

Lagos e Salares Andinos: Uma introdução sobre as suas características

Andean Lakes and Salt Flats: An introduction to their characteristics

Tatiana Martinez Moreira^{1*}

RESUMO

Esse trabalho tem o objetivo de trazer algumas informações e características sobre uma área extremamente árida, com formações geológicas sedimentares, um ecossistema único e de grande interesse científico e econômico, trata-se dos Salares de regiões Andinas. Esses locais possuem lagos salinos; evaporitos formados pela cristalização e precipitação química dos sais dissolvidos, em um meio aquoso por evaporação; formação de dunas; vulcões ativos; além de um ecossistema complexo com microrganismos poliextremofílicos. As condições apresentadas podem ser utilizadas para estudos geológicos diversos; para pesquisas relacionadas com o início da vida na Terra, onde surgiram os primeiros microrganismos; além disso, como análogos terrestres para investigação sobre outros planetas, como Marte, utilizando a Astrobiologia como referência para busca de vida em outros planetas.

Palavras-chave: Lagos salinos; Salares; Evaporitos; Astrobiologia, Geociências.

ABSTRACT

This work aims to bring some information and characteristics about an extremely arid area, with sedimentary geological formations, a unique ecosystem and of great scientific and economic interest, it is the Salares of Andean regions. These places have saline lakes; evaporites formed by crystallization and chemical precipitation of dissolved salts, in an aqueous medium by evaporation; dune formation; active volcanoes; in addition to a complex ecosystem with polyextremophilic microorganisms. The presented conditions can be used for different geological studies; for research related to the beginning of life on Earth, where the first microorganisms appeared; in addition, as terrestrial analogues for research on other planets, such as Mars, using Astrobiology as a reference for the search for life on other planets.

Keywords: Saline lakes, Salt flats; Evaporites; Astrobiology; Geosciences.

¹ Universidade de São Paulo – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – Instituto de Geociências

*E-mail: tatiana.moreira@usp.br

INTRODUÇÃO

Os lagos salinos geralmente são encontrados em regiões áridas e semiáridas onde há altas taxas de evaporação e uma combinação de condições geológicas, geomorfológicas e hidrológicas que permitem que salmouras naturais se desenvolvam em bacias endorreicas. Esse tipo de bacia hidrográfica ocorre quando as drenagens são internas e não possuem escoamento até o mar, desembocando em lagos, dissipando-se nas areias do deserto, ou perdendo-se nas depressões cársticas. Nestas situações, os sais minerais se concentram, a química do ambiente é então determinada pela concentração dos sais que se acumulam e pela proporção relativa dos íons na água afluyente que alimenta o lago, podendo vir através da chuva. (URRUTIA et al., 2019)

A maior parte dos lagos salinos são determinados pelos íons cloreto, carbonato e sulfato e os cátions mais comuns são sódio e potássio, porém, alguns lagos há predominância do magnésio ou do cálcio. Estes lagos podem ter concentrações de sais muito superiores às encontradas em ambientes marinhos. Uma característica interessante desse tipo de ambiente é a formação de colunas de sal, que são geradas pelo movimento da água salina por ação capilar, sendo que, a deposição de calcário por organismos fotossintéticos reforça este processo, conforme exibido na figura 1, do lago Mono localizado na Califórnia.

Figura 1. Lago Mono – Califórnia – EUA.



Fonte: Google Imagens.

Diferentes adaptações são necessárias para os organismos serem capazes de sobreviver em ambientes extremos de salinidade. De forma geral, há uma diminuição

na biodiversidade de animais e plantas à medida que a salinidade aumenta e o limite máximo de tolerância de vários organismos é excedido.

