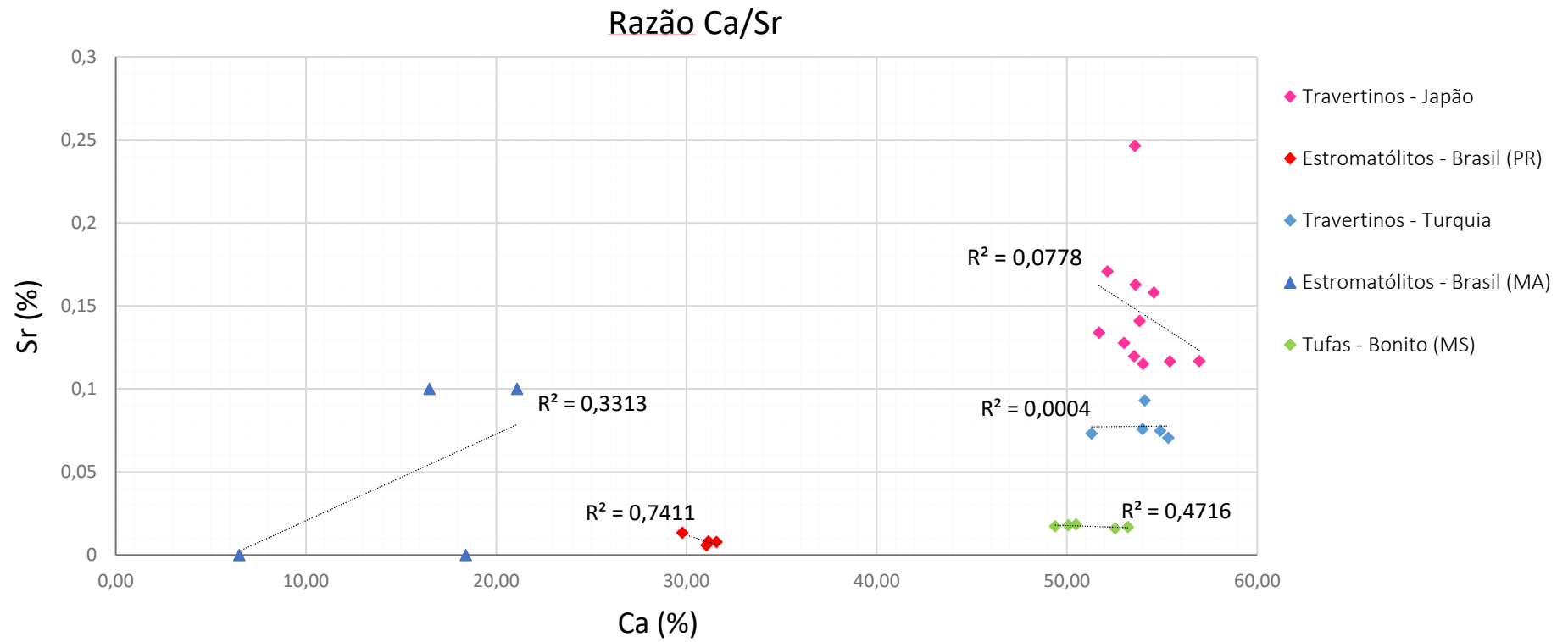


Figura 17 - Razões elementares entre Ca e Sr, projetadas para todas as amostras, após a normalização dos teores elementares para 100%. Os dados estão agrupados de acordo com a localização geográfica e tipo de microbialito das amostras. (Fonte: o autor).

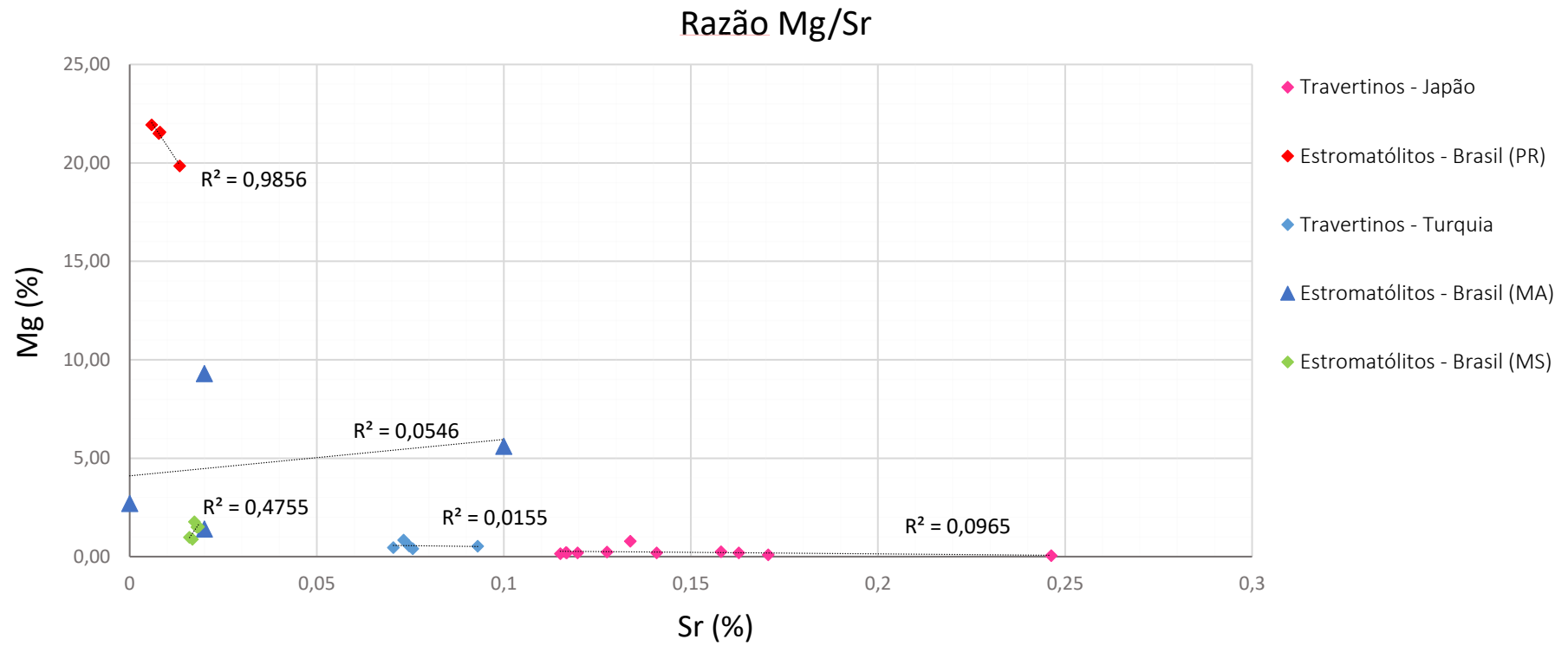


Figura 18 - Razões elementares entre Mg e Sr, projetadas para todas as amostras, após a normalização dos teores elementares para 100%. %. Os dados estão agrupados de acordo com a localização geográfica e tipo de microbialito das amostras. (Fonte: o autor).

7. VARIAÇÕES NA CONCENTRAÇÃO DE Sr

Em ambientes antigos (Neoproterozóico e Cretáceo Inferior) as concentrações de Sr são menores, por mais que haja registro de atividade microbiana. Em ambientes de tufa e travertino do Holoceno, as concentrações encontradas foram baixas e com registros de atividade microbiana apenas de bactérias fotossintetizantes (OSTE 2015; OSTE, 2016). As maiores concentrações de Sr estão nos ambientes em que se verificam tapetes microbianos e travertinos, no Brasil. (Gráfico 4).

Com relação aos processos mineralizadores, são influenciados pela proximidade das áreas fonte de Sr e atividade microbiana envolvida, exibindo diferentes concentrações de estrôncio nos microbialitos precipitados, a exemplo dos *end members* microbialitos, Rio de Janeiro (RJ) e travertinos do Japão.

Finalmente, em análise de tendências composicionais, percebe-se que a atividade microbiana interfere no processo de captura do Sr para o microbialito que está sendo formado. Este processo de captura se dá pela semelhança geoquímica entre os principais elementos constituintes de carbonatos, Ca e Mg, com o Sr (Figura 19). Porém, não se pode definir com clareza se apenas a atividade microbiana seria a responsável por essas variações, outros fatores podem ser influentes na origem e fixação do Sr seriam: proximidade de áreas fonte de Sr, tipos de bactérias envolvidas na organomineralização, microclimas regionais e taxas de evaporação, temperatura em que se desenvolveriam as trocas Sr-Ca, entre outros.

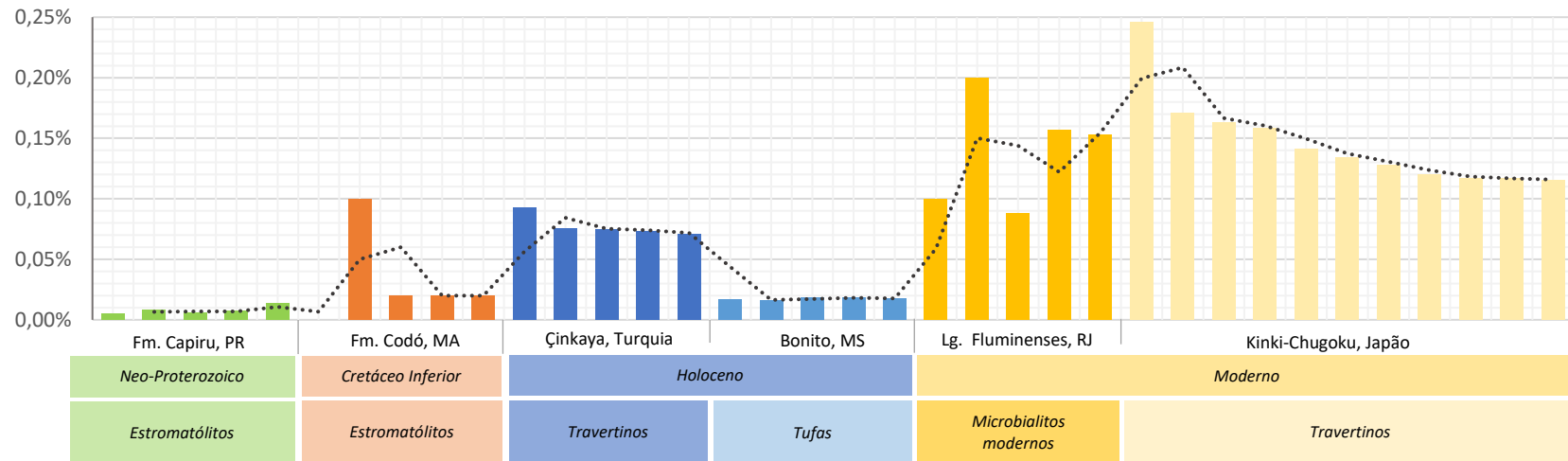


Gráfico 4 - Variação das concentrações de Sr, em porcentagem, ao longo do tempo geológico, considerando as idades das amostras envolvidas no trabalho. Percebe-se um aumento nas concentrações de estrôncio para as amostras mais recentes, independentemente do tipo de amostra e, conseqüentemente, do ambiente em que se formam ou estão sendo precipitados. Os dados das amostras estão arranjados de acordo com suas idades (mais antigas na esquerda, mais recentes na direita), localização geográfica e tipos de microbialitos (separados pelas linhas verticais dispostas ao longo do eixo horizontal do gráfico). (Fonte: o autor).