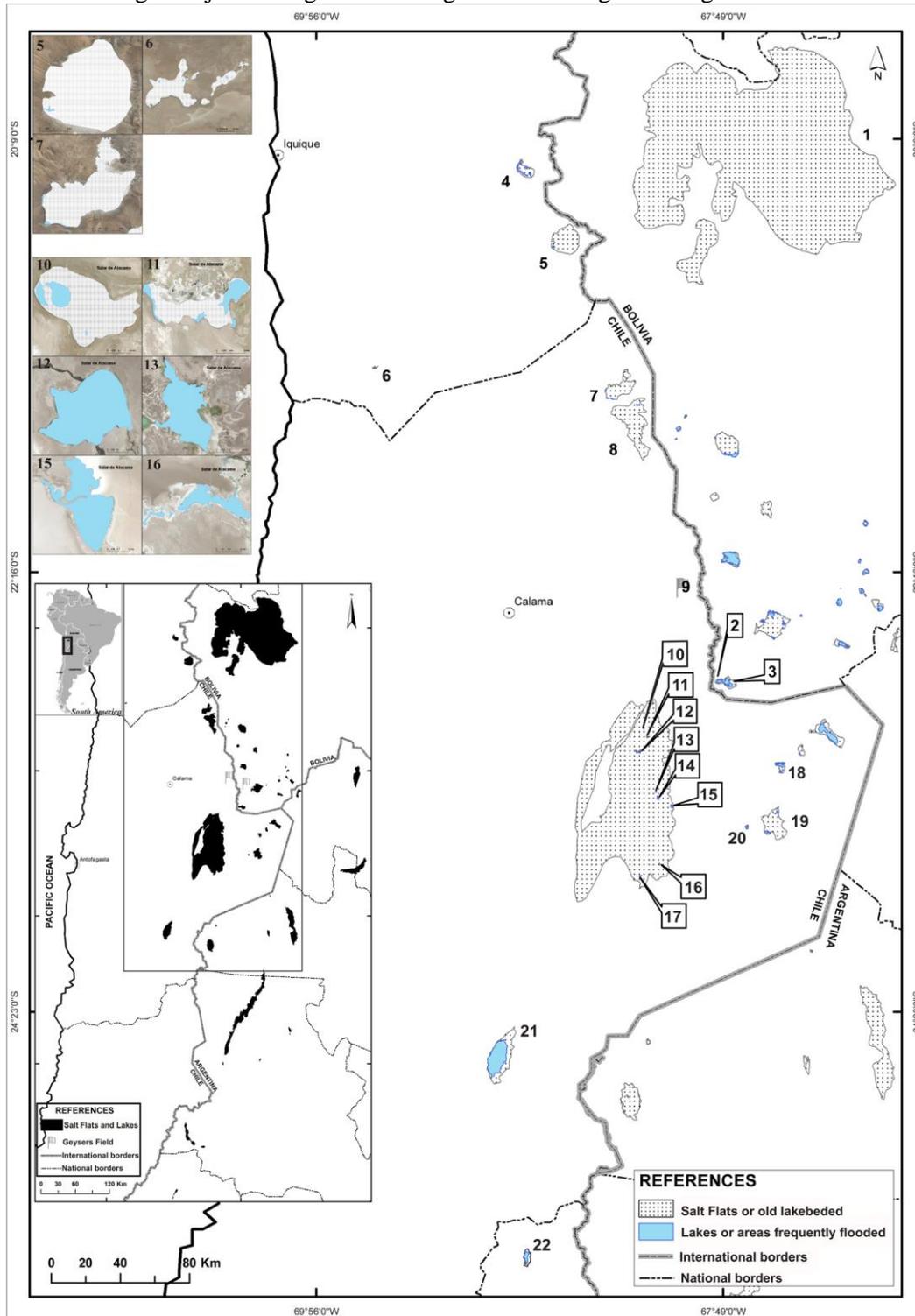
Alguns sistemas hipersalinos possuem grande interesse econômico, como o Salar de Atacama no hiperárido Deserto do Atacama, localizado no norte do Chile. Essa região possui elevada concentração de lítio, sendo parte integrante das maiores reservas de lítio do mundo. (CUBILLOS et al., 2018; GAJARDO; REDÓN, 2019)

Dessa forma, os lagos salinos e salares são ecossistemas dinâmicos que estão dependentes de vários fatores bióticos (organismos vivos) e abióticos (elementos físicos e químicos do ambiente: luz, calor, pH, salinidade etc.), que podem alterar as suas condições ecológicas e a comunidade de organismos. Além disso, esses ecossistemas possuem valores científicos, econômicos, culturais, recreativos e ecológicos e são muito sensíveis as mudanças no fluxo de entrada de água.

LAGOS E SALARES DOS ANDES CENTRAIS

Os Andes Centrais da América do Sul, que se estendem por sudoeste da Bolívia, noroeste da Argentina e norte do Chile, apresentam uma geografia única de bacias endorreicas em altitudes variando de 3.000 a 6.000 metros acima do nível do mar. O Altiplano (Bolívia), Deserto do Atacama (Chile) e Puna (Argentina), como exibido nas figuras 2 e 3, são regiões ricas em salinas, vulcões ativos, nascentes, fumarolas e lagos andinos de alta altitude, a maioria dos quais apresenta diversos ecossistemas microbianos poliextremofílicos denominados Ecossistemas Microbianos Andinos. Esses microrganismos vivem em ambientes com condições que são consideradas adversas às formas de vida mais comuns do planeta, que vão desde temperaturas e pH extremos a altos índices de radiação e salinidade. (VIGNALE et al., 2022)

Figura 2. Mapa da Bolívia e do Chile exibindo a localização das salinas e lagos. Bolívia: 1 Salar de Uyuni. 2 Lagoa Verde. 3 Lagoa Branca. Chile: 4 Salar de Huasco. 5 Lagoa da Coposa. 6 Salar de Llamara. 7 Salar de Carcote. 8 Salar de Ascotán. 9 Campo de Géiseres del Tatio. 10 Lagoa de la Piedra. 11 Lagoa do Cejar. 12 Lagoa Tebenquiche. 13 Lagoa Chaxa. 14 Lagoa Barros Negros. 15 Águas de Quelana. 16 Lagoa da Salada. 17 Lagoa Brava. 18 Lagoa Pujsa. 19 Salar Águas Calientes. 20 Lagoa Lejía. 21 Lagoa Punta Negra. 22 Salar Água Amarga.



Fonte: VIGNALE et al., (2022).

Figura 3. Imagens da Bolívia, Salares chilenos e argentinos e lagos salinos dos Andes Centrais. **a** Salar de Uyuni (1). **b** Salar de Coposa (5). **c** Puquios de Llamará (6). **d** Lagoa Verde del Salar de Carcot (7). **e** Lagoa do Cejar (11). **f** Lagoa Tebenquiche (12). **g** Lagoa Chaxa (13). **h** Lagoa Barros Negros (14). **i** Lagoa da Salada (16). **j** Lagoa Brava (17). **k** Salar Águas Calientes (19). **l** Lagoa Água Amarga (22). **m** Lagoa Vilama. **n** Salar de Tolar Grande. **o** Lagoa Socompa. **p** Lagoa Pozo Bravo. **q** Puquio de Campo Naranja. **r** Las Quinoas. **s** Laguna El Peinado. **t** Lagoa Carachipampa. **u** Lagoa Diamante.



Fonte: VIGNALE et al., (2022)