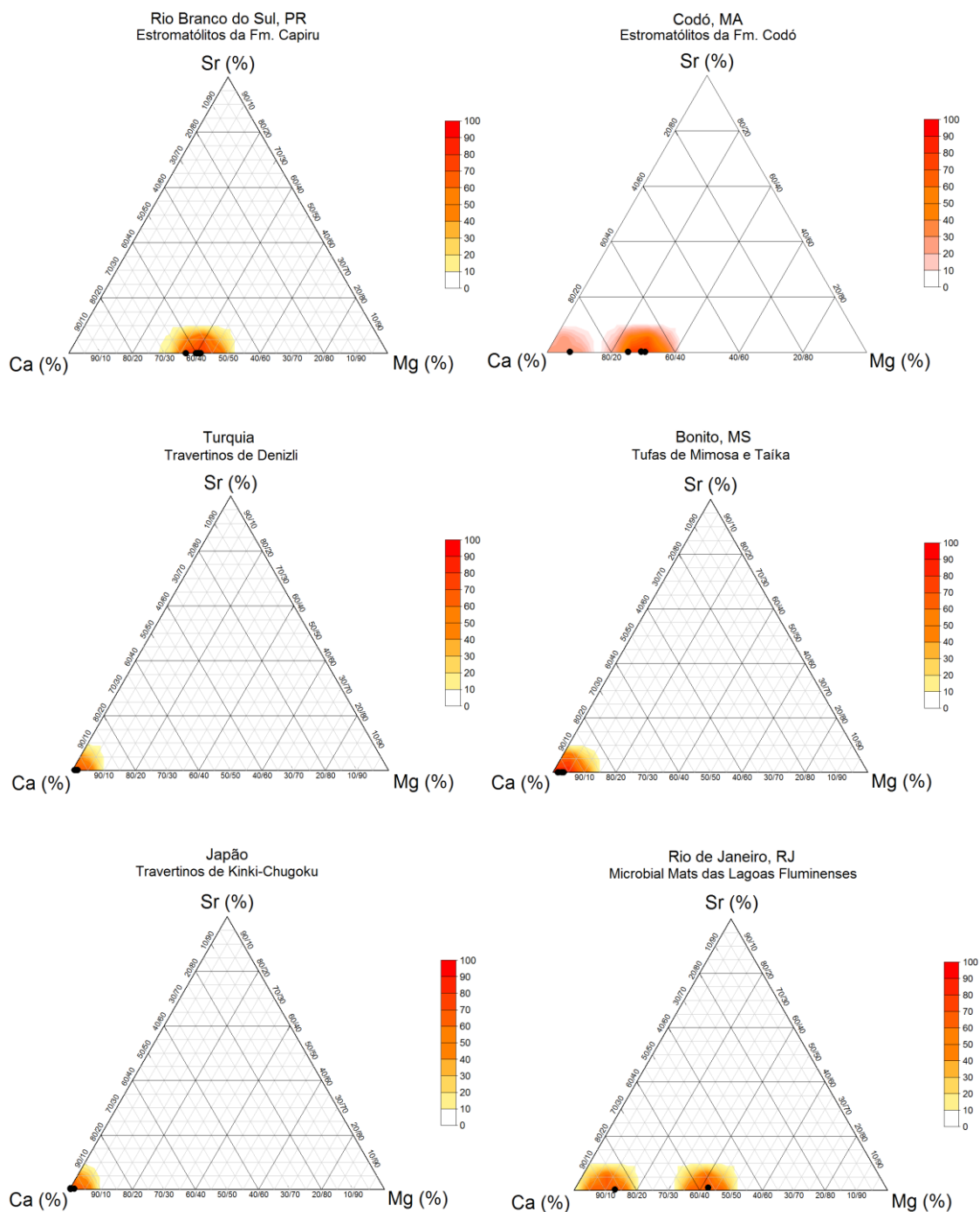


Figura 19 - Diagramas ternários (Ca, Mg e Sr) construídos para cada localidade estudada, afim de demonstrar tendências composicionais, após cálculo de normalização para 100%, em cada tipo de microbialito e localidade. (Fonte: o autor).