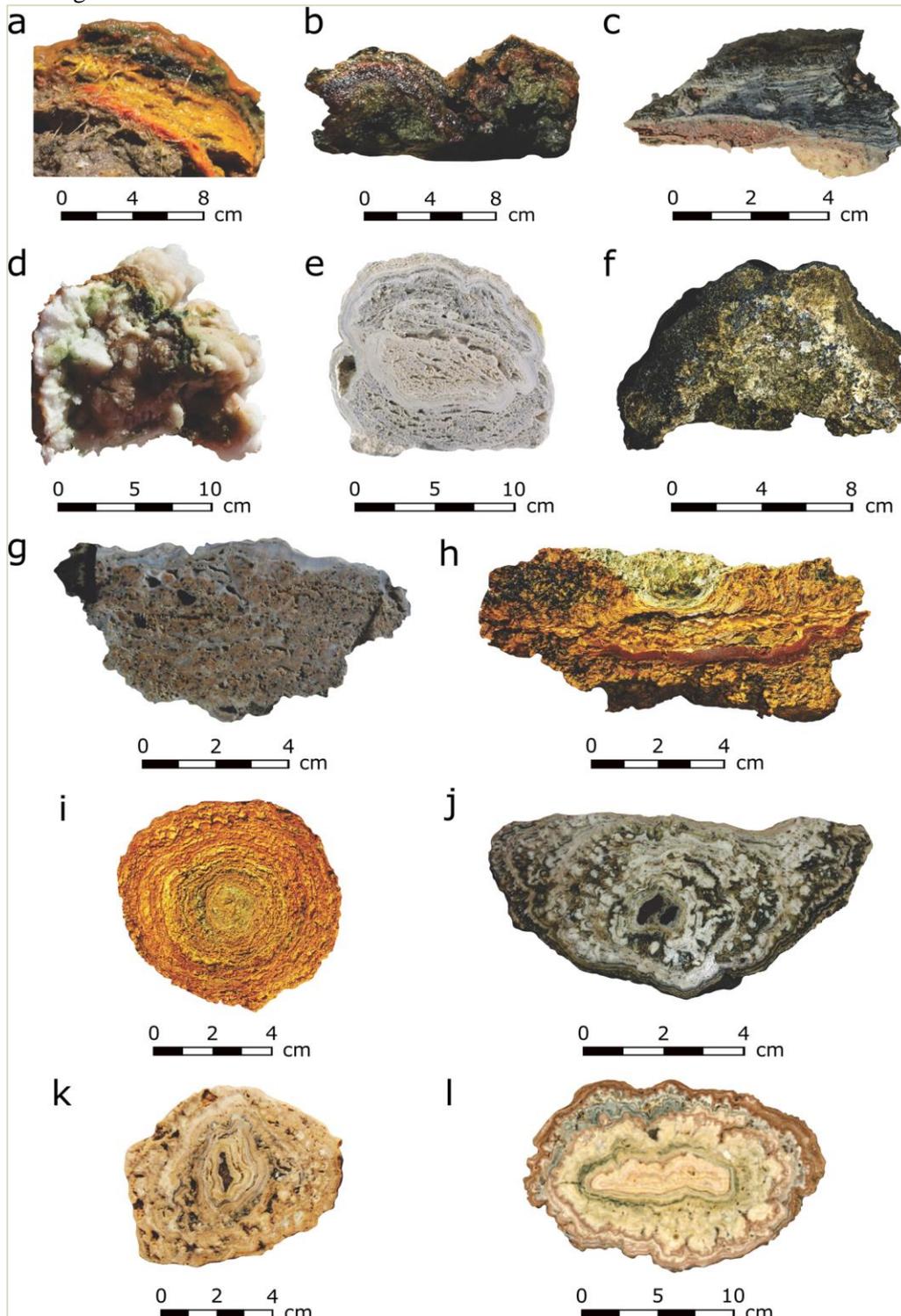
Comparado com outros sistemas salinos ao redor do mundo, os sistemas andinos centrais possuem forte radiação ultravioleta, níveis mais altos de evaporação, e maiores flutuações diárias de temperatura causadas pelas altas altitudes; além de, uma composição química distinta da água atribuível à atividade vulcânica, podendo conter altas concentrações de arsênio. Essas condições ambientais assemelham-se à Terra primitiva e potencialmente extraterrestre. Portanto, o estudo dessa região poderia fornecer informações sobre a evolução inicial da vida na Terra, bem como conhecimento para a busca de vida em Marte. (ANDESKIE et al., 2018; BENISON, 2019)

MINERALOGIA DA REGIÃO

Nas bacias endorreicas dos Andes Centrais, as salinas são depósitos evaporíticos quaternários comuns. Os evaporitos são sedimentos formados por precipitação físico-química de salmouras. Eles contêm uma grande variedade de minerais, como: halita, gipsita ($\text{Ca}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$), anidrita (CaSO_4), selenita ($\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$), glauberita ($\text{Na}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2$), e em alguns casos boratos (bórax ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4\cdot 8\text{H}_2\text{O}$), ulexita ($\text{NaCaB}_5\text{O}_6(\text{OH})_6\cdot 5\text{H}_2\text{O}$), hidroboracita ($\text{CaMgB}_6\text{O}_8(\text{OH})_6\cdot 3\text{H}_2\text{O}$), colemanita ($\text{CaB}_3\text{O}_4(\text{OH})_3\cdot \text{H}_2\text{O}$), ou inyoite ($\text{CaB}_3\text{O}_3(\text{OH})_5\cdot 4\text{H}_2\text{O}$).

Nessas salinas, os ecossistemas consistem principalmente de populações microbianas associadas com a gipsita e a halita. Essas comunidades podem se desenvolver tanto como biofilmes aderidos à superfície dos minerais, onde os microrganismos extraem água, ou como comunidades endolíticas, que vivem dentro de rochas ou outras substâncias pétreas (endoevaporitos), onde os minerais fornecem proteção contra dessecação e radiação. Alguns exemplos de estruturas mineralógicas e microbianas são exibidos na figura 4. (GAJARDO; REDÓN, 2020; VIGNALE et al., 2022)

Figura 4. Mesoestruturas diversas. **a** tapete microbiano não litificante da fonte termal de Laguna Diamante. **b** Tapete microbiano não litificado de Puquio de Campo Naranja. **c** Esteira microbiana litificante da Laguna Carachipampa. **d** Endoevaporitos da Laguna Verde (Salar de Antofalla). **e** Estromatólito trombolítico da Laguna El Peinado. **f** Estromatólito trombolítico da Laguna Pozo Bravo. **g** Microbialita da Laguna Diamante. **h** Estromatólito da Lagoa Carachipampa. **i** Oncóide da Lagoa Carachipampa. **j** Oncóide do rio Salado. **k** Oncóide de Las Quinoas. **l** Oncóide de Laguna Negra.



Fonte: VIGNALE et al., (2022)

AMBIENTES SEDIMENTARES EXTREMOS E SUAS CARACTERÍSTICAS

O estudo realizado por Benison (2019), apresenta as características de dois Salares, sendo eles o Gorbea e o Ignorado. Eles estão localizados em uma área remota das Cordilheiras dos Andes entre a região nordeste do Atacama no norte do Chile, estão situados entre 4.000 e 4.250 metros acima do nível do mar, possuem pouca umidade no ar, recebem muita radiação solar, não apresentam vegetação, sofrem com ventos fortes e abrigam salmouras ácidas.

Além de todas estas condições, os dois salares também estão situados em um complexo vulcânico composto por estratovulcões ativos. As rochas vulcânicas que compõem os salares de Gorbea e Ignorado tem composição original semelhante à de salares neutros e alcalinos dos Andes, porém, a intensa alteração hidrotermal a que são expostos causam a acidez característica desses ambientes (BENISON, 2019).

Para a melhor compreensão da dinâmica de formação desse ecossistema, podemos observar algumas características intrínsecas de ambientes extremos como suas fácies geológicas. Essas propriedades, quer paleontológicas quer litológicas, considerando qualquer aspecto composicional, químico ou mineralógico, morfológico, estrutural ou textural, nos ajuda a conhecer e identificar os processos diagenéticos do local.