8. CONCLUSÕES

- Rochas carbonáticas mais recentes (travertinos do Japão e microbialitos modernos do Rio de Janeiro), apresentam concentrações maiores de Mg e, conseqüentemente, de minerais como Mg-calcita e aragonita.
- Os processos organomineralizadores se desenvolveram de modo influenciado em regiões como Lagoas Fluminenses (BAHNIUK, 2015); de modo induzido nas tufas de Bonito (OSTE, 2016) e estromatólitos de Codó. Há pouca, ou nenhuma, participação microbial nos microbialitos do Japão e Turquia analisados.
- Os tipos de bactéria envolvidos em cada ambiente formador de microbialitos poderá condicionar: tanto o tipo de organomineralização, quanto as concentrações de Sr verificadas na rocha precipitada.
- Com base nas concentrações de Sr, parece existir uma relação entre processos microbiais ativos na formação de microbialitos e a concentração do elemento nessas rochas. Contudo, a hipótese inicial do trabalho não foi confirmada, não há uma correlação direta entre concentração de Sr e atividade microbial, fazendo-se necessários mais estudos, principalmente quanto á origem e fixação do Sr em microbialitos.

REFERÊNCIAS

- ALLISON, N.; FINCH, A. A.; SUTTON, S. R.; NEWVILLE, M. 2001. Strontium heterogeneity and speciation in coral aragonite: implications for the strontium paleothermometer. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 65(16), pp. 2669–2676.
- BAHNIUK, M. A. 2007. Controles Geológicos da Carstificação em Metadolomitos da Formação Capiru – Neoproterozoico, Região Metropolitana de Curitiba, Paraná. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em geologia, UFPR, 138pp.
- BAHNIUK M.A. 2013. *Coupling Organic and Inorganic Methods to Study Growth and Diagenesis of Modern Microbial Carbonates, Rio de Janeiro State, Brazil: Implications for Interpreting Ancient Microbialite Facies Development*. Tese de Doutorado. Programa de Doutorado de Ciências (*Doctor of Sciences*), ETH ZURICH, 169 pp.
- BAHNIUK, M.A.; ANJOS, S.; FRANÇA, A. B; MATSUDA, N.; EILER, J.; MACKENZIE, J. A.; VASCONCELOS. *Development of microbial carbonates in the Lower Cretaceous Codó Formation (north-east Brazil): Implications for interpretation of microbialite facies associations and palaeoenvironmental conditions*. **Sedimentology**, v.62, p. 155-181, 2014.
- BAHNIUK, A.; MCKENZIE, J. A.; PERRI, E.; BONTOGNALI, T. R. R.; VOGELI, N.; REZENDE, C. E.; RANGEL, T. P.; VASCONCELOS, C. Characterization of environmental conditions during microbial Mg-carbonate precipitation and early diagenetic dolomite crust formation: Brejo do Espinho, Rio de Janeiro, Brazil. **Geological Society Special Publication**, v. 418, p. 1-2, 2015.
- BENZERARA, K.; COURADEAU, E.; GÉRARD, E.; TAVERA, R.; LOPEZ-ARCHILLA, A. I.; MOREIRA, D.; LOPEZ-GARCIA, P. *Geomicrobiological study of modern microbialites from Mexico: towards a better understanding of the ancient fossil record*. **EDP Sciences, BIO Web of Conferences**, 2: 1-10, 2014.
- BENZERARA, L.; MENGUY, N. *Looking for traces of life in minerals*. *Comptes Rendus Palevol*, v.8, p.617-628, 2009.
- BIGARELLA J.J., SALAMUNI R. 1956. Estudos preliminares da Série Açungui. V- Estruturas Organógenas nos Dolomitos da Formação Capiru (Estado do Paraná). *Dursenia* VII 7 (6):317-323. Curitiba.
- BIGARELLA J.J., SALAMUNI R. 1958. Contribuição a geologia da região sul da Série Açungui (estado do Paraná). **Bol. Paulista de Geografia**, (29):3-19. São Paulo.
- BIGARELLA J.J., SALAMUNI R. 1967. Sumário das estruturas sedimentares singenéticas no Grupo Açungui. **Bol. Paranaense de Geociências**, nº 23/25: 151-155.

BLASCHKO, S. D.; CHI, T.; MILLER, J.; FLECHNER, L.; FAKRA, S.; KAPAH, P.; KAHN, A.; STOLLER, M. L. 2013. Strontium Substitution for Calcium in Lithogenesis. **The Journal of Urology**, v.189, p.735-739.

DUPRAZ, C.; REID, P. R.; BRAISSANT, O.; DECHO, A. W.; NORMAN, R. S.; VISSCHER, P. T. 2009. Processes of carbonate precipitation in modern microbial mats. **Earth-Science Reviews**, v.96, p.141-162.

FIORI A.P. GASPAR L.A. 1993 Considerações sobre a estratigrafia do Grupo Açungui (Proterozóico Superior), Paraná, sul do Brasil. *Bol. IG-USP, Série Científica*, 24:1-19.

FORD, T. D. & PEDLEY, H. M. 1996. A review of tufa and travertine deposits of the world. **Earth-Science Review**, 41: 117-175.

FRANÇA, R. M. 2016. *Caracterização Geoquímica, Faciológica e Permo-Porosa de Carbonatos Continentais Modernos do Japão*. Tese de Mestrado. Programa de Mestrado em Geologia Exploratória, UFPR, 100pp.

FRANÇA, A. B.; BAHNIUK, A. M.; SHIRAIISHI, F.; CURY, L. F.; SANTOS, L. R.; MATTOS, R. F.; LEANDRO, R. 2016. Relatório final do Projeto Geobiocal. Relatório interno LAMIR – Frade, Japão Petróleo LTDA – Universidade Hiroshima – ANP, 353 p.

LANGE, L. L. 2015. Análise do Registro Sedimentar e Tectônico das Unidades Siliciclásticas da Formação Capiru, Porção Central de Almirante Tamandaré – PR. Monografia. Bacharelado em geologia, UFPR, 84pp.