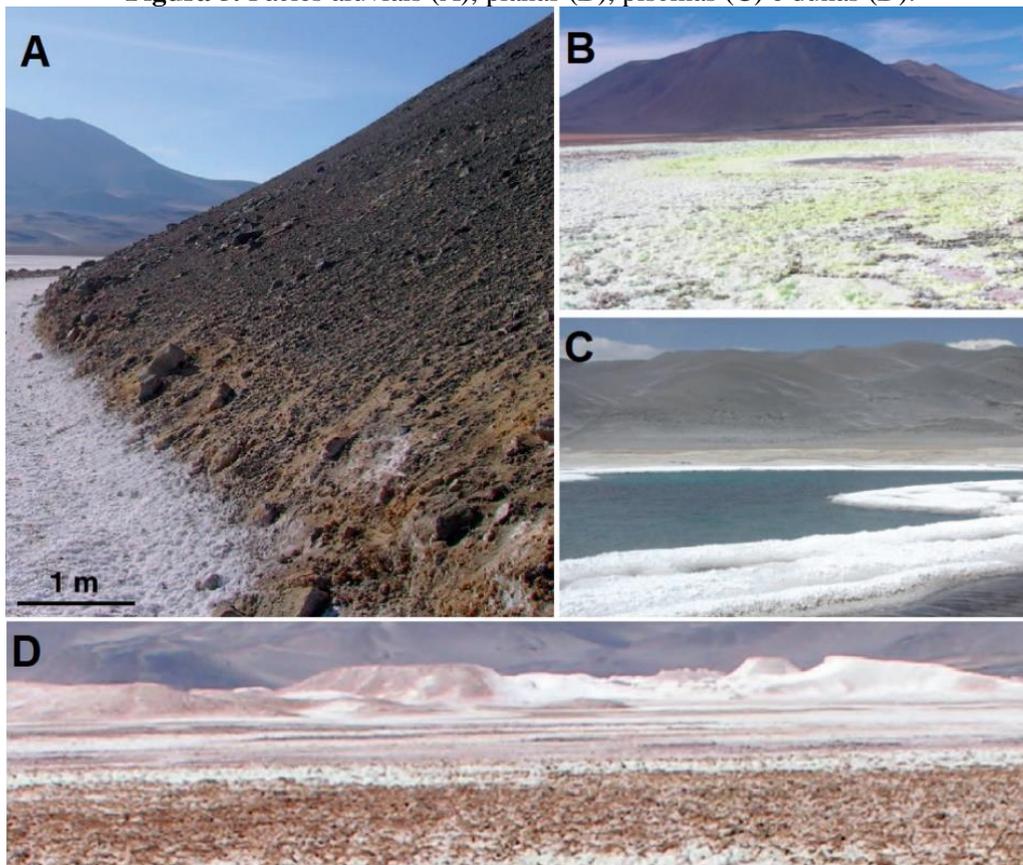
Dessa forma, podemos citar as fácies aluviais, planas, piscinas e dunas, que se formam nessa região e podem ser visualizadas na figura 5. As fácies aluviais são distribuídas por quase toda a área indo desde as encostas vulcânicas até os salares. A granulometria dos sedimentos pode variar desde areia grossa a pedregulhos, com grãos de moderadamente a mal selecionados, podendo ser subarredondados a angulares e de moderada a alta esfericidade. Os sedimentos vulcanoclásticos tem coloração vermelha, laranja, amarela e branca. São compostos principalmente por alunita ($KAl_3(SO_4)_2(OH)_6$), caulinita (Al_2O_3), sulfato de cálcio ($CaSO_4$) e hematita (Fe_2O_3), podendo sofrer alterações químicas pelas águas subterrâneas ácidas e salinas.

As fácies planas têm como característica um relevo baixo, cuja cor castanha se destaca. Esses montes, que não chegam a dois metros de altura, são arredondados, cobertos por cristais de gipsita acicular. Ao redor deles, observa-se depressões arredondadas compostas por crostas de sal, cuja aparência são de couves-flores brancas e amarelas, com odor de enxofre e de granulometria fina. As crostas de sal dos cachos de couve-flor foram identificadas principalmente como gipsita, halita, enxofre. (BENISON, 2019).