LOWENSTAM, H. A. 1981. Minerals formed by Organisms. **Science**, v.211 (4487), p.1126-1131.

OSTE, J. T. F. 2015. Químioestratigrafia e Ambiente Depositional de Travertinos: Estudo de Caso da Bacia de Denizli, Turquia. Monografia. Bacharelado em Geologia, UFPR, 52pp.

OSTE, J. T. F. 2016. Caracterização geoquímica dos depósitos tipo tufa do Quaternário da Serra da Bodoquena – MS. Tese de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geologia, UFPR. (*em prep.*)

PERRY, R. S.; MCLOUGHLIN, N.; LYNNE, B. Y.; SEPTON, M. A.; OLIVER, J. D.; PERRY, C. C.; CAMPBELL, K.; ENGEL, M. H.; FARMER, J. D.; BRASIER, M. D.; STALEY, J. T. 2007. Defining biominerals and organominerals: direct and indirect indicators of life. **Sedimentary Geology**, v.201, p.157-179.

REIS NETO, J. M.; GUIMARÃES, S. B.; SIQUEIRA, R. B. L. Caracterização dos Estromatólitos da Formação Capiru (Proterozoico) nas Regiões de Morro Azul e Morro Grande: Leste do Paraná. **Boletim Paranaense de Geociências**, n. 51, p. 77-88, 2002. Editora UFPR.

RIDING, R. 2011. Microbialites, stromatolites and thrombolites. In J. Reitner and V. Thiel (eds), *Encyclopedia of Geobiology, Encyclopedia of Earth Science Series*, Springer, Heidelberg, p.635-654.

RIDING, R. E.; AWRAMIK, S. M. *Microbial Sediments*. Springer, v.1, p.161-170, 2000.

SIGA JR., O. 1995. Domínios tectônicos do Sudeste do Paraná e Nordeste de Santa Catarina: Geocronologia e Evolução Crustal. *Tese (Doutorado)*. São Paulo: Instituto de Geociências – USP. p. 212.

VÖGELI, N. 2012. Implications of elevated strontium values in microbial mediated dolomites: Brejo do Espinho and Lagoa Vermelha, Brazil. *Tese de Mestrado*. Programa de Mestrado de Ciências (*Master of Sciences*), Swiss Federal Institute of Technology Zurich, 39 pp.

APÊNDICE I

(Tabela com os resultados de composição mineralógica – DRX)

Tabela de resultados de composição mineralógica: listagem de resultados obtidos a partir de análise DRX, exibindo os valores semi-quantitativos, em porcentagem, para os minerais encontrados. As amostras foram aranjadas de acordo com o trabalho, ou pesquisa, em que estiveram envolvidas, e também de acordo com sua localização geográfica.

Coleta	Amostra	Tipo	Local	nº novo	Mineralogia - DRX	Quartzo	Calcita	Dolomita	Ca-Dolomita	Mg-Calcita	Halita	Gipso	Calcopirita	Aragonita	Anidrita	Goethita			
Oste (2015)	CK 1A	Travertino	Denizli, Turquia	TQ-I	Calcita	1%	99%												
	CK 2A			TQ-II	Calcita, quartzo	2%	98%												
	CK 01			TQ-III	Calcita		100%												
	CK 4A			TQ-IV	Calcita, quartzo	2%	98%												
	CK 02			TQ-V	Calcita, quartzo	6%	94%												
Oste (2016, em prep.)	355/15 MIM1B	Tufa	Mimosa e Taika, Bonito (MS)	BR-BNT-I	Mg-Calcita, calcita					63%									
	355/15 MIM1E			BR-BNT-II	Calcita, quartzo	4%	96%												
	355/15 TAI2A			BR-BNT-III	Mg-Calcita						100%								
	355/15 TAI3A			BR-BNT-IV	Mg-Calcita, quartzo	2%					98%								
	355/15I			BR-BNT-V	Mg-Calcita						100%								
Mandelli (2016)	151/16C	Microbial mat	Lagoas Fluminenses (RJ)	BR-RJ-I	Quartzo, Mg-calcita, halita	1%	20%				79%								
	151/16D		BR-RJ-II	Mg-Calcita, calcita, dolomita, halita		12%	12%		73%	3%									
	EST-Cap	Estromatólito	Rio Branco do Sul (PR)	BR-PR-I	Quartzo, dolomita			93%											
	151/16A		BR-CD-I	Quartzo, calcita, dolomita	7%	2%	8%												
	151/16B		BR-CD-II	Quartzo, calcita, dolomita	90%	2%	8%												
	452/16A		BR-CD-III	Quartzo, calcita, anidrita, goethita	71%	9%	2%												
	452/16B		BR-CD-IV	Quartzo, dolomita, calcita	40%	11%									27%	22%			
	452/16C		BR-CD-V	Calcita, dolomita	77%	9%	14%												
De Mattos (2016, em prep.)	Yama 13	Travertino	Kinki-Chugoku, Japão	JP-I	Calcita, aragonita		73%								27%				
	MYO 02			JP-II	Calcita magnesiana, aragonita					3%					97%				
	Yama 6			JP-III	Calcita, aragonita		88%								12%				
	Yama 17			JP-IV	Calcita, aragonita		82%								18%				
	Yama 10			JP-V	Calcita, aragonita		82%								18%				
	MYO 05			JP-VI	Calcita magnesiana, aragonita						48%				52%				
	Yama 14			JP-VII	Calcita, aragonita		73%								27%				
	Yama 8			JP-VIII	Calcita, aragonita		88%								12%				
	Yama 11			JP-IX	Calcita, aragonita		22%								78%				
	Yama 16			JP-X	Calcita, aragonita		99%								1%				
	Yama 21			JP-XI	Calcita, aragonita		92%								8%				
Bahniuk (2013)	BE-01	Microbial mat	Lagoas Fluminenses (RJ)	BR-RJ-III	LAMA: Calcita, calcita magnesiana, cálcio-dolomita		23%		27%	50%									
	BE-02			BR-RJ-IV	LAMA: Calcita magnesiana, cálcio-dolomita				56%	44%									
	BE-03			BR-RJ-V	LAMA: Calcita, calcita magnesiana, cálcio-dolomita		29%		34%	37%									
	BE-04			BR-RJ-VI	LAMA: Calcita magnesiana, cálcio-dolomita				44%	56%									
	BE-05			BR-RJ-VII	CROSTA: Dolomita					100%									
	BE-06			BR-RJ-VIII	CROSTA: Dolomita					100%									
	BE-07			BR-RJ-IX	CROSTA: Dolomita					100%									
	LS-01			BR-RJ-X	Quartzo, Dolomita, Calcita magnesiana	23%		25%			52%								
	LS-02			BR-RJ-XI	Quartzo, Dolomita, Calcita magnesiana, Halita	23%		19%			37%	21%							
	LS-03			BR-RJ-XII	Quartzo, Dolomita, Calcita magnesiana	32%		37%			31%								
	LS-04			BR-RJ-XIII	Quartzo, Calcita, Calcita magnesiana, gipso, calcopirita	7%	46%				22%		4%	23%					
	LS-05			BR-RJ-XIV	Quartzo, Mg-calcita, halita	22%					65%								
	LS-06			BR-RJ-XV	Quartzo, Mg-calcita, halita	13%					81%		13%	7%					
	Lange (2016, em prep.)			LL 104A	Estromatólito	Rio Branco do Sul (PR)	BR-PR-I	Dolomita, quartzo			92%								
				LL 141			BR-PR-II	Dolomita, quartzo, biotita	8%			100%							
LL 121C		BR-PR-III	Dolomita, quartzo	2%						98%									
LLM		BR-PR-IV	Dolomita, quartzo, biotita	25%						81%									

APÊNDICE II

(Tabela com os resultados de composição química – FRX)

Tabela de resultados de composição química: listagem de resultados obtidos a partir de análise FRX, exibindo os valores quantitativos para os dez óxidos maiores (CaO, MgO, SiO2, Al2O3, Fe2O3, Na2O, K2O, TiO2, MnO, P2O5) e quatro elementos traço (S, Sr, Cl, Ba) encontrados, com destaque para o Sr. As amostras foram arranjadas de acordo com o trabalho, ou pesquisa, em que estiveram envolvidas, e também de acordo com sua localização geográfica.

Coleta	Amostra	Tipo	Local	nº novo	CaO (%)	MgO (%)	SiO2 (%)	Al2O3 (%)	Fe2O3 (%)	Na2O (%)	K2O (%)	TiO2 (%)	MnO (%)	P2O5 (%)	Sr (ppm)	Ba (ppm)	S (ppm)	Cl (ppm)	Perda ao Fogo (%)			
Oste (2015)	CK 1A	Travertino	Denizli, Turquia	TQ-I	54,09%	0,52%	1,12%	0,21%	0,40%	0,06%	0,05%	0,02%	0,01%	0,03%	930,0	16,0	1574,0	2,0	43,24%			
	CK 2A			TQ-II	53,98%	0,39%	1,68%	0,32%	0,35%	0,07%	0,09%	0,03%	0,01%	0,02%	757,0	24,0	712,0	2,0	42,91%			
	CK 01			TQ-III	54,91%	0,54%	0,71%	0,18%	0,33%	0,05%	0,03%	0,01%	0,01%	0,01%	747,0	88,0	1129,0	9,0	43,02%			
	CK 4A			TQ-IV	51,30%	0,84%	4,80%	0,90%	0,78%	0,07%	0,19%	0,08%	0,02%	0,03%	732,0	53,0	1179,0	2,0	40,80%			
	CK 02			TQ-V	55,33%	0,46%	0,38%	0,10%	0,10%	0,06%	0,02%	0,01%	0,01%	0,01%	705,0	100,0	827,0	9,0	43,35%			
Oste (2016, em prep.)	355/15 MIM1B	Tufa	Mimoso e Taika, Bonito (MS)	BR-BNT-I	53,20%	0,87%	0,90%	0,32%	0,21%	0,02%	0,07%	0,02%	0,02%	0,04%	168,0	58,0	157,0	2,0	44,30%			
	355/15 MIM1E			BR-BNT-II	52,53%	0,98%	1,38%	0,48%	0,31%	0,03%	0,10%	0,03%	0,02%	0,04%	160,0	69,0	167,0	2,0	44,07%			
	355/15 TAI2A			BR-BNT-III	50,48%	1,51%	1,25%	0,36%	0,31%	0,02%	0,09%	0,02%	0,03%	0,06%	184,0	90,0	370,0	2,0	45,80%			
	355/15 TAI3A			BR-BNT-IV	50,08%	1,50%	1,82%	0,60%	0,41%	0,03%	0,15%	0,03%	0,03%	0,06%	180,0	96,0	291,0	2,0	45,24%			
	355/15I			BR-BNT-V	49,39%	1,76%	5,13%	0,90%	0,48%	0,04%	0,31%	0,05%	0,01%	0,09%	173,0	68,0	1054,0	21,0	41,73%			
Mandelli (2016)	151/16C	Microbial mat	Lagoas Fluminenses (RJ)	BR-RJ-I	42,60%	6,30%	0,60%	0,10%	0,10%	0,10%	0,10%	0,00%	0,00%	0,10%	2000,0	0,0	900,0	1300,0	46,47%			
	151/16D			BR-RJ-II	33,20%	19,30%	0,70%	0,20%	0,30%	0,00%	0,10%	0,00%	0,00%	0,10%	50,0	0,0	0,0	0,0	46,24%			
	EST-Cap	Estromatólito	Rio Branco do Sul (PR)	BR-PR-I	33,20%	19,30%	0,70%	0,20%	0,30%	0,00%	0,10%	0,00%	0,00%	0,10%	50,0	0,0	0,0	0,0	46,24%			
	151/16A		Codó (MA)		BR-CD-I	6,50%	2,70%	84,10%	0,20%	0,10%	0,10%	0,00%	0,00%	0,10%	0,10%	0,0	0,0	2000,0	1000,0	6,08%		
	151/16B				BR-CD-II	16,50%	5,60%	61,20%	0,50%	0,30%	0,10%	0,10%	0,00%	0,20%	0,10%	1000,0	0,0	1000,0	1000,0	15,18%		
	452/16A				BR-CD-III	18,40%	1,40%	16,30%	5,70%	12,10%	0,00%	1,10%	0,30%	0,20%	0,20%	138,0				22,00%		