As fácies piscinas têm menos de dois metros de profundidade, algumas chegam a cerca de quarenta centímetros. As cores de suas águas são: rosa e tons de azul com salinidade e pH que varia de 1,8 a 4,6. Essas piscinas dos Salares Gorbea e Ignorado foram formadas pela ação dos ventos e pela grande evaporação das águas, que possuem uma elevada salinidade e baixo pH. Todos esses fatores contribuem para que haja uma precipitação de gipsitas laminadas e aciculares. Estes cristais, quando desgastados, são levados pelos ventos e formam outras piscinas ou se acumulam nas dunas.

As fácies de dunas não possuem estratificação interna, deste modo, são formadas por cascalho de gipsita dispostos aleatoriamente pela força do vento. O processo de litificação das dunas ocorre parcialmente, a princípio na área da base, onde, devido a processos físico-químicos, os finos cristais de gipsita atuam como um cimento. (BENISON, 2019)

Figura 5. Fácies aluviais (A), planas (B), piscinas (C) e dunas (D).



Fonte: BENISON, (2019)

ESTUDOS SOBRE O INÍCIO DA VIDA NA TERRA E NO SISTEMA SOLAR

Todas essas condições extremas que as regiões dos Salares Andinos apresentam, podem servir de base para estudos relacionados com o início da vida na Terra, onde surgiram os primeiros microrganismos. Esse ambiente pode proporcionar uma simulação da atmosfera inicial, através de processos hidrotermais e gases de enxofre, além da evolução da hidrosfera, biosfera e outros sistemas da superfície terrestre.

Além disso, esses ambientes podem ser utilizados como análogos terrestres para estudos sobre outros planetas, como Marte. Os análogos modernos mais próximos são aqueles que: têm águas extremamente ácidas e altamente salinas; possuem águas superficiais efêmeras rasas e águas subterrâneas; e apresentam fortes ventos.

Embora nenhum panorama terrestre moderno corresponda exatamente ao cenário de Marte, os sistemas de salmouras ácidas do Chile são bastante semelhantes em mineralogia, texturas e estruturas sedimentares e características diagenéticas. Dessa forma, os recursos físicos, químicos e biológicos desses Salares, e seus produtos resultantes, podem servir de comparação e nos ajudar a entender melhor os regimes que ocorrem em Marte. (BENISON, 2019; GABOYER et al., 2017)

ASTROBIOLOGIA COMO CIÊNCIA SOBRE A VIDA FORA DA TERRA

A Astrobiologia é uma ciência multidisciplinar, envolvendo diversas áreas, entre elas, a biologia, química, física, matemática, geografia, filosofia etc., isso nos mostra quão abrangente esse tema pode ser. Com o avanço da ciência e da tecnologia, foi possível detectar corpos celestes com mais clareza, identificando não só sua estrutura através de telescópios, como também a exploração dos ambientes extraterrestres com sondas espaciais capazes de analisar as características de outros planetas. (GALANTE et al., 2016)

Um dos fatores que influencia o estudo da vida em outros planetas, é a investigação do desenvolvimento da vida na própria Terra. É importante que para alcançarmos outros estágios de evolução, possamos primeiro saber profundamente como os aspectos químicos, físicos, biológicos e geológicos agiram na nossa própria atmosfera.

A teoria do Big Bang explica as origens do Universo, que teve seu início há aproximadamente 13,7 bilhões de anos e desde então vem evoluindo. A força da

gravidade impulsionou o surgimento das galáxias e estrelas, além de induzir o processo de fusão nuclear estelar, que deu origem aos elementos químicos que constituem a tabela periódica. Já, o desenvolvimento dos elementos químicos e algumas moléculas no ambiente estelar, serviu de base para as próximas etapas: a formação de proteínas, lipídios, ácidos nucleicos, entre outros, que deram origem a moléculas complexas com funções biológicas.

A capacidade das formas de vida do planeta de se reproduzirem, sustenta o processo evolutivo darwiniano. Porém, em outros sistemas planetários esse processo é desconhecido, há possibilidade de haver condições diferentes para os meios de vida ali existentes. Na Terra, uma grande evidência da história biológica do planeta, são os fósseis encontrados, que nos possibilitam entender até mesmo os primeiros seres microscópicos que já existiram.