	452/16B				BR-CD-IV	21,10%	9,30%	40,45%	0,16%	0,38%	0,10%	0,01%	0,00%	0,28%	0,12%	145,0				28,00%		
	452/16C				BR-CD-V	49,46%	0,57%	7,26%	1,20%	0,60%	0,03%	0,15%	0,05%	0,35%	0,08%	147,0				40,19%		
	Yama 13				JP-I	53,57%	0,04%	0,51%	0,02%	0,87%	0,35%	0,03%	0,01%	0,04%	0,01%	0,38%	0,01%	2463,0	1290,0	54,0	607,0	44,12%
MYO 02	JP-II	52,13%			0,08%	1,50%	0,07%	2,11%	0,13%	0,02%	0,01%	0,01%	0,38%	0,01%	1707,0	453,0	339,0	36,0	43,33%			
Yama 6	JP-III	53,61%	0,19%	0,73%	0,03%	1,33%	0,16%	0,02%	0,01%	0,06%	0,01%	0,01%	1628,0	910,0	58,0	194,0	43,57%					
Yama 17	JP-IV	54,58%	0,24%	0,49%	0,03%	1,11%	0,20%	0,02%	0,01%	0,05%	0,01%	0,01%	1581,0	1009,0	57,0	278,0	42,96%					
Yama 10	JP-V	53,82%	0,19%	0,81%	0,03%	1,41%	0,17%	0,03%	0,01%	0,06%	0,01%	0,01%	1409,0	943,0	60,0	244,0	43,20%					
MYO 05	JP-VI	51,69%	0,78%	1,35%	0,07%	2,01%	0,11%	0,02%	0,01%	0,02%	0,35%	0,01%	1338,0	419,0	1147,0	18,0	43,29%					
Yama 14	JP-VII	53,01%	0,23%	1,67%	0,21%	2,41%	0,18%	0,07%	0,02%	0,07%	0,03%	0,03%	1276,0	841,0	93,0	263,0	41,83%					
Yama 8	JP-VIII	53,54%	0,18%	0,89%	0,03%	1,52%	0,16%	0,02%	0,01%	0,06%	0,01%	0,01%	1197,0	872,0	61,0	240,0	43,34%					
Yama 11	JP-IX	56,96%	0,18%	0,63%	0,03%	1,66%	0,16%	0,02%	0,01%	0,07%	0,01%	0,01%	1168,0	885,0	56,0	318,0	40,03%					
Yama 16	JP-X	55,41%	0,20%	0,44%	0,03%	1,01%	0,12%	0,02%	0,01%	0,06%	0,03%	0,03%	1166,0	818,0	200,0	131,0	42,44%					
Yama 21	JP-XI	54,01%	0,14%	0,77%	0,03%	1,77%	0,13%	0,02%	0,01%	0,07%	0,02%	0,02%	1151,0	829,0	72,0	161,0	42,80%					
Bahniuk (2013)	BE-01	Microbial mat	Lagoas Fluminenses (RJ)	BR-RJ-III																		
	BE-02			BR-RJ-IV																		
	BE-03			BR-RJ-V																		
	BE-04			BR-RJ-VI																		
	BE-05			BR-RJ-VII																		
	BE-06			BR-RJ-VIII																		
	BE-07			BR-RJ-IX																		
	LS-01			BR-RJ-X	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	876,1				0,00%	
	LS-02			BR-RJ-XI																		
	LS-03			BR-RJ-XII	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	1566,6				0,00%	
	LS-04			BR-RJ-XIII																		
	LS-05			BR-RJ-XIV																		
	LS-06			BR-RJ-XV	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	1526,5				0,00%	
	Lange (2016, em prep.)			LL 104A	Estromatólito	Rio Branco do Sul (PR)	BR-PR-I	31,16%	21,56%	2,19%	0,18%	0,08%	0,01%	0,09%	0,01%	0,01%	0,01%	81,0	19,0	53,0	11,0	44,69%
				LL 141			BR-PR-II	31,05%	21,93%	0,63%	0,14%	0,13%	0,01%	0,07%	0,01%	0,01%	0,02%	59,0	15,0	47,0	29,0	46,01%
LL 121C		BR-PR-III	31,58%	21,49%			1,80%	0,14%	0,10%	0,01%	0,09%	0,01%	0,01%	0,01%	78,0	15,0	56,0	9,0	44,77%			
LLM		BR-PR-IV	29,76%	19,84%			2,92%	0,63%	1,56%	0,01%	0,36%	0,03%	0,02%	0,08%	134,0	41,0	54,0	3,0	44,74%			