Para buscar vida fora da Terra e além do Sistema Solar, a Astrobiologia engloba diversas técnicas, que podem ser desde sinais transmitidos por outras civilizações em rádio e pulsos laser, até ensaios e simulações de ambientes extremos para o melhor entendimento da evolução.

Com as atuais mudanças climáticas, a Ciência da Astrobiologia traz uma boa perspectiva para projeções da vida no planeta Terra, pois, é capaz de unir uma gama multidisciplinar de áreas. Dessa forma, projetar possíveis situações que poderemos sofrer no futuro. Assim, além do melhor entendimento sobre as adaptações da vida, há possibilidade da tomada de ações que minimizem ou controlem tais impactos na Terra.

No Brasil, a Astrobiologia também se mostra uma Ciência promissora, que já vem sendo estudada nesse formato, desde os anos 2000. É importante que a Ciência una forças em diversos âmbitos mundiais, para que a evolução científica atinja níveis de excelência. O Brasil se encontra nesse meio, principalmente com os esforços de pesquisadores de Universidades, como a de São Paulo. O engajamento para a Astrobiologia é muito promissor e o seu fortalecimento pode trazer ganhos imensuráveis para a sociedade. (GALANTE et al., 2016)

CONCLUSÃO

O panorama apresentado nesse trabalho, traz um conjunto de dados sobre uma região que vem sendo estudada em seus amplos aspectos. Os lagos e Salares Andinos, apresentam um elevado potencial para ser retratado e preservado, através do seu cenário terrestre extremo. Formações geológicas sedimentares, ecossistemas únicos, evaporitos, entre outros aspectos, formam um grupo de condições e características de grande interesse científico e econômico. Dessa forma, o estudo e preservação dessa região é de fundamental importância e vai de encontro com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) das Nações Unidas, em particular o número 15 Vida Terrestre.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDESKIE, A. S. et al. Acid-saline-lake systems of the triassic mercia mudstone group, county antrim, Northern Ireland. **Journal of Sedimentary Research**, v. 88, n. 3, p. 385–398, 2018.
- BENISON, K. C. The physical and chemical sedimentology of two high-altitude acid salars in Chile: Sedimentary processes in an extreme environment. **Journal of Sedimentary Research**, v. 89, n. 2, p. 147–167, 2019.
- CUBILLOS, C. F. et al. Microbial Communities From the World’s Largest Lithium Reserve, Salar de Atacama, Chile: Life at High LiCl Concentrations. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 123, n. 12, p. 3668–3681, 2018.
- GABOYER, F. et al. Mineralization and Preservation of an extremotolerant Bacterium Isolated from an Early Mars Analog Environment. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p. 1–14, 2017.
- GAJARDO, G.; REDÓN, S. Andean hypersaline lakes in the Atacama Desert, northern Chile: Between lithium exploitation and unique biodiversity conservation. **Conservation Science and Practice**, v. 1, n. 9, p. 1–8, 2019.
- GAJARDO, G.; REDÓN, S. Hypersaline Lagoons from Chile, the Southern Edge of the World. Em: **Lagoon Environments Around the World - A Scientific Perspective**. IntechOpen, 2020.
- GALANTE, D. et al. **Astrobiologia: uma ciência emergente**. Tikinet ed. São Paulo: Tikinet Edição Ltda, 2016.
- URRUTIA, J. et al. Groundwater recharge and hydrodynamics of complex volcanic aquifers with a shallow saline lake: Laguna Tuyajto, Andean Cordillera of northern Chile. **Science of the Total Environment**, v. 697, p. 134116, 2019.

VIGNALE, F. A. et al. Lithifying and Non-Lithifying Microbial Ecosystems in the Wetlands and Salt Flats of the Central Andes. **Microbial Ecology**, v. 83, n. 1, p. 1–17, 2022.

Recebido em: 10/11/2022

Aprovado em: 15/12/2022

Publicado em: 22/12/2022