APÊNDICE III

(Tabela com os resultados de análises isotópicas)

Tabela de resultados de análise isotópica: listagem de resultados obtidos a partir de análise isotópica, exibindo os valores de $\delta^{13}\text{C}$ (‰ VPDB) e $\delta^{18}\text{O}$ (‰ VPDB), bem como seus respectivos desvios padrões. As amostras foram arranjadas de acordo com o trabalho, ou pesquisa, em que estiveram envolvidas, e também de acordo com sua localização geográfica.

Coleta	Amostra	Tipo	Local	nº novo	Resultado $\delta^{13}\text{C}$ (‰ VPDB)	Resultado $\delta^{18}\text{O}$ (‰ VPDB)	Desvio padrão $\delta^{13}\text{C}$ (‰ VPDB)	Desvio padrão $\delta^{18}\text{O}$ (‰ VPDB)			
Oste (2015)	CK 1A	Travertino	Denizli, Turquia	TQ-I	-1,3	-7,88	0,04	0,02			
	CK 2A			TQ-II	0,64	-7,45	0,08	0,06			
	CK 01			TQ-III	-0,91	-7,46	0,1	0,06			
	CK 4A			TQ-IV	0,54	-7,58	0,1	0,06			
	CK 02			TQ-V	-0,47	-7,41	0,02	0,04			
Oste (2016, em prep.)	355/15 MIM1B	Tufa	Mimosa e Taika, Bonito (MS)	BR-BNT-I	-9,33	-8,65	0,04	0,06			
	355/15 MIM1E			BR-BNT-II	-9,52	-7,83	0,06	0,08			
	355/15 TAJ2A			BR-BNT-III	-7,40	-7,33	0,07	0,08			
	355/15 TAJ3A			BR-BNT-IV	-7,55	-7,80	0,03	0,04			
	355/15I			BR-BNT-V	-8,56	-8,23	0,05	0,05			
Mandelli (2016)	151/16C	Microbial mat	Lagoas Fluminenses (RJ)	BR-RJ-I	-4,98	-0,67	0,05	0,13			
	151/16D			BR-RJ-II	-6,14	1,98	0,05	0,15			
	EST-Cap	Estromatólito	Rio Branco do Sul (PR)	BR-PR-I	-1,26	-5,43	0,05	0,15			
	151/16A		BR-CD-I								
	151/16B		BR-CD-II								
	452/16A		BR-CD-III								
	452/16B		BR-CD-IV								
	452/16C		BR-CD-V								
	De Mattos (2016, em prep.)		Yama 13	Travertino	Kinki-Chugoku, Japão	JP-I	1,40	-11,47	0,04	0,05	
			MYO 02			JP-II	-2,00	-12,58			
Yama 6		JP-III	1,94			-11,15	0,05	0,04			
Yama 17		JP-IV	2,46			-10,97	0,08	0,12			
Yama 10		JP-V	1,89			-11,00	0,04	0,04			
MYO 05		JP-VI	-2,41			-13,60					
Yama 14		JP-VII	0,87			-11,72	0,04	0,06			
Yama 8		JP-VIII	1,70			-11,21	0,02	0,06			
Yama 11		JP-IX	0,93			-11,76	0,06	0,05			
Yama 16		JP-X	0,90			-11,78	0,32	0,27			
Yama 21		JP-XI	0,69			-11,80	0,36	0,27			
Bahniuk (2013)	BE-01	Microbial mat	Lagoas Fluminenses (RJ)	BR-RJ-III							
	BE-02			BR-RJ-IV							
	BE-03			BR-RJ-V							
	BE-04			BR-RJ-VI							
	BE-05			BR-RJ-VII							
	BE-06			BR-RJ-VIII							
	BE-07			BR-RJ-IX							
	LS-01			BR-RJ-X	1,86	1,41					
	LS-02			BR-RJ-XI	2,18	0,96					
	LS-03			BR-RJ-XII	13,75	0,27					
	LS-04			BR-RJ-XIII	17,12	-2,16					
	LS-05			BR-RJ-XIV	11,32	-0,79					
	LS-06			BR-RJ-XV	13,13	-1,71					
	Lange (2016, em prep.)			LL 104A	Estromatólito	Rio Branco do Sul (PR)	BR-PR-II	-1,57	-8,84	0,04	0,10
				LL 141			BR-PR-II	-1,36	-7,42	0,03	0,11
LL 121C		BR-PR-III	-1,32	-6,48			0,09	0,13			
LLM		BR-PR-IV	-0,70	-5,90			0,08	0,18